

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**

**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**Katedra technologií a měření**

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Osvitová jednotka pro měření FV článků metodou LBIC**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2011/2012

**ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**  
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Marie BROŽOVÁ**  
Osobní číslo: **E10N0017P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**  
Název tématu: **Osvitová jednotka pro měření FV článků metodou LBIC**  
Zadávající katedra: **Katedra technologií a měření**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Zhodnoťte základní vlastnosti FV článků.
2. Vysvětlete jednotlivé metody měření a zkoušení FV článků.
3. Navrhněte vhodnou osvitovou jednotku pro měření FV článků metodou LBIC.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího  
Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran  
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická  
Seznam odborné literatury:

1. Poulek, Libra: Solární systémy

Vedoucí diplomové práce: Ing. Milan Bělík, Ph.D.  
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: 17. října 2011  
Termín odevzdání diplomové práce: 11. května 2012

  
Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.  
děkan



  
Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

## **Anotace**

Tato práce je zaměřena na problematiku měření solárních článků. Především zkoumá, jaký světelný zdroj je nejvhodnější pro měření solárních článků metodou LBIC v laboratorních podmínkách. Porovnává jednotlivé světelné zdroje z různých hledisek. V teoretické části se zaměřuje na vlastnosti fotovoltaického článku a přehled jednotlivých detekčních metod.

## **Klíčová slova**

Solární články, fotovoltaický článek, metoda LBIC, LED dioda, polovodičový laser, detekční metody.

## **Abstract**

This thesis is focused on measurement of solar cells. Primarily explores what light source is most appropriate for the measurement of solar cells by LBIC method under laboratory conditions. This thesis compares various light sources from different perspectives. The theoretical part focuses on the characteristics of the photovoltaic cell and an overview of the various detection methods.

## **Key words**

Sollar modul, photovoltaic cell, method LBIC, LED diode, semiconductor laser, detection methods

## **Prohlášení**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

V Plzni dne 10.5.2012.

Jméno a příjmení:

.....

## **Poděkování**

Ráda bych poděkovala vedoucímu diplomové práce, panu Ing. Milanu Bělíkovi, Ph.D., za cenné informace a pomoc při zpracování této diplomové práce.

## Obsah

Anotace .....	4
Klíčová slova .....	4
Abstract.....	5
Key words.....	5
Prohlášení .....	6
Poděkování.....	7
1 Úvod.....	10
2 Fotovoltaický článek a jeho vývoj.....	11
3 Základní vlastnosti fotovoltaických článků .....	12
3.1 Účinnost fotovoltaického článku .....	13
3.2 Výkon fotovoltaického článku.....	13
3.3 Pracovní bod .....	14
3.4 Vliv teploty na vlastnosti fotovoltaických článků.....	16
3.5 Vliv intenzity osvětlení na vlastnosti fotovoltaického článku .....	17
4 Jednotlivé metody měření .....	18
4.1 Elektroluminiscenční měření (ELCD TEST).....	18
4.2 Flash test.....	19
4.3 Termografie .....	19
4.4 Měření V-A charakteristik.....	20
4.5 Detekční metoda LBI .....	20
4.5.1 Detekční metoda LBIC .....	21
4.5.2 Technika laboratorního měření metodou LBIC .....	22
4.6 Výhody a možnosti metody LBIC .....	23
4.6.1 Zkoumané světelné zdroje pro metodu LBIC .....	24



---

5	Experimentální část - vlastní postup měření.....	25
5.1	Praktická realizace metody LBIC .....	25
5.2	Rozložení pracoviště.....	25
5.3	Řešení optické části.....	26
5.3.1	Nekoherentní zdroj světla – LED diody .....	27
5.3.2	Koherentní zdroj světla – lasery.....	27
5.4	Vlastní měření.....	30
5.4.1	Vlnové délky použitých světelných zdrojů .....	31
5.5	Příklad výpočtu odporu .....	32
5.6	Naměřené hodnoty napěťové odezvy.....	34
5.1	XY Charakteristika rozložení odezev .....	35
5.2	Grafy .....	36
6	Shrnutí.....	39
7	Přílohy .....	41
8	Citovaná literatura.....	44
9	Použité obrázky .....	45
10	Seznam obrázků .....	45

# **1 Úvod**

Diplomová práce se zabývá problematikou světelných zdrojů, které se dají využít pro měření metodou LBIC. Detekční metoda LBIC je jednou z diagnostických metod, které zkoumají povrchovou a vnitřní strukturu fotovoltaického článku.

Problematiku fotovoltaických článků jsem si zvolila záměrně. Důvodem byla má loňská návštěva Turecka v programu Erasmus. Celý semestr jsme zde zkoumali fotovoltaické články a jejich využití v Turecku. Tato témata mě zaujala natolik, že jsem se rozhodla pokračovat ve studiu využití fotovoltaiky po návratu zpět i v České republice.

Diplomová práce se první v polovině věnuje shrnutí jednotlivých detekčních metod a základním vlastnostem fotovoltaických článků. Cílem experimentální části mé práce bylo zjistit, který světelný zdroj nejvíce vyhovuje požadavkům metody LBIC, a proto jsem porovnávala množství světelných zdrojů z různých parametrů.

Různé druhy vnitřních nebo povrchových vad mohou totiž ovlivňovat schopnost využití sluneční energie. Tyto defekty jsou schopné detekovat kvalitní diagnostické nástroje. Jedním z takových nástrojů je diagnostika metodou LBIC. Tato metoda zjišťuje proudové odezvy na tenký světelný paprsek, který postupně prozkoumá celý článek. Z těchto proudových odezev se následně může vytvořit mapa. Tato mapa zobrazuje detailní rozložení defektů v křemíkovém článku.

## 2 Fotovoltaický článek a jeho vývoj

Fotovoltaický (dále jen FV) článek je polovodičová součástka, která přeměňuje světlo na elektrickou energii. Pracuje na principu FV jevu. Dopadem fotonů na polovodičový přechod dochází k uvolňování a hromadění volných elektronů. Jestliže se k přechodu připojí dvě elektrody, může začít protékat elektrický proud.

Výzkum a vývoj FV panelů se dá rozdělit do tří skupin. FV článek první, druhé a třetí generace. První generace FV článku je charakterizována výrobou na bázi křemíku. Využívají jako základ křemíkové desky – tzv. wafery. Dosahují poměrně vysoké účinnosti přeměny (v sériové výrobě 16 až 19 %, speciální monokrystalické struktury až 24 %). Ale jejich nevýhoda je v relativně drahé výrobě, a to zejména z důvodu drahého vstupního materiálu – krystalického křemíku. Panely se vyrábějí s monokrystalickou nebo polykrystalickou strukturou.

Rozdíly v účinnosti mezi monokrystalickým a polykrystalickým křemíkovým panelem jsou v současné době srovnatelné, nepatrně lepší je v našich světelných podmínkách panel monokrystalický. Technologie výroby je zde ale náročnější. FV panely první generace jsou v České republice prozatím nejrozšířenější.

Druhá generace FV článků vychází především ze snahy o snížení výrobních nákladů a úsporu křemíku. Články druhé generace jsou charakterizovány 100 krát až 1000 krát tenčí aktivní absorbující polovodičovou vrstvou -thin-film a jsou na bázi amorfního a mikrokystalického křemíku. Využívají se předem tři technologie -technologie amorfního hydrogenizovaného křemíku a-Si:H, měďindium-galium-diselenid CIGS a kadmium telurid CdTe [1].

Při výrobě dojde k poklesu výrobních nákladů, avšak dosahovaná účinnost v porovnání s první generací je nižší (v sériové výrobě max. 10%).

Výzkumem druhé generace FV článků se bude mezi dalšími zabývat nové výzkumné centrum CENTEM, které vzniká při vysokoškolském ústavu Nové technologie – výzkumné centrum Západočeské univerzity v Plzni (NTC ZČU).

Třetí generace FV článků je především ve fázi vývoje. Nosnou myšlenkou této generace FV je maximalizace počtu absorbovaných fotonů a následně generovaných párů elektron-díra,

tedy proudový zisk, ale také maximální využití energie dopadajících fotonů, napěťový zisk FV článků. Uskutečnění této myšlenky povede k překročení Shockley-Queisserova limitu účinnosti PV článků, tzn. cca 33 procentní účinnost[2].

### **3 Základní vlastnosti fotovoltaických článků**

Přeměna slunečního záření na elektrickou energii probíhá v článku, ve kterém není potřeba pohyblivých dílů. Protože obecně všechny pohyblivé kontakty čelí mechanickému opotřebenosti, dochází k rychlejšímu snížení výkonu.

FV moduly lze sestavovat do libovolných sestav různě velkých rozměrů. Při výrobě elektrické energie nevzniká žádné znečištění, hluk, zplodiny nebo zápach - při výrobě elektřiny se neprodukuje žádný CO<sub>2</sub>.

Tyto fakta řadí FV článek mezi ekologické zdroje elektrické energie. Je ale nutno zohlednit vliv výroby těchto článků na životní prostředí u těchto článků. Při výrobě se totiž spotřebuje elektrická energie, kterou bude tento FV článek sám vyrábět po dobu 3-5 let. Tato doba je uváděna jako doba energetické náročnosti vratnosti. Pro stanovení doby energetické náročnosti je nutné nejprve provést důkladnou analýzu všech energetických vstupů do celého řetězce životního cyklu FV modulu, zohlednit materiály, způsob výroby, atd.

Většina výrobců udává životnost fotovoltaického článku okolo 25 let. Energetická náročnost je na území České republiky okolo 3 až 5 let.

Na území České republiky se celková doba slunečního svitu (bez oblačnosti) pohybuje v rozmezí 1400 – 1700 h/rok. V některých oblastech na jižní Moravě se doba slunečního svitu přibližuje ke 2000 h/rok [3].

### 3.1 Účinnost fotovoltaického článku

#### Monokrystalické PV články I. generace

Teoreticky mají tyto články dosahovat účinnosti 24 %, ale v reálných podmínkách solární moduly dosahují účinnosti v rozsahu 14 až 16 %.

