

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

Ing. Jiří Vaněk

**VYUŽITÍ TRANSPORTNÍCH A ŠUMOVÝCH
CHARAKTERISTIK PRO TESTOVÁNÍ KVALITY
FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ**

**USAGE OF TRANSPORT AND NOISE CHARACTERISTICS FOR
QUALITY TESTING OF SOLAR CELLS**

ZKRÁCENÁ VERZE PHD THESIS

Obor: Mikroelektronika a technologie
Školitel: Prof. Ing. Jiří Kazelle, CSc.
Oponenti: Prof. Ing. Jaroslav Benda, CSc.
Doc. Ing. Jiří Vondrák, CSc.
Datum obhajoby: 28. 1. 2003

KLÍČOVÁ SLOVA

solární článek, fotovoltaika, diagnostika, šum, polovodič, PN přechod, U-I charakteristiky, U-C charakteristiky, kontaktní šum, tepelný šum, generačně-rekombinační šum, 1/f šum, simulace, MatLab, Simulink, termografie

KEY WORDS

solar cell, photovoltaics, diagnostic, noise, semiconductor, PN junction, U-I characteristics, U-C characteristics, contact noise, thermal noise, 1/f noise, simulation, MatLab, Simulink, thermografie

Práce je uložena na Ústavu elektrotechnologie FEKT VUT v Brně

OBSAH

1 SOUČASNÉ PROBLÉMY A VÝVOJOVÉ TRENDY V OBLASTI TESTOVÁNÍ KVALITY FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ.....	5
2 CÍL DISERTAČNÍ PRÁCE	6
3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	6
3.1 Spektrální napěťová hustota	6
3.2 Porovnávání různých technologií výroby kontaktů pomocí šumové 1/f diagnostiky.....	12
3.3 Vliv osvětlení na 1/f šum křemíkového solárního článku	14
3.4 Teplotní fluktuace a 1/f šum v polovodiči	16
4 ZÁVĚRY	21
5 LITERATURA	24

1 SOUČASNÉ PROBLÉMY A VÝVOJOVÉ TRENDY V OBLASTI TESTOVÁNÍ KVALITY FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ

Neustálý nárůst energetických nároků naší civilizace a zároveň nutnost tyto potřeby uspokojovat ekologicky čistými zdroji elektrické energie vede k výraznému vývoji součásti energetiky zvané alternativní zdroje elektrické energie. Jedním z nadějných budoucích zdrojů elektrické energie jsou fotovoltaické systémy, které by mohli pokrýt významnou část tohoto nároku. To samozřejmě vede k požadavku na zvýšenou kvalitu, spolehlivost a životnost těchto systémů a jejich jednotlivých částí. Je vytvářen neustálý tlak na hledání parametrů pro rychlé nedestruktivní testování těchto součástek. Souvisí to zejména s rostoucí složitostí vyspělejších a dokonalejších elektrických zařízení. To nutí výrobce dosáhnout spolehlivosti řádově 10^{-8} h^{-1} . Znamená to, že střední život součástky má být delší než 11 000 let. Je zřejmé, že ověření takovýchto hodnot spolehlivostních parametrů klasickými metodami je nemožné. Buď bychom museli zkoumat součástky po dobu přesahující lidské možnosti, nebo bychom museli zakládat testovací soubory přesahující 100 000 kusů.

Je mnoho různých technik nedestruktivního testování polovodičových součástek a zařízení, které umožňují detailní analýzu mechanismů v pracovním bodě součástky a vyhodnocení její kvality a celkové životnosti. Měření nízkofrekvenční šumové nadbytečné složky je jednou z těchto možných metod. Od roku 1980 je obecně přijata definice, že $1/f$ šum v PN přechodu diody může být interpretován pomocí McWhorterova modelu $1/f$ šumu. Teoretické předpoklady, že intenzita $1/f$ šumu v PN přechodu diody je nepřímo úměrná době životu minoritních nosičů a přímo úměrná rychlosti rekombinaci na kontaktech, se shodují s experimentálními výsledky, ukazující, že velikost intenzity $1/f$ šumu se zvyšuje s rostoucím počtem krystalografických defektů, rekombinačních center a množstvím povrchových stavů. [1-2]. Takové defekty snižují dobu života minoritních nosičů, nebo zvyšují rekombinační rychlost.

Velikost sériového odporu solárních článků lze považovat za ukazatel jejich kvality [3]. Změny velikosti tohoto odporu je bohužel velmi obtížné naměřit klasickými metodami, protože se pohybují v rozmezí od 0,1 do 10 Ω . $1/f$ šum při vysokých proudových hustotách v propustném směru je velmi závislý na velikosti sériového odporu polovodičového PN přechodu. Korelace mezi sériovým odporem a velikostí $1/f$ šumu při měřené frekvenci 1 kHz a proudu v propustném směru 500 mA umožňuje velmi přesně určit velikost sériového odporu PN přechodu fotovoltaického článku.

Široké využití fotovoltaiky závisí na ceně a spolehlivosti fotovoltaických solárních článků a celých modulech. Povrch článků, pokovené kontakty a kontakty mezi jednotlivými články jsou během provozu často vystavovány povětrnostním vlivům. Proto jsou jednotlivé solární články a kontakty v modulech chráněny. Bohužel jedním z příčin zkrácení doby života je degradace těchto elektrických kontaktů a propojení [4]. Měření sériového odporu se bohužel nejeví jako dostatečně citlivá metoda určení stupně degradace kontaktů. Opět je možné použít měření velikosti $1/f$ šumu [5].

Velikost $1/f$ šumu vyskytujícím se při procházení proudu neosvětleným solárním článkem zapojeným v propustným směru může sloužit k nedestruktivnímu odhadu spolehlivosti [6]. Experimentální výsledky s $1/f$ šumem odpovídají Kleinpenningovým jedno-dimenzionálním výpočtům pro PN přechody [3]. Při středních a nízkých hodnotách proudů je $1/f$ šum N^+P solárních článků asi 50 krát větší než se předpokládalo. Taková odchylka může být způsobena nestejnorodostí velké plochy přechodu. Lokální plochy s nižším zabudovaným potenciálem v přechodu způsobují snižování spolehlivosti.

Experimentální výsledky měření $1/f$ šumu mohou vést potvrzení správnosti teoretických modelů tohoto typu šumu [7-8]. Nejvíce výsledků v měření $1/f$ šumu lze popsat Hoogeovým empirickým vztahem [9]. Experimentálně je dokázáno, že tento typ šumu je způsoben fluktuacemi vodivosti, která je způsobena fluktuací pohyblivosti nosičů.

2 CÍL DISERTAČNÍ PRÁCE

Z výše uvedeného vyplývá náš cíl, najít takové parametry, pomocí nichž by bylo možné v poměrně krátké testovací době, nejlépe však přímo z testů před uvedením součástky do provozu, s vysokou pravděpodobností předikovat kvalitu, spolehlivost a životnost součástek. V našem případě je tento úkol konkretizován na fotovoltaické křemíkové solární články české produkce. Pro splnění tohoto cíle jsme si určili tyto úkoly.

1. Provést teoretický rozbor transportních a šumových charakteristik a na základě provedené analýzy vybrat vhodné parametry pro testování kvality, spolehlivosti a životnosti fotovoltaických křemíkových solárních článků.
2. Pomocí zrychlené degradace při působení zvýšené teploty ověřit vhodnost vybraných parametrů.
3. Na základě získaných poznatků navrhnout parametry pro možnost konstrukce testeru

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

3.1 SPEKTRÁLNÍ NAPĚŤOVÁ HUSTOTA

Elektronické součástky a systémy se projevují na svých svorkách náhodným kolísáním napětí nebo proudu, které se obvykle přirovnává k šumu. Tento šum není výsledkem chybných kontaktů nebo nějakého jiného rušivého jevu, který by mohl být eliminován, ale je součástí systému sám o sobě. Vzniká v náhodném, mikroskopickém chování nosičů náboje uvnitř elektronických částí systému.

Jestliže nosiče náboje mají tepelnou energii a pohybují se náhodně materiálem, střetávají se při své pouti s atomy materiálu. Tento náhodný pohyb je odpovědný za tepelný šum

Šum našeho zájmu je „nadbytečným“ šumem, který se též v některých případech může nazývat „proudovým“ šumem. Je to šum, který je přidán k základním šumovým složkám Johnsonova (nebo Nyquistova) šumu a výstřelovému šumu.

$$\overline{v_n^2} = 4kTR\Delta f \quad (3.1)$$

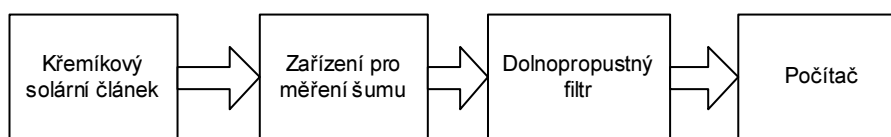
$$S_U = \frac{\overline{v_n^2}}{\Delta f} = 4kTR \quad (3.2)$$

kde v_n je šumová napěťová fluktuace, k Boltzmanova konstanta, T absolutní teplota, R odpor materiálu a Δf je šířka spektrálního měřeného pásma. Tato rovnice platí pro tepelný šum, který se vyskytuje ve všech typech systémů ve kterých lze definovat odpor R .

Výstřelový šum je generován vždy, když nábojové nosiče jako proud procházejí přes oblasti zakázaného pásu a v tomto smyslu se jedná o formu šumu v nerovnovázném stavu. Proudová fluktuace intenzity šumu je pak:

$$\overline{i_n^2} = 2qI\Delta f \quad (3.3)$$

Pro měření spektrální napěťové hustoty S_U je použit automatizovaný systém využívající metodu s filtry v měření spektrální proudové hustoty šumu v kmitočtovém rozsahu od 1 Hz do 10^5 Hz. Blokové schéma měřícího systému je zobrazeno na obr. 3.5.

