

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

*Edice PhD Thesis, sv. 659*

*ISSN 1213-4198*

*thesis*  
**?**  
**IS**

*Ing. Robert Macků*

**Analýza flukтуаčních procesů  
v solárních článcích**

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

**Ing. Robert Macků**

**Analýza flukтуаčních procesů v solárních člancích**

Analysis of Fluctuation Processes of Solar Cells

zkrácená verze Ph.D. Thesis

Obor: Fyzikální elektronika a nanotechnologie

Školitel: Doc. Ing. Pavel Koptavý, CSc., Ph.D.

Oponenti: prof. RNDr. Zdeněk Chobola, CSc.  
Doc. Ing. Jan Franc, DrSc.

Datum obhajoby: 25.1.2012

**Klíčová slova:**

Solární článek, šum  $1/f$ , mikroplazmatický šum, diagnostika, transport náboje.

**Keywords:**

Solar cell,  $1/f$  noise, microplasma noise, diagnostic, charge transport.

**Umístění:**

Disertační práce je uložena v centrální knihovně Vysokého učení technického v Brně.

© Robert Macků, 2012

ISBN 978-80-214-4523-9

ISSN 1213-4198

# Obsah

1 ÚVOD .....	5
2 SOUČASNÉ PŘÍSTUPY K CHARAKTERIZACI .....	5
3 CÍLE DISERTACE .....	6
4 ROZBOR TYPICKÉHO CHOVÁNÍ SOLÁRNÍCH ČLÁNKŮ .....	7
4.1 Technologické detaily vzorků .....	7
4.2 Sledování procesu stárnutí .....	8
4.3 Souhrn typického chování .....	8
5 EXPERIMENTÁLNÍ VÝSLEDKY STUDIA .....	9
5.1 Studium transportních charakteristik .....	9
5.1.1 Obvodový model solárního článku .....	11
5.1.2 Aktivační energie defektů .....	14
5.2 Rozlišení průrazných mechanismů s asistencí šumů .....	15
5.3 Lokální lavinové (Mikroplazmatické) průrazy .....	17
5.3.1 Korelace vyzařování a mikroplazmatických oblastí .....	18
5.4 Kapacitní charakterizace a diagnostika defektů .....	20
5.4.1 Extrakce parametrů lokálních defektů .....	20
5.5 Šumová diagnostika v propustném režimu .....	21
5.5.1 Modelování šumových procesů solárních článků v propustném režimu .....	22
6 ZÁVĚRY A PŘÍNOSY DISERTAČNÍ PRÁCE .....	25
7 POUŽITÁ LITERATURA .....	27
8 VYBRANÉ PRESTIŽNÍ ČLÁNKY AUTORA .....	27
9 ŽIVOTOPIS .....	29
ABSTRAKT .....	30



# 1 ÚVOD

Počátek solárních článků lze datovat do roku 1839, kdy Alexandre Edmond Becquerel objevil fotoelektrický jev. Až na počátku sedmdesátých let se solární články dostaly z výzkumných laboratoří a z kosmického prostoru i na zem. Současný technologický trend je zaměřen na volbu vhodného materiálu a odstraňování problémů způsobujících nárůst výrobních nákladů. V [1] lze najít, že v rámci světové produkce solárních článků je z 38 % používán monokrystalický křemík, z 46 % polykrystalický křemík, amorfni Si ze 4 %, CdTe z 2,7 %, a přibližně 9 % připadá na organické a ostatní materiály. V současné době je tedy 84 % produkce solárních článků založeno na krystalické křemíkové (tlustovrstvé) technologii.

Kritickým problémem je ale stále neúspěšný transfer známých laboratorních řešení do výrobních závodů (účinnost laboratorních křemíkových solárních článků  $\approx 25\%$ ), [2]. Záměr této disertační práce je poskytnout společnosti nové možnosti nedestruktivní charakterizace produkovaných solárních článků s využitím studia flukтуаčních procesů. Závěry mohou být využity pro určování kvality solárních článků a následné ovlivnění výrobních procesů. Speciální vlastností solárních článků je jejich značná plocha, v rámci které je nesmírně obtížné vytvořit strukturu zcela bez defektních oblastí. Chceme-li toto ovlivnit, je nutné pochopit procesy, které ve vzorcích pozorujeme, navrhnout jejich fyzikální podstatu a je-li to možné, následně reagovat změnou výrobních postupů. Pro diagnostiku bylo zvoleno studium flukтуаčních procesů, které do značné míry souvisejí s objemovou homogenitou, přítomností nečistot a mřížkových poruch. Mohou být také navrženy oblasti, ve kterých dochází k dominantnímu projevu fluktuací. Podobně lze charakterizovat i lokální oblasti, které jsou namáhány velkými proudovými hustotami a mohou vést k destrukci článků a snížení životnosti. Současná šumová diagnostika jako vědní obor se zabývá téměř výhradně diagnostikou a testováním komponentů s malou aktivní plochou, u kterých lze izolovaně sledovat konkrétní defekty, nikoliv složené projevy, které jsou typické pro solární články.

Závěrem tohoto odstavce je vhodné podotknout, že tato teze slouží spíše pro stručné seznámení se s problematikou a prováděným výzkumem. Poznatky a výsledky jsou podány informativně a v mnoha případech je lze považovat za silně nekompletní. V případě zájmu doporučuji k prostudování plnou verzi disertační práce.

## 2 SOUČASNÉ PŘÍSTUPY K CHARAKTERIZACI

Mezinárodní elektrotechnická komise standardizovala základní požadavky pro hodnocení kvality solárních panelů, solárních článků i substrátů ve svých normách IEC 61215, 61646 a IEC 61730. Více informací lze najít například v [3], [4] a na stránkách elektrotechnické komise [5]. Konvenční metody pro posuzování kvality v průběhu výroby křemíkových plátek se dají shrnout jako měření rezistivity před

a po krystalizaci, měření doby života, kontrola mechanických rozměrů, kontrola roztřepení hran a podobně. Tyto kontroly vyloučí pouze zásadní chyby, nekonstatují nic o budoucích elektrických vlastnostech ani spolehlivosti. V průběhu výroby solárních článků je rozsah testování také značně omezený. Nejprve probíhá leptání povrchu pro odstranění nečistot. To je kontrolováno obvykle opticky. Při difúzi (obvykle fosfor) je měřena rezistivita nanášené tenké vrstvy pro řízení doby difúze. Následně probíhá oxidace povrchu a je nanášen antireflexní povrch (nitrid křemíku SiNx). V provozu je měřena odrazivost jako doplněk pohltivosti pro řízení tloušťky antireflexní vrstvy. Kvalita nanášených kontaktů je také kontrolována převážně vizuálně. Po dokončení výroby jsou solární články podrobeny měření dodávaného výkonu pro různá osvětlení a jsou stanoveny parametry jako maximální výkon,  $P_{\max}$ , napětí na prázdno,  $U_{oc}$ , proud nakrátko,  $I_{sc}$  a někdy i sériový odpor. Testování určující kvalitu, spolehlivost nebo i životnost zcela chybí.

V poslední době se živým tématem testování kvality solárních článků stává měření elektroluminescence a fotoluminiscence, [4]. Elektroluminescence je měřena při propustně polarizovaných solárních člancích buzených vnějším napětím. Elektrická energie v tomto případě způsobuje vyzařování v infračervené oblasti. Lokální změny záření pak mohou nést informace o kvalitě vzorku. Pro testování křemíkových desek se využívá obdobná metoda založená na fotoluminiscenci, kdy je vzorek ozařován a sám se následně stává zdrojem záření s jinou vlnovou délkou. Obě tyto metody jsou v současné době stále více populární a poskytují informace o specifických problémech. Kriticky je nutno podotknout, že charakter defektu je kódován v lokální změně intenzity a není zde prakticky žádná možnost jak s jistotou tvrdit, že jde například o lokální zkrat. Informace, které tyto metody poskytují, jsou velmi cenné, ale jako vědecký diagnostický nástroj nedostatečné.

### 3 CÍLE DISERTACE

Smyslem mých prací započatých v roce 2007 bylo řešení problémů v oblasti nedestruktivní diagnostiky solárních článků. Klíčovým problémem se ukázalo nalezení charakterizační metodiky včetně kvalitativních indikátorů, zmapování poznatků, respektive technik, z příbuzných vědeckých oborů a fyzikální interpretace měřených charakteristik. V konečném důsledku je cílem práce aplikovat závěry výzkumu na solární články, získat informace o defektních oblastech, ukázat, které oblasti solárních článků jsou kritické z pohledu namáhání a kvality, a konzultovat případná opatření s výrobcem. Samostatným neméně významným cílem je rozšíření poznatků v oblasti základního výzkumu týkající se fyzikální podstaty defektů.

Zaměříme-li se detailněji na problematiku diagnostiky solárních článků, zcela neřešeným problémem je identifikace typů defektů. Nejsou známy flukтуаční a šumové procesy doprovázející strukturální nedokonalosti. Obecně lze očekávat problémy se zajištěním opakovatelnosti měření (ireverzibilní degradace) při elektrickém i optickém buzení. Cílem je i zajištění definovaného kontaktování bez poškození povrchových mikrostruktur, odvod tepla a optické stínění vzorků. Ovšem

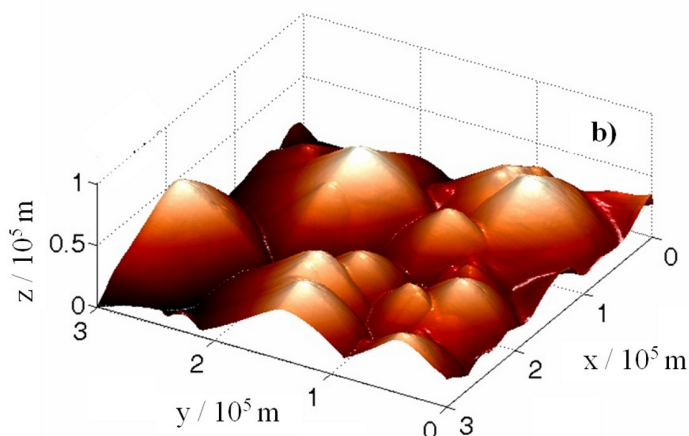
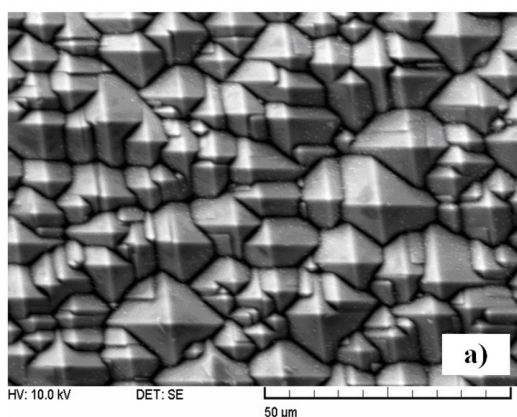
cílem je i nalezení techniky přípravy vzorků, kdy pro nalezení parametrů defektů je nezbytná jejich co možná největší izolace. Příprava naráží na dva problémy. Jednak prostorové odlišení konkrétní defektní oblasti a pak mechanické odstranění ostatních oblastí bez zanesení nežádoucích vlivů. Z tohoto důvodu bude velmi vhodné zjistit, zda je schůdné sledování optické aktivity defektních oblastí nedestruktivním způsobem a zda defekty budou navzájem rozlišitelné. Dílčí experimenty provedené na počátku studia vedly k dalšímu významnému cíli. Ukázalo se totiž, že diagnosticky zajímavých podmětů je u solárních článků enormní množství a není možné každý z nich detailně studovat. Logickým krokem je proto směřování výzkumu k nejčastěji pozorovaným jevům a bude proto v této práci operováno vždy s typickými projevy defektů. Později se velmi atraktivní ukázalo studium mikroplazmatického šumu. Této problematice bude věnována i relativně velká část této práce s cílem nalezení poměrů v lokalizovaných oblastech a jejich geometrie. U vzorků bude ale sledována řada flukтуаčních mechanismů a jejich vlivů na postupnou degradaci sledovaných parametrů.

Ke splnění uvedených cílů bude zapotřebí najít odpovědi na sadu dílčích avšak velmi důležitých otázek. Podrobněji jsou dílčí problémy rozebírány v nezkrácené verzi práce, a zde by bez uvedení do teoretických souvislostí neobjasnily záměry autora. V tomto stručném úvodu do problematiky se tedy spokojme pouze s obecným shrnutím.

## 4 ROZBOR TYPICKÉHO CHOVÁNÍ SOLÁRNÍCH ČLÁNKŮ

### 4.1 TECHNOLOGICKÉ DETAILY VZORKŮ

Námi zkoumané vzorky mají tloušťku ( $230 \div 250$ )  $\mu\text{m}$ . Substrát je tvořen polovodičem typu  $p$  s dotací bórem a je vytvářen Czochralského metodou; polovodič typu  $n$  je dotován fosforem v plynném prostředí. Povrchová struktura je pyramidální, jak ukazuje obr. 4.1a i 4.1b.



Obr. 4.1 Povrchová textura solárního článku: a) elektronový mikroskop (SEM), b) optický skenovací mikroskop (SNOM) – rychlost skenování 12  $\mu\text{m/s}$ .



Antireflexní povlak je realizován nitridovou vrstvou, šířka vyčerpané oblasti bez vnějšího působení je přibližně 0,6  $\mu\text{m}$ . Kontakty na čelní straně jsou formovány sítotiskem stříbrnou pastou. Zadní prstové kontakty jsou vyráběny kompoziční pastou Ag-Al a zbývající plocha je s využitím naprašovacího procesu pokryta hliníkem. Podrobnější informace jsou buďto tajné a výrobce odmítá sdělit nebo je zakazuje sdělit třetím osobám.