#### Polykrystalický křemík I. generace

Účinnost polykrystalických článků je sice nepatrně nižší, ale lépe dokáží proměňovat světlo, které přichází na článek ze strany, ale také rozptýlené difúzní světlo. Pro tyto vlastnosti jsou v dnešní době prakticky rovnocenné s články monokrystalickými. Běžně se účinnost uvádí okolo 14%.

#### Tenkvrstvé články II. generace

Účinnost těchto článků je u současně nižší než článků I. generace. Současné tenkvrstvé FV články pracují s účinností 8 až 10 %. Zkušenosti z vývoje naznačují, že tato účinnost v budoucnu poroste, a není vyloučeno, že vícevrstvé struktury dokonce účinnost křemíku předčí.

### 3.2 Výkon fotovoltaického článku

#### Instalovaný výkon

Výkon FV článků a panelů se udává v jednotkách Wp (watt peak - špičková hodnota). Výkon velmi závisí na osvětlení a na úhlu, ve kterém světlo dopadá.

Instalovaný výkon článků se udává při těchto pevně definovaných podmínkách:

- výkonová hustota slunečního záření  $1000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$
- spektrum záření AM1.5(odpovídá slunečnímu světlu po průchodu atmosférou)
- teplota solárního článku 25 stupňů Celsia.

### Okamžitý výkon

V praxi je výkon nižší než udávaný. Je to dáno tím, že článek není celou denní dobu natočen přímo na slunce a intenzita denního světla kolísá v závislosti na atmosférických podmínkách.

Tento výkon označujeme jako okamžitý výkon.

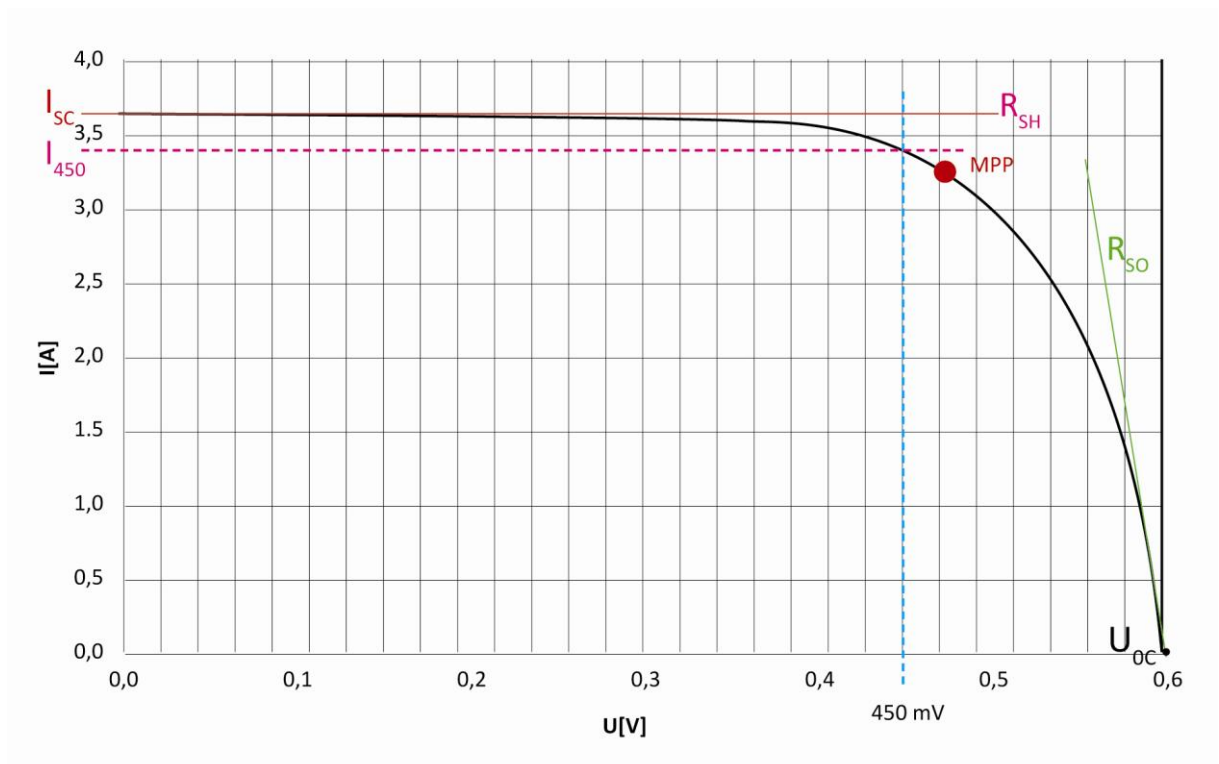
Je závislý na celé řadě faktorů:

- na intenzitě slunečního záření
- na úhlu dopadu slunečního záření
- na okolní teplotě
- na spektru záření
- na ochlazování panelů
- na stínění panelu.

### 3.3 Pracovní bod

Největší vliv na výkon FV článku má samozřejmě ozáření článku slunečním zářením. Výkon článku je ale také podstatným způsobem ovlivněn teplotou článku (s rostoucí teplotou dochází k poklesu FV napětí a tím ke snížení výkonu) a také tím, jaký proud z FV článku odebíráme.

Velikost odebíraného proudu závisí na velikosti odporu elektrického obvodu, ke kterému je FV článek připojen. Čím menší je odpor, tím větší je proud. Současně s růstem proudu však dochází k poklesu napětí na svorkách článku. Pracovní bod odečítáme z voltampérové charakteristiky, která udává závislost proudu na napětí (obr.1).



Obr. 1: Příklad voltampérové charakteristiky křemíkového FV článku

Pokud připojíme ke článku zátěž  $R_z$ , obvodem prochází proud. Největší možnou hodnotou proudu je zkratový proud  $I_{sc}$ , který prochází tehdy, je-li zátěž  $R_z = 0 \Omega$ . Pokud je FV článek zapojen naprázdno, zátěž  $R_z$  není připojena a na svorkách je napětí  $U_{oc}$ . Výkon FV článku je dán součinem napětí a proudu. Výkon dodávaný článkem je závislý na intenzitě ozáření, na spektru světla a na teplotě. S rostoucí teplotou dochází k poklesu napětí  $U_{oc}$ . Velikost tohoto poklesu je závislá na použitém materiálu článku. Největší výkon článek poskytuje v pracovním bodě zvaném MPP (Maximal Power Production).

### Proud nakrátko -fotoelektrický proud

Proud nakrátko  $I_{sc}$  (**Short Circuit**), nebo také fotoelektrický proud -  $I_L$  je charakteristickou hodnotou, která bývá zpravidla vždy uváděna, nebo ji můžeme pohodlně odečíst

z voltampérové charakteristiky. Proud nakrátko je ve své fyzikální podstatě maximální proud, který může fotovoltaický článek při daném slunečním osvětlení dodávat.

Velikost tohoto proudu je závislá na:

- intenzitě osvětlení
- spektrální citlivosti fotovoltaického článku;
- ploše fotovoltaického článku
- teplotě.

Velikost proudu nakrátko se pohybuje řádově v desítkách mA až jednotek A. Největší běžně dostupné fotovoltaické články mají při plném ozáření proud nakrátko nad hranicí 6A. Proud nakrátko lze měřit pouze speciálním přístrojem. Běžné ampérmetry mívají vnitřní odpor přibližně 100 mΩ. Při měření proudu nakrátko takovýmto ampérmetrem vzniká na elektrodách fotovoltaického článku napětí kolem 300 mV.

### **Napětí naprázdno**

Napětí naprázdno  $U_{oc}$  (**Open Circuit**) je další charakteristickou hodnotou voltampérové charakteristiky jako je proud nakrátko.

Toto napětí je ve své fyzikální podstatě napětím, které je na svorkách fotovoltaického článku bez připojené zátěže. Toto napětí je maximálním napětím fotočlánku při dané teplotě a intenzitě osvětlení. U monokrystalických článků se toto napětí pohybuje kolem hranice 0,6 V.

## **3.4 Vliv teploty na vlastnosti fotovoltaických článků**

Na polohu pracovního bodu má výrazný vliv teplota. Při déle trvající sluneční intenzitě nebo zhoršených podmínkách chlazení článku (bezvětrí), kdy teplota vzduchu dosahuje až 40 °C, dochází ke zvýšení povrchové teploty fotovoltaického článku až na 80 °C. Při takto vysokých teplotách dochází ke změně elektrických vlastností článku, která vede ke snížení svorkového napětí fotovoltaického článku na zatěžovací charakteristice. Pokles svorkového napětí



způsobí snížení dodávaného výkonu do zátěže. Jelikož k tomuto jevu dochází právě při největší sluneční intenzitě, můžeme ztratit popř. až 75 % z dosažitelné denní výroby fotovoltaického článku. Z uvedeného je zřejmé, že výkon fotovoltaického článku v zimním období je výrazně vyšší než v letním období.

### 3.5 Vliv intenzity osvětlení na vlastnosti fotovoltaického článku

Největší vliv na výkon fotovoltaického článku má intenzita dopadajícího záření. Tato skutečnost je dána fyzikální podstatou přeměny dopadajícího záření na elektrickou energii – světlem se uvolňují elektrony pro vedení elektrického proudu.

Světlo Slunce při průchodu atmosférou je rozptýleno, a tím ve výsledku změkčeno. Jednotlivé vlnové délky světla jsou atmosférou za různých podmínek rozptylovány různě, a tak se barva oblohy může výrazně měnit.

Celkové sluneční záření se skládá z přímého a difuzního záření. S rostoucím zakalením atmosféry celková intenzita záření klesá. Závisí:

- na kalendářní době
- na sklonu FV panelu  $\alpha$
- na faktoru znečištění
- na zeměpisné šířce
- na orientaci světových stran

Je zřejmé, že se optimální úhel  $\alpha$  mění. V létě to je 30°, naopak v zimě, kdy je Slunce nízko, je optimální úhel 60° až 90°.