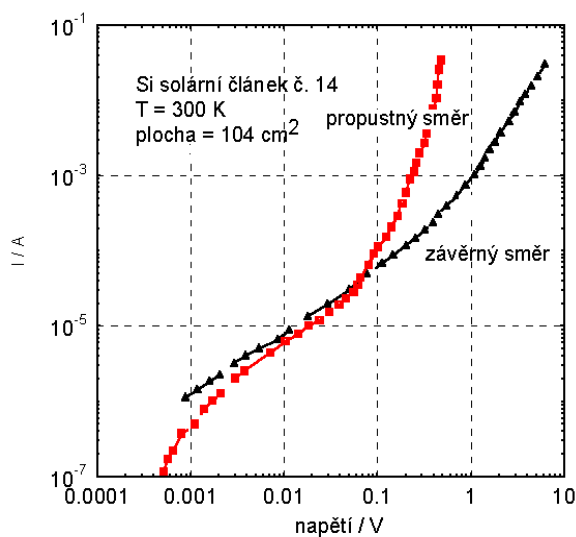


Obr. 3.5 Blokové schéma měření spektrální napěťové hustoty S_U v závislosti na kmitočtu.

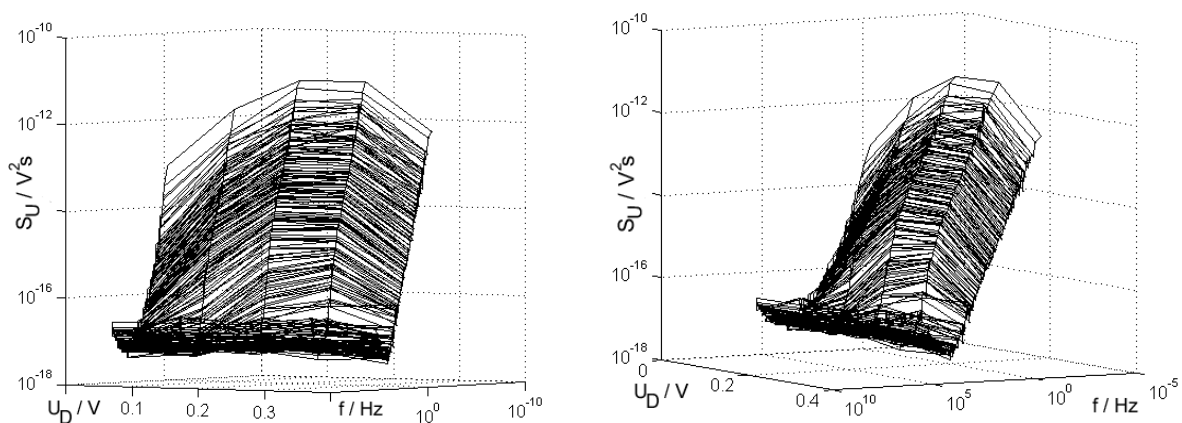
Bylo použito více než čtyřicet různých testovaných velkoplošných článků pro zkoumání kvality křemíkových solárních článků n^+pp^{++} PESC struktury pomocí techniky šumové spektroskopie. Měření bylo prováděno při různých podmínkách, jako je osvětlení, teplota a po tepelném namáhání po dobu 10 000 hodin při teplotě 400 K.

Obrázek 3.6 ukazuje proudově-napěťové charakteristiky křemíkového solárního článku č.14 v propustném a závěrném směru struktury n^+pp^{++} (p-typ CZ křemíková destička). Vnitřní odpor se pohybuje v rozsahu od 0,7 do 3 Ωcm . Ze sklonu v $\log I$ versus U při nízkých proudech jsme stanovili činitel ideálnosti n . Z extrapolace sklonu $q/2kT$ na obr. 3.6 jsme dostali saturační proud I_0 , který v rekombinační oblasti $n = 2$ vychází do nesaturovaného závěrného proudu. Faktor ideálnosti zde leží v rozsahu od 1,84 do 2,0 nad proudovými hustotami 10^{-3} Acm^{-2} pro testovaný Si solární článek. Nadbytečný $1/f^{\alpha}$ šum související s údaji na obr. 3.6 pro stejný vzorek č. 14 je dán v obr. 3.6, kde S_{UR} je šumová spektrální hustota měřená na zatěžovacím odporu 100 Ω .

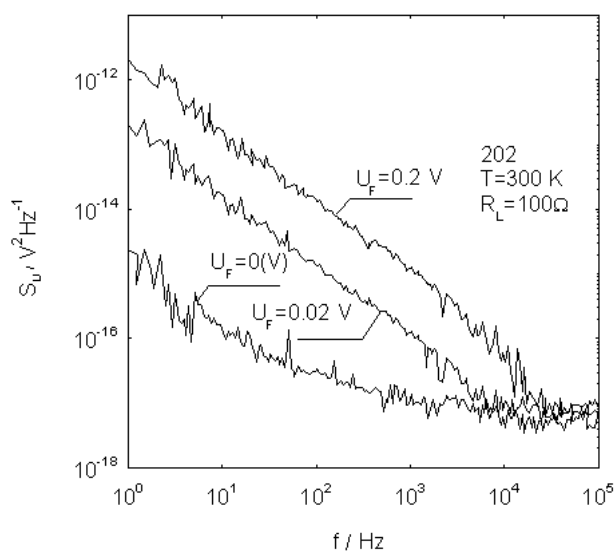
Protože šumové napětí na zatěžovacím odporu je měřitelná veličina, testovací procedura je založena na sběru dat šumového napětí na zatěžovacím odporu. Největší rozlišení proudové šumové spektrální hustoty je získáno při splnění podmínky proudového energetického přizpůsobení zařízení. Pak bude mít poměr měřeného šumu k šumu na pozadí největší hodnotu.



Obr. 3.6 Proudovo-napěťové charakteristiky křemíkového solárního článku při pokojové teplotě.



Obr. 3.7 Šumová spektrální hustota křemíkového solárního článku č. 14 (3D grafy).



Obr. 3.8 Šumová spektrální hustota v závislosti na frekvenci křemíkového solárního článku č. 202

Tyto šumové charakteristiky naměřené na zatěžovacím odporu PN přechodu solárního článku při napětí zapojeném v propustném směru dosáhnou maximální hodnoty (extrému), pokud se hodnota dynamického odporu testovaného článku bude rovnat zátěžovému odporu. Křivka maxima se posune ke spodním hodnotám napětí v propustném směru, pokud zvýšíme hodnotu zátěžového odporu. V našem experimentu jsme měřili šumové napětí nebo šumový proud na zátěžovém odporu:

$$S_U = S_I \cdot R_p^2, \quad (3.4)$$

kde R_p odpovídá případu, kde dynamický odpor PN přechodu solárního článku je $R_d = 1/\beta I$ tak, že pak máme:

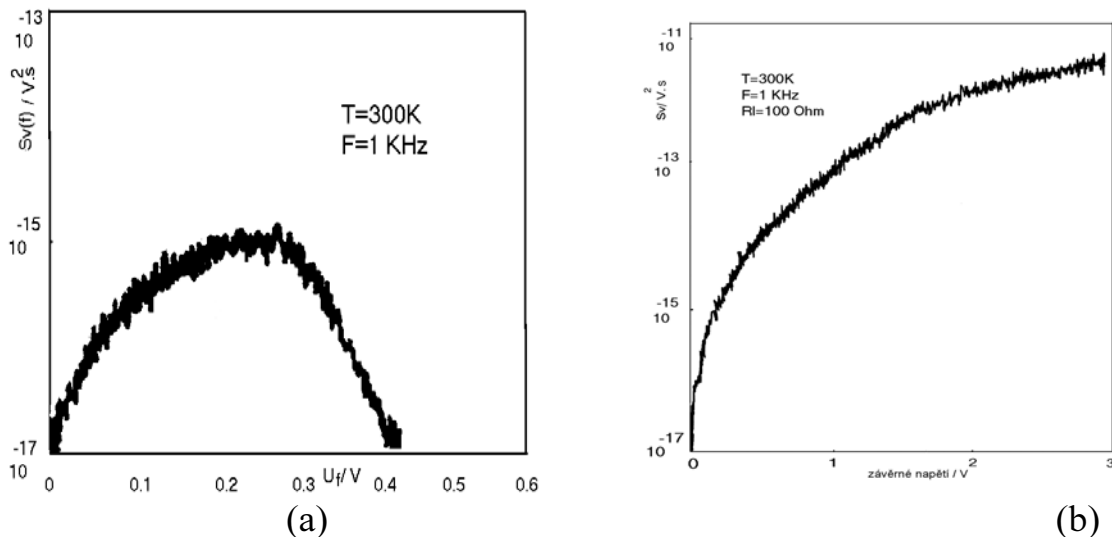
$$R_p = \frac{R_L}{\beta I R_L + 1}. \quad (3.5)$$

Pro režimy nízké injekce je zátěžový odpor $R_L < 1/\beta I_F$, tak že $I_{FL} < 1/\beta R_L$. Zvolením $\beta = 20 \text{ V}^{-1}$, $R_L = 100 \text{ } \Omega$, oblast proudu nízké injekce dosáhne až $I_{FL} < 5 \cdot 10^{-4} \text{ A}$.