## 4.2 SLEDOVÁNÍ PROCESU STÁRNUTÍ

Samostatným problémem u studia solárních článků je jejich postupné stárnutí a změna parametrů. Byla publikována řada prací, které sledují degradační mechanismy při expozici záření jak v kosmu, tak i v terestrických podmínkách. I přes to, že převážná většina prováděných experimentů byla prováděna v opticky těsných komorách, byl na elektrických charakteristikách pozorován časový vývoj výsledků.

Tématicky tato problematika odlišná od analýzy flukтуаčních procesů, ale považují za důležité alespoň ve zkrácené formě upozornit na toto chování. V práci byl sledován např. vývoj úzkopásmového šumového signálu s časem  $I_n = f(t, U_R)$ , vývoj kapacity vzorku a vliv teploty. Ireverzibilní chování se podařilo u většiny vzorků potlačit snížením maximální přípustné proudové hustoty a preciznějším odvodem tepla z oblasti vzorku. Více informací je možné najít v nezkrácené verzi práce.

## 4.3 SOUHRN TYPICKÉHO CHOVÁNÍ

Podívejme se opět pouze na dílčí závěry ze sledování typického chování. Z rozboru jednoznačně víme, že šумы objemového charakteru jsou přítomny prakticky vždy (vyjma zcela defektních vzorků). S jistotou víme, že u různých vzorků jsou zcela odlišné šumové projevy (posuzováno na absolutní velikosti měřených signálů). Protože nadbytečné šумы jsou projevem výskytu nehomogenit, nadbytečného namáhání určitých oblastí a přítomnosti defektů, lze u různých vzorků hodnotit jejich kvalitu, popřípadě míru poškození. V této práci se proto budu zabývat i využitím objemových šumů a úsilí bude věnováno i lokalizaci oblastí.

Z rozboru také vyplynulo, že je často přítomný mikroplazmatický šum. Konkrétně v jeho případě je využitelná vlastnost snadné identifikace v časové oblasti. Navíc je znám i mechanismus vzniku a lze navázat na relativně komplexní výzkumné práce. Nutno podotknout, že se žádná z dostupných monografií nezabývá solárními články, a tak je velmi zajímavé doplnit znalosti v této oblasti.

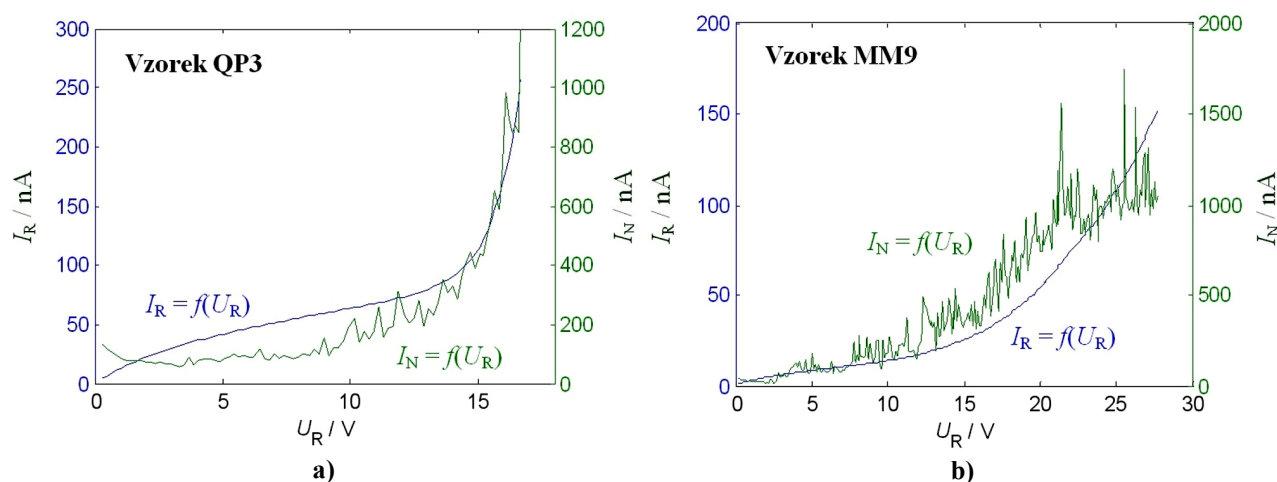
Další perspektivní oblastí studia je rozbor průrazných mechanismů. Bylo zjištěno že, u 63 % vzorků lze pozorovat průraz. Takto velký podíl těchto procesů je obecně velmi překvapivý a ukazuje na zásadní nedostatky ve struktuře. Bez ohledu na to jakým konkrétním způsobem je snížena životnost solárního článku, je velmi zajímavé sledovat zmíněné mechanismy.

## 5 EXPERIMENTÁLNÍ VÝSLEDKY STUDIA

Experimentálnímu studiu předcházelo relativně rozsáhlé teoretické studium fyziky pevných látek a aplikace poznatků na solární články. Tato zajímavá oblast je v plném rozsahu uvedena v nezkrácené verzi disertace, stejně tak jako technické detaily týkající se experimentálních metod a aparatur. Experimentální výsledky jsou zde prezentovány ve velmi omezeném rozsahu.

### 5.1 STUDIUM TRANSPORTNÍCH CHARAKTERISTIK

Zvláště byly sledovány charakteristiky v přímém a zpětném směru a speciální skupinu tvoří i vzorky s průrazy v charakteristikách. Měřením bylo zjištěno, že sada vzorků vykazuje závěrné charakteristiky odpovídající vodivým kanálům. Přitom zde nedochází k jejich vzniku průrazem, ale jsou přítomny již při velmi malých intenzitách elektrického pole. Další skupinu tvoří vzorky, u kterých je pozorován průraz. Vyjma přirozeného homogenního průrazu, pozorujeme i prudké zlomy s následným nárůstem proudu. Pravděpodobně dochází k výraznému ohřevu polovodiče a deformaci VA charakteristik, které bez znalosti lokální teploty nelze numericky korigovat. Do poslední skupiny, bychom mohli zařadit vzorky, u kterých je pozorována hladká VA charakteristika evidentně bez vznikajících průrazů, ale s možným vývojem mechanismu vedení proudu. Jejich popis je možný, jen na základě elektrických modelů.

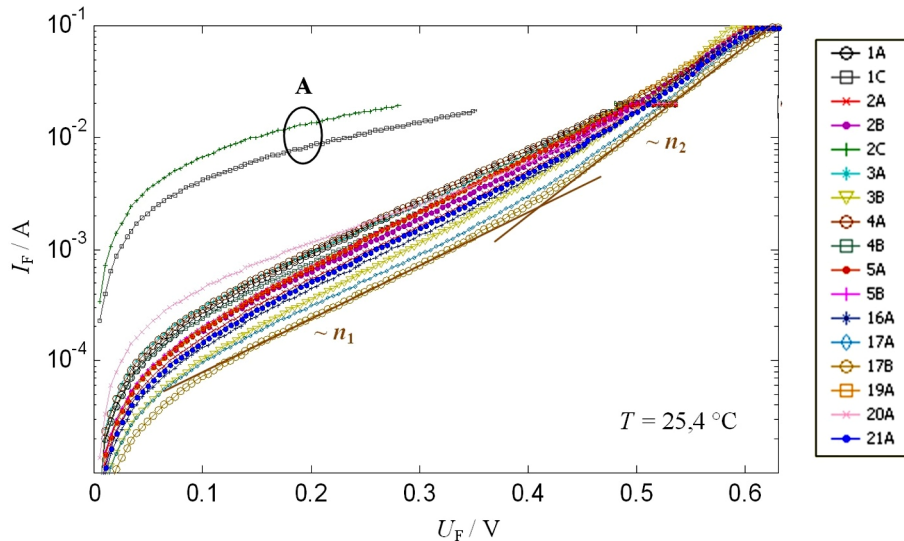


Obr. 5.1 a) Sledování úzkopásmového šumového signálu u vzorků, kde dochází k homogennímu průrazu přechodu. b) Vzorky s postupným nárůstem proudu ve VA charakteristice a jejich šumové projevy. Středním kmitočet detektoru je 478 Hz s šumovou šířkou pásma 87 Hz.

Spojíme-li měření transportních charakteristik s měřením úzkopásmového šumového signálu, pozorujeme průběhy jako na obr. 5.1. Můžeme sledovat projevy homogenního průrazu. Postupně dochází k nárazové ionizaci a lavinovému průrazu a přitom roste i lavinový šum. I když je homogenní průraz v principu nedestruktivní proces, opakovatelnost měření je nízká. Pravděpodobně zde totiž dochází k tepelné degradaci. Dále rozlišujeme objemové mechanismy (nehomogenity) a více či méně lokalizované defekty vytvářející vodivé kanály. Varianta obr. 5.1a ukazuje vzorek,

u kterého je pozorován objemový šum, na obr. 5.1b jsou navíc přítomny píky odpovídající lokálním průrazům. Zda jde skutečně o objemový fenomén je potvrzováno sledováním vyzařování z oblastí  $pn$  přechodů vzorků (aparatura využívající citlivou CCD kameru). U lokalizovaných defektů bylo zjištěno, že před vznikem kanálu šumový proud charakterizuje vzorek jako celek. Avšak po vytvoření kanálu je protékající proud obvykle v řádu desítek až jednotek  $\mu\text{A}$ . Defektní oblast je velmi malá a dochází k nárazové ionizaci a lokálním lavinovým průrazům. V časové oblasti můžeme pozorovat nejprve mikroplazmatický šum a po trvalé ionizaci lavinový šum kanálem. Úzkopásmová šumová charakteristika vykazuje prudké píky odpovídající bistabilní proudové fluktuaci.

V souvislosti s defekty byly zkoumány i části charakteristik v propustném režimu. Bylo zjištěno, že v této oblasti nelze pozorovat, žádné projevy lokálních defektů. Objemové nehomogenity ovlivňují charakteristiky v celém jejich rozsahu. Některé zcela defektní vzorky (viz obr. 5.2), nevykazují exponenciální ale rezistivní charakter vedení proudu. Dále bylo zjištěno, že se v případě velkých propustných proudů prakticky vždy uplatňuje sériový odpor,  $R_s$ , v rozsahu  $(0,05 \div 3) \Omega$ .



Obr. 5.2 Semilogaritmické zobrazení VA charakteristik v propustném režimu (měření za pokojové teploty v temném prostředí).

Dále bylo zjištěno, že u většiny vzorků, jsou v charakteristikách přítomny dvě zdánlivé exponenciální oblasti s různou strmostí. To napovídá postupně rekombinačním procesům a difúzním procesům. Bod obratu je obecně těžko definovatelný, ale pohybuje se okolo  $U_F = 400 \text{ mV}$ . Počítačovou aproximací charakteristik byly zjištěny koeficienty ideálnosti, jak ukazuje následující tabulka.

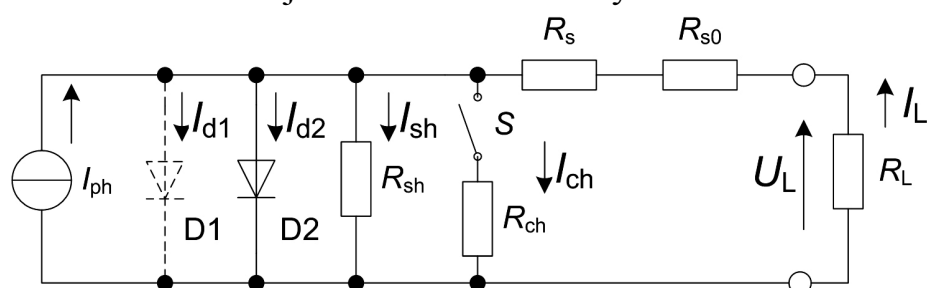
Tab. 5.1 Koeficienty ideálnosti vybraných vzorků získané z počítačové aproximace experimentálních charakteristik z obr. 5.2

	1A	2A	2B	3A	3B	4A	4B	5A	5B	16A	17A	17B	19A	20A	21A
$n_1$	3,39	3,48	3,39	4,05	3,31	3,62	3,62	3,25	3,22	3,39	3,68	3,61	3,28	5,14	3,39
$n_2$	2,29	2,59	2,34	2,26	2,03	2,82	2,35	2,14	2,27	2,56	2,40	2,37	2,76	3,03	2,46

### 5.1.1 Obvodový model solárního článku

Souvislost flukтуаčních procesů s transportními mechanizmy a elektrickým modelováním chování spočívá v možném nalezení závislosti  $S_i = f(I)$ , kde  $I$  představuje budicí proud defektní oblasti. Je tedy nutné rozlišit přirozené vedení proudu  $pn$  přechodem od nadbytečných proudů objemovými, případně lokálními oblastmi.

