

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV TELEKOMUNACÍ

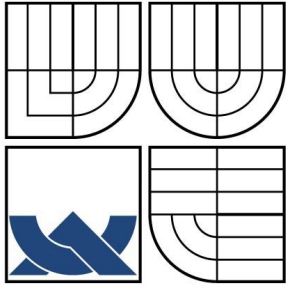
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATION

VYUŽITÍ ZÁŘENÍ EMITOVANÉHO Z LOKÁLNÍCH OBLASTÍ PN PŘECHODU PRO DIAGNOSTIKU SOLÁRNÍCH ČLÁNKŮ

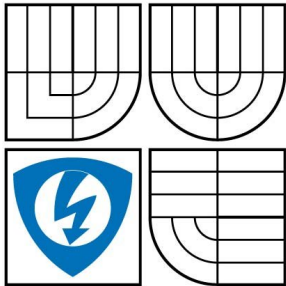
DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE BC. ONDŘEJ KRČÁL
AUTHOR

BRNO 2008



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKACNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND
COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

VYUŽITÍ ZÁŘENÍ EMITOVANÉHO Z LOKÁLNÍCH OBLASTÍ PN PŘECHODU PRO DIAGNOSTIKU SOLÁRNÍCH ČLÁNKŮ

APPLICATION OF RADIATION EMITTED FROM LOCAL AREAS OF PN JUNCTION
FOR SOLAR CELL DIAGNOSTICS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

BC. ONDŘEJ KRČÁL

ING. ROBERT MACKŮ

POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Bc. Ondřej Krčál

Bytem: Masarykova 225, Nové Město na Moravě, 59231

Narozen/a (datum a místo): 20.5.1984, Nové Město na Moravě

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

se sídlem Údolní 244/53, 602 00, Brno

jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:

.....

(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 1

Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- disertační práce
 - diplomová práce
 - bakalářská práce
 - jiná práce, jejíž druh je specifikován jako
- (dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Využití záření emitovaného z lokálních oblastí PN přechodu pro diagnostiku solárních článků

Vedoucí/ školitel VŠKP: Ing. Robert Macků

Ústav: Ústav telekomunikací

Datum obhajoby VŠKP:

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v*:

- tištěné formě – počet exemplářů 2
- elektronické formě – počet exemplářů 2

* hodící se zaškrtněte

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
 - ihned po uzavření této smlouvy
 - 1 rok po uzavření této smlouvy
 - 3 roky po uzavření této smlouvy
 - 5 let po uzavření této smlouvy
 - 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne:

.....
Nabyvatel

.....
Autor

ABSTRAKT

Je-li PN přechod závěrně polarizován a oblast přechodu obsahuje lokální defekty, může v těchto oblastech dojít ke vzniku lokálních lavinových průrazů. Ty se objevují obvykle při dostatečně velkých závěrných napětích, ale nižších, než je napětí nutné pro lavinový výboj v celé nedefektní oblasti přechodu. Tyto výboje jsou často doprovázeny emisí záření, které nese informaci o procesech probíhajících v dané oblasti. Cílem práce je rozebrat a navrhnout metodické možnosti pro využití záření pro diagnostiku solárních článků, zjistit základní vlastnosti emitovaného záření, jako jsou vlnová délka, závislost na závěrném napětí, důvod vzniku emise a diskutovat možnosti použití metody měření emise pro nedestruktivní diagnostiku kvality solárních článků.

KLÍČOVÁ SLOVA

Solární článek, PN přechod, lavinový průraz, emise záření

ABSTRACT

The microplasma discharges in the PN junction local defect micro-regions are as a rule, accompanied by the emission of light. This radiation from solar cell PN junctions was measured by means of a optical fibre connected to the optical input of a photomultiplier. By inching the fibre by means of computercontrolled X-Y plotter above the cell surface a 2-D image of the irradiation local regions has been created. It is seen that a cell of a superficial area of 100 square cm contains a large number of defects, which depends on applied reverse voltage. This method can be a convenient tool for study and diagnostics of optoelectronic devices. The main thesis goal is to uncover the radiation features as spectrum and voltage dependency. The occasion of emition generation will be determined.

KEYWORDS

solar cell, PN junction, avalanche breakdown, light emition

KRČÁL, O. *Využití záření emitovaného z lokálních oblastí PN přechodu pro diagnostiku solárních článků*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2008. 90 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Robert Macků.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci na téma využití záření emitovaného z lokálních oblastí PN přechodu pro diagnostiku solárních článků jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedeného semestrálního projektu dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením tohoto projektu 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

.....
podpis autora

Obsah

1 Úvod.....	13
2 Solární článek.....	14
2.1 Historie solárních článků.....	14
2.2 Funkce solárních článků.....	14
2.3 Současný stav.....	17
2.3.1 Rozdělení solárních článků podle generace.....	17
2.3.2 Výrobní postup.....	19
2.3.3 Výroba monokrystalického křemíku.....	20
2.3.4 Struktura povrchu solárního článku.....	20
2.4 Měřitelné vlastnosti solárních článků.....	21
2.4.1 Chování šumu mikroplazmatu v závislosti na čase.....	22
2.4.2 VA charakteristika PN přechodu s defektními oblastmi v závěrném směru.....	23
2.4.3 Střední hodnota úzkopásmového šumu.....	23
2.4.4 Výkonová spektrální hustota.....	24
2.4.5 Model PN přechodu s oblastmi mikroplazmatu v závěrném stavu.....	25
3 Metoda měření emitovaného záření.....	27
3.1 Možnosti realizace.....	27
3.1.1 Fotorezistor.....	27
3.1.2 Fotodioda.....	28
3.1.3 Fototranzistor.....	29
3.1.4 CCD kamera.....	29
3.1.5 Řádkový CCD snímač.....	30
3.1.6 CCD kamera s chlazeným čipem.....	30
3.1.7 Fotonásobič.....	30
3.2 Měřicí pracoviště s využitím fotonásobiče.....	33
3.2.1 Optické vlákno.....	36
Vlastnosti optických vláken.....	36
Jednovidová vlákna.....	38
Mnohavidová vlákna.....	39
Křemíková vlákna.....	39
Polymerové vlákna.....	41
Polymerové vlákno modulárního simulačního systému Optel.....	42
3.2.2 Logaritmický zesilovač.....	45
Integrovaný obvod AD8307A.....	46
Logaritmický zesilovač.....	47
Operační zesilovač LT1077.....	48
3.2.3 Měřicí karta.....	49
3.2.4 Snížení vlivu vlastního šumu fotonásobiče a zvýšení citlivosti.....	50
Chlazení trubice fotonásobiče.....	57
3.2.5 Měřicí program.....	60
Paměťová struktura naměřených dat.....	61
Paměťová struktura nastavení měření.....	64
Měřicí vlákno.....	65

Datový soubor.....	70
Soubor s nastavením.....	71
Funkce pro manipulaci se soubory.....	72
Uživatelské rozhraní.....	74
Zobrazovací část.....	80
4 Výsledky měření.....	85
4.1 Emise ze vzorků solárních článků.....	85
4.2 Počet emitujících bodů v závislosti na velikosti závěrného napětí.....	86
4.3 Spektrum signálu na výstupu fotonásobiče.....	90
4.4 Spektrum záření z lokálních oblastí.....	91
4.5 Jev způsobující vznik emise z lokálních oblastí.....	101
5 Závěr.....	108
6 Použitá literatura.....	110
7 Seznam příloh.....	112

Seznam ilustrací

Obr. 1. Fotovoltaický panel [10].....	13
Obr. 2. Základní struktura solárního článku [11].....	15
Obr. 3. VA charakteristika solárního článku [15].....	15
Obr. 4. Energetický pásový model PN přechodu.....	16
Obr. 5: Spektrum vlnových délek světla dopadajícího na zemský povrch[19].....	16
Obr. 6. První generace solárních článků [12].....	17
Obr. 7. Druhá generace solárních článků [13].....	18
Obr. 8. Nové trendy ve vývoji solárních článků [14].....	18
Obr. 9: Struktura povrchu solárního článku.....	20
Obr. 10: Měřením ověřená struktura části povrchu solárního článku.....	21
Obr. 11. Víceúrovňový šum mikroplazmatu při konstantním napájecím napětí.....	22
Obr. 12. Proudový šum mikroplazmatu při konstantním zdroji proudu.....	22
Obr. 13. VA charakteristika PN přechodu [2].....	23
Obr. 14. Střední hodnota úzkopásmového šumu pro vzorky K1 a K2.....	24
Obr. 15. Výkonová spektrální hustota, A(K1, napětí 14,34V), B(K3, napětí 14,97).....	24
Obr. 16. Proložení VA charakteristiky přímkami.....	25
Obr. 17. VA charakteristiky izolovaných mikropl. pro určení náhradního modelu PN přechodu.....	25
Obr. 18. Náhradní model PN přechodu.....	26
Obr. 19. Fotorezistor [16].....	27
Obr. 20. Obecná VA charakteristika fotorezistoru [16].....	28
Obr. 21. Obecná závislost odporu R fotorezistoru na osvětlení E [16].....	28
Obr. 22. VA charakteristiky fotodiody [18].....	28
Obr. 23. VA charakteristiky fototranzistoru [18].....	29
Obr. 24. CCD kamera [24].....	30
Obr. 25. Princip fotonásobiče.....	31
Obr. 26. Citlivost fotonásobiče vs. vlnová délka.....	33
Obr. 27: Uspořádání měřicího pracoviště.....	34
Obr. 28: Měření numerické apertury[22].....	37
Obr. 29: Příklad vyzářovací charakteristiky vlákna.....	38
Obr. 30: Útlumová charakteristika křemíkového vlákna[22].....	39
Obr. 31: Závislost útlumu polymerových vláken na vlnové délce [22].....	41
Obr. 32: Stanovení měrného útlumu vlákna z výstupních intenzit záření - délka vlákna 1m (modrý průběh), 50m (červený).....	42
Obr. 33. Tloušťka vlákna vs. skutečná tloušťka.....	43
Obr. 34: Přenosová charakteristika vlákna Optel.....	44
Obr. 35: Naměřená numerická apertura.....	44
Obr. 36: Logaritmický zesilovač.....	45
Obr. 37: Převodní charakteristika kaskádového logaritmického zesilovače.....	46
Obr. 38: Schéma logaritmického zesilovače.....	47
Obr. 39. Měřicí karta PCI-6221.....	49
Obr. 40: Časový průběh vlastního šumu měřicí cesty (teplota okolí trubice 26° C).....	51
Obr. 41: Časový průběh vlastního šumu měřicí cesty (teplota okolí trubice -4,5° C).....	53
Obr. 42: Časový průběh vlastního šumu měřicí cesty (teplota okolí trubice -24° C).....	53
Obr. 43: Spektrum signálu při teplotě 26° C.....	56

Obr. 44: Spektrum signálu při teplotě $-4,5^{\circ}\text{C}$	57
Obr. 45: Termobox pro chlazení.....	58
Obr. 46: Odpojení teplotního regulátoru.....	59
Obr. 47: Struktura měřicího programu.....	60
Obr. 48: Paměťová struktura naměřených dat.....	64
Obr. 49: Vývojový diagram měřicího vlákna.....	68
Obr. 50. Pohyb vlákna nad povrchem.....	70
Obr.51: Vývojový diagram funkcí pro práci se soubory.....	73
Obr. 52: Uživatelské rozhraní programu - inicializace.....	77
Obr. 53: Uživatelské rozhraní programu - měření.....	78
Obr. 54: Sada nastavení měření.....	79
Obr. 55: Sada naměřených dat.....	79
Obr. 56: Menu programu.....	79
Obr.57: Zobrazovací část.....	80
Obr.58: Ohraničení měřené plochy.....	84
Obr. 59: Použití funkce prahování – velký počet bodů.....	85
Obr. 60. Emise ze vzorku Z1 při 6 V.....	88
Obr. 61. Emise ze vzorku Z1 při 9 V.....	88
Obr. 62. Emise ze vzorku Z1 při 12 V.....	89
Obr. 63: Elektrický model zářícího bodu.....	89
Obr. 64: Spektrum výstupu fotonásobiče, oblast bez emise (teplota fotonásobiče -26°C).....	90
Obr. 65: Spektrum výstupu fotonásobiče – oblast emise (teplota fotonásobiče -26°C).....	91
Obr. 66: Přenosové charakteristiky optických filtrů.....	96
Obr. 67: Spektrum záření z lokálních oblastí.....	101
Obr. 68: Závislost efektivní hodnoty šumového proudu na závěrném napětí.....	102
Obr. 69: vzorek 33-3 pro 5,833 V.....	103
Obr. 70: Vzorek 33-3 pro 6,791 V.....	103
Obr. 71: Vzorek 33-3 pro 7,764 V.....	104
Obr. 72: Vzorek 33-3 pro 11,641 V.....	104
Obr. 73: Vzorek 33-3 pro 16,464 V.....	105
Obr. 74: Vzorek 33-3 pro 19,294 V.....	105
Obr. 75: Vzorek 33-3 pro 20,23 V.....	106
Obr. 76: Vzorek 33-3 pro 21,14 V.....	106
Obr. 77: Vzorek 33-3 pro 22,04 V.....	107
Obr. 78: Vzorek 33-3 pro 22,96 V.....	107

Seznam tabulek

Tabulka 1: Pásma vlnových délek jednovidových optických vláken.....	40
Tabulka 2: Parametry obvodu AD8307A.....	46
Tabulka 3: Charakteristické parametry LT1077.....	48
Tabulka 4: Parametry použitého peltierova článku.....	59
Tabulka 5: Názvy optických filtrů a středy propustných pásem.....	96

1 Úvod

V dnešní době je vyvíjeno nemalé úsilí pro nalezení vhodného alternativního zdroje energie pro nahrazení dosavadních neobnovitelných (tzv. klasických) zdrojů energie. Jedna z možných variant je využití sluneční energie, která dopadá na zemský povrch. Tuto variantu lze dále dělit na přímou přeměnu sluneční energie na tepelnou energii, nebo na přeměnu na elektrickou energii v tzv. solárních/fotovoltaických článcích.

Solární články stejně jako mnoho jiných elektrických součástek využívajících ke své činnosti PN přechod vykazují výskyt lokálních defektů. Tyto defekty se mohou projevit při závěrně polarizovaném přechodu. V normálním režimu nemá článek závěrně polarizovaný přechod. Je však běžné, že se články zapojují nejen do série (zvýšení celkového výsledného napětí), ale i do sérioparalelního zapojení (zvýšení celkového výsledného proudu i maximálního napětí). Při jakémkoliv poruše nebo omezení intenzity dopadajícího záření na konkrétní článek se tento článek dostane do své závěrné části charakteristiky. Pokud se vyskytnou u daného článku lokální defekty, jedná se nejčastěji o výbojové průrazy. Proud výboji vede k poškozování struktury PN přechodu a v poslední fázi dojde k jeho úplnému zničení. Je tedy vhodné tyto lokální defekty zmapovat, určit jejich chování, charakteristické vlastnosti a v poslední řadě i důvod jejich vzniku, pro návaznost na výrobní proces, kde lze využít získané informace pro omezení počtu lokálních defektů.



Obr. 1. Fotovoltaický panel [10]

V mnoha případech jsou výboje doprovázeny emisí záření, které nese informace o procesech probíhajících v dané oblasti. Cílem práce je ukázat možnosti jakými lze toto záření změřit a zaznamenat pro pozdější zpracování. Bude zkoumán princip vzniku lokálního záření z oblasti PN přechodu solárního článku při závěrně polarizovaném směru. Budou popsány různé možnosti při měření a zaznamenávání s možností dalšího zpracování. Bude navržena bloková struktura zařízení umožňující sledování velké plochy přechodu solárního článku.

2 Solární článek

Solární/fotovoltaický článek je zařízení pro konverzi světelné energie na elektrickou energii. Tato konverze je založena na principu vnitřního fotoefektu, který bude popsán v kapitole 2.1. Solární články mají mnoho možností použití. Již dlouho se používají v místech, kde není v dosahu elektrická rozvodná síť, při nedostatku elektrické energie, v satelitech, vesmírných sondách, ale i v zařízeních běžného používání, jako jsou například kalkulačky náramkové hodinky apod.

V poslední době nachází solární články uplatnění také při výrobě elektrické energie, zatím spíše jako doplňkový zdroj v podobě solárních modulů (fotovoltaických polí, panelů), dodávajících energii do rozvodné sítě pomocí měničů.