Šumové napětí U_N na zátěžovém odporu je měřitelná veličina. V oblasti nízké injekce napěťová spektrální hustota je dána jako $S_U = S_I R_L^2$ kde:

$$S_I = \frac{I^2 N}{\Delta F} = \frac{U_N^2}{\Delta f \cdot R_L^2}. \quad (3.6)$$

V oblastech vysoké injekce je napěťová šumová spektrální hustota $S_U = S_I \cdot R_p^2$, kde $R_p = \frac{R_d \cdot R_L}{R_d + R_L}$. Napěťová šumová spektrální hustota dosáhne na zátěžovém odporu maximální hodnoty S_{UM} , jestliže vnitřní odpor zdroje šumu bude roven zátěžovému odporu (v oblasti nízkých frekvencí). Nejlepší pracovní bod pro měření šumového napětí v propustném směru PN přechodu je právě ten, kdy tento šum na zátěžovém odporu R_L dosáhne maximální hodnoty. Jak je patrné z obr. 3.7 a obr. 3.9, pro stejnosměrné napětí odpovídající tomuto maximu, vnitřní odpor tohoto šumového generátoru dosahuje velikosti zátěžového odporu. Údaje o křemíkovém solárním článku (zvolený článek č. 14) jsou zobrazena na obr. 3.7 jako $S_U(f)$ (která je v tomto případě přímo úměrná na $S_I(f)$ a dynamickému odporu) měnící se ve frekvenčním rozsahu od 1 Hz do 10^5 Hz.

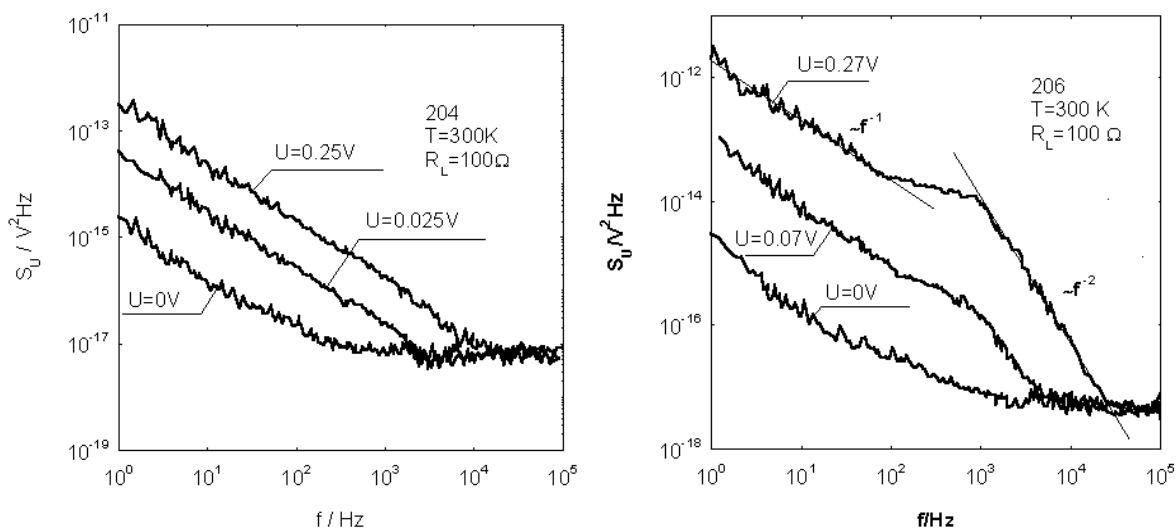


Obr. 3.9 Spektrální napěťová šumová hustota versus napětí Si solárního článku č. 14 při pokojové teplotě (a) propustný směr, (b) závěrný směr.

Křivky byly získány pro různé hodnoty přiloženého napětí, kde U_f má hodnoty od $U_f = 0$ V do $U_f = 0,4$ V. Bylo pozorováno, že přiložené napětí v propustném směru zvyšovalo spektrální napěťovou hustotu vzorku dokud nedosáhlo své maximální hodnoty $S_{UM}(f)$ při $U_f = 0,25$ V. Po tomto bodu se zvyšujícím se napětím (do $U_f = 0,4$ V) se šumové spektrum znovu snižovalo, jak ukazuje obr. 3.9 (a). Typický $1/f^\alpha$ šum ($\alpha = 1$) je zjištěn při nulovém přiloženém napětí v oblasti nízkých frekvencí do 10^4 Hz. Při vyšších kmitočtech nad 10^4 Hz pro $U_f = 0$ V převažuje komponenta tepelného šumu (shodná s Nyquistovým vzorcem $S_U = 4kTR$). Při zvyšujícím se přiloženém napětí od $U_f = 0,1$ V do $U_f = 0,4$ V se $1/f$ šumové spektrum objevuje ve frekvenčním rozsahu do 10^3 Hz a mezi kmitočty 10^2 Hz do 10^4 Hz se nachází generačně-rekombinační (G-R) šum, který má také $1/f^\alpha$ spektrum (α je ale v rozsahu od 1,5 do 2). Pozorovat G-R šum je možné ve vysoce dopovaných submikronových polovodičových vrstvách, kde v takovém materiálu (p-typ CZ křemíkový plátek v našem případě) Fermiho hladina je blízko vodivostního pásu, tak že všechny pasti jsou skoro plně zaplněny. Je dobře známo, že zaplněný nebo prázdný stav generuje G-R šum. Pozorované G-R spektrum se často nachází v rozšířeném Lorentzianově tvaru. G-R šum v rozšířeném Lorentzianově spektru ve vysoce dotovaných vrstvách může být přičítán ke G-R dějům na okrajích vrstev. Rozšířené G-R spektrum je výsledkem místní závislosti relaxační doby v depletiční oblasti blízko okrajů vrstev. Možnost takového rozšíření pro monoenergetické pasti v depletiční oblasti polovodičového PN přechodu již popisoval ve své práci Folkes [9].

Jak je jasné z obr. 3.7, generačně-rekombinační (G-R) šum vzniká jako výsledek náhodného zachytávání elektronů a děr v generačně-rekombinačních centrech a pastích v polovodiči, tak i tato informace o tom může být odvozena z G-R šumového měření.

$1/f$ šum, G-R šum a impulsní šum jsou těsně spjaty s vadami součástek, jako jsou povrchové defekty, nečistoty a dislokace. Dislokace a elektromigrace v kovové vrchní vrstvě mají vliv na spolehlivost součástek.

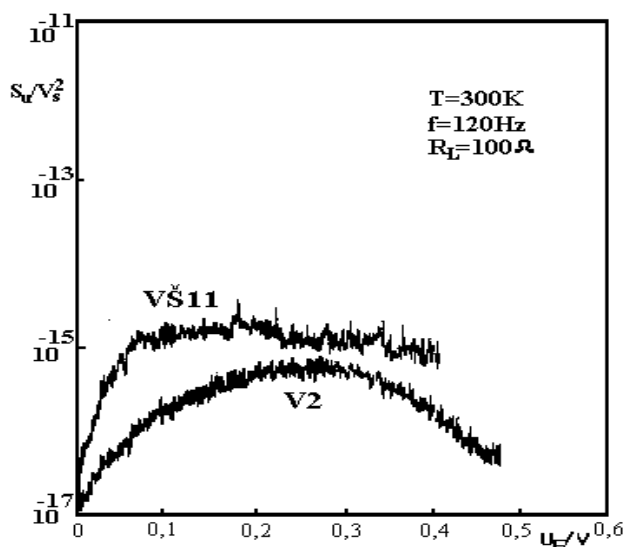


sol.čl. č. 204

sol. čl. č. 206

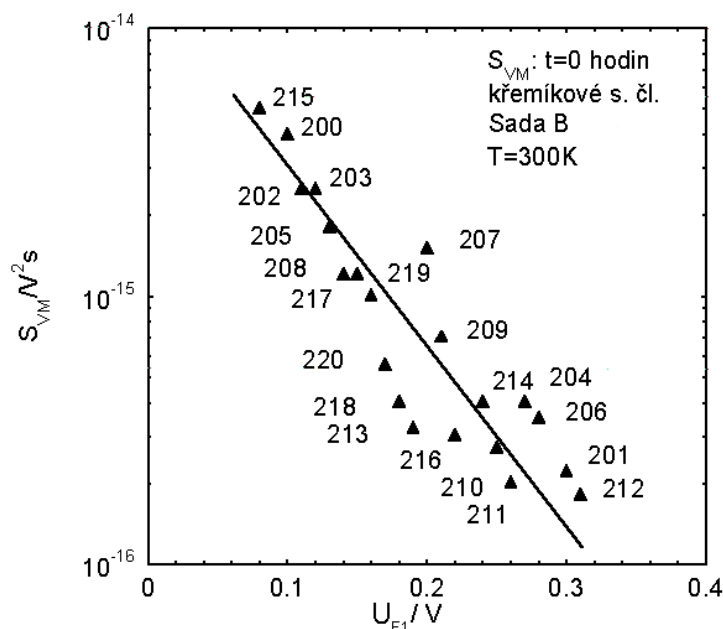
Obr. 3.10 Spektrální šumová napěťová hustota křemíkových solárních článků č. 204 a 206 jako funkce frekvence.

Byla naměřena závislost mezi šumovou napěťovou hustotou a přiloženým stejnosměrným napětím pro pevně dané hodnoty měřeného šumu 1 kHz při šířce pásma 20 Hz, který byl vyneseno do grafu 3.11. Údaje o S_{UR} u těchto dvou měřených vzorků byly měřeny na zatěžovacím odporu $R_L = 100 \Omega$. Je zřejmé, že Si solární článek VŠ11, který vykazoval výrazný nadbytek (svodového) ztrátového proudu, vykazuje nadbytečnou šumovou spektrální napěťovou hustotu, která je skoro dvakrát tak velká, jako u druhého vzorku V2 (dobrý vzorek). Maximum spektrální napěťové hustoty S_{UM} získané ze vzorku VŠ11 dosahuje hodnoty $S_{UM} = 5,1 \cdot 10^{-15} \text{ V}^2\text{s}$ při napětí v propustném směru $U_F = 0,25 \text{ V}$ při podmínkách energetického přizpůsobení vedení.



Obr. 3.11 Šumová spektrální napěťová hustota křemíkových solárních článků versus napětí v propustném směru.

