

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

*Edice Habilitační a inaugurační spisy, sv. 270*

*ISSN 1213-418X*

**Jiří Vaněk**

**DIAGNOSTICKÉ METODY  
FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ  
ZALOŽENÉ NA  
GENERAČNĚ-REKOMBINAČNÍCH JEVECH**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií  
Ústav elektrotechnologie

**Ing. Jiří Vaněk, Ph.D.**

**Diagnostické metody fotovoltaických článků založené na generačně-  
rekombinačních jevech**

Diagnostic methods of photovoltaic cells based on generation-  
recombination effects

Zkrácená verze habilitační práce



BRNO 2008

**Klíčová slova:**

diagnostické metody, fotovoltaické solární články, materiálové defekty, procesní defekty, LBIC, elektroluminiscence, luminiscence mikroplazmy

**Key words:**

Diagnostic methods, photovoltaic solar cells, material defects, process defects, LBIC, electroluminescence, luminescence of microplasma

Rukopis habilitační práce je uložen na Ústavu elektrotechnologie

© Jiří Vaněk, 2008

ISBN 978-8-0214-3666-4

ISSN 1213-418X

## Obsah

ŽIVOTOPIS .....	4
1 ÚVOD .....	5
2 LBIC (LIGHT BEAM INDUCED CURRENT) .....	5
2.1 Analýza využití různých vlnových délek světelného zdroje .....	6
2.1.1 Měření na monokrystalickém vzorku .....	7
2.1.2 Měření na multikrystalickém vzorku .....	11
2.2 Zobrazení zadních kontaktů solárních článků .....	14
2.2.1 Teorie vlivu sekundárně generovaného světla na výsledný snímek LBIC .....	16
3 METODA ELEKTROLUMINISCENCE .....	18
3.1 Materiálové defekty .....	19
3.2 Procesní defekty .....	20
4 METODA VYZAŘOVÁNÍ SVĚTLA Z MIKROPLAZMY .....	22
4.1 Analýza grafického výstupu výsledků detekce emise světelného záření mikroplazmy CCD kamerou. ....	24
5 ZÁVĚRY A DOPORUČENÍ .....	27
REFERENCE .....	28
ABSTRACT .....	32

# ŽIVOTOPIS

**Jméno:** Ing. Jiří Vaněk, Ph.D.

**Narozen:** 9. 12. 1971



## Vzdělání a příbuzné atributy

- Gymnázium Velké Meziříčí 1985–1990.
- Fakulta elektrotechniky a informatiky VUT v Brně – obor elektrotechnologie, 1990–1995, diplomová práce: Katalytické aktivní hmoty pro palivové články, celkový výsledek státní zkoušky: výborně.
- Postgraduální studium FEKT VUT v Brně – doktorský studijní program Elektrotechniky a komunikačních technologií, studijní obor Mikroelektronika a technologie, 1996–2003, téma disertační práce: „Využití transportních a šumových charakteristik pro testování kvality fotovoltaických článků“.
- Spolupráce na grantových projektech a organizaci mezinárodních vědeckých konferencí.
- Publikace v oblasti alternativních zdrojů elektrické energie.

## Dosažené pedagogicko-vědecké tituly:

- 1995 inženýr (Ing.)
- 2003 doktor (Ph.D.)

## Praxe:

- 1995–1998 FEI VUT v Brně – výuka studentů inženýrského a bakalářského studia v rámci doktorského studia.
- 1995–1998 FEI VUT v Brně – technický pracovník na FEI VUT v Brně – participace na výzkumu a vývoji v oblasti technologie, diagnostiky a speciálních aplikací chemických zdrojů elektrické energie, tvorba hardware a software speciálních měřicích technik.
- 1996 Krátkodobý pobyt (3 měsíce) na Universitaet Geasmthochschule Siegen, v rámci technická praxe IAESTE při řešení optimalizace elektronických obvodů používaných v detekční technice.
- 1998–2000 SVI ECON MU – správce počítačové sítě v rámci vojenské civilní služby.
- 2000–2003 FEKT VUT v Brně – technický pracovník na Ústavu elektrotechnologie FEKT VUT
- Od 2003 FEKT VUT v Brně – odborný asistent na Ústavu elektrotechnologie FEKT VUT v Brně.
- 2006 Krátkodobý pobyt (1 týden) na European Summer School Petras Greece v rámci česko-řecké spolupráce při řešení problematiky solárních zdrojů energie.
- 2007 Krátkodobý pobyt (1 týden) na European Summer School Pargos Greece v rámci česko-řecké spolupráce při řešení problematiky solárních zdrojů energie.

## Publikační činnost

- 1995–2007 Autorem nebo spoluautorem 7 článků v zahraničních časopisech, 41 článků ve sbornících mezinárodních konferencí, 25 článků ve sbornících národních konferencí, x článků v národním.

## Výzkumná činnost

- 1995–2007 Účast v řešení 1 mezinárodního projektu, 2 výzkumných záměrů, řešitel grantu GAČR, spoluředitel grantu GAČR, spolupracovník 10 grantů GAČR a jiných projektů.

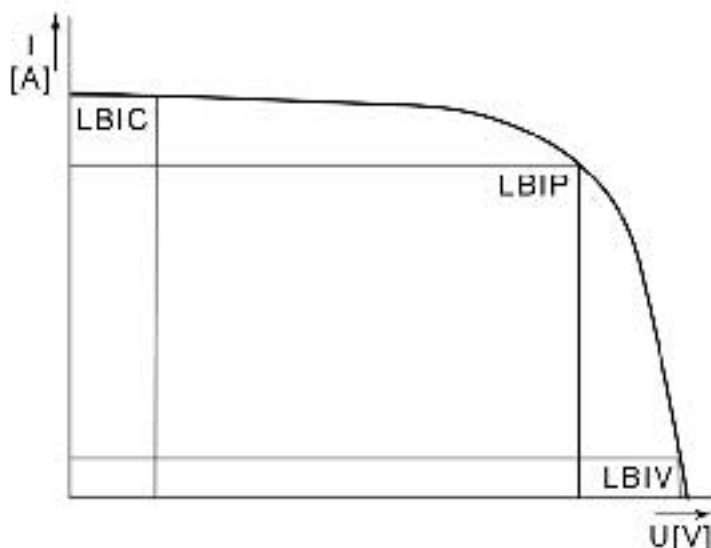
# 1 ÚVOD

Neustálý nárůst energetických nároků naší civilizace a zároveň nutnost tyto potřeby uspokojovat ekologicky čistými zdroji elektrické energie vede k výraznému vývoji součástí energetiky zvané alternativní zdroje elektrické energie. Jedním z nadějných budoucích zdrojů elektrické energie jsou fotovoltaické systémy, které by mohly pokrýt významnou část tohoto nároku. Pro významnější budoucí využití těchto systémů je důležité, aby byly nalezeny nové technologie, které umožní vyrobit tyto systémy s nejmenšími náklady a s největším možným dodávaným výkonem. Aby tyto technologie mohly být nalezeny, musí být plně pochopeny procesy a děje, které v daných systémech působí. K pochopení těchto dějů slouží analytické nástroje, které jsou schopny analyzovat jednotlivé parametry a výsledky provedených technologií. Proto stejnou měrou k významnému rozšíření využití fotovoltaických systémů a jejich využití k dodávce energie slouží nejen hledání nových technologií, ale i vývoj nových diagnostických nástrojů, které pomohou posoudit vhodnost různých technologických kroků.

Z výše uvedeného vyplývá náš cíl najít takové diagnostické metody, pomocí nichž by bylo možné v poměrně krátké testovací době s vysokou pravděpodobností predikovat kvalitu, spolehlivost a účinnost fotovoltaických článků, které jsou jedním z nejdůležitějších součástí solárních systémů.

## 2 LBIC (LIGHT BEAM INDUCED CURRENT)

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

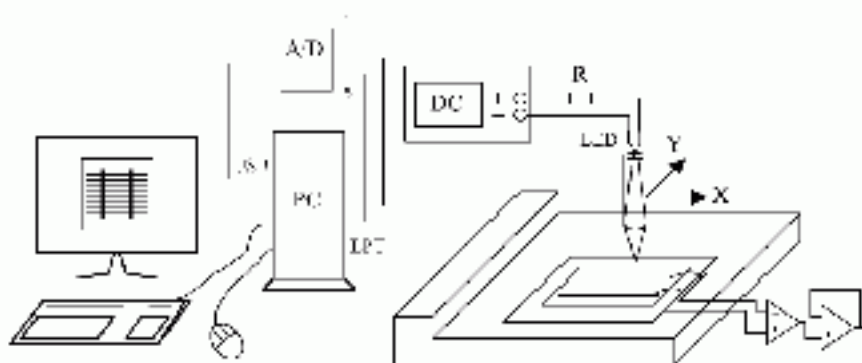


**Obr. 2.1** Nastavení pracovního bodu měřicího zesilovače pro různé metody LBI

V ideálním případě LBIC, kdy by měl převodník proud-napětí nulový vnitřní odpor, by se měřená veličina rovnala hodnotě  $I_{SC}$  lokálního osvětlení solárního článku. Pro měření metody LBIC

ale postačuje, aby zátěžový odpor měřicího převodníku byl menší než polovina ideální zátěže maximálního výkonu, což v praxi znamená odpor menší jak  $0,1 \Omega$ . Naopak pro měření LBIV je důležité, aby byl vnitřní odpor měřicího zesilovače co největší. Tuto podmínku ale splňuje většina měřicích zařízení pro měření napětí, proto realizace metody LBIV není tak technicky náročná, jako nastavení pracovního bodu metody LBIC.

Během měření LBIC je laserový 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. V dalším kroku je nutné (automaticky nebo ručně) nastavit stupeň šedi zobrazované oblasti pro dobré zobrazení jednotlivých defektů, a to podle nalezených odchylek. Přesnost proudových map závisí především na druhu použitého laseru (hloubka vniku) a na kroku posunu (míra přesnosti), s jakým se daný vzorek analyzuje.



**Obr. 2.2** Měřicí pracoviště LBIC, PC – měřicí počítač, DC – stabilizovaný zdroj napětí světelného zdroje, LED – zdroj konstantního světelného toku, A/D – převodník proud-napětí, LPT – skenovací zařízení.

Jak bylo řečeno, výstupem měření je matice číselných hodnot, kterou lze převést na mapu bodů s různým stupněm šedé barvy, která signalizuje velikost proudové odezvy a dále ji lze analyzovat běžnými grafickými metodami. Nebo ji 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 fotovoltaických článků a technologických kroků jejich výroby.

Zajímavých výsledků lze dosáhnout porovnáváním jak měření LBIC, LBIV, tak i použitím různých typů světelných zdrojů a vlnových délek světelného záření.

## 2.1 ANALÝZA VYUŽITÍ RŮZNÝCH VLNOVÝCH DÉLEK SVĚTELNÉHO ZDROJE

Použití různých vlnových délek světelného zdroje při měření LBIC může pomoci k detailnější analýze strukturálních a materiálových defektů solárních článků.

**Tabulka 1** Hloubka vniku fotonů do křemíku Si (c-Si PC1D 300K)

Vlnová délka (nm)	400	450	500	550	600	650	700	740
Hloubka vniku ( $\mu\text{m}$ )	0,1	0,4	0,9	1,5	2,4	3,4	5,2	7,0
Vlnová délka (nm)	760	800	850	900	950	1000	1050	1100
Hloubka vniku ( $\mu\text{m}$ )	8,4	11	19	33	54	156	613	2857

Jak je známo o spektrální odezvě, s různou vlnovou délkou se mění jak optický absorpční koeficient  $\alpha$ , tak i hloubka vniku světelného záření do materiálů. Pro krystalický křemík se tato hodnota pohybuje od  $10^3 \mu\text{m}$  pro vlnovou délku  $1,1 \mu\text{m}$  až po  $10^{-2} \mu\text{m}$  pro vlnovou délku  $350 \text{ nm}$ . V tabulce 1 můžete nalézt vybrané hodnoty vlnových délek a jim odpovídající hloubky vniku monokrystalického křemíku.

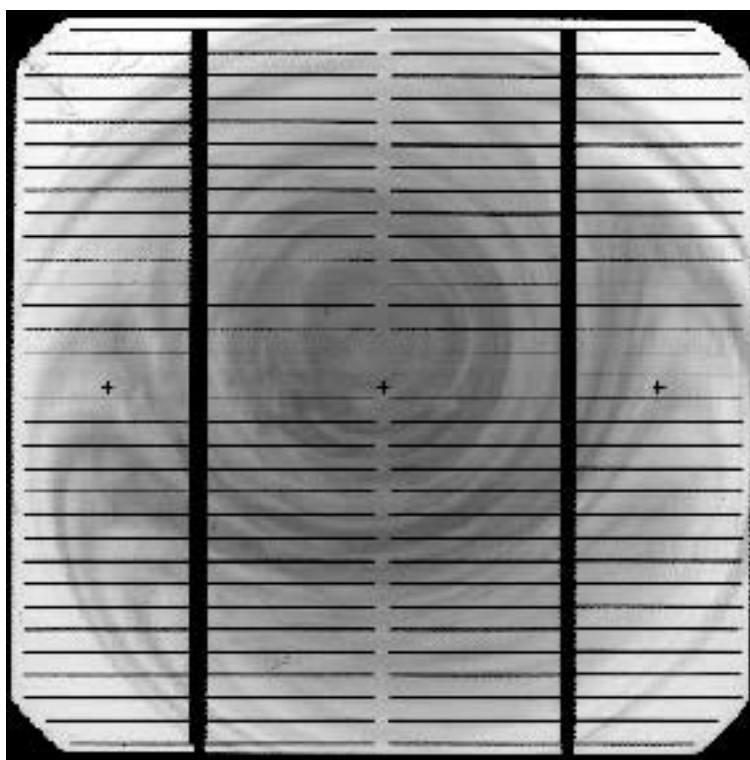
Díky této vlastnosti lze výběrem světelných zdrojů různých vlnových délek ovlivnit vzdálenost od pn přechodu, do kterého bude moci proniknout světelný foton a předat svou energii materiálu. Tímto by šlo získávat informace o struktuře a materiálech v různých hloubkách solárního článku.