2.1 Historie solárních článků

První sluneční článek založený na monokrystalickém křemíku byl připraven v roce 1953 v Bellových laboratořích. D. Chapin byl pověřen úkolem vyřešit problém s bateriemi, které v telefonních systémech v horkém a vlhkém podnebí až příliš často selhávaly. Zkoušel mimo jiné i tehdy dostupné selénové sluneční články, které ale měly mizivou účinnost 0,5%. Jeho kolegové Fuller a Pearson experimentovali s křemíkovými diodami a všimli si i jejich chování při osvětlení. V roce 1953 použili arsenem dotovanou tenkou destičku křemíku o ploše asi 2 cm², ve které vytvořili bórem PN přechod a první křemíkový sluneční článek s účinností 6% byl na světě. O vánocích 1953 autoři popsali objev v krátkém článku pro Journal of Applied Physics. Bellovy laboratoře pak ohlásili objev na tiskové konferenci, kde byl předveden první solární panel napájející rádio. Tisk označil objev za revoluci ve využití sluneční energie a začátek solární civilizace[5].

Další vývoj byl pozvolný. První praktické pokusy se odehrály ve městě Americus v Georgii, kde solární panely měly nahradit chemické baterie telefonického vedení, ovšem brzy se od nich upustilo. Výzkumný tým ve složení Chapin, Fuller a Pearson opustili tento směr a věnovali se výzkumu polovodičů pro výkonové tranzistory. Obnovení přišlo v době vypuštění Sputniku I Sovětským svazem v roce 1957. Další podstatný rozvoj solární energetiky byl zaznamenán ve spojení s ropným šokem v 70. letech 20. století. Sluneční články prošly intenzivním výzkumem a vývojem a jejich účinnost se zvyšovala. V roce 1991 byl vyroben článek s účinností 24,7%, přičemž jeho princip je stále stejný jako v Bellovském článku z roku 1953.

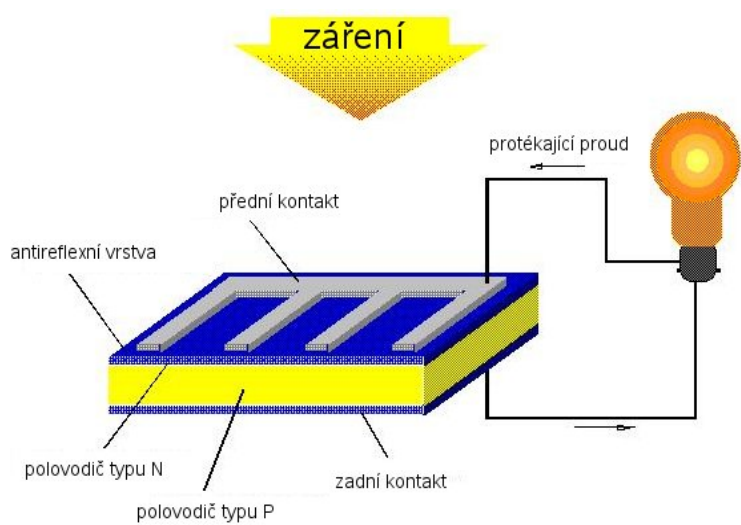
2.2 Funkce solárních článků

Běžně používané solární články jsou velkoplošné polovodičové diody, jak je znázorněno na obr. 2. Po přiložení napětí mezi horní a spodní elektrodu, poteče článkem proud o velikosti dané Shockleyho diodovou rovnicí (1)[7],

$$I = I_0 \cdot \left[e^{\frac{eV}{k_b T}} - 1 \right], \quad (1)$$

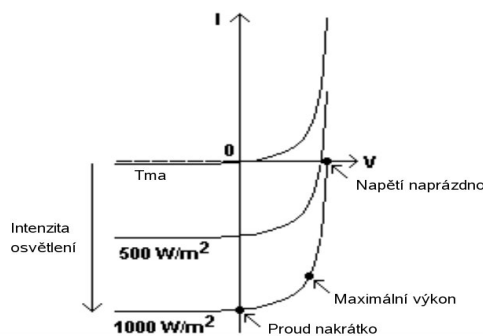
kde I_0 je saturační proud diodou, e je elementární náboj, U je napětí mezi kontakty, k_b je Boltzmanova konstanta a T je teplota. Voltampérová charakteristika je uvedena na obr. 3. Pro nulovou intenzitu osvětlení odpovídá průběh běžnému PN přechodu. Při osvětlení článku se k proudu I přidává další složka – fotogenerovaný proud I_L , který posouvá voltampérovou charakteristiku do záporné části proudové osy. Proud generovaný dopadajícím zářením tedy působí proti směru proudu protékajícího v propustném směru.

Ve čtvrtém kvadrantu voltampérové charakteristiky tedy článek dodává výkon do obvodu.



Obr. 2. Základní struktura solárního článku [11]

Vnitřní děje jsou popsány na pásovém modelu PN přechodu, uvedeného na obr. 4. Ve slunečním svitu jsou fotony o různých vlnových délkách, fotovoltaické přeměny se účastní pouze ty z nich, které mají energii větší než je šířka zakázaného pásu polovodiče (1,14 eV pro křemík). Fotony, které splňují tuto podmínku, excitují elektrony z valenčního do vodivostního pásu. Vzniklý elektron relaxuje na dno vodivostního pásu a díra po elektronu na vrchol valenčního pásu a zároveň se rozdíl mezi energií dopadeného fotonu a zakázaného pásu polovodiče bez užitku mění na teplo.

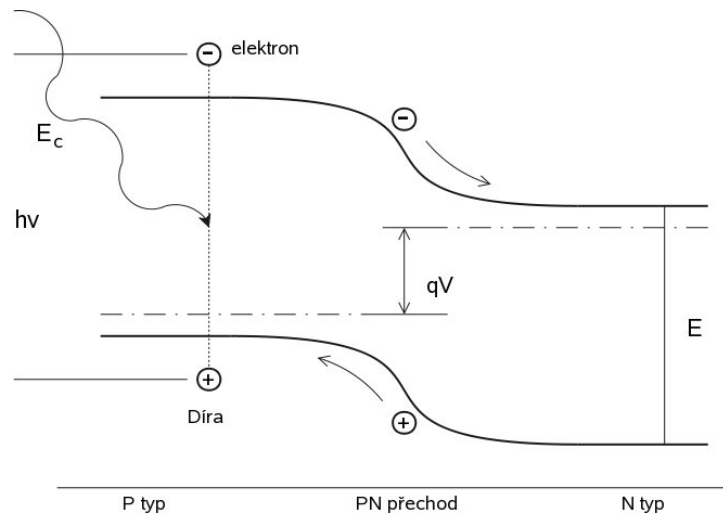


Obr. 3. VA charakteristika solárního článku [15]

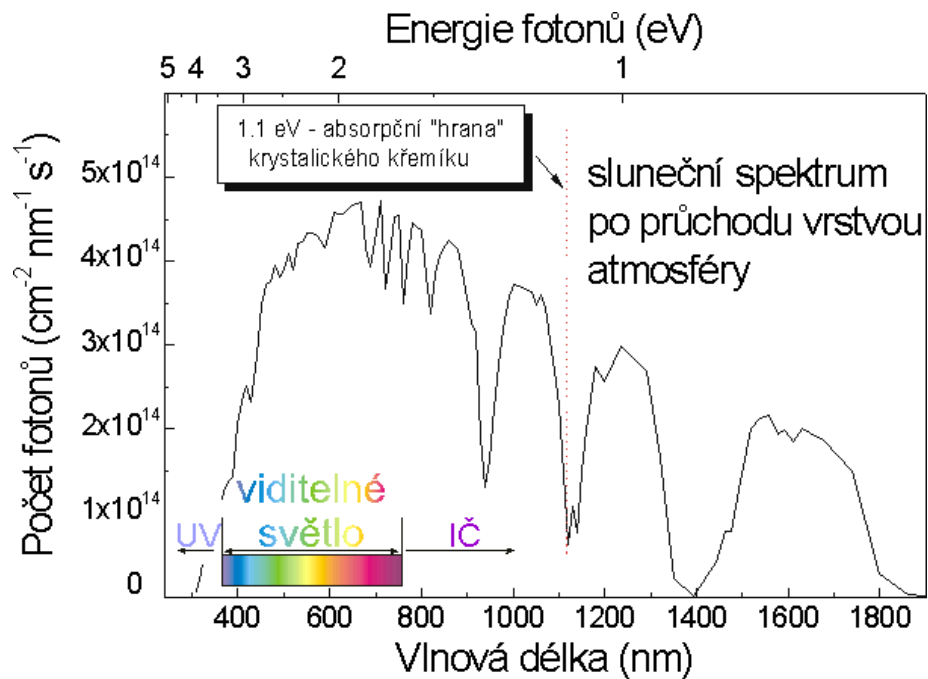
Potenciálová bariéra separuje elektrony a díry, ty pak po průchodu vnějším obvodem rekombinují zpět a konají zde užitečnou práci. Účinnost fotovoltaické přeměny nemůže být pro křemík větší než asi 27%. Hlavní důvody jsou následující:

- část fotonů má menší energii než šířka zakázaného pásu, jejich energie není uvolněna a nepodílejí se tedy na excitaci elektronů a děr,

- fotony, které se podílejí na excitaci elektronů a děr, mají energii vyšší, než je šířka zakázaného pásu polovodiče. Tento rozdíl energií je přebytečná energie, dochází k přeměně na teplo.



Obr. 4. Energetický pásový model PN přechodu



Obr. 5: Spektrum vlnových délek světla dopadajícího na zemský povrch[19]

2.3 Současný stav

2.3.1 Rozdělení solárních článků podle generace

Rozdělení do generací bylo provedeno podle [5], jiná literatura může uvádět podrobnější nebo jiné rozdělení, protože v současné době neexistuje sjednocené dělení do skupin. Jedná se pouze o nastínění rozdílů mezi základními typy solárních článků.

➤ První generace

První generace fotovoltaických článků, viz. obr. 6 se skládá z velkoplošných PN přechodů, které jsou schopné přeměnit široké spektrum záření o vlnových délkách podobných slunečnímu záření na elektrickou energii. Tyto články jsou typicky vyráběny z křemíkové podložky, na níž jsou difuzně postupně nanášeny potřebné vrstvy. Tato generace má nejvyšší podíl na zastoupení komerční produkce, je to více než 86% z celosvětového prodeje.

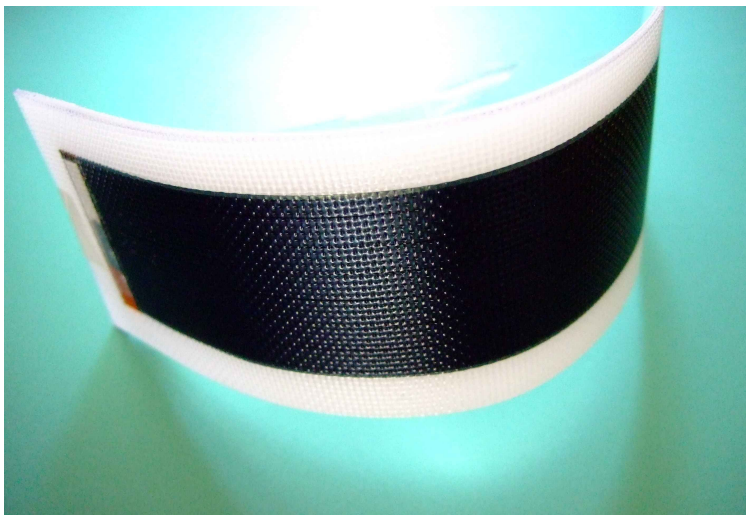


Obr. 6. První generace solárních článků [12]

➤ Druhá generace

Tato generace fotovoltaických článků používá tenkou vrstvu křemíkových depozit. Tento materiál byl zpočátku konstruován pro vysokou účinnost vícenásobného spojení článků vrstvením PN přechodů. Později byly zaznamenány výhody tenkovrstvého filmu při redukci hmotnosti použitého materiálu, to znamená i úsporu materiálu i energie pro výrobu. Nyní je zkoumáno hned několik technologií a polovodičových materiálů pro hromadnou výrobu, např. amorfni křemík, polykrystalický křemík, mikrokrystalický křemík, Cd-Te, Cu-In, sulfid selenu.

Účinnost takovýchto článků je typicky nižší v porovnání s první generací, založené na bázi tlusté křemíkové podložky, na druhou stranu mají nižší cenu vztahenou na jednotku wattu. Další výhodou snížení hmotnosti je fakt, že tyto články nepotřebují takovou mechanickou podporu při montáži na střechy domů, lze je také přizpůsobit tvaru podložky, dokonce i připevnit na flexibilní materiály, jako jsou textilie.



Obr. 7. Druhá generace solárních článků [13]

➤ Třetí generace

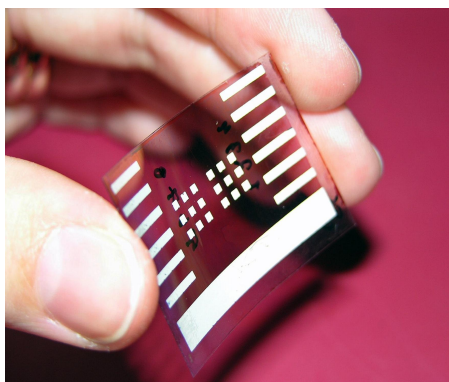
Třetí generace solárních článků je velice odlišná od předchozích a nespohlhá na tradiční PN přechod pro separaci generovaných nábojů. Tato skupina zahrnuje fotochemické články, polymerové a nanokrystalické solární články se strukturou odlišnou od předchozí skupiny.

➤ Čtvrtá generace

Čtvrtá generace spojuje dohromady složenou fotovoltaickou technologii s technologií polymerů s nanočásticemi pro vytvoření jednoduché multispektrální vrstvy. Tyto vrstvy mohou být naskládány na sebe pro vytvoření multispektrálního solárního článku s vyšší účinností a nižší cenou. Každá vrstva pohlcuje jiné spektrum záření, první ultrafialové, poslední infračervené. Záření, jež není pohlceno předchozí vrstvou je možné zachytit na další vrstvě a pohlcovat tak další zbylou složku spektra. Tak je zaručeno že maximální šířka spektra dopadajícího záření bude zachycena a většina energie záření bude využita.

Na poslední generaci článků pracuje mnoho společností jako Xsunux, Konarka Technologies, Inc., Nanosolar, Dyesol a Nonosys. Výzkum se v této chvíli blíží k použitelným závěrům.

Z důvodu majoritního zastoupení první generace solárních článků v celkovém počtu nyní používaných bude v dalším textu uvažována pouze tato skupina, jakož i v zaměření celé této práce.



Obr. 8. Nové trendy ve vývoji solárních článků [14]

2.3.2 Výrobní postup

Výroba solárních článků s použitím křemíkové podložky má několik samostatných fází. Některé jsou velmi náročné jak po stránce technologické, tak i z hlediska spotřeby energie: růst monokrystalu křemíku, řezání ingotu a další. Z hlediska spotřeby energie je ale ještě náročnější vlastní příprava zdrojového křemíku. Křemík je sice druhý nejvíce zastoupený prvek v zemské kůře, ale vyskytuje se výhradně jen vázaný a je ho tedy nejprve potřeba vyloučit z křemenného písku. Křemíku se vyrábí velké množství, v největší míře pro legování ocelí. Pro sluneční články je třeba ho zbavit příměsí. Výrobci slunečních článků se proto dlouho přizívovali na polovodičovém průmyslu, protože mnohé desky, které pro výrobu procesorů nebo pamětí nevyhovují, jsou stále ještě dostatečně dobré pro sluneční články. Nicméně před dvěma až třemi lety potřeba křemíku pro fotovoltaiku převýšila veškerý ostatní polovodičový průmysl a tak se obor ocitl ve stavu nouze o výrobní materiál [19].

Křemík je také hlavním „viníkem“ dlouhé doby energetické návratnosti, a proto se hledají cesty, jak omezit jeho spotřebu. nejde však jednoduše použít tenčí desky. Současné desky mají tloušťku přibližně 1/4mm a menší tloušťka již nestačí zabsorbovat všechno světlo, a navíc, desky se ve výrobě snáze lámou nebo se dokonce ohýbají.