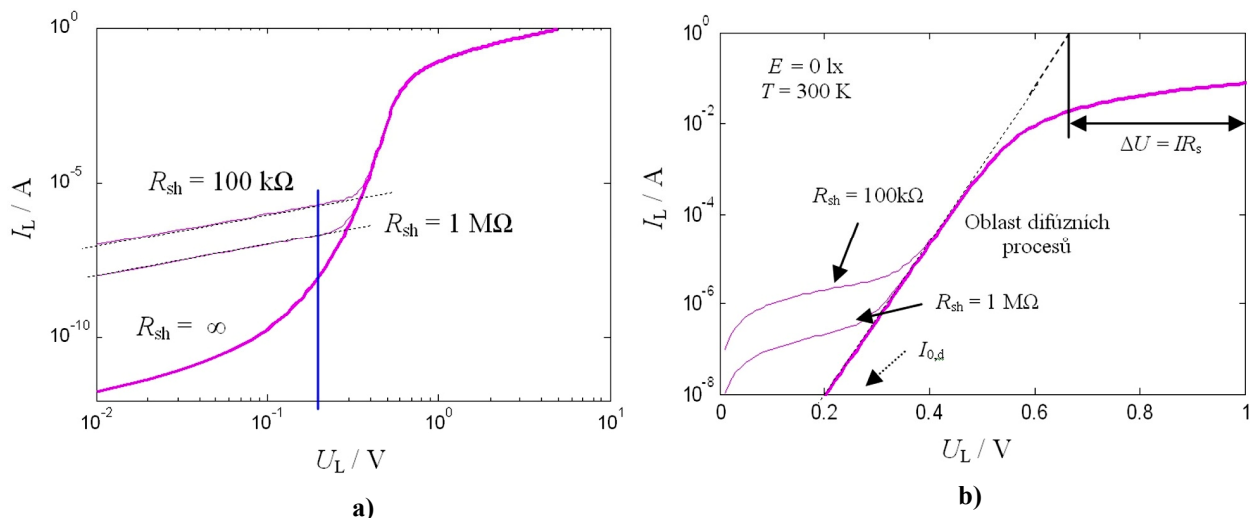
U solárních článků se běžně udává napětí naprázdno,  $U_{oc}$ , a proud nakrátko,  $I_{sc}$ . Oba tyto parametry jsou obecně funkcí teploty,  $T$ , a intenzity (výkonu) dopadajícího záření  $E$ . Experiment popisující tyto závislosti byl demonstrován v plné verzi disertace. Lze říci, že závislost  $U_{oc} = f(E, P)$  není významná a nárůst teploty způsobí pokles  $U_{oc}$ . Naopak proud nakrátko je přímo úměrný intenzitě osvětlení a jen málo závisí na teplotě. Solární článek se pak chová jako zdroj proudu a je tak i velmi často modelován. Na obr. 5.3 je znázorněn sestavený model solárního článku.



Obr. 5.3 Ekvivalentní náhradní model solárního článku

Model dává do relace dva vstupní parametry, což je intenzita dopadajícího záření  $E \propto I_{ph}$  a pracovní teplotu,  $T$ , (uvažováno v modelu diody) a dva výstupní parametry, tedy napětí na zátěži,  $U_L$ , a proud zátěži,  $I_L$ . Diody D1, D2 představují ideální  $pn$  přechod solárního článku. Každá z těchto diod přitom vyjadřuje vedení proudu jiným mechanismem (difúze, generace-rekombinace nosičů). Je-li to vhodné, pracuje se pouze s tou, která přispívá dominantně. Rezistor,  $R_{sh}$ , vyjadřuje svodový proud objemem, okrajů solárního článku a rekombinaci na povrchu solárního článku;  $R_{ch}$  pak proud defektním vodivým kanálem. Ten může být aktivován až po dosažení jistého elektrického pole, což je modelováno spínačem S. Tato větev nemusí být uvažována, nedochází-li k aktivaci kanálu ve zkoumané oblasti. Rezistory  $R_s$ ,  $R_{s0}$ , vyjadřují sériové odpory styku polovodič-kontakt, kontaktů a přívodních kabelů.  $R_L$  je zatěžovací rezistor, na němž je měřeno napětí  $U_L$  a proud  $I_L$ . Pomocí Kirchhoffova zákona můžeme sestavit obvodovou rovnici solárního článku. Tato rovnice je transcendentní rovnicí pro námi hledaný proud  $I_L$ . Řešení je možné iterativním způsobem, pomocí Lagrangeova inverzního teorému, [6], a nebo s využitím Lambertovi W-funkce  $\mathbf{W}(x)$  jak je navrženo v disertační práci.

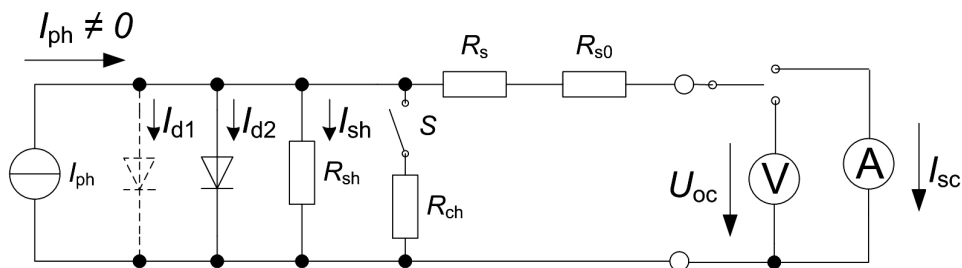
Obrázky 5.4 a 5.5 demonstrují vliv jednotlivých parametrů obvodu na VA charakteristiku v logaritmickém a semilogaritmickém zobrazení zvláště pro propustnou a závěrnou část charakteristiky.



**Obr. 5.4** Numerická simulace VA charakteristiky solárního článku, propustný směr. a) Studium vlivu svodového odporu. b) Část charakteristiky a posouzení exponenciálního úseku difúzního vedení proudu. Parametry modelu:  $T = 300 \text{ K}$ ,  $n = 1$ ,  $I_{ph} = 0 \text{ A}$ , použita situace popisovaná rovnicí (5.4).

Obrázek 5.4a názorněji ukazuje vliv svodového odporu na VA charakteristiku. Rezistorům  $R_{sh} = 100 \text{ k}\Omega$ ,  $R_{sh} = 1 \text{ M}\Omega$  odpovídají lineární úseky do napětí přibližně 200 mV. Směrnice těchto přímk odpovídají uvedeným odporům. Je zřejmé, že pro sledování  $R_{sh}$  je nutné měřit VA charakteristiky v oblasti malých proudů a malých napětí. To je technicky velmi limitující. Dle teorie, ale také očekáváme dvě oblasti, kdy je dominantní nejprve rekombinace a následně difúze. Je-li ale vedení proudu svodovým odporem dominantní, pak maskuje rekombinaci a určení  $n_1$  je chybné. Obrázek 5.4b opět ukazuje propustnou část VA charakteristiky solárního článku, tentokrát v semilogaritmickém zobrazení. Díky exponenciální závislosti difúzního procesu je nyní odpovídající úsek zobrazen lineárně. Směrnice nyní odpovídá exponentu jednoho exponenciálního členu v obvodové rovnici. V závislosti na transportním mechanismu můžeme tedy sledovat lineární oblast s různým sklonem, který charakterizuje zmíněný koeficient  $n$ .

Nejednoznačnost určení transportních mechanismů vedla ke snaze najít způsob jak experimentálně co nejvíce potlačit vliv parazitních parametrů solárních článků. Ukázalo se vhodné studovat vzorky s co nejmenší plochou (omezení počtu defektů). Dále byla diskutována filozofie měření. U solárního článku, kde je  $pn$  přechod přístupný optickému buzení se nabízí zajímavá varianta měření VA charakteristik. Jde o měření při proměnném optickém buzení, kdy je v bodě zátěže sledováno napětí na prázdko,  $U_{oc}$ , a proud na krátko,  $I_{sc}$ . Označme tento způsob jako měření VA charakteristiky vlastního  $pn$  přechodu. Uspořádání je na obr. 5.5.



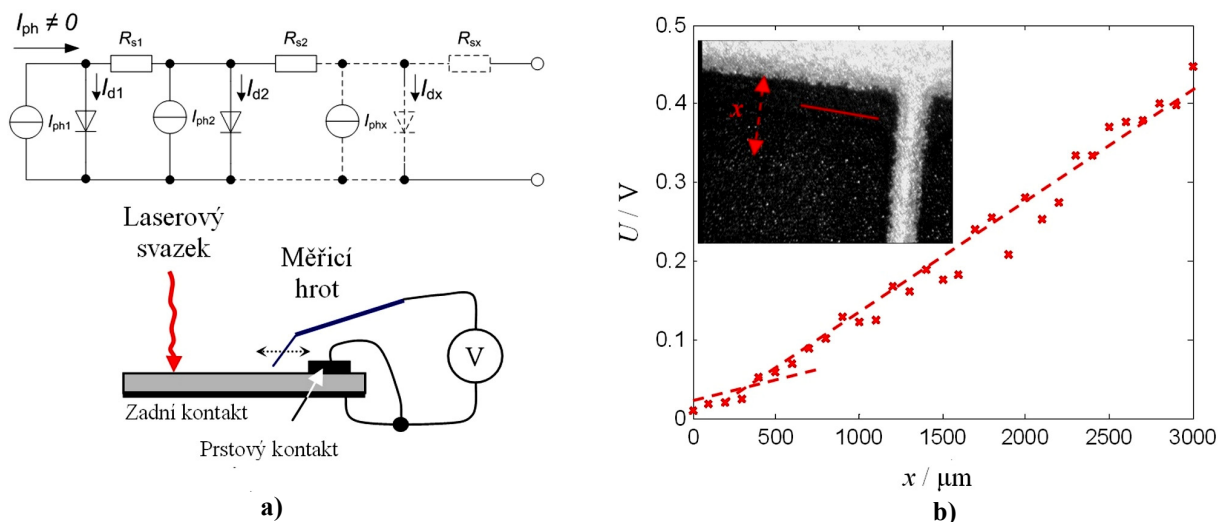
**Obr. 5.5** Měření transportní charakteristiky solárního článku při proměnném optickém buzení.

Měřením zmíněných veličin se při této konfiguraci neuplatní sériová kombinace rezistorů  $R_s$ ,  $R_{s0}$ , a potlačí se i vliv svodových proudů. Získaná charakteristika je pak výrazně více příbuzná rekombinační a difúzní teorii. Intenzita budícího záření přitom nemusí být známa. Grafickým výstupem je  $I_{sc} = I_{ph} = f(U_{oc})$  a je možné získat charakteristiku pouze v prvním kvadrantu, tedy přímý směr.

### Problematika distribuce sériového odporu

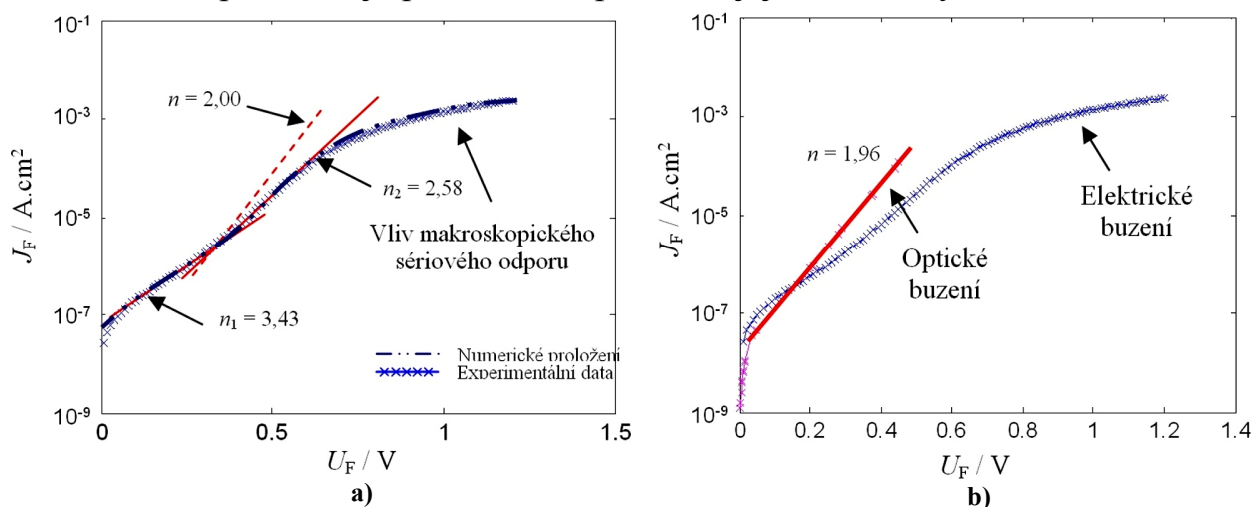
Netypické velikosti koeficientu ideálnosti dále vedly k popisu procesů ovlivněných sériovým odporem. Zavedme model solárního článku do širších souvislostí. Solární článek je plošně osvětlen, je generován proud,  $I_{ph}$ , svodové proudy zanedbáme a sériové odpory mějme  $0,5 \Omega$  a  $5 \Omega$ . Skutečné maximální napětí zdroje proudu v modelu (viz obr. 5.3), je rovno  $U_{diff}$ , které se prakticky pohybuje okolo  $0,6 \text{ V}$ . Měříme-li proud na krátko,  $I_{sc}$ , pak u prvního vzorku bude napěťový úbytek na sériovém rezistoru při ozáření konstantní intenzitou  $E_1$  např.  $0,5 \Omega \cdot 0,2 \text{ A} = 0,1 \text{ V}$ , u druhého hypoteticky  $5,0 \Omega \cdot 0,2 \text{ A} = 1 \text{ V}$ . Zdroj fotoproudu ale nedisponuje takovýmto napětím a tedy již nepracuje v režimu konstantního proudu. Tedy  $I_{sc} \neq I_{ph}$  pokud je velký sériový odpor a značná intenzita osvětlení. Byl proveden následující experiment. Jeden z kontaktů byl spojen se zadním kontaktem, laserem byl indukován fotoproud a posuvným hrotem bylo měřeno rozložení napětí směrem ke kontaktu. Popis experimentu je na obr. 5.6a. Dále na obr. 5.6b je ukázána výsledná charakteristika. Poznamenejme, že v blízkosti prstového kontaktu je i opticky patrná oblast se zvýšenou dotací  $n^{++}$ .

V případě plošného ozáření je nutné vzorek podrobit tzv. segmentování. Vznikají elementární zdroje proudu různě vzdáleny od kontaktu, sériové odpory jsou různé a proudová hustota v polovodiči roste spolu s úbytkem směrem ke kontaktu. Zavedme tedy pojem "rozprostřený sériový odpor". Elektrický model rozšířený o vliv rozprostřeného sériového odporu při plošném buzení je taktéž na obr. 5.6a.