### 2.1.1 Měření na monokrystalickém vzorku

Pro lepší srovnání jsou zde uvedeny výsledky dvou měření každé barvy. Byly vybrány vzorky číslo 1 a číslo 3 solárních článků vyrobených na monokrystalickém substrátu  $102 \times 102 \text{ mm}$  firmy Solartec s. r. o., jejichž parametry můžete nalézt v tabulce 2.

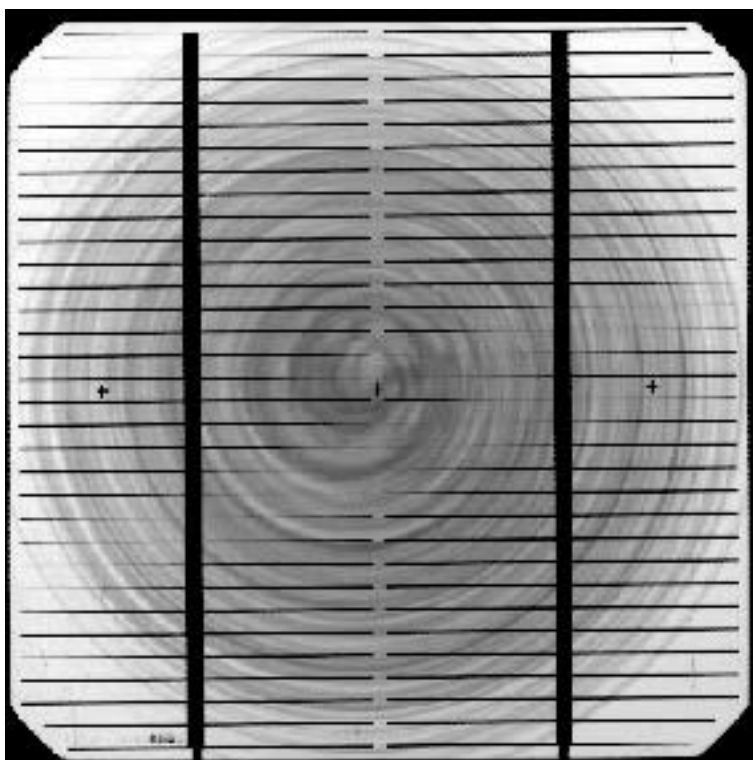
**Tabulka 2** Vybrané parametry testovaných solárních článků

Vzorek	$I_{450} [\text{A}]$	$I_{sc} [\text{A}]$	$U_{oc} [\text{V}]$	$I_m [\text{A}]$	$U_m [\text{V}]$	$P_m [\text{W}]$	FF [%]	EEF [%]	$R_s [\Omega]$	$R_p [\Omega]$
1	2,729	2,842	0,576	2,628	0,476	1,252	76,5	12,04	0,015	11,0
2	2,344	2,511	0,559	2,293	0,461	1,057	75,4	10,17	0,016	11,0
3	2,426	2,602	0,560	2,344	0,466	1,092	74,9	10,50	0,018	11,0
4	2,500	2,670	0,567	2,473	0,459	1,136	75,1	10,92	0,016	11,0

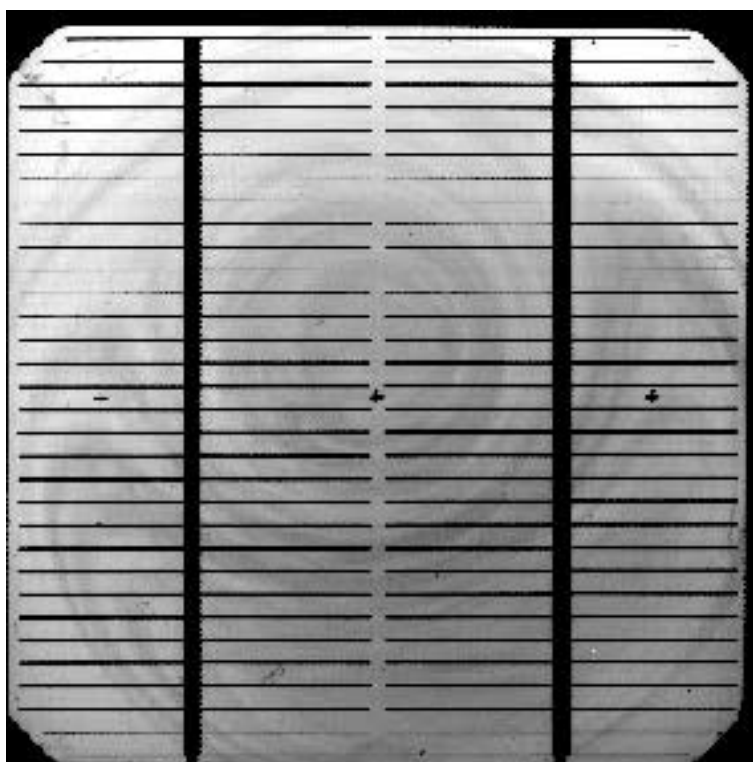


**Obr. 2.3** Analýza výstupních proudů vzorku č.1 při použití fokusované LED diody se střední vlnovou délkou  $650 \text{ nm}$  (červená LED,  $T = 297 \text{ K}$ )

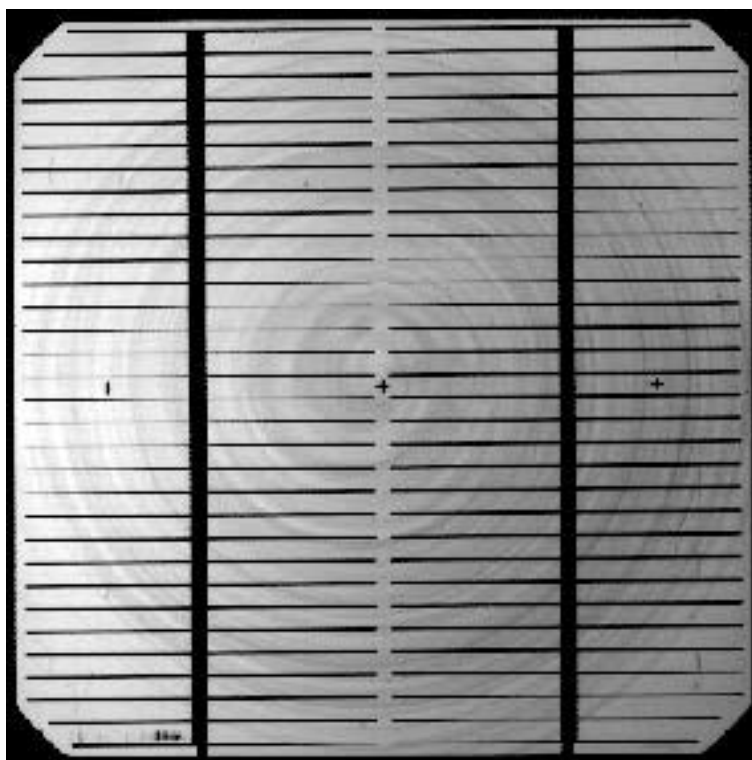




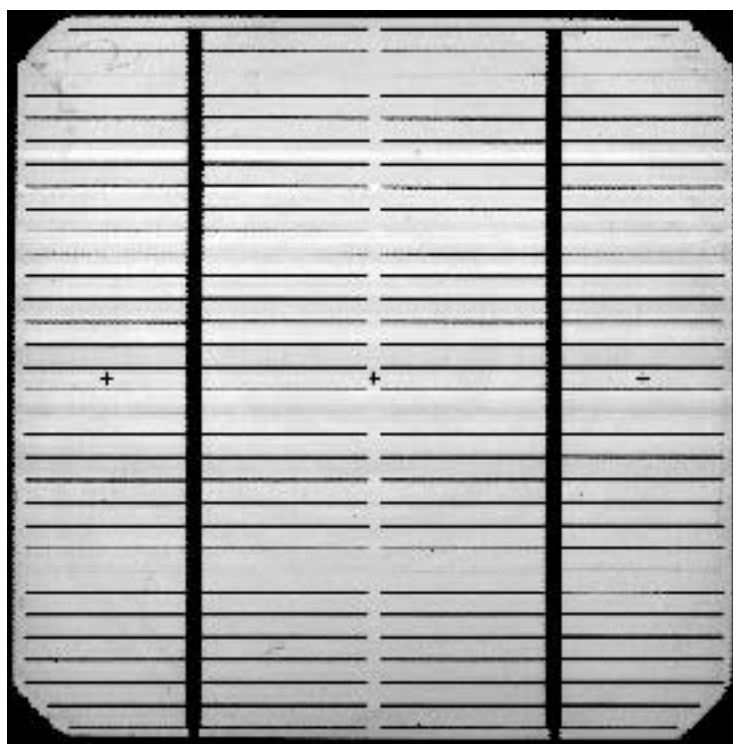
**Obr. 2.4** Analýza výstupních proudů vzorku č. 3 při použití fokusované LED diody se střední vlnovou délkou 650 nm (červená LED,  $T = 297$  K)



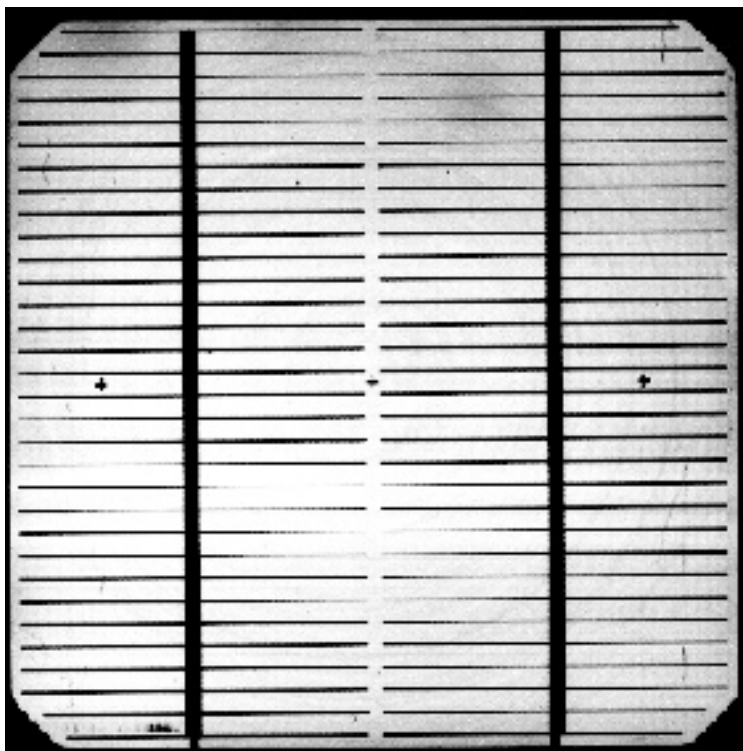
**Obr. 2.5** Analýza výstupních proudů vzorku č. 1 při použití fokusované LED diody se střední vlnovou délkou 560 nm (zelená LED,  $T = 297$  K)



**Obr. 2.6** Analýza výstupních proudů vzorku č. 3 při použití fokusované LED diody se střední vlnovou délkou 560 nm (zelená LED,  $T = 297\text{ K}$ )



**Obr. 2.7** Analýza výstupních proudů vzorku č. 1 při použití fokusované LED diody se střední vlnovou délkou 430 nm (modrá LED,  $T = 297\text{ K}$ )



**Obr. 2.8** Analýza výstupních proudů vzorku č.3 při použití fokusované LED diody se střední vlnovou délkou 430 nm (modrá LED,  $T = 297\text{ K}$ )

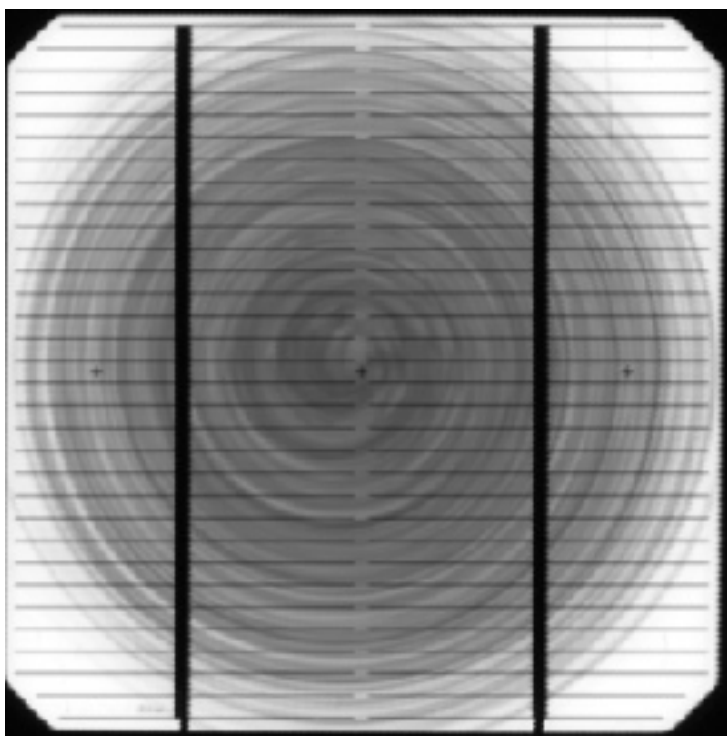
Jak již bylo zmíněno výše, všechny vzorky obsahují tzv. vírový defekt. Pokud si prohlédneme obrázek pořízený červenou barvou (vlnová délka 650 nm, obr. 2.3 a obr. 2.4), tak je daný defekt velmi dobře viditelný. U barvy zelené (vlnová délka 560 nm, obr. 2.5 a obr. 2.6) je defekt stále dobře viditelný, ale není tak zřetelný jako u červené barvy. A u barvy modré (vlnová délka 430 nm, obr. 2.7 a obr. 2.8) se tento defekt téměř ztrácí.