Výrobní fáze pro články s vysokou účinností jsou následující:

1. Řízená krystalizace polykrystalického křemíku na monokrystalický - Czochralského metoda
2. Ořezání vzniklého ingotu
3. Dělení ingotu na desky o tloušťce 0.5 mm až 0.25 mm
4. Difúze donorové oblasti fosforem, bórem,...
5. Nanesení hliníkové vrstvy na povrch křemíkové podložky
6. Určení obrazce předního kontaktu pomocí fotolitografie
7. Následné leptání hliníkové vrstvy
8. Aplikování antireflexního nátěru
9. Nanesení hliníkové vrstvy pro zadní kontakt
10. Žihání, zcelí všechny vrstvy v jednu kompaktní
11. Ořezání přebytečných okrajů
12. Testování a ověření dosažených vlastností

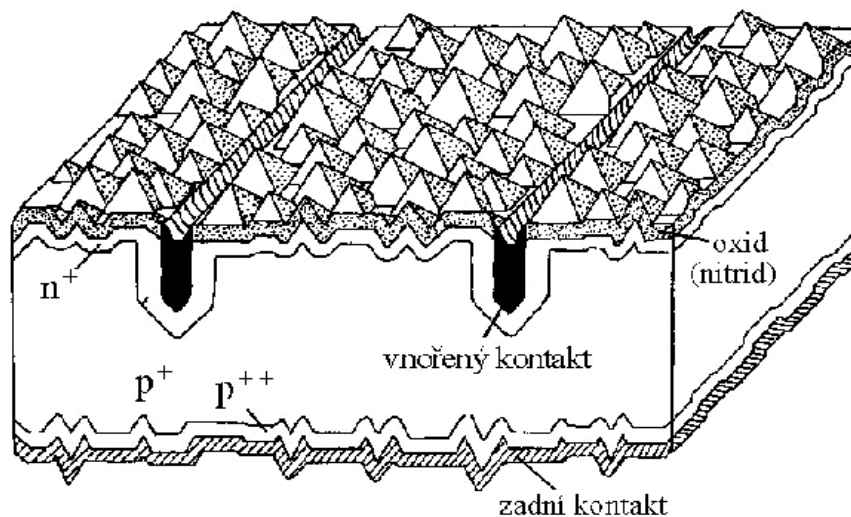
Pro zapojení článků do panelu následují další postupy jako zapojení článků do sestavy, laminace mezi sklo a polymer, rámování modulu, atd.

2.3.3 Výroba monokrystalického křemíku

Protože pro výrobu většiny polovodičových součástek je polykrystalický křemík nepoužitelný je nutné vytvořit monokrystalický. Metod pro výrobu je hned několik, nejčastější je používána řízená krystalizace z taveniny, nazývaná Czochralského proces. Při tomto postupu je do křemíkové taveniny vložen zárodečný krystal vysoce čistého křemíku. Tento krystal se přitom otáčí, pulzuje a je postupně vytahován z taveniny podle předem přesně definovaného postupu, přičemž teplota taveniny je také velmi pečlivě sledována a řízena. Celý proces probíhá v nádobách z velmi čistého křemene v inertní atmosféře argonu. Na zárodečném krystalu se pak vylučují další vrstvy mimořádně čistého křemíku, výsledný produkt (křemíkový ingot) pak může mít až 400 mm v průměru a délku do 2 m, tvořen je přitom jediným krystalem. Celý proces tavby je velmi energeticky náročný, je nutné udržovat teplotu taveniny kolem 1100°C.

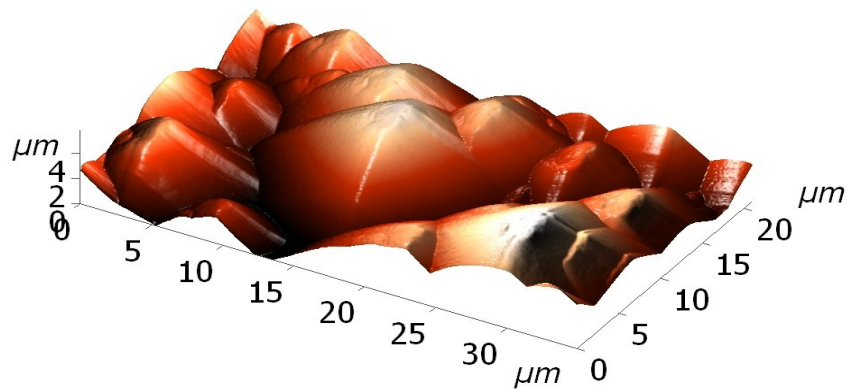
2.3.4 Struktura povrchu solárního článku

Pokud bude uvažována situace, kdy panel se zapouzdřenými solárními články bude umístěn ve stacionární poloze, sluneční paprsky mají úhel dopadu na povrch silně závislý na denní i roční fázi. Lehce tedy může docházet k výskytu takových úhlů, kdy by se velká část slunečního záření mohla odrazet od povrchu na základě zákona o lomu a odrazu světla na dvou různých optických rozhraních, případně by v některých případech mohlo dojít k totálnímu odrazu, kdy by veškeré záření bylo odraženo od povrchu. Z tohoto důvodu bylo zavedeno formování oxidu křemičitého – svrchní pasivační vrstva – do členité struktury, připomínající strukturu pyramid. Příklad je možno shlédnout na obrázku 9.



Obr. 9: Struktura povrchu solárního článku

Dopadající záření je nyní absorbováno i při velkých úhlech dopadu vůči rovině článku, pokud by došlo v některých případech k částečnému odrazu, odražená část paprsku dopadá na jinou část členěného povrchu a je absorbováno. Tímto způsobem došlo ke zvýšení účinnosti solárních článků, snížení odrazivosti a zvýšení absorpční schopnosti vstupního záření. Měřením byla ověřena část struktury povrchu námi zkoumaných solárních článků, odpovídající výše uvedené pyramidální struktuře, je zobrazena obrázku 10. Vrcholy pyramid jsou nerovnoměrně rozmístěny v prostoru, mají náhodnou výšku. Velikosti dílčích ploch, úhly natočení ve všech prostorových osách i rozmístění po povrchu tvoří vzájemný stochastický proces, což je výhodné při nedeterminovaném dopadu slunečního záření.



Obr. 10: Měřením ověřená struktura části povrchu solárního článku

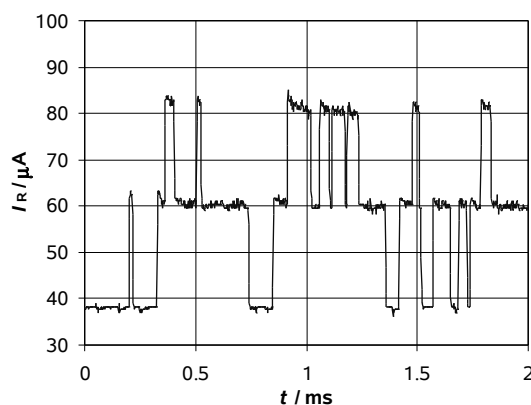
2.4 Měřitelné vlastnosti solárních článků

V křemíkovém PN přechodu jsou rozloženy oblasti s rostoucí koncentrací nečistot, které snižují průrazné napětí závěrně polarizovaného PN přechodu. Přítomnost těchto oblastí můžeme zaznamenat při měření závěrné VA charakteristiky PN přechodu s využitím zdroje proudu. Část charakteristiky se záporným diferenciálním odporem poukazuje právě na jednu defektní oblast. Těchto defektů může být více, tomu odpovídá i výsledná VA charakteristika. Druhým způsobem jak objevit tyto oblasti může být použití zdroje napětí při měření časového průběhu šumového proudu v závěrném směru. Při zvyšování závěrného napětí na PN přechodu dojde při určitém napětí ke vzniku dvouhladinového nebo vícehladinového šumu (šum mikroplazmatu). S dále se zvyšujícím napětím roste intenzita el. pole v přechodu, v důsledku toho roste pravděpodobnost obsazení vyšší hladiny n-hladinového šumu, v okamžiku dostatečně velkého závěrného napětí je tato hladina trvale obsazena (část proudu bez přerušení protéká defektní oblastí), při dalším zvyšování může dojít k lavinovému průrazu celého přechodu. Opět je možno zaznamenat více takovýchto oblastí bistabilního chování proudu v celém rozsahu závěrné charakteristiky. Počet oblastí bistability vypovídá o počtu oblastí.

Jedná se o podmíněně vodivé kanálky skrze PN přechod, u nichž není jejich velikost přesně známa, předpokládá se však rozmezí 10^{-14} m^2 až 10^{-12} m^2 . Protékající proud lze odečíst jako rozdíl hladin proudů v bistabilní části časového průběhu, výše uvedeného. Z toho vyplývá proudová hustota vyšší než 10^7 Am^2 . To způsobuje velmi silný ohřev v oblasti defektu, který může vést k lokální difúzi či teplotnímu průrazu. Tyto oblasti jsou jedním z omezení při provozu vysokonapěťových usměrňovačích diod, ale i solárních článků, kde dochází ke snížení závěrných napětí potřebných pro průchod proudu těmito oblastmi ze stovek na několik voltů.

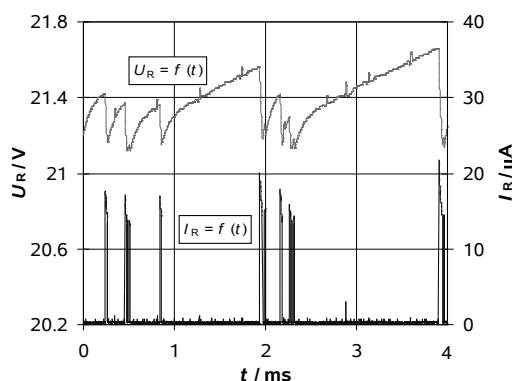
2.4.1 Chování šumu mikroplazmatu v závislosti na čase

Šum mikroplazmatu se vyskytuje v závěrné oblasti PN přechodu ve tvaru náhodných dvoustavových nebo víceustavových proudových impulzů, které jsou obvykle obdélníkového tvaru (s podmínkou, že obvod je napájen zdrojem napětí), nicméně jejich tvar může záviset na parametrech okolního obvodu (parazitní kapacity deformují obdélníkový tvar). Takovýto průběh je na obr. 11.



Obr. 11. Víceúrovňový šum mikroplazmatu při konstantním napájecím napětí

Pokud je PN přechod napájen zdrojem proudu, v časovém průběhu napětí lze spatřit pilový průběh s exponenciální hranou doběhu, časový průběh proudu je složen z úzkých proudových impulzů s náhodnou šířkou trvání a dobou vzniku korespondující se sestupnou hranou průběhu napětí, jak je uvedeno na obr. 12.

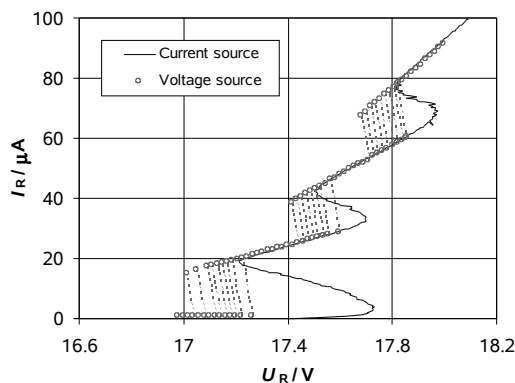


Obr. 12. Proudový šum mikroplazmatu při konstantním zdroji proudu

2.4.2 VA charakteristika PN přechodu s defektními oblastmi v závěrném směru

Existence oblastní mikroplazmatu nejvíce ovlivňuje VA charakteristiku v závěrném směru. Obr. 13 ukazuje rozdíl mezi napájením napět'ovým zdrojem a proudovým, kde lze pozorovat lokální změnu dynamického odporu diody, způsobenou bistabilitou mikroplazmatu. Jsou zde znázorněny opět 3 oblasti bistability. Podle sklonu charakteristiky v místě záporného dynamického odporu, můžeme určit velikost napětí zdroje mikroplazmatu pro sestavení náhradního schematického modelu. Z grafu je dále patrné, že stejný proces je odpovědný za oba jevy, tvar VA charakteristiky i časovou závislost proudu diodou.

Průběhy uvedené v tomto i předchozím odstavci jsou z důvodu jednoduchosti pro LED. U solárního článku je takovýchto lokálních defektních oblastí příliš mnoho, napět'ově se překrývají, nelze je tedy izolovat a demonstrovat uvedené principy. Pokud bychom vzali pouze dostatečně malou část solárního článku, je možné získat průběh s jednou nebo několika defektními oblastmi a demonstrovat tak podobnost.

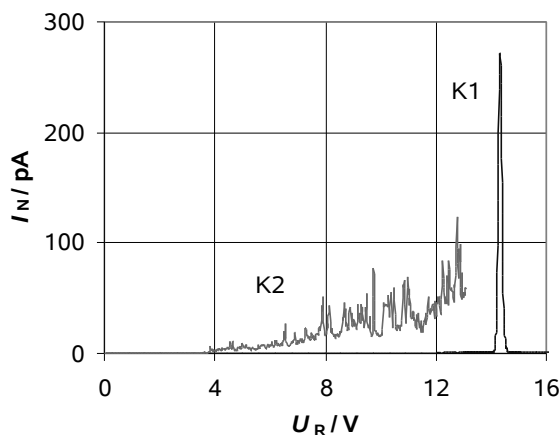


Obr. 13. VA charakteristika PN přechodu [2]

2.4.3 Střední hodnota úzkopásmového šumu

Z hlediska šumové diagnostiky je vhodné stanovit závislost úzkopásmového šumového proudu na hodnotě závěrného napětí, protože každý lokální extrém této charakteristiky koresponduje s aktivní oblastí mikroplazmatu. Měření lze realizovat pomocí úzkopásmového zesilovače se střední frekvencí 420Hz a velmi úzkou efektivní propustnou šířkou.

První průběh na obr. 14 ukazuje vzorek označený K1 o ploše přechodu $0,63\text{cm}^2$. Z průběhu je vidět přítomnost jediného šumu – šumu mikroplazmatu. Druhý průběh s označením vzorku K2 (velikost přechodu $0,88\text{cm}^2$) již zahrnuje 3 lokální maxima odpovídajícím šumům mikroplazmatu, první při napětí 9,75V, druhé při 10,50V a třetí při 11,88V. Šum typu B byl detekován ve zbývajících částí průběhu nad prahovým napětí 3,7V.



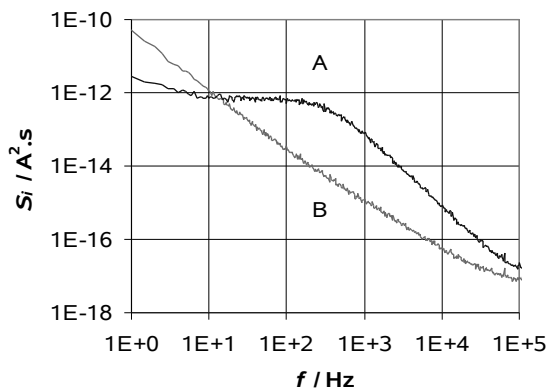
Obr. 14. Střední hodnota úzkopásmového šumu pro vzorky K1 a K2

2.4.4 Výkonová spektrální hustota

Velmi důležitou veličinou pro hodnocení kvality PN přechodu je proudová závislost výkonové spektrální hustoty $S(f, I)$, v oblasti nízkých frekvencí. Zde může být dominantní šum $1/f$ [7] v případě, že dioda vykazuje nadbytečný proud. Spektrální výkonová hustota proudového šumu PN přechodu s výskytem mikroplazmatu má charakter generačně-rekombinačního spektra a je dáno rovnicí:

$$S_i(\omega, U_r) = \frac{4I_M^2 gr}{(g+r)[(g+r)^2 + \omega^2]} \quad (2)$$

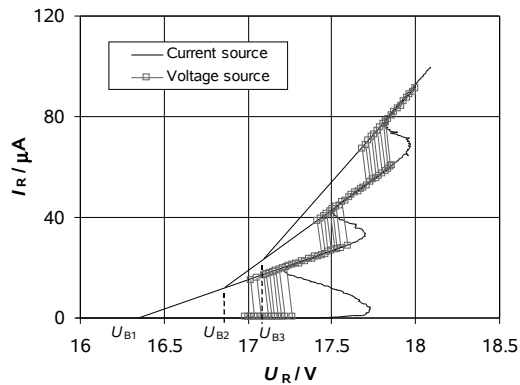
V případě vícehladinových impulzů, nebo výskytu více izolovaných mikroplazmatických šumů je spektrum složeno z několika základních spekter. Příklad na obr. 15 znázorňuje průběh pro výše uvedený vzorek K1, kde je přítomen pouze šum typu A a vzorek K3, kde je v celém měřeném rozsahu závěrných napětí dominantní šum typu B. Pro vzorek K1 lze odečíst koeficienty generace-rekombinace: $g=1365\text{s}^{-1}$ a $r=808\text{s}^{-1}$. V případě šumu typu B je zcela zřetelné, že je možné ho zařadit do kategorie šumů $1/f$, u vzorku K3 s koeficientem a v rozmezí $a = 1$ až $a=2$.