Obr. 5.6 a) Schématické znázornění experimentu a obvodový model solárního článku. b) Závislost napětí na poloze hrotu a ukázka vzorku s naznačeným pohybem z optického mikroskopu. Vzorek 32\_1,  $T = 26 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Problém s distribuovaným sériovým odporem ovšem nastává i v případě temného prostředí a proudovým buzením. V tomto případě je navíc připočten vliv odporu metalických kontaktů a styku kov – polovodič. Ze zřejmých důvodu je vhodné použít buzení optické, nejlépe lokální, a porovnat jej s elektrickým měřením.



Obr. 5.7 a) Experimentální měření propustné části charakteristiky vzorku K4 v temném prostředí. Charakteristika byla proložena funkcí (5.4). b) Totožné měření vzorku K4 doplněné o optické měření.

Byly provedeny následující experimenty. U vzorku K4 byla v temném prostředí měřena statická VA charakteristika. V souladu se závěry s obr. 5.2 byly v semilogaritmickém zobrazení pozorovány dvě lineární oblasti a projevil se zdatelně i vliv sériového odporu. Tento jasně pozorovatelný jev vzniká v důsledku makroskopického působení sériového odporu, kdy již prostorová distribuce nehraje prakticky žádnou roli,  $pn$  přechody jsou otevřeny a měření je pouze odpor materiálu.

Zajímavé je ale zjištění z opticky excitované charakteristiky. Byl použit laser 635 nm a optický atenuátor. V tomto případě zcela zanikla dvojice lineárních úseků a jediný úsek dle koeficientu ideálnosti výborně odpovídá rekombinačním procesům. Počáteční zakřivení je tedy výsledkem vedení svodových proudů.

### 5.1.2 Aktivační energie defektů

Spolehlivost i účinnost solárního článku do značné míry koresponduje s dobou života nosičů náboje. Ta je negativně ovlivněna jednak častějšími kolizemi s krystalickou mříží při nárůstu teploty a přítomností defektů (dislokace, vakance apod.). Dochází tedy k Augerově rekombinaci, [7], popřípadě k zachycení a následné rekombinaci na hladině pastí. Vzhledem k tomu, že současnou motivací je nalezení bližší specifikace objemové rekombinace (popis rekombinačního šumu, popřípadě šumu  $1/f$ ) ve vyčerpané oblasti, budou měření prováděna u vzorků bez zřejmých lokálních defektů. Hledáme parametry  $I_{02}$ ,  $n_2$  a  $R_{sh}$ . Pro saturační proud  $I_{02}$ , platí:

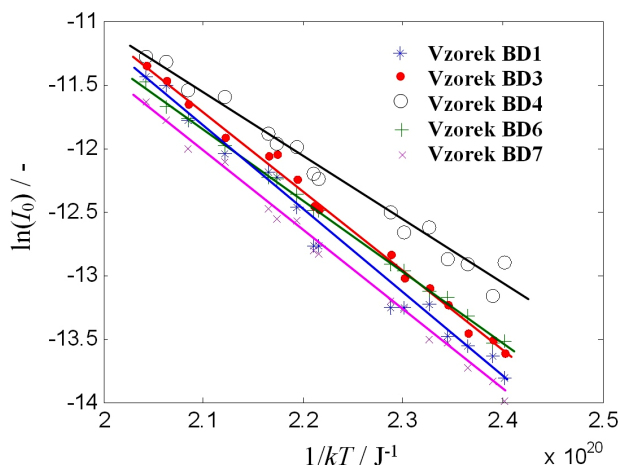
$$I_{02} = \frac{en_i dS}{\tau_{ef}} \quad (5.1)$$

Vztah vyjadřuje integrální proud celým  $pn$  přechodem a veličina  $\tau_{ef}$  vyjadřuje efektivní dobu života, která je funkcí množství pastí, jejich aktivního průřezu a především jejich polohy v zakázaném pásu. Podle [8] pro  $\tau_{ef}$  platí:

$$\tau_{ef} = \left[ S_n e^{\frac{E_T - E_i}{kT}} + S_p e^{\frac{E_i - E_T}{kT}} \right] \left[ S_n S_p v_t N_t \right]^{-1} \quad (5.2)$$

Zde  $S_n$ ,  $S_p$  představují aktivní průřezy pastí,  $v_t$  tepelnou rychlost elektronů a děr,  $E_i$  intrinzickou energetickou hladinu,  $E_T$  hladinu pastí a  $N_t$  koncentraci rekombinačních center. Sledováním teplotní závislosti saturačního proudu  $I_0(T)$  a vhodnou úpravou vztahu (5.1) s kombinací (5.2) můžeme sledovat lineární závislost se směrnicí úměrnou  $\pm (E_T - E_i)$ . To je znázorněno na obr. 5.8.

Je zajímavé, že v případě vzorku BD4 je směrnice lineární závislosti výrazně odlišná od ostatních vzorků. Proložení bylo provedeno opět v programu Matlab, získané hodnoty energií g-r center jsou i pro další vzorky shrnuty v tab. 5.2. Hodnoty energií  $E_{T1}$  a  $E_{T2}$  odpovídají totožné hladině pastí umístěné v blízkosti vodivostního pásu, popřípadě hluboko nad valenčním pásem.



Obr. 5.8 Logaritmičká reprezentace saturačního proudu g-r procesu.

Tab. 5.2 Určení možných aktivačních energií g-r center různých vzorků solárních článků.

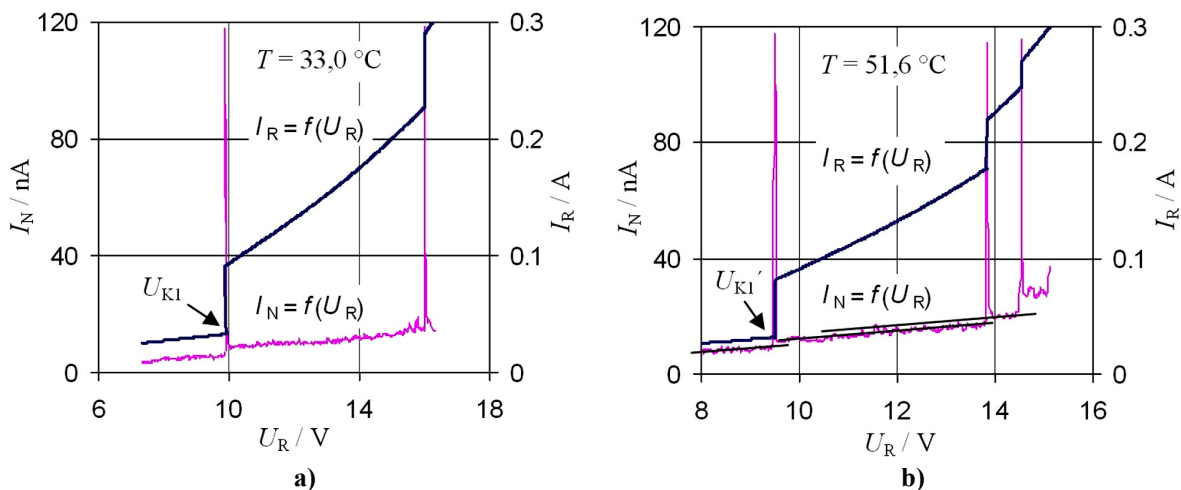
Vzorek	$ E_T - E_i  / eV$	$E_{T1} / eV$	$E_{T2} / eV$
BD1	0,409	0,151	0,969
BD3	0,392	0,168	0,952
<b>BD4</b>	<b>0,315</b>	<b>0,245</b>	<b>0,875</b>
BD6	0,350	0,210	0,910
BD7	0,397	0,163	0,957
Sxx7	0,399	0,161	0,959
K21	0,364	0,196	0,924
N1	0,378	0,182	0,938
<b>BR4</b>	<b>0,318</b>	<b>0,242</b>	<b>0,875</b>

## 5.2 ROZLIŠENÍ PRŮRAZNÝCH MECHANIZMŮ S ASISTENCÍ ŠUMŮ

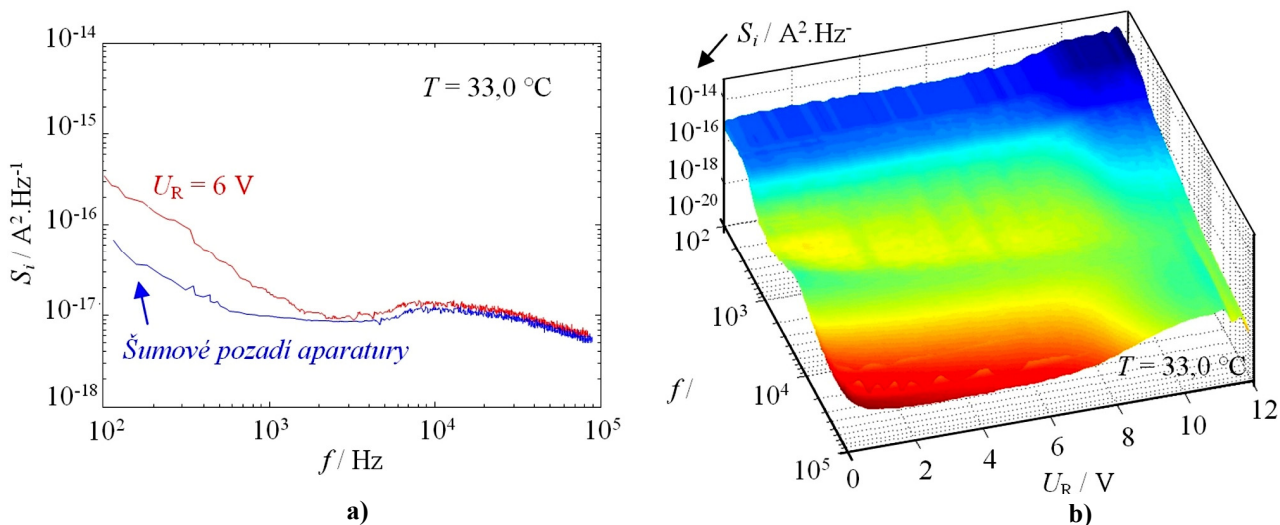
U sady vzorků byly sledovány transportní charakteristiky, šumové charakteristiky a plošné vyzařování CCD kamerou. U vzorku 30\_3 bylo provedeno měření nejméně dvou vznikajících průrazů. Teplotní součinitel průrazného napětí je záporný a tudíž je vyloučen lavinový jev ( $U_{K1} = 9,88$  V,  $U_{K1}' = 9,48$  V). Pozorujeme pravděpodobně tepelnou nestabilitu, která vede k mohutným vodivým kanálům.

Měření úzkopásmového šumového signálu vždy vykazuje pík v okamžiku průrazu (viz obr. 5.9). Zajímavý je nárůst šumu bezprostředně po průrazu v porovnání se stavem před ním. V případě prvního kanálu jde o šumový přírůstek proudu asi 3,9 nA u druhého kanálu pak 4,2 nA (pro  $T = 51,6$  °C). Z výsledků lze vyvodit, že šumový příspěvek kanálů je proudově nezávislý a neměnný. Spektrální oblast je blíže rozebrána na obr. 7.10b.

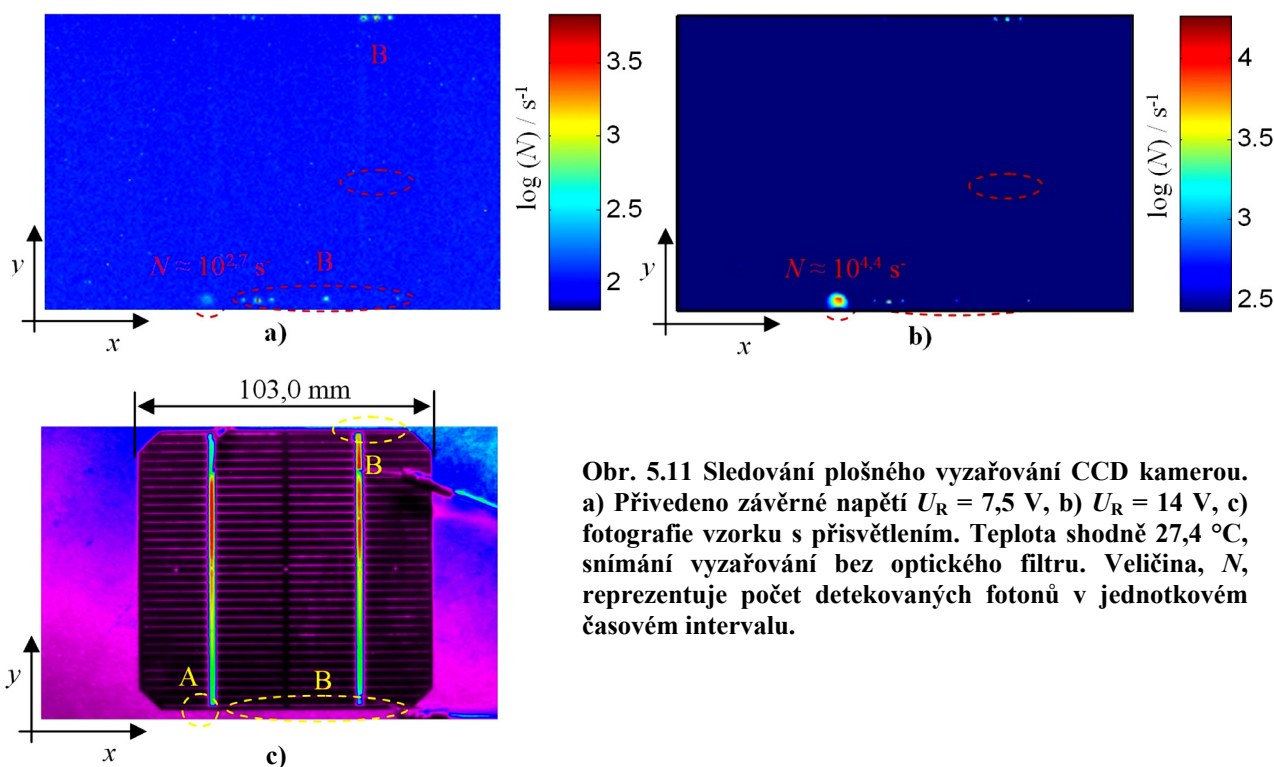




Obr. 5.9 Měření VA char. vzorku 30\_3 společně s úzkopásmovým šumovým signálem pro dvě různé teploty.