Vlnová délka červeného světla je z uváděných zdrojů nejdelší, proto je také hloubka vniku největší, což se projevuje dobrou viditelností vírového defektu, který se řadí mezi defekty objemové. Na druhou stranu vlnová délka modrého světla je nejkratší a způsobuje to téměř úplnou ztrátu viditelnosti tohoto defektu. Příčinou je pohlcení modrého světla v blízkosti povrchu solárního článku, kde se vírový defekt ještě neprojevuje. Vlnová délka barvy zelené leží mezi vlnovými délkami barvy červené a modré. Proto světlo zelené barvy pronikne do větší hloubky než u barvy modré, ale ne tak hluboko, jako u barvy červené. Vírový defekt je dobře viditelný, ale není tak výrazný, jako u barvy červené.

Z uvedeného se může zdát, že světlo modré barvy není důležité, jelikož neumožňuje odhalení objemových defektů. Pokud si ale důkladně prohlédneme skeny získané modrou barvou, a to především sken vzorku 3, spatříme u horního okraje oblasti se sníženou účinností článku (oblast s tmavším odstínem šedé). Tyto nehomogenity jsou způsobené nerovnoměrnou difúzí při výrobě článku a řadí se mezi povrchové defekty. Světlo červeného spektra již z výše uváděného důvodu tyto defekty neodhalí. Světlo zeleného spektra tyto defekty odhalí, ale v tomto případě jsou velmi špatně viditelné, jelikož se nejedná o případy silné nehomogenity. Dokonce se dá tvrdit, že bez důkazu přítomnosti nehomogenity modrou barvou, by se nehomogenita zjištěná zelenou barvou stala lehce přehlédnutelná.

Mezi další mechanické defekty patří škrábance a odřenininy, které jsou všemi barvami dobře viditelné, i když se jedná o povrchový defekt. Je to způsobeno jejich povahou, kdy přítomnost tohoto defektu znamená značné poškození struktury vedoucí ke zvýšení rekombinace nosičů nebo ke zhoršení absorpce v daném místě.

Dosažené výsledky měření vzorku 3 můžeme ještě srovnat s obrázkem pořízeným infračerveným laserem M4LA5-30-830 (vlnová délka 830 nm, obr. 2.24). Jedná se o nejdelší námi možnou použitelnou vlnovou délku laseru, při které by světlo mělo pronikat do měřeného vzorku nejhlouběji.

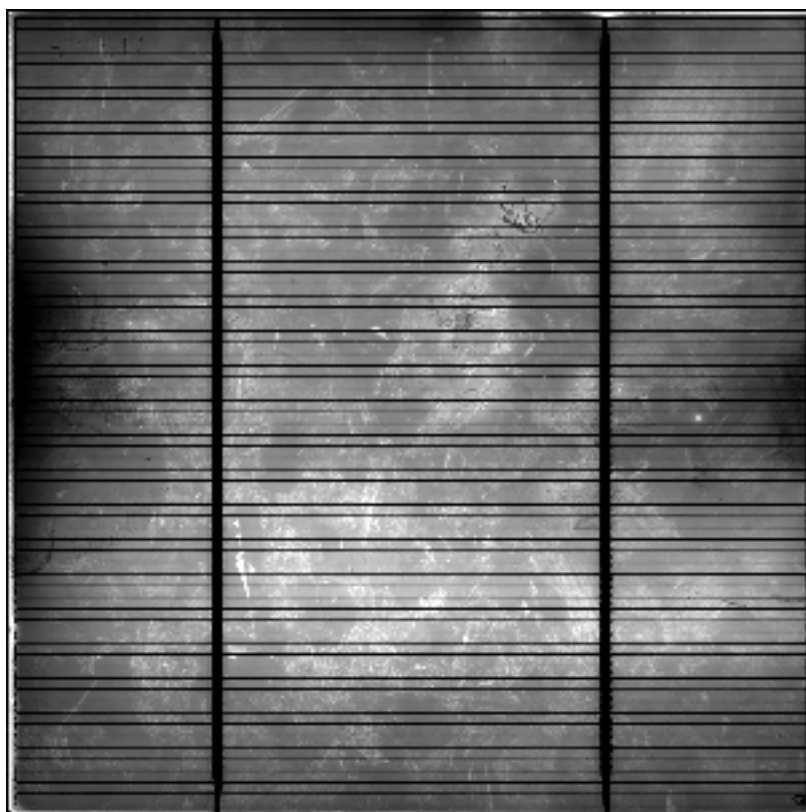


**Obr. 2.9** Analýza výstupních proudů vzorku č. 3 při použití infračerveného laseru vlnové délky 830 nm (IR laser,  $T = 297$  K)

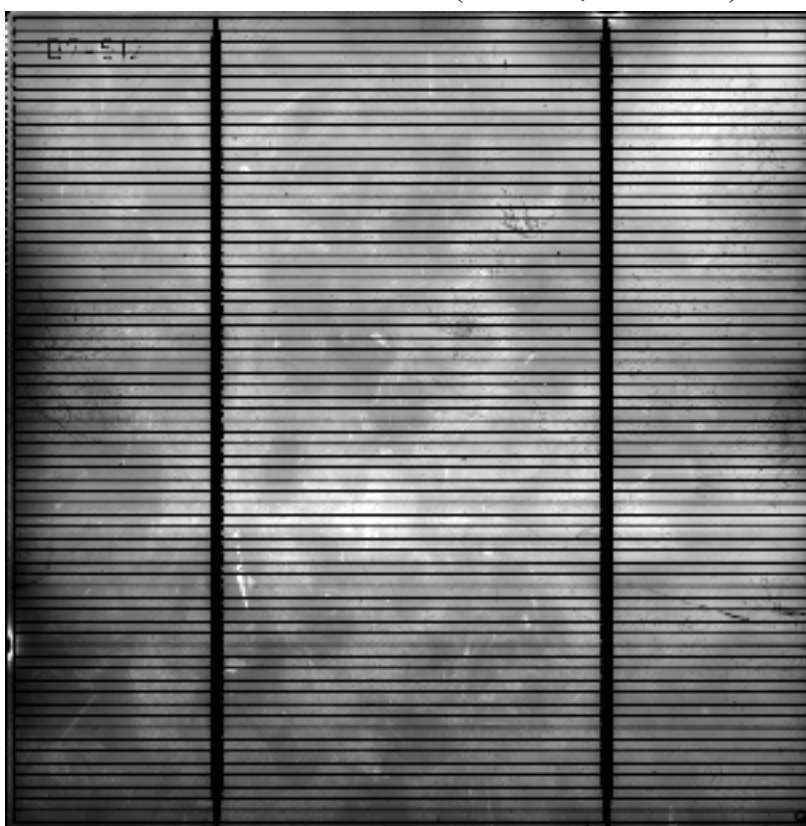
Vírový defekt na obrázku pořízeném infračerveným laserem je nejintenzivnější, což potvrzuje největší hloubku vniku světla. Získaný obrázek je oproti předchozím mírně rozmazaný. Je to způsobeno komplikovaným zaostřováním, jelikož IR světlo nepatří do viditelné oblasti spektra a k jeho zaostření bylo třeba použít speciálního zařízení umožňujícího detekování IR. Velká intenzita viditelnosti defektu spojená s mírným rozmazáním obrázku vykazuje částečnou ztrátu informace ve viditelnosti povrchových defektů (škrábance).

### 2.1.2 Měření na multikrystalickém vzorku

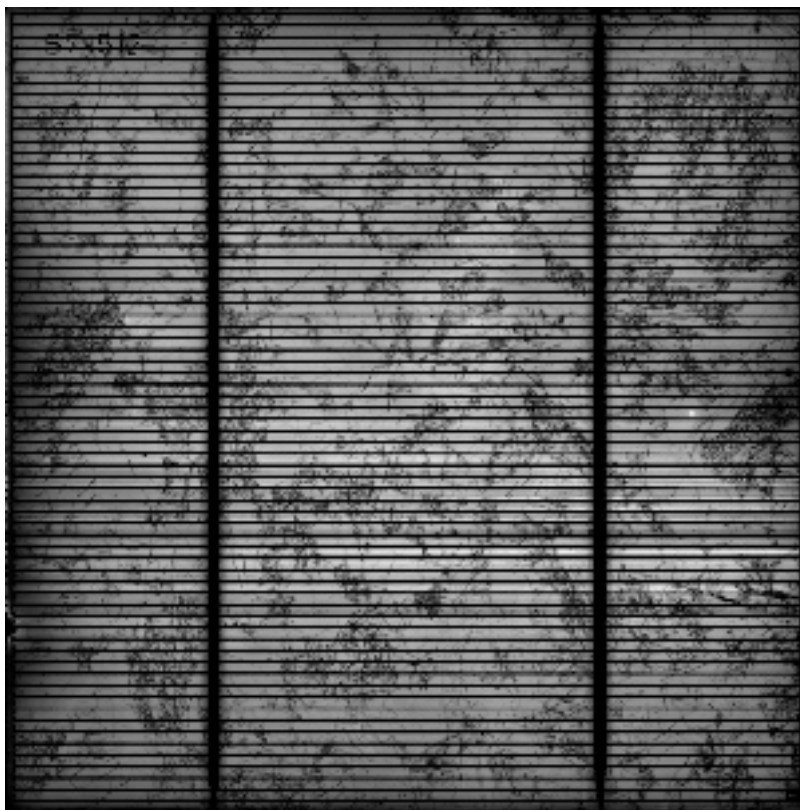
Pro lepší posouzení zobrazovacích vlastností jednotlivých vlnových délek zařízení LBIC bylo provedeno měření na vzorcích fotovoltaických článků vyrobených na polykrystalickém substrátu velikosti  $157 \times 157$  mm. Jednotlivé výsledky měření na polykrystalickém vzorku B7-512 lze vidět na obrázcích 2.10 a 2.11. Na obr. 2.10 je vidět LBIC sken při použití krátkovlnného světelného záření generované UV LED diodou se střední vlnovou délkou 400 nm. Fotony tohoto světla pronikají do hloubky asi  $0,1 \mu\text{m}$ , což je oblast před pn přechodem testovaného fotovoltaického článku (hloubka pn přechodu se pohybuje v rozmezí od  $0,1$  do  $0,5 \mu\text{m}$ ) a generované páry elektron-díra jsou velice ovlivněny povrchovou a Augerovskou rekombinací. Na obrázku jsou zřetelně vidět velké tmavé oblasti, které jsou blízko hran vzorku.



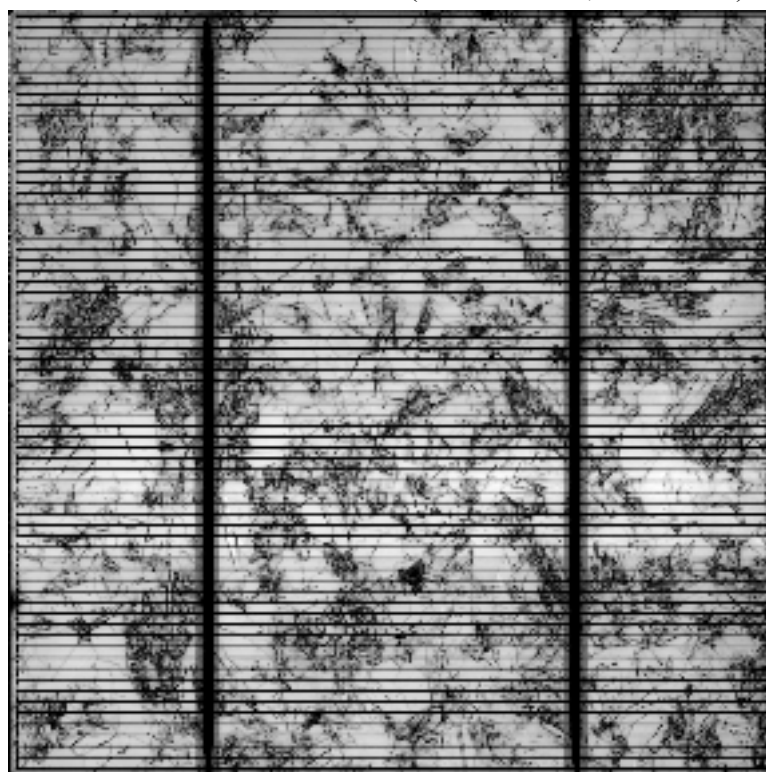
**Obr. 2.10** Analýza výstupních proudů vzorku B7-512 při použití fokusované LED diody se střední vlnovou délkou 400 nm (UV LED,  $T = 297$  K)



**Obr. 2.11** Analýza výstupních proudů vzorku B7-512 při použití fokusované LED diody se střední vlnovou délkou 525 nm (zelená LED,  $T = 297$  K)



**Obr. 2.12** Analýza výstupních proudů vzorku B7-512 při použití fokusované LED diody se střední vlnovou délkou 630 nm (červená LED,  $T = 297\text{ K}$ )

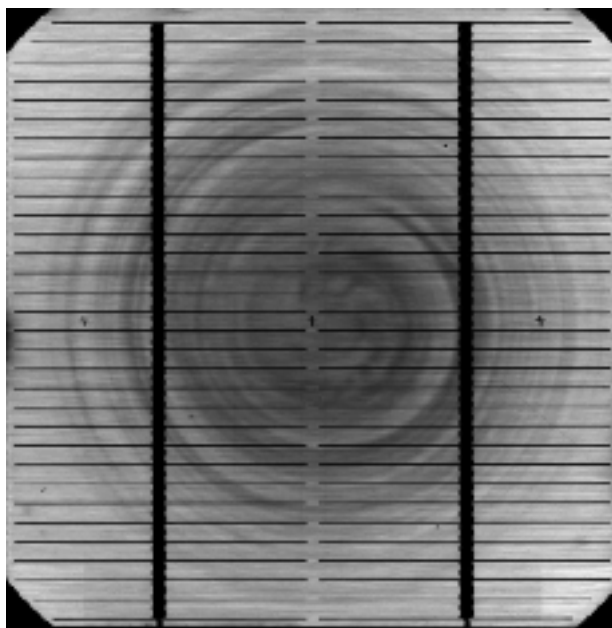


**Obr. 2.13** Analýza výstupních proudů vzorku B7-512 při použití fokusované LED diody se střední vlnovou délkou 980 nm (IR LED,  $T = 297\text{ K}$ )