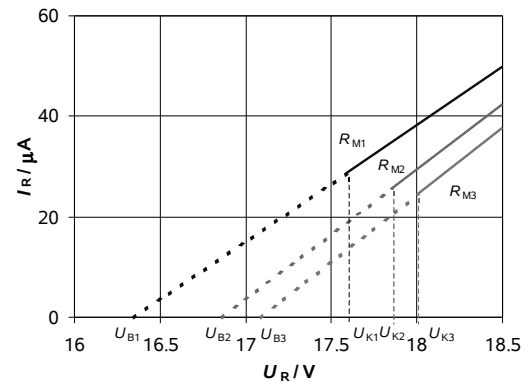
Obr. 15. Výkonová spektrální hustota, A(K1, napětí 14,34V), B(K3, napětí 14,97)

2.4.5 Model PN přechodu s oblastmi mikroplazmatu v závěrném stavu

Z předchozích informací o chování PN přechodu s oblastmi mikroplazmatu je možné stanovit náhradní model PN přechodu v závěrném stavu, určený pro pochopení pravděpodobnosti vzniku bistabilních stavů a matematické modelování pro analyzování chování PN přechodu. Model uvedený na obr. 18 vychází z předpokladu, že oblasti mikroplazmatu procházejí celým přechodem jako válcová tělesa s osami ve směru vedení proudu – kolmo na rovinu přechodu. V náhradním modelu jsou charakterizovány sériovým spojením spínače S_k napětím U_{Bk} a sériovým odporem R_{Mk} , $k=1, \dots, n$. Spínač je náhodně spínán a rozspínán náhodným procesem (prozatím budeme předpokládat stochastický spínač). Z VA charakteristiky přechodu je možno stanovit hodnoty náhradních napětíových zdrojů U_{Bk} , extrapolací lineárních oblastí nad oblastí bistability. Průsečík jednotlivých přímk s předchozí přímkou (u první se jedná o průsečík s osou napětí) stanoví hodnotu napětí náhradních zdrojů. Je zřejmé, že směrnice první přímký udává přímo hodnotu sériového odporu prvního mikroplazmatu R_{M1} .



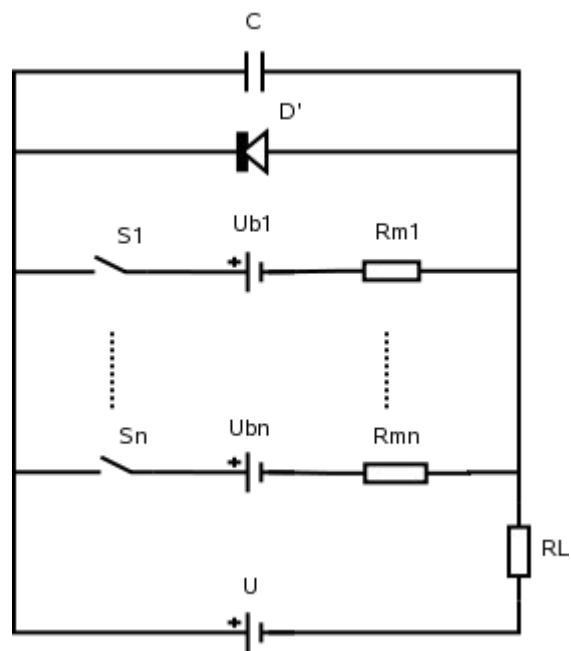
Obr. 16. Proložení VA charakteristiky přímkami



Obr. 17. VA charakteristiky izolovaných mikropř. pro určení náhradního modelu PN přechodu

Směrnice dalších přímký je dána součtem v proudové ose směrnice předchozí přímký navýšený o směrnici aktuální přímký. Pro určení velikosti náhradního odporu R_{Mx} , je nutné odečíst předchozí směrnici v ose proudu. Obrázek 16 ukazuje odečítání směrníc lineárních oblastí VA charakteristiky, výsledný graf popisující vlastnosti izolovaných oblastí mikroplazmatu s odpovídajícími směrniciemi přímký je uveden na obr. 17. U tohoto grafu jsou hodnoty náhradních napětíových zdrojů přímo určeny průsečíky jednotlivých přímký s napětíovou osou.

Symbol diody v náhradním modelu na obr. 18 značí ideální diodu (v závěrném směru se neprojevuje difúzní napětí) doplněnou o kapacitu přechodu, značenou jako C . Náhradní model PN přechodu je připojen ke zdroji napětí U se svým sériovým odporem R_L .



Obr. 18. Náhradní model PN přechodu

3 Metoda měření emitovaného záření

Vedení proudu oblastní mikroplazmatu v PN přechodu je zpravidla doprovázena emisí světelného záření, jak uvádí [1]. V bistabilním stavu mikroplazmatu dochází k emisí v časových úsecích sepnutí vodivého kanálu defektní oblasti, při závěrném napětí PN přechodu vyšším dochází k trvalé emisí. Tato práce je zaměřena na mapování povrchu solárního článku a zaznamenávání lokálních oblastí s emisí světelného záření, následné zobrazení se skutečným měřítkem. Bylo experimentálně zjištěno, že solární článek o velikosti 100 cm² má defektních oblastí velmi mnoho, nelze je tedy manuálně spočítat. Jejich počet samozřejmě závisí na velikosti závěrného napětí PN přechodu. Dále uvedená metoda by měla být vhodným nástrojem pro studium a diagnostiku vzniku defektních oblastí a bližší určení jejich vlastností.

3.1 Možnosti realizace

Emise záření z defektních oblastí solárního článku je velmi slabá a pouhým okem velmi těžce pozorovatelná. I při dostatečném snížení okolního osvětlení lze emisí spatřit až v okamžiku blízkém lavinovému průrazu celého PN přechodu, tudíž dochází k výraznému přetěžování a následnému poškození přechodu teplem. Je tedy nutné použít dostatečně citlivý snímací element. Dosud není také známo spektrum vyzařovaného záření, zda se nachází výrazně v některém z okem nepostřehnutelných pásem, nebo je rovnoměrně rozloženo v konkrétní oblasti.

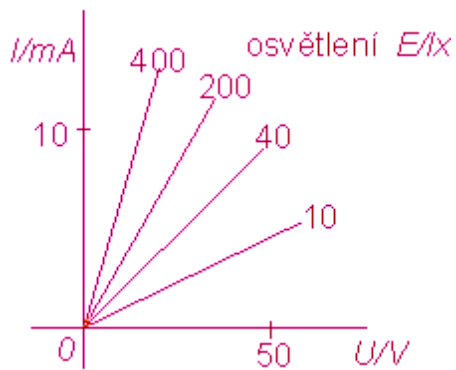
Jako snímací element přichází v úvahu fotorezistor, fototranzistor, řádkový CCD snímač, CCD kamera, CCD kamera s chlazeným čipem a fotonásobič. Jejich princip snímání je různý, pro další postup je nutné porovnání jejich vlastností.

3.1.1 Fotorezistor

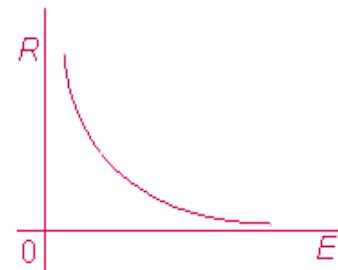
Fotorezistor je polovodičová součástka, jejíž odpor závisí na osvětlení [16]. Princip fotorezistoru je založen na vnitřním fotoelektrickém jevu. Foton narazí do elektronu ve valenční sféře a předá mu svoji energii, tím elektron získá dostatek energie k překonání zakázaného pásu a skočí z valenčního pásu do vodivostního. Tím opustí svůj atom a pohybuje se jako volný elektron prostorem krystalové mřížky. Na jeho místě vznikla díra. Takto vzniklé volné elektrony přispívají ke snížení elektrického odporu (zvýšení elektrické vodivosti). Čím více světla na fotorezistor dopadá, tím vzniká více volných elektronů a zvyšuje se tím elektrická vodivost [17].



Obr. 19. Fotorezistor [16]



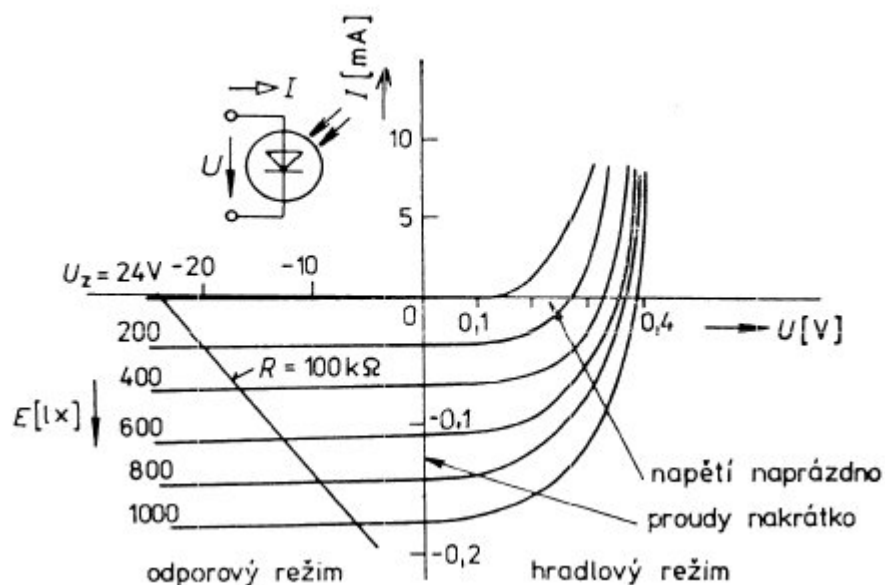
Obr. 20. Obecná VA charakteristika fotorezistoru [16]



Obr. 21. Obecná závislost odporu R fotorezistoru na osvětlení E [16]

3.1.2 Fotodioda

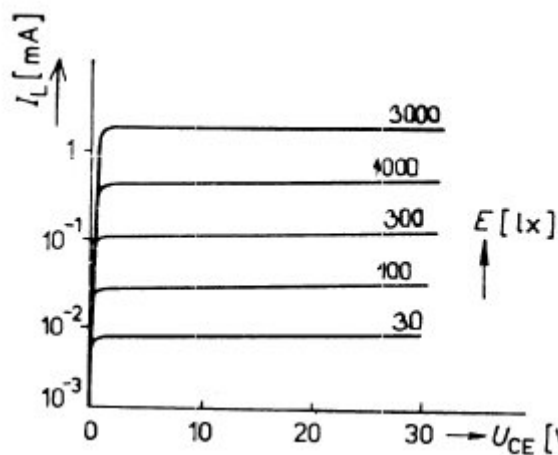
Fotodioda je polovodičová součástka, jejíž přechod PN je přístupen záření. Voltampérové charakteristiky tvoří soustavu křivek, kde parametrem je osvětlení E . V I. kvadrantu jsou křivky stlačeny, dioda je málo citlivá na osvětlení, v průsečíku charakteristik není citlivá vůbec. Proto se fotodioda v propustném směru nepoužívá. Ve III. kvadrantu jsou charakteristiky lineární a rovnoměrně vzdálené. Dioda se chová jako odpor řízený osvětlením, hovoříme o odporovém režimu fotodiody. Ve IV. kvadrantu se dioda chová jako stejnosměrný zdroj elektrické energie, hovoříme o tzv. hradlovém režimu. Fotodioda dává naprázdno napětí řádově 0,1 V a závisí na materiálu a osvětlení. Proud nakrátko je přímo úměrný ploše přechodu a osvětlení. Fotodioda se chová podobně jako solární článek s malou plochou povrchu, obě polovodičové součástky mají tedy principiálně stejné vlastnosti. Rozdílné je pouze způsob používání fotodiody, většinou v odporovém režimu, na rozdíl od solárního článku, kde se očekává hradlový režim. Fotodioda stačí sledovat průběhy osvětlení rychleji než fotorezistor. [18]



Obr. 22. VA charakteristiky fotodiody [18]

3.1.3 Fototranzistor

Fototranzistor je bipolární tranzistor, který nemá vyvedený kontakt k bázi, jehož přechod mezi bází a emitorem je přístupný světlu. Princip fototranzistoru je podobný jako u fotorezistoru a fotodiody, navíc proud v řízeném obvodu zesiluje jako běžný tranzistor. Zapojuje se společným emitorem, vnější zdroj se připojuje mezi kolektor a emitor tak, aby kolektorový přechod byl polarizován závěrně. Báze zpravidla nebývá vyvedena. Princip spočívá v tom, že emitorový přechod je otvírán osvětlením, počet uvolněných nosičů se zvětšuje úměrně s osvětlením a je zesilován jako proud báze v bipolárním tranzistoru. Vlivem tohoto zesilovacího účinku mají fototranzistory větší citlivost na osvětlení než fotodiody. Neozářeným fototranzistorem prochází kolektorový proud, zvaný proud za temna I_0 , který je určen zbytkovým proudem tranzistoru I_{CE0} . Voltampérové charakteristiky mají tvar výstupních charakteristik bipolárního tranzistoru, parametrem je zde namísto proudu báze osvětlení E [18].



Obr. 23. VA charakteristiky fototranzistoru [18]

Výše uváděné snímací elementy nedovolují měření světelného záření o tak nízké intenzitě, jako produkují lokální oblasti v solárních článcích. Pro účel měření jsou tedy nevhodné.

3.1.4 CCD kamera

CCD snímač pracuje na principu přeměny světelné energie na elektrický náboj pomocí izolovaného PN přechodu, kde jsou elektrony generované dopadem fotonů kumulovány v polovodiči po stanovenou dobu. Následně dochází k odčerpání náboje a určení jeho velikosti. Pro nízké osvětlení je doba kumulace náboje adekvátně delší, pro vyšší intenzity kratší. Světlocitlivé elementy jsou uspořádány do matice bodů, počet bodů určuje rozlišení kamery. Tepelný šum na čipu nedovoluje snímat příliš malé intenzity vstupujícího záření ani po dalším zvyšování doby kumulace náboje. Naopak výhodou je sejmutí všech bodů obrazu najednou.



Obr. 24. CCD kamera [24]

3.1.5 Řádkový CCD snímač

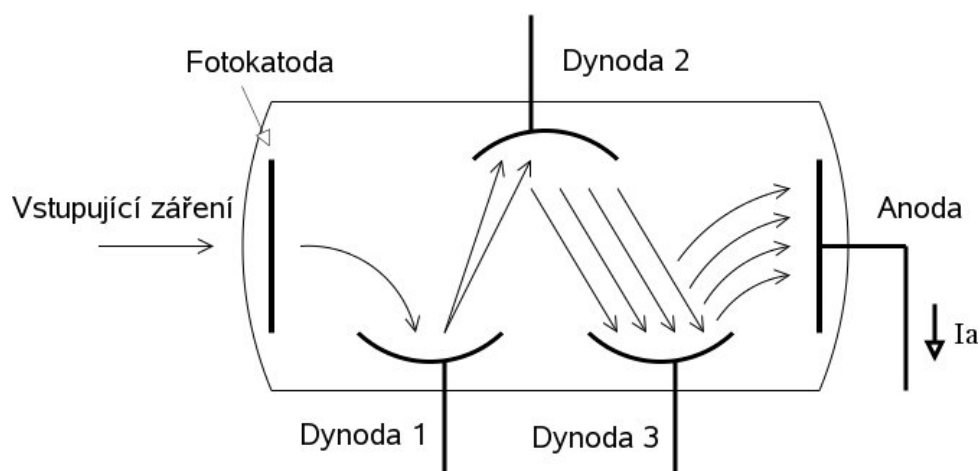
Tento snímač pracuje na stejném principu jako běžný CCD snímač, body tvoří dvourozměrnou matici, jsou však uspořádány do jediného řádku (pro černobílý CCD snímač). Díky tomu je snížen šum snímače, který dovoluje zaznamenání nižší intenzity záření. Snížení šumu je dosaženo nižším celkovým počtem bodů a také jejich nižší koncentrací na jednotku plochy. Přes tento fakt citlivost jednořádkového snímače není dostatečná pro měření emise záření z lokálních oblastí solárních článků. Dvourozměrný obraz se u tohoto typu snímače realizuje posunem snímače a zaznamenáváním jednotlivých řádků ve směru pohybu.

3.1.6 CCD kamera s chlazeným čipem

Chlazením polovodičové struktury CCD kamery je dosaženo výrazného snížení šumu snímače. Teplota čipu obvykle dosahuje teploty varu dusíku nebo prvku či směsi prvků s podobnou velikostí teploty varu. Citlivost tohoto snímače již může dosahovat požadovaných hodnot pro měření.