Obr. 5.10 a) Spektrální výkonová hustota vzorku 30\_3 při závěrném napětí  $U_R = 6V$  včetně pozadí měřicí aparatury. b) Rozvoj spektrální výkonové hustoty se závěrným napětím. Krok  $U_R$  je 50 mV.



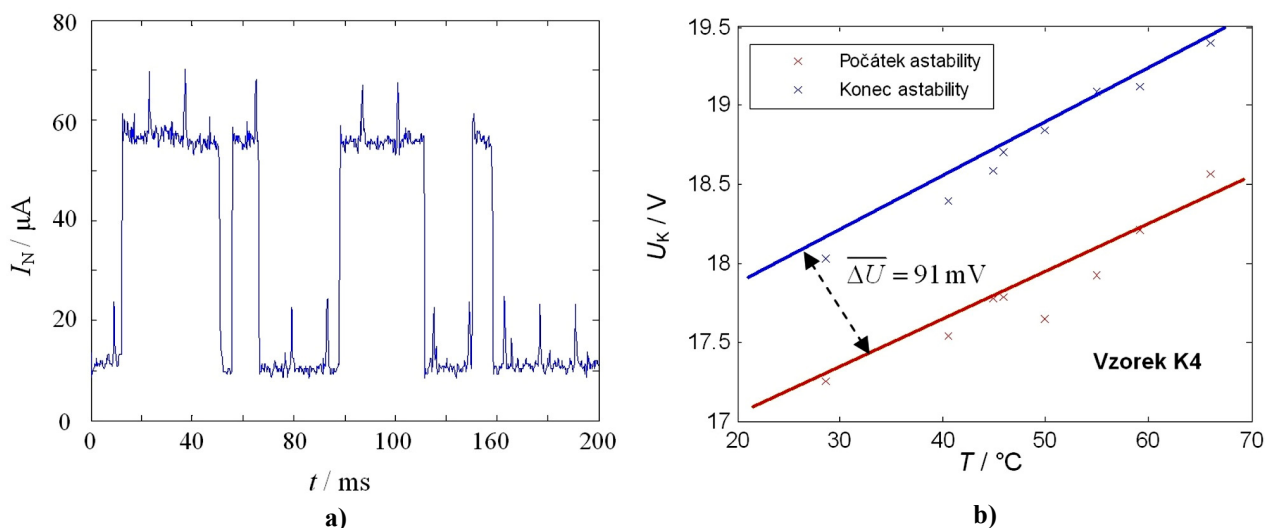
Obr. 5.11 Sledování plošného vyzařování CCD kamerou. a) Přivedeno závěrné napětí  $U_R = 7,5 V$ , b)  $U_R = 14 V$ , c) fotografie vzorku s přisvětlením. Teplota shodně 27,4 °C, snímání vyzařování bez optického filtru. Veličina,  $N$ , reprezentuje počet detekovaných fotonů v jednotkovém časovém intervalu.

Dále byly provedeny experimenty detekce plošného vyzařování citlivou CCD kamerou. Bez ohledu na podstatu vzniku záření vidíme na obr. 5.11a oblast postiženou nehomogenitou v okamžiku před průrazem i po něm (viz obr. 5.11b). Je velmi zajímavé, že detekované zářící body jsou lokalizovány v blízkosti hran. Bod A (obr. 5.11) je pravděpodobně zodpovědný za prudký nárůst proudu při překročení prvního kritického napětí. To lze dokázat měřením jeho intenzity v závislosti na  $U_R$ , která velmi dobře koreluje s VA charakteristikou z obr. 5.9a.

### 5.3 LOKÁLNÍ LAVINOVÉ (MIKROPLAZMATICKÉ) PRŮRAZY

Další často pozorovaný typ průrazu je z VA charakteristik mnohem hůře patrný. Důvod je ten, že defektními oblastmi protéká podstatně menší proud pohybující se v řádech desítek  $\mu\text{A}$ . Podrobnější rozbor ukázal, že jde bez výjimky o lokální lavinové průrazy, které rovněž vytvářejí vodivé kanály. Prvotním závěrem v širokém smyslu bylo, že tyto průrazy jsou doprovázeny bistabilní proudovou fluktuací. Tento jev je znám pod názvem "mikroplazmatický šum" a v plné verzi práce je mu věnován značný rozsah.

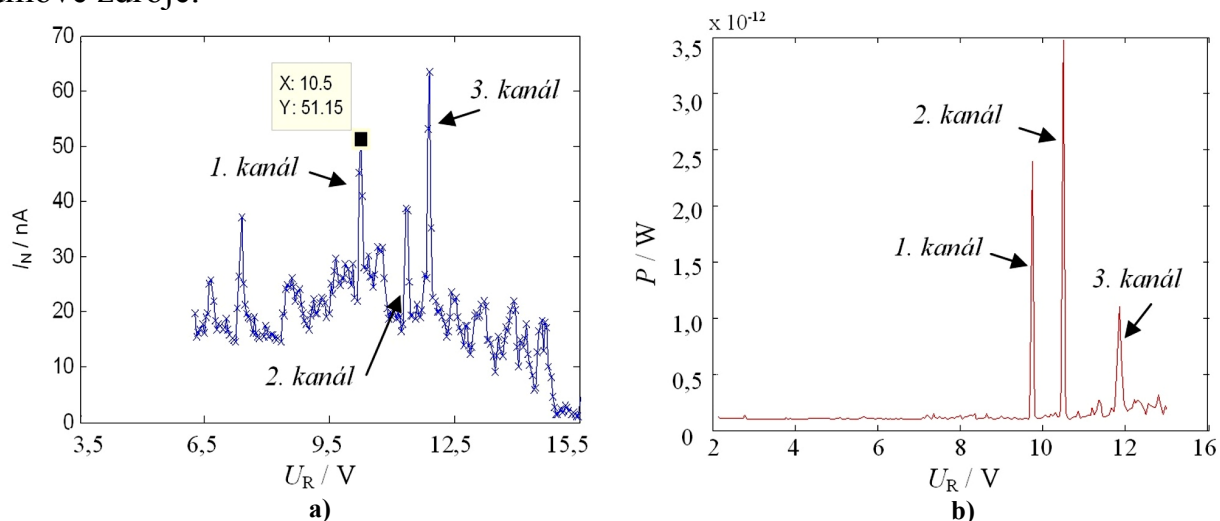
Mikroplazmatický proudový šum v časové oblasti je znázorněn na obr. 5.12a. Obrázek názorně ukazuje i jeden velmi zajímavý jev. Jde o nárůst superponovaného šumu na vrcholu obdélníků oproti stavu v údolí. Jde o lavinový šum zavedený při teoretickém studiu. Teoretickým výpočtem se podařilo určit i koeficient multiplikace,  $M$ , charakterizující vzniklou lavinu.



Obr. 5.12 a) Časový záznam mikroplazmatického šumu, vzorek K1 při teplotě  $33^\circ\text{C}$  a závěrném napětí  $U_R = 20,23 \text{ V}$ . b) Teplotní závislost kritického napětí (křivka označena A) a napětí, kdy již dochází k trvalé ionizaci – křivka B, vzorek K4.

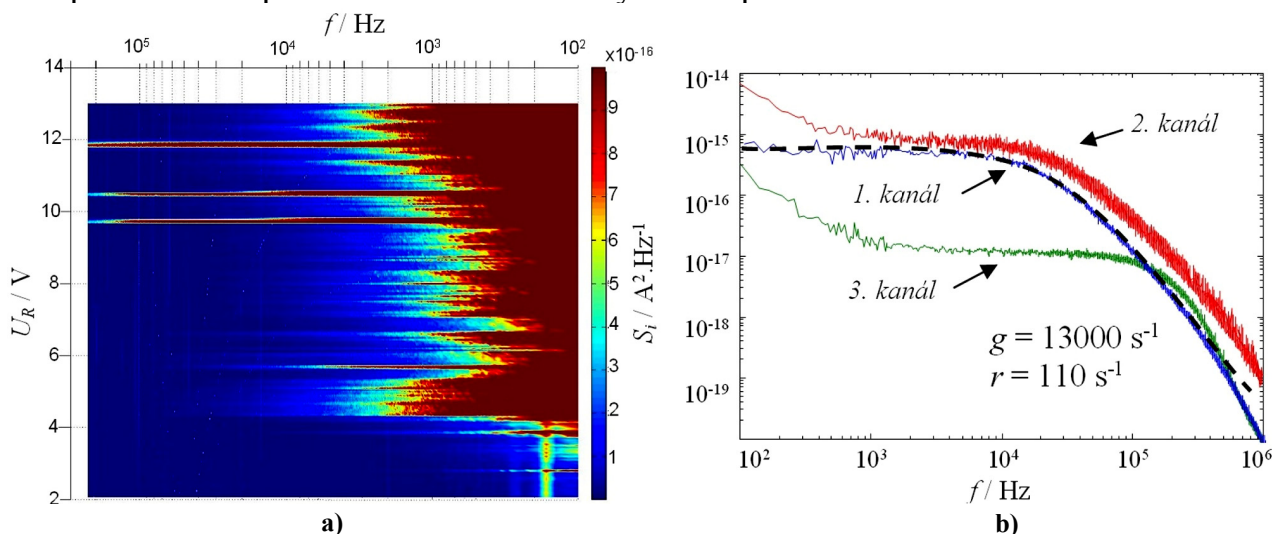
Dále byla podrobněji sledována teplotní závislost průrazného napětí, při kterém nastává nárazová ionizace s lavinovým průrazem. To je znázorněno na obr. 5.12b společně s napětím, kdy dochází k trvalé ionizaci. Je patrné, že s rostoucí teplotou kritické napětí,  $U_k$ , roste, což podporuje lavinový mechanismus. Odpory mikroplazmatických kanálů jsou shrnuty v plné verzi práce. Úzkopásmový šumový

signál prakticky bez výjimky vykazuje píky v oblasti bistability (viz obr. 5.13a). Integrální výkon ve spektru je znázorněn na obr. 5.13b a evidentně převyšuje ostatní šumové zdroje.



Obr. 5.13 a) Úzkopásmový šumový signál vzorku K2 s výskytem mikroplazmatu, střední kmitočet nastaven na 480 Hz. Trojice píků odpovídá trojici defektních bodů. b) Integrální výkon ve spektrální oblasti, měřeno v intervalu 100 Hz ÷ 250 kHz, vzorek K2. Obě měření realizovány za pokojové teploty 27,6 °C.

Zajímavý náhled na situaci poskytuje rozvoj spektrální výkonové hustoty se závěrným napětím  $U_R$  (viz obr. 5.14a). S napětím postupně roste i šum  $1/f$  a objevují se spektra mikroplazmatického šumu. Vybraná spektra na obr. 5.14b.

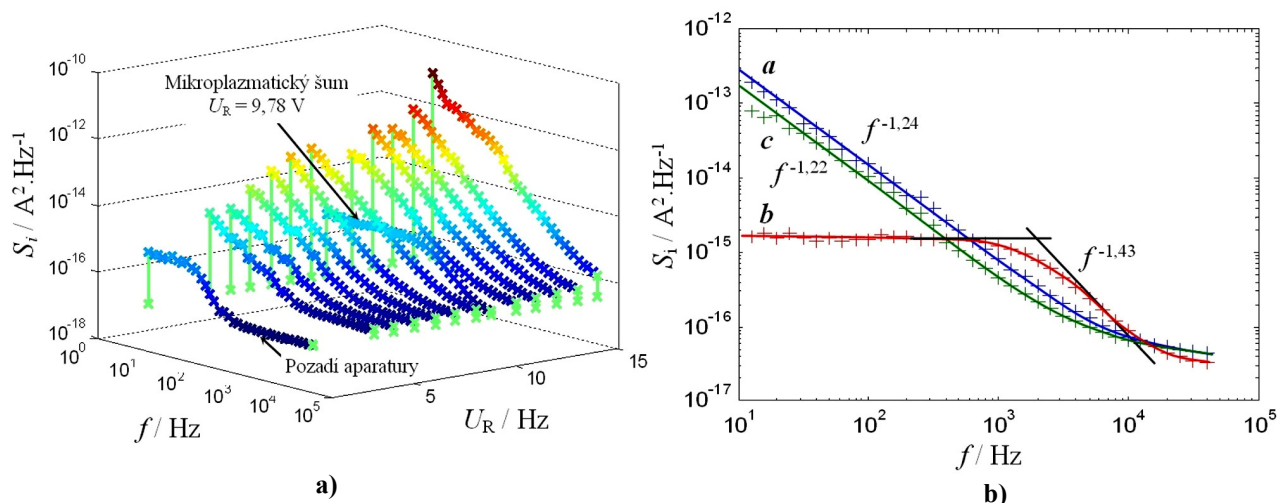


Obr. 5.14 a) Rozvoj spektrální výkonové hustoty s napětím – závěrný režim, vzorek K2,  $T = 27,6$  °C. b) Spektrální výkonové hustoty trojice defektů s mikroplazmatickou fluktuací, vzorek K2,  $T = 27,6$  °C.