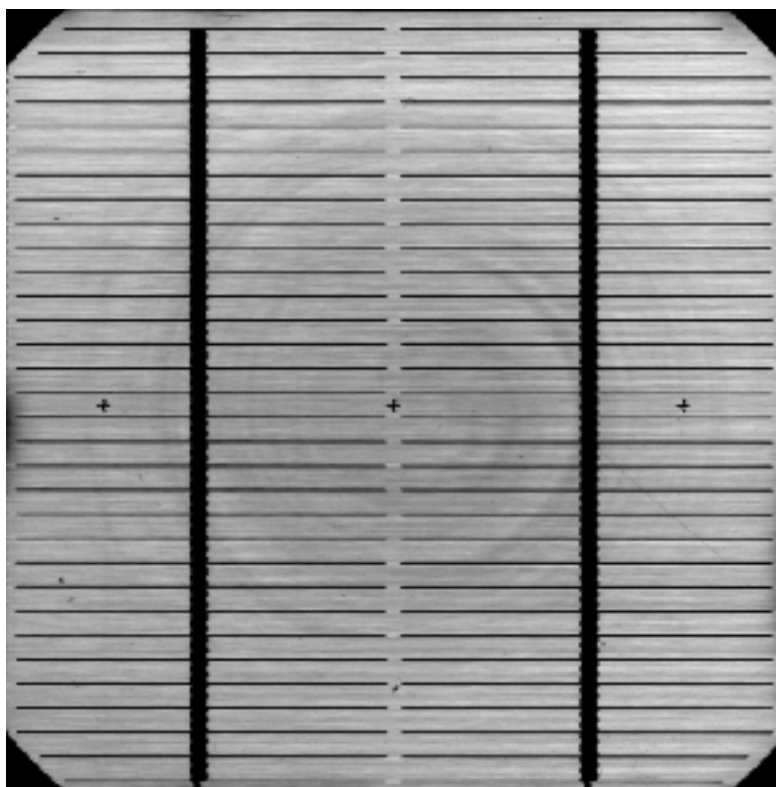
Tyto oblasti jsou pravděpodobně způsobeny svodovými povrchovými proudy způsobenými opracováním hran. Naopak nejsvětlejšími místy se na tomto skenu jeví hrany jednotlivých krystalických zrn. To lze vysvětlit zvýšenou difúzní rychlostí po hranicích krystalických zrn při vytváření pn přechodu a tedy jinou strukturou. Na obr. 2.11 lze vidět LBIC sken při použití fokusovaného světla střední vlnové délky 525 nm zelené barvy, které proniká přibližně do hloubky 1,2  $\mu\text{m}$ , což je již daleko za pn přechodem solárního článku (dvoujnásobek hloubky přechodu). Přesto informace z tohoto skenu jsou velice podobné jako u skenu, kdy světlo pronikalo pouze do hloubky 0,1  $\mu\text{m}$ . Majoritní část fotonu je při této vlnové délce stále absorbována v povrchových oblastech solárního článku, a proto se stále nejvíce uplatňují povrchová rekombinace a povrchové svodové proudy. Naopak světlo na obr. 2.12 a 2.13 proniká do velkých hloubek solárního článku (3  $\mu\text{m}$  až 104  $\mu\text{m}$ ), ve kterých převládá rekombinace na hranicích krystalických zrn, a proto jsou nejtmavšími místy právě tyto hranice. Při podrobné analýze lze na obr. 2.13 vidět šedý stín kolem hlavního kontaktu solárního článku, což dokazuje, že světlo proniká až do oblasti zadního kontaktu. Toto je zobrazení kontaktu na zadní straně solárního článku, který ovlivňuje lokální absorpci záření a rekombinaci volných nosičů náboje a snižuje tím celkovou účinnost tohoto přechodu.

## 2.2 ZOBRAZENÍ ZADNÍCH KONTAKTŮ SOLÁRNÍCH ČLÁNKŮ

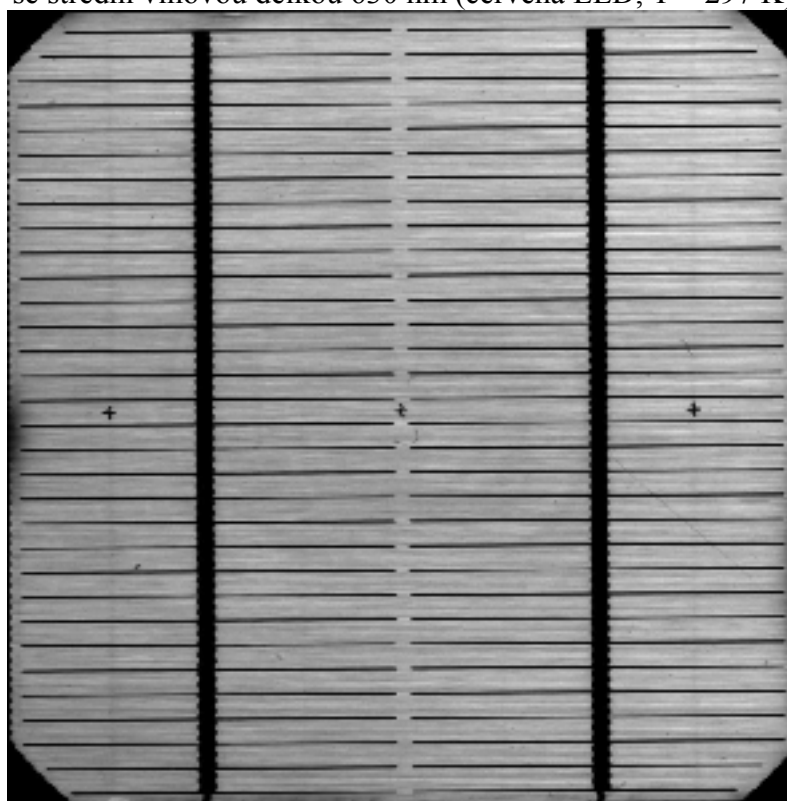
Díky různým vlnovým délkám použitého světelného záření lze detekovat různé defekty a struktury v závislosti na hloubce vniku světelných fotonů. Jak ale ukázaly experimenty, některé struktury lze detekovat daleko od předpokládané hloubky vniku. Jsou to například kontakty na zadní straně solárních článků, které v oblasti červené barvy zdrojového světla nejsou vůbec detekovatelné (obr. 3.14 IR LED, obr. 3.19 červená LED). Na těchto obrázcích jsou zřetelně vidět materiálové vady v podobě vírového defektu vzniklého při výrobě ingotu monokrystalického křemíku a dále pak některé povrchové vady, např. škrábance a vady na hranách solárních článků. Oproti tomu při použití kratších vlnových délek (500 nm a méně – obr. 3.16 pro zelenou LED, obr. 3.17 modrou LED) materiálové vady již nejsou zřetelné, ale detekujeme defekty, které se nacházejí na povrchu nebo blízko povrchu solárního článku, jak jsme si ukázali v předchozích kapitolách. Navíc se nám ale objevuje informace o rozložení kontaktů na zadní straně.



**Obr. 2.14** Analýza výstupních proudů vzorku 22-C2 při použití fokusované LED diody se střední vlnovou délkou 980 nm (IR LED,  $T = 297\text{ K}$ )

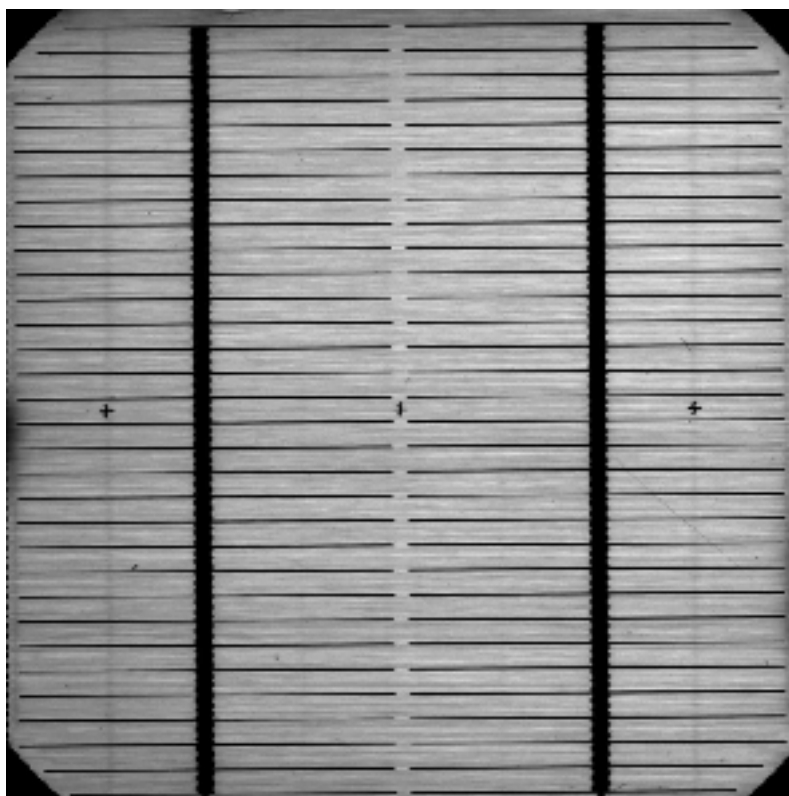


**Obr. 2.15** Analýza výstupních proudů vzorku 22-C2 při použití fokusované LED diody se střední vlnovou délkou 630 nm (červená LED,  $T = 297\text{ K}$ )



**Obr. 2.16** Analýza výstupních proudů vzorku 22-C2 při použití fokusované LED diody se střední vlnovou délkou 525 nm (zelená LED,  $T = 297\text{ K}$ )

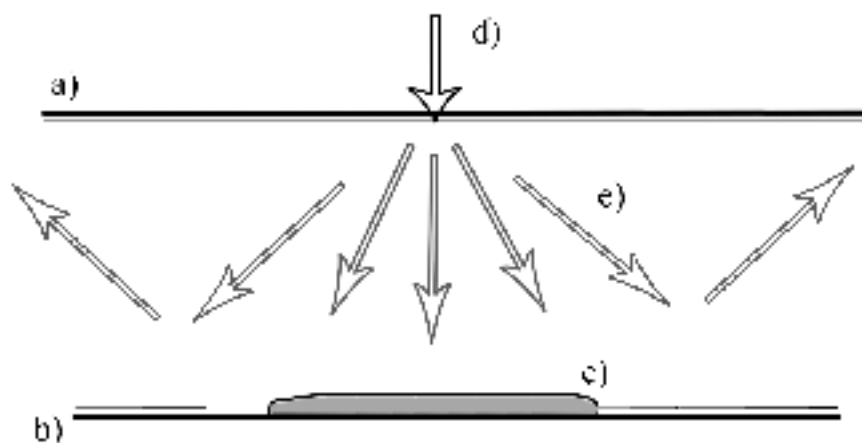




**Obr. 2.17** Analýza výstupních proudů vzorku 22-C2 při použití fokusované LED diody se střední vlnovou délkou 430 nm (modrá LED,  $T = 297\text{ K}$ )

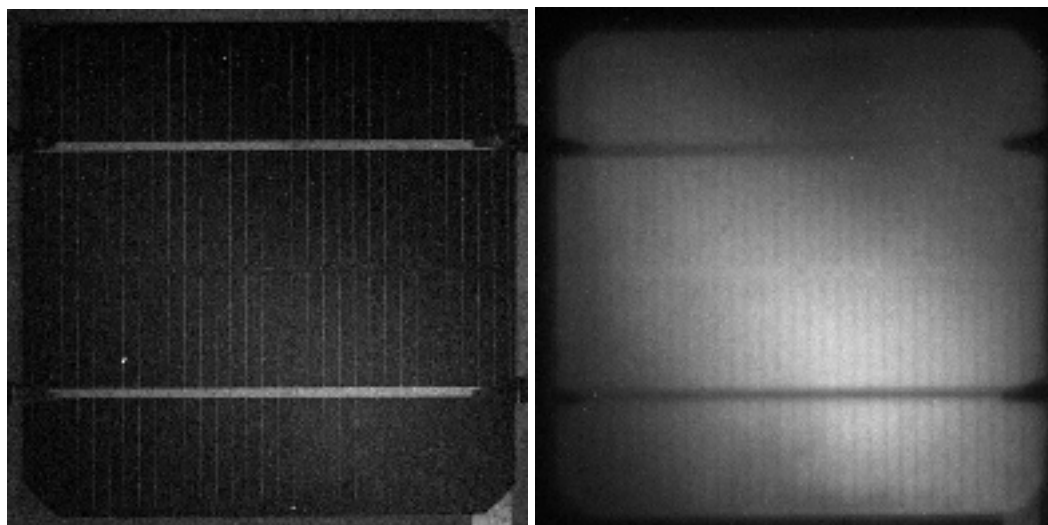
### 2.2.1 Teorie vlivu sekundárně generovaného světla na výsledný snímek LBIC

Zobrazení zadní mřížky kontaktů solárních článků se dá vysvětlit teorií, ve které díky velké rekombinaci nosičů na povrchu materiálu vzniká záření, které je IR vlnových délek blízké  $1,1\ \mu\text{m}$ , což je šířka zakázaného pásu křemíku, a které bude pronikat až k zadnímu kontaktu solárního článku, jak je zobrazeno na Obr. 2.18



**Obr. 2.18** Možné vysvětlení zobrazení zadních kontaktů metodou LBIC krátkovlnným zářením – a) přední povrch, b) zadní strana solárního článku, c) kovový kontakt na zadní straně solárního článku, d) dopadající krátkovlnné záření, e) generované dlouhovlnné záření

Hloubka vniku pro světlo vlnové délky 1,1  $\mu\text{m}$  je daleko větší než je tloušťka celého solárního článku, proto se bude část světla odrážet zpět od zadní strany do materiálu a bude postupně po několika odrazech absorbováno. Část světla je emitována z fotovoltaického článku a projeví se



a)

b)

**Obr. 2.19** Fotoluminiscence solárního článku 24B3 osvětleného UV světlem 400 nm modrý filter (380–460 nm) b) IR filter (742 nm – )

jako dlouhovlnná fotoluminiscence solárního článku ozářeného světlem kratších vlnových délek než je emitované světlo a nebude se podílet na celkové energii absorbované fotovoltaickým článkem. Foton, který dopadá přímo na plochu zadního kontaktu, bude absorbován zadním kontaktem a jeho energie se přemění pouze na teplo.