3.1.7 Fotonásobič

Fotonásobič je velmi citlivý univerzální detektor ultrafialového, viditelného i části infračerveného spektra záření. Typické schéma je na obr. 25. Vstupní záření dopadá na fotokatodu, energie fotonu uvolňuje elektron z katody a uděluje mu základní kinetickou energii. Ten je přitahován elektrickým polem k první dynodě, která má kladný potenciál vůči katodě a zároveň urychlován (narůstá kinetická energie elektronu). Elektron má při dopadu na dynodu dostatečnou energii a uvolňuje další elektrony. Ty jsou přitahovány k další dynodě, která má vyšší potenciál, než předchozí dynoda. Celý proces se opakuje, z další dynody je uvolněn ještě větší počet elektronů, odpovídající x -násobku předchozího počtu. Počet dynod určuje celkové zesílení fotonásobiče. To se obvykle pohybuje v řádu 10^6 . Dostatečně zesílený tok elektronů dopadá na anodu, kde je měřen.



Obr. 25. Princip fotonásobiče

Na stejném principu fungují detektory RTG a gama záření zvané „Scintilační detektory“, používané především v lékařství. Liší se pouze v materiálu a provedení fotokatydy.

Fotonásobič lze obvykle použít v rozsahu vlnových délek od 200nm do 900nm, aniž by vnášel významně zkreslení, způsobené nelinearitou přenosové charakteristiky, která je v tomto rozsahu téměř lineární. Příklad přenosové charakteristiky fotonásobiče R374 od firmy SESIM je uveden na obrázku 26. V porovnání s ostatními detektory záření viditelného spektra je fotonásobič vhodný pro menší vlnové délky.

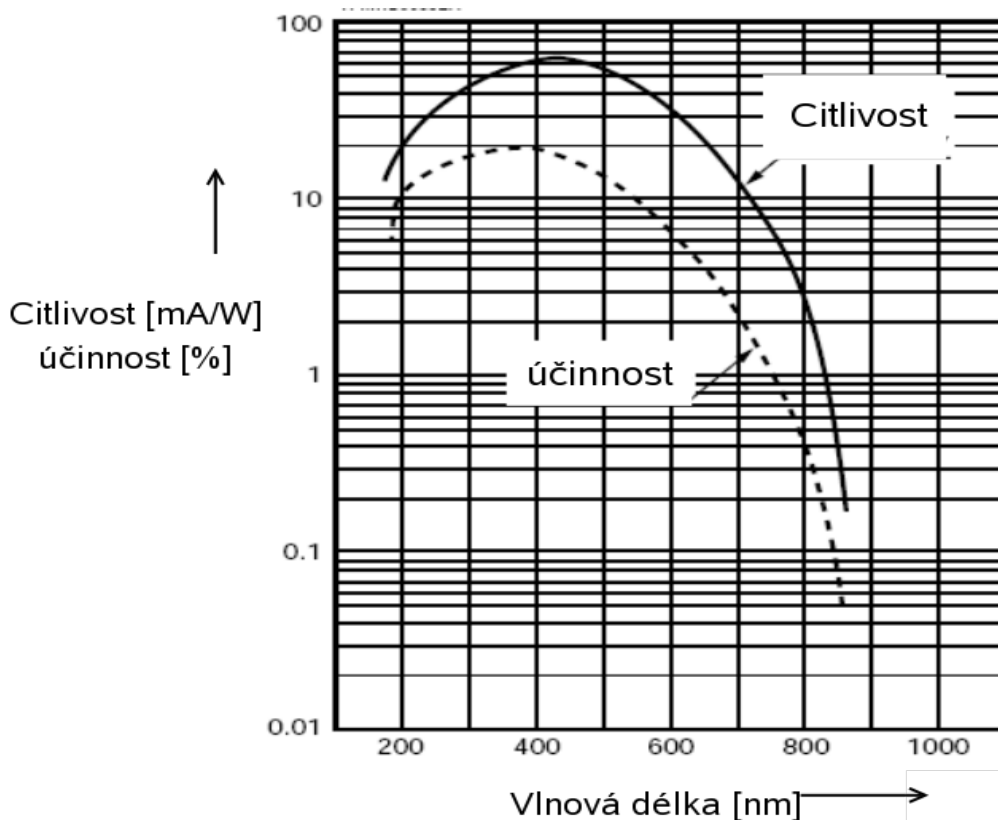
Doba odezvy fotonásobiče je průměrně od 1ns do 2ns při zatěžovací impedanci 50Ω. Z důvodu zlepšení poměru signál/šum (S/N) je však volena hodnota zatěžovací impedance vyšší. Zvýší se tak amplituda užitečného signálu při zachování velikosti šumového napětí. Zvyšování výstupní impedance zároveň snižuje rychlost odezvy na 10ns až 20ns.

Na rozdíl od ostatních fotodetektorů mají fotonásobiče mnohem větší snímání plochu, pohybující se v řádech cm². Nejsou vhodné pro teplotu okolí větší než 75°C z důvodu exponenciálního nárůstu temného proudu¹. Při teplotě fotokatydy rovné 10°C je tento proud 10⁻⁷A, při nárůstu o dalších 10°C se však zdvojnásobuje. Temný proud způsobuje aditivní šum, který je závislý pouze na teplotě, svou velikostí tak určuje nejmenší možnou měřitelnou úroveň signálu. Dalším významným zdrojem šumu je sekundární emise (některé vyražené elektrony z dynody neputují k následující dynodě, ale k předchozí, dále zpět k původní a dále k následující – na anodu dopadá náhodné kvantum zpožděného náboje). Tato emise má kladnou exponenciální závislost na nastaveném anodovém napětí. Nejnížší možná měřená úroveň vstupního signálu je určena citlivostí a poměrem signál/šum.

¹ Temný proud: vyšší teplotou fotokatydy překonávají elektrony výstupní práci z kovů a jsou tak uvolňovány, i bez přítomnosti vstupního záření lze zaznamenat proud anodou.

Parametry vybraného fotonásobiče:

<i>Označení:</i>	<i>R374</i>
<i>Typ:</i>	<i>Head on</i>
<i>Průměr:</i>	<i>28mm</i>
<i>Aktivní prům.:</i>	<i>25mm</i>
<i>Rozsah vlnových délek:</i>	<i>(graf na obr. 26)</i>
<i>Min.:</i>	<i>185nm</i>
<i>Max.:</i>	<i>850nm</i>
<i>Citlivost:</i>	<i>64mA/W</i>
<i>Vstupní okno:</i>	<i>UV Glass</i>
<i>Typ katody:</i>	<i>Multialkalická</i>
<i>Lumin. citl.:</i>	<i>150mA/lm</i>
<i>Anod. lumin. citl.:</i>	<i>80A/lm</i>
<i>Zesílení:</i>	<i>5.3E+05</i>
<i>Nejnižší zachytitelný proud:</i>	<i>3nA</i>
<i>Doba zotavení</i>	<i>15ns</i>
<i>Počet dynod:</i>	<i>11</i>
<i>Napájecí napětí:</i>	<i>1000V</i>

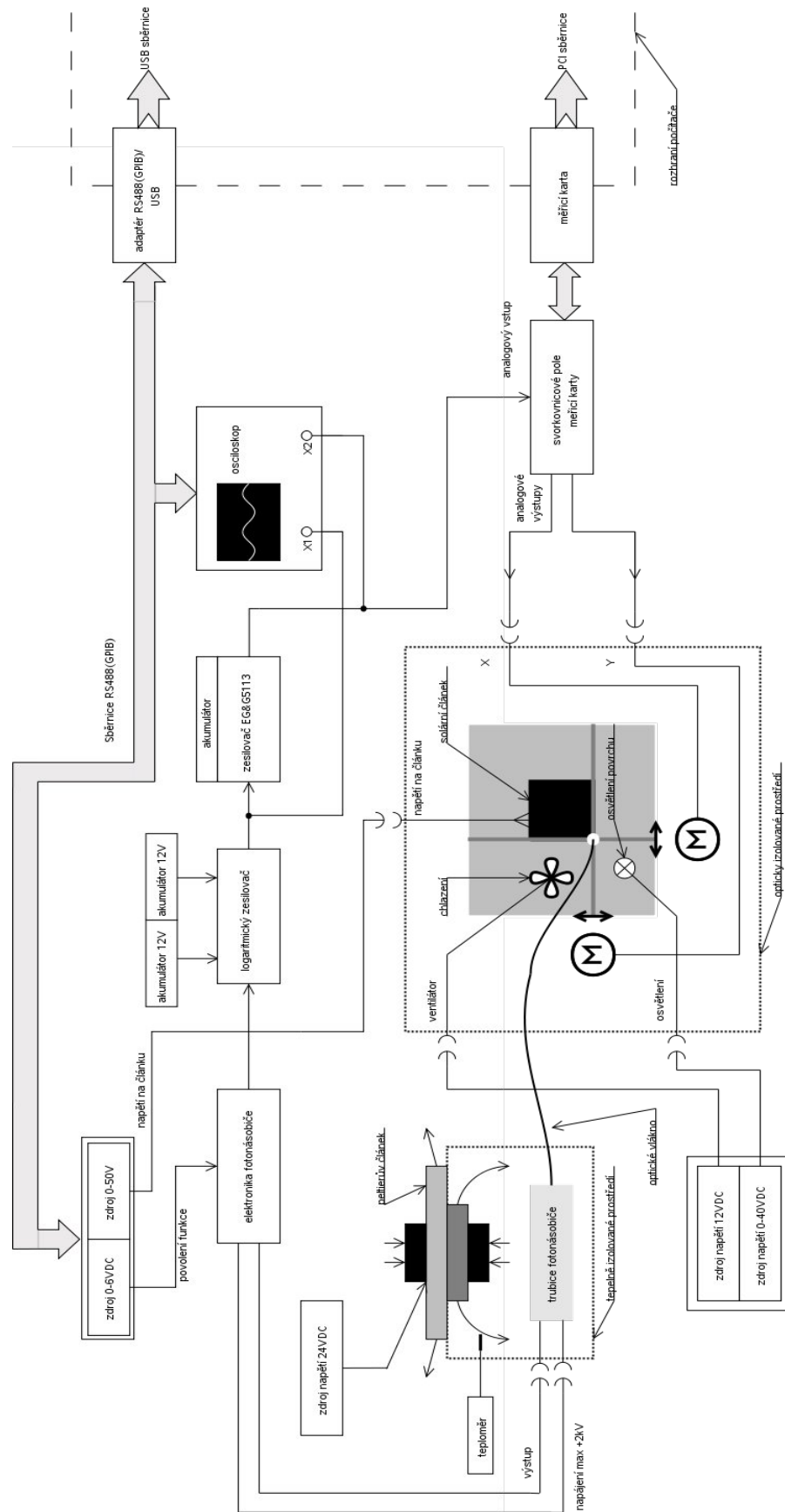


Obr. 26. Citlivost fotonásobiče vs. vlnová délka

3.2 Měřicí pracoviště s využitím fotonásobiče

Jak již bylo zmíněno, pro dané měření nelze použít fotorezistor, fotodiodu, fototranzistor ani CCD snímač bez chlazení z důvodu jejich nedostatečné citlivosti na záření emitované z lokálních oblastí solárního článku. Jednořádkovým CCD snímačem lze emisi zachytit, avšak velmi zkresleně s nadbytkem tepelného šumu. Dostatečnou citlivost nabízí použití CCD kamery s chlazeným čipem. Problém nastává při doplňování chladícího média při dlouhodobém automatizovaném měření. Zároveň mechanická konstrukce takovéto CCD kamery neumožňuje zabudování do opticky izolovaného prostředí (měřicí komora) pro eliminaci rušivých zdrojů světelného záření. Z těchto důvodů byla za nejvýhodnější možnost zvolena použití fotonásobiče. Jeho výhodou oproti CCD kameře je vysoká citlivost (už několik fotonů může být zachyceno). Naopak nevýhodné je použití fotonásobiče v nutnosti nastavovat vstup do konkrétního bodu nad povrchem článku. Vstup fotonásobiče je většinou tvořen trubicí o průměru několik cm², což je pro měření oblasti o ploše několik desetin mm² nevyhovující. Je nutné použít zúžené vstupní okénko, nebo jiný způsob pro dosažení snímání velmi malé plochy. Obraz celého povrchu není sejmut najednou, musí být nastavována pozice bod po bodu, což značně prodlužuje čas měření.

Možné uspořádání měřicího pracoviště je uvedeno na obr. 27, vstup fotonásobiče je přizpůsoben pro připojení optického vlákna. Druhým koncem je pohybováno nad povrchem článku.



Obr. 27: Uspořádání měřicího pracoviště

Aby signál nebyl po přenosu optickým vláknem příliš zkreslen, je nutné vybrat vlákno s co nejlepší přenosovou charakteristikou. Útlum vlákna není příliš kritický avšak nerovnoměrná přenosová charakteristika způsobí potlačení některých vlnových délek, což je nežádoucí byť jen z důvodu neznámé vlnové délky záření z povrchu článku.

Pohyb nad povrchem článku (nastavování pozice vlákna) v osách X a Y realizuje analogový souřadnicový zapisovač. Musí být schopen nastavit vlákno do konkrétních souřadnic s dostatečnou přesností. Největším úskalím je ovládání analogové veličiny. To klade do cesty přesnosti překážku v podobě chyby převodu použitého D/A převodníku a propojovacího vedení mezi převodníkem a zapisovačem. Provedené testy ukázaly, že pro použité vlákno a jeho vzdálenost od povrchu je použití daného typu zapisovače dostačující, nedochází k výrazné chybě nastavení pozice, ani ve fluktuaci nastavené pozice větší, než je 5% z průměru vlákna.

Jak již bylo zmíněno výše a uvedeno na blokovém diagramu (obr. 27), je nutné použít při řízení měření pomocí PC převodník D/A. Protože výstup z fotonásobiče je také analogová veličina a je třeba ji převést do číslicové podoby, je nutné použít kombinovaný převodník A/D i D/A. Na převodník je především kladen nárok na nízký kvantovací šum.

Kvantovaný signál se svým průběhem liší od původního vinou vzniku kvantovacího šumu. Kvantovací šum má většinou pilovitý průběh. Jeho efektivní hodnotu můžeme spočítat podle rovnice (2) [7],

$$U_i = \frac{U_m}{2^n \sqrt{12}}, \quad (2)$$

kde U_i je efektivní hodnota napětí kvantovacího šumu, n je počet bitů převodníku a U_m znamená napěťový rozsah převodníku. Další významnou vlastností převodníků je krok výstupní veličiny. Znamená rozdělení výstupního rozsahu převodníku na počet bitových kombinací. Vypočítá se jako

$$q = \frac{U_{max} - U_{min}}{2^n}, \quad (3)$$

kde U_{max} je napětí na výstupu převodníku při nastavení nejvyšší bitové kombinace, U_{min} při nejnižší bitové kombinaci. Krok výstupního napětí q tedy znamená nejmenší možnou změnu výstupního napětí při změně o nejméně významný bit.

Měřený článek je tedy umístěn do souřadnicového zapisovače (zhruba vprostřed blokového diagramu – obr. 27), který má připevněn na své pohyblivé rameno vstup optického vlákna. Na článek je přivedeno závěrné napětí ze stejnosměrného zdroje 0 až 50V řízeného po sběrnici RS488 (IEEE 488 nebo GPIB). Povrch článku je nutno chladit z důvodu odvodu ztrátového tepla, to je prováděno ventilátorem. Je zřejmé, že pro měření velmi nízké intenzity záření jako je záření z lokálních oblastí povrchu solárních článků je nutné velmi dobré optické odstínění měřicího pracoviště od okolního prostředí pro zabránění průniku okolních zdrojů záření.

Do opticky odděleného prostředí, reprezentovaného na blokovém diagramu plochou ohraničenou tečkovanou čarou, je umístěn umělý zdroj záření reprezentovaný žárovkou pro případy, kdy je nutné předem měřit skutečnou pozici solárního článku a jeho tvar. Povrch solárního článku na rozdíl od okolní plochy absorbuje dopadající záření ze žárovky, nad povrchem je tedy intenzita záření vstupujícího do optického vlákna nízká. Informaci o poloze článku lze využít pro přesnou definici oblasti měření.

Z opticky izolovaného prostředí vystupují napájecí vodiče ventilátoru, napájení souřadnicového zapisovače, ovládání žárovky, optické vlákno, napájení solárního článku a jako vstupy jsou přivedeny ovládací vodiče souřadnicového zapisovače pro obě souřadnice pohybu X a Y.