### 5.3.1 Korelace vyzařování a mikroplazmatických oblastí

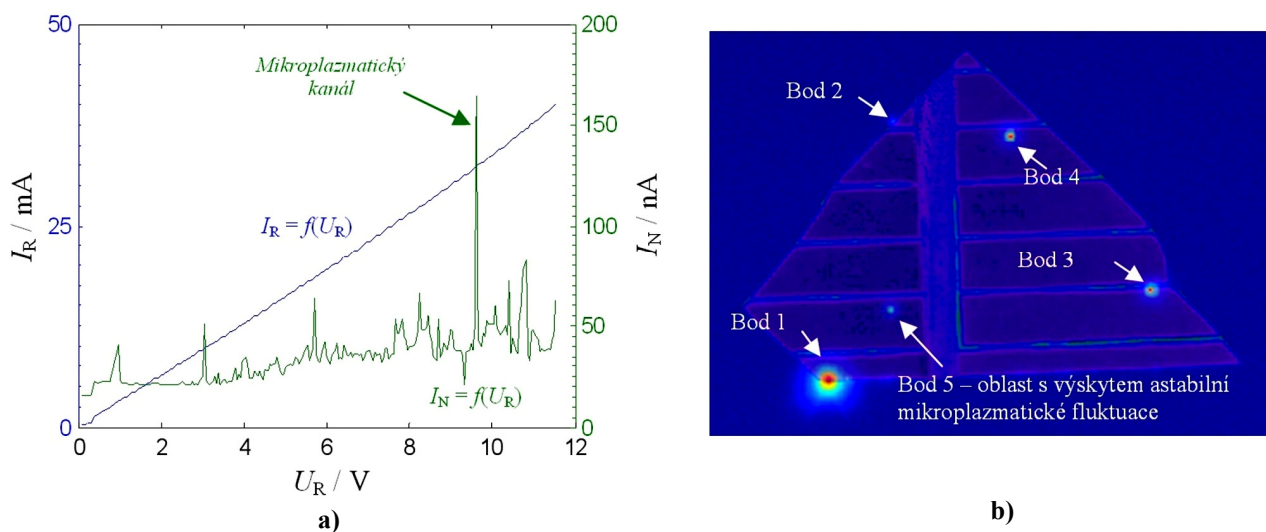
Technickou metodou pro další rozbor je sledování emise fotonů z oblasti  $pn$  přechodu. Důvod lavinových průrazů spočívá ve fluktuaci šířky vyčerpané oblasti a tedy fluktuaci průrazného napětí. U vzorku K20 byla provedena šumová diagnostika v časové i spektrální oblasti. Byla objevena mikroplazmatická proudová fluktuace při napětí  $U_R = 9,78$  V. Optické studium ukázalo, že na povrchu je

přítomno pět významných lokálních bodů, ovšem pouze jediný produkuje mikroplazmatický šum.



Obr. 5.15 a) Závislost spektrální výkonové hustoty proudového šumu na závěrném napětí  $U_R$ . b) Vybrané char. pro závěrné napětí 9,0 V (křivka a); 9,78 V (křivka b) a 11,0 V (křivka c). Vzorek K20,  $T = 16,6$  °C.

Ostatní defektní oblasti však nevykazují napěťovou závislost a jejich rozlišení včetně charakteru šumových projevů je nejasné. Pozorovaný charakter spektra je shodně  $1/f$  viz obr. 5.15a, b. Úzkopásmový šumový signál ukazuje jediný výrazný pík odpovídající vzniku mikroplazmatického kanálu.

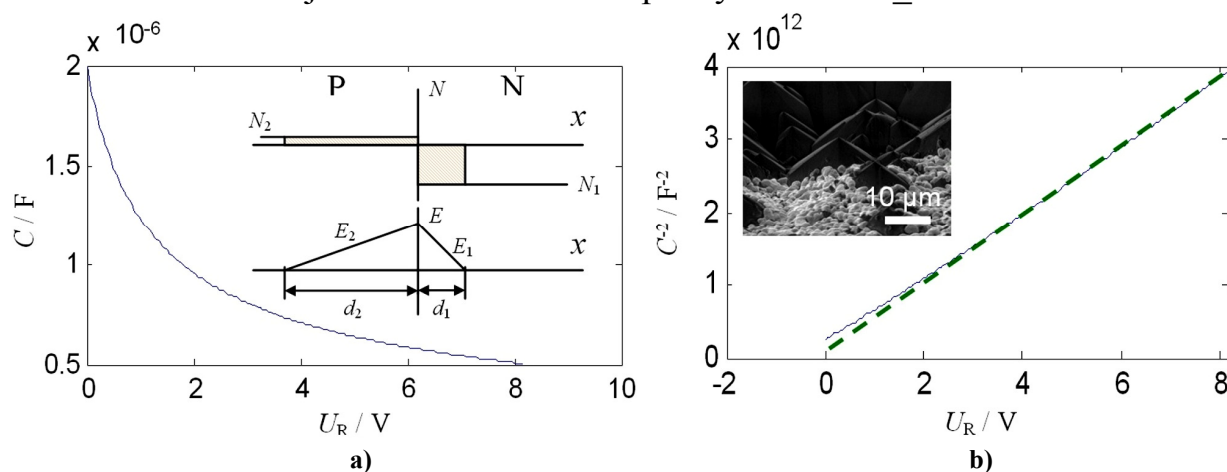


Obr. 5.16 a) Úzkopásmový šumový signál a závěrný proud v závislosti na přiloženém napětí. Střední kmitočet selektivního voltmetru nastaven na 420 Hz, šumová šířka pásma 87 Hz,  $T = 24,7$  °C. b) Fotografie vzorku K20 se znázorněním zářících bodů při napětí  $U_R = 10$  V,  $T = 26,3$  °C. Vzorek K20.

Postupně bylo zvedáno závěrné předpětí a snímáno vyzařování. Bod 1 byl detekován od závěrného napětí 4 V. Není jasné, zda byl přítomen i dříve a byl pouze maskován detekční schopností snímací aparatury. Oproti tomu bod 5 byl aktivován přesně v okamžiku, kdy vzniká pík v obr. 5.15a a je pozorováno Lorenciánovské spektrum ( $U_R = 9,7$  V). Souvislost s mikroplazmatickou fluktuací je evidentní. Zajímavé je, že bod 5 je relativně malý se slabou intenzitou vyzařování.

## 5.4 KAPACITNÍ CHARAKTERIZACE A DIAGNOSTIKA DEFEKTŮ

U solárních článků je motivací pro kapacitní experimenty nalezení odpovědi na dvě klíčové otázky. První je spojená s koncentračním profilem  $pn$  přechodu. Druhou klíčovou otázkou je nalezení geometrie defektů a to především těch, o kterých víme, že produkují mikroplazmatický šum. Podívejme se nyní na vybrané výsledky. Obrázek 5.17a ukazuje měření bariérové kapacity vzorku 25\_1A.



Obr. 5.17 a) Průběh bariérové kapacity v závislosti na přiloženém napětí. b) Grafická transformace kapacitní charakteristiky vzorku. Vložena je i ukázka topografie povrchu v blízkosti kontaktu získaná pomocí SEM mikroskopu. Vzorek 25\_1A,  $T = 25,2$  °C.

Bariérovou kapacitu typických  $pn$  přechodů jako funkci napětí lze popsat pomocí analytických vztahů a snadno lze posoudit, zda jde o lineární či strmý přechod. V případě vzorků solárních článků se podařilo ukázat, že  $pn$  přechod je strmý (viz obr. 5.17a, obr. 5.17b). S použitím změřené CU charakteristiky z obr. 5.17b a její směrnice  $k = 1,488 \cdot 10^{-6} \text{ V}^{1/2} \cdot \text{F}$  byla u tohoto vzorku získána koncentrace akceptorů  $N_a = 1,2 \cdot 10^{21} \text{ m}^{-3}$ , která je typická pro zkoumané vzorky.

### 5.4.1 Extrakce parametrů lokálních defektů

Pro určení parametrů lokálních defektů je velmi důležité, že lokální zúžení vyčerpané oblasti vede k lokálnímu nárůstu intenzity elektrického pole, protože hranice vyčerpané oblasti tvoří ekvipotenciální plochy obklopené dobře vodivými polovodiči typu  $p$  a  $n$ . Pro studium vlastností lokálních defektů byl vybrán opět vzorek K2, který je charakteristický relativně malou plochou přechodu (zlomek celého článku), a je proto možné odděleně sledovat pouze trojici defektních oblastí. U vzorku bylo opět provedeno měření kapacitních charakteristik a byla určena koncentrace akceptorů v substrátu  $N_a = 5,85 \cdot 10^{21} \text{ m}^{-3}$  (před aktivací prvního defektu). Následně byla sledována charakteristika  $C = f(U_R)$  v oblastech, kde dochází k průrazům, byla numericky určena maximální intenzita el. pole a následně (opět numericky) stanovena šířka oblasti a nutná koncentrace příměsí, aby nastal sledovaný průraz. Detailní postup je uveden v plné verzi práce. Podívejme se zde pouze na výsledky uvedené v tab. 5.3.

Tab. 5.3 Výsledky určení geometrie trojice defektních oblastí s výskytem mikroplazmy u vzorku K2.

Kritické napětí $U_K$	9,62 V	10,36 V	11,72 V
Šířka vyčerpané oblasti (nedefektní) / $\mu\text{m}$	1,50	1,55	1,65
Šířka defektní oblasti / $\mu\text{m}$	0,32	0,36	0,42
Koncentrace příměsí defektní oblasti / $10^{23} \cdot \text{m}^{-3}$	1,27	1,12	0,91

Byl navržen i další model, který je založen na studiu nedefektní oblasti před lokálním průrazem a po lokálním průrazu. Po jednoduchých matematických výpočtech pak můžeme získat informace o efektivní ploše defektní oblasti, kterou protéká šumový proud. Následující tabulka shrnuje výsledky týkající se popisovaného vzorku K2.

Tab. 5.4 Výsledky určení efektivní plochy trojice defektních oblastí s výskytem mikroplazmy u vzorku K2.

Kritické napětí $U_K$	9,62 V	10,36 V	11,72 V
Efektivní plocha defektní oblasti / $\mu\text{m}^2$	0,5	17,1	19,8

Ověření správnosti navržené geometrie (především šířky defektní oblasti) můžeme provést podle znalosti rozložení součinitelů nárazové ionizace v přechodu. Průběh součinitelů nárazové ionizace elektronů  $\alpha$ ,  $\beta$  a intenzity el. pole pro tento konkrétní případ je možné teoreticky odvodit (zde kvůli rozsahu neuvedeno). Pro případ každé defektní oblasti je tedy možné řešit zvlášť ionizační integrál a hledat korektní tloušťku defektní oblasti. Následné matematické řešení není triviální. Z tohoto důvodu bylo použito iterativní řešení v programu Matlab. Cyklicky byla měněna tloušťka oblasti,  $d$ , a byla hledána taková, kdy je splněna podmínka vzniku lavinového průrazu ionizačním integrálem. Ukázalo se, že pro první defektní oblast takto získáme  $d_1' = 0,315 \mu\text{m}$ , což je ve velmi dobré shodě s určenou hodnotou  $d_1 = 0,32 \mu\text{m}$ . Naopak pro  $d_1 = 0,32 \mu\text{m}$  byl ionizační integrál roven 1,07. Toto vše bylo počítáno pro iniciaci laviny dírami.

## 5.5 ŠUMOVÁ DIAGNOSTIKA V PROPUSTNÉM REŽIMU

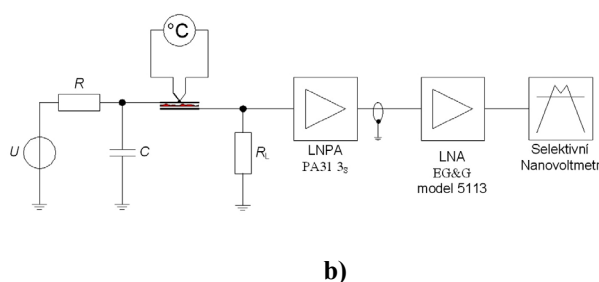
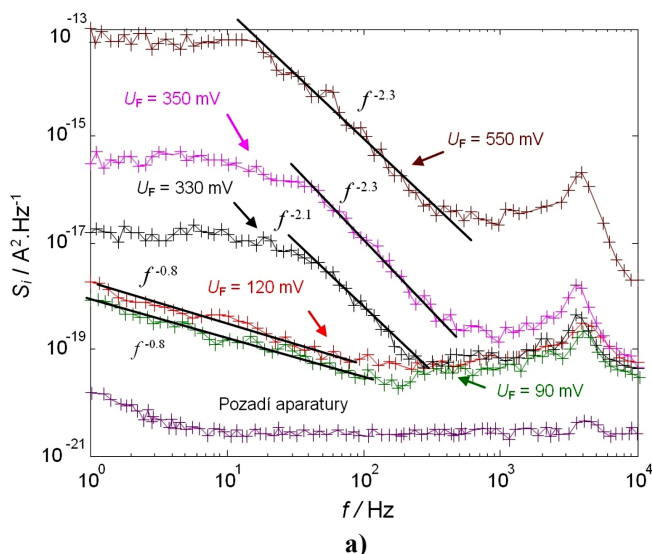
V závěrném režimu solárních článků pozorujeme nejčastěji šum  $1/f$ , mikroplazmatický šum, lavinový šum a bílé šumy související patrně s průchodem proudu bariérou a teplotou vzorků. Popis těchto šumů byl proveden společně s průraznými mechanizmy. Zcela samostatně byl sledován propustný režim solárních článků, kde průrazy pozorovány nebyly, přitom šumově jsou vzorky velmi aktivní. S použitím šumových metod (měření závislosti  $S_i = f(T)$ , popřípadě měření teplotní závislosti úzkopásmového šumového signálu  $I_N = f(T)$ , pro několik vybraných kmitočtů) se podařilo ukázat, že existuje dominantní aktivační energie a je prakticky totožná s energií rekombinačních center určených dříve. Toto zjištění

ovšem neposkytuje kompletní vysvětlení pozorovaného chování vzorků. Podívejme se tedy blíže na získané závěry.