Byla také provedena analýza hypotézy potenciálně existující korelace mezi šumovým kvalitativním parametrem S_{UM} a parametrem založeným na transportních charakteristikách U_{F1} (U_{F1} je rovno napětí v propustném směru, při kterém je proud diodou I_{F1} roven 10^{-3} A). Výsledek této studie korelace je prezentován na obr. 3.12 pro sadu vzorků B monokrystalických křemíkových solárních článků, která byla provedena pro všechny vzorky před teplotním namáháním a namáháním elektrickým polem.



Obr. 3.12 Korelace mezi S_U a U_{F1} .

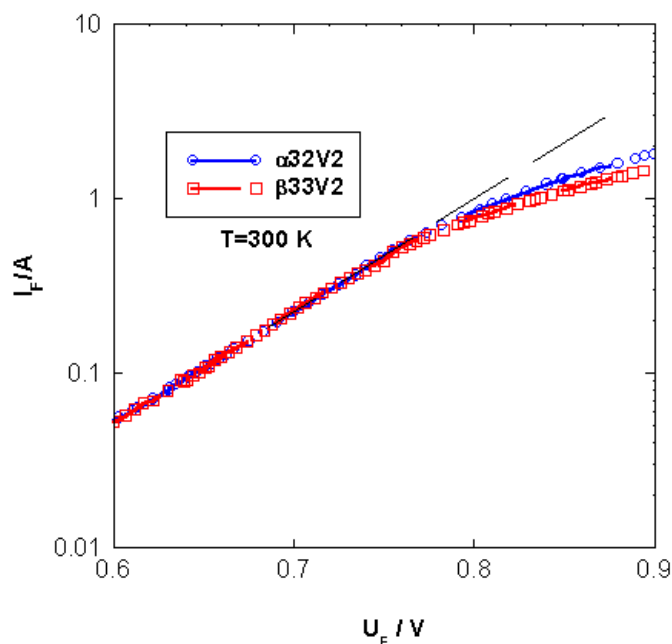
3.2 POROVNÁVÁNÍ RŮZNÝCH TECHNOLOGIÍ VÝROBY KONTAKTŮ POMOCÍ ŠUMOVÉ 1/F DIAGNOSTIKY

Zkoumali jsme kvalitu kontaktů vyrobených pomocí „alfa“ technologie a porovnávali s články vyrobených pomocí „beta“ technologie. Používaná stará technologie alfa je využití naprašování kontaktů a následného pocínování pro zlepšení pájitelnosti. Spodní kontakt na P^{++} vrstvě je vytvořen jako plný měděný plát a z horní vrstvy je vytvořena struktura vodivých linií a sběrných kolektorů. Nová technologie „beta“ je vytváření kontaktů nanesením stříbrné pasty pomocí sítotisku a následné vypálení v peci.

Při této technologii se vytváří systém vodivých cest z obou stran solárního článku. Výhoda technologie „beta“ je ekonomičnost a větší sériovost

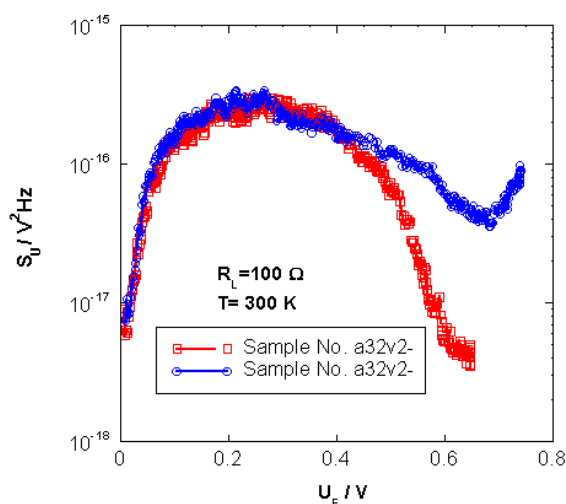
Porovnání U-I charakteristik v oblasti vysokých proudů vzorků $\alpha 32V2-2$ a $\beta 33V2-2$ je na obr. 3.13.

Jak je vidět z grafu, zlom v U-I charakteristice pro vyšší napětí je větší pro vzorek $\beta 33V2-2$ a lze z něj stanovit sériový kontaktní odpor, který má hodnotu $R_s = 0,072 \Omega$, zatímco odpor vzorku $\alpha 32V2-2$ je $R_s = 0,049 \Omega$.

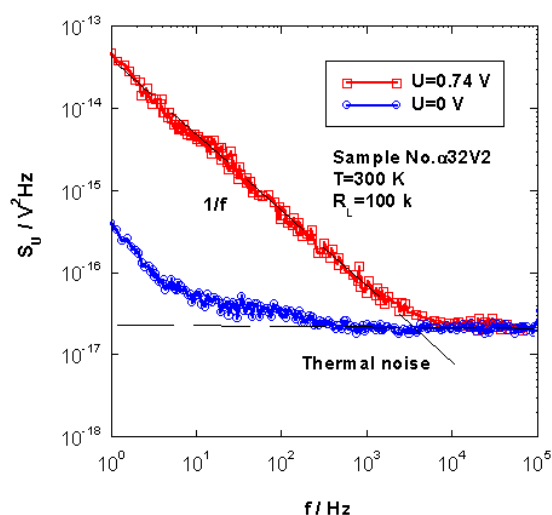


Obr. 3.13 I-V charakteristiky v oblasti vysokých proudů vzorků $\alpha 32V2$ -2 a $\beta 33V2$ -2

Na obr. 3.14 je zobrazena šumová spektrální napěťová hustota S_U v závislosti na přiloženém napětí v propustném směru pro vzorek $\alpha 32V2$ -2. Zatěžovací odpor byl použit $R_L = 100 \Omega$ a střední kmitočet pásmové propusti byl $f = 1 \text{ kHz}$. Na tomto obrázku je porovnáván S_U šum malých řezů vzorku $\alpha 32V2$ -2 při konektování pomocí běžného držáku a pomocí pájeného spoje. Z velkého nárůstu nadbytečného šumu můžeme pozorovat, že kontakt vytvořený pomocí běžného držáku je nedostatečný a je zdrojem šumu u nepájeného spoje pro oblast napětí větší než 0,5 V v propustném směru.

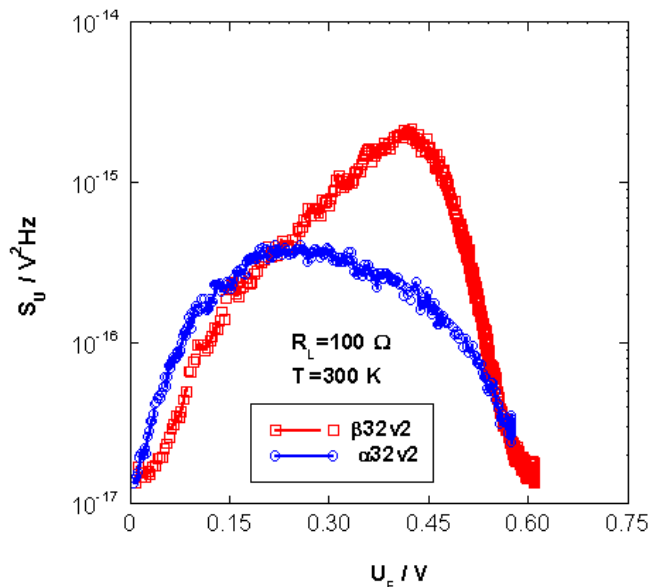


Obr. 3.14 Porovnání S_U šumu 100 mm^2 řezů vzorku $\alpha 32V2$ -2 při konektování pomocí držáku a pomocí pájeného spoje



Obr. 3.15 Spektrální šumová hustota v závislosti na frekvenci vzorku $\alpha 32V2$

Na obr. 3.15 je spektrální šumová hustota S_U v závislosti na frekvenci vzorku $\alpha 32V2$. Šumové napětí je snímáno na zatěžovacím odporu $R_L = 100 \Omega$. Napětí $U_F = 0,74 V$ je nastavené tak, aby efekt vytváření šumu kontaktů byl co největší. Z obrázku je jasné, že nadbytečná šumová složka $1/f$ převládá pro frekvence do $10^4 Hz$ a pro vyšší frekvence je maskována tepelným šumem.



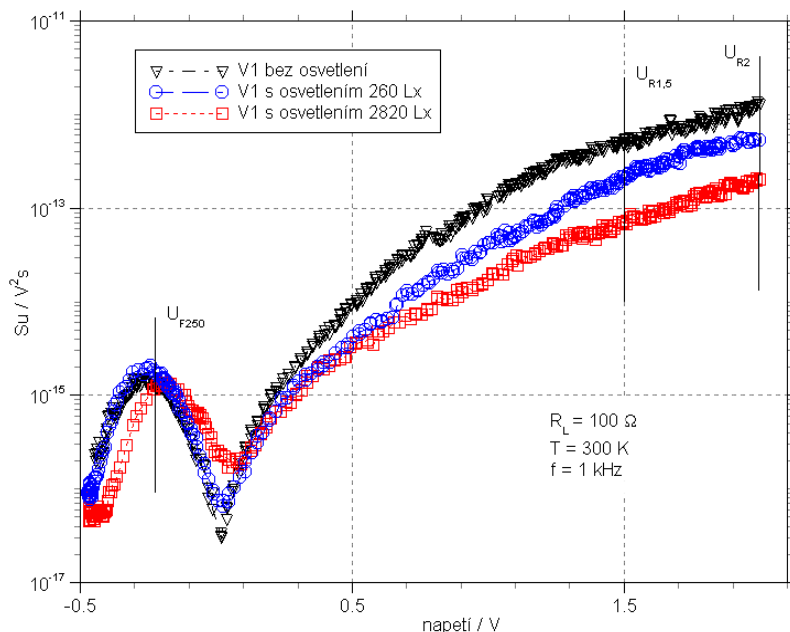
Obr. 3.16 Porovnání S_u malých 100 mm^2 řezů vzorku $\alpha 32V2-2$ a $\beta 33V2-2$

Na obr. 3.16 je šumová napěťová spektrální hustota S_U v závislosti na přiloženém napětí v propustném směru pro malé řezy (100 mm^2) vzorku $\alpha 32V2-2$ a $\beta 33V2-2$. Zatěžovací odpor byl použit $R_L = 100 \Omega$ a střední hodnota frekvence pásmové propusti byla $f = 1 \text{ kHz}$. Na tomto obrázku je vidět porovnání S_u šumu vzorků α technologie a β technologie. Můžeme pozorovat nárůst nadbytečné šumové složky pro beta solární články. Experimentální výsledky získané jak z $U-I$ charakteristik, tak i pomocí monitorování spektrální napěťové šumové hustoty ukazují, že doposud je alfa technologie kvalitnější.