Optické vlákno je vedeno do trubice fotonásobiče, ta je umístěna v tepelně odděleném prostoru, kde dochází k chlazení trubice fotonásobiče (oblast ohraničená tečkovanou čarou vlevo na diagramu – obr. 26). Důvod chlazení bude vysvětlen později. Chlazení je zajišťováno peltierovým článkem. Výstup a napájení trubice fotonásobiče jsou přivedeny do řídicí elektroniky fotonásobiče. Vstupní signál povolení funkce zapíná a vypíná napájení trubice (logické úrovně L a H), ovládání je provedeno přes zdroj 0 až 6V sběrnici RS488. Výstup z řídicí elektroniky fotonásobiče je přiveden na logaritmický převodník, ten má za úkol upravit dynamiku signálu tak, aby v oblastech slabších signálů byl velký rozdíl výstupního napětí a naopak. Tato změna dynamiky zajistí snížení vzorkovacího šumu. Logaritmický zesilovač je napájen z akumulátorů pro odstranění rušení z elektrorozvodné sítě. Dalším prvkem úpravy signálu je nízkošumový zesilovač s funkcí filtrace. Je také opatřen galvanicky odděleným napájením, umožňuje nastavení zesílení, volbu typu strmosti a mezní hodnoty frekvence filtru. V tomto případě byl zvolen filtr typu dolní propust s mezním kmitočtem 30Hz. Výstup ze zesilovače je přiveden na A/D převodník měřicí karty. Analogové výstupy této karty jsou určeny pro nastavování souřadnic zapisovače.

Osciloskop zobrazuje výstup z logaritmického zesilovače a jemu odpovídající filtrovaný signál nízkošumovým zesilovačem. Je také připojen na sběrnici RS488 pro možnost snímání a zpracovávání průběhů výstupních signálů logaritmického zesilovače a vstupu A/D převodníku. USB adaptér tvoří rozhraní mezi sběrnici RS488 a USB.

3.2.1 Optické vlákno

Optické vlákno je určeno pro přenos emise záření z povrchu článku k trubici fotonásobiče, je použito ze dvou základních důvodů. Trubice fotonásobiče není uzpůsobena pro pohyb pomocí ramena souřadnicového zapisovače především z důvodu neflexibilitnosti přívodních vodičů a velikostí přiváděného napájecího napětí až 1200 V_{DC}. Dále rameno zapisovače není dimenzováno na tak velkou hmotnost, jakou představuje trubice fotonásobiče. Druhým důvodem je selekce definované oblasti povrchu solárního článku. Vstupní okénko trubice má příliš velkou plochu, je třeba ji omezit na požadovanou hodnotu, jinak by docházelo ke snímání příliš velké plochy. Vázání vláknem dovoluje snímání přibližně stejné plochy, jakou má vlákno/konektor vlákna.

Optické vlákno lze chápat jako dielektrický vlnovod, ve kterém se šíří elektromagnetické vlny (zpravidla viditelné světlo či infračervené záření) ve směru osy s využitím principu totálního odrazu na rozhraní dvou prostředí s rozdílným indexem lomu. Vnitřní část vlákna se nazývá jádro, okolo jádra plášť, na povrchu bývá primární ochrana pro mechanickou ochranu a optickou izolaci. U optických vláken se udává průměr jádra a pláště v mikrometrech a používají se mnohavidová vlákna (MM) o průměrech 50/125 μm (standardizováno ITU-T podle G.651) nebo 62,5/125 μm . Většinou se dnes používají jednovidová vlákna (SM) o průměru 9/125 μm . Jedná se především o standardy G.652, G.653, G.655 a G. 657 [22].

Vlastnosti optických vláken

Základní parametry SI vláken (vlákna z křemičitého skla) je optický útlum, chromatická disperze, polarizační vidová disperze a průměr vidového pole. Disperze je příčinou zkreslení přenášeného signálu, dochází ke zpoždování signálu a změně jeho tvaru tvaru [22].

Druhy disperze v optických vláknech:

- materiálová,
- vlnovodná,
- vidová - u mnohavidových vlákních rozdílná rychlost a dráha šíření jednotlivých vidů ve vlákně

Chromatická disperze se skládá z materiálové a vlnovodné disperze.

Útlum

Útlum optických vláken je způsobován především:

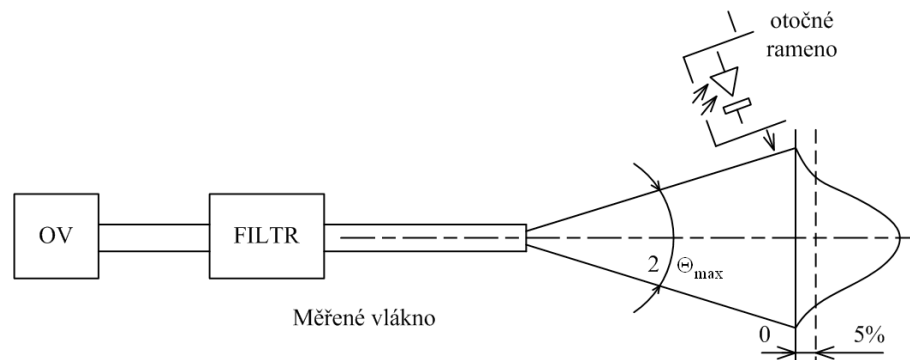
- absorpci prostředí, v němž se energie šíří,
- rozptylem na nehomogenitách,
- vyzařováním z vlákna.

Numerická apertura

Numerická apertura (NA) je důležitým parametrem pro posuzování účinnosti vazby mezi optickým zdrojem a vláknem nebo mezi dvěma vlákny, případně mezi vláknem a optickým detektorem, je dána vztahem [22]:

$$NA = \sin \Theta_{\max} = \left(n_1^2 - n_2^2 \right)^{-\frac{1}{2}} \quad [22]. \quad (3)$$

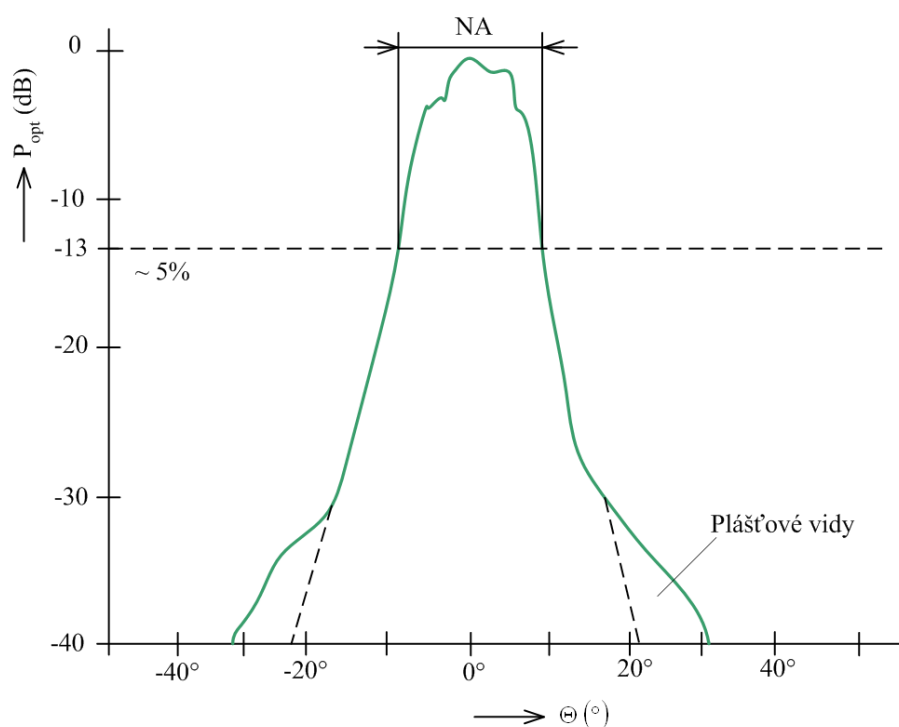
Vzhledem k tomu, že indexy lomu jádra n_1 a pláště n_2 jsou obtížně zjistitelné, určuje se numerická apertura z průběhu vyzařovací charakteristiky na výstupu krátkého úseku rovnoměrně buzeného vlákna, a to ze šířky vyzařovací charakteristiky v 5% poklesu z maximální intenzity [22].



Obr. 28: Měření numerické apertury [22]

Na obrázku 28 je znázorněna metoda měření vyzářovací charakteristiky, OV značí optický vysílač, θ_{\max} je úhel pro pokles o 5% z maximální intenzity. Na výstupu vlákna je na rotačním rameni pevně upevněn optický přijímač snímající intenzitu záření v závislosti na velikosti úhlu θ měřeného od osy vlákna.

Závislost úrovně vyzářeného optického výkonu P_{opt} na úhlu θ z konce křemíkového vlákna dlouhého 2 m je uvedena na obrázku 29.



Obr. 29: Příklad vyzářovací charakteristiky vlákna

Běžně bývá numerická apertura důležitá při určování ztrát přenosové cesty. Ztráty vznikají na místě spojů mezi dvěma vlákny, mezi vláknem a zdrojem záření. Mezi dvěma vlákny dochází k tomu, že pokud vlákno, které přijímá světelný tok má nižší NA, bude maximální úhel, pod kterým mohou paprsky na vlákno dopadat, menší. Paprsky vycházející z prvního vlákna pod úhlem větším než je daný NA přijímajícího vlákna nebudou přeneseny a mohou být zahrnuty mezi ztráty [22].

Jednovidová vlákna

Vykazují nejlepší parametry optické přenosové cesty. Mají nejmenší průměr jádra do $10\mu\text{m}$. Takto malé jádro má za následek velký úhel odrazu ve vlákně, to vede k malému prodloužení dráhy paprsku. Signál je tvořen jedním videm, který se šíří podél osy jádra, při ohybu se odráží od jádra nemá vidovou disperzi pouze chromatickou a polarizační vidovou disperzi. Tento druh vlákna je nejrozšířenější v telekomunikacích, vyrábí se z homogenní skloviny.

Mnohavidová vlákna

Zásadní rozdíl oproti jednovidovým vláknům je v průměru jádra, které může být až 1000x větší. S velkým jádrem se zvětšuje i počet drah po nichž paprsky procházejí - proto se vlákna nazývají mnohavidová.

Mnohavidová vlákna se skokovou změnou indexu lomu

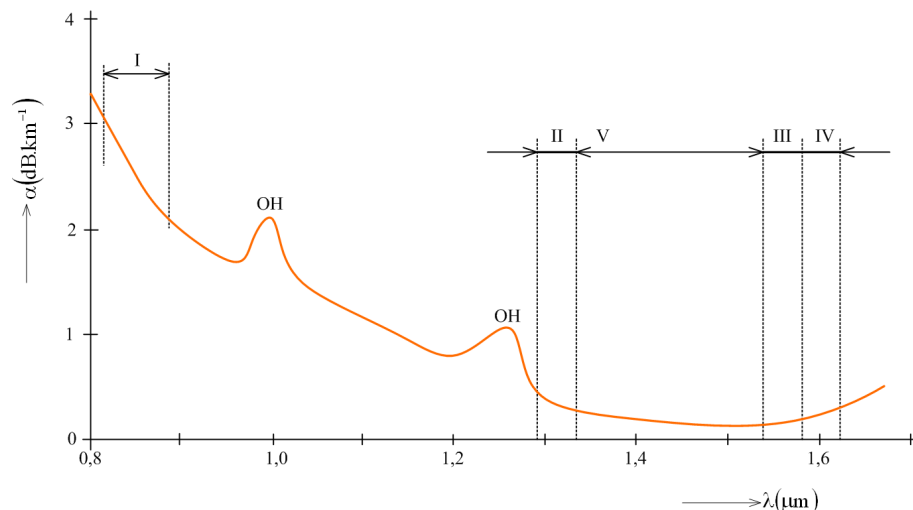
Do vlákna vstupují vidy (paprsky) pod mnoha úhly, šíří se totálním odrazem, vytváří mnohavidový způsob šíření signálu. Používá se na krátké vzdálenosti (max. desítky km) z důvodu velké vidové disperze – rozptyl v drahách jednotlivých vidů, což omezuje šířku přenášeného pásma.

Mnohavidová vlákna s gradientní změnou indexu lomu

Vlákno je tvořeno z tisíce plynule navazujících tenkých vrstev, které se liší indexem lomu. Čím je paprsek dále od osy jádra tím je index lomu menší až paprsek přejde do kolmice a nakonec se vrátí k ose jádra. Tyto vlákna mají oproti předchozím výhodu v eliminaci vidové disperze - menší zkreslení, jednotlivé vidy dojdou na konec vlákna zhruba ve stejném časovém okamžiku. Jsou velmi často používané v datových aplikacích

Křemíková vlákna

Základním materiálem pro výrobu křemíkových optických vláken je SiO_2 a tzv. legovací příměsi, kterými bývají GeO_2 , P_2O_5 , B_2O_3 aj. Koncentrací legovacích příměsí se dosahují požadované vlastnosti z hlediska velikosti a průběhu indexu lomu jádra a pláště vlákna, čímž se ovlivňují přenosové vlastnosti vlákna [22].



Obr. 30: Útlumová charakteristika křemíkového vlákna [22]

Tabulka 1: Pásma vlnových délek jednovidových optických vláken

Pásma	Název	Rozsah [nm]
O	<i>Original</i>	1260-1360
E	<i>Extended</i>	1360-1460
S	<i>Short</i>	1460-1530
C	<i>Conventional</i>	1530-1565
L	<i>Long</i>	1565-1625
U	<i>Ultra-long</i>	1625-1675

Pro přenosy máme dle doporučení ITU-T (skupina G), tato jednovidová vlákna:

Vlákna typu G.652 je standardní optické jednovidové vlákno 9/125 μm . Toto vlákno je nazýváno *matched cladding* (MC), vzledem k typické skokové změně indexu lomu na rozhraní jádra a pláště vlákna. Zvláštní skupinu tvoří vlákna s tzv. vnořeným indexem lomu, u kterých je index lomu pláště v okolí jádra nižší v plášti pak vyšší. Bývá vyrobeno z čistého křemičitého skla bez dodatečných příměsí [22].

Vlákna typu G.652.C jako nový typ lze na rozdíl od běžného vlákna G.652 provozovat v celém rozsahu vlnových délek a využít větší šířku dostupného přenosového pásma, včetně pásma s označení *E*. Toto pásmo dříve nebylo možné využít, protože klasická optická vlákna mají v této oblasti zvýšený vložný útlum vlivem rezonancí na absorbovaných iontech vody OH, které se do vlákna dodostávají při výrobním procesu [22].

Vlákna typu G.653 mají potlačení chromatické disperze na vlnové délce 1550 nm. Tato vlákna se označují jako vlákna DSF (*Dispersion Shifted Fiber*). Používala se pro vyšší přenosové rychlosti na velké vzdálenosti, provoz na jedné vlnové délce. Pro větší počet používaných vlnových délek nastává překrývání jednotlivých vlnových délek a vytváření vedlejších parazitních kanálů a přeslechů [22].

Vlákna typu G.654 byla vyvinuta jako varianta vláken G.652. Tato vlákna jsou optimalizována pro nízký vložný útlum v pásmu 1550 nm a mají zvýšenou mezní vlnovou délku. Jsou nákladná, používají se téměř výhradně k dálkovým přenosům pro podmořské kabely bez zesilovače [22].

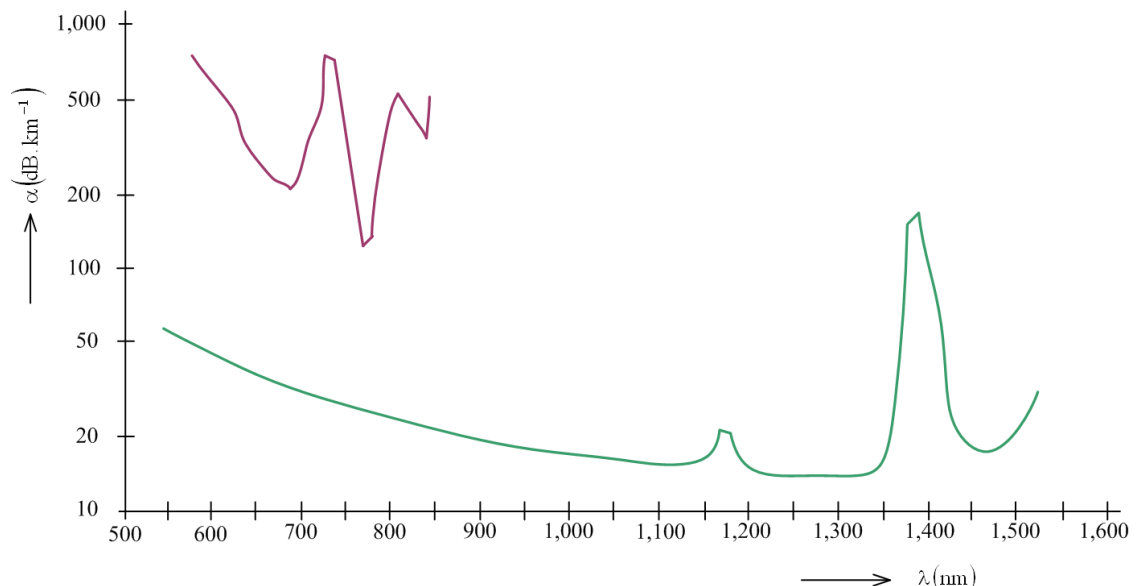
Vlákno typu G.655 s posunutou nenulovou disperzí (NZ-DSF, *Non Zero – Dispersion Shifted Fiber*) jsou optimalizována pro přenosovou funkci v pásmu 1550 nm. Tato vlákna se dnes používají především pro dálkové optické sítě a na rozdíl od vlákna typu G.653 nemají nulovou disperzi pro vlnovou délku 1550 nm. Malá nenulová disperze je nutná pro zamezení projevů vedlejších nelineárních efektů. Tento typ vlákna je určen k provozu hustého vlnového multiplexu a pro vysoké přenosové rychlosti [22].