Doba slunečního svitu se také mění. Při úplně jasné obloze působí na osluněnou plochu intenzita slunečního záření složená z intenzity přímého a difuzního záření. Naopak při zatažené obloze dopadá na FV panely pouze difuzní světlo.

## 4 Jednotlivé metody měření

Solární článek je prvek s alespoň jedním PN přechodem. Když je tento článek vystaven záření, jsou vybuzeny elektricky nabitě částice. Tento náboj poté prochází přechodem, kde vzniká napěťový rozdíl mezi předním a zadním kontaktem článku.

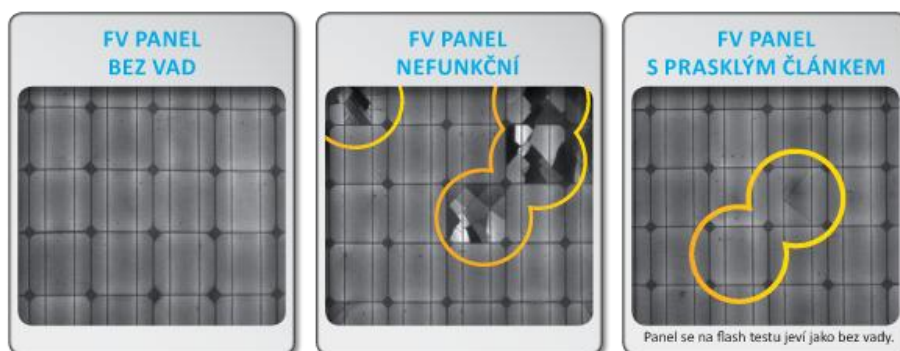
U FV modulů závisí celková efektivita na lokálních vlastnostech článků, a tedy existence místních defektů je velmi nežádoucí. Proto existují různé experimentální techniky, které jsou schopné mapovat prostorové rozdělení takových defektů. Tato měření lokálních parametrů, mohou poskytovat cenné informace, a tak napomáhat k zlepšení technologie výroby.

### 4.1 Elektroluminiscenční měření (ELCD TEST)

Tento test umožňuje detekci respektive zviditelnění materiálových a výrobních vad solárního článku. S jeho pomocí lze vyhodnotit jak kvalitu výrobního procesu článků, tak i případné defekty vzniklé při pozdější manipulaci s FV moduly. Dokáže odhalit skryté vady, nezjistitelné jinými metodami (flash test, měření V-A charakteristik, termografie).

Především mikropraskliny mají zásadní vliv na dlouhodobou stabilitu výkonových parametrů FV panelů.

Základem tohoto testování je nahlédnutí do vnitřní struktury panelů, která zůstává pohledu oka skrytá. Pro názornost uvádíme příklady FV článků, které se jeví jako bezvadné (obr.2).



Obr. 2: Ukázka zobrazení panelu na ELCD testu [1]

## 4.2 Flash test

Flash test patří mezi základní měření výkonových charakteristik FV panelů. Každý panel by měl za svůj život absolvovat minimálně jedno měření a to ve výrobě, prakticky je tomu ovšem jinak. Výstupem měření jsou tzv. flashdata, která jsou určena minimálně výstupním špičkovým výkonem, napětím naprázdno, proudem nakrátko, pracovním napětím, proudem, výkonem a popřípadě účinností [4].

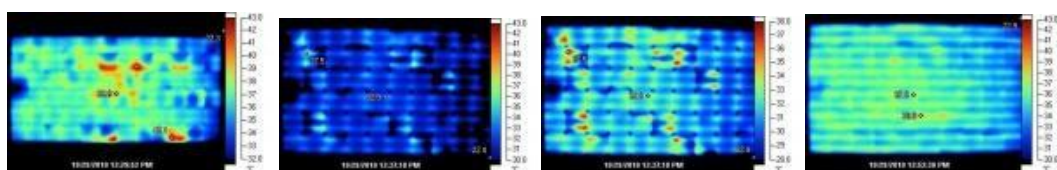
## 4.3 Termografie

Teplota jakéhokoli povrchu může být zachycena pomocí termografické kamery. Termokamera umožňuje měřit teplotu povrchu FV panelů při jejich zatížení a odhalují v mnoha případech přítomnost nějakého problému (obr. 3).

Pomocí termokamery lze odhalit například defekty elektrických komponent, jako jsou bypass diody a spojovací skříňky, stejně jako mechanické vady jako jsou delaminace nebo buněčné poškození. Termografie také pomáhá lokalizovat problémy s pájecími body, což může nakonec způsobit problémy v dlouhodobém horizontu.

Výstupem termografické kamery jsou snímky, které určují spektrum teplot na povrchu měřeného objektu. V podstatě, kamera převádí neviditelné infračervené záření do viditelného spektra vlnových délek. Každá barva definuje určitou teplotu.

Termografie poskytuje rychlé a jednoduché informace o solárním modulu a určuje kvalitu a odhaluje výskyt možných budoucích rizik. Vzhledem k tomu, že termografické obrazy jsou obecně přijímané výrobci a velkoobchodníky jako důkaz vady, může tato služba pomoci vyřešit zajištění pohledávky velmi rychle [5].



Obr. 3: Ukázka termografických snímků [2]

## 4.4 Měření V-A charakteristik

Měření voltampérových charakteristik se provádí simulátorem FV článků. Simulátor umožňuje testování FV článku i mimo sluneční záření. Jako zdroj osvětlení je použita xenonová výbojka, podobná jako ve fotografickém blesku, jen výkonnější. Její spektrum je nejvíce podobné slunečnímu spektru. Celé osvitové zařízení je umístěno na svislých lyžinách. Posunem výbojky nahoru a dolů se nastavuje intenzita osvětlení.

Hlavní výhody simulátoru osvětlení jsou opakovatelnost měření, snadné nastavení požadované intenzity záření a nezávislost na slunečním svitu. Nevýhodou pak je odlišnost vyzařovaného spektra výbojky od spektra slunečního. Měřicí systém se připojuje k počítači, kterým se nastavují parametry měření a sbírají data. Na jedno osvětlení odměří systém celou voltampérovou charakteristiku FV článku.

Při analýze je prováděno:

- měření max. výkonu
- napětí naprázdno
- napětí pro max. výkon
- měření zkratového proudu
- proudu pro max. výkon
- výpočet účinnosti

## 4.5 Detekční metoda LBI

Detekční metoda LBI je experimentální technika, která je schopná mapovat prostorové rozdělení vad. Může poskytovat cenné informace, a tak napomáhat ke zlepšení technologie výroby. Technika LBI (Light Beam Induced) je metoda, kdy světelný paprsek skenuje povrch solárních článků a pomocí měřicího zesilovače signálu jsou data postupně snímána do počítače a je vytvářena mapa odezvy měřeného článku na světelný paprsek. Podle hlavní měřicí veličiny pak rozlišujeme mezi měřením LBIC (current), LBIV (voltage), případně LBIP

(power). Metoda LBIC je takové měření, kdy pomocí převodníku proud–napětí měříme proudovou odezvu, metodou LBIV (Light Beam Induced Voltage) snímáme napětovou odezvu a u LBIP (Light Beam Induced Power) se snažíme nastavit pracovní bod měřených veličin do bodu maximálního výkonu.

Pro měření LBIV je důležité, aby byl vnitřní odpor měřicího zesilovače co největší. Tuto podmínku splňuje většina měřicích zařízení pro měření napětí, proto realizace metody LBIV není tak technicky náročná jako nastavení pracovního bodu metody LBIC.

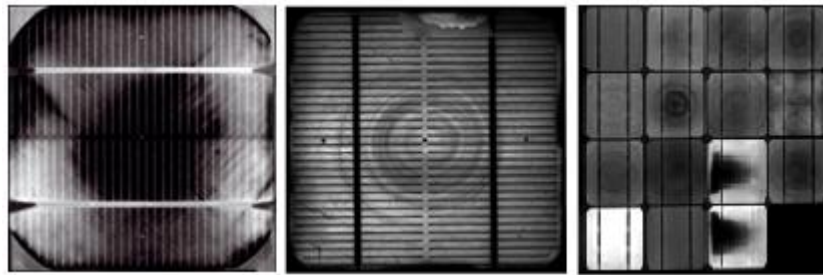
#### **4.5.1 Detekční metoda LBIC**

Detekční metoda LBIC je používána jako univerzální metoda detekce lokálních defektů nejen ve struktuře solárních článků. Její pomocí se skenuje prostorového rozdělení proudové odezvy solárního článku a je možné určit defekty na tomto článku (obr. 4).

Během měření LBIC je světelný paprsek zaostřen na vzorek a díky lokální proudové odezvě z článku získáme XY charakteristiku rozložení proudu. Získaná data se uspořádají do proudové mapy a v podstatě modelují chování celého článku po jeho jednotlivých částech. Z takto vzniklých proudových map potom můžeme určit většinu lokálních defektů v solárním článku. Přesnost proudových map závisí především na druhu použitého světelného zdroje (fokusace, vlnová délka – hloubka vniku) a na kroku posunu (míra přesnosti) s jakým se daný vzorek analyzuje.

Výstupem měření je matice číselných hodnot, kterou lze převést na mapu bodů s různým stupněm sytosti šedé barvy. Získaná data pak slouží k sestrojení mapy solárního článku, ze které lze vyčíst většinu typů defektů. Tato mapa signalizuje velikost proudové odezvy a dále ji lze analyzovat běžnými grafickými metodami. V případě potřeby ji lze také matematicky zpracovávat v původní podobě matice hodnot a použít analytické nástroje maticového počtu. Obě tyto metody mohou vést k podobným závěrům a sloužit k podrobné analýze vlastností FV článků a úspěšnosti jednotlivých technologických kroků při jejich výrobě.

Zajímavých výsledků lze dosáhnout porovnáním měření LBIC a LBIV při použití různých typů světelných zdrojů a vlnových délek světelného záření.