Tato teorie byla ověřena metodou fotoluminiscence, kdy článek byl osvětlován plošným světlem generovaným UV LED diodou 400 nm a obraz jsme snímali CCD kamerou s použitím IR propustným filtrem. Přestože vlnová délka 400 nm leží v oblasti, ve které tento filtr má nulovou propustnost, byl získán obraz, který svědčí o tom, že materiál emituje světlo s vlnovými délkami v oblasti IR světla – obr. 2.19.

Teorii, že se na celkovém LBIC proudu při použití UV světelných vlnových délek podílí i sekundárně generované světlo z oblasti dlouhých IR vlnových délek, které se šíří odrazy v solárním článku, potvrzuje i fakt, že sice na snímcích jsou patrné zadní kontakty solárního článku, ale není vidět materiálová vada, jako je vírový defekt. Hloubka vniku tohoto dlouhovlnného IR záření několikrát překračuje tloušťku solárního článku. Celkový proud vygenerovaný metodou LBIC bude suma všech proudových příspěvků generovaných sekundárním světlem a příspěvků generovaných primárně dopadajícím světlem.

$$I_{LBIC} = \sum I_{SP} + \sum I_{SS} \quad (2.1)$$

Proudové příspěvky generované sekundárně emitovaným světlem jsou vytvářeny ve velkém kulovém objemu se středem, do kterého dopadá světelný paprsek, a poloměrem blížícím se k hloubce vniku vlnové délky sekundárního záření, který bude kolem 2800  $\mu\text{m}$  (tabulka 2). Z tohoto důvodu všechny detaily, které mohou nějak ovlivnit odražené sekundární světlo, musí být velice nezřetelné a rozmazané.

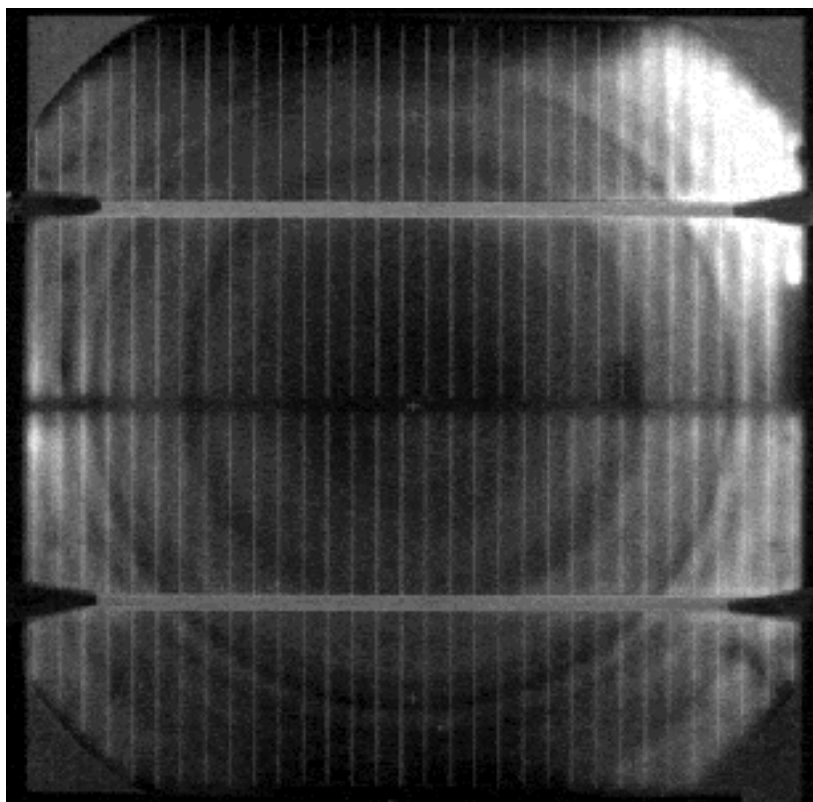
Jak je vidět na obr. 2.14, sekundárně generované světlo nemusí být emitováno pouze UV světelným zářením, ale i zářením jiných vlnových délek. Pokud ale suma příspěvků proudů generovaných sekundárním světlem je v porovnání s proudovými příspěvky primárního světla zanedbatelná, nebude ve výsledném snímku LBIC rozeznatelná. Proto se zadní kontakty solárních článků objevují hlavně u snímků, kde výstupní celkový proud má velmi malou hodnotu a může být ovlivněn i proudem generovaným sekundárně emitovaným světlem.

### 3 METODA ELEKTROLUMINISCENCE

Elektroluminiscence je fyzikální děj, kdy při průchodu elektrickým proudem polovodičovým přechodem dochází k emitování světelného záření. Jak již bylo řečeno v kapitole o optických vlastnostech polovodiče, můžeme rozdělit polovodiče na polovodiče s přímým mezipásmovým přechodem a s nepřímým mezipásmovým přechodem. U polovodiče s přímým mezipásmovým přechodem, jako je AsGa, je při rekombinaci páru elektron-díra vysoká pravděpodobnost vyzáření fotonu o energie rovnající se šířce zakázaného pásu v místě přímého přechodu. Této vlastnosti se využívá u LED diod a polovodičových laserů. U polovodičů s nepřímým mezipásmovým přechodem se účastní při generačně-rekombinačních dějích kromě energii fotonů i fonony. Z tohoto důvodu tyto materiály nejsou vhodné pro optoelektroniku. Přestože je pravděpodobnost vyzáření fotonu při rekombinačních dějích u těchto polovodičů nižší a je tu větší neurčitost energie vyzářeného fotonu, lze tuto metodu použít pro generování světelné emise a pomocí ní analyzovat struktury polovodičových pn přechodů, jako jsou solární články.

Tato metoda umožňuje detekci materiálových a procesních defektů solárního článku. Ve výsledcích měření lze také pozorovat rozložení proudové hustoty v článku. Během měření je článek připojen ke zdroji napětí v propustném směru.

Detekce defektů a rozložení proudu ze snímku spočívá v rozlišení tmavých a světlých míst. Ideální solární článek by měl vykazovat konstantní proudovou hustotu v celé ploše přechodu a tím i jeho vyzářené světlo by mělo mít na celé ploše stejnou intenzitu. Místa s nižší intenzitou světla (malé tmavší body) indikují poruchu ve struktuře materiálu (nehomogenita difúzní vrstvy PN přechodu). Porucha může být dána nepravidelností ve struktuře monokrystalu. Naopak výrazně světlejší místa znázorňují oblasti s vyšší proudovou hustotou. Jak je vidět na snímcích, jde většinou o místa kontaktů se solárním článkem.



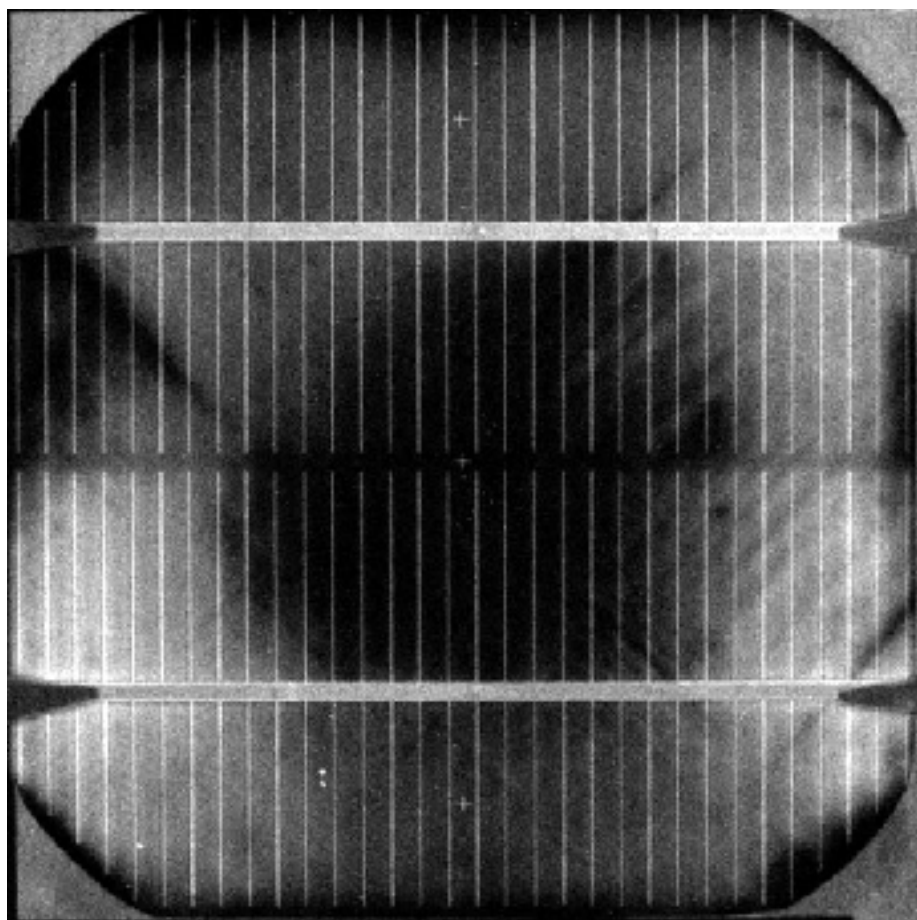
Obr. 3.1 Vírový defekt (Swirl Defect) – metoda elektroluminiscence

### 3.1 MATERIÁLOVÉ DEFEKTY

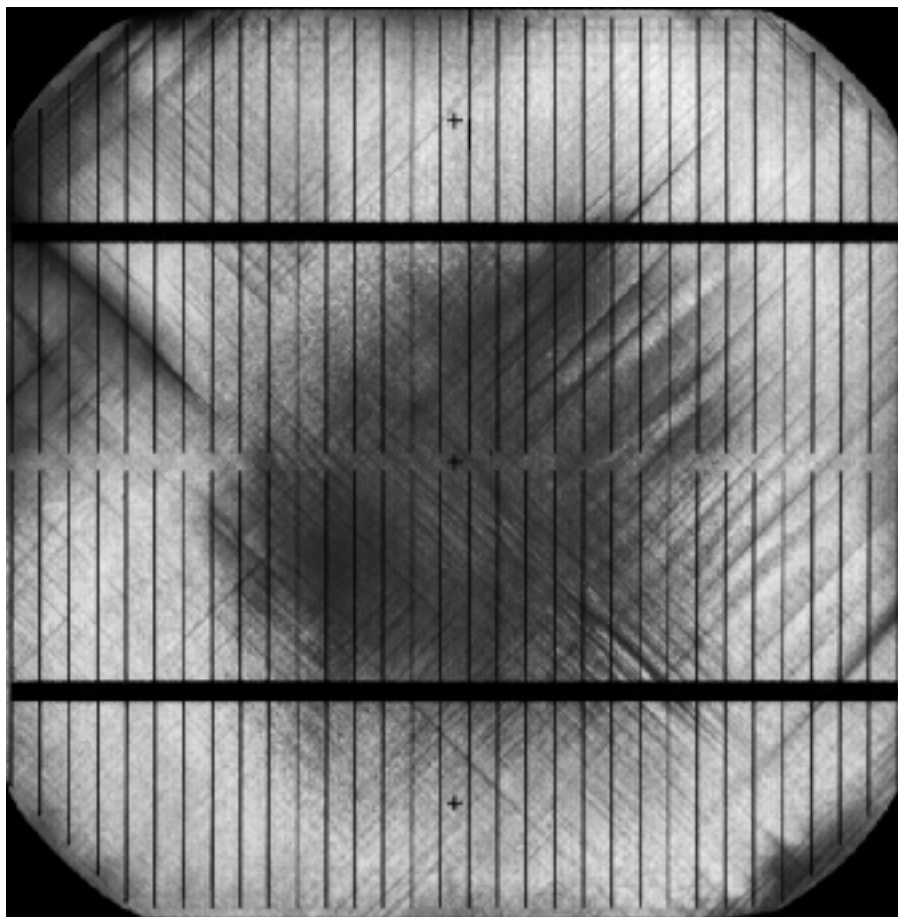
Mezi nejznámější materiálové defekty patří bezpochyby tzv. vírové defekty (Swirl Defects). Na výsledném snímku, viz Obr. 3.1, se tato vada projevuje ve formě soustředných kružnic. Ty vznikají již při samotné výrobě ingotu křemíku Czochralského metodou. Důvodem je vnik příměsí (nejčastěji kyslík) do taveniny křemíku. Přítomnost těchto defektů (soustředných kružnic) může způsobovat celou řadu nežádoucích vlastností. Mohou např. sloužit jako centra pro generaci – rekombinaci a tím zvyšovat závěrný proud PN přechodu. Také mohou snižovat dobu života minoritních nosičů náboje. [2].

Na Obr. 3.1 je vidět kromě popsaného vírového defektu i oblast zvýšené proudové hustoty v pravém horním rohu. Pro tento snímek byl nastaven elektrický proud článkem na 2 A a na kameře byl zvolen IR filtr. Díky tomu lze pozorovat již zmíněnou oblast vyšší proudové hustoty. Za povšimnutí stojí i vlastní tepelné vyzařování kontaktních pásků vedoucích vodorovně nad sebou.