Vlákno typu G.656 s posunutou nenulovou disperzí (NZ-DSF, *Non-Zero Dispersion Shifted Fiber*) jsou optimalizována pro přenos v oblasti vlnových délek 1460-1625 nm. Tato vlákna jsou určena pro systémy vlnového multiplexu DWDM a CWDM. V pásmu *S* umožňují u systému DWDM až 40 kanálů. Maximální chromatická disperze je stanovena od 2 do 14 ps.nm⁻¹.km⁻¹, maximální polarizační 0,20 ps/ $\sqrt{\text{km}}$ [22].

Jak je patrné z tohoto přehledu, použitím jakéhokoliv jednovidového vlákna by bylo měření vystaveno zkreslením díky přenosu pouze určitého úzkého spektra záření. Předem nelze odhadnout charakter vlnových délek emitovaného záření. Použití jednovidového vlákna tedy není možné. Mnohavidová jsou svým přenosovým charakterem velmi podobná jednovidovým, potenciální možnost využití skrývají pouze vlákna určená pro vlnový multiplex s velkým počtem kanálů (WDM), nebo polymerová vlákna uvedená dále. Charakteristika vlákna pro vlnový multiplex je v oblasti viditelného záření a v části ultrafialového plochá, nezasahuje však do oblasti infračervené (teoretický předpoklad je větší podíl infračervených složek záření).

Polymerové vlákna

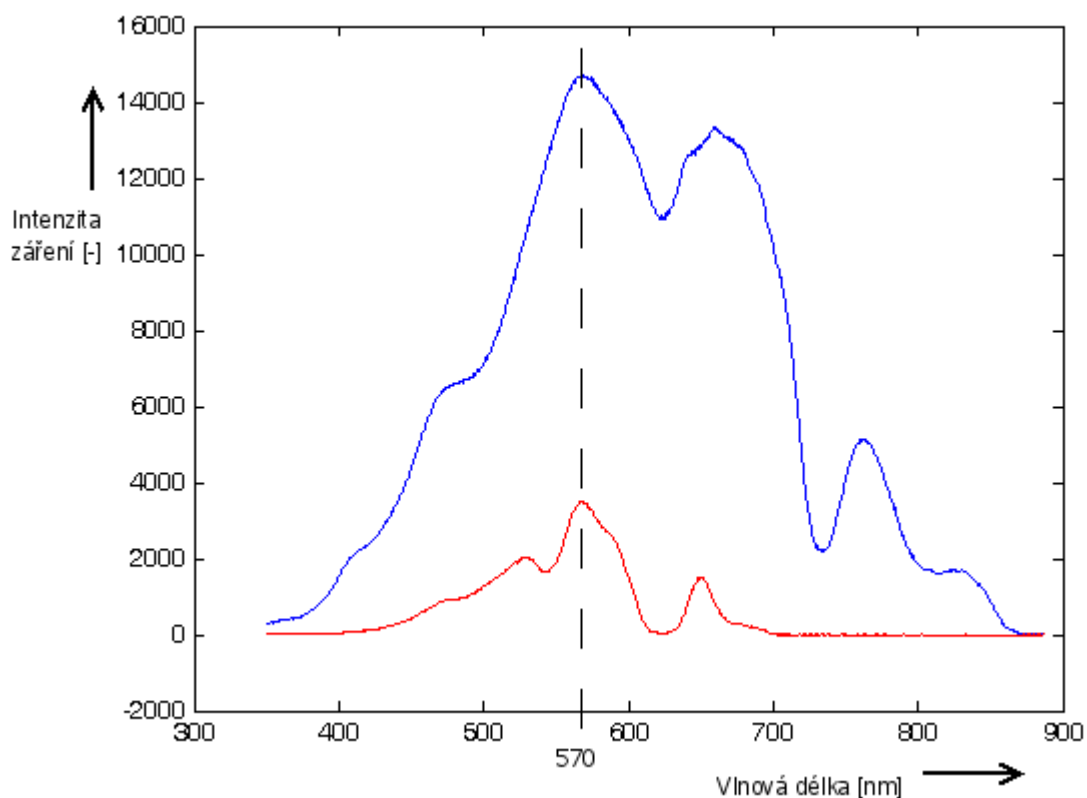
Současně s rozvojem přenosu SI vláknem byla snaha uskutečňovat i přenosy po vláknech z umělých hmot. Průběh útlumu na vlnové délce těchto vláken udává obrázek 31. Křivka s vyšší hodnotou odpovídá roku 1990 s nižším útlumem současného stavu vývoje. Je patrné, že nově vyráběná polymerová vlákna mají nejen nízký útlum, ale i dostatečně plochou útlumovou charakteristiku pro vlnové délky od 600 nm do 1350 nm. Vyšší útlum těchto vláken oproti křemíkovým se neprojeví při délce vlákna do několika desítek cm, což odpovídá vzdálenosti měřicího ramena od fotonásobiče. Současně se u polymerových vláken podařilo i zvýšit odolnost těchto vláken k teplotě. Současná vlákna odolávají hodnotám 200 až 300 °C [22].



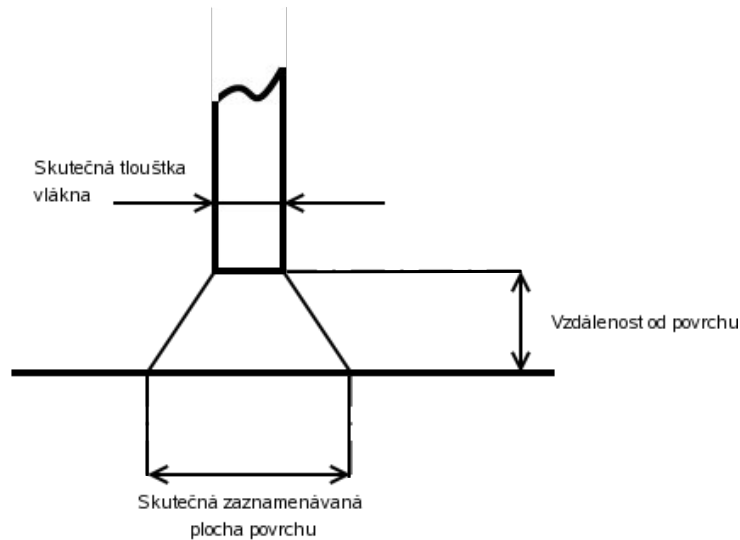
Obr. 31: Závislost útlumu polymerových vláken na vlnové délce [22]

Polymerové vlákno modulárního simulačního systému Optel

Pro měření bylo vybráno polymerové vlákno z modulárního simulačního optického systému Optel, vhodnost volby byla ověřena měřeními jeho základních charakteristických vlastností. Jedná se o předem nakonektorovaná vlákna různých délek od 0,5m do 4m, jednou z vlastností těchto vláken je také větší průměr. To má výhodu ve větší zabírané šířce, která ovlivňuje množství zachycené energie záření, což způsobuje vyšší úroveň záření na vstupu fotonásobiče, omezuje však rozlišovací schopnost měřicího pracoviště. Prozatím budeme považovat rozlišovací schopnost měřicího pracoviště za dostatečnou.



Obr. 32: Stanovení měrného útlumu vlákna z výstupních intenzit záření - délka vlákna 1m (modrý průběh), 50m (červený)



Obr. 33. Tloušťka vlákna vs. skutečná tloušťka

Do skutečného rozlišení se negativně promítne i numerická apertura. Vláknem je nutno umístit nad plochu článku v definované vzdálenosti aby nedošlo k poškození povrchu článku a řezu vlákna. Vzdálením vlákna od zdroje způsobí zvětšení snímané plochy tak, jak je naznačeno na obr. 33. Tomuto faktu je nutné přizpůsobit reálný krok při snímání povrchu článku.

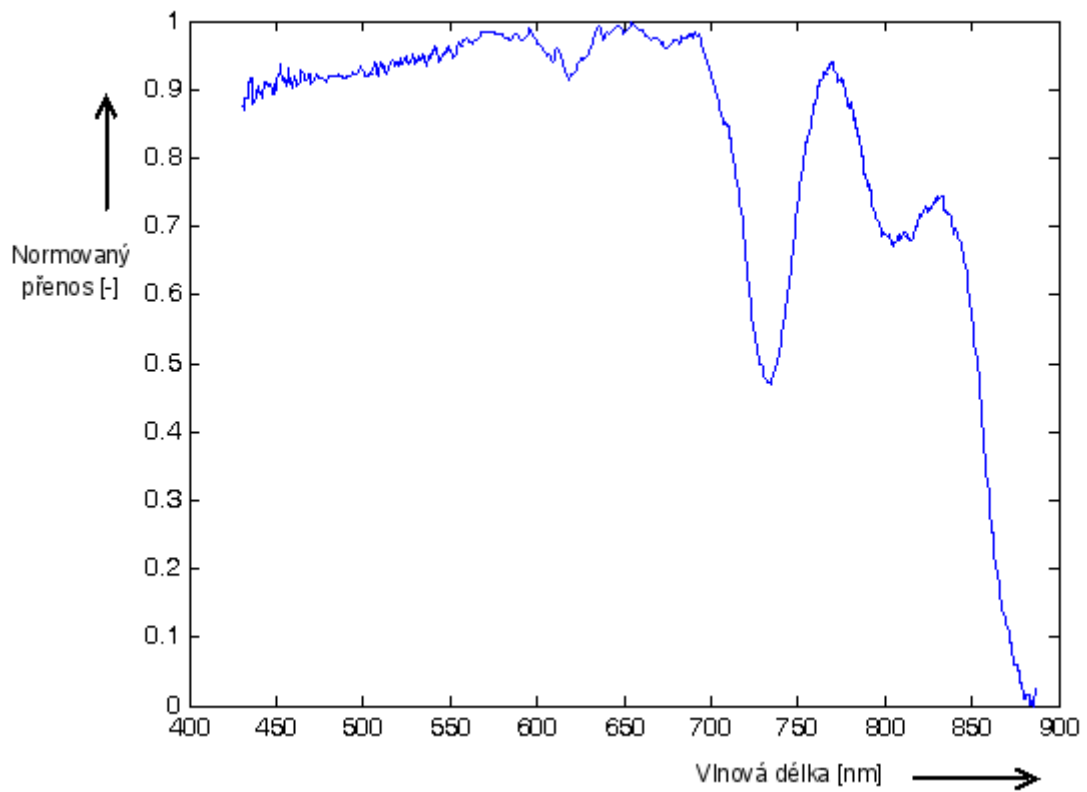
Přenosová charakteristika vlákna byla měřena pomocí spektrometru. Z důvodu absence ideálního spektra zdroje záření byla použita porovnávací metoda, kdy je změřeno spektrum reálného zdroje záření, spektrum po průchodu vlákem, posléze dojde k odečtení spektra vycházejícího z vlákna od spektra zdroje a je získána přenosová charakteristika, tak je dále podělením nejvyšší hodnotou normována (obsahuje hodnoty od 0 do 1). Tato normovaná charakteristika je zobrazena na obrázku 34. V celém průběhu mimo jediného výrazného poklesu na vlnové délce 730 nm je plochá, nezakresluje tedy významně amplitudy přenášených záření o různých vlnových délkách.

Další ověřovanou vlastností je hodnota měrného útlumu. Opět byla provedena porovnávací metoda, na obrázku 32 jsou zobrazeny závislosti intenzit výstupního záření z vlákna na vlnové délce pro dvě různé délky vlákna, červená křivka pro délku 50 m a modrá pro délku 1 m. Pro odečtení útlumu byla zvolena vlnová délka 570 nm. Pak je útlum vlákna roven 0,2866 dB/m. Hodnoty na ose y na obrázku 35 jsou bezrozměrné, udávají pouze počet elementárních nábojů na CCD čidlu spektrometru získaných za dobu integrace.

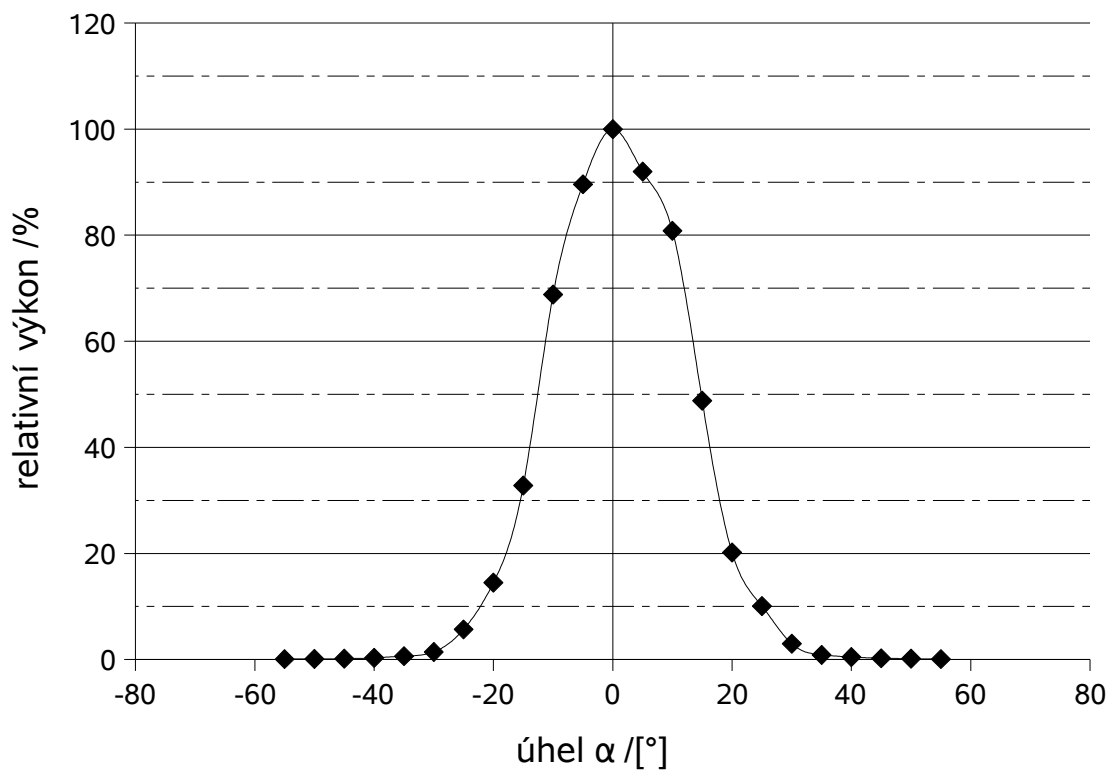
Jako poslední byla měřena numerická apertura. Pro vázání trubice fotonásobiče s vlákem není třeba s ní uvažovat, avšak pro úvahu uvedenou na obrázku 33 je nutno ji změřit. Z numerické apertury a vzdálenosti od povrchu se určuje skutečná snímaná plocha povrchu solárního článku. Na obrázku 35 je uvedena závislost relativního výkonu záření na úhlu odchýlení od osy vlákna. Pro pokles na 5% je numerická apertura rovna 0,48 při polovině úhlu θ rovné 28,5°. Průměr skutečně zaznamenávané plochy povrchu solárního článku lze vypočítat podle vzorce:

$$\text{Skutečná tloušťka} = \text{tloušťka vlákna} + 2 \cdot \tan(\theta) \cdot \text{vzdálenost od povrchu.} \quad (4)$$

Při průměru použitého vlákna 1 mm a jeho vzdálenosti od povrchu rovné 1 mm je průměr skutečné tloušťky roven 2,0859 mm.