Obr. 4: Mapa proudové odezvy vzorků metodou LBIC [3]

#### 4.5.2 Technika laboratorního měření metodou LBIC

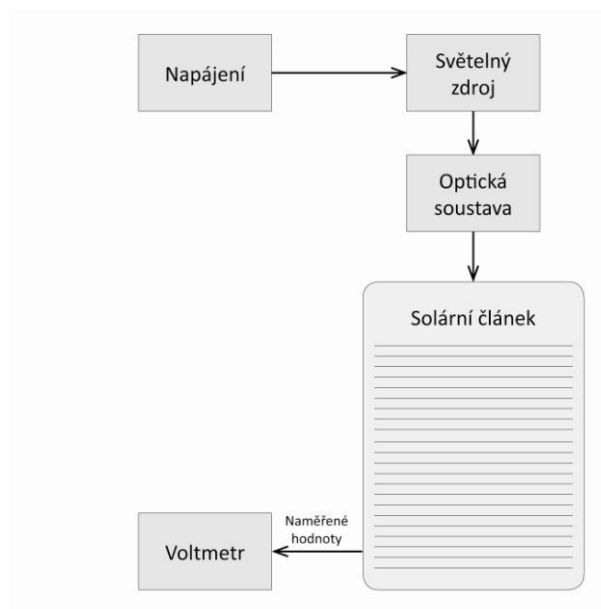
Při laboratorním měření metodou LBIC (Light Beam Induced Current) je nutné sestavit zařízení, které umožňuje skenovat solární článek. Je nutné přesně posunovat světelným zdrojem po celé ploše článku. Jako nejjednodušší variantu lze v laboratorním prostředí využít plotr, kde se světelný zdroj připevní na pero plotru. Spolu s ním se pak možné světelný zdroj nasměrovat na kteroukoli pozici nad solární článek. Světelný zdroj se pohybuje těsně nad povrchem solárního článku tak, aby paprsek z diody byl zaostřen na vzorek. Tímto osvitem dochází k lokální proudové odezvě z článku. Získá se XY charakteristika rozložení proudu (včetně jeho lokálních odchylek)

Důležitá je také jednoduchost výměny světelného zdroje, protože různé vlnové délky penetrují v odlišných hloubkách struktury solárního článku a zobrazují tak hloubkové či povrchové defekty.

K zařízení na provádění skenování solárního článku je připojen osobní počítač přes paralelní port, který slouží k zadávání souřadnic posunu diody a k měření lokálních odchylek solárního článku. Tyto hodnoty jsou pak dále zpracovávány.

## 4.6 Výhody a možnosti metody LBIC

Metodou LBIC lze určit plošné rozložení proudu na solárním krystalickém článku. Různé spektrum světelných zdrojů zapříčiňují jinou hloubku vniku světelného záření, které ovlivňují velikost fotoproudu. Maximální dosažitelná účinnost solárního článku je daná typem článku a jeho technologií výroby. V každém článku však účinnost ještě snižují nečistoty a strukturální poruchy v polovodiči. Při použití metody LBIC se povrch solárního článku zkoumá zaostřeným světelným svazkem. Pokud je osvětleno místo s poruchou, výstupní proud článku značně klesne. Tímto způsobem lze přesně lokalizovat místo defektu a to především zkratky a některé strukturální poruchy. Metoda LBIC je nedestruktivní.



Obr. 5: Blokové schéma zapojení pracoviště

#### **4.6.1 Zkoumané světelné zdroje pro metodu LBIC**

##### **LED**

- + různé vlnové délky - detailnější prozkoumání solárního článku
- + dlouhá životnost a nízké náklady
- potřeba speciálního optického zařízení k usměrnění

##### **Xenonová výbojka**

- + výkonná
- + spektrum podobné slunečnímu záření
- vysoké napájecí napětí

##### **Halogenová žárovka**

- + velmi výkonná
- + relativně malá velikost žárovky
- vysoká teplota vlákna

##### **Polovodičový laser**

- + v jednom pouzdře jak zdroj záření, tak i optickou soustavu na zaostření paprsku
- + větší výkon a jemnějšího zaostření
- dražší



## 5 Experimentální část - vlastní postup měření

### 5.1 Praktická realizace metody LBIC

Vzhledem k nedostupnosti přesného ampérmetru, který by snímal i malé proudové odezvy, byla zvolena nepřímá metodika měření. Na FV článku byla snímána napěťová odezva a změřen odpor fotočlánku. Z těchto údajů byla pak dopočítána hodnota proudu v mikroampérech. Průběh obou veličin – napětí i proudu - je na sobě závislý a vychází z Ohmova zákona.

### 5.2 Rozložení pracoviště

Pro zjištění nejlepšího světelného zdroje bylo zapotřebí sestavit vyhovující přípravek. Předmětem této práce není sestavit celou pohybuující se hlavu, ale pouze zjistit vhodný světelný zdroj. Je tedy možné využít pouze statického měření v jedné místě fotovoltaického panelu. V zásadě je nutné mít přípravek sestavený z následujících částí: blok sloužící k uchycení světelného zdroje, optické zařízení sloužící k zaostření světelného paprsku, měřicí přístroj a vhodný napěťový zdroj pro napájení světelného paprsku. Schematické rozložení pracoviště je vidět na (obr. 5).

Na FV článek byly napájeny kontakty, které slouží k připojení měřicího přístroje. Vzorový článek je uchycen na destičku, která zamezuje jeho pohybu. K takto připravenému vzorku FV článku je možné přiblížit zaostřenou optiku těsně nad jeho povrch.

Blok sloužící k uchycení světelného zdroje se mění dle světelných zdrojů. Pro měření s LED diodami byl využit hliníkový tubus, který byl upevněn nad optiku. Tento tubus usměrňuje světelný paprsek LED diody. Při měření laseru nebylo nutné žádné mechanické usměrnění paprsku, byla využita pouze optická soustava, která je jeho součástí.

Díky takto navrženému systému je možné měnit různobarevné LED diody přímo v ústí tubusu. Případně lze rovněž vyměnit celý tubus za laser. Jako napájecí zdroj pro LED diody a laser slouží externí zdroj napětí.

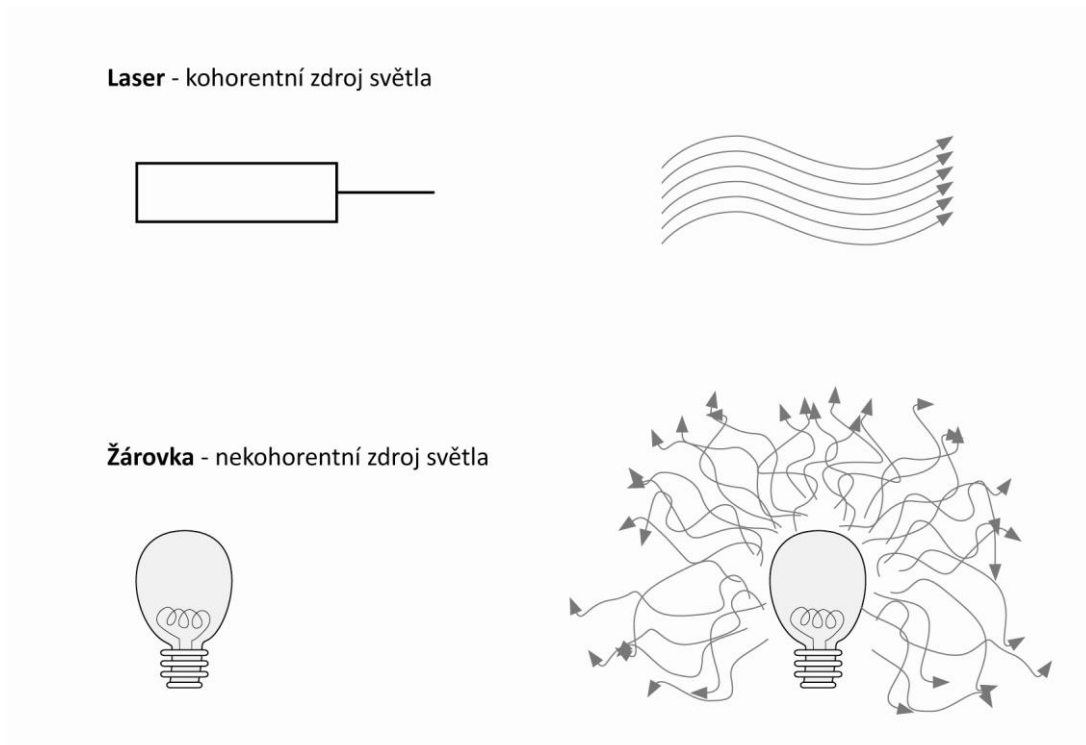
Celý přípravek musí být plně odstíněn od okolního denního světla, které je nežádoucí a při měření by mělo negativní vliv na přesnost. Odstínění bylo provedeno vložením celého pracoviště do uzavíratelného boxu. Pro konečná přesná měření bylo využito temné komory, aby efekt dopadajícího okolního světla byl minimální.

### 5.3 Řešení optické části

Podle vlastností emitovaného záření se dělí světelné zdroje na koherentní (lasery) a nekoherentní (spontánní záření s chaoticky měnící se fází).

K osvětlení VF článků je možno využít buď klasické nekoherentní záření, jehož zdrojem jsou například LED diody nebo xenonová výbojka.

Příkladem koherentního záření jsou lasery. Z důvodu malých rozměrů a nižší ceny jsou nejvýhodnější polovodičové lasery. V tomto případě bylo pro test využito laseru z laserového ukazovátka a laseru z cd mechaniky (obr. 6).



Obr. 6: Ukázka směru paprsků u koherentního a nekoherentního zdroje světla

### 5.3.1 Nekoherentní zdroj světla – LED diody

Výhodou použití LED diod je především jejich cena a také jejich rozličné barevné spektrum. Nevýhodou pak potřeba speciálního optického zařízení k usměrnění paprsku. Tento problém byl však vyřešen použitím tubusu z hliníkové zužující se trubičky, která byla doplněna o optickou část. Ta zajišťuje zpřesnění paprsku vycházející z hliníkového tubusu. V horní části přípravku je připevněn tubus. Slouží ke vložení a uchycení LED diody. V dolní části navazuje na tubus optika k zaostření paprsku. Vnitřní stěna tubusu je nastříkána černou barvou pohlcující odrazy světelného paprsku. Díky nastavitelnému dolnímu konci, který obsahuje skleněnou čočku lupy je možné paprsek doostřit, případně k nejjemnějšímu doostření optickou soustavou z cd mechaniky.