### 5.5.1 Modelování šumových procesů solárních článků v propustném režimu

U šumových metod, kdy předpokládáme, že nadbytečný šum je důsledkem namáhání i objemových nehomogenit, teoreticky můžeme zjistit, která oblast je nejvíce aktivní. Typické pro propustný režim u solárních článků je, že se spektrální výkonové hustoty vyvíjí s přiloženým napětím. Vybrané měření je demonstrováno na obr. 5.18a, uspořádání aparatury je na obr. 5.18b. Rozbor záměrně provádíme u vzorku K4, kterému byla věnována pozornost v souvislosti s průzkumem transportních charakteristik. Již víme, že navzdory nestandardnímu tvaru charakteristik zde hraje roli pouze jediný mechanismus vedení a to generace-rekombinace nosičů. Spolu s ním hraje významnou roli svodový odpor  $R_{sh}$  i sériový odpor  $R_s$ .

Aplikovatelný je náhradní obvod z obr. 5.3 s jedinou diodou a bez větve charakterizující defekt. Vliv svodového odporu,  $R_{sh}$ , je dominantní pro napětí nižší než asi 300 mV, do napětí asi 620 mV je rozeznatelné g-r vedení a nad toto napětí je charakteristika významně deformována makroskopickým sériovým odporem. Připomeňme také, že saturační proud úzce souvisí s mechanismem vedení a pro případ tohoto vzorku získáváme  $I_{0(g-r)} = 2,7 \cdot 10^{-7} \text{ A}$ .



Obr. 5.18 a) Vývoj spektrální výkonové hustoty s přiloženým napětím, vzorek K4,  $T = 20,2 \text{ } ^\circ\text{C}$ , temné prostředí. b) Blokové uspořádání pracoviště popisovaného experimentu.

#### • Šum $1/f$ a $pn$ přechod solárního článku

Během mnoha let výzkumu se podařilo ukázat, že šum  $1/f$  velmi často souvisí s nehomogenitami v objemu (viz [9], [10]). Prováděný výzkum je založen na zobecněném Hoogově modelu, kdy se předpokládá, že šum vzniká v důsledku fluktuace rezistivity polovodiče díky fluktuaci pohyblivosti. Zmíněný Hoogův model je platný pouze pro homogenní vrstvy materiálů ve smyslu prostorové nezávislosti koncentrace volných nosičů  $n = n(x)$ ,  $p = p(x)$ . Polovodičový přechod

ovšem za homogenní považovat nelze. Pro případ solárního článku a poměry v něm byla nalezena matematická metoda výpočtu. Později se ale ukázalo, že stejný postup již aplikoval Kleinpenning a publikoval ve svém článku [11]. Odvozený vztah (5.3) tedy není původní, ovšem není známo, že by byl aplikován na solární články.

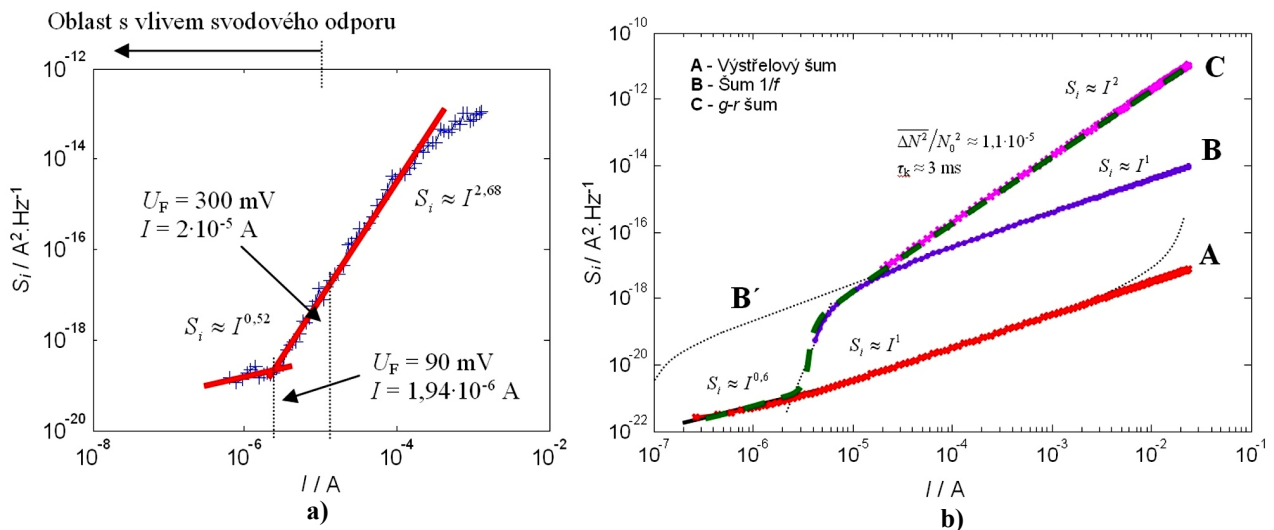
$$S_i = \frac{\alpha_H \gamma e I^2}{(I + I_0) \tau_a f} \quad (5.3)$$

Konstanta  $\gamma$  vznikla substitucí sady veličin a závisí na typu transportního procesu ve vzorku. Symbol  $\tau_a$  v předchozím vztahu je doba života. Matematický model generace šumu  $1/f$  je dále nutné rozšířit o vliv svodového odporu. Pro malé propustné proudy je očekáván zásadní vliv, obzvláště uvažíme-li, že svodový odpor,  $R_{sh}$ , je u vzorku K4 pouze 44,4 k $\Omega$  ( $T = 20,2$  °C). Vztah (5.3) je tedy nutné modifikovat do tvaru

$$S_i = \frac{\alpha_H \gamma e \left( I - \frac{U_F}{R_{sh}} \right)^2}{\left( I - \frac{U_F}{R_{sh}} + I_0 \right) \tau_a f} \quad (5.4)$$

- **Analýza proudové závislosti spektrální výkonové hustoty**

Vhodným nástrojem pro posouzení správnosti navrhovaného popisu šumu  $1/f$  je experimentálně získaná závislost spektrální výkonové hustoty na proudu vzorkem při konstantním středním kmitočtu. Výsledek experimentu je na obr. 5.19.



Obr. 5.19 a) Závislost spektrální výkonové hustoty na stejnosměrném proudu vzorkem – propustný režim, vzorek K4, sledováno na středním kmitočtu 10 Hz, šumová šířka pásma 1,6 Hz,  $T = 20,2$  °C. b) Simulace proudové závislosti spektrální výkonové hustoty – modelování chování solárního článku v propustném režimu. Simulace provedena pro teplotu  $T = 20,2$  °C, kmitočet 10 Hz, Hoogův koeficient  $\alpha_H = 1 \cdot 10^{-3}$ .

Z rovnice (5.4) vyplývá, že předpokládaná spektrální výkonová hustota proudové fluktuaace je pro  $I < I_{0x}$  úměrná druhé mocnině proudu a pro  $I_{0x} < I$  je přímo úměrná



proudu vzorkem (zde indexem  $\lambda$  vyjadřujeme závislost saturačního proudu na druhu transportního procesu).

Výsledek měření demonstrovaného na obr. 5.19a je však velmi překvapivý. Je evidentní prudký zlom při proudu  $I = 1,94 \cdot 10^{-6}$  A a propustném napětí  $U_F = 90$  mV. Proud zlomu koreluje se saturačním proudem prvního diskutovaného lineárního úseku ( $I_0 = 1,3 \cdot 10^{-6}$  A). Trend závislosti,  $S_i$ , na proudu,  $I$ , je navíc oproti očekávání přesně opačný. Dále je zajímavé, že při napětí, kdy dochází k dominantnímu projevu  $g$ - $r$  procesu (přibližně 300 mV viz obr. 5.7) a současně dochází k viditelné změně charakteru spektra šumu (viz obr. 5.18), není na charakteristice  $S_i = f(I)$  z obr. 5.19a žádná viditelná změna. Posouzení proudové závislosti se stává relativně složitou záležitostí, protože proud vzorkem a napětí na vzorku není přímo úměrné. Z tohoto důvodu byla provedena simulace (zobrazena v obr. 5.19b) ukazující proudové závislosti spektrálních výkonových hustot pro různé případy. Křivka  $B$  odpovídá předpokladům podle vztahu (5.4) a tečkovaná křivka  $B'$ , vycházející ze zmíněné křivky  $B$ , odpovídá prvotním představám podle vztahu (5.3).

- **Diskuze existence výstřelového šumu**

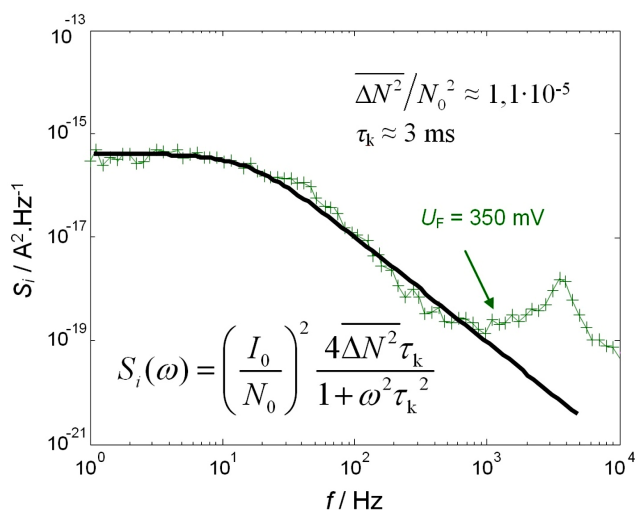
V souvislosti s rozbořem solárního článku si nyní položíme cílenou otázku. Je-li dokázáno, že u vzorku pozorujeme šum  $1/f$  a je-li možné, že tento šum je pro proudy  $I > I_{0\lambda}$  úměrný proudu vzorkem a pro  $I < I_{0\lambda}$  velmi strmě klesá k neměřitelným úrovním, jaký druh šumu tedy v obr. 5.19a způsobuje nárůst spektrální výkonové hustoty úměrný  $I^{0,52}$ . Tady se po relativně obsáhlém studiu možností ukázal jako zajímavou alternativou výstřelový šum (shot noise). V práci byl cíleně zaveden teoretický rozbor platný pro  $pn$  přechod z něhož vyplývá závislost spektrální výkonové hustoty na stejnosměrném proudu vzorkem. V souladu s tímto rozbořem byla opět provedena simulace  $S_i$  výstřelového šumu na proudu vzorkem  $I$ . Výsledek demonstruje v obr. 5.19b křivka označená  $A$ .

- **Oblast propustných proudů s výskytem šumu s charakterem spektra  $1/f^2$**

Zaměřme se dále na způsob, jakým může být charakterizován šumový proces, jehož vznik pozorujeme od okamžiku, kdy je dominantní působení  $g$ - $r$  procesu (patrné z obrázků 5.18a, 5.19 a 5.7), tedy od napětí přibližně 300 mV. O tomto procesu víme, že má Lorentziánský charakter spektra. To je typické pro  $g$ - $r$  šum. Pro popis proudové spektrální výkonové hustoty byly opět nalezeny teoretické vztahy a byla provedena jejich diskuze.

Teoretický popis je možné navrhnout s ohledem na sledovaný stejnosměrný budící proud. Příslušný vztah je vepsán v obr. 5.20 a hledanými parametry jsou časová konstanta  $\tau_k$  a podíl disperze počtu nosičů  $\overline{\Delta N^2}$  a středního počtu nosičů účastního se vedení proudu  $N_0$ . Byla provedena aproximace a její výsledek je znázorněn v obr. 5.20. Výsledné parametry jsou časová konstanta  $\tau_k \approx 3$  ms a poměr  $\overline{\Delta N^2}/N_0^2 \approx 1,1 \cdot 10^{-5}$ . Šumová aktivita rekombinačních přechodů se nejlépe posoudí

opět ze simulace na obr. 5.19b. Tvar závislosti demonstruje křivka C. Ukazuje se, že pro zavedené parametry funkce z obr. 5.20 se šum stává dominantní při stejnosměrném proudu,  $I$ , asi  $2 \cdot 10^{-5}$  A a jeho hodnota je přibližně  $5,6 \cdot 10^{-17}$  A<sup>2</sup>.Hz<sup>-1</sup>. To je ve velmi dobré shodě se závislostí na obr. 5.19a a měřenými spektry z obr. 5.18a.



Obr. 5.20 Spektrální výkonová hustota změřená pro předpětí  $U_F = 350$  mV u vzorku K4 a její proložení vepsanou funkcí (určené parametry jsou taktéž vepsány v obrázku).

## 6 ZÁVĚRY A PŘÍNOSY DISERTAČNÍ PRÁCE

Prezentovaná práce předkládá výsledky nedestruktivního studia solárních článků. Již na počátku studia se ukázalo, že klíčovým problémem u sledovaných vzorků je velké množství diagnosticky zajímavých projevů. Bylo věnováno nemalé úsilí nalezení nejčastěji se vyskytujících defektů a nedokonalostí, byly řešeny problémy s postupnou degradací při měření i s extrémními úrovněmi rušení. Konkrétní závěry jsou prezentovány v práci, zde pouze připomeňme vybrané nejvýznamnější fyzikální závěry.