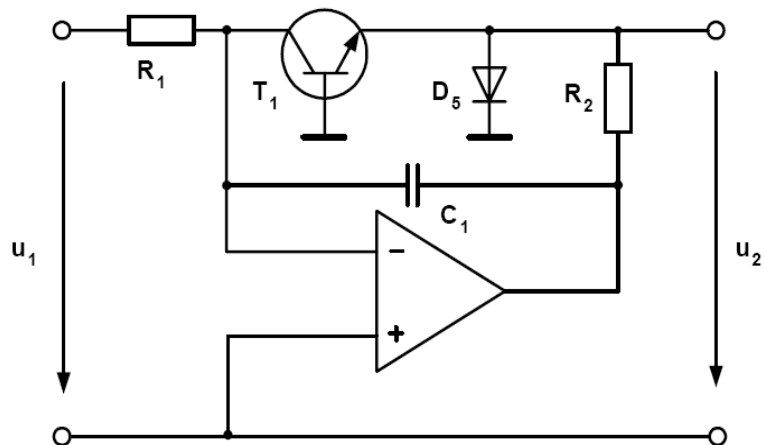
Obr. 34: Přenosová charakteristika vlákna Optel



Obr. 35: Naměřená numerická apertura

3.2.2 Logaritmický zesilovač

Při měření velkého dynamického rozsahu hodnot napětí, kde nízké hodnoty nesou velkou míru informace o záření, je vhodné celý rozsah převést na jeho logaritmus. Malé hodnoty vstupního napětí jsou převedeny na vyšší, rozdíl mezi vyššími hodnotami nevyvolá velkou změnu výstupní hodnoty napětí. To zajistí snížení vlivu kvantovacího šumu A/D převodníku na měřený signál. Po převodu je nutné provést inverzní převod hodnot pomocí exponenciální funkce. To již lze zajišťovat programově. Funkce logaritmu lze v analogové cestě realizovat logaritmickým zesilovačem. Možný způsob realizace je uvede na obr. 36 .

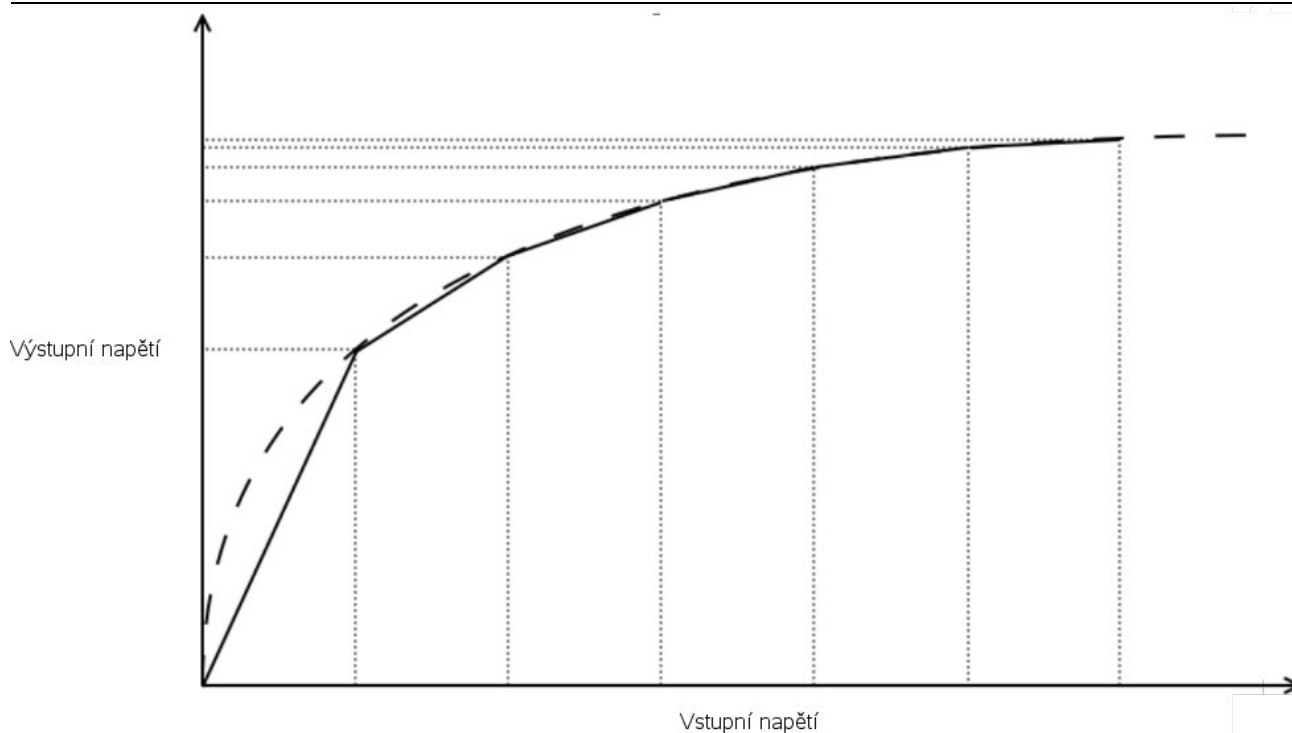


Obr. 36: Logaritmický zesilovač

Využívá se zde přechodu emitor-báze bipolárního tranzistoru, který má v určitém poměrně širokém rozmezí logaritmickou ampérvoltovou charakteristiku. Je-li zapojen do zpětné vazby OZ, je získán logaritmický převod. Pokud by byl tento přechod zapojen místo rezistoru R1, byla by převodní funkce exponenciální.

Další možnost realizace logaritmického převodníku využívá několik kaskádně zapojených zesilovacích stupňů, každý s jiným zesilovacím činitelem. Řídící obvod zapne konkrétní zesilovací stupeň v závislosti na vstupním napětí, ostatní mají v neaktivním stavu nastaveno zesílení rovno 1. Křivka převodu tak není ideální, skládá se z lineárních částí, každá odpovídá jednomu zesilovacímu stupni. Zvýšením počtu zesilovacích stupňů se zvýší přesnost převodu na úkor rychlosti (doba přepínání zesilovacích stupňů).

Na obrázku 37 je uvedena převodní charakteristika logaritmického převodníku s kaskádovými zesilovacími stupni. Čárkovaně je vyznačena ideální logaritmická křivka. Křivka převodníku je rovna ideálním hodnotám pouze v bodech změny zesilovacích stupňů. V ostatních případech vykazuje chybu, k největší dochází při nízkých hodnotách vstupního napětí. Zde malá změna vstupního napětí vyvolá velkou změnu výstupního. To má za následek zkreslení nejmenších hodnot. Naopak pro nejvyšší hodnoty lze konstatovat, že převodník má zanedbatelnou chybu převodu. Jak bylo již výše zmíněno, chybu lze snížit zvýšením počtu zesilovacích stupňů.



Obr. 37: Převodní charakteristika kaskádového logaritmického zesilovače

Integrovaný obvod AD8307A

Jako vhodný integrovaný logaritmický převodník byl zvolen obvod AD8307A. Jeho funkce je založena na principu šesti přepínaných zesilovacích stupňů, každý s odstupem 14,3 dB. Obvod se vyznačuje velkým dynamickým rozsahem, přičemž mezní frekvence je dostatečná (500 MHz). Jedná se o velmi stabilní monolitický demodulační logaritmický zesilovač založený na technice progresivní komprese. Dynamický rozsah 92 dB s chybou +/-0,3 dB, nebo 88 dB s chybou +/-1 dB na frekvencích do 100 MHz. Minimální frekvence není omezena, diferenciální vstup obvodu umožňuje využití obvodu pro převod střídavého signálu i stejnosměrného s offsetem. Vstupní offset je možno potlačit pomocí vstupního pinu OFS. Tím se řídí smyčka kompenzace uvnitř obvodu.

Následuje přehled nejdůležitějších parametrů obvodu:

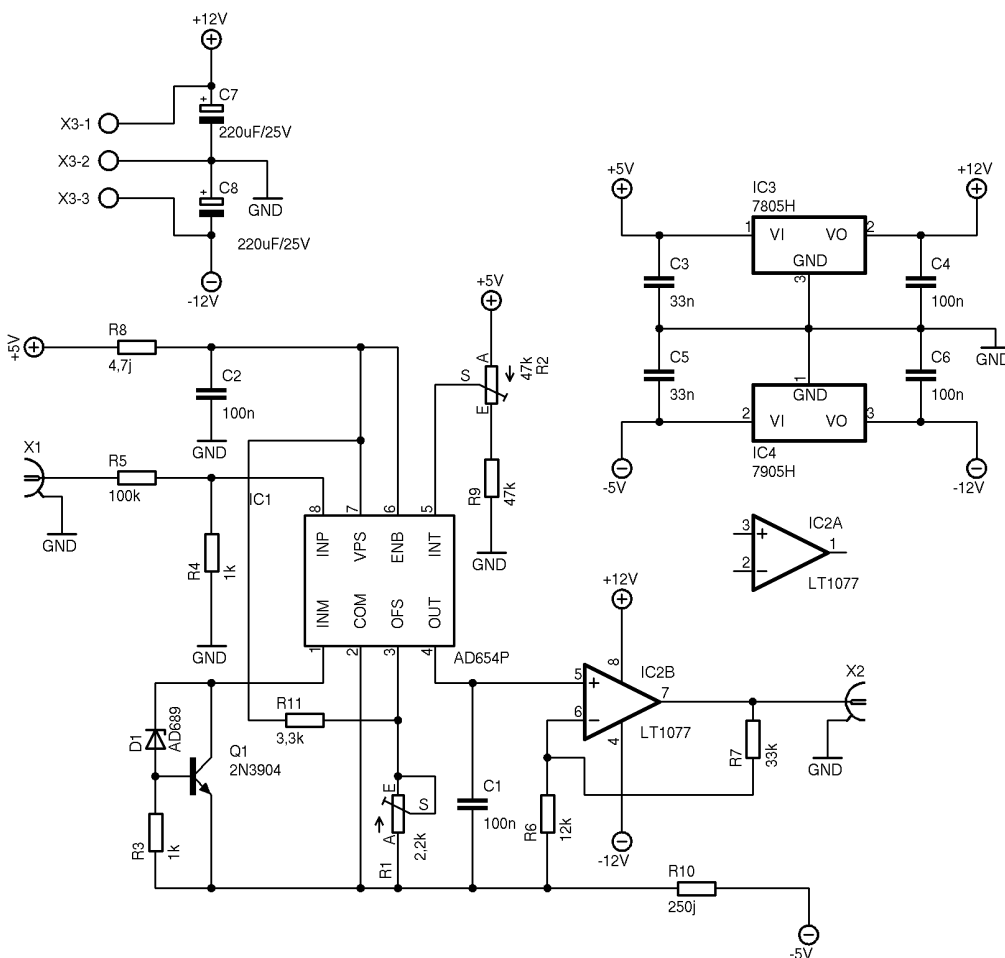
Tabulka 2: Parametry obvodu AD8307A

Vstupní rozsah (pro 50Ω)	-72dBm až 16dBm
Chyba převodu (f<100MHz)	+/- 0,3dB
Chyba převodu (f=500MHz)	+/- 0,5dB
Převodní poměr	25mV/dB
Časová odezva	400ns
Vstupní napětí	-0,3V až Vcc-1
Vstupní proud	max. 25μA
Napájecí napětí	max. 7,5V
Napájecí proud	10mA

Výstup je tvořen dostavitelným proudovým zrcadlem s nominálním proudem $2 \mu\text{A/dB}$. Tento proud protéká kalibrovaným interním rezistorem o hodnotě $12,5\text{k}\Omega$. Tím je tvořen základní převodní poměr 25mV/dB . Vstupní pin s označením INT dovoluje přesně dostavit tento poměr pro konkrétní zapojení v rozsahu 15mV/dB až 100mV/dB . Pokud je tedy vyžadována vysoká přesnost převodu je nutné tento vstup zapojit. Bez jeho zapojení je zaručen poměr v rozsahu, který uvádí tabulka 2.

Logaritmický zesilovač

V zapojení logaritmického zesilovače, uvedeného na obrázku 38, je použito doporučené zapojení integrovaného logaritmického převodníku (AD8307A) pro stejnosměrně vázaný vstup. Vstupní signál je přiveden na konektor X1. Vstupní impedance, rezistor R1 a R5 tvoří dělič napětí s poměrem přibližně 1:50. Vstupní kapacita je v řádu pF, pro uvažované frekvence nižší než 1MHz ji lze zanedbat. Přesnou hodnotu zesílení převodníku lze nastavit odporovým trimrem R2. Jak již bylo uvedeno výše, napětím na vstupu INT obvodu AD8307A je nastavován potřebný převodní poměr. Pro stejnosměrné vázání vstupu je nutné přivést záporné předpětí 2V na záporný napájecí vstup. Tím je docílena správná funkce prvního zesilovacího stupně. Stabilizované napájecí předpětí zajišťuje integrovaná reference AD689 společně s tranzistorem Q1. Offset je kompenzován odporovým trimrem R1. Nastavuje se při zkratování vstupu. Otáčením trimru R1 je dosaženo nulové napětí na výstupu obvodu – OUT. Kladné napájecí napětí je rovno 5V.



Obr. 38: Schéma logaritmického zesilovače

Výstup z převodníku je veden na operační zesilovač IC2B (LT1077). Zde je signál dále zesílen 3,75x, což určují rezistory R6 a R7 ve zpětné vazbě. Vztah pro napětové zesílení je:

$$A_u = \frac{-R6}{R7}, \quad (5)$$

Operační zesilovač pracuje v neinvertujícím režimu, kdy jeho vstupní impedance je velmi vysoká. Výstup je veden na výstupní konektor X2. Druhá polovina zesilovače je nevyužita.

Napájecí napětí +12V a -12V, přivedené na svorky X3-1 až X3-3 napájí operační zesilovač a vstupují do lineárních stabilizátorů napětí, které vytvářejí potřebných +5V a -5V pro napájení převodníku. Předpokladem je dostatečně vyhlazený průběh napájecího napětí na vstupních svorkách.

Operační zesilovač LT1077

Integrovaný operační zesilovač LT1077 se vyznačuje velmi nízkou spotřebou, optimalizací pro nesymetrické napájení 5V a symetrické +/-15V a nízkým teplotním driftem. Požadavky na operační zesilovač v zapojení logaritmického zesilovače jsou symetrické napájení, nízký šum, nízký vstupní offset a malý teplotní drift, což splňuje operační zesilovač typu LT1077. Následují charakteristické parametry LT1077:

Tabulka 3: Charakteristické parametry LT1077

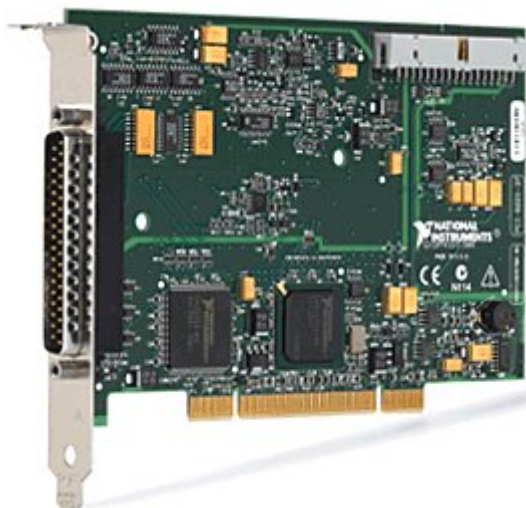
Maximální napájecí napětí	+/-22V
Offset vstupních napětí	10μV
Proudový offset	0,06nA
Vlastní šum vstupů	2,5pA
Vstupní impedance (neinvertující zapojení)	6GΩ
CMMR	105dB
Šířka přenosu	250kHz
Přeběh	0,08V/μs
Proudový odběr	48μA

Výhodou OZ je také nízký odběr proudu ze zdroje, který umožní při provozu z akumulátorů delší dobu měření.

3.2.3 Měřicí karta

Výběr měřicí karty bylo provedeno z nabídky firmy National Instruments, požadavky jsou alespoň 2 analogové výstupy s rozlišením 12bitů, jeden analogový vstup s rozlišením 16bitů. Tyto kritéria splňuje karta s označením PCI-6221 určená do PCI sběrnice s následujícími parametry:

- 16 analogových vstupů s bitovým rozlišením 16bit a vzorkovací frekvencí 250kS/s,
- 2 analogové výstupy s bitovým rozlišením 16bit a maximální frekvencí 833kS/s,
- 10-ti bitová vstupně/výstupní digitální sběrnice s 32 bitovými čítači a číslicovými komparátory pro spouštění čítačů ,
- korelovaný DIO (2 zdroje hodinového signálu o frekvenci 1MHz),
- výběr rychlé měření na úkor přesnosti a naopak,
- NI-DAQmx driver software pro NI LabVIEW SignalExpress interactive měřicí software,



Obr. 39. Měřicí karta PCI-6221

- samokalibrační technologie NI-MCal pro zvýšení přesnosti měření
- 6 DMA kanálů zvyšujících propustnost vnitřní sběrnice
- tři kvadraturní vstupy enkodéru
- volitelný rozsah analogových vstupů (+/-10V, +/-5V, +/-1V, +/-0,2V) pro každý vstup

Měřicí karta je podporována v operačních systémech