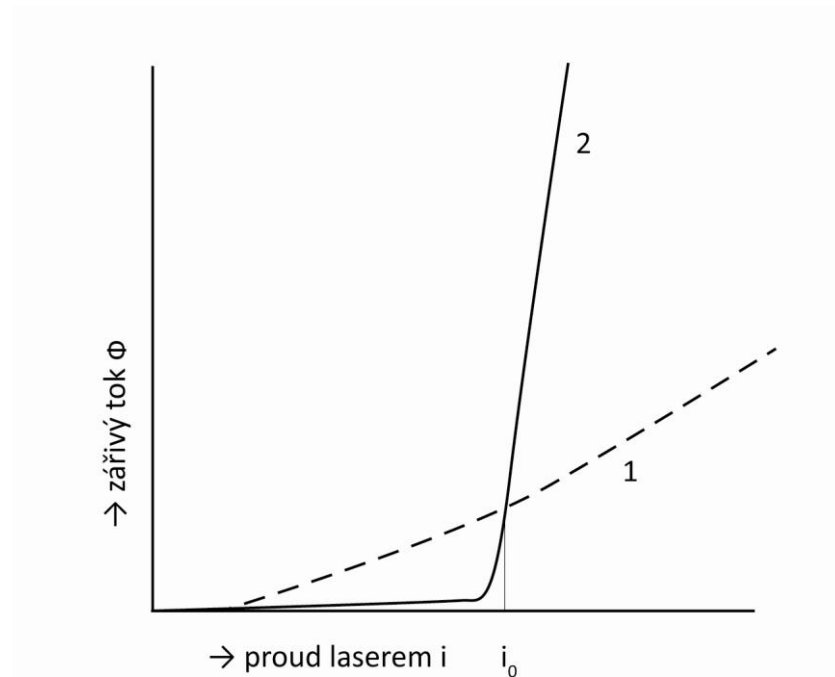
Vzhledem k jednoduchému uchycení LED diod v horní části tubusu je možné diodu snadno vyměnit. To je výhodné zejména pro měření světelného paprsku různých barev, tedy různých světelných délek LED diod.

Můžeme použít červenou, zelenou, žlutou bílou nebo modrou LED diodu. Díky využití odlišných vlnových délek těchto barevných paprsků je pak dosaženo detailnějšího prozkoumání solárního článku.

### 5.3.2 Koherentní zdroj světla – lasery

Polovodičový injekční laser (laserová dioda) je uváděn do chodu elektrickým proudem procházejícím P–N přechodem v propustném směru. Při průchodu proudu polovodičovým laserem vzniká při nízkých hodnotách proudu v oblasti přechodu pouze spontánní emise a laser pracuje prozatím jen jako obyčejná LED dioda. Emisní spektrum vysílaného záření je poměrně široké. Při zvyšování hodnoty proudu se zvyšuje koeficient zisku a překročí-li proud určitou kritickou hodnotu, převýší zisk ztráty a nastupuje zesílení záření a laserová dioda přechází do kontinuálního režimu a pracuje jako laser. Po jeho překročení se spektrum emitovaného záření silně zúží, neboť daleko nejvíce jsou zesilovány vlnové délky v úzké oblasti spektra v okolí vlnové délky odpovídající maximu intenzity spontánní emise. Překročení prahového proudu se také projeví typickým způsobem v grafu závislosti

vysílaného zářivého toku na proud tekoucím laserovou diodou - tzn. světelné charakteristice (obr. 7).

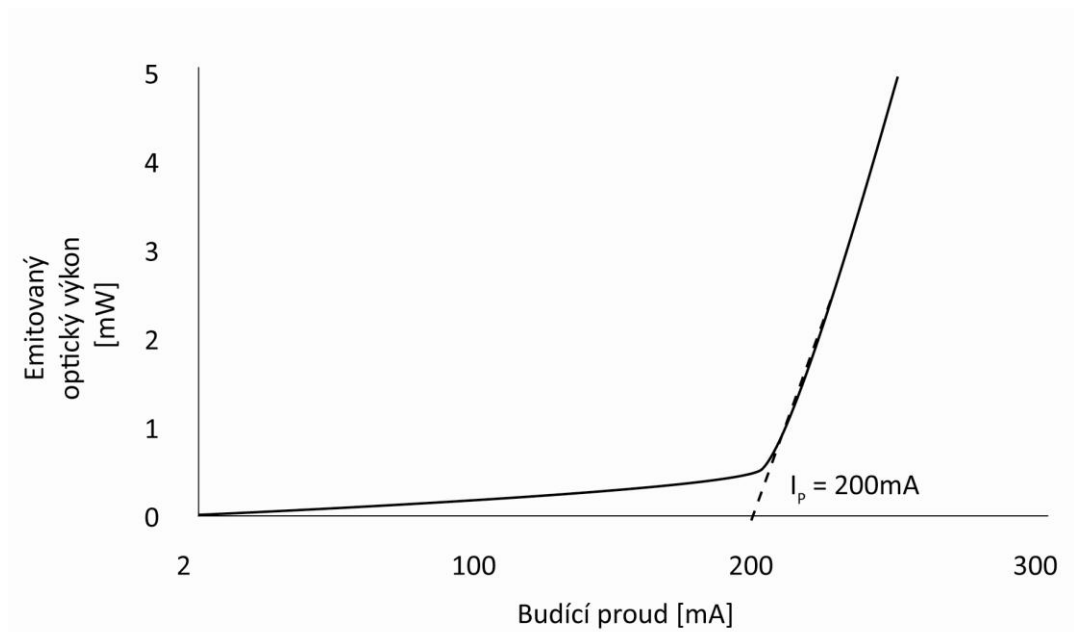


Obr. 7: Světelná charakteristika laserové diody

Laserové záření se vyznačuje vysokou směrovostí svazku, monochromaticností, koherencí a vysokou zářivostí.

Polovodičový laser obsahuje v jednom pouzdře jak samotný zdroj záření, tak i optickou soustavu na zaostření paprsku. Při experimentálním měření byly využity dvě varianty laseru. Laserová dioda GaAlAs, která byla vyjmuta z cd mechaniky, a dále laserová dioda GaAs, které využívá laserové ukazovátko. Polovodičový laser je oproti LED diodám dražší, ale díky většímu výkonu a jemnějšího zaostření laserového paprsku je potom výsledný obraz sestavený z naměřených dat mnohem více kontrastní.

Úzká oblast energie čerpání, při níž dochází k náhlému přechodu z režimu spontánní emise do režimu stimulované emise, se nazývá práh. Prahovým proudem  $I_p$  laserová dioda přechází z režimu nekoherentního zdroje do režimu laseru (obr. 8). V experimentu byl využit čtecí laser, který není silnější než 5mW.



Obr. 8: Závislost emitovaného optického výkonu na budícím proudu

Pro malé proudy má záření spontánní charakter a je lineární funkcí budícího proudu. Po dosažení prahového proudu, tj. po dosažení prahu laserového generování, prudce narůstá výkon stimulovaného záření a ze zrcadel rezonátoru je emitováno koherentní záření opět lineárně závislé na velikosti budícího proudu. Zároveň také dochází ke kvalitativní změně tvaru vyzařovací charakteristiky laserové diody vyjádřené zmenšováním úhlu vyzařování v rovině kolmé a rovnoběžné s rovinou přechodu PN, rovněž ke zmenšení šířky pásma emitovaného záření [6].

V původní konstrukci cd mechaniky je paprsek zaostřen pouze ohniskovou vzdáleností několik mm. Jsou zde 2 čočky: první přemění světelný kužel laserové diody na široký rovnoběžný paprsek, druhá ho soustředí do bodu.

Diodu z jednotky vyjmout a umístit do optiky z jiného zařízení nebo laserovou diodu ponechat v původní jednotce a odstranit jednu z čoček. Druhá čočka se posune o malý kousek směrem od diody, aby se paprsek soustředil do ohniska v požadované vzdálenosti.

Laserová dioda je umístěna přesně na ose s čočkou, aby bylo možné paprsek zaostřit. Dioda byla umístěna na kovovém krytu, který byl vyjmut rovněž z cd mechaniky - slouží jako chladič.

## 5.4 Vlastní měření

Při vlastním měření byly zjišťovány dvě hodnoty. Při prvním pokusu byl použit pouze světelný zdroj s mechanicky vytvořenou štěrbinou o průměru 1mm. Při druhém pokusu byl světelný paprsek dále zaostřen systémem optických čoček, které paprsek usměrnily. Výsledkem byl paprsek o průměru přibližně 0,5 mm. K napájení všech zdrojů světla byl využit měkký zdroj napětí – baterie o různé velikosti napětí.

Při přípravách na měření bylo porovnáno množství různých světelných zdrojů. Důraz byl kladen na hlavně malou velikost světelného zdroje. Zářivky ani žárovky tento parametr nesplňují. Jejich velikost není vhodná k umístění na pohyblivou hlavu snímače. Xenonová výbojka se z počátku zdála jako vhodná, splňovala parametry velikosti zdroje. Provozní teplota výbojky je také nižší zhruba o 50°C-150°C než porovnávaná halogenová žárovka. Nevyhovující se stala pro svou napěťovou náročnost a nutností zapalovacího obvodu. Výbojka potřebuje k rozběhu až 400 V. Tento světelný zdroj se tedy nehodí pro tento experiment.

Dalšími významnými parametry byla ekonomická dosažitelnost a svítivost. Jeden z nejdůležitějších parametrů se ukázal tepelný výkon světelného zdroje, který práci při měření značně omezoval a způsoboval nestabilitu obvodu.