Dalším materiálovým defektem, který je metodou elektroluminiscence zjištělný, je pnutí v materiálu, viz Obr. 3.2. Tento defekt vzniká také při výrobě ingotu křemíku. Je způsoben špatným řízením výroby (nerovnoměrným tuhnutím taveniny na monokrystalu). Pro měření byly použity stejné podmínky jako u Obr. 3.1, tj. proud 2 A, IR filtr. Na snímku je opět viditelné tepelné vyzařování kontaktních pásků. Pro porovnání je na Obr. 3.3 uveden snímek opět pořízený metodou LBIC.



**Obr. 3.2** Pnutí v materiálu – metoda elektroluminiscence



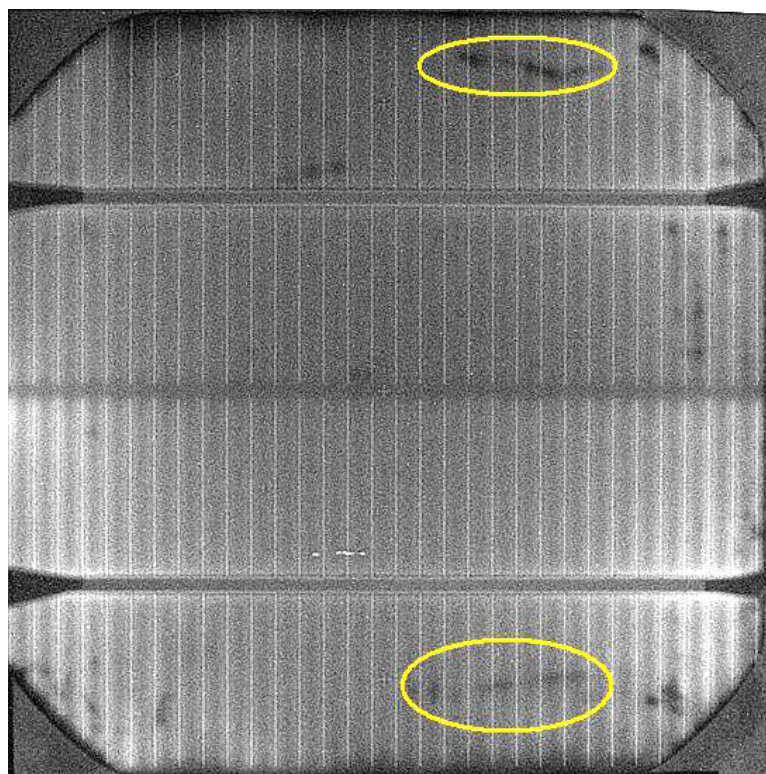
**Obr. 3.3** Pnutí v materiálu – metoda LBIC – IR barva

Všechny materiálové defekty jsou velmi nežádoucí tím, že se většinou vyskytují u celé série vyrobených článků z jedno velkého monokrystalu. Lze je eliminovat kvalitnějším řízením výroby monokrystalického křemíku.

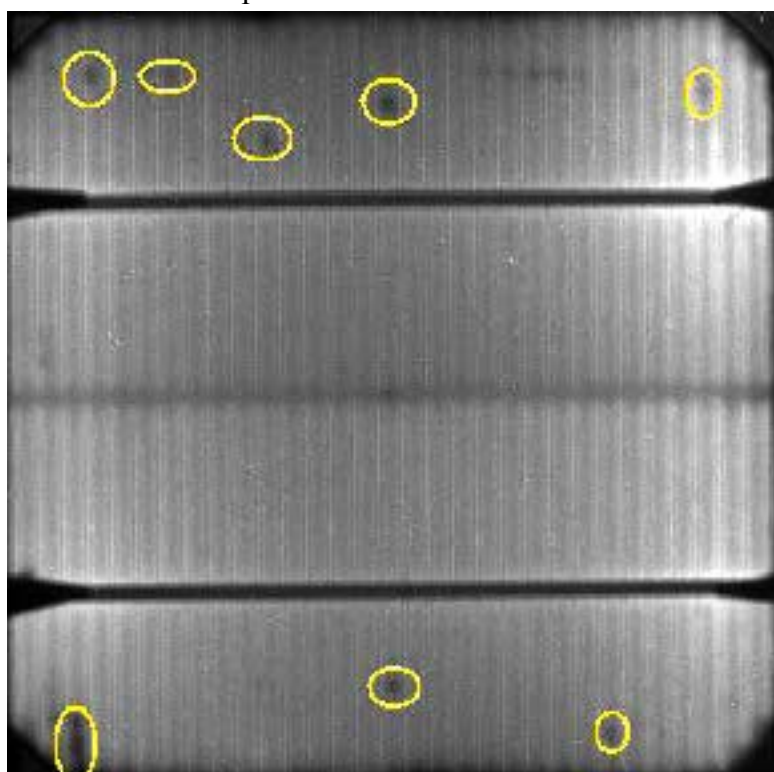
### **3.2 PROCESNÍ DEFEKTY**

Další skupinou defektů, které se u solárních článků vyskytují, jsou procesní defekty. Do této skupiny patří různá mechanická poškození při vlastní výrobě solárních článků. Především do této skupiny patří poškrábání povrchu, viz Obr. 3.4, nebroušené rohy a okrajové oštípnutí. Vznikají při výrobě neopatrnou manipulací, např. při zasouvání jednotlivých článků do zásobníku nebo posunem po pásu. Pro snímek byl zvolen proud 3 A a IR filtr. Větší škrábance patří mezi defekty, které jsou pozorovatelné okem při normálních podmínkách. Touto metodou však můžeme odhalit i ty menší, které nemusí být na první pohled viditelné. Na snímku jsou zvýrazněny žlutě. Každý škrábanec snižuje celkovou účinnost solárního článku. Aby bylo zabráněno vzniku těchto defektů, je potřeba dodržovat bezpečnostní opatření při manipulaci s články.

Posledním nejzávažnějším defektem ze skupiny procesních defektů, který byl studován metodou elektroluminiscence, je nehomogenita difúzní vrstvy, viz Obr. 3.5. Vzniká při vlastní výrobě PN přechodu difúzí fosforu vnikem nečistot do plynné směsi fosforu. Na obrázku jsou tyto defekty zvýrazněny žlutě.



**Obr. 3.4** Poškrábání povrchu – metoda elektroluminiscence

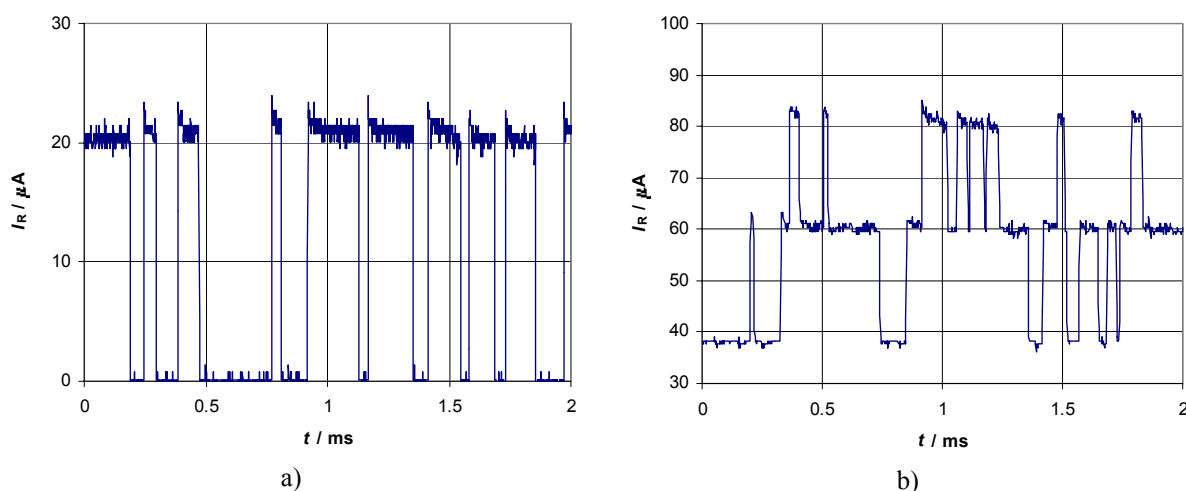


**Obr. 3.5** Nehomogenita difúzní vrstvy – metoda elektroluminiscence

## 4 METODA VYZAŘOVÁNÍ SVĚTLA Z MIKROPLAZMY

Tato metoda využívá vzniku lokálních center mikroplazmy v místech strukturálních defektů při napětí v závěrném směru blízcím se k průraznému napětí. Mikroplazma se neprojevuje pouze vyzářováním světelného záření, ale projevuje se i tzv. šumem mikroplazmy.

**Šum mikroplazmy** byl poprvé studován na křemíkových PN přechodech polarizovaných v závěrném směru. První informace o šumu tohoto typu byla dána v roce 1952 **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**54]. McKay **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**55] zjistil, že v nestabilním stavu je proud PN přechodem tvořen posloupností impulzů konstantní amplitudy a náhodné doby trvání a vzniku. Střední doba trvání impulzu závisí na závěrném napětí na přechodu. První impulzy jsou velmi úzké, při zvyšování závěrného napětí roste jejich šířka a tím i střední proud, až při dosažení určitého napětí je proud stabilní. Při vyšších napětích se může tento jev opakovat. McKay tento jev interpretuje jako výsledek lavinového průrazu přechodu v lokalizovaných oblastech, jehož následkem je vznik mikroplazmy. Toto vysvětlení bylo potvrzeno v roce 1958 v práci **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**56], ve které autoři pozorovali rekombinační záření z individuálních oblastí mikroplazmy v mělkých difúzních přechodech a jejich korelaci s bistabilním šumem. Ukázali také, že mikroplazma vzniká tam, kde dislokace protíná přechod.



**Obr. 4.1** Příklad časového průběhu a) dvoj-stavového šumu b) více-stavového šumu

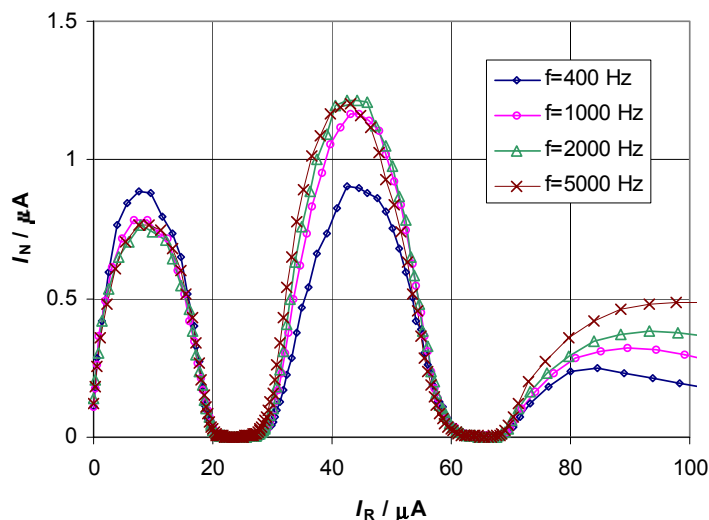
Chování VA charakteristiky přechodu s mikroplazmami je diskutováno v literatuře **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**57]. Je ukázán vliv zatěžovacího odporu v obvodu přechodu a kapacity paralelně připojené k přechodu. Je zdůrazněno, že části VA charakteristiky se záporným diferenciálním odporem jsou výsledkem měření střední hodnoty proudu a napětí na diodě.

První práce o mikroplazmě v GaAs PN přechodech je práce **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**58]. Všímá si však hlavně závislosti průrazného napětí na teplotě a na koncentraci nečistot.

Další stručná zpráva o mikroplazmě v GaAs diodách je v práci **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**59]. Autoři zjišťují, že se uvedené diody chovají v tomto směru obdobně jako PN přechody v Si. V práci **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**60] je sledován vztah mezi hustotou dislokací a hustotou oblastí mikroplazem u GaAs a je zjištěno, že jsou téhož řádu. Práce ukazuje, že pro výskyt mikroplazem v GaAs jsou nutné dislokace nebo srovnatelné mřížkové nedokonalosti.

Studium šumu luminiscenčních diod  $GaAs_{0,60}P_{0,40}$  ve zpětném směru při nehomogenním lavinovém výboji bylo provedeno v práci **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**61]. Při určitém napětí na diodě docházelo k emisi světla z malých oblastí a u většiny diod byl indikován šum mikroplazmy.

V dalším období je věnována pozornost hlavně nárazové ionizaci a jejím charakteristikám v souvislosti se studiem lavinových fotodiod, např. **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.62**]. Teoretický rozbor problémů spojených s nárazovou ionizací v polovodičích typu  $A^{III}B^V$  je proveden v práci **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.63**]. O materiálech  $GaAs_{1-x}P_x$  bohužel jak tyto informace, tak i informace o nehomogenním průrazu PN přechodu v literatuře prakticky chybějí.



**Obr. 4.2** Příklad proudového šumu  $I_N$  v závislosti na závěrném proudu  $I_R$

V naší literatuře se první informace o mikroplazmě v GaAsP diodách vyskytla v práci **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.65**]. Autor při vyšetřování průběhu závěrné větve VA charakteristiky diod zjistil u některých vzorků nespojitosti, které vykládá přítomností mikroplazmatických výbojů. Vyvozuje, že tato skutečnost je průkazem strukturální nedokonalosti a nehomogenity distribuce příměsí v polovodičovém systému.

Vznikající mikroplazmu lze detekovat několika způsoby:

- Měřením časového průběhu proudového šumu v závěrném směru (Obr. 4.1).
- Měřením UI charakteristik při použití napájení ze stabilního proudového zdroje.
- Měřením efektivní hodnoty úzkopásmového proudového šumu při napájení v závěrném směru proudovým nebo napěťovým zdrojem, Obr. 4.2.
- Měřením emise světelného záření z bodových defektů během formování mikroplazmatických výbojů.