### Vybrané fyzikální výsledky

- Byl zpracován matematický popis  $pn$  přechodu podle idealizované Shockleyho teorie. Ten byl následně rozšířen i o proces generace a rekombinace nosičů a byly zavedeny ztrátové parametry, jako jsou svodový odpor a sériový rezistor. Na základě toho byl sestaven elektrický náhradní model a předložena analytická transcendentní funkce včetně jejího řešení.
- Kombinací elektrických i optických metod byly identifikovány transportní mechanismy vedení elektrického proudu.
- Bylo zjištěno, že s ohledem na svodový odpor je fyzikálně zajímavá oblast relativně nízkých přiložených napětí v přímém i zpětném směru. Podařilo se také ukázat, že svodový odpor je totožný pro přímý i závěrný směr, rozptyl

jeho velikosti je obecně u vzorků velmi velký a ve spektrální oblasti jeho velikost koreluje s hladinou jistého bílého šumu.

- U vybraných vzorků bylo ukázáno teplotní měření závislosti průrazného napětí a byly tak rozlišeny lavinové a teplotní průrazy.
- Ve spojení s metodou optického vyzařování byly identifikovány mohutné průrazy se záporným teplotním součinitelem průrazného napětí. Bylo zjištěno, že jde patrně o tepelné nestability. Vznikající průrazy produkují šum  $1/f$ , VA charakteristiky kanálů se podařilo dobře zmapovat a byla zkonstruována i závislost  $I_N = f(I_R)$ .
- Ve složitých proudových projevech byl identifikován šum mikroplazmatu. U tohoto šumu byla sledována jeho teplotní závislost a byl potvrzen teoretický předpoklad o lavinovém násobení v defektních oblastech.
- Dále byl u různých vzorků určen koeficient multiplikace a to ze spektra lavinového šumu (typicky  $M \approx 9300$ ) a z geometrie defektu a očekávaných proudů ( $M \approx 2000$ ). Pro režim astability byla získána i závislost  $M = f(U_R)$ .
- Unikátním výsledkem je nalezení způsobu určení geometrie mikroplazmatických defektů. Podařilo se ukázat, že tloušťka se pohybuje okolo  $0,35 \mu\text{m}$  a efektivní plocha  $(0,5 \div 20) \mu\text{m}^2$ .
- S použitím průběhů součinitelů nárazové ionizace zvláště pro elektrony a díry byla ověřena navržená tloušťka lokálních defektů. Byl řešen ionizační integrál pro konkrétní případ  $pn$  přechodu.
- Experimentálně byla zjištěna i přítomnost defektů, ve kterých dochází k teplotním nestabilitám a doprovázeným aditivním šum  $1/f$ .
- Pro propustný režim byly klasifikovány pozorované zdroje šumu a byl sestaven unikátní šumový model solárního článku v přímém směru.
- Podařilo se zjistit, že v propustném režimu solárního článku je nejvíce šumově aktivní oblast prostorového náboje. Defekty uvnitř této oblasti jsou patrně zodpovědné i za průrazy pozorované ve zpětném směru.

Závěrem stručného výčtu nejdůležitějších poznatků a výsledků lze říci, že vytyčené cíle byly splněny. Problematika ovšem není uzavřena a lze doporučit další vědecké práce v oblasti diagnostiky solárních článků (viz odstavec 9). Prezentované výsledky již byly z velké části písemně publikovány a konkrétnější informace lze najít v odstavci "Autorské publikace vztahující se k tématu disertace". Patrně nejvýznamnější relevantní výstup práce, což je šumová diagnostika v propustném režimu spojená s rozlišením transportních mechanismů, byla publikována v impaktovaném fyzikálním časopise [A2].

## 7 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] MILES R. W. Inorganic photovoltaic cells, *Materials Today*, vol. 10, pp. 20-50, 2007, ISSN 1369-7021.
- [2] EUROPEAN COMMISSION and JOINT RESEARCH CENTRE Research, Solar Cell Production and Market Implementation of Photovoltaics, 2010, ISSN 978-92-79-15657-1.
- [3] EUROPEAN COMMISSION Photovoltaic solar energy, Development and current research, 2009, ISSN 978-92-79-10644-6.
- [4] KRAUTER, S. and GRUNOW, P. Wafer, cell and module quality requirements, *In Photovoltaic International*, 2008, pp. 59-65, ISBN 1757-1197.
- [5] IEC. (2010, 29. 11. 2010). *IEC STANDARDS*. Dostupné z WWW: <http://www.iec.ch/>.
- [6] MATHWORLD. (2008, 5. Jun 2008). *Lambert W-Function* Dostupné z WWW: <http://mathworld.wolfram.com/LambertW-Function.html>.
- [7] SZE, S. M. *Semiconductor Devices Physics and Technology*, 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2002, ISBN 0-471-33372-7.
- [8] FRANK, H. *Fyzika a technika polovodičů*. Praha: SNTL, 1990, ISBN 80-63-00401-2.
- [9] VANDAMME, L. K. J.: Noise as a diagnostic tool for quality and reliability of electronic devices, *IEEE Transaction on electron device*, vol. 41, 1994, ISSN 0018-9383.
- [10] VAN DER ZIEL, A. *Noise: Sources, Characterization, Measurement*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1971, ISBN 978-0136231653.
- [11] KLEINPENNING, T., G., M. 1/f noise in solid state single injection diodes, *Physica B*, vol. 98, pp. 141-151, 1977, ISSN 0921-4526.

## 8 VYBRANÉ PRESTIŽNÍ ČLÁNKY AUTORA

- [A1] MACKŮ, R.; KOKTAVÝ, P.; ŠKARVADA, P. Non-destructive Characterization of Micro-sized Defects in the Solar Cell Structure. *Key Engineering Materials*. 2011. 465(1). p. 314 - 317. ISSN 1662-9795.
- [A2] MACKŮ, R.; KOKTAVÝ, P. Analysis of fluctuation processes in forward-biased solar cells using noise spectroscopy. *Physica status solidi (a)*. 2010. 207(10). p. 2387 - 2394. ISSN 1862-6319.

- [A3] MACKŮ, R.; KOKTAVÝ, P. Využití měření CU charakteristik pro určení geometrie a polohy pn přechodů křemíkových solárních článků. *Jemná mechanika a optika*. 2009. 2009(10). p. 291 - 293. ISSN\~0447-6441.
- [A4] MACKŮ, R.; KOKTAVÝ, P. Stanovení transportních a elektrických charakteristik solárních článků. *Slaboproudý obzor*. 2008. 64(3-4). p. 14 - 18. ISSN\~0037-668X.
- [A5] MACKŮ, R.; KOKTAVÝ, P.; ŠKARVADA, P. Advanced non-destructive diagnostics of monocrystalline silicon solar cells. *WSEAS Transactions on Electronics*. 2008. 4(9). p. 192 - 197. ISSN\~1109-9445.
- [A6] GRMELA, L.; ŠKARVADA, P.; MACKŮ, R.; TOMÁNEK, P. Near-field Detection and Localization of Defects in Monocrystalline Silicon Solar Cell. *Inventi Rapid: Energy & Power*. 2011. 2011(2). p. 1 - 4. ISSN\~2229-7774.
- [A7] PARAČKA, P.; KOKTAVÝ, P.; MACKŮ, R. PN junction defects detection in solar cells using noise diagnostics. *Key Engineering Materials*. 2011. 465(1). p. 359 - 362. ISSN\~1662-9795.
- [A8] TOMÁNEK, P.; ŠKARVADA, P.; MACKŮ, R.; GRMELA, L. Detection and localization of defects in monocrystalline silicon solar cell. *Advances in Optical Technologies*. 2010. 2010(805325). p. 8053251 - 8053255. ISSN\~1687-6393.
- [A9] KOKTAVÝ, P.; MACKŮ, R.; PARAČKA, P.; KRČÁL, O. Microplasma noise as a tool for PN junctions diagnostics. *WSEAS Transactions on Electronics*. 2008. 4(9). p. 186 - 191. ISSN\~1109-9445.

## 9 ŽIVOTOPIS



### Ing. Robert Macků

Fakulta elektrotechniky a komunikačních  
technologií  
Vysoké učení technické v Brně  
Technická 8  
616 00 Brno

Tel. 541 143 277

E-mail: [macku@feec.vutbr.cz](mailto:macku@feec.vutbr.cz)

Web: <http://www.ufyz.feec.vutbr.cz/index>

### KVALIFIKACE A PROFESNÍ KARIÉRA

**Současná pozice**  
2007 – dosud

Student doktorského studijního programu “Fyzikální elektronika a nanotechnologie” a vědecko výzkumný pracovník na Ústavu fyziky, Fakultě elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně

**Kvalifikace**  
2007  
2005

Dosažení titulu Ing. v oboru radioelektronika a sdělovací technika, VUT v Brně  
Dosažení titulu Bc. v oboru elektronika a sdělovací technika, VUT v Brně

**Profesní kariéra**  
2007 – dosud

Vědecko výzkumný pracovník, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, VUT v Brně

**Odborné aktivity**

Výzkum v oblasti šumové diagnostiky solárních článků, specializovaných mikroskopických a měřicích systémů. Návrh a design unikátních laboratorních zařízení pro vědecké experimenty. Aktivní práce v oblasti metodiky měření nízko-úrovňových signálů a počítačové analýzy včetně fyzikální simulace experimentálních dat.

Držitel radioamatérské licence podle §108 a §122 podle zákona 127/2005 Sb. třídy A  
Držitel certifikátu HAREC naloženém na doporučení CEPT s označením T/R 61–02  
V roce 2010 získal CEU certifikát absolvováním International Measurement University

**Řešitel**  
2008 – 2009

Projekt na podporu rozvoje vysokých škol s názvem " Rozvoj laboratorní výuky magisterského předmětu Fyzika pevné fáze", označení: 1525/2009 G1

**Spoluřešitel**  
2007– dosud

Výzkumný záměr "Nove trendy v mikroelektronických systémech a nanotechnologii"  
MSM 0021630503

2010 – dosud

Grant na podporu primárního výzkumu "Flukтуаční procesy v PN přechodech solárních článků", P102/10/2013

2009 – dosud

Projekt poskytnutý ministerstvem průmyslu a obchodu s názvem "Aplikace laserových technologií do procesu výroby krystalických křemíkových solárních článků", TIP FR-TII/305

2010 – dosud

Evropský projekt "Inkubátor vědeckých týmů pro fyzikální elektroniku a nanotechnologii", OP VK 2.3 - CZ.1.07

2011 – dosud

Evropský projekt "Nanovědy pro elektroinženýry", OP VK 2.2 - CZ.1.07/15.0147  
Projekt s názvem "Diagnostika defektů v materiálech za použití nejnovějších defektoskopických metod", GD102/09/H074

2007 – 2008

Grant na podporu primárního výzkumu "Diagnostika elektronických součástek s PN přechodem pomocí šumu mikroplazmy", GA102/06/1551

## ABSTRAKT

Práce rozebírá problematiku nedestruktivní diagnostiky křemíkových solárních článků. Ačkoliv současné výrobní postupy a technologie jsou na velmi vysoké úrovni, další rozvoj v oblasti fotovoltaiky se nyní jeví limitovaný i v důsledku neschopnosti nalezení lokálních a objemových defektů, včetně jejich interpretace. Předmětem výzkumu je tedy nedestruktivní studium procesů s vlivem na provoz, životnost a spolehlivost vzorků. Za tímto účelem byly použity hlavně šumové analytické metody ve spojení se sledováním optické aktivity defektů, měřením kapacitních charakteristik a studiem transportu náboje. Tyto metody umožňují sledovat objemové nedokonalosti, defekty krystalické mříže, lokálně namáhané oblasti a v neposlední řadě i průrazné mechanismy s možným vyústěním až v destrukci vzorků. Významná část práce je zaměřena na náhodný  $n$ -stavový impulsní šum známý jako mikroplazmatický šum. Tento šum vzniká v důsledku průrazů ve velmi malých oblastech  $pn$  přechodu a indikuje významné snížení životnosti, popřípadě destrukci  $pn$  přechodu jako takového. Tyto prostorově lokalizované oblasti byly studovány samostatně s použitím optických i elektrických metod a podařilo se získat mnoho zajímavých informací. Neméně významná část práce byla věnována i modelování šumových procesů objemových nedokonalostí, kde se podařilo navrhnout jejich fyzikální interpretaci a analytický popis.

## ABSTRACT

The thesis deals issue of the silicon solar cells non-destructive testing. The manufacturing technology of solar cells currently features a very high level of perfection. Its further development appears to be limited by amongst other issues imperfect diagnostic methods. The objective of presented research consists in non-destructive studies of processes that influence specimen life and reliability. To this end, I will employ mainly noise based analytical methods in connection with observation of defect optical activities, capacitance measurement etc. These methods are closely related to some specimen bulk imperfections, crystal-lattice defect induced traps, local-stress-subjected regions and, finally, breakdowns, which might bring about specimen destruction. Based on a detailed study and understanding of transport processes, regions in which noise is generated can be identified and appropriate technological measures can be proposed and adopted. Presented research focuses, first of all, on the real solar cell structures, which are inhomogeneous in their nature and are difficult to diagnose. The significant part of this study is attend to the random  $n$ -level (in most case just two-level) impulse noise, usually referred to as microplasma noise. This noise is a consequence of local breakdowns in micro-sized regions and brings about reduction of lifetime or destruction of the  $pn$  junction. The micro-sized regions have been studied separately by electrical and optical methods and defect properties have been put forward. Nevertheless, no less significant part of the thesis is devoted to the fluctuation modeling of the bulk imperfections in the semi-analytical form.