Proto měření halogenové žárovky neproběhlo dle teoretických předpokladů. Halogenová žárovka má velmi vysokou svítivost. Má správné spektrální složení světla = blíže dennímu slunečnímu záření, proto by byla vhodný zdroj pro měření defektů FV panelů. Nevýhodou je ale její vyzařované teplo. Při zapnutí obvodu s halogenovou žárovkou začalo docházet k jejímu přehřívání, protože byla vložena do přípravku, který měl usměrňovat a nasměrovat její světelný tok. V malém prostoru tubusu došlo k přehřátí prakticky okamžitě. Problémem bylo i chlazení žárovky. Bylo provedeno připojením ventilátoru vyjmutého ze stolního počítače. Ani tímto pomocným chlazením se teplota halogenové výbojky nesnížila a v experimentu nebylo možno pokračovat. Tento světelný zdroj není vhodný pro měření defektů pomocí metody LBIC. Je velmi náročný na chlazení a tím pádem i na prostor, kterého na pohyblivé hlavě není možno dosáhnout.

Jako vhodné světelné zdroje pro měření byly vybrány LED diody a polovodičové lasery pro jejich malé rozměry a nízkou ekonomická náročnost. V neposlední řadě mají LED diody výhody v různobarevném provedení, které zajistí při experimentu použití různých světelných délek a tím i lepší a detailnější prozkoumání panelu. Tepelný výkon jednotlivých zdrojů nepřevyšuje dovolenou mez a světelný obvod je stabilní i po vložení do hliníkového tubusu, který usměrňuje světelný paprsek. V tabulce (tab. 1) jsou uvedeny naměřené hodnoty. K jednotlivým světelným zdrojům bylo nutné přidat omezovače proudu, aby se nepřesáhlo jejich dovolené proudové zatížení a tím pádem nedošlo ke zničení diody. V případě laseru bylo nutno dbát na prahový proud, při kterém laserová dioda přechází z režimu nekoherentního zdroje do režimu laseru.

#### 5.4.1 Vlnové délky použitých světelných zdrojů

Tab. 1: Vlnová délka vybraných světelných zdrojů

Zdroj světla		Vlnová délka [nm]	Napájecí napětí [V]	Svítivost [ mCd ] (Při 20 mA)
LED diody	zelená	500 – 570	1.9 - 4.0	3000
	žlutá	570 – 590	2.10 - 2.18	3000
	modrá	450 – 500	2.48 - 3.7	3000
	červená	610 – 760	1.63 - 2.03	3000
	bílá	Celé spektrum	3.5	3000
Polovodičový laser	GaAlAs	650 – 840	12	
	GaAs	670 – 680	4,5	
Halogenová žárovka		480 – 570	220	

## 5.5 Příklad výpočtu odporu

### LED diody

Pro LED diody je ideální proudové zatížení kolem 20 mA. Tuto hodnotu je třeba důsledně dodržovat při použití neregulovatelného zdroje napětí a vhodně navrhnout předřadný odpor nebo napětí stabilizovat. LED dioda byla použita v propustném směru.

Tab. 2: Prahové napětí a zvolený odpor LED diod

LED diody	Prahové napětí na LED [V]	Zvolený odpor pro 20 mA [ $\Omega$ ]
zelená	2,6	330
žlutá	2,4	330
modrá	3,5	300
červená	1,9	360
bílá	3,5	300

U standardních LED diod je mezní proud většinou roven 20 mA.

Zdrojem napětí byla pro měření LED diod 9 V baterie. Odporů jsou vybrány z řady E 14.

$$R = \frac{U_{\text{ZDROJE}} - U_{\text{LED}}}{I_{\text{LED}}}$$

Vypočtený odpor, který je vhodný použít pro měření zelené LED diody

$$R = \frac{9 - 2,6}{0,02} = 320\Omega \rightarrow \text{zvolíme odpor nejbližší vyšší a to } 330\Omega.$$



## 5.6 Naměřené hodnoty napěťové odezvy

Tab. 3: Naměřené hodnoty napěťové odezvy světelných zdrojů

Zdroj světla		U [mV] (Ø 1 mm)	U [mV] (s přidanou optikou) (Ø 0,5 mm)
LED diody	zelená	2,4	2,3
	žlutá	5,5	4,9
	bílá	8,2	7,1
	modrá	11,4	7,4
	červená	80,5	75,7
Polovodičový laser	GaAs	95,3	89,5
	GaAlAs	130,4	126,4

Graf 1: Zobrazení proudových odezvy při porovnání průměru štěrbin (světlejší odstín - Ø1mm, tmavší odstín - Ø0,5mm)



**Polovodičový laser**

Jmenovitý proud polovodičového laseru GaAlAs je přibližně 100 - 150 mA. Úbytek napětí na diodě je 2,1V.

$$R = \frac{U_{\text{ZDROJE}} - U_{\text{LASERU}}}{I_{\text{LASERU}}}$$

$$R = \frac{9 - 2,1}{0,015} = 460\Omega \rightarrow \text{zvolíme odpor nejbližší vyšší a to } 470\Omega.$$

Při měření laserové diody v laserovém ukazovátku bylo vycházeno z již zapojené funkční sestavy. Ta obsahovala baterie o celkovém napětí 4,5 V.

## 5.1 XY Charakteristika rozložení odezev

Proměření FV článku ve velikosti 20 x 40 mm. Jako krok měření byl určen 1mm. Průměr světelného bodu je 0,5 mm. Při zaostření na 0,5 mm vznikaly částečně rozptýlené okraje světelného bodu. Tento problém byl vyřešen přidáním vnější clony. Clona, ve které je otvor o průměru 0,5 mm, se položila na článek a pomohla tak přesně zacílit požadovaný bod na FV článku.

Pro měření celé sítě bodů byly vybrány 3 světelné zdroje. Polovodičový laser GaAlAs , červená LED dioda, a pro srovnání méně vhodný zdroj pro detekční metodu – žlutá LED dioda.

V porovnání odezev jednotlivých světelných zdrojů je patrné, že největší  $\Delta u$  je možno odečíst u polovodičového laseru GaAlAs. Naopak nejmenší odchylka  $\Delta u$  je u žluté LED diody, která má i nejmenší odezvu vůbec.

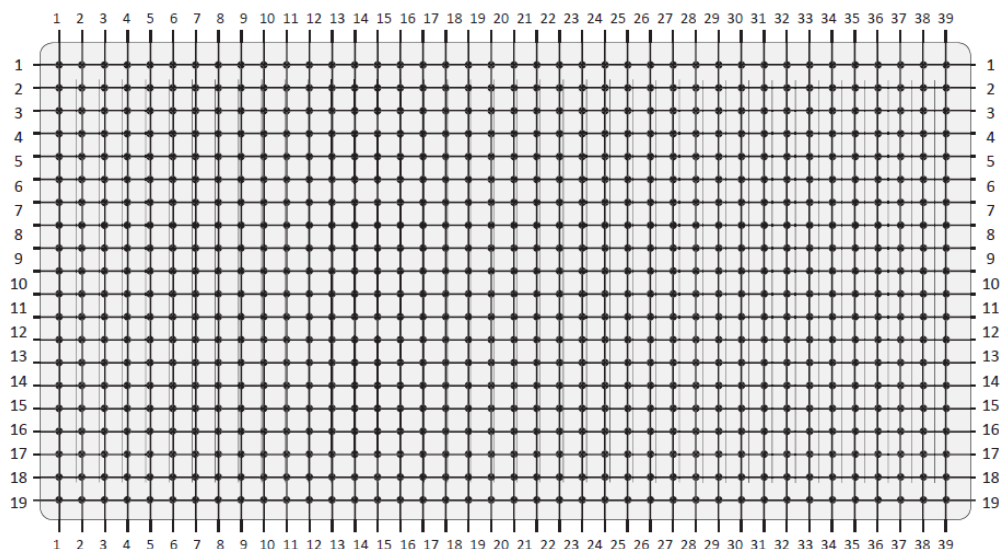
V dolní části článku mezi 10 – 20 bodem měření je patrné zašpinění článku. Je zde vidět, že zde dochází k menší odezvě než u zbytku článku. V dalších odečítaných bodech nevzniká žádná větší skupina, a jedná se jen o malé místní defekty, respektive zašpinění článku.