Všechny tyto výsledky naznačují, že by se detekce světelné emise z mikroplazmy dala využít k detekci procesních defektů solárního článku, kdy v průběhu měření je článek připojen ke zdroji napětí v závěrném směru.

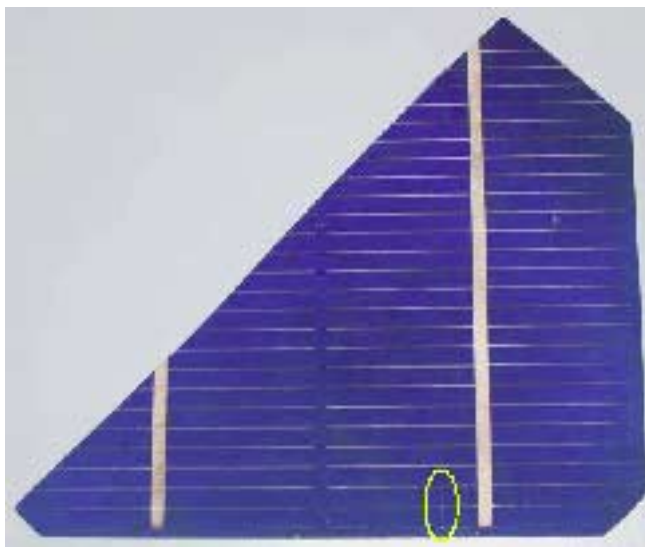
Princip vzniku emise světla z mikroplazmy je následující. V místech, kde dislokační porucha (nedokonalost krystalické mřížky) protíná PN přechod, dochází k lokálnímu lavinovému výboji, který je doprovázen šumem. Tento šum se objevuje při dostatečně velkých závěrných napětích, ale nižších, než je napětí lavinového průrazu. Velikost závěrného napětí potřebného k pozorování tohoto jevu je silně závislá na ploše článku, resp. dodaného výkonu do článku. Vznik mikroplazmy při výboji v polovodiči je obvykle doprovázen emisí světla, která je zachycena CCD kamerou a následně analyzována. V solárním článku jako plošném PN přechodu vzniká mikroplazma v mís-



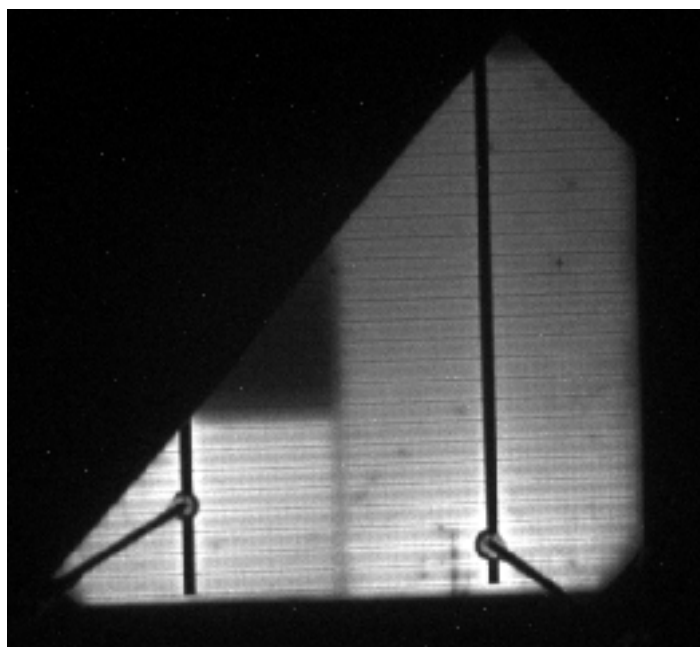
tech, ve kterých je PN přechod nehomogenní nebo je například poškozen. V oblasti mikroplazmy může protékat značně velký proud a tím způsobit lokální ohřev v takové úrovni, kdy může dojít ke zničení PN přechodu. Proto je nutné při této metodě pečlivě nastavovat závěrné napětí. Jinak může dojít k nevratnému poškození struktury PN přechodu a k znehodnocení celého článku. **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**68]

#### 4.1 ANALÝZA GRAFICKÉHO VÝSTUPU VÝSLEDKŮ DETEKCE EMISE SVĚTELNÉHO ZÁŘENÍ MIKROPLAZMY CCD KAMEROU.

Tato metoda byla v praxi zkoušena na zlomu solárního článku, viz Obr. 4.3, u kterého bylo možné akceptovat případnou úplnou destrukci v případě nevhodně nastaveného příliš vysokého závěrného napětí do oblasti tepelného průrazu.



**Obr. 4.3** Zlom testovaného solárního článku s okem viditelným poškozením



**Obr. 4.4** Elektroluminiscence testovaného solárního článku  
( $I_F = 2,3A$ ,  $t = 21\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t_{\text{CCD}} = -20\text{ }^\circ\text{C}$ )

Proměřovaný vzorek byl také zvolen z toho důvodu, že obsahuje výrazné mechanické poškození (škrábanec) v pravé spodní oblasti, které bylo vidět jak pouhým okem na samotném článku (Obr. 4.3), tak bylo spolu z dalšími defekty zaznamenáno pomocí dříve zmiňované elektroluminiscence (Obr. 4.4). Měření probíhalo do maximálního závěrného napětí 22,38 V a maximálního proudu 0,163 A. Na kameře byl zvolen IR filtr, který v porovnání s ostatními nejlépe eliminoval okolní šum. Teplota čipu byla nastavena na  $-20\text{ °C}$  a doba uzávěrky snímání kamery 30 s. Na sérii snímků, viz obr. 5.5 a obr. 5.6, je možné pozorovat postupné navyšování míst s výskytem mikroplazmy v závislosti na zvyšujícím se napětí.

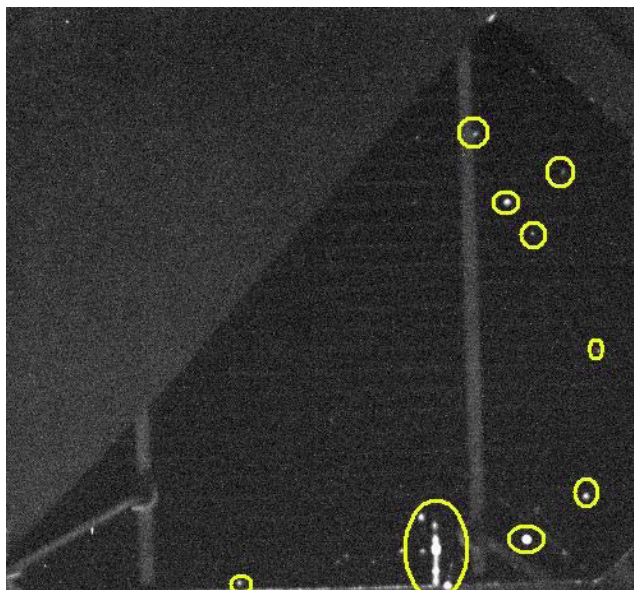


**Obr. 4.5** Emise světla z mikroplazmy, první zaznamenaný bod  
( $U_R = 5\text{ V}$ ,  $t = 21\text{ °C}$ ,  $t_{\text{CCD}} = -20\text{ °C}$ )

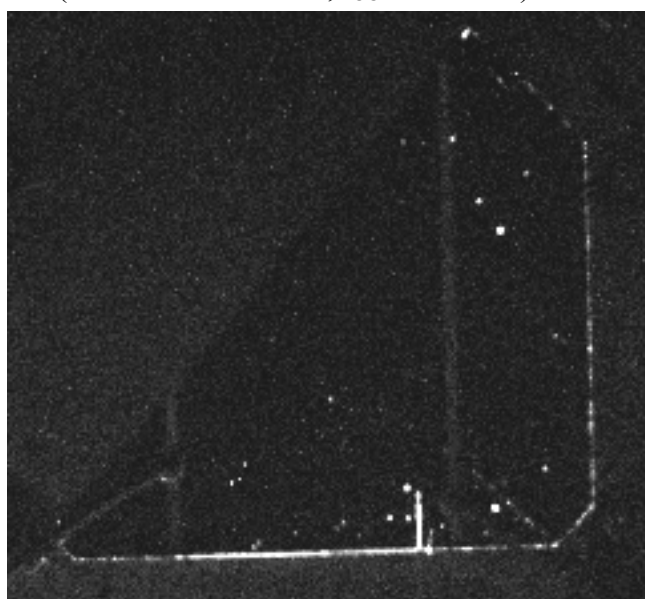


**Obr. 4.6** Emise světla z mikroplazmy, v snímku již lze pozorovat emisi světla z místa, kde se nalézá oblast viditelného poškrábání testovaného lomu solárního článku

( $U_R = 10 \text{ V}$ ,  $t = 21 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t_{\text{CCD}} = -20 \text{ }^\circ\text{C}$ )



**Obr. 4.7** Emise světla z mikroplazmy, zřetelně rozeznatelná emise světla z místa poškrábání  
( $U_R = 15 \text{ V}$ ,  $t = 21 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t_{\text{CCD}} = -20 \text{ }^\circ\text{C}$ )



**Obr. 4.8** Plně rozvinutá emise světla z mikroplazmy u testovaného lomu solárního článku  
( $U_R = 22,38 \text{ V}$ ,  $t = 21 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t_{\text{CCD}} = -20 \text{ }^\circ\text{C}$ )

Obr. 4.8 zobrazuje emisi světla z mikroplazmy při hraničních podmínkách závěrného napětí, (bylo stanoveno z UI charakteristiky daného lomu). Lze pozorovat jak emisi světla z oblasti zmiňovaného mechanického poškození povrchu solárního článku, tak lze pozorovat bodové zdroje mikroplazmy a několik dalších čárových zdrojů, které pravděpodobně budou reprezentovat další mechanické poškození povrchu v blízkosti PN přechodu. Dobře viditelné jsou dále mechanicky opracované hrany lomu solárního článku. Naopak samotná lomová hrana nevyzařuje světelné záření. Mechanické opracování (broušení) hran bývá většinou příčinou nadbytečného svodového proudu u většiny solárních článků a hrany solárních článků bývají jasně detekovatelným zdrojem emise záření z mikroplazmy.

## 5 ZÁVĚRY A DOPORUČENÍ

Tato práce se zaměřila na teoretické a experimentální studium generačně-rekombinačních dějů ve fotovoltaických mono- i polykrystalických křemíkových článkách.

Měření probíhalo na sadě technologicky různých křemíkových monokrystalických fotovoltaických solárních článků vyrobených na křemíku p-typu Czochralsky (Cz) (Bórem dopovaný na vnitřní měrný odpor od 1 do 3  $\Omega\text{cm}$ ). Byly vyhotoveny LBIC snímky těchto článků pro různé vlnové délky světla a byla navržena nejlepší metoda analýzy těchto snímků tak, aby byla zvýšena jejich vypovídací schopnost.

Zajímavým fenoménem objeveným v průběhu měření LBIC bylo zobrazování zadních kontaktů solárních článků. Tento fenomén byl vysvětlen teorií sekundární emise dlouhovlnného světelného záření, které přispívá k celkovému proudu zaznamenávanému metodou LBIC a díky své dlouhovlnné povaze má hloubku vniku do křemíkového substrátu několikrát vyšší než je samotná tloušťka solárního článku. Díky několikanásobnému odrazu je ale část energie tohoto záření absorbována substrátem a přispívá k celkovému proudu LBIC. Sekundární záření dopadající přímo do oblasti zadního kontaktu je absorbováno materiálem zadního kontaktu a přeměněno na tepelnou energii, která se nepodílí na celkovém fotovoltaickém proudu.

Další metody, které byly rozvíjeny a ověřeny, byly metody zachytávající CCD kamerou emisi světla z fotovoltaického článku při průchodu proudu v propustném směru (elektroluminiscence) nebo při přiloženém napětí (luminiscence mikroplazmy).

Výsledné snímky pořízené metodou elektroluminiscence jsou srovnatelné se snímky pořízenými metodou LBIC, ale lze je touto metodou získat několikanásobně rychleji. Zatímco vysoko detailní snímání metodou LBIC pro jeden snímek trvá přes několik hodin, obdobného výsledku lze dosáhnout metodou elektroluminiscence během několika sekund.

Nespornou výhodou metody LBIC je možnost modifikace na metodu LBIV a použití různých vlnových délek zdrojového světla, což umožňuje detailnější výzkum struktury a defektů zkoumaných solárních článků.

Pro účely, kdy je nutné naopak rozhodnout rychle o defektech ve struktuře solárních článků, je výhodnější použít metodu snímání elektroluminiscence, kdy snímání může probíhat na konci výrobního procesu každého solárního článku a rozlišení výsledného skenu je závislé pouze na zvoleném CCD čipu snímací kamery. Díky použití různých filtrů světelného záření je též u metody elektroluminiscence možné analyzovat charakter emitovaného záření a získávat tak detailní informace o mezipásmových přechodech náboje.

Poslední zkoumanou metodou byla emise světelného záření z mikroplazmy. Tato metoda umožňuje lokalizovat zdroje mikroplazmy, které vznikají v oblastech pn přechodu při závěrném napětí blízcím se k napětí lavinového průrazu PN přechodu a projevujícím se tzv. šumem mikroplazmy. Zkoumáním tohoto šumu a lokalizováním jeho zdroje lze analyzovat lokální poruchy struktury solárních článků a stanovovat jejich charakter a vliv na celkovou kvalitu, spolehlivost a životnost solárního článku.

Cílem této práce bylo:

- 1) Provést teoretický rozbor optických a fyzikálních charakteristik polovodičových materiálů a popsat procesy probíhající v průběhu testování parametrů solárních článků diagnostickými metodami využívajícími generačně-rekombinační procesy.
- 2) Pomocí vybraných vzorků fotovoltaických článků ověřit tyto metody a stanovit diagnostické postupy vhodné pro analýzu plošných vlastností defektů a struktur solárních článků.
- 3) Na základě získaných poznatků stanovit vhodnost testovacích metod solárních článků při různých podmínkách měření a jejich možné uplatnění v technologickém procesu.