3.3 VLIV OSVĚTLENÍ NA $1/f$ ŠUM KŘEMÍKOVÉHO SOLÁRNÍHO ČLÁNKU

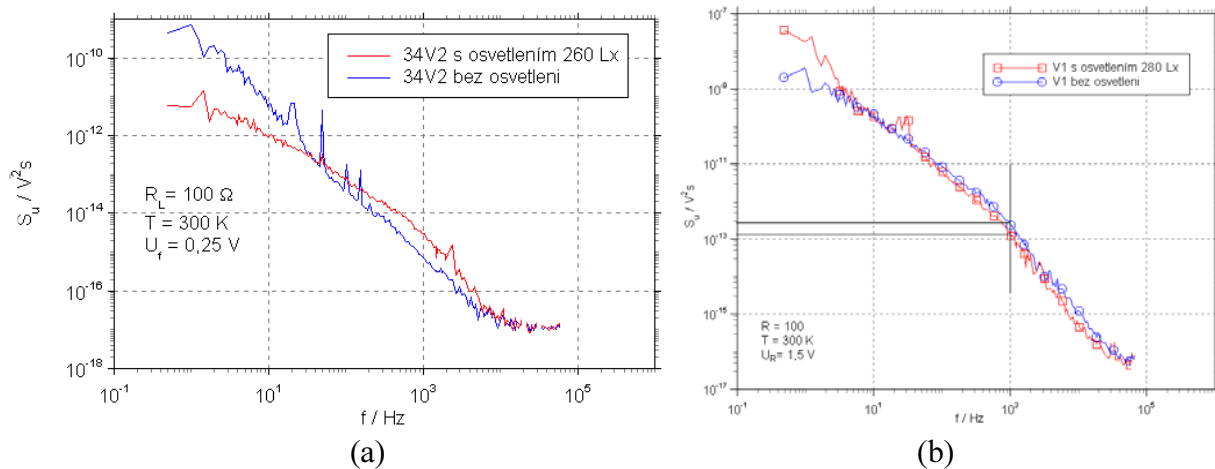
Výzkumy stacionárních, kinetických a šumových charakteristik různých PN přechodů (takových jako solární články) ukázaly, že osvětlení PN přechodu může mít vliv nejen na vznik fotonapětí, ale i ve zřetelné změně vlastností oblasti prostorového náboje. Tento jev byl pozorován jen na heteropřechodech založených na $A^{II}B^{VI}$ sloučeninách [10] - [11]. Zároveň nebyl nalezen žádný vliv osvětlení na vlastnosti oblasti prostorového náboje v počtu homo a heteropřechodů založených na $A^{III}B^V$ sloučeninách [12]. Chování nízkofrekvenčního šumu ve chlazených InSb fotodiodách pozorovaných ve [13] ukázalo různé rysy, které naznačují, že i v tomto případě se vyskytují změny v oblasti prostorového náboje. V této práci bylo provedeno měření $1/f$ šumu křemíkových solárních článků (o ploše 104 cm^2).

Experimenty byly uskutečněny na PN přechodech křemíkových solárních článků připravených borovou (B) difúzí v p-typu Si plátků. Měření bylo provedeno při pokojové teplotě $T = 300$ K. Zdrojem osvětlení byla halogenová lampa (55 W) připojená ke stejnosměrnému stabilizovanému zdroji proudu, aby bylo možné nastavovat různé stupně intenzity osvětlení L vztahující se k proudu lampou. Pro každý stupeň osvětlení L jsme měřili spektrální hustotu $S_U(f)$ fluktuace fotonapětí U_{ph} při přiloženém napětí.



Obr. 3.17 Spektrální napěťová hustota $S_U(f)$ křemíkového solárního článku V1 sada D při různých stupních osvětlení L v závislosti na napětí.

Experimentální vybavení pro $S_U(f)$ měření se skládalo z širokopásmového nízkošumového předzesilovače 233-7 připojeného k selektivnímu nanovoltmetru UNIPAN 233 naladěného na frekvenční rozsah od $f = 2$ Hz do 10^5 Hz, spodní propusti filtru a mikrovoltmetru se zvýšenou časovou konstantou.



Obr. 3.18 Spektrální napěťová hustota $S_U(f)$ křemíkových solárních článku při různých stupních osvětlení L v závislosti na frekvenci a přiloženého napětí

Obr. 3.18 ukazuje závislosti $S_U(f)$ typických křemíkových solárních článků při osvětlení. Tyto závislosti byly měřeny při pokojové teplotě bez osvětlení a při různých stupních intenzity osvětlení L halogenovou lampou. Jak se zdá z obrázku při $L = 0 \text{ Lx}$ (podmínky bez osvětlení) $S_U(f)$ má spektrum řídicí se Hoogovým

vzorcem $\frac{S_U}{r^2} = \frac{\alpha_H}{Nf}$. Také je zřetelně vidět, že tvar spektrální napěťové hustoty $S_U(f)$

závisí na stupni intenzity osvětlení L a liší se jeden od druhého. Předpokládáme, že tepelný šum $S_U(f) = 4kTG_d$, kde k je Boltzmanova konstanta. Při $L = 0 \text{ Lx}$ je Nyquistův vztah splněn, protože dochází k termodynamické rovnováze, při $L \neq 0 \text{ Lx}$ pozorujeme opět závislost $S_U(f) = \alpha_H f^{-1}$ (kde S_U je posunuta nahoru k vyšším hodnotám S_U s rostoucím L) v S_U spektru v kmitočtovém rozsahu $1 \text{ Hz} < f < 10^3 \text{ Hz}$, a pro $f > 10^3 \text{ Hz}$ šumová spektrální fotonapěťová hustota je daná pouze výstřelovou a termální šumovou fluktuací: $S_U(f) = 2qI + 4kTG_d$, kde q je náboj elektronu a G_d je dynamická vodivost vzorku křemíkového solárního článku při osvětlení. Pro vyšší hodnoty osvětlení L (pro fotonapětí větší nebo rovno 350 mV) $S_U(f)$ spektrum poklesne opět jako při $L = 0 \text{ Lx}$. Závislost spektrální fotonapěťové hustoty $S_U(f)$ s rostoucím L ($U_{ph} \neq 0 \text{ V}$) se může vzniknout z vodivostní fluktuace oblasti prostorového náboje nebo v neutrálních oblastech ve vzorku křemíkového solárního článku s osvětlením.

Závislosti šumové spektrální fotonapěťové hustoty $S_U(f)$ s různými stupni intenzit osvětlení L při konstantní frekvenci $f = 1 \text{ 000 Hz}$ na napětí jsou zřejmé z obr. 3.17, kde se zvyšujícím se napětím v propustném směru (na grafu je na záporné poloose) zvyšuje $S_U(f)$ dokud nedosáhne své maximální hodnoty $6,37 \cdot 10^{-14} \text{ V}^2\text{s}$ a to odpovídá fotonapětí rovnajícímu se 275 mV a pak $S_U(f)$ poklesne opět se zvyšujícím se napětím. Pro měřenou frekvenci 1 000 Hz je závislost na L méně silná, což dokládá obr. 3.17. Nárůst v šumovém fotonapěťovém spektru s rostoucím L (když je Si solární článek zapojen v propustném směru a $U_F = 0 \text{ V}$) může vzniknout fluktuací vodivosti v oblasti prostorového náboje PN přechodu článku. Následný pokles lze vyložit jako důsledek převládnutí vlivu vnitřního dynamického odporu zdroje a nepřizpůsobení přenosu energie ze zdroje na měřicí přístroj. Věříme, že šum pozorovaný při $L \neq 0 \text{ Lx}$ (t.j., $U_{ph} \neq 0 \text{ V}$) vzniká a je generován v oblasti prostorového náboje. Korelace mezi $1/f$ šumovým spektrem a intenzitou osvětlení L se objevuje v PN přechodu Si solárního článku při nulovém přiloženém napětí při vlivu osvětlení L podmíněnou fluktuací vodivosti v neutrální oblasti nebo fluktuací fotonapětí.

3.4 TEPLTNÍ FLUKTUACE A 1/F ŠUM V POLOVODIČI

Nedávno Clarke, Uoss a Hsiang [15] - [16] studovali odporovou fluktuaci v tenkých kovových filmech. Interpretovali výsledky v rámci kolísání teploty, která modulovala odpor. Jejich experimentální údaje kovových filmů byly v souladu

se semiempirickým spektrálním postulátem při předpokladu, že $S_R(f)$ je přímo úměrné $1/f$ pro frekvence $f_1 < f < f_2$:

$$\frac{S_R(f)}{R^2} = \frac{\gamma^2}{[3N_A(3 + Lnf_2/f_1)f]}, \quad (3.7)$$

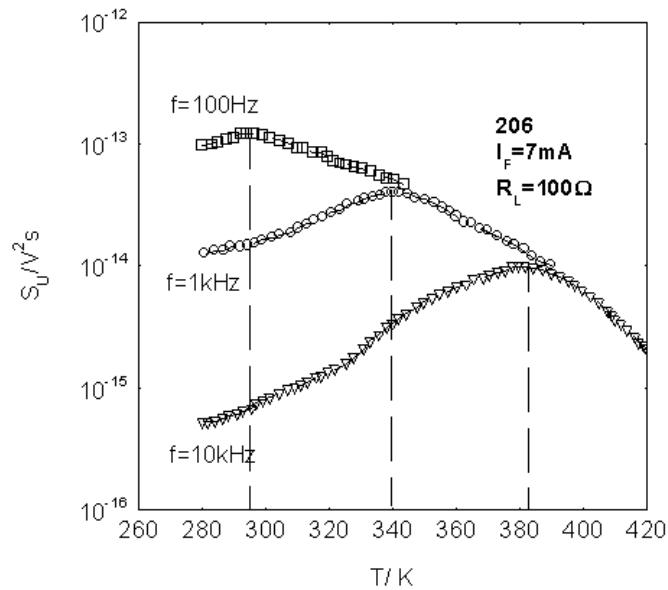
kde N_A je počet atomů v kovovém vzorku a $\gamma = (T/R)(dR/dT)$. Pro mnoho kovů se γ blíží k jedničce. Frekvence f_1 a f_2 souvisejí s rozměry vzorku. Pro teploty vyšší než je Debyeova teplota normalizované spektrum můžeme vyjádřit jako:

$$\int_0^{\infty} \{S_R(f)/R^2\} df = \int_0^{\infty} \lambda^2 \{S_T(f)/T^2\} df = \gamma^2 k/C_U = \gamma^2/3N_A, \quad (3.8)$$

kde $C_U = 3 kN_A$ je tepelná kapacita vzorku. $1/f$ šum polovodičovém filmu může být vyjádřen fluktuací teploty, která bude modulovat odpor R vzorku a generovat napěťovou fluktuaci za přítomnosti ustáleného proudu I . Pak:

$$S_U(f) \alpha I^2 \left(\frac{\partial R}{\partial T} \right)^2 \langle (\Delta T)^2 \rangle = U^2 \gamma^2 \langle (DT)^2 \rangle,$$

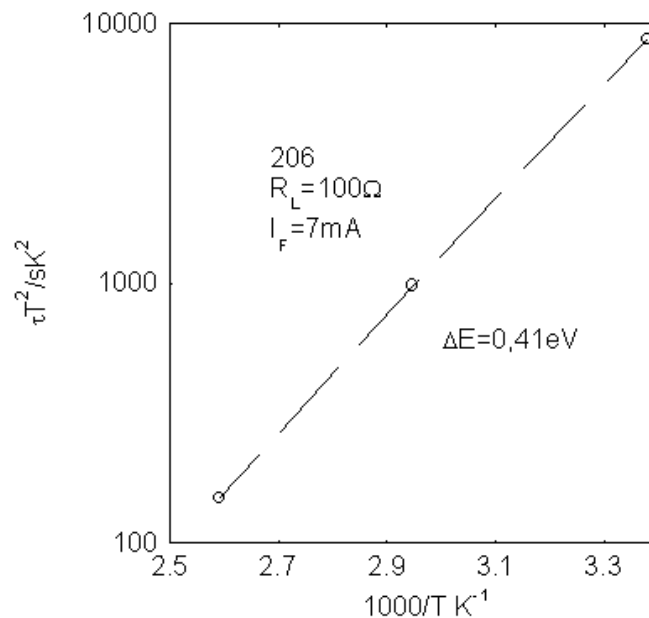
kde $\langle (DT)^2 \rangle$ je střední kvadratická hodnota tepelné fluktuace. Při tepelné rovnováze je $\langle (\Delta T)^2 \rangle = kT^2/C_U$. Pro tepelnou fluktuaci ΔT ve vzorku odporu R a tepelný koeficient rezistivity $\gamma = \frac{1}{R} \frac{\partial R}{\partial T}$ můžeme vyjádřit napěťovou fluktuaci $\Delta U = IR\gamma\Delta T$ za přítomnosti ustáleného proudu. Spektrum napěťové fluktuace $S_U(f)$ je vztaženo k teplotní fluktuaci $S_T(f)$ jako $S_U(f) = U^2 \gamma^2 S_T(f)$. Jestliže dochází k tepelné fluktuaci díky rovnovážné výměně energie mezi vzorkem a okolím, pak $S_T(f) = \alpha kT^2/C_U$. V tomto případě je $S_U(f) = \alpha U^2 \beta^2 T^2 k/C_U$. Závislost spektrální napěťové hustoty $S_U(f)$ pro různé teploty 280 K - 420 K monokrystalického křemíkového článku č. 206 (o ploše $S = 100 \text{ cm}^2$) n^+pp^{++} struktury je zobrazena na obr. 3.19. Z tohoto obrázku můžeme pozorovat při třech různých středních frekvencích pásmové propusti ($100, 10^3$ a 10^4 Hz) spektrální šumovou hustotu na zatěžovacím rezistoru 100Ω při konstantním stejnosměrném proudu vzorkem $I_F = 7 \text{ mA}$. Závislost vykazuje vrchol, který se posouvá s rostoucí frekvencí k vyšším teplotám. Tyto vrcholy jsou $100 \text{ Hz}/295 \text{ K}$, $1 \text{ kHz}/340 \text{ K}$ a $10 \text{ kHz}/385 \text{ K}$. Rovnovážnou teplotní fluktuaci modulující odpor vzorku a jejich fyzikální původ pro $1/f$ šum při tepelném vlivu nebo při tepelné rovnováze nalezneme v literatuře [16].



Obr. 3.19 Teplotní závislost spektrální hustoty vzorku č. 206

Amplituda impulsního šumu závisí hlavně na τ a je teplotně závislá. Z vrcholů z obr. 3.19 můžeme určit dobu života τ a teplotu, při které se tento vrchol objeví. Navíc pokud past nebo centrum má aktivační energii ΔE , bude se měnit v závislosti na teplotě podle vzorce:

$$\tau = \frac{1}{T^2} \exp\left(\frac{\Delta E}{kT}\right) \quad (3.9)$$



Obr. 3.20 Arrheniova závislost τT^2 ku $1/T$ článku č. 206

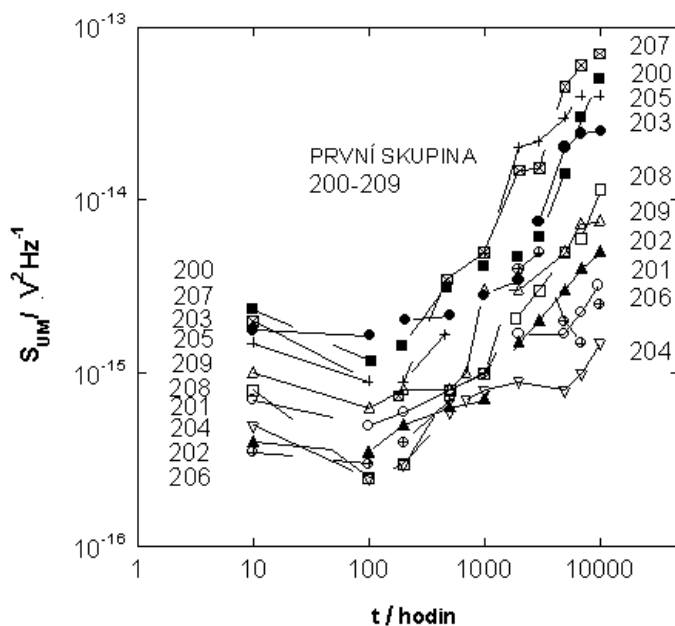
Na obr. 3.20 je zobrazena závislost τT^2 na $1/T$. Aktivační energie může být určena ze sklonu tohoto grafu a je $\Delta E = 0,41$ eV. Toto může být způsobeno přítomností Fe.

Hodnoty aktivační energie ostatních vzorků, které vykazují impulsní šum se pohybují v rozmezí 0,38 až 0,43 eV.

Jedním z nejvíce důležitých nástrojů pro diagnostiku solárních článků je vliv tepelného namáhání na elektrické parametry článků. Zpravidla solární články podstoupí a projdou testem životnosti před zařazením do jednočládkových nebo modulových venkovních použití. Proto laboratorní experimentální testy jsou prováděny kvůli pozorování degradací článků a/nebo kvůli odhadu jejich parametrů. Aby se zabezpečilo, že pozemské články budou mít schopnost snášet namáhání, které jsou spojeny s denními a klimatickými změnami teploty bez nadměrného mechanického nebo elektrického degradování, jsou solární články tepelně namáhány při různých testech. Testované křemíkové solární články (více jak 50 kusů) jsou umístěny do tepelné komory (při konstantní teplotě 400 K pro časovou periodu blízkou 4 000 hodinám), kde tepelné namáhání, které články podstupují při denních nebo klimatických extrémech při normální funkci článků je simulováno uměle. Klíč pro výběr rozsahu teplot při testu souvisí s minimalizováním doby urychlením efektu tepelného namáhání.

Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, teplotní namáhání monokrystalického křemíkového článku n^+pp^{++} PESC konstrukce ovlivňuje elektrické parametry tohoto článku, tj. výsledkem tepelného namáhání při 400 K pro časovou periodu 10 000 hodin se elektrické parametry I_{SC} , U_{OC} , FF, EEF, R_S a R_{Sh} zhorší. Nyní se pokusíme najít souvislost mezi tepelným namáháním a hodnotou naměřenou šumovým měřením a vytvořit tím diagnostický nástroj.

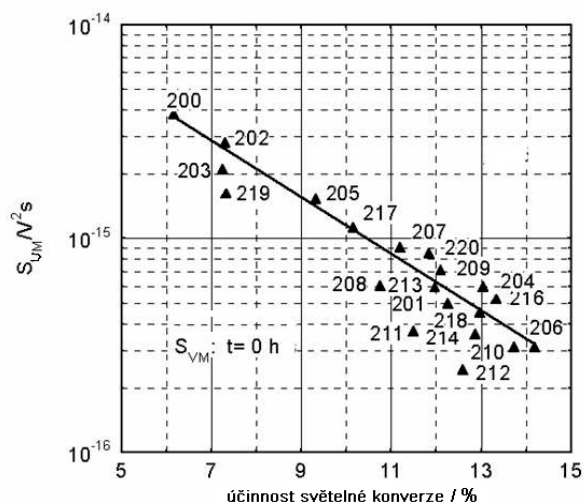
Na obr. 3.21 je zobrazena korelace maxima parametru spektrální napětové hustoty $S_{UM}(f)$ (u článků vyrobených starou technologií) při zvoleném přiloženém napětí $U_{F1} = 0,3$ V a po tepelném namáhání 400 K po době 10 000 hodin. Spektrální hustota se zvyšuje s dobou namáhání tj. více defektů se objevilo aktivováním tepelnou degradací v celém křemíkovém solárním článku.



Obr. 3.21 Korelace mezi $S_{UM}(f)$ a časem tepelného namáhání křemíkových článků

Korelace mezi účinností přeměny η a spektrální napět'ovou hustotou jako diagnostickým parametrem $S_{UM}(f)$ Si solárních článků po teplotním namáhání je také důležitým parametrem při rozhodování mezi špatným a dobrým solárním článkem. Je jasné, že vzorky s malou hodnotou $S_{UM}(f)$ mají větší elektrické parametry po namáhání, než ty s vyšší hodnotou. Takto může $S_{UM}(f)$ charakterizovat postupnou kvalitu degradace testovaných vzorků. Korelace mezi $S_{UM}(f)$ a parametry účinností monokrystalických křemíkových testovaných článků jsou zobrazeny na obr. 3.22. (při $U_{F1} = 0,3$ V) před a po teplotním namáhání 10 000 hodin při teplotě 400 K. Faktor korelace roste s dobou namáhání do hodnoty 0,50.

Šumová spektroskopická technika může být považována za jednu z nejcitlivějších diagnostických technik polovodičové technologie. Nejlepších výsledků bude dosaženo, pokud budou vždy porovnávány jak naměřené šumové, tak i transportní charakteristiky. Jakostní a spolehlivostní ukazatel je založený na transportních a šumových charakteristikách PN přechodu součástky při přiloženém napětí v propustné i závěrném směru. Tyto ukazatele součástek jsou jednoduše a snadno naměřeny a vyhodnoceny a je jejich použití nedestruktivní a proveditelné při jakémkoliv stupni výrobního procesu. Z měření je spektrální šumová hustota související s defekty $1/f$ šumem, G-R šumem, a impulsním (burst) šumem a proudová šumová hustota přímo úměrná čtverci stejnosměrného proudu I^2 v nízko-injekčním módu. Zároveň vzorky monokrystalického křemíkového solárního článku s nízkou hodnotou šumového spektra mají vysokou účinnost. Průměrná hodnota šumové spektrální hustoty většiny vzorků (více jak 40 vzorků) se zvýšila s dobou teplotního namáhání.



Obr. 3.22: Korelace mezi $S_{UM}(f)$ a účinností Si solárních článků po teplotním namáhání.

4 ZÁVĚRY

Problémy okolo spolehlivosti elektrických součástek a zařízení patří v současné době v elektrické praxi mezi nejaktuálnější. Stále stoupající trendy požadavků na kvalitu, spolehlivost a životnost vytváří tlak na hledání parametrů pro rychlé a nedestruktivní testování zejména složitých polovodičových struktur.

Tato práce se zaměřila na teoretické a experimentální studium transportních a šumových charakteristik fotovoltaických monokrystalických solárních článků a byla doplněna i porovnáním pomocí termografické metody.

Díky teoretickému rozboru fyzikálních vlastností fotovoltaického článku bylo navrženo několik okruhů teoretického i experimentálního výzkumu:

Předpokládalo se, že díky fyzikálním elektrickým vlastnostem PN přechodu bude ovlivněn tvar výstupní závislosti spektrální šumové hustoty na frekvenci a to hlavně dynamickým odporem, bariérovou a difúzní kapacitou. Tento předpoklad byl ověřen pomocí výpočtu v matematickém programu MatLab.

Předpokládalo se, že díky rostoucímu počtu volných nosičů se bude vodivost fotovoltaických článků zvyšovat a proto bude spektrální šumová hustota s rostoucím osvětlením klesat. Tento předpoklad byl ověřen v experimentální části výzkumu.

Předpokládalo se, že díky vlivu rekombinačních center a další elektrické nehomogennosti v solárních článcích bude možné podle velikosti spektrální šumové hustoty tyto vady detekovat a použít šumové charakteristiky pro diagnostické účely solárních článků. Tento předpoklad byl ověřen v experimentální části výzkumu.

Měření probíhalo na šesti sadách technologicky různých křemíkových monokrystalických fotovoltaických solárních článcích n^+pp^{++} Passivated Emitter Solar Cell (PESC) typu vyrobených na křemíku p-typu Czochralski (Cz) (Bórem dopovaný na vnitřní měrný odpor od 1 do 3 Ωcm). Při různých podmínkách měření (bez osvětlení, s osvětlením, teplotě, urychleným stárnutím pomocí teplotního namáhání 400 K po dobu 10 000 hodin) byly měřeny transportní charakteristiky (U-I a U-C), které podrobně vypovídají o vlastnostech fotovoltaických solárních článků a o jejich spolehlivosti a životnosti. Tyto naměřené výsledky byly porovnávány také s technickými daty poskytnutými výrobcem, jako je proud nakrátko I_{sc} , napětí naprázdno U_{oc} , konverzní účinnost η a faktor plnění (Fill factor) FF. Z naměřených charakteristik byly určeny sériové a paralelní odpory R_s a R_{sh} před a po urychleném stárnutí.

Vzhledem k tomu, že v průběhu zrychlené degradace bylo nutné změřit přes 1 000 charakteristik a vyhodnotit přes 5 000 parametrů, bylo pro sledování transportních a šumových charakteristik vybudováno zcela automatizované pracoviště řízené počítačem. To umožňuje snímat U-I charakteristiky a vyhodnotit parametry β a R_s . Rovněž je možné automaticky sledovat průběhy spektrální hustoty šumu v závislosti na přiloženém napětí a frekvenci.

V průběhu U-I charakteristik lze definovat několik významných oblastí:

- 1) lineární ohmická oblast, při které je přiložené napětí menší než je tepelné napětí PN přechodu fotovoltaického solárního článku (menší jak 0,026 V při pokojové teplotě)
- 2) široká oblast nadbytečného proudu odpovídající oblasti nízké injekce (přiložené napětí se pohybuje v rozmezí od 0,05 do 0,4 V)
- 3) exponenciální oblast odpovídající generačně rekombinačnímu proudu
- 4) exponenciální oblast odpovídající difúznímu proudu a
- 5) oblast vysoké injekce, ve které převládá vliv sériového odporu.

Všechny tyto oblasti lze nalézt v U-I charakteristikách našich vzorků fotovoltaických solárních článků, přestože některé více či méně zanikají v porovnání s ostatními oblastmi. Disperze U-I naměřených charakteristik je extrémní v oblasti svodového proudu s porovnáním s oblastí, kde převládá difúzní proud. Indikátory kvality U_{F1} , U_{F2} , U_{F3} jsou voleny tak, aby definovaly kvalitu solárního článku při nízké injekci, v oblasti generačně-rekombinačního proudu a v difúzní oblasti.

Při porovnání U-I charakteristik naměřených před a po urychleném tepelném stárnutí (400 K po dobu 10 000 hodin) vzrostl nadbytečný generačně-rekombinační šum. Toto může být výsledkem snížení doby života transportních nosičů a zvýšením rekombinačního proudu. Po urychleném stárnutí se také zhoršily další parametry, jako je proud nakrátko I_{sc} , napětí naprázdno U_{oc} , konverzní účinnost η a faktor plnění (Fill factor) FF. Po tepelném namáhání 4000 hodin I_{sc} vykazuje snížení v průměru o 2,45 % pro A sadu a 2,2 % pro B sadu solárních článků. Účinnost solárních článků klesla pro sadu A o 8,3 % a pro sadu B o 3,85 %. Fill factor se změnil pro A sadu o 4,9 % a pro B sadu o 1,6 %.

Měření C-U charakteristik bylo prováděno z důvodu určení elektronové hustoty nosičů v p-typu CZ křemíkových plátků.

Hlavní část práce byla věnována měření šumových charakteristik fotovoltaických solárních článků při různých podmínkách měření (bez osvětlení, s osvětlením, při různé teplotě, po urychleném stárnutí pomocí teplotního namáhání 400 K po dobu 10 000 hodin) a následnou analýzou.

Při analýze spektrální napěťové hustoty bylo zjištěno, že nadbytečný šum obsahuje šum typu $1/f^\alpha$. Pokud α je velmi blízké jedné, hovoříme o $1/f$ šumu. Pokud nadbytečný šum obsahuje příspěvek generačně-rekombinačního šumu, pak α je v rozmezí od 1,5 do 2. Přítomnost generačně-rekombinačního šumu se rovněž potvrdila silnou teplotní závislostí spektrální hustoty.

Při měření šumových charakteristik v závislosti na osvětlení byl pozorován nárůst generačně-rekombinačního šumu a změnu v α koeficientu směrem blíže k jedné. Zároveň bylo pozorováno, že pro určité frekvence se charakteristiky protínají a v těchto bodech jsou charakteristiky téměř nezávislé na osvětlení a pro nižší frekvence dochází dokonce k poklesu šumu v závislosti na vyšším osvětlení. To může být způsobeno zvýšením vodivosti v oblasti prostorového náboje a poklesem tepelného šumu PN přechodu, který je maskován tepelným šumem měřícího zařízení.

U řady sledovaných vzorků byl pozorován výskyt impulsního šumu. Tento typ šumu je indikátorem přítomnosti poruch v oblasti přechodu PN, které mají za následek modulaci proudu tímto přechodem, což se projevuje charakteristickým dvou či více hladinovým impulsním šumem.

Byla provedena analýza impulsního šumu, která umožňuje určení aktivační energie kovových precipitátů. Ze směrnice závislosti rozdělení dob τ na $1/T$ byl získán odhad aktivačních energií záchytných center. Tato hodnota se pohybuje mezi 0,38 až 0,43 eV

Z lineární závislosti amplitudy impulsního šumu a proudu procházejícího vzorkem, (velikost amplitudy byla řádově okolo $4 \cdot 10^{-7}$ V a doba trvání pulsů 10^{-2} až 10^{-1} s) a přibližnou neměnností tvaru pulsů, která byla zjištěna na zatěžovacím odporu 100Ω , to vše ukázalo na to, že se u sledovaných vzorků nejedná o šum mikroplazmy, ale o impulsní šum způsobený fluktuacemi potenciálové bariéry defektu v oblasti prostorového náboje přechodu PN, která je přitom řízena jednotlivými náboji.

Z porovnání průběhů změn závislostí šumových a transportních parametrů získaných v průběhu degradace vyplývá, že vhodnějším parametrem pro testování spolehlivosti a životnosti sledovaných fotovoltaických solárních článků jsou šumové parametry, kde relativní rozdíly jsou řádové. Zatímco u transportních charakteristik se liší pouze o 10 % hodnoty.

Poslední část se zabývá termografickými výsledky zhotovenými v Max Planck Institute for Microstructure Physics v Halle v Německu naměřenými na našich fotovoltaických solárních článcích. Jsou zde potvrzeny domněnky o existenci dislokačních a dalších vad v materiálu solárního článku.

Byly navrženy a následně ověřeny parametry S_{F1} , S_{F2} a S_{F3} pro možnou konstrukci testeru křemíkových fotovoltaických solárních článků.

Cílem této práce bylo:

1. Provést teoretický rozbor transportních a šumových charakteristik a na základě provedené analýzy vybrat vhodné parametry pro testování kvality, spolehlivosti a životnosti fotovoltaických křemíkových solárních článků.

Pomocí zrychlené degradace při působení zvýšené teploty ověřit vhodnost vybraných parametrů.

Na základě získaných poznatků navrhnout parametry pro možnost konstrukce testeru.

Tyto cíle byly v této práci splněny a bylo ověřeno, že se dají transportní a šumové charakteristiky použít pro testování kvality, spolehlivosti a životnosti fotovoltaických křemíkových solárních článků a bylo navrženo několik parametrů, které se dají využít pro výrobu testeru, který by se mohl zařadit do výrobní linky fotovoltaických křemíkových solárních článků a tím zvýšit kvalitu, spolehlivost a životnost finálních výrobků.

5 LITERATURA

- [1] BLASQUEZ, G. *Solid State Electronics* 21, 1978, pp. 1425.
- [2] KLEINPENNING, T.G.M. *J. Vac. Sci. Technol.* A3(1), pp. 176-182. (1985)
- [3] KLEINPENNING, T.G.M., SCHURINK, F. AND VAN DER VEER, J.H.C. *Solar Cells*, 12, pp.363-370.
- [4] ROSS, R.G., BLOSS, W.H AND GRASSI, G. (EDS), *Proc. 4th Commission of the European Communities Cong. on Photovoltaic Solar Energy*. Stresa. May 10-14, (1982, Reidel, Dordrecht, p. 169.
- [5] NOE, G.T., WOOD, V.E., MCGINNISS, V.D., HASSER, J.A., RICHARD, N.A., GAINES, G.B. AN CARMICHAEL, D.C., *Rep. HC a05/MF A01*, Battele, Columbus Laboratories, OH, 1979.
- [6] VANDAMME, L.K.J., ALABEDRA, R., ZOMMITI, M., *Solid State Electronics*. Vol.26(7), pp.671-674. (1983)
- [7] HOOGE, F.N., KLEINPENNING, T.G.M AND VANDAMME, L.K.J., (1981) *Rep. Prog. Phys.* Vol. 44, pp. 479
- [8] HOOGE, F.N., (1976) *Physica* 83B, pp. 14-23
- [9] FOLKES, A., *J. Appl. Phys.*, Vol. 68, p.6279, (1993).
- [10] GILL, W.D. AND BUBE, R.H., *J. Appl. Phys.*, Vol.41, p.3731, (1970).
- [11] LUKYANCHIKOVA, N.B., GARBAR, N.P., SHEINKMAN, M.K. AND ZARGARJANTS, M.N., *Solid State Electronics*, Vol. 15, p.801, (1972)..
- [11] WHITTINGHAM, M. S., JACOBSON, A. *J. Intercalation Chemistry*. New York: Academic Press, 1982. ISBN 0-12-747380-7.
- [12] LUKYANCHIKOVA, N.B., SOLGANIK, B.D. AND KASOGOV, O.V., *Solid State Electron*, Vol. 16, pp.1473-1480, (1973).
- [13] STRASILLA, U.J. AND STRUUT, M.J.D., *Proc. IEEE*, pp.1711-1713, (1974)
- [14] KLEINPENNING, T.G.M., *Physica* 84B, pp.353-361, (1976).
- [15] EBERHARD, J.W. AND HORN, P.M., *Phys. Rev. B.*, Vol. 18 (12), p.6681, (1978).
- [16] CLARKE, J. AND HSIANG, T.Y., *Phys. Rev. Lett.* 34 , p.1217, (1975).
- [17] VANĚK, J., CHOBOLA, Z., KAZELLE, J., *New Methods for Testing Quality of Solar Cells and Employment of Photovoltaic Systems in Czech Republik*“, sborník EDS 98, str. 109-112, ISBN 80-214-1198-8, Brno 1998.
- [18] VANĚK J., KAZELLE J.: „Diagnostika technických vlastností fotovoltaických článků“, sborník ESE 98, str. 15-18, Praha, 4.-5. Června 1998
- [19] VANĚK J.: *New technologies in photovoltaic*, Sborník prací studentů a doktorandů VI., s. 148 - 150, Brno, (2000).
- [20] VANĚK J., KAZELLE J., *Photovoltaic technologie*, Sborník Konference Workshop 2000, Bratislava, 6.-8. 9. 2000.
- [21] KORDESCH, K., SIMANDER, G. *Fuel cells and their Applications*. Berlin: VCH, 1996. ISBN 3-527-28579-2
- [22] HUTH, S., O. BREITENSTEIN, A. HUBER, D. DANTZ, U. LAMBERT AND F. ALTMANN, *Lock-in IR-thermography - A novel tool for material and device characterization*, *Solid State Phenomena* 82-84, 741-746 (2002)

6 CURRICULUM VITAE

Jméno: Jiří Vaněk
Narozen: 9. 12. 1971 ve Velkém Meziříčí
Adresa: Langrova 1b, Brno - Slatina, 627 00
Zaměstnání: Ústav elektrotechnologie, FEKT VUT v Brně, Údolní 53, 602 00
Brno
E-mail: vanekji@feec.vutbr.cz
Telefon: (+420-5) 4114 6122

Vzdělání:
1995 – 1998 PGS na ústavu elektrotechnologie FEI VUT v Brně
1990 – 1995 FEI VUT v Brně, obor Součástky a systémy v elektrotechnice
1986 – 1990 Gymnázium ve Velkém Meziříčí

Abstrakt

This work is concentrated on theoretical and experimental research of transport and noise characteristics of czech made monocrystalline silicon solar cells. Objectives are to discover appropriate parameters for examination of quality, reliability and prediction of these cells lifetime.

A physical process in electric devices can give an information on device reliability if it is in correlation with the failure causes or failure mechanisms. It is known that electron device has a level of maximal reliability as a result of knowledge incorporated in designing phase and reached level of technology used in materials and device manufacturing. The actual reliability of device is usually less than the maximal reliability depending on reached manufacture level. In this way the device reliability is connected with irregularities in manufacture processes or electric devices. The irregularities is a common characteristic of unreliable device. So, the physical process as a carrier of device reliability information must be connected with irregularity which is the origin of the failure.

A monocrystalline silicon solar cells of large area (104.4 cm^2) of the construction n^+p^{++} Passivated Emitter Solar Cell (PESC), fabricated on p-type Czochralski (Cz) silicon wafer (Boron doped of resistivity 1 to 3 $\Omega \text{ cm}$) were under investigation. The transport characteristics (I-V and C-V) as a reliability tools of the solar cells were measured under different conditions: dark, illumination, temperature, and thermal stress, i.e., preannealing (for a period of time of 10 000 hours at 400 K). Also, the short-circuit current, I_{sc} , the open-circuit voltage, U_{oc} , the conversion efficiency, η , the Fill Factor, FF, and finally the series resistance R_s and shunt resistance R_{sh} were measured before and after thermal stress.

One of the methods used in diagnostic and prediction of silicon solar cell reliability is based on the noise measurements of the cell or test structures. Where the failures of the cell device in the beginning of operating life are influenced by defects which are the results of rough errors in the manufacturing processes and these components can be removed during screening steps. Mainly, this kind of defects is not the subject of investigation using the noise measurements as a diagnostic tool because the other cell device characteristics are more sensitive to the defects or easier to measure than the noise one. For silicon solar cells under investigation a $1/f^\alpha$ noise (α has a range from 1 to 2), Generation-Recombination (G-R) noise, burst noise, and thermal noise were exist. The noise technique is suitable for defects and failure analysis, failure prediction and selection of more reliable units than other ones, but more investigations are needed to correlate the noise reliability indicators and lifetime of the electronic device (solar cell).