$$\Delta u_{\text{GaAlAs}} = 126,4 - 124,6 = 1,8 \text{ mV}$$

$$\Delta u_{\text{LED červená}} = 75,7 - 73,3 = 1,4 \text{ mV}$$

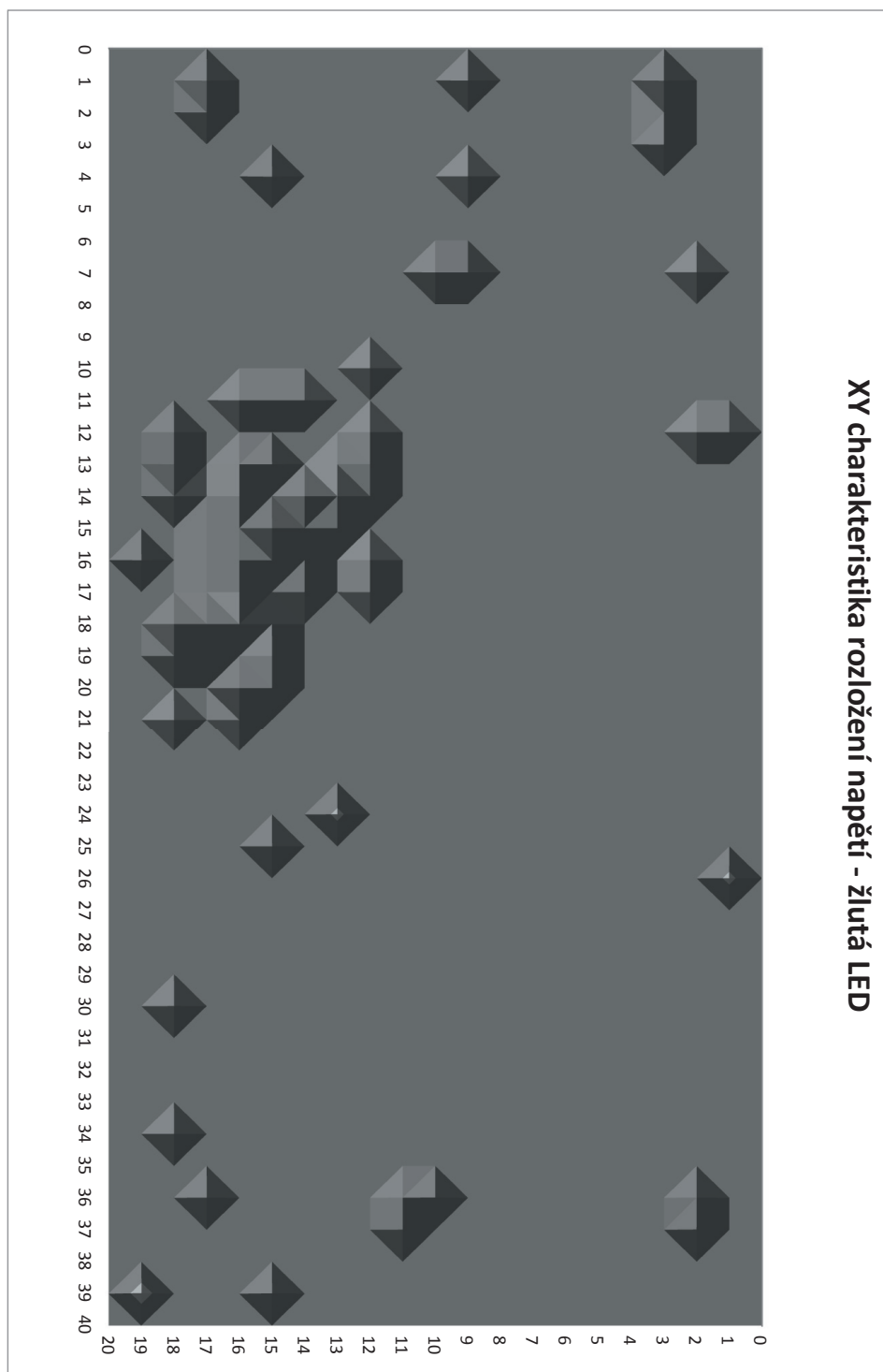
$$\Delta u_{\text{LED žlutá}} = 4,9 - 4,4 = 0,5 \text{ mV}$$

Obr. 9: Nákres XY charakteristiky (body, kde byla měřena odezva).

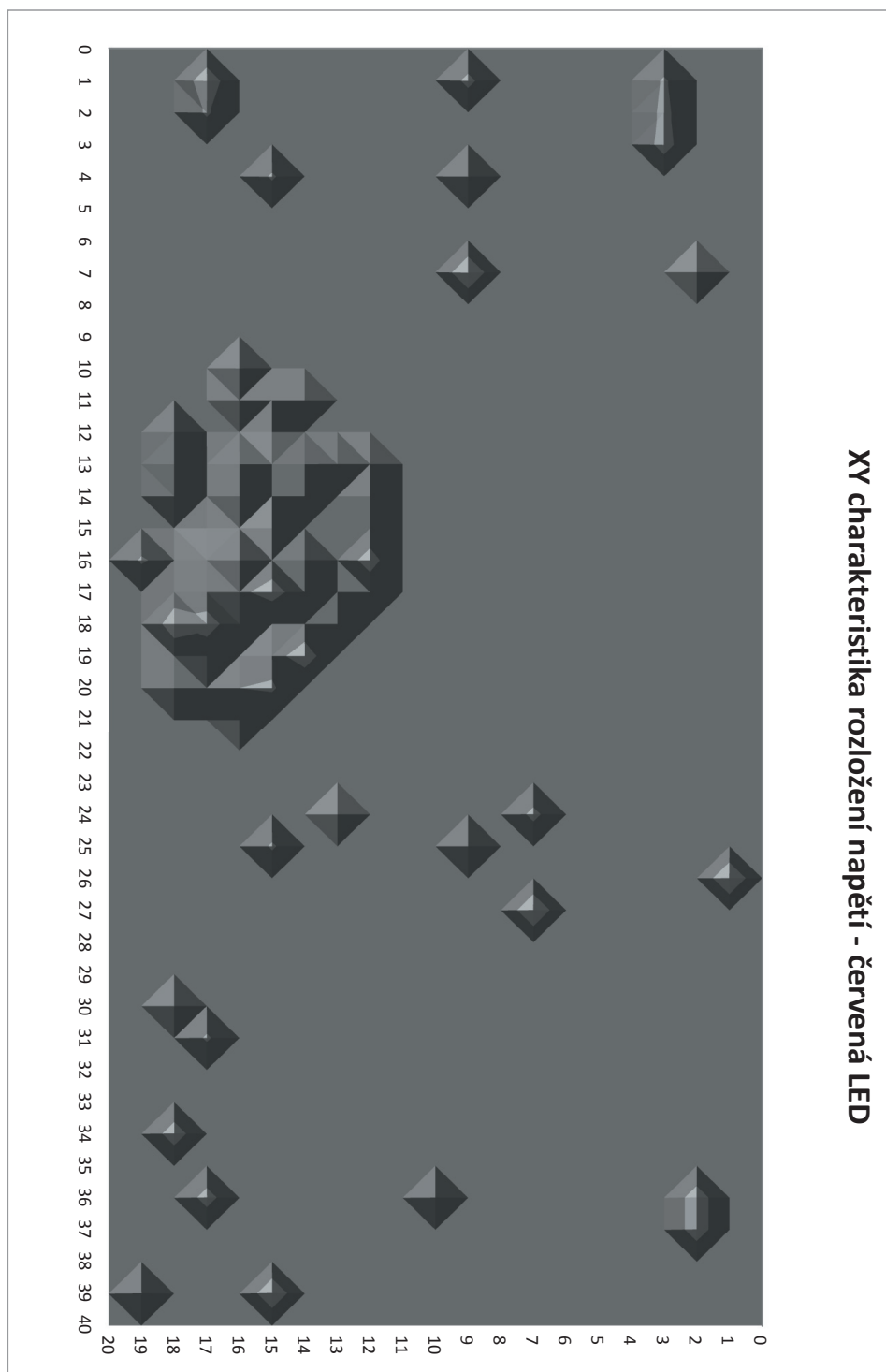


## 5.2 Grafy

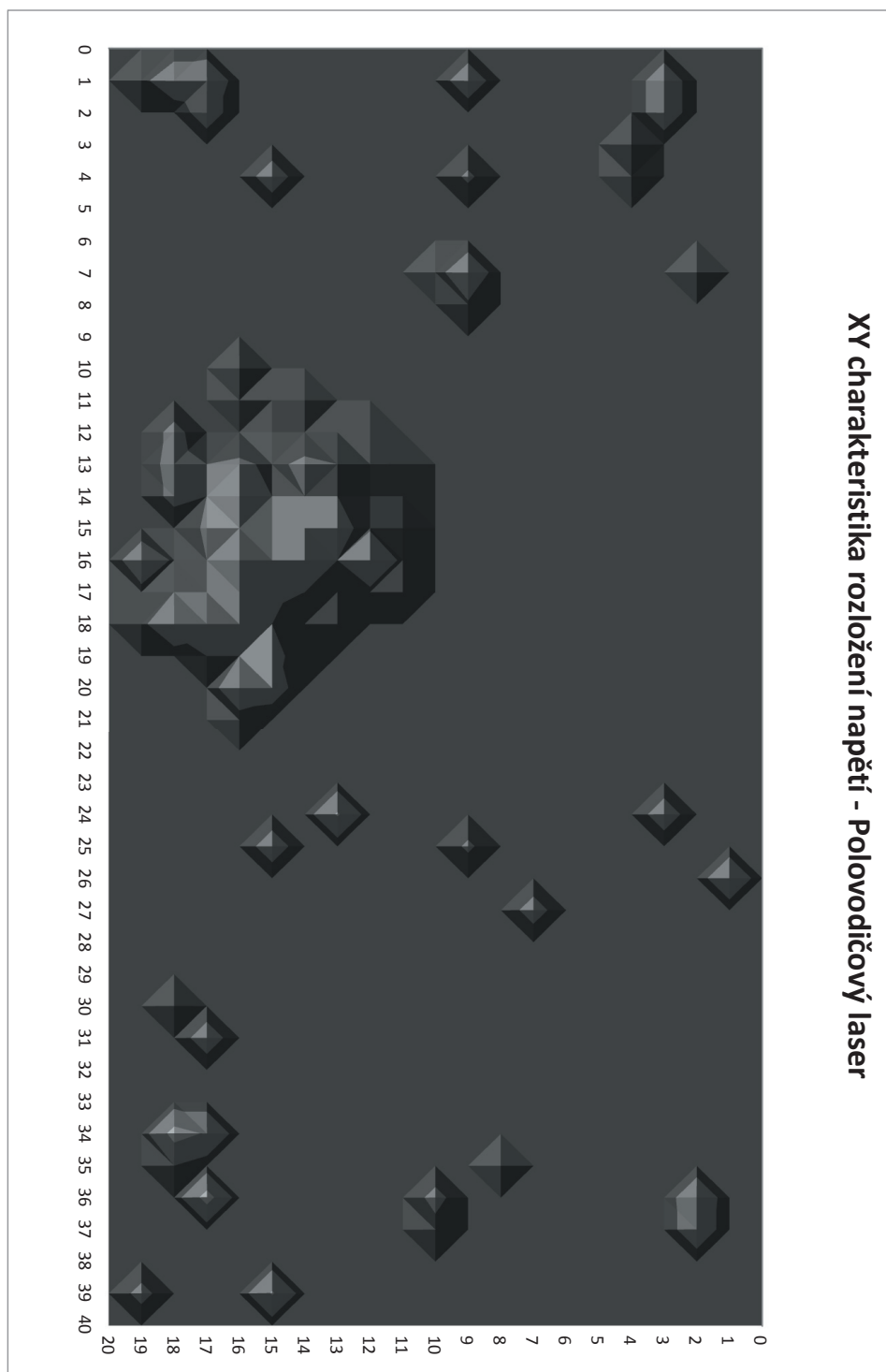
Graf 2: XY charakteristika rozložení napětí - žlutá LED



Graf 3: XY charakteristika rozložení napětí - červená LED



Graf 4: XY charakteristika rozložení napětí – Polovodičový laser



## 6 Shrnutí

Cílem mé práce bylo zjištění nejvhodnějšího osvitovou jednotku pro detekční metodu LBIC.