Tyto cíle byly v této práci splněny a bylo ověřeno, že se dají generačně-rekombinační jevy použít pro testování kvality fotovoltaických křemíkových solárních článků. Pro zařazení do technologického procesu se nejvíce hodí metoda využívající elektroluminiscence, protože je velice rychlá a vzhledem k typu CCD čipu přesná. Z hlediska podrobnější analýzy solárních článků v laboratorním prostředí je vhodné tuto metodu doplnit o LBIC analýzu, která umožňuje detailnější analýzu. Metoda detekující luminiscenci mikroplazmy společně se šumovou diagnostikou šumu mikroplazmy umožňuje detekovat další lokální poruchy a stanovit jejich závažnost z hlediska kvality, spolehlivosti a životnosti solárních článků.

## REFERENCE

- [1] <http://www.worldenergy.org/>.
- [2] SZE, S. M. – NG, K. K.: *Physics of Semiconductor Devices*, Wiley, 2007.
- [3] PIERRET, R. F.: *Advanced Semiconductor Fundamentals*, vol. VI: Addison-Wesley, 1989.
- [4] TIEDJE, T. – YABLONOVITCH, E – CODY, G. D. – BROOKS, B. G.: “Limiting Efficiency of Silicon Solar Cells” *IEEE Trans. Elec. Dev.*, ED-31 (5), pp. 711–716, 1984.
- [5] MICHAELIS, W. – PILKHUN, M. H.: “Radiative recombination in silicon p-n junctions” *Phys. Stat. Sol. A*, 36 (1), pp. 311–319, 1969.
- [6] SCHLANGENOTTO, H. – MAEDER, H. – GERLACH, W.: “Temperature Dependence of the Radiative Recombination Coefficient in Silicon” *Physica Status Solidi*, 21a, pp. 357– 367, 1974.
- [7] GREEN, M. A.: *Silicon Solar Cells: Advanced Principles and Practice*, Sydney: UNSW, 1995.
- [8] DZIEWIOR, J. – SCHMID, W.: “Auger coefficients for highly doped and highly excited silicon” *Appl. Phys. Lett.*, 31 (5), pp. 346–348, 1977.
- [9] HANGLEITER, A – HÄCKER, R.: “Enhancement of Band-to-Band Auger Recombination by Electron-Hole Correlations” *Physical Review Letters*, 65 (2), pp. 215–218, 1990.
- [10] TYAGI, M. S. – VAN OVERSTRAETEN, R.: “Enhancement of Band-to-Band Auger Recombination by Electron-Hole Correlations” *Solid State Electronics*, 26 (6), pp. 577–579, 1983.
- [11] DZIEWIOR, J. – SCHMID, W.: “Auger coefficients for highly doped and highly excited silicon” *Appl. Phys. Lett.*, 31 (5), pp. 346–348, 1977.
- [12] SINTON, R. A. – SWANSON, R. M.: “Recombination in Highly Injected Silicon” *IEEE Trans. Elec. Dev.*, ED-34 (6), pp. 1380–1389, 1987.
- [13] ALTERMATT, P. P. – SCHMIDT, J. – HEISER, G. – ABERLE, A. G.: “Assessment and parameterisation of Coulomb-enhanced Auger recombination coefficients in lowly injected crystalline silicon” *J. Appl. Phys.*, 82 (10), pp. 4938–4944, 1997.
- [14] GREEN, M. A.: *Silicon Solar Cells: Operating Principles, Technology and System Applications*, Sydney: UNSW, 1982.
- [15] SHOCKLEY, W. – READ, W. T.: “Statistics of the Recombinations of Holes and Electrons” *Phys. Rev.*, 87, pp. 835–842, 1952.

- [16] HALL, R. N.: "Electron-Hole Recombination in Germanium" *Phys. Rev.*, 87, p. 387, 1952.
- [17] SCHRODER, D. K.: *Semiconductor Material and Device Characterization*: John Wiley and Sons, 1990.
- [18] WEI, S. – CHOU, M. Y.: Phonon Dispersions of Silicon and Germanium from First-Principles Calculations, *Phys. Rev. B*, 50, 190, 1955.
- [19] THURMOND, C. D.: The Standard Thermodynamic Function of the Formation of Electrons and Holes in Ge, Si, GaAs and GaP, *J. Electrochem. Soc.*, 122, 1133, 1957.
- [20] ALEX, V. – FINKBEINER, S. – WEBER, J.: Temperature Dependence of the Indirect Energy Gap in Crystalline Silicon, *J. Appl. Phys.*, 79, 6943, 1975.
- [21] DASH, W. C. – NEWMAN, R.: Intrinsic Optical Absorption in Single-Crystal Germanium and Silicon at 77°K and 300°K, *Phys. Rev.*, 99, 1151, 1955.
- [22] PHILIP, H. R. – TAFT, E. A.: Optical Constants of Silicon in the Region 1 to 10 eV, *Phys. Rev. Lett.*, 8, 13, 1962.
- [23] MELCHIOR, H.: *Demodulation and Photodetection Techniques*, Laser Handbook, Vol. 1, North/Holland, Amsterdam, 1972.
- [24] MÖLLER, H. J.: *Semiconductor for Solar Cells*, Artech House, 1993.
- [25] HENRY, CH.: Limiting Efficiencies of Ideal Single and Multiple Energy Gap Terrestrial Solar Cells, *J. Appl. Phys.* 51, 4494, 1980.
- [26] SHOCKLEY, W. – READ, W. T.: *Phys. Rev.*, Vol.87, p.835, 1952.
- [27] MILLER, W. A. – OLSEN, L. C.: *Proc. 17<sup>th</sup> IEEE Photovoltaic Specialists Conf.*, p. 768, 1984.
- [28] THEKAEKARA, M. P.: Data on Incident Solar Energy, *Suppl. Proc. 20th Annu. Meet. Inst. Environ. Sci.*, p. 21, 1974.
- [29] Principal Conclusions of the American Physical Society study Group on Solar Photovoltaic Energy Conversion, American Physical Society, New York, 1979.
- [30] HOVEL, H. J.: Solar Cells, in Willardson RK. and Beer, AC.: *Semiconductors and Semimetals*, Vol. 11, Academic, New York, 1975.
- [31] VOJTĚCHOVSKÝ, K.: Solární fotovoltaické systémy, *Obnovitelné zdroje energie*, FFC Public, 2001.
- [32] KRIEG, B.: *Elektrina ze slunce*, Ostrava, 1993.
- [33] BOUČEK, J.: *Sluneční energie*, *Obnovitelné zdroje energie*, Agrospoj Praha, 1993.
- [34] <http://ccd.mii.cz/art?id=321&cat=1&lang=405>.
- [35] <http://www.astronomik.com/english/enghome.html>.
- [36] SHAH, A.; PV techn., *Science*, 07/30/99, Vol. 285 Issue 5427, p. 692, 1999.
- [37] GREEN, M. A. – EMERY, K. – BUCHER, K. – KING, D. L. – IGARI, S.: *Prog. PV Res. Appl.* 6, 35, 1998.
- [38] GIROULT-MATLAKOWSKI, G. – THEDEN, U. – BLAKERS, A. W.: in *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> WC on PV Solar Energy Conversion*, J. Schmid et al., Eds. (EC, DGJRC, Ispra, Italy, pp. 3403–3406, 1998.
- [39] TASAKI, H. – KIM, W. Y. – HALLERDT, H. – KONAGI, M. – TAKAHASHI, K.: *J. Appl. Phys.* 63, p. 550, 1988.

- [40] MURTHY, R. V. R. – DUTTA, V.: *J. Non-Crystalline Solids* 197, pp. 250–253, 1996.
- [41] REEHAL, H. S. – LESNIAK, M. P. – HUGHES, A. E.: *J. Phys. D: Appl. Phys.* 29, pp. 934–938, 1996.
- [42] KIKKARIN, S. M. – MAKASHEV, B. N. – TAMENDAROV, M. F. – TOKMOLDIN, S. Z.: *Tech. Phys. Lett.* 23(2), pp. 147–148, 1997.
- [43] KIRBY, P. L.: *Electronic Components*, pp. 411–415, 1970.
- [44] JONES, B. K. – FRANCIS, J. D.: *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 8, pp. 1937–1940, 1975.
- [45] SHOCKLEY, W. – QUEISSER, H. J.: *J. Appl. Phys.* 32, pp. 510–519, 1961.
- [46] GUGGENBUHL, W. – STRUTT, M. J. O.: *Proc. IRE*, Vol. 45, No. 6, pp. 839–854, 1957.
- [47] ROBINSON, F. N. H.: *Electr. Eng.*, Vol. 41, No. 2, pp. 218–220, 1969.
- [48] UHLIR, A.: *Proc. IRE*, Vol. 44, No. 4, pp. 557–558, 1956.
- [49] VAN DER ZIEL, A. – BECKING, A. G. T.: *Proc. IRE*, Vol. 46, No. 3, pp. 589–594, 1958.
- [50] TONDON, J. L. – BILGER, H. R.: *J. Appl. Phys.*, Vol. 47, No. 4, pp. 1697–1707, 1976.
- [51] AMBRÓZY, A.: *Electronic Noise*, McGraw Hill, New York, Budapest, 1982.
- [52] WEBER, J.: *Phys. Rev.*, Vol. 90, No. 5, pp. 977–979, Vol. 94, No. 2, pp. 211–215, 1954.
- [53] BEAM, W. R.: *Electronic of Solids*, McGraw Hill, New York, 1965.
- [54] PEARSON, G. L. – SAWYER, B.: *Proc. Inst. Radio Engrs.*, vol. 40, p. 1348, 1952.
- [55] MCKAY, K. G.: *Avalanche Breakdown in Silicon. Phys. Rev.*, May 1954, vol. 94, no. 4, p. 877–884.
- [56] CHYNOWETH, A. G. – PEARSON, G. L.: *Effect of Dislocations on Silicon p-n Junctions. J. Appl. Phys.*, vol. 29, no. 7, p. 1103–1110, 1958.
- [57] HAITZ, R. H. et al.: *Avalanche Effects in Silicon p-n Junctions. I. Localized Photomultiplication Studies on Microplasmas. J. Appl. Phys.*, June 1963, vol. 34, p. 1581–1590.
- [58] KRESSEL, H. – BLICHER, A.: *Breakdown Voltage of Graded Gallium Arsenide p-n Junctions. J. Appl. Phys.*, Aug. 1963, vol. 34, no. 8, p. 2495–2497.
- [59] KEIL, G. – RUGE, J.: *Microplasma in GaAs Diodes. J. Appl. Phys.*, Aug. 1965, vol. 36, no. 8, p. 2600–2602.
- [60] MCCARTHY, J. P.: *Microplasma in Reverse-Biased p-n Junctions in Epitaxial GaAs. J. Appl. Phys.*, Jan. 1966, vol. 37, no. 1, p. 436.
- [61] HAZENDONK, T. J. – LODDER, A.: *Noise in Luminiscent GaAs<sub>0,60</sub>P<sub>0,40</sub> Diodes under Non-Uniform Avalanche Conditions – II. Sol. St. El.*, July–Aug. 1975, vol. 18, no. 7–8, p. 605–616.
- [62] ŠEVČÍK, L.: *Vliv anomální rekombinační kinetiky na emisní a VA charakteristiky elektroluminiscenčních diod na bázi GaAs<sub>1-x</sub>P<sub>x</sub>. Kandidátská disertační práce*, Brno, 1976.
- [63] ANDO, H. – KANBE, H.: *Ionization Coefficient Measurement in GaAs by Noing Multiplication Noise Characteristics. Solid-State Electronics*, vol. 24, 1981, pp. 629–634.
- [64] DMITRIJEV, A. P. – MICHAJLOVA, M. P. – JASSIEVIČ, I. N.: *Udarnaja ionizacija v poluprovodnikach A<sup>III</sup>B<sup>V</sup> i tvjordych rastvorach na ich osnove. Sbornik naučnych trudov pod redakcij Alferova Ž. J. i Šmarceva. Izdatelstvo Nauka, Leningrad, 1986, 296 s.*

- [65] KOKTAVÝ, P.: Šum mikroplazmy v luminiscenčních GaAsP diodách. Doktorská disertační práce, Brno, 2002. 130 p.
- [66] VANĚK, J. – BOUŠEK, J. – KAZELLE, J. – BAŘINKA, R.: Different Wavelengths of light source used in LBIC. In 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference. Dresden, Germany: WIP-Renewable Energies, 2006. s. 324–327. ISBN: 3-936338-20-5.
- [67] VANĚK, J. – FOŘT, T. – JANDOVÁ, K. – BAŘINKA, R.: Projection fo solar cell back side contact to the LBIC image. In EDS'07. Brno: TIMEART agency, 2007. s. 253–255. ISBN: 978-80-214-3470-7.
- [68] VANĚK, J. – KOKTAVÝ, P. – JANDOVÁ, K. – SADOVSKÝ, P.: Usage of micro-plasma signal noise for solar cells diagnostic. Proceedings of SPIE, 2007, roč. 2007, č. 6600, s. 17-1 (8 s.) ISSN: 0277-786X.



## **ABSTRACT**

This work deals with the summary of developed diagnostic testing methods based on generation-recombination effects which are taking place in solar cells and with the usability of this method in technological process of solar cells production. The method using scanning front solar cell surface by light beam and analyzing the response of induced current (LBIC); image analysis of solar cell luminescence during high current density (electroluminescence) in forward biased pn junction and luminescence during reverse biased PN junction (luminescence of microplasma) belong among these methods.

The theoretical part of work is intended to present the analysis of physical effects taking place in semiconductors during illumination of light, generation-recombination effects, physical aspects of solar cells PN junction and the physical science of PN junction generally. Furthermore there was the theoretical analysis of solar cell performed.

The practical part is dealing with description of diagnostic method using generation-recombination effects in solar cells and analyses the result of different type's solar cell measurement.