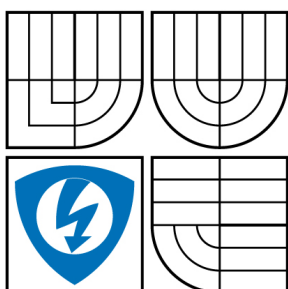




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC
TECHNOLOGY

VYUŽITÍ ŠUMOVÉ DIAGNOSTIKY K ANALÝZE VLASTNOSTÍ SOLÁRNÍCH ČLÁNKŮ

ANALYZE OF PHOTOVOLTAIC CELL BY NOISE DIAGNOSTIC

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

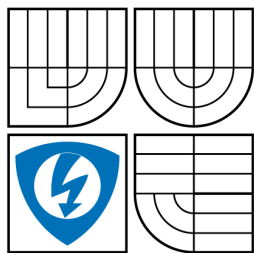
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. MAREK HUSÁK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. JIŘÍ VANĚK, Ph.D.

BRNO 2009



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektrotechnologie

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektrotechnická výroba a management

Student: Bc. Marek Husák

ID: 112269

Ročník: 2

Akademický rok: 2008/2009

NÁZEV TÉMATU:

Využití šumové diagnostiky k analýze vlastností solárních článků

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Zpracujte technickou rešerši o možnosti využití šumové diagnostiky pro testování kvality kontaktů krystalických křemíkových solárních článků. Ve spolupráci s firmou Solartec s.r.o v Rožnově vyberte vhodné vzorky pro testování pomocí šumové diagnostiky a proveďte měření. Získané výsledky porovnejte s výsledky jiných diagnostických metod. Zjištěné výsledky vyhodnoťte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího

Termín zadání: 9.2.2009

Termín odevzdání: 29.5.2009

Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Vaněk, Ph.D.

prof. Ing. Jiří Kazelle, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

Anotace:

Diplomová práce se zabývá šumovou diagnostikou fotovoltaických článků. Popisuje hlavní druhy šumů, které vznikají v solárních článcích. Zkoumané vzorky byly rozřazeny na kvalitní a spolehlivé pomocí šumových spolehlivostních indikátorů. Vzorky byly zkoumány pomocí měření VA charakteristik, spektrální výkonové hustoty šumového napětí v závislosti na napětí a frekvenci. Dopočítána byla spektrální výkonová hustota šumového proudu v závislosti na proudu.

Abstract:

The master's thesis deals with the noise diagnostic in the solar cells. Describes the main kinds of noises. The samples were quality and reliability screened using noise reliability indicators. The samples were surveyed by measuring the I-V characteristics, the noise spectral density as a function of forward voltage and frequency. It was calculated the noise spectral density as a function of forward current.

Klíčová slova:

Elektrický šum, spolehlivostní fyzika, polovodič, PN přechod, tepelný šum, výstřelový šum, rozdělovací šum, 1/f šum, impulzní šum, lavinový šum, generačně-rekombinační šum, RTS šum, šum mikroplazmy, fotovoltaický článek.

Keywords:

Electrical noise, reliability physics, semiconductor, p-n junction, thermal noise, shot noise, flicker noise, 1/f noise, burst noise, multiplication noise, generation-recombination noise, random telegraphic signal noise, microplasma noise, solar cell.

Prohlášení autora o původnosti díla:

Prohlašuji, že jsem tuto vysokoškolskou diplomovou práci na téma „Využití šumové diagnostiky k analýze vlastností solárních článků“ vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce, s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 25. 5. 2009

.....

Poděkování:

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Jiřímu Vaňkovi, Ph.D. za vedení, odborné rady a vstřícný přístup při sestavování této práce.

Dále děkuji pracovníkům Ústavu fyziky Fakulty stavební VUT v Brně, kde proběhla veškerá měření.

OBSAH

ÚVOD.....	8
1 FYZIKÁLNÍ PODSTATA ŠUMU	9
1.1 TEPELNÝ ŠUM	10
1.2 VÝSTŘELOVÝ ŠUM	11
1.3 ROZDĚLOVACÍ ŠUM.....	12
1.4 1/F ŠUM	13
1.5 GENERAČNĚ-REKOMBINAČNÍ ŠUM	14
1.6 LAVINOVÝ ŠUM.....	15
1.7 IMPULZNÍ ŠUM	16
1.7.1 RTS šum	17
1.7.2 Šum mikroplazmy.....	18
2 ZKOUŠKY SPOLEHLIVOSTI.....	19
2.1 URČUJÍCÍ ZKOUŠKY SPOLEHLIVOSTI.....	19
2.2 OVĚŘOVACÍ ZKOUŠKY SPOLEHLIVOSTI	20
2.3 VÝZNAM ZKOUŠEK SPOLEHLIVOSTI	20
2.4 METODY ŘÍZENÍ SPOLEHLIVOSTI	22
2.4.1 Předcházení poruchám	22
2.4.2 Odolnost proti poruchám.....	23
3 ZÁKLADNÍ PARAMETRY FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ.....	24
3.1 PARAMETRY FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ PŘI OSVĚTLENÍ.....	24
3.2 VOLTAMPÉROVÁ CHARAKTERISTIKA	25
3.2.1 Vliv generace a rekombinace.....	25
3.2.2 Vliv velké injekce	29
3.3 ZTRÁTY NA FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNCÍCH	29
3.3.1 Optické ztráty.....	29
3.3.2 Rekombinační ztráty	30
3.3.3 Sériový a paralelní odpor	30
3.4 STATICKÝ A DYNAMICKÝ ODPOR PN PŘECHODU	30
4 METODY MĚŘENÍ FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ	32
4.1 MĚŘENÍ VA CHARAKTERISTIK.....	32
4.2 MĚŘENÍ SPEKTRÁLNÍ ŠUMOVÉ HUSTOTY	33
4.2.1 Měření S_u v závislosti na napětí.....	33

4.2.2	<i>Měření S_u ve frekvenční závislosti.....</i>	35
5	ŠUMOVÁ ANALÝZA FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ.....	36
5.1	PARAMETRY MĚŘENÉ VÝROBCEM	36
5.2	MĚŘENÍ VA CHARAKTERISTIK.....	36
5.3	MĚŘENÍ S_u V ZÁVISLOSTI NA NAPĚTÍ	40
5.4	S_i V ZÁVISLOSTI NA PROUDU	41
5.5	S_u V ZÁVISLOSTI NA FREKVENCI	45
	ZÁVĚR	48
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY A DALŠÍCH PRAMENŮ	49
	PŘEHLED FYZIKÁLNÍCH VELIČIN	51

Úvod

Pro vznik elektrické energie přímou přeměnou ze slunečního záření potřebujeme mít polovodičový materiál. Ten je základem fotovoltaiického článku. I přes snahu objevovat, testovat a zavádět nové materiály pro fotovoltaiické články, zaujímá stále nejvýznamnější místo krystalický křemík.

S materiálem, který má ideální a neměnné vlastnosti, se v praktickém životě nesetkáme. Každý materiál obsahuje určité nečistoty, defekty apod., které mění námi očekávané výstupní charakteristiky. Jeden z diagnostických nástrojů, který nám pomáhá určovat kvalitu materiálu z hlediska elektrických vlastností je šumová diagnostika.

Cílem práce je zpracování technické rešerše o možnosti využití šumové diagnostiky pro testování kvality kontaktů krystalických křemíkových solárních článků. Ve spolupráci s firmou Solartec s.r.o. v Rožnově jsme vybrali vhodné vzorky pro testování pomocí šumové diagnostiky a provedli měření. Zjištěné výsledky jsme vyhodnotili vhodnými postupy a porovnali s výsledky jiných diagnostických metod.

1 Fyzikální podstata šumu

Všechny procesy, které se dějí v látce na mikroskopické úrovni, jsou stochastické povahy a projevují se fluktuacemi (šumem) makroskopicky měřitelných veličin. Přiblížíme si, co je to stochastický proces. Popisujeme-li dynamický děj, bývá příslušná veličina funkcí času. Realizací stochastického procesu nazýváme časovou funkci $\xi(t)$, která je výsledkem náhodného pokusu a nabývá náhodných hodnot. Stochastický proces je určen množinou těchto realizací, přičemž jednotlivé realizace označujeme symbolem $\xi^{(k)}(t)$, kde k je libovolné reálné číslo. Pozorování stochastického procesu v čase $t = t_1$ se nazývá řezem stochastického procesu. Získané hodnoty jsou hodnotami náhodné veličiny $\xi(t_1)$ [6].

Šum je náhodný signál [12], který se mění v čase, ale který má stálé statistické vlastnosti. Popis procesů probíhajících ve sledovaných látkách můžeme učinit nejen pomocí měření středních hodnot makroskopicky měřitelných veličin, ale také pomocí některých statistických charakteristik, jako je např. korelační funkce či výkonová spektrální hustota. Spektrální výkonová hustota je v čase relativně stálá. Můžeme vypočítat výkon šumu, který je soustředěný v určitém kmitočtovém pásmu, dále efektivní hodnotu a pravděpodobnou mezivrcholovou hodnotu šumu. Časový rozvoj šumu je v kladné i záporné ose, přičemž nejpravděpodobnější je nulová hodnota. To je také střední – průměrná – hodnota. Rozložení pravděpodobnosti, které je popsáno hustotou pravděpodobnosti, je ve tvaru Gaussovy křivky.

Šumy se objevují ve všech materiálech a součástkách a protože často potřebujeme pracovat s malými signály, jsou zde šumy limitujícím faktorem při využití daných materiálů, součástek a systémů. Toto je negativní pohled na šumy, kdy nám „škodí“ při provozu zařízení. Při opačném pohledu můžeme považovat šumy za zdroj informací o materiálu, ve kterém vznikají. Dávají základ oblasti vědy nazývané nedestruktivní diagnostika, která se je snaží popsat a vyhodnotit.

Šumy můžeme klasifikovat podle různých hledisek. Jedno dělení nám říká, že existují dva druhy šumů [1]. Do prvního, základního typu šumů, patří tepelný (thermal noise), výstřelový (shot noise) a $1/f$ šum. Do druhého typu řadíme nízkofrekvenční typy šumu, což je blikavý šum (flicker noise), impulzní šum (burst noise), násobný šum (multiplication noise), generačně-rekombinační šum a RTS šum (random telegraphic signal noise).

Jiné dělení [6] řadí do první skupiny šumy, které jsou odrazem mikrofyzikálních dějů při různých vodivostních mechanismech (kdy vedení elektrického proudu neprobíhá spojitě), a které nelze odstranit (tepelný, výstřelový, difúzní šum); lze je však ovlivňovat změnou parametrů materiálu nebo součástky. Druhou skupinu tvoří šumy, které odrážejí

nedokonalosti v technologii, jako jsou např. nehomogenity, nezáměrně zavedené příměsi, špatné kontakty. Jsou to tzv. nadbytečné šумы.

Zároveň existují šумы, které nelze čistě rozdělit do jedné skupiny. Mají vlastnosti obou skupin – g-r šum, 1/f šum. Jedna složka těchto šumů souvisí s daným vodivostním mechanismem a druhá je nadbytečná, tvoří ji defekty.

Na nízkých frekvencích (v řádech Hz až kHz) se uplatňuje blikavý šum a 1/f šum [12]. S rostoucí frekvencí jejich výkon zaniká. Na těchto vyšších frekvencích se uplatní šum tepelný a výstřelový.

1.1 Tepelný šum

Tepelný (Johnsonův) šum je způsobený tepelným pohybem elektronů ve vodiči. Elektrony nikdy nedosahují klidného stavu, ten by byl pouze při absolutní nule. Elektrony jsou stále v pohybu, proto i tepelný šum se vyskytuje ve všech látkách. Elektrony získávají mimo svůj potenciál také náhodné přeskoky [6].

Tento druh šumu nezávisí na napětí, proudu ani frekvenci. Řadíme jej mezi bílý šum a to proto, že podobně jako bílé světlo obsahuje celé spektrum barev, také bílý šum zahrnuje všechny frekvence. Ovšem bílý šum v praxi nedosahuje nekonečného rozsahu signálu, protože by při nenulovém výkonu na každé frekvenci musel být jeho celkový výkon nekonečný. Obecně se považuje za bílý šum takový, který má ploché spektrum v definovaném rozsahu frekvencí.

Pro frekvence do 100 MHz jej můžeme vyjádřit podle Nyquistova vztahu [6]:

$$U_{th} = \sqrt{4kTRB} \quad (1.1)$$

nebo

$$I_{th} = \sqrt{\frac{4kTB}{R}}, \quad (1.2)$$

kde U_{th} je tepelné šumové napětí, I_{th} je tepelný šumový proud, $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$ je Boltzmannova konstanta, $T \text{ (K)}$ je absolutní teplota, $R \text{ (}\Omega\text{)}$ je elektrický odpor, $B \text{ (Hz)}$ je šířka pásma.

Šumové napětí můžeme rovněž vyjádřit pomocí spektrální výkonové hustoty [6]

$$S_u(f) = 4kTR \frac{hf}{kT} \left(e^{\frac{hf}{kT}} - 1 \right)^{-1} \quad (1.3)$$

Pro oblast nižších frekvencí, kdy platí $hf \ll kt$ získáme po rozvoji exponenciální funkce v mocninnou řadu vztah

$$S_u(f) = 4kTR. \quad (1.4)$$

Pro spektrální hustotu proudu získáme

$$S_i(f) = 4kTG, \quad (1.5)$$

kde $G = 1/R$ je vodivost materiálu.

1.2 Výstřelový šum

Výstřelový šum se projevuje jako časově závislé kolísání elektrického proudu způsobené přechodem elektronů přes potenciálovou bariéru. Vyskytuje se v součástkách v pevné fázi kde je tunelový přechod, Schottkyho dioda a PN přechod. Nevzniká naopak v rezistoru, kde náboj prochází kovovým vodičem.

Výstřelový šum netvoří spojitý tok proudu, ale součet oddělených impulzů v čase, má důvod v korpuskulární povaze přenosu částic. Tok elektronů je sice neustálý, zato ne spojitý, to se projeví jako šum. Výstřelového šumu se nemůžeme vyhnout snižováním teploty, jak je to teoreticky možné pro tepelný šum [9, 12].

Výkonová spektrální hustota šumového proudu pro nízké frekvence je

$$S_i(f, I) = 2eI, \quad (1.6)$$

kde I je střední hodnota proudu. Při nárůstu frekvence od oblasti srovnatelné s převrácenou hodnotou doby t průchodu nosiče potenciálovou bariérou a vyšší máme vztah

$$S_i(f, I) = 2eI \left(\frac{\sin \pi f t}{\pi f t} \right)^2. \quad (1.7)$$

Při průchodu proudu přechodem PN bude vztah (1.7) složitější, protože se bude skládat z několika proudových složek – elektronové, děrové, driftové, difúzní, generační, rekombinační, tunelové a lavinové [6].

1.3 Rozdělovací šum

Náboj emitovaný z katody má při dvou anodách pravděpodobnost dopadu na jednu z nich stejnou (obr. 1.1). Celkový náboj, který emitujeme z katody za dobu Δt je Ne . Celkový proud vytékající z katody je

$$I = \frac{Ne}{\Delta t} = i_1 + i_2, \quad (1.8)$$

kde i_1 a i_2 jsou proudy protékající jednotlivými anodami,

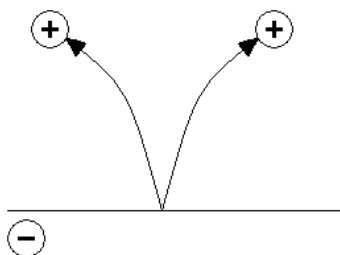
$$i_1 = \frac{n_1 e}{\Delta t}, \quad i_2 = \frac{n_2 e}{\Delta t}. \quad (1.9)$$

Počty nábojů n_1 a n_2 dopadající na jednotlivé anody, mají binomické rozdělení.

Spektrální výkonová hustota proudu je

$$S_i(f) = 2e \frac{I_1 I_2}{I_1 + I_2}, \quad (1.10)$$

kde I_1 a I_2 jsou střední hodnoty proudů, které protékají jednotlivými anodami [6].



Obr. 1.1: Vznik rozdělovacího šumu

1.4 1/f šum

1/f šum (kmitající šum) je fyzikální jev, který vzniká z různých příčin, se svým charakteristickým kolísáním proudové hustoty úměrné $f^{-\gamma}$, kde $\gamma = 1,0 \pm 0,1$ [12]. Je nepřímo úměrné frekvenci ve velkém rozsahu hodnot. Vzniká pouze v elektrickém poli a závislost jeho výkonové spektrální hustoty na frekvenci je typu [2]

$$S_i(f) = A \frac{I^n}{f^\alpha}, \quad (1.11)$$

kde A je konstanta, $n \approx 2$, $\alpha \approx 1$. Parametr α je příspěvek jednoho elektronu k relativnímu šumu v 1 Hz za předpokladu, že N elektronů se nijak neovlivňuje při vzniku šumu, f je bodová frekvence při měření. Navíc je zjištěno, že α není konstantou, ale že se mění v rozsahu hodnot 10^{-6} až 10^{-3} . Závisí to na rozptylu elektronů a na kvalitě uspořádání krystalové mřížky materiálu. Hlavní příčina je spatřována v rozptylu elektronů na krystalové mřížce.

Parametr α je dále závislý na koncentraci dislokací v materiálu. S rostoucím počtem dislokací; jeho šumové spektrum je úměrné α a nepřímo úměrné délce života nosiče náboje.

1/f šum můžeme pokládat za velké měřítko pro určování spolehlivosti zařízení. Vady v krystalové struktuře materiálu nám způsobí zvýšení 1/f šumu. Navíc pokud máme vzorek s velkým počtem dislokací, zvýší se nám hodnota šumu alespoň o jeden řád, než při nízkém rozmístění dislokací.

Pro celkový výkon signálu použijeme vztah [2]

$$P = \int_0^\infty S df = \int_0^\infty A \frac{I^n}{f^\alpha} df \rightarrow \infty. \quad (1.12)$$

Z něho plyne, že v dolní části spektra musí být tento šum omezen, musí existovat dolní limit. Ten však nebyl dosud experimentálně nalezen.

U polovodiče se setkáme s další příčinou 1/f šumu, což jsou vlastnosti povrchu materiálu. Generace a rekombinace nosičů náboje na povrchu energetické hladiny a hustota povrchových stavů jsou důležité faktory; dokonce na rozhraní mezi povrchem křemíku a silně pasivovaným kyslíkem vzniká zdroj šumu. Zde je vidět, že 1/f šum má vztah ke generačně-rekombinačnímu centru, sledovanému v pasivační vrstvě.

Pro 1/f šum je spatřována mírná závislost na teplotě. Spektrální hustota šumu zůstává buď konstantní – např. pro PN přechod ve zpětném směru, nebo častěji má nelineární průběh v závislosti na teplotě.

Spolehlivost zařízení má blízký vztah k 1/f šumu, na základě kterého se dá odhalit nízká kvalita tohoto zařízení [2].

1.5 Generačně-rekombinační šum

Generačně-rekombinační šum (g-r šum) vyskytující se u polovodičů a kovů je způsoben statistickým kolísáním koncentrace volných elektronů a děr, které jsou důsledkem kvantových přechodů nosičů mezi valenčním a vodivostním pásem a mezi těmito pásy a diskretními energetickými hladinami v zakázaném pásu.

Každý typ přechodu k ($k = 1, 2, \dots, n$), je vyjádřen spektrální výkonovou hustotou [2]:

$$S_{tk}(\omega, T) = A_k I^2 \frac{1}{1 + \omega^2 \tau_k^2}, \quad (1.13)$$

kde τ_k je šumová časová konstanta charakterizující k -tý typ přechodu a ω je driftová rychlost.

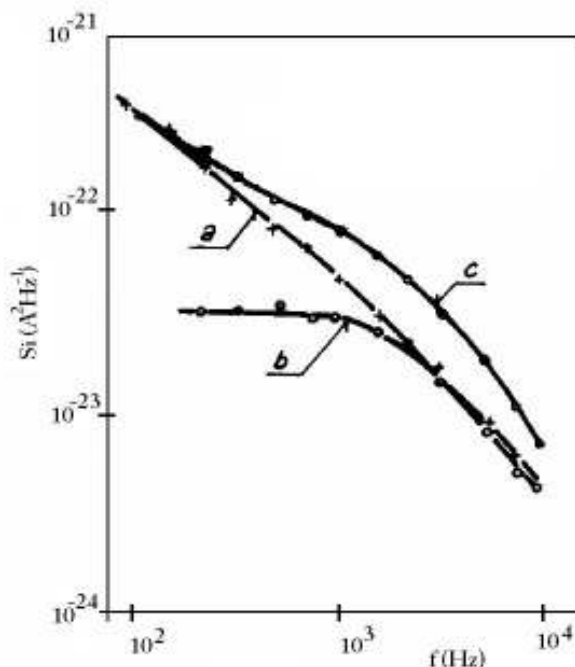
Distribuční funkci g-r šumu je Gaussova funkce, protože se ve skutečnosti skládá ze superpozice velkého počtu nezávislých náhodných RTS signálů zpracovaných se stejnou charakteristickou dobou. Koeficient A je míra počtu jednotlivých procesů. Závisí na g-r střední hustotě, proudu a struktuře materiálu.

G-r šum při statistickém zkoumání nám může být zdrojem informací o hustotě stavů pastí, parametrech lokalizovaných hladin v zakázaném pásu, aktivační energii a efektivním průřezu pro zachycení volného nosiče.

Experimentálně bylo zjištěno, že u velmi čistého křemíku nebyl naměřen g-r šum. Zato u materiálů s nízkou kvalitou a heterogenní strukturou, kde jsou časté defekty mříže, se vyskytuje. Je vygenerován na kontaktech nebo na povrchu. V lepších materiálech najdeme zdroje šumu až v objemu. G-r šum je dobrý a zároveň i nepostradatelný diagnostický ukazatel ke sledování pastí ve složených polovodičích.

Defekty v materiálu, jako jsou dislokace, velká úroveň nečistot na emitujícím pólu a na povrchu, jsou hlavním zdrojem g-r šumu tranzistoru, zvláště PN přechod je ve stavu přímého zkreslení. Při zapojení v závěrném směru, polovodič vykazuje nadměrný g-r šum, který je

způsoben g-r centry blízko kovových připojení. Ukazuje se tedy, že měření g-r šumu je efektivní metodou pro analýzu celkových defektů.



Obr. 1.2: Typický průběh frekvenční závislosti g-r spektra:
a - šum $1/f$, b - g-r spektrum, c - superpozice (převzato z [2])

1.6 Lavinový šum

Lavinový šum můžeme pozorovat u struktur, u kterých dochází k lavinovému průrazu v důsledku nárazové ionizace v silných elektrických polích, což jsou např. PN přechody v závěrném směru. Vznik šumu je podmíněn fluktuací koncentrace generovaných vodivostních elektronů a děr v důsledku nárazové ionizace. Spektrální výkonová hustota šumového proudu pro případ rovnosti součinitelů nárazové ionizace elektronů a děr lze popsat vztahem

$$S_i(\omega) = \frac{2eI_R M^2}{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_m}\right)^2}, \quad (1.14)$$

kde úhlová rychlost $\omega = \frac{2v}{MW}$, v je driftová rychlost, W je šířka báze, M je součinitel násobení, I_R je střední hodnota proudu přechodem ve zpětném směru. Při vzniku laviny je potom $M \rightarrow \infty$. Vztah se změní do tvaru

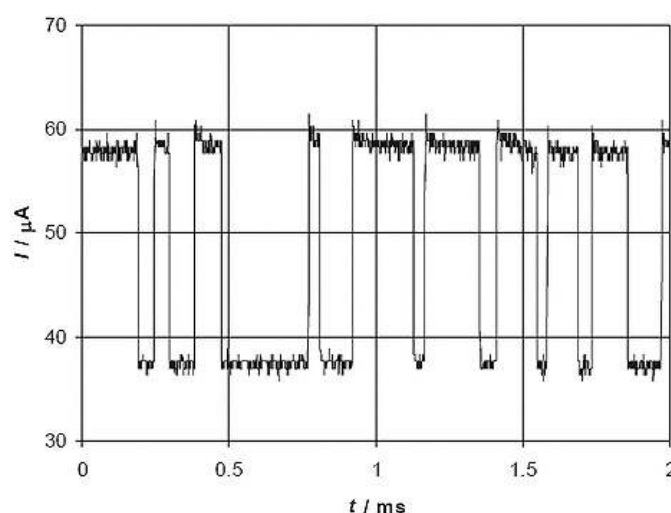
$$S_i(\omega) = \frac{8eI_R v^2}{W^2 \omega^2} = \frac{8eI_R}{T^2 \omega^2}, \quad (1.15)$$

kde $T = W/v$ je doba průchodu nosiče přechodem.

1.7 Impulzní šum

Impulzní šum je typ šumu, který se vyskytuje v polovodičích jako fluktuace proudu. Ovšem oproti výstřelovému šumu, který se vyskytuje jen jako mírné kolísání proudu, nabývá impulzní šum hodnot několika desítek mikroampérů. Sestává z náhlých impulzů, jejichž amplituda je ve stacionárním stavu konstantní a doba trvání a čas vzniku jsou náhodnými veličinami. Rozlišujeme dva odlišné fyzikální mechanismy, které vedou ke vzniku tohoto typu šumu:

1. Impulzní šum prvního typu – tzv. burst noise neboli RTS šum (RTS = random telegraph signal). RTS šum je název, který se obvykle používá pro šum v MOS strukturách.
2. Impulzní šum druhého typu – tzv. šum mikroplazmy.



Obr. 1.3: Časový průběh šumu mikroplazmy (převzato z [2])

Z hlediska statistických vlastností dvouhadinového impulzního šumu, popsaného dvoustavovým generačně-rekombinačním procesem, mají oba typy stejný statistický model, přestože je fyzikální základ vzniku pro každý z typu šumu různý.

Spektrální výkonová hustota proudu lze vyjádřit vztahem

$$S_i(\omega) = \frac{A_k}{1 + \omega^2 \tau_k^2}. \quad (1.16)$$

RTS šum a šum mikroplazmy se obecně liší v několika parametrech. Amplituda impulzů bistabilních proudových fluktuací mikroplazmy je zhruba tisíckrát větší než u RTS šumu. Šířka impulzů může být u šumu mikroplazmy naopak velmi malá (až 10^{-11} s). Paralelní kapacita přechodu ovlivní tvar primárního impulzu zejména u šumu mikroplazmy, RTS šum téměř neovlivní.

1.7.1 RTS šum

RTS šum můžeme pozorovat nejen u polovodičových součástek, ale i v rezistorech. V PN přechodu jej způsobují bistabilní fluktuace potenciálové bariéry defektu v oblasti prostorového náboje PN přechodu, která je řízena zachycováním nebo emisí jednotlivého nosiče na pasti nebo g-r centru v blízkosti defektu.

Amplituda impulzů se pohybuje v řádech 10^{-10} A až 10^{-8} A a doba trvání je v širokém rozsahu 10^{-6} s až 10^3 s.

Vysvětlení RTS šumu spočívá ve vytvoření Schottkyho bariér díky velké poruše v monokrystalu v ochuzené vrstvě PN přechodu. Tyto bariéry způsobí vznik nadbytečného proudu a RTS šumu. Pokud bude v blízkosti Schottkyho bariéry rekombinační centrum, potom bude nábojové obsazení centra elektronem nebo dírou modulovat výšku potenciální bariéry a způsobí tak diskrétní fluktuaci proudu tekoucího přechodem. Porucha se může nacházet v objemu přechodu nebo, což je častější případ, v blízkosti povrchu přechodu.

Vícehadinový šum může vzniknout jen tehdy, pokud existuje v PN přechodu více defektů tohoto typu nebo je blízko defektů více generačně-rekombinačních center.

Dvouhadinový impulzní šum lze z hlediska statistických vlastností popsat dvoustavovým generačně-rekombinačním procesem. Primárním procesem se dvěma stavy je náhodné obsazování rekombinačního centra nosičem a jeho následná emise, což je generačně-rekombinační proces s charakteristikami, které jsou dány vlastnostmi centra a stavem

polovodiče. Sekundární proces je modulací elektrického proudu vyvolaného změnou potenciální bariéry mezi kovem a polovodičem.

Šum o nízkých frekvencích je typický pro analogové signály. Při zmenšování součástek do oblasti CMOS technologie se tento nízkofrekvenční šum zvyšuje.

U tohoto typu šumu se předpokládalo, že je způsoben dislokacemi uvnitř krystalové mříže. Ovšem při měření kovových materiálů, u kterých se odstranily dislokace mříže, se tento RTS šum neztratil. Proto je jasné, že nečistoty mříže nejsou nutné pro vznik šumu.

Existuje model zdroje šumu, který je založený na předpokladu, že vodič existuje v degradovaném PN přechodu a že aktuální proud defektem je modulovaný pastmi sousedícími s nečistotami. Model vysvětluje vnější okolnosti dvou polarit a víceúrovňového impulzního šumu.

Spektrum RTS šumu nemá tvar Gaussovy křivky, ale zobrazíme je pomocí rozložení Lorentzovým spektrem

$$S_i(f) = \frac{A_b \tau_b^2}{1 + \omega^2 \tau_b^2}, \quad (1.17)$$

kde A_b je konstanta závislá na povaze defektů, τ_b je $1/\tau_b = 1/\tau_1 + 1/\tau_2$. V souladu s náhodným směrem průchodu během časového intervalu dt , má propustný směr pravděpodobnost dt/τ_1 zavření a závěrný směr dt/τ_2 otevření. V parametru A_b a τ_b jsou obsaženy informace o defektech.

Experimenty prokazují, že dislokace v mříži, vážný defekt, je hlavním zdrojem RTS šumu jak pro bipolární tranzistory, tak pro integrované obvody [6].

1.7.2 Šum mikroplazmy

Příčina šumu mikroplazmy (microplasma noise) je spatřována ve vzniku lokálních lavinových průrazů v malých oblastech přechodu v místech, kde dislokace protíná PN přechod, který je polarizovaný ve zpětném směru. Šum mikroplazmy se objevuje obvykle při dostatečně velkých závěrných napětích. Nesmějí být ovšem větší než je napětí pro lavinový průraz celé nedefektní oblasti přechodu. Vlivem fluktuace napětí na oblasti mikroplazmy může intenzita elektrického pole klesnout natolik, že dojde k zániku procházejícího proudu. Mikroplazma také může vzniknout najednou na dvou a více malých oblastech. Potom se jedná o vícehladinový šum. Obvykle se při vzniku mikroplazmy emituje také světlo.

2 Zkoušky spolehlivosti

Spolehlivost výrobků patří k hlavním požadavkům kladeným na vznikající výrobky. Zkoušky spolehlivosti jsou základním prostředkem pro zjištění a kontrolu spolehlivostních ukazatelů. Jejich používání je založeno na teorii pravděpodobnosti a matematické statistice.

Zkoušky spolehlivosti zpravidla dělíme podle:

- cílů, které sledujeme,
- určovaných nebo ověřovaných spolehlivostních ukazatelů,
- doby trvání,
- místa realizace.

Zkoušky spolehlivosti podle cílů se rozdělují na určující a ověřovací (kontrolní). Podle určovaných nebo ověřovaných spolehlivostních ukazatelů jsou nejběžnějšími zkouškami spolehlivosti zkoušky bezporuchovosti a z nich odvozené zkoušky skladovatelnosti, životnosti a opravitelnosti.

Z časového hlediska realizujeme zkoušky dlouhodobé, zkrácené nebo zrychlené. Podle místa realizace se zkoušky spolehlivosti dělí na laboratorní a provozní [3].

2.1 Určující zkoušky spolehlivosti

Cílem určujících zkoušek je zjistit skutečné hodnoty požadovaných ukazatelů spolehlivosti výrobků. Patří mezi základní zkoušky. Nejčastěji požadovanými ukazateli jsou střední doba do poruchy nebo střední doba mezi poruchami a intenzita poruch.

Určující zkoušky spolehlivosti ukončíme:

- po určitém počtu poruch,
- po uplynutí stanovené kumulované provozní doby.

Podle opatření následujících po výskytu poruch známe variantu zkoušky:

- s opravami vadných výrobků a s jejich navrácením do zkušební souboru nebo s jejich záměnou bezvadnými výrobky,
- s vyřazením vadných výrobků, tedy bez záměny.

Určující zkoušky spolehlivosti využijeme pro tyto účely:

- porovnání předpokladů, teoretických výpočtů a technických požadavků se skutečností,
- zanesení hodnot ukazatelů spolehlivosti do technických podmínek,
- odhalení nespolehlivých součástek, nedostatků v návrhu obvodů, v návrhu konstrukčního řešení i v technologickém provedení na základě analýzy vzniklých poruch,
- návrh opatření, jimiž lze zvýšit spolehlivost výrobků,
- stanovení a zpřesnění intervalů a rozsahu technické údržby,
- zpřesnění souboru nezbytných náhradních dílů a servisních přístrojů,
- stanovení období časných poruch,
- vyšetření zákona rozdělení pravděpodobnosti zjišťované náhodné veličiny [3].

2.2 Ověřovací zkoušky spolehlivosti

Ověřovacími zkouškami spolehlivosti testujeme, zda hodnoty ukazatelů spolehlivosti výrobků vyhovují požadavkům. Využijeme je především při kontrolách a přejímkách. Většinou kontrolujeme úroveň pravděpodobnosti bezporuchového provozu, popřípadě životnost, opravitelnost či skladovatelnost.

Výchozími údaji pro plánování ověřovacích zkoušek spolehlivosti jsou hodnoty ověřovaného ukazatele spolehlivosti pro jeho přijetí a zamítnutí, rovněž rizika výrobce a odběratele. Riziko výrobce vyjadřuje pravděpodobnost, že výrobek se střední dobou bezporuchového provozu větší než předepsanou nebude podle výsledku postupné zkoušky přijat jako vyhovující. Riziko odběratele vyjadřuje pravděpodobnost, že bude jako vyhovující přijat výrobek, jehož střední doba bezporuchového provozu je menší, než je požadováno.

Výsledky ověřovacích zkoušek umožňují zjistit, zda výrobky splňují nebo nesplňují zadanou úroveň požadavků, ale neposkytují informaci o jejich skutečné hodnotě [3].

2.3 Význam zkoušek spolehlivosti

Úroveň spolehlivosti součástek je dána základním návrhem (konstrukcí). Tento návrh vymezuje vlastnosti součástky v kombinacích prostředí a času. Součástka se stane nevyhovující, přestane-li plnit požadavky v důsledku změn (degradace) svých vlastností. Za

podmínek ideální výroby by byla spolehlivost součástek téhož typu stejná. Výrobním procesem a variabilitou používaného materiálu však úroveň spolehlivosti součástek kolísá.

Při zkouškách spolehlivosti se zjišťuje degradace vlastností daného souboru součástek. Degradace se posuzuje obvykle podle změn vhodně vybraných technických parametrů. Ze znalosti změn můžeme usuzovat na změnu ostatních parametrů, neboť mezi nimi existuje mnoho závislostí, funkcionálních nebo stochastických. Není proto většinou nutné měřit všechny parametry.

Zkoušky spolehlivosti součástek se mohou uskutečňovat v podmínkách laboratorních i provozních. Laboratorní zkouška spolehlivosti je zkouška vedená ve stanovených a kontrolovaných klimatických podmínkách a v režimech, které mohou, ale nemusí simulovat provozní podmínky. Laboratorní zkoušky zejména umožňují:

- vytvoření přesně zadaného režimu pro zkoušený soubor,
- kontrolu dodržování stanovených kritérií poruch a podmínek zkoušky,
- provedení zkoušky v mezních řízených podmínkách,
- průběžné analyzování poruch,
- unifikování zkušebních režimů a způsobů vyhodnocování výsledků,
- optimální organizování průběhu zkoušky.

Provozní zkouška spolehlivosti je ověřovací nebo určující zkouška, uskutečňovaná při provozu zařízení, v němž jsou sledované součástky použity. Při této zkoušce jsou zaznamenávány skutečné podmínky a okolnosti. Získané údaje jsou ovšem objektivnější, protože laboratorní zkoušky nemohou všechny možné vlivy postihnout.

Mezi zkoušky spolehlivosti řadíme i třídící zkoušky, používané k vytřídění součástek s časnými poruchami. Příčinou těchto poruch bývají převážně nedostatky ve výrobním procesu.

Podle doby trvání dělíme zkoušky na:

Dlouhodobé zkoušky – umožňují bezprostřední experimentální zjištění údajů o spolehlivosti daných součástek. Pracuje při nich určitý soubor součástek stejného typu ve stanovených provozních podmínkách a v určeném pracovním režimu tak dlouho, až je možné s dostatečnou pravděpodobností zjistit odpovídající spolehlivostní ukazatele.

Zkrácené zkoušky – umožňují stanovit v poměrně krátkých časových obdobích a na přijatelném počtu součástek ukazatele spolehlivosti, které se doplní údajem pravděpodobnosti,

s níž takto získané údaje odpovídají výsledkům zjištěným při dlouhodobých zkouškách. Zkrácené zkoušky jsou účelné pouze za předpokladu, že je zaručena stejnorodost a opakovatelnost výroby sledovaných součástek a jsou-li k dispozici výsledky dlouhodobých zkoušek.

Zrychlené zkoušky – umožňují získat výsledky ekvivalentní nebo porovnatelné s výsledky nákladných dlouhodobých zkoušek, a to za podstatně kratší dobu a s menším souborem součástek. Zrychlení zkoušky dosahujeme aplikováním vhodného stupně zatížení, kterým je ve výrobku vyvoláván poruchový stav. Rozeznáváme zrychlené zkoušky s konstantním, postupným a stupňovitým zatížením. Stanovení činitele zrychlení však vyžaduje znalost výsledků z odpovídajících dlouhodobých zkoušek [3].

2.4 Metody řízení spolehlivosti

Při snaze dosáhnout co největší spolehlivosti máme na paměti především snižování intenzity poruch. Tím se zlepší všechny ukazatele spolehlivosti. Tento způsob se označuje jako předcházení poruchám. Použitelnost této metody je omezená jednak proto, že od jisté úrovně rostou náklady spojené s dalším snižováním intenzity poruch neúměrně rychle, jednak proto, že se do cesty staví objektivní fyzikální překážky, jejichž překonání se vymyká našim možnostem či znalostem.

Když nelze poruchám zabránit, je třeba hledat jiné možnosti zlepšování hodnot ukazatelů spolehlivosti. Jednou z nich je, že vezmeme výskyt poruch v úvahu a budeme ho respektovat při návrhu a realizaci systému. Vezme se v úvahu, že k poruchám součástek bude i nadále docházet, ale dosáhne se toho, že se tyto poruchy nebudou projevovat na chování systému, případně se budou projevovat jen minimálně. Tento způsob reakce na poruchy se označuje jako odolnost proti poruchám nebo tolerance poruch. Systém, který je takové reakce schopen, nazýváme jako systém odolný proti poruchám [3].

2.4.1 Předcházení poruchám

Účinnost metody předcházení poruchám je do značné míry omezená, ale přesto ji nelze přehlížet, protože tolerovat lze jen omezený počet poruch. Nejprve musíme vyčerpat všechny dosažitelné prostředky předcházení poruchám, a pouze na zbývající poruchy můžeme uplatnit metody tolerance. Poruchám lze předcházet při návrhu, výrobě i provozu systému.

Při návrhu je třeba především volit spolehlivou součástkovou základnu a spolehlivou technologii. V obou případech je nutno brát v úvahu podmínky, v nichž bude výsledný systém

pracovat. Kromě toho je potřeba volit optimální pracovní bod všech součástí z hlediska výkonu, tepelného režimu, napájení, odrušení, pracovní frekvence apod.

Při výrobě hraje klíčovou roli vstupní kontrola součástí, polotovarů a použitých materiálů. Důležitost vstupní kontroly vyplývá z výsledků řady prováděných rozborů a statistických výzkumů. Sami výrobci se snaží zajišťovat spolehlivost především vysokou technologickou kázní, sledovanou průběžnými kontrolami. Výsledné výrobky se navíc podrobují spolehlivostním testům, při nichž se zkoušejí při zvýšené, případně snížené teplotě, při zvýšeném napětí, vibracích apod.

Při provozu je pro předcházení poruchám nejdůležitější dodržování tzv. technických podmínek. Mezi ně patří požadavky na klimatizaci, intenzitu rušení, stabilitu napájení apod. Navíc je třeba zajistit pravidelnou údržbu a opravy v soulase s předpisy výrobce [3].

2.4.2 Odolnost proti poruchám

Systém se označuje jako odolný proti poruchám, jestliže je schopen správně vykonávat svou funkci i v přítomnosti poruch technického vybavení nebo chyb v programech. Protože však termín „správně vykonávat funkci“ lze chápat různě, je třeba upřesnit, kdy je funkce považována za správně vykonanou. Obvykle se vyžaduje splnění těchto tří podmínek:

- zpracování dat nebylo zastaveno ani narušeno v důsledku poruchy,
- výsledek je správný,
- výsledek byl získán v předepsané době.

Jsou-li splněny pouze některé z uvedených tří požadavků, označuje se systém jako částečně odolný proti poruchám. První požadavek, tedy zachování funkceschopnosti programu, se ovšem považuje za dominantní, takže musí být splněn i v systémech, které jsou odolné jen částečně.

Systém při vývoji prochází několika stádii. Mezi hlavní fáze návrhu systému odolného proti poruchám patří:

- stanovení cílů,
- volba metod detekce poruch,
- návrh algoritmů zotavení po poruše,
- vyhodnocení odolnosti proti poruchám.

3 Základní parametry fotovoltaických článků

Výkon fotovoltaického článku při osvětlení může být plně popsán proudově-napěťovou závislostí. Tuto závislost pro praktické použití stačí popsat několika parametry, mezi které patří: proud nakrátko, napětí na prázdko a faktor plnění.

3.1 Parametry fotovoltaických článků při osvětlení

Proud nakrátko I_{SC} je získán při $U = 0$ V. Proud je generovaný světlem, jestliže sériový odpor R_{so} je nulový. Sériový odpor konečné hodnoty snižuje velikost proudu nakrátko.

Napětí na prázdko U_{OC} je získáno pro $I = 0$ A.

Faktor plnění FF definujeme jako:

$$FF = \frac{U_m I_m}{U_{OC} I_{SC}}. \quad (3.1)$$

Faktor plnění počítáme pro bod maximálního výkonu. Je to poměr výkonu v pracovním bodě ($P_m = U_m \cdot I_m$) k součinu napětí na prázdko a proudu nakrátko. Faktor plnění je tím větší, čím „pravoúhlejší“ je proudově-napěťová křivka.

Parametr I_{450} určuje proud tekoucí článkem při napětí 450 mV. Tento parametr je dán mezinárodním standardem IEC 60904-1 (identický též s ČSN EN 60904-1). Měří se při intenzitě osvětlení 1000 W/m^2 , spektrální složení světla musí odpovídat slunečnímu spektru (AM 1,5 Global) a teplota okolí je stanovena na 25°C . Ze získané hodnoty proudu určujeme třídu fotovoltaického článku (např. pro proud $I_{450} = 3,243$ A víme, že se jedná o třídu 32).

Bod maximálního výkonu označíme P_m . Potom I_m je proud a U_m je napětí, při kterém fotovoltaický článek dodává maximální výkon.

Účinnost fotovoltaického článku značíme E_{EF} . Při určení účinnosti posuzujeme, kolik dopadajícího záření se přemění v elektrickou energii. K tomu je potřeba znát intenzitu dopadajícího záření. Pro fotovoltaické články vyrobené z monokrystalického křemíku se účinnost pohybuje okolo patnácti procent.

R_{so} udává sériový a R_{sh} paralelní odpor fotovoltaického článku [10].

3.2 Voltampérová charakteristika

Přiložíme-li vnější zdroj napětí na přechod PN, tj. kladné napětí na straně P a záporné na straně N, pak vnější elektrické pole přetahuje elektrony na stranu P a díry na stranu N, takže nastává injekce nosičů, oblast prostorového náboje se zaplaví injektovanými nosiči a prochází proud v přímém směru. Přechod představuje malý odpor, šířka bariéry se zmenší. Díry, které se dostanou přes přechod, představují v oblasti N menšinové nosiče a nemohou tam stabilně existovat, a proto se rekombinují postupně s elektrony. Doba, po kterou existují v oblasti N, je doba života menšinových nosičů. Vzdálenost, na kterou pronikají přes přechod do oblasti N, je určena difúzní délkou. Přechod PN pólovaný v přímém směru dobře vstřikuje menšinové nosiče proudu. Podobným způsobem přecházejí elektrony do oblasti P.

Pokud je ovšem polarita přiloženého napětí opačná, působí elektrostatické síly tak, že jak elektrony na straně N, tak díry na straně P se vzdalují od přechodu a téměř žádný proud neprochází. Mluvíme o zpětném, neboli závěrném směru. Přechod představuje velký odpor, šířka bariéry se zvětší. Procházející zbytkový proud vytváří menšinové nosiče, pro které má napětí příznivou polaritu, aby se mohly dostat přes přechod.

Ideální VA charakteristika, vyjádřená podle rovnice [14]

$$I = I_0 [\exp(eU / kT) - 1], \quad (3.2)$$

se může ve skutečnosti pozorovat u přechodů z germania pro malá napětí. Pro vyšší napětí a vzorky z Si a GaAs se objevují odchylky, které jsou způsobeny řadou vlivů: vlivem povrchu, generace a rekombinace v oblasti prostorového náboje, tunelového přestupu nosičů mezi lokalizovanými hladinami (zejména u GaAs), velkým vstřikovaným proudem, vlivem sériového odporu krystalu mimo oblast prostorového náboje [14].

3.2.1 Vliv generace a rekombinace

V Shockleyově modelu přechodu se předpokládá, že rekombinace a generace nosičů se v oblasti prostorového náboje neprojevují. Ve skutečnosti však při polarizaci přechodu ve zpětném směru vzniká generace nosičů, poněvadž koncentrace nosičů je hluboko pod rovnovážnou koncentrací, předpokládáme $n = p = 0$. Vztah pro fononovou rekombinaci:

$$R - G = -\frac{C_n C_p N_i n_i^2}{C_n n_1 + C_p p_1}, \quad (3.3)$$

kde C jsou konstanty úměrnosti. Pomocí relaxační doby je vyjádříme $C = 1/\tau N_t$.

Budeme předpokládat, že $E_t = E_i$, kde E_t představuje energii hluboké hladiny (energetického stavu v blízkosti středu zakázaného pásu). Přes tuto hladinu je velmi pravděpodobná generace, resp. rekombinace páru elektron-díra. Potom platí $n_1 = p_1 = n_i$

$$R - G = -\frac{n_i}{\frac{1}{N_t C_p} + \frac{1}{N_t C_n}}. \quad (3.4)$$

Rekombinace je pro nepřítomnost nosičů nulová. Když zvolíme $\tau_0 = \frac{\tau_p + \tau_n}{2}$, dostaneme pro generaci vztah:

$$R - G = -\frac{n_i}{2\tau_0}. \quad (3.5)$$

Integrací přes celou ochuzenou oblast získáme vztah pro proudovou hustotu způsobenou generací nosičů náboje:

$$j_{gen} = \int_0^W e(G - R)dx = \frac{en_i W(U)}{2\tau_0}. \quad (3.6)$$

Pro polarizaci PN přechodu v přímém směru se projeví více rekombinace nosičů, vzhledem k injekci nadbytečných nosičů. Pro odhad rekombinačního proudu použijeme hodnoty koncentrace nosičů ve středu ochuzené oblasti, kde pro kvazi-Fermiho hladiny přibližně platí:

$$E_{Fn} - E_i = E_i - E_{Fp} = \frac{eU}{2}, \quad (3.7)$$

proto

$$n = p = n_i \exp\left(\frac{eU}{2kT}\right). \quad (3.8)$$

Rekombinace má v tomto místě své maximum. S použitím $n_1 = p_1 = n_i$ a $\tau_{n0} = \tau_{p0} = \tau_0$ dostaneme pro fononovou rekombinaci vztah:

$$(R - G)_{\max} = \frac{n_i}{2\tau_0} \frac{\exp\left(\frac{eU}{kT}\right) - 1}{\exp\left(\frac{eU}{2kT}\right) + 1}. \quad (3.9)$$

Pro $U \gg kT/e$:

$$(R - G)_{\max} = \frac{n_i}{2\tau_0} \exp\left(\frac{eU}{2kT}\right). \quad (3.10)$$

Rekombinace není v oblasti prostorového náboje konstantní, proto ji můžeme odhadnout pomocí integrace její maximální hodnoty přes oblast s menší efektivní šířkou x' :

$$j_{rek} = \int_0^W e(R - G)dx = ex' \frac{n_i}{2\tau_0} \exp\left(\frac{eU}{2kT}\right) = j_{r0} \exp\left(\frac{eU}{2kT}\right). \quad (3.11)$$

Důležitý poznatek je ten, že oproti Shockleyho vztahu má exponenciální člen rekombinačního proudu poloviční argument, což se v semilogaritmicím měřítku projeví poloviční směrnici voltampérové charakteristiky:

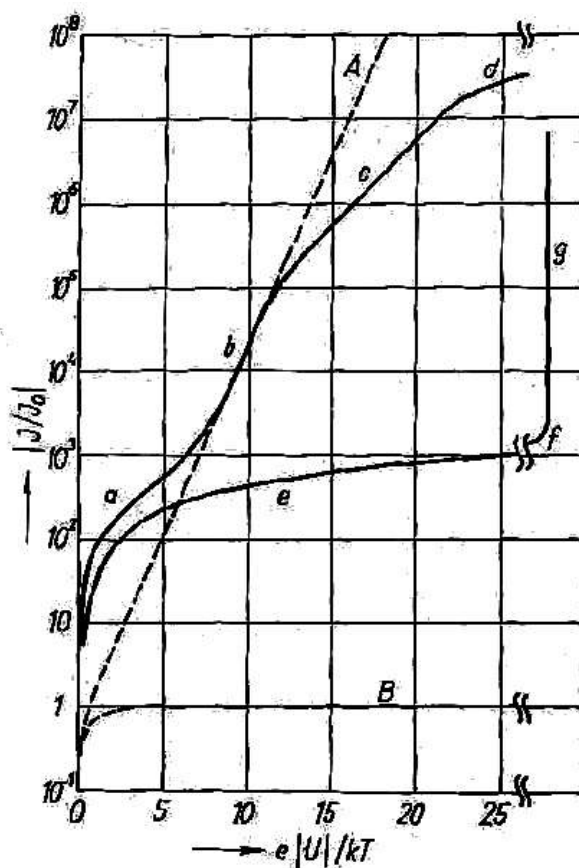
$$\ln j_{rek} = \ln j_{r0} + \frac{eU}{2kT}, \quad (3.12)$$

$$\ln j_D = \ln j_s + \frac{eU}{kT}. \quad (3.13)$$

Celkovému proudu reálné diody potom odpovídá vztah:

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{eU}{nkT}\right) - 1 \right], \quad (3.14)$$

kde n je číslo z intervalu $\langle 1, 2 \rangle$. Rekombinační proudy se projeví zejména při nižších proudových hustotách. Je tedy možné položit $n = 1$ pro velká U a $n = 2$ pro malá U [15].



Obr. 2.1: Normalizovaná voltampérová charakteristika křemíkové diody za tmy (převzato z [14])

Obr. 2.1 zobrazuje normalizovanou VA charakteristiku křemíkové diody, kde:

A - ideální propustná větev,

B - ideální závěrná větev, reálná charakteristika – vytažená křivka

a - oblast rekombinačního proudu,

b - oblast difúzního proudu,

c - oblast velké injekce,

d - vliv sériového odporu,

e - závěrný proud generační a vlivem povrchových jevů,

f - koleno,

g - oblast nárazové ionizace.

3.2.2 Vliv velké injekce

U silových usměrňovačů, spínacích diod aj. je třeba znát chování PN přechodu za podmínek velké injekce, kdy koncentrace vstřikovaných nosičů dosahuje koncentrace většinových nosičů. Proud už není čistě difúzní, ale obsahuje též složky driftové, elektrické pole už není omezeno jen na oblast prostorového náboje. Proud je úměrný $\exp(eU/2kT)$.

Úbytek napětí v mimopřechodové oblasti diody je rozhodující pro účinnost při velkých proudech (obr. 2.1d). Proto se používá epitaxního materiálu se silně dotovaným substrátem a slabě dotovanou oblastí epitaxní vrstvy, kde se vytvoří přechod PN [14].

3.3 Ztráty na fotovoltaiických člancích

Optimální fotovoltaiický článek sestavený z ideálního materiálu a ideálního návrhu by vykazoval teoretické charakteristiky PN přechodu. Ovšem pro reálný fotovoltaiický článek musíme počítat s nedokonalostmi jak materiálu, který je těžké udržet velmi kvalitní během zpracování, tak i návrhu. Důležitými materiálovými parametry jsou doba života a pohyblivost minoritních nosičů náboje v objemu polovodiče a rekombinační rychlost na předním a zadním povrchu článku [10].

3.3.1 Optické ztráty

Ztráty ve světle generovaném proudem přímo ovlivňují proud nakrátko a napětí naprázdno. Dopadající světlo nemůže být nikdy plně využito kvůli existenci odrazivosti materiálu.

Odrazivost můžeme snížit použitím antireflexní vrstvy na povrch materiálu. Tloušťka vrstvy je nastavena tak, aby odrážející světlo nahoře na povrchu nebylo ve fázi s odráženým světlem z rozhraní substrátu.

Optické ztráty rovněž nastávají kvůli malé tloušťce fotovoltaiického článku. Za účelem soustředit hlavní část slunečního světla uvnitř článku je potřebná jistá tloušťka materiálu, která je obzvlášť velká pro nepřímé polovodiče s nízkým absorpčním koeficientem. Např. pro křemík je dobrá tloušťka kolem 100 až 400 μm k absorbování většiny světla. Optická tloušťka polovodiče může být zmenšená tzv. světelnou pastí na světlo uvnitř krystalu tak, že se světlo několikrát odráží od horního povrchu a spodního, než se úplně pohltí. Toto vyžaduje zrcadlo v zadní části a texturu povrchu, která by odrážela toto světlo pod šikmými úhly [10].

3.3.2 Rekombinační ztráty

Některé nosiče náboje, které jsou vygenerovány velmi daleko od přechodu, zaniknou ještě dříve, než stačí prodifundovat k vývodům součástky. Tento rekombinační mechanismus může být ovlivněn dobou života. V čistém bezdefektním monokrystalickém polovodiči je zářivá rekombinace dána dobou života, která závisí na koncentraci dopantů. Dalším důležitým rekombinačním centrem je povrch, dislokace, hranice zrn v polykrystalickém polovodiči a rozhraní v heterostruktuře fotovoltaiického článku.

Rekombinace na povrchu a uvnitř materiálu je základní proces určující velikost U_{OC} . Je snahou rekombinační procesy v celém článku co nejvíce minimalizovat. Čím menší je rekombinační rychlost, tím vyšší je napětí U_{OC} [10].

3.3.3 Sériový a paralelní odpor

Charakteristiky PN přechodu jsou dále ovlivněny sériovým R_{so} a paralelním R_{sh} odporem. Ideální fotovoltaiický článek by měl $R_{so} = 0$, $R_{sh} = \infty$. Tyto parazitní odpory vytváří ztrátu napětí nebo proudu. Původ sériového parazitního odporu je v celkovém odporu hmoty polovodiče a odporu kontaktů a propojení. Paralelní parazitní odpor může být způsobený rozsáhlými defekty krystalické mřížky, nebo svodovým proudem kolem okrajů článku. K defektům uvnitř krystalové mřížky řadíme dislokace, hranice zrnitosti a velké precipitáty. Paralelní odpor R_{sh} je veden skrze celou strukturu článku a je paralelně připojen k diodě, kdy dochází k úbytku proudu I_p . V praxi je velikost paralelního odporu většinou zanedbatelná [10].

3.4 Statický a dynamický odpor PN přechodu

Protože je fotovoltaiický článek nelineární součástka, můžeme u jejího PN přechodu definovat statický (prostý) a dynamický (diferenciální) odpor, jako funkci přiloženého napětí. Ze vztahu napětí:

$$U = U_T \ln \left(1 + \frac{I}{I_0} \right), \quad (3.15)$$

kde $U_T = kT/e$ je teplotní napětí.

Statický odpor potom definujeme:

$$R_s = \frac{U}{I} = \frac{U}{I_0 \left(e^{\frac{U}{U_T}} - 1 \right)} = \frac{U_T \ln \left(1 + \frac{I}{I_0} \right)}{I}. \quad (3.16)$$

Dynamický odpor určíme:

$$R_d = \frac{dU}{dI} = \frac{U_T}{I_0 \left(e^{\frac{U}{U_T}} \right)} = \frac{U_T}{I + I_0}. \quad (3.17)$$

Velikost odporu R_0 je pro křemíkové PN přechody 10^6 až $10^{10} \, \Omega$. S dynamickým odporem počítáme při malých střídavých napětích a proudech, tj. při superponovaném střídavém signálu. V propustném směru se dynamický odpor teoreticky blíží k nule. Musíme ovšem k němu přičíst sériový odpor R_{so} [7].

4 Metody měření fotovoltaických článků

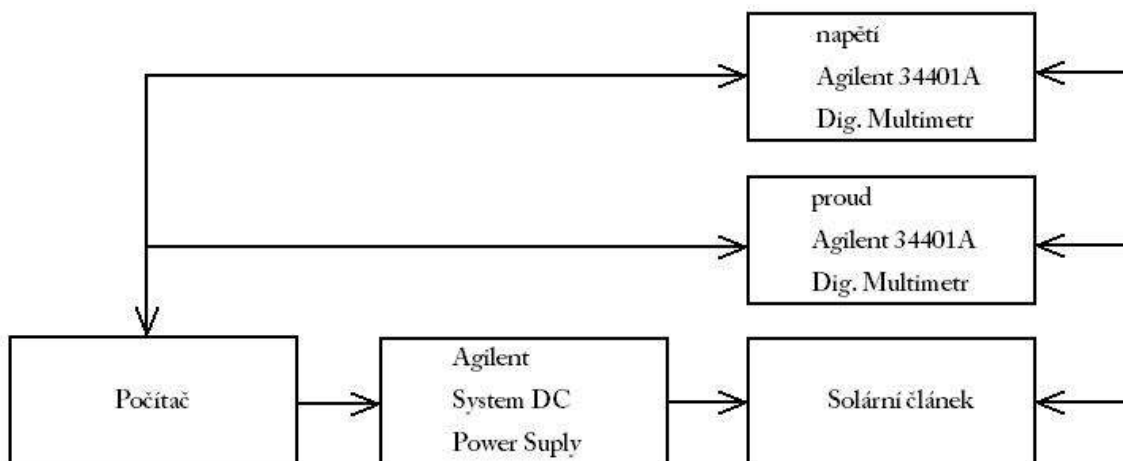
Měření fotovoltaických článků bylo realizováno na pracovišti pro měření VA charakteristiky bez osvětlení a na pracovišti pro měření spektrální šumové hustoty.

4.1 Měření VA charakteristik

Pro měření VA charakteristik bylo použito automatizované pracoviště, které obsahuje:

- voltmetr Agilent 34401A Digital Multimetr,
- ampérmetr Agilent 34401A Digital Multimetr,
- zdroj napětí Agilent Systém DC Power Suply,
- výpočetní technika s výstupem na tiskárnu.

Průběh charakteristik ideální diody může být východiskem pro zkoumání reálné diody. Přesto je potřeba počítat s ději, které tento ideální průběh ovlivní. Vzniknou tak odchylky dané jinými povrchovými vlastnosti, generací a rekombinací nosičů v závěrné vrstvě, tunelováním nosičů mezi jednotlivé stavy v zakázaném pásu, stavem vysoké injekce a efektem sériového odporu.



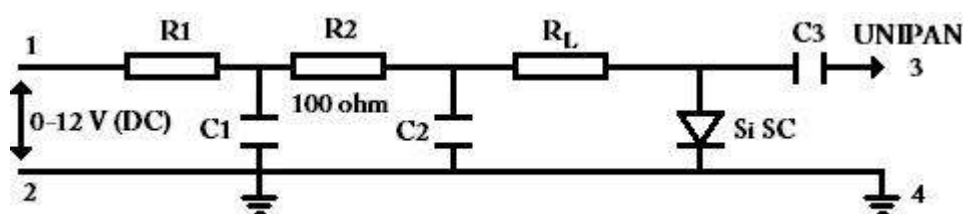
Obr. 4.1: Blokové schéma zapojení měřicího pracoviště VA charakteristiky (převzato z [7])

Hodnota odporu R_{so} je zkoumaným parametrem sériově zapojeného obvodu, který zahrnuje odpor části vzorku, kromě PN přechodu a dále odpor kontaktů. Tato hodnota je získaná z proudu procházejícího vzorkem a z rozdílu napětí, které je ve skutečnosti změřeno na vzorku a odvozeno z exponencionální závislosti. Pokud zaneseme proud procházející

vzorkem a ΔU do logaritmických měřítek grafu, získáme exponenciální závislost $\Delta U = RI^n$, která nám pomůže posoudit odpor kontaktů [7].

4.2 Měření spektrální šumové hustoty

Šumový proces na fotovoltaiickém článku se projevuje většinou kolísáním odporu. Proud způsobený vnějším napětím je potřebný pouze ke zvýšení úrovně šumu do měřitelných hodnot. Potřebný proud je stejný, nebo nižší, než je normální pracovní bod součástky, vyšším proudem bychom snižovali životnost fotovoltaiického článku. Měření probíhá za normálních napěťových podmínek, při kterých fotovoltaiický článek pracuje. Jedná se proto o nedestruktivní testování [7].

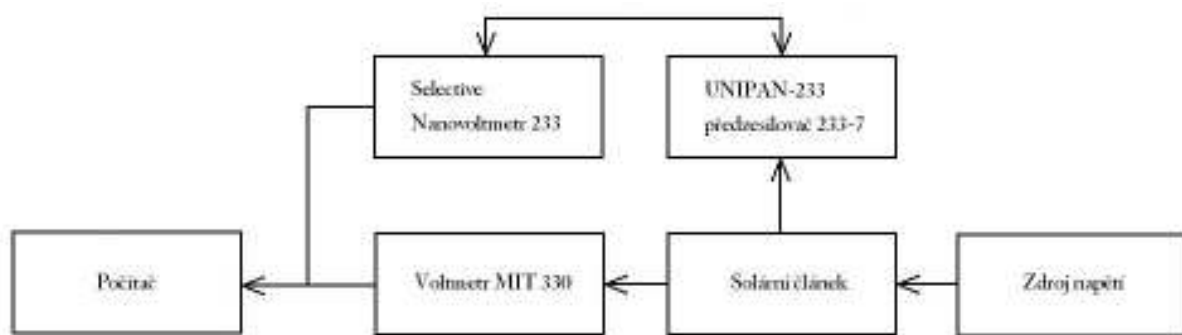


Obr. 4.2: Schéma zapojení měřicího pracoviště (převzato z [1])

4.2.1 Měření S_u v závislosti na napětí

Měření probíhalo na automatizovaném měřicím pracovišti. Metoda používá k měření filtry při měření spektrální proudové hustoty šumu při kmitočtu 1 kHz. Jak filtr dolní propusti, tak počítačový systém je umístěn vně komplexu. Výstup z UNIPAN 233-7 je připojen k Selective Nanovoltmetr 233 (citlivost je zde nastavitelná od 3 μV a selektivita 54 dB na oktávu). Na vzorek přivádíme napětí ze zdroje, který je zdrojem pilového napětí. To umožňuje přivádět postupně rostoucí napětí do obvodu se vzorkem a pomocí přepínače měnit rychlost nárůstu napětí ($\text{mV}\cdot\text{s}^{-1}$). Vyhodnocení se provádí pomocí počítače.

Měření bylo prováděno pro zátěžové odpory $R_L = 100 \Omega$, $R_L = 1 \text{ k}\Omega$, $R_L = 10 \text{ k}\Omega$ a $R_L = 1 \text{ M}\Omega$. 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. 4.3: Blokové schéma zapojení měřicí soustavy S_u (převzato z [7])

Šumové charakteristiky naměřené na zatěžovacím odporu PN přechodu fotovoltaického článku při napětí zapojeném v propustném směru dosáhnou maximální hodnoty-extrému, pokud se hodnota dynamického odporu testovaného článku bude rovnat zátěžovému odporu. Křivka se posune ke spodním hodnotám napětí v propustném směru, pokud zvýšíme hodnotu zátěžového odporu. Měřili jsme šumové napětí na zátěžovém odporu:

$$S_u = S_i \cdot R_p^2, \quad (4.1)$$

kde R_p odpovídá případu, kde dynamický odpor PN přechodu fotovoltaického článku je $R_d = \frac{1}{\beta I}$ tak, že dostaneme:

$$R_p = \frac{R_L}{\beta I R_L + 1}. \quad (4.2)$$

Pro režimy nízké injekce je zátěžový odpor $R_L < \frac{1}{\beta I_F}$ tak, že $I_{FL} < \frac{1}{\beta R_L}$.

Šumové napětí U_N na zátěžovém odporu je měřitelná veličina. V oblasti nízké injekce napěťová spektrální hustota je dána vztahem $S_u = S_i \cdot R_L^2$, kde

$$S_i = \frac{I^2 N}{\Delta f} = \frac{U_N^2}{\Delta f R_L^2}. \quad (4.3)$$

V oblastech vysoké injekce je napěťová šumová spektrální hustota $S_u = S_i \cdot R_p^2$, kde

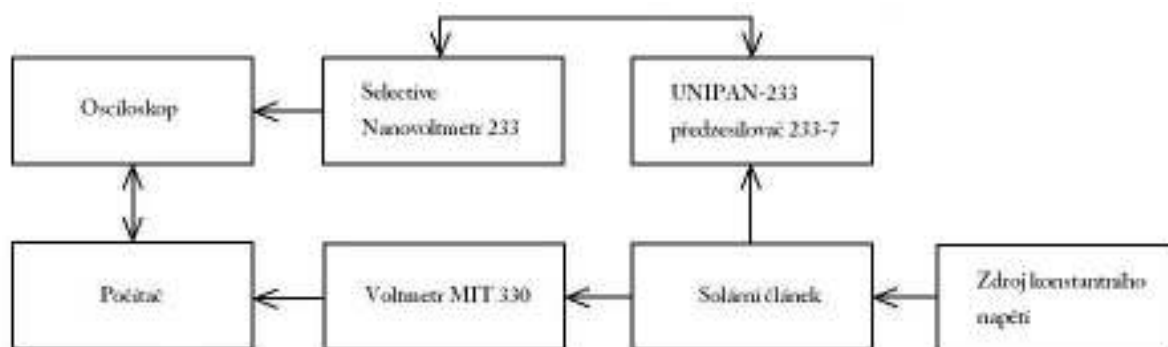
$$R_p = \frac{R_d R_L}{R_d + R_L}. \quad (4.4)$$

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 [7].

4.2.2 Měření S_u ve frekvenční závislosti

Měření probíhalo na automatizovaném měřicím pracovišti. Na vzorek je připojena sada baterií tak, aby byl vzorek pod konstantním napětím. Výstup z UNIPAN 233-7 je připojen k Selective Nanovoltmetru 233. Měřené napětí je přiváděno na osciloskop. Vyhodnocení se provádí pomocí počítače.

Kleinpenning [8] popsal způsob, jak charakterizovat příspěvky různých zdrojů $1/f$ šumu v PN přechodu diody. Ukázal, že různé zdroje $1/f$ šumu mohou být dominantní v různých oblastech proudové hustoty. Podobné šumové chování se vyskytuje ve fotovoltaiickém článku bez osvětlení, protože jde rovněž o polovodičový PN přechod.



Obr. 4.4: Blokové schéma zapojení měřicí soustavy S_u pro přepočet do frekvenční závislosti

5 Šumová analýza fotovoltaických článků

5.1 Parametry měřené výrobcem

K dispozici jsme měli tři fotovoltaické články z monokrystalického křemíku. Výrobce fotovoltaických článků (Solartec s.r.o.) provedl na zkoumaných článcích svá měření. Parametry určoval při intenzitě osvětlení 1000 W/m^2 , při spektrálním složení světla AM 1,5 Global, které odpovídá slunečnímu spektru a při teplotě 25°C .

Tabulka 5.1 – Hodnoty solárních článků dodané výrobcem

Č.	Sada	Šarže	Třída	I_{450} (A)	I_{sc} (A)	U_{oc} (V)	I_m (A)	U_m (V)	P_m (W)	FF	E_{EF} (%)	R_{so} (Ω)	R_{sh} (Ω)
1	G1	AMEX	32	3,253	3,297	0,600	3,120	0,499	1,557	78,7	14,97	0,013	11
4	G1	AMEX	32	3,280	3,324	0,600	3,171	0,500	1,586	79,6	15,25	0,011	11
5	G1	AMEX	32	3,333	3,390	0,598	3,136	0,503	1,576	77,7	15,15	0,012	11

Tabulka 5.2 – Doplnující údaje solárních článků

Č.	ARC	Tloušťka (μm)	BS 4-point	Base res.	FS 4-point	BS metal.
1	$\text{SiO}_2 + \text{Si}_3\text{N}_4$	246	x	x	7,2	Finger 64
4	$\text{SiO}_2 + \text{Si}_3\text{N}_4$	246	x	x	7,2	Mesh
5	Si_3N_4	246	x	x	7,2	Finger 64

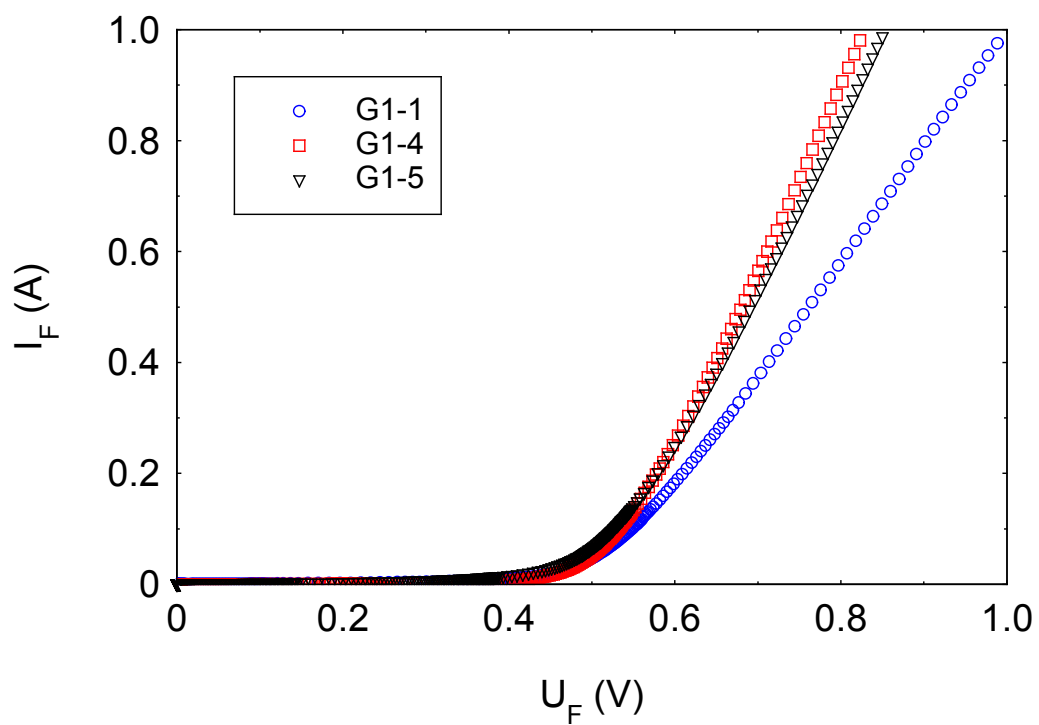
Vzorky (dále jen G1-1, G1-4 a G1-5) byly vyrobeny ve stejné sérii. Jedná se o monokrystalické křemíkové desky (100×100) mm. Liší se ovšem některými povrchovými úpravami, např. materiálem pro antireflexní vrstvu (ARC) nebo metalizací zadní strany (Backside metallization).

5.2 Měření VA charakteristik

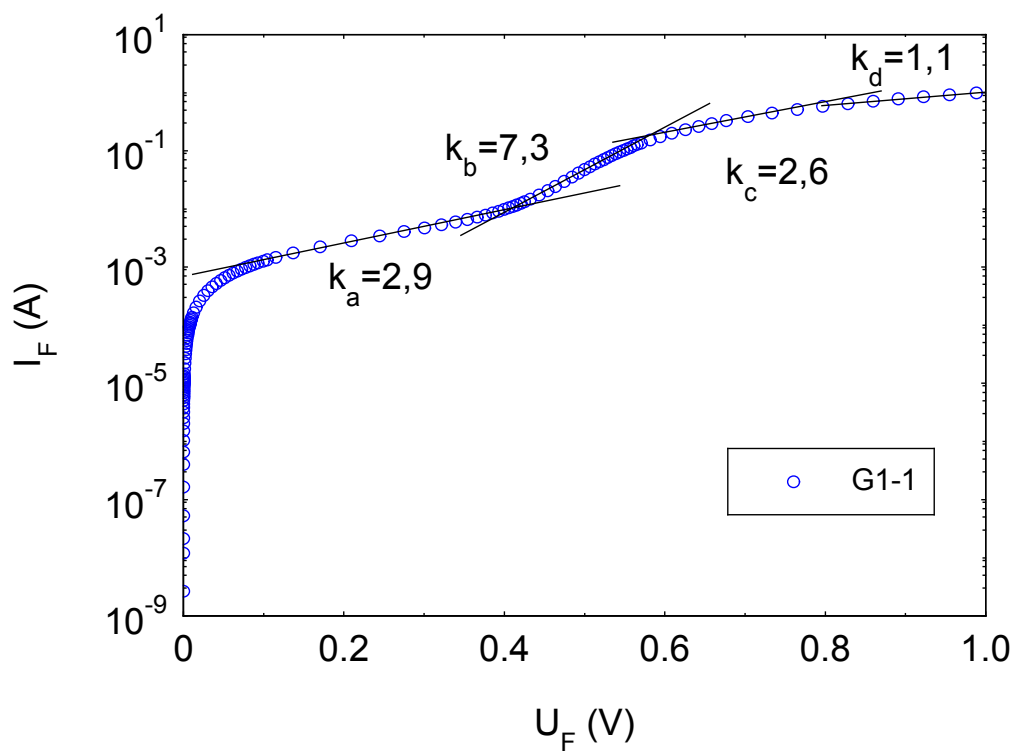
Měření proběhla 16.2.2009 (vzorek G1-1) a 17.2.2009 (vzorek G1-4 a G1-5).

Výchozí podmínky:

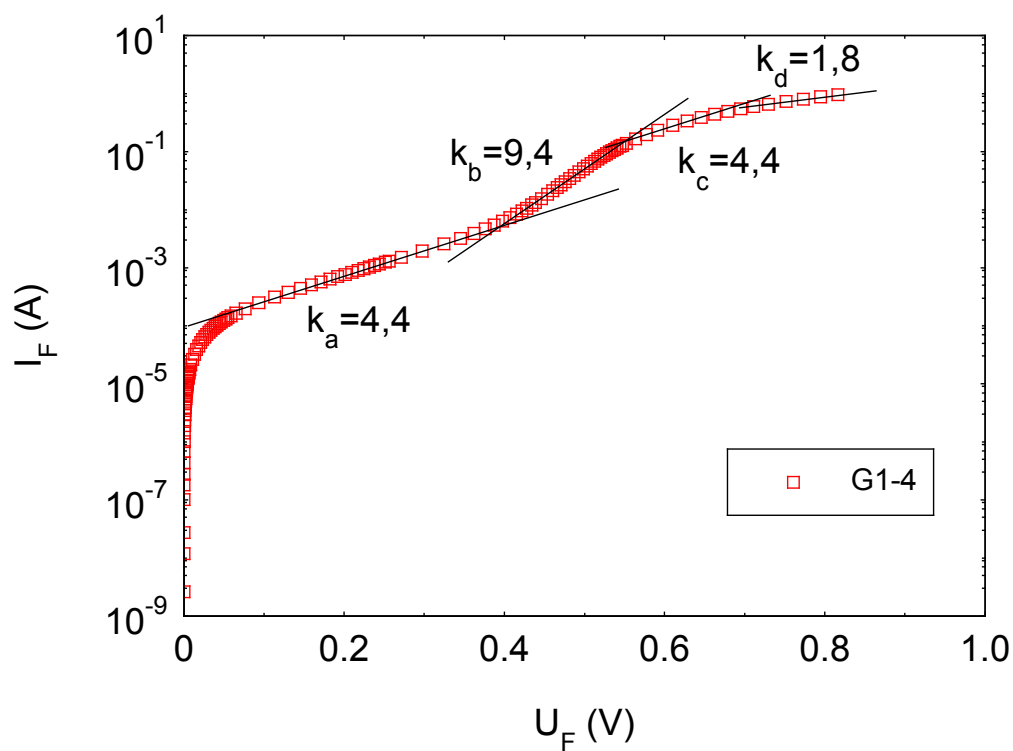
- $T = 300 \text{ K}$
- $f = 1 \text{ kHz}$



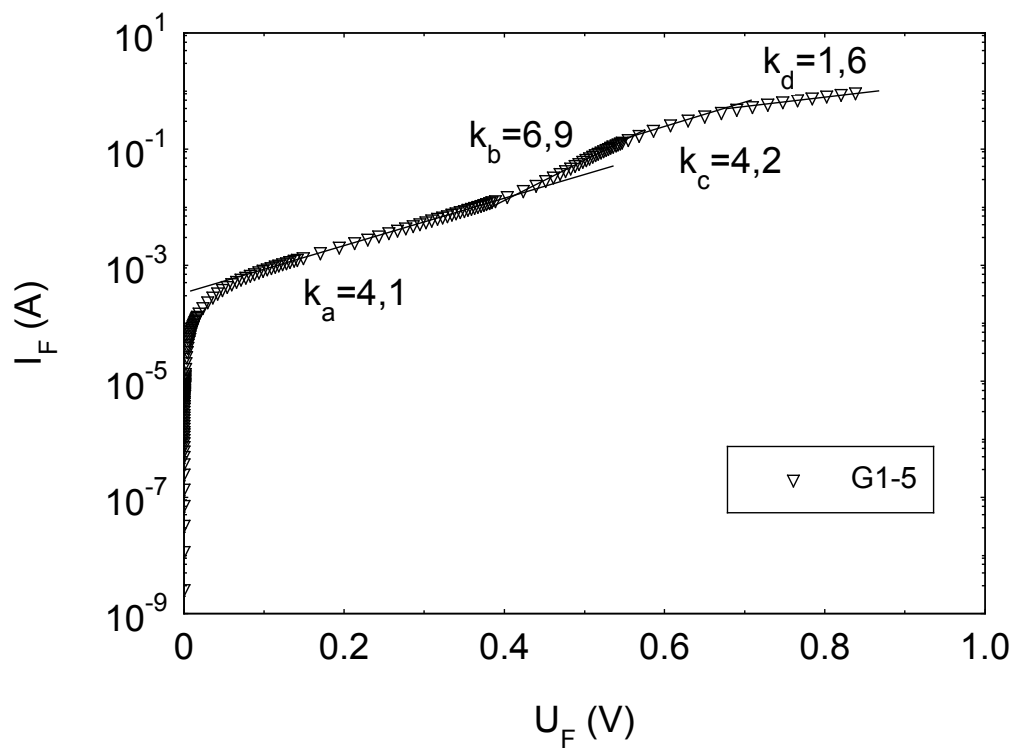
Graf 5.1: VA charakteristika fotovoltaiických článků za tmy



Graf 5.2: VA charakteristika fotovoltaiického článku G1-1 za tmy, měřítko $U - \log I$



Graf 5.3: VA charakteristika fotovoltaiického článku G1-4 za tmy, měřítko U - log I



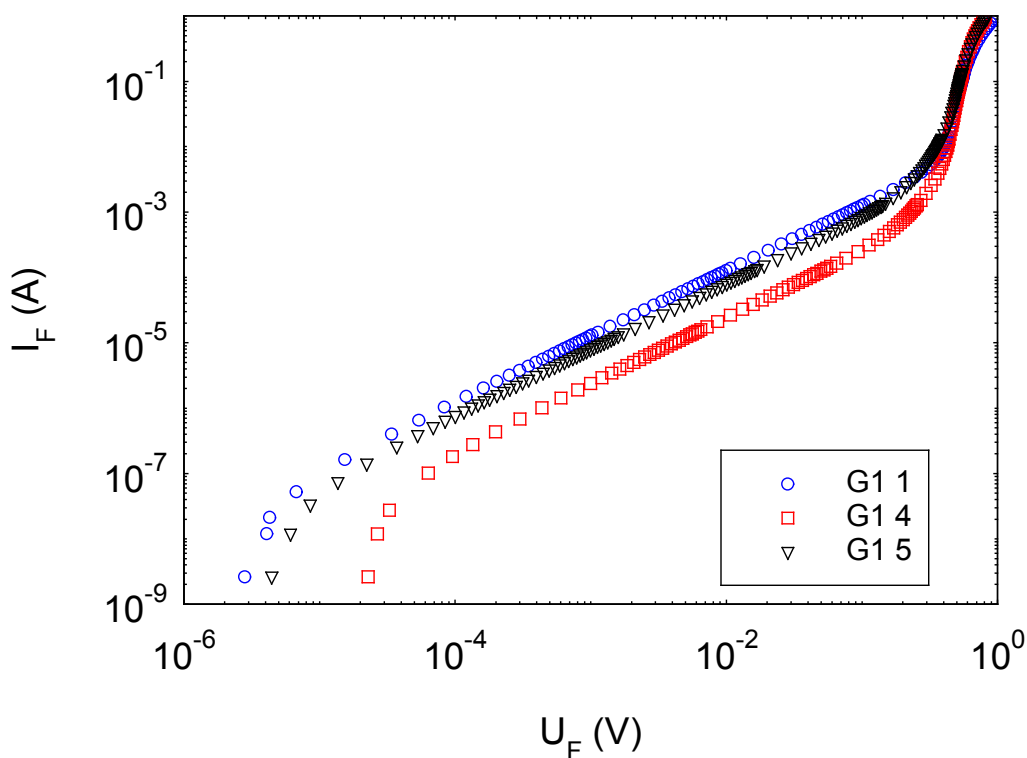
Graf 5.4: VA charakteristika fotovoltaiického článku G1-5 za tmy, měřítko U - log I

Tabulka 5.3: Parametry VA charakteristik v propustném směru fotovoltaických článků za tmy

	k_a (-)	k_b (-)	k_c (-)	k_d (-)
G1-1	2,9	7,3	2,6	1,1
G1-4	4,4	9,4	4,4	1,8
G1-5	4,1	6,9	4,2	1,6

Směrnice k_a představuje oblast ohmického odporu, dominantní je rekombinační proud. Směrnice k_b patří do oblasti difúzního proudu. Dále následuje oblast velké injekce – směrnice k_c a v poslední části můžeme sledovat vliv sériového odporu – směrnice k_d .

Ze závislosti $\log I - \log U$ můžeme odečíst velikost odporu R (oblast 1 V) a odporu R_{so} (oblast 10^{-4} až 10^{-1} V) [7].



Graf 5.5: VA charakteristika fotovoltaických článků za tmy, měřítko $\log U - \log I$

Příklad výpočtu R_{so} a R pro článek G1-1:

$$R_{so} = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{(7,70 \cdot 10^{-2} - 1,21 \cdot 10^{-4})}{(9,53 \cdot 10^{-4} - 1,54 \cdot 10^{-6})} \Omega = 80,80 \Omega$$

$$R = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{(0,99 - 0,80)}{(0,98 - 0,58)} \Omega = 0,48 \Omega$$

Tabulka 5.4: Odečtené hodnoty R_{so} a R

	R_{so} (Ω)	R (Ω)
G1-1	80,80	0,48
G1-4	380,60	0,30
G1-5	119,05	0,33

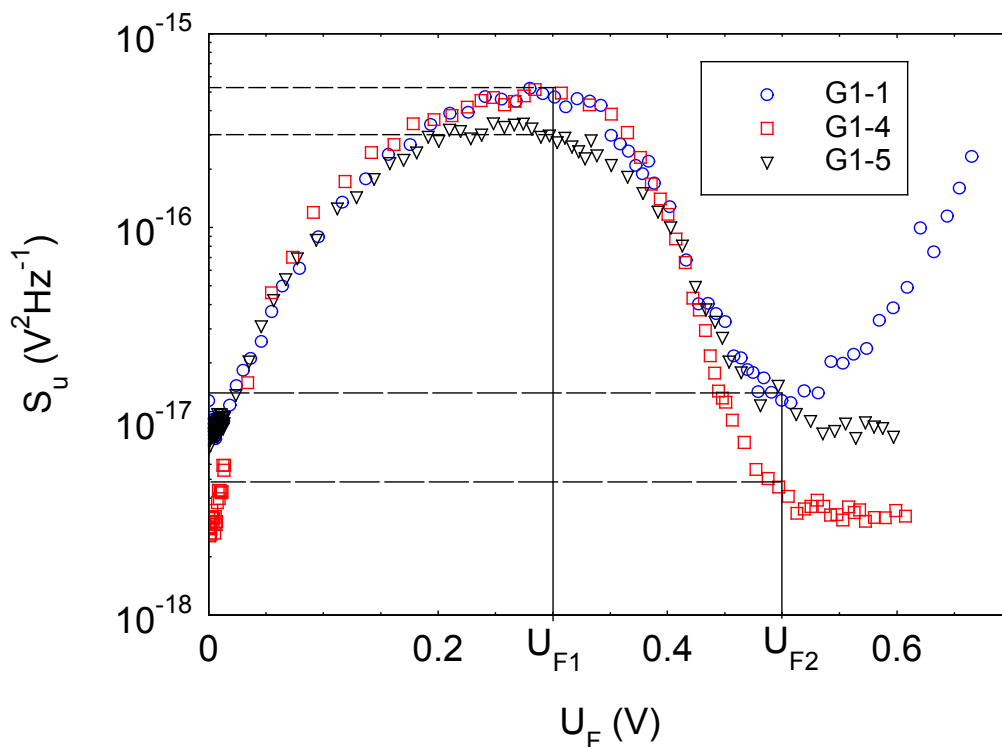
Odpor R , který představuje odpor kontaktů, je nejnižší pro článek G1-4. Srovnatelné hodnoty dosahuje článek G1-5. Vyšší odpor R , tedy i horší kvalitu kontaktů, předpokládáme u článku G1-1.

5.3 Měření S_u v závislosti na napětí

Měření proběhla 16.2.2009 (vzorek G1-1) a 17.2.2009 (vzorek G1-4 a G1-5).

Výchozí podmínky:

- $T = 300 \text{ K}$
- $f = 1 \text{ kHz}$



Graf 5.6: Spektrální výkonová hustota šumového napětí na fotovoltaických člancích v závislosti na procházejícím napětí

Napětí $U_{F1} = 0,3$ V představuje oblast zhruba maximálního spektrálního šumového napětí. Pro toto napětí byla měřena frekvenční závislost vzorku G1-1 a G1-4.

Tabulka 5.5: Spektrální výkonové hustoty šumového napětí při různých referenčních napětí

	U_{F1} (V)	S_u (V^2Hz^{-1})	U_{F2} (V)	S_u (V^2Hz^{-1})
G1-1	0,3	$4,70 \cdot 10^{-16}$	0,5	$1,28 \cdot 10^{-17}$
G1-4	0,3	$4,93 \cdot 10^{-16}$	0,5	$4,60 \cdot 10^{-18}$
G1-5	0,3	$2,64 \cdot 10^{-16}$	0,5	$1,46 \cdot 10^{-17}$

Od napětí $U_{F2} = 0,5$ V můžeme sledovat parazitní vlivy, mezi které patří i vliv kontaktů. Článek G1-4 má o jeden řád nižší hodnotu spektrálního šumového výkonu napětí. Můžeme u něj předpokládat kvalitnější provedení kontaktů.

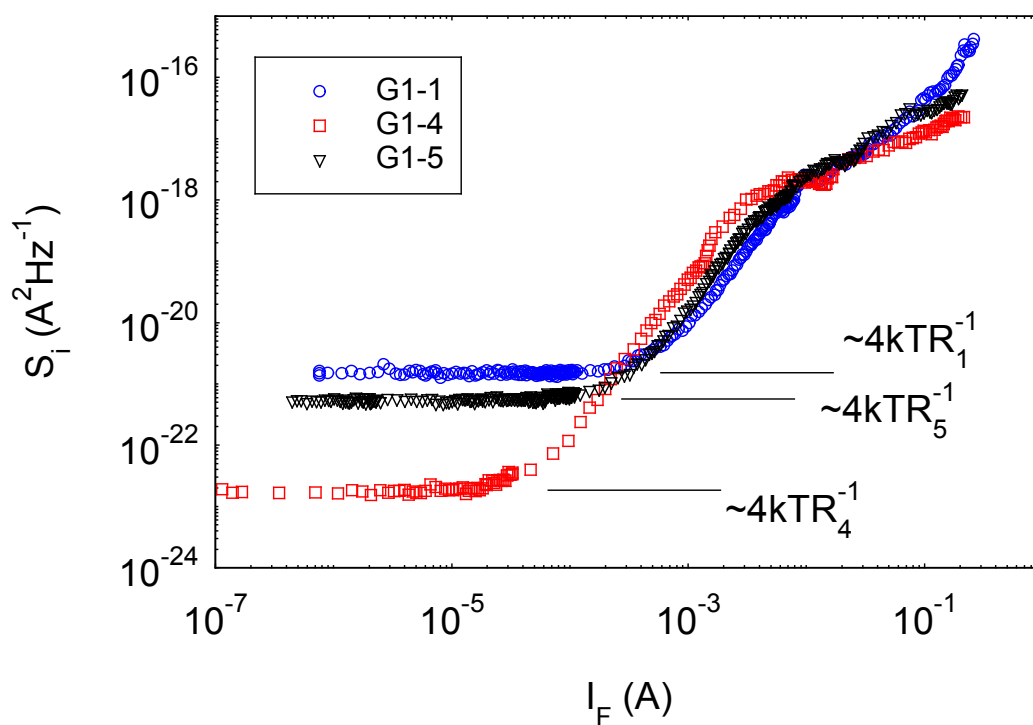
5.4 S_i v závislosti na proudu

Z naměřených hodnot S_u v závislosti na napětí dopočítáme proudovou závislost S_i . Spektrální výkonovou hustotu šumové napětí podělíme druhou mocninou dynamického odporu

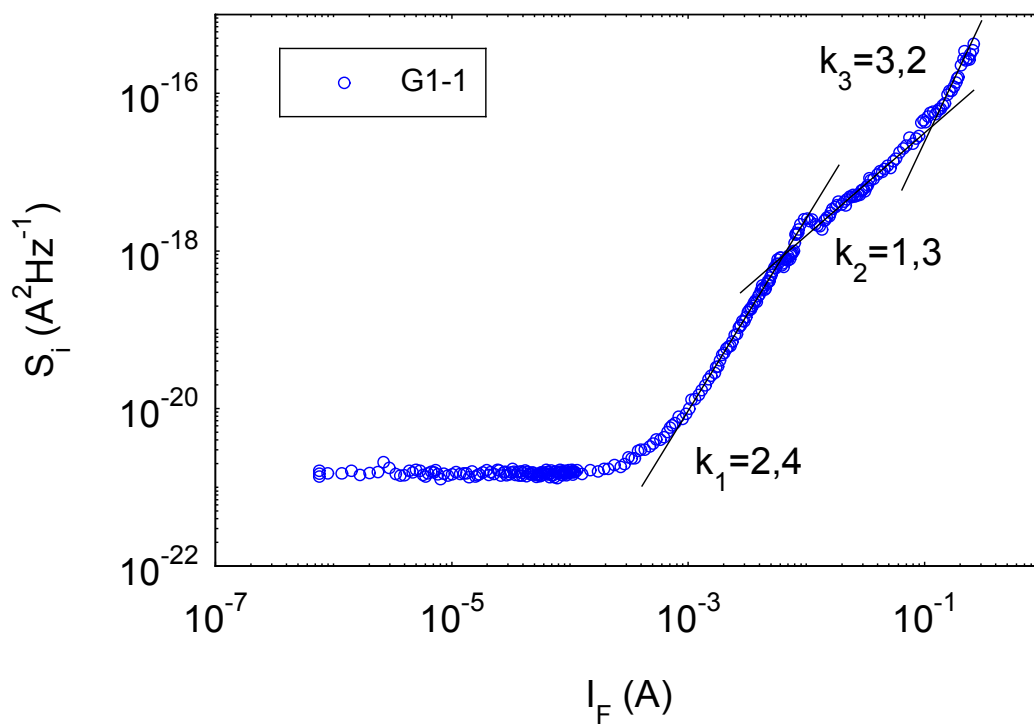
v každém místě závislosti. Na ose x určíme proud na článku, který jím prochází při příslušném napětí. Hodnoty nalezneme pomocí VA charakteristiky.

Příklad výpočtu jedné hodnoty S_i pro článek G1-1:

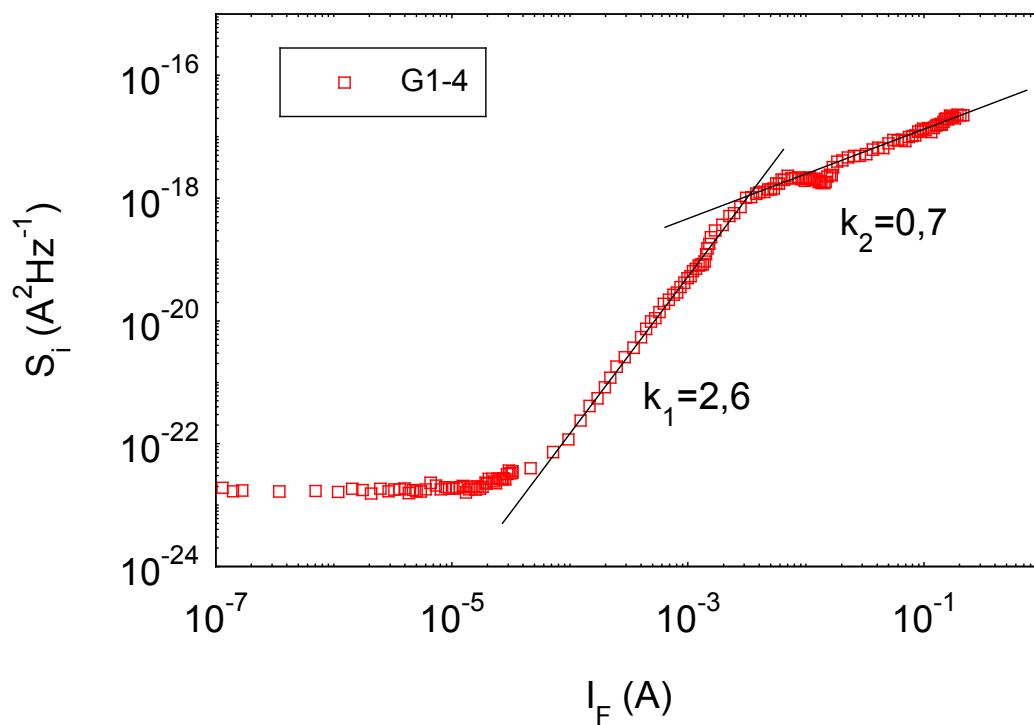
$$S_i = \frac{S_u}{R_d^2} = \frac{S_u}{\left(\frac{\Delta U}{\Delta I}\right)^2} = \frac{9,36 \cdot 10^{-18}}{\left(\frac{5,07 \cdot 10^{-4}}{6,44 \cdot 10^{-6}}\right)^2} A^2 Hz^{-1} = 1,51 \cdot 10^{-21} A^2 Hz^{-1}$$



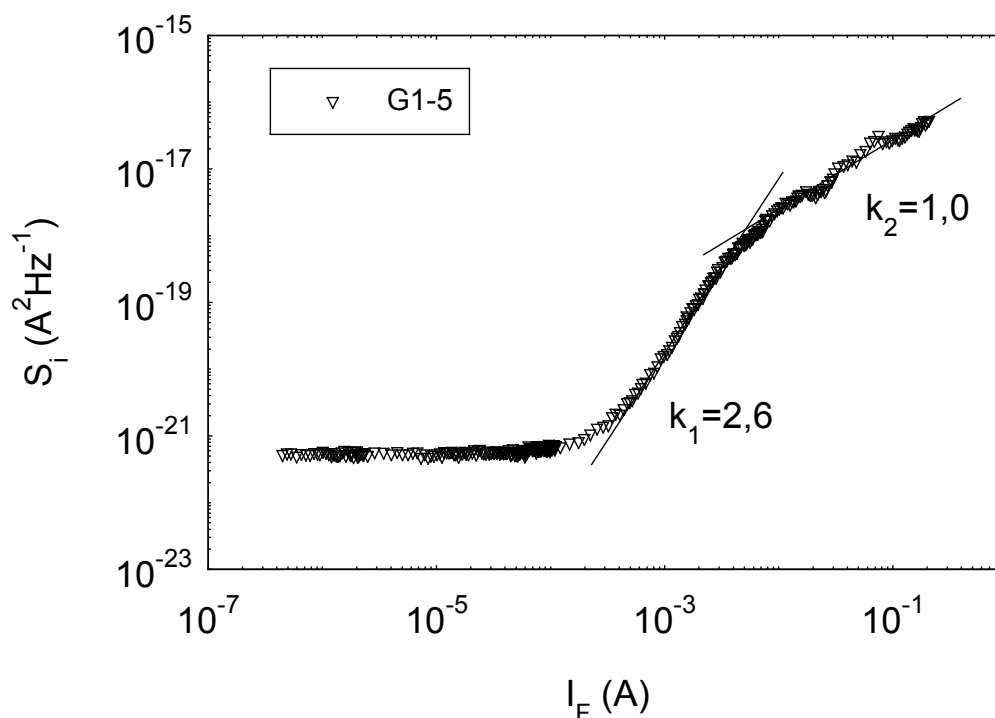
Graf 5.7: Spektrální výkonová hustota šumového proudu na fotovoltaických článcích v závislosti na procházejícím proudu



Graf 5.8: Spektrální výkonová hustota šumového proudu na fotovoltaickém článku G1-1 v závislosti na procházejícím proudu



Graf 5.9: Spektrální výkonová hustota šumového proudu na fotovoltaickém článku G1-4 v závislosti na procházejícím proudu



Graf 5.10: Spektrální výkonová hustota šumového proudu na fotovoltaickém článku G1-5 v závislosti na procházejícím proudu

Tabulka 5.6: Parametry spektrální výkonové hustoty šumového proudu v závislosti na proudu

	S_i (tepelný) ($A^2 Hz^{-1}$)	k_1 (-)	k_2 (-)	k_3 (-)
G1-1	$1,51 \cdot 10^{-21}$	2,4	1,3	3,2
G1-4	$2,16 \cdot 10^{-23}$	2,6	0,7	-
G1-5	$5,78 \cdot 10^{-22}$	2,6	1,0	-

Nejnižší hodnoty spektrální výkonové hustoty šumového proudu v grafech odpovídají tepelnému šumu. Měření probíhalo za konstantní teploty prostředí, proto je tepelný šum vzorků určen především statickým odporem fotovoltaického článku. Vzorky G1-1 a G1-5 se svými hodnotami k sobě velmi blíží. Mají ovšem vyšší tepelný šum než vzorek G1-4.

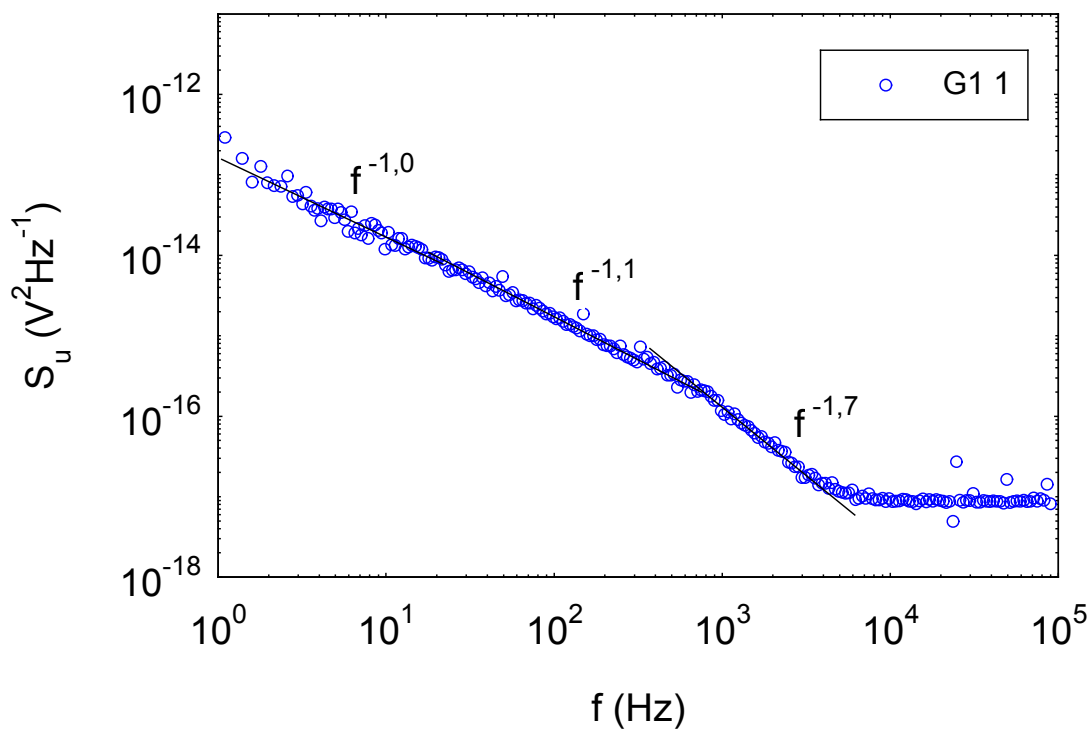
Směrnice k_2 nám představuje oblast výstřelového šumu [1]. Nejnižší hodnotu 0,7 vykazuje článek G1-4.

5.5 S_u v závislosti na frekvenci

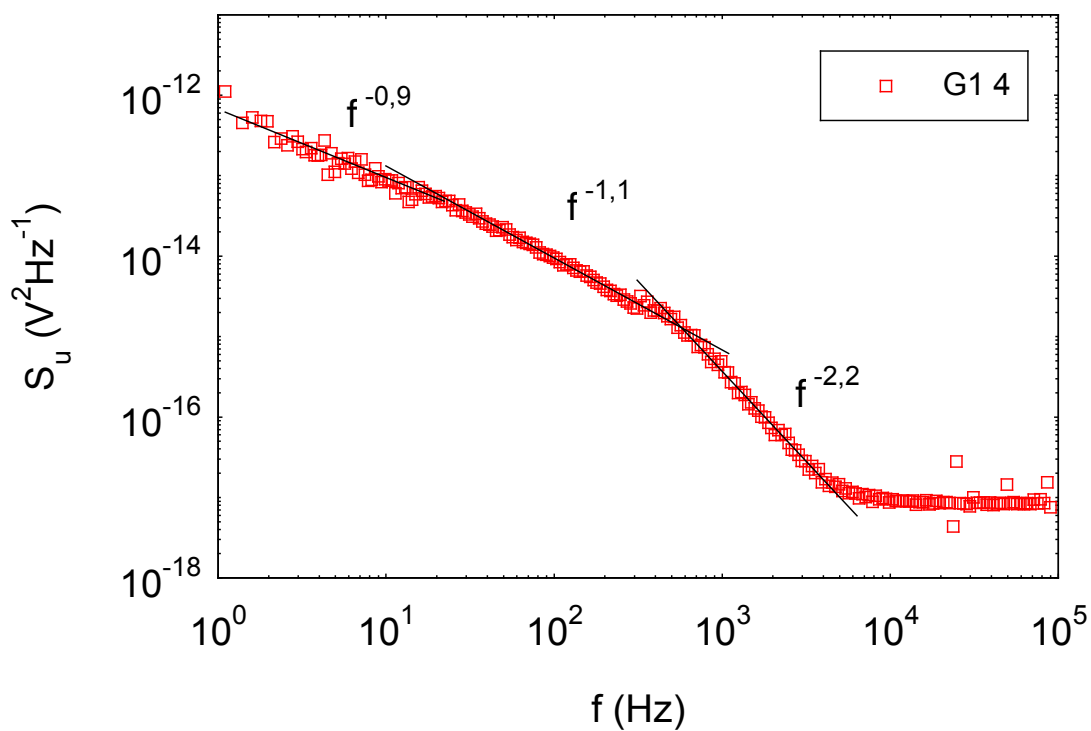
Měření proběhla 16.2.2009 (vzorek G1-1) a 17.2.2009 (vzorek G1-4 a G1-5).

Výchozí podmínky:

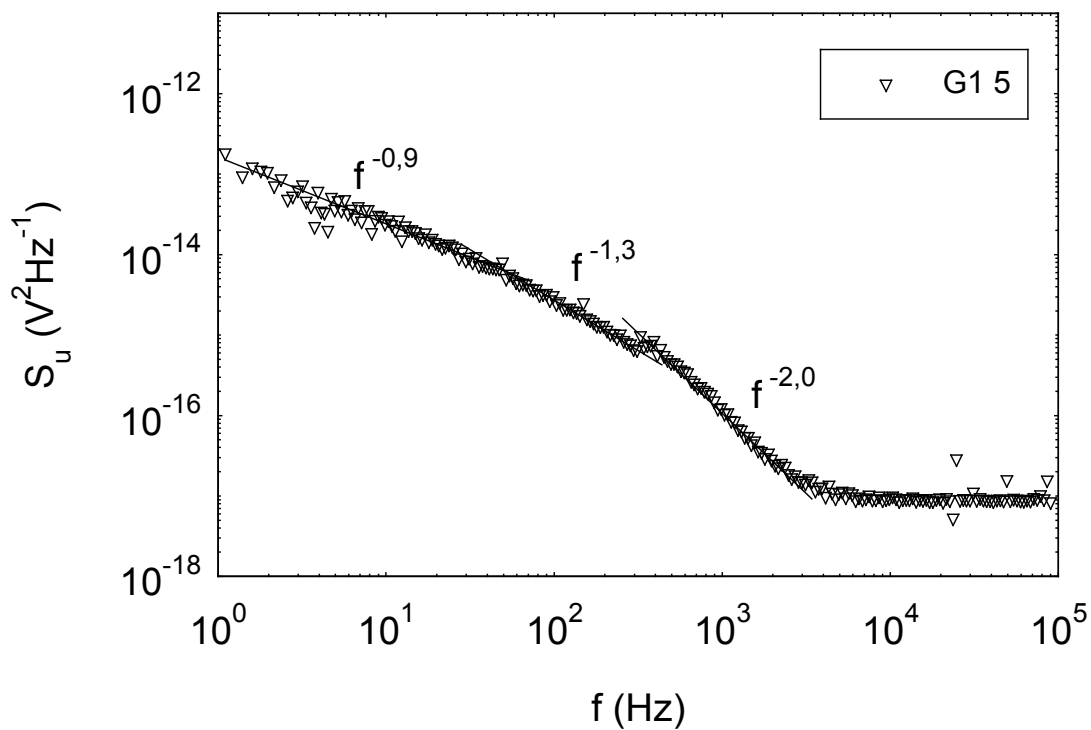
- $T = 300 \text{ K}$
- $R_L = 1 \text{ k}\Omega$



Graf 5.11: Spektrální výkonová hustota šumového napětí na fotovoltaickém článku G1-1 při napětí $U_F = 0,3 \text{ V}$ v závislosti na frekvenci



Graf 5.12: Spektrální výkonová hustota šumového napětí na fotovoltaickém článku G1-4 při napětí $U_F = 0,3$ V v závislosti na frekvenci



Graf 5.13: Spektrální výkonová hustota šumového napětí na fotovoltaickém článku G1-5 při napětí $U_F = 0,2$ V v závislosti na frekvenci

Oblast šumu $f^{-\alpha}$, která má závislost f^{-2} , představuje oblast generačně-rekombinačního šumu.

Tabulka 5.7: Spektrální výkonové hustoty šumového napětí při referenčních frekvencích

	f (Hz)	S_u (V^2Hz^{-1})	f (Hz)	S_u (V^2Hz^{-1})
G1-1	50	$3,79 \cdot 10^{-15}$	1000	$1,13 \cdot 10^{-16}$
G1-4	50	$2,24 \cdot 10^{-14}$	1000	$4,46 \cdot 10^{-16}$
G1-5	50	$6,95 \cdot 10^{-15}$	1000	$1,18 \cdot 10^{-16}$

Vzorek G1-4 vykazuje nejvyšší spektrální výkonovou hustotu šumového napětí jak pro složky s nízkou frekvencí, tak pro vyšší referenční frekvenci. Můžeme předpokládat, že provedení článku je méně kvalitní než u zbylých vzorků, obsahuje např. více nečistot či dislokací. Přestože tento vzorek má nejlepší předpoklady dosahovat nejvyššího výkonu – má nejnižší tepelný šum, nejlepší provedení kontaktů – tak zřejmě svojí vnitřní strukturou představuje článek méně spolehlivé provedení.

Závěr

V práci jsme zkoumali tři vzorky G1-1, G1-4 a G1-5 od výrobce solárních článků Solartec s.r.o. Použili jsme metody měření VA charakteristiky za tmy, dále měření spektrální výkonové hustoty šumového napětí ve frekvenční a napěťové závislosti. Dopočetali jsme spektrální výkonovou hustotu šumového proudu v závislosti na proudu.

Nejnižší vliv kontaktů byl zjištěn u vzorku G1-4. Úroveň kvality zkoumaných kontaktů článků jsme zjistili z metody měření VA charakteristiky v $\log U - \log I$ měřítku a z metody měření spektrální výkonové hustoty šumového napětí v napěťové závislosti při vyšší referenční hodnotě napětí.

Z hlediska spolehlivosti fotovoltaického článku je vhodná metoda měření spektrální výkonové hustoty šumového napětí ve frekvenční závislosti. Vyšší hodnoty, tedy i nižší kvality, dosáhl vzorek G1-4.

Měření spektrální výkonové hustoty šumového napětí považujeme za vhodnou nedestruktivní metodu pro posuzování kvality vyrobených fotovoltaických článků.

Seznam použité literatury a dalších pramenů

- [1] CHOBOLA, Z. *Noise as a tool for non-destructive testing of single-crystal silicon solar cells*. Microelectronics Reliability 41 (2001) 1947-1952.
- [2] KOKTAVÝ, P. *Nedestruktivní diagnostika a fyzika dielektrik*. Skriptum FEKT VUT v Brně. Brno : 2006, 102 stran.
- [3] POLSTEROVÁ, H. *Základy spolehlivosti elektrotechnických výrob*. Skriptum FEKT VUT v Brně. Brno : 2006, 127 stran.
- [4] JIANSHENG, X. *1/f, $g \pm r$ and burst noise used as a screening threshold for reliability estimation of optoelectronic coupled devices*. Microelectronics Reliability 40 (2000) 171-178.
- [5] KOLHATKAR, J.S. et al. *Separation of Random Telegraph Signals from 1/f Noise in MOSFETs under Constant and Switched Bias Conditions*. Dostupné na WWW: <<http://www.imec.be/esscirc/essderc-esscirc-2003/papers/all/446.pdf>> ze dne 5.10.08.
- [6] MANCINI, R. *Op Amps For Everyone*. Dostupné na WWW: <<http://focus.ti.com/lit/an/slod006b/slod006b.pdf>> ze dne 10.9.08.
- [7] KAFKA, O. *Analýza kontaktů solárních článků pomocí šumové diagnostiky*. Diplomová práce. FEKT VUT v Brně. Brno : 2004, 57 stran.
- [8] KLEINPENNING, T. G. M. *Physica B*98. 1980, p. 289.
- [9] *Shot Noise*. Dostupné na WWW: <<http://cs.utd.edu/~hellums/docs/EE7331/Fall2004/ShotNoise.pdf>> ze dne 12.5.08.
- [10] VANĚK, J., KŘIVÍK, P., NOVÁK, V. *Alternativní zdroje energie*. Skriptum FEKT VUT v Brně. Brno : 2006, 158 stran.
- [11] JONG, M. *Sub-Poissonian shot noise*. Dostupné na WWW: <<http://www.lorentz.leidenuniv.nl/beenakkr/mesoscopics/topics/noise/noise.html>> ze dne 12.5.08.
- [12] BLACHOWICZ, T. *1/f noise near the free surface of a semiconductor*. Dostupné na WWW: <<http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/0803/0803.4287.pdf>> ze dne 12.5.08.
- [13] PowerWiki: *Spolehlivost v elektroenergetice*. Dostupné na WWW: <<http://www.powerwiki.cz/attach/X15ZSE/Kap01.pdf>> ze dne 12.5.08.

- [14] FRANK, H., ŠNEJDAR, V. *Principy a vlastnosti polovodičových součástek*. Vyd. 1. Praha : SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1976. 487 s.
- [15] VOVES, J. *Fyzika polovodičových součástek*. Skripta ČVUT, Praha : 1997.
- [16] JEVTIČ, M. M. *Noise as a diagnostic and prediction tool in reliability physics*. Microelectronics Reliability 35 3 (1995) pp.455-477.

Přehled fyzikálních veličin

značka	veličina	jednotka	hodnoty
$\xi(t)$	realizace stochastického procesu		
t	čas	s	
f	frekvence	Hz	
U_{th}	tepelné šumové napětí	V	
I_{th}	tepelný šumový proud	A	
R	elektrický odpor	Ω	
G	elektrická vodivost	S	
B	šířka pásma	Hz	
T	termodynamická teplota	K	
k	Boltzmannova konstanta	JK^{-1}	$1,38 \cdot 10^{-23}$
S_u	spektrální výkonová hustota šumového napětí	V^2Hz^{-1}	
S_i	spektrální výkonová hustota šumového proudu	A^2Hz^{-1}	
h	Planckova konstanta	Js	$6,626 \cdot 10^{-34}$
τ_k	šumová časová konstanta	s	
ω	úhlová rychlost	s^{-1}	
v	driftová rychlost	ms^{-1}	
γ	konstanta úměrnosti $1/f$ šumu	-	$1,0 \pm 0,1$
A	míra počtu procesů g-r šumu	-	
n	konstanta úměrnosti I pro $1/f$ šum	-	≈ 2
α	konstanta úměrnosti f pro $1/f$ šum	-	≈ 1
W	šířka báze	m	
M	součinitel násobení	-	

značka	veličina	jednotka	hodnoty
ΔE_g	šířka zakázaného pásu	eV	cca 1,1 pro Si
E_F	Fermiho hladina	eV	
E_D	donorová hladina	eV	
E_A	akceptorová hladina	eV	
E_t	energie hluboké hladiny	eV	
n	koncentrace elektronů	m^{-3}	
n_i	intrinsická koncentrace	m^{-3}	
p	koncentrace děr	m^{-3}	
G	intenzita generace	$m^{-3}s^{-1}$	
R	intenzita rekombinace	$m^{-3}s^{-1}$	
N_t	koncentrace rekombinačních center	m^{-3}	
C_n	konstanta úměrnosti pro elektrony	$m^3.s^{-1}$	
C_p	konstanta úměrnosti pro díry	$m^3.s^{-1}$	
τ	relaxační doba	s	
U	napětí	V	
U_D	difúzní napětí	V	cca 0,6 pro Si
U_P	fotovoltaické napětí	V	
U_{OC}	napětí na prázdno	V	
U_m	napětí při maximálním výkonu	V	
U_T	teplotní napětí	V	
α	součinitel pro teplotní závislost šířky zakázaného pásu	$eV.K^{-1}$	$7,021.10^{-4}$
I	proud	A	
I_0	saturační proud	A	
I_R	střední hodnota proudu přechodem v závěrném směru	A	

značka	veličina	jednotka	hodnoty
I_D	proud fotovoltaiického článku za tmy	A	
I_L	proud fotovoltaiického článku způsobený dopadajícím zářením	A	
I_{SC}	proud nakrátko	A	
I_m	proud při maximálním výkonu	A	
I_F	proud v propustném směru	A	
A	faktor kvality PN přechodu	-	
γ	zahrnuje teplotní závislost ostatních parametrů I_0	-	cca 3
j	proudová hustota	$A m^{-2}$	
e	elementární náboj	C	$1,602 \cdot 10^{-19}$
FF	faktor plnění (fill factor)	-	cca 0,75
P	výkon	W	
P_m	maximální výkon	W_p	
E_{EF}	účinnost fotovoltaiického článku	%	cca 15
T_C	teplotní koeficient	$\%/^{\circ}C$	
λ	vlnová délka	m	
R_{so}	sériový odpor	Ω	
R_{sh}	paralelní odpor	Ω	
R_s	statický odpor	Ω	
R_d	dynamický odpor	Ω	
R_L	odpor zátěže	Ω	
β	parametr dynamického odporu	V^{-1}	
p_A	atmosférický tlak	Pa	
φ	relativní vlhkost vzduchu	%	