Při vlastním měření světlo ze zdroje procházelo mechanicky vytvořenou štěrbinou, a dále byl paprsek zaostřen systémem optických čoček, které ho usměrnily.

V experimentu bylo porovnáno množství různých světelných zdrojů. Byl kladen důraz na malou velikost světelného zdroje. Žárovky ani zářivky tuto podmínku nesplňují. Jejich velikost není vhodná k umístění na pohyblivou hlavu snímače a pro jejich nekoherentní paprsky by bylo velmi složité usměrnit kužel světla do úzké štěrbině.

Dalším důležitým parametrem byl tepelný výkon světelného zdroje. Halogenová žárovka se při měření z důvodu vysokého tepelného zahřívání také neosvědčila.

V pořadí další zkoumaný zdroj byla xenonová výbojka. Z počátku zdála se jako vhodná, splňovala parametry velikosti zdroje. Provozní teplota výbojky je také nižší než porovnávaná halogenová žárovka. Nevyhovující se stala pro svou startovací napěťovou náročnost a nutností zapalovacího obvodu. Výbojka potřebuje k rozběhu až 400 V, a proto se tento světelný zdroj se nehodil pro tento experiment.

Jako vhodné světelné zdroje byly vybrány LED diody pro jejich malé rozměry a nízkou finanční náročnost. V neposlední řadě mají LED diody výhodu v různobarevném provedení. Použití různých světelných délek dojde k lepšímu a detailnějšímu prozkoumání panelu. Největší odezvu má ale červená LED dioda, která má největší vlnovou délku. Tato červená LED dioda se osvědčila i při podrobnějším měření odezev celého fotovoltaického článku. Tepelný výkon jednotlivých zdrojů nepřevyšuje dovolenou mez a světelný obvod je stabilní.

V případě polovodičového laseru bylo nutno dbát na prahový proud, při kterém laserová dioda přechází z režimu nekoherentního zdroje do režimu laseru. Při obou měření bylo dokázáno, že za daných podmínek má nejlepší napěťovou odezvu polovodičový laser z cd mechaniky. Má velmi vysokou svítivost a již má v pouzdře obsažený optický modul na zaostření paprsku. Je velmi důležité nepřekročit výkon laseru 5 mW, protože pak by mohlo dojít k nenávratnému poškození zkoumaného FV panelu.

Závěrem lze tedy doporučit tento zdroj jako nejvhodnější pro metodu LBIC. A v podmínkách tohoto experimentu bylo provedeno jedno ukázkové měření zkoumaného fotovoltaického článku. Tuto metodu lze dále doporučit pro použití při detekování vad fotovoltaického článku.



## 7 Přílohy

Tab. 4: Naměřené hodnoty XY charakteristiky – Žlutá LED dioda

Žlutá LED dioda: $\varnothing 0,5 \text{ mm} = 4,9 \text{ mV}$																			
1	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9
2	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9
3	4,6	4,8	4,6	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9
4	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9
5	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9
6	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9
7	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9
8	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9
9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9
10	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9
11	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9
12	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9
13	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9
14	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9
15	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9
16	4,8	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9
17	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9
18	4,8	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9
19	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9

Žlutá LED dioda: $\varnothing 0,5 \text{ mm} = 4,9 \text{ mV}$																			
21	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9
22	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9
23	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9
24	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9
25	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9
26	4,4	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9
27	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9
28	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9
29	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9
30	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9
31	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9
32	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9
33	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9
34	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9
35	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9
36	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9
37	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9
38	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9
39	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9



Tab. 6: Naměřené hodnoty XY charakteristiky – Polovodičový laser

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4
2	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,3	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4
3	125,5	125,5	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4
4	126,4	126,4	126,1	126,3	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4
5	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4
6	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4
7	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4
8	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4
9	125,5	126,4	126,4	125,9	126,4	126,4	125,3	126,1	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4
10	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,3	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4
11	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,3	126,3	126,2	126,2	126,2	126,4	126,4	126,4
12	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,3	126,3	126,2	126,1	125	126,2	126,4	126,4	126,4
13	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,3	126	126	125,9	126	126,2	126,2	126,4	126,4
14	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,3	126,3	125,9	126	125,9	125,8	126	126,2	126,3	126,4
15	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,3	126,3	126,1	126	125,9	125,8	125,9	126	125,8	125,6
16	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,3	126,4	125,9	125,8	125,8	125,6	125,7	125,7	126	125,3
17	125,2	125,6	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126	126	125,9	126	126	125,4	126	126,4
18	125,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	125,8	125,7	125,8	125,7	126,1	126	125,1	126,4	126,4
19	126,2	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	125,4	126,2	126,2	126,4	126,4

	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	
1	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	125,2	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	
2	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	125,3	125,4	126,4	126,4	
3	126,4	126,4	126,4	125,6	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	
4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	
5	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	
6	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	
7	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	125,7	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	
8	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,3	126,4	126,4	126,4	126,4	
9	126,4	126,4	126,4	126,4	125,9	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	
10	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	125,8	126,2	126,4	126,4	
11	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	
12	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	
13	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	
14	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	
15	126,4	126,4	126,4	126,4	125,6	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	
16	126,3	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	
17	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	125,1	126,4	126,4	126,4	126,4	
18	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	124,6	126	126,4	126,4	126,4	126,4	
19	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	126,4	125,8

## 8 Citovaná literatura

- [1] H. Benešová, J. Škorpil. *Tandemové fotovoltaické články – jeden ze směrů výzkumu a vývoje v oblasti fotovoltaiky III. generace*. Vystaveno 26. 01 2012 [cit. 2012-02-18]. Dostupné z: [http://147.228.94.30/index.php?option=com\\_content&view=article&id=288:tandemove-fotovoltaicke-lanky-jeden-ze-smr-vyzkumu-a-vyvoje-v-oblasti-fotovoltaiky-iii-generace&catid=37:islo-12012-nzee-2011&Itemid=49](http://147.228.94.30/index.php?option=com_content&view=article&id=288:tandemove-fotovoltaicke-lanky-jeden-ze-smr-vyzkumu-a-vyvoje-v-oblasti-fotovoltaiky-iii-generace&catid=37:islo-12012-nzee-2011&Itemid=49)
- [2] H. Benešová, J. Škorpil. *Tandemové fotovoltaické články – jeden ze směrů výzkumu a vývoje v oblasti fotovoltaiky III. generace*. Vystaveno 26. 01 2012 [cit. 2012-02-18]. Dostupné z: [http://147.228.94.30/index.php?option=com\\_content&view=article&id=288:tandemove-fotovoltaicke-lanky-jeden-ze-smr-vyzkumu-a-vyvoje-v-oblasti-fotovoltaiky-iii-generace&catid=37:islo-12012-nzee-2011&Itemid=49](http://147.228.94.30/index.php?option=com_content&view=article&id=288:tandemove-fotovoltaicke-lanky-jeden-ze-smr-vyzkumu-a-vyvoje-v-oblasti-fotovoltaiky-iii-generace&catid=37:islo-12012-nzee-2011&Itemid=49)
- [3] Mach, J. *Využití solární energie*. Vystaveno 22. 03. 2010 [cit. 2012-02-18]. Dostupné z: [http://www.rescompass.org/IMG/pdf/Solarni\\_energie.pdf](http://www.rescompass.org/IMG/pdf/Solarni_energie.pdf)
- [4] Kubáč, S. *Kontrola kvality fotovoltaických modulů*. [cit. 2012-03-07]. Dostupné z: <http://www.solartechnika.sk/solartechnika-12011/kontrola-kvality-fotovoltaickych-modulu-.html>
- [5] Abot, *Diagnostika FV modulů a FVE*. [cit. 2012-03-07] Dostupné z: <http://www.abot.cz/cs/sluzby/diagnostika-fv-modulu-a-fve>
- [6] Lukáš, M. *Laserové diody*. [cit. 2012-04-15] Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/01034/index.html>

## 9 Použité obrázky

[1] Abot, *Diagnostika FV modulů a FVE*. [cit. 2012-03-07] Dostupné z:

<http://www.abot.cz/cs/sluzby/diagnostika-fv-modulu-a-fve>

[2] Abot, *Diagnostika FV modulů a FVE*. [cit. 2012-03-07] Dostupné z:

<http://www.abot.cz/cs/sluzby/diagnostika-fv-modulu-a-fve>

[3] Vaněk, J. *Diagnostické metody fotovoltaických článků*. Vystaveno 16. 08. 2010 [cit. 2012-03-10]. Dostupné z: <http://www.asb-portal.cz/tzb/fotovoltaika/diagnosticke-metody-fotovoltaickych-clanku-2100.html>

## 10 Seznam obrázků

Obr. 1: Příklad voltampérové charakteristiky křemíkového FV článku .....	15
Obr. 2: Ukázka zobrazení panelu na ELCD testu [1] .....	18
Obr. 3: Ukázka termografických snímků [2] .....	19
Obr. 4: Mapa proudové odezvy vzorků metodou LBIC [3] .....	22
Obr. 5: Blokové schéma zapojení pracoviště .....	23
Obr. 6: Ukázka směru paprsků u koherentního a nekoherentního zdroje světla .....	26
Obr. 7: Světelná charakteristika laserové diody .....	28
Obr. 8: Závislost emitovaného optického výkonu na budícím proudu .....	29
Obr. 9: Nákres XY charakteristiky (body, kde byla měřena odezva) .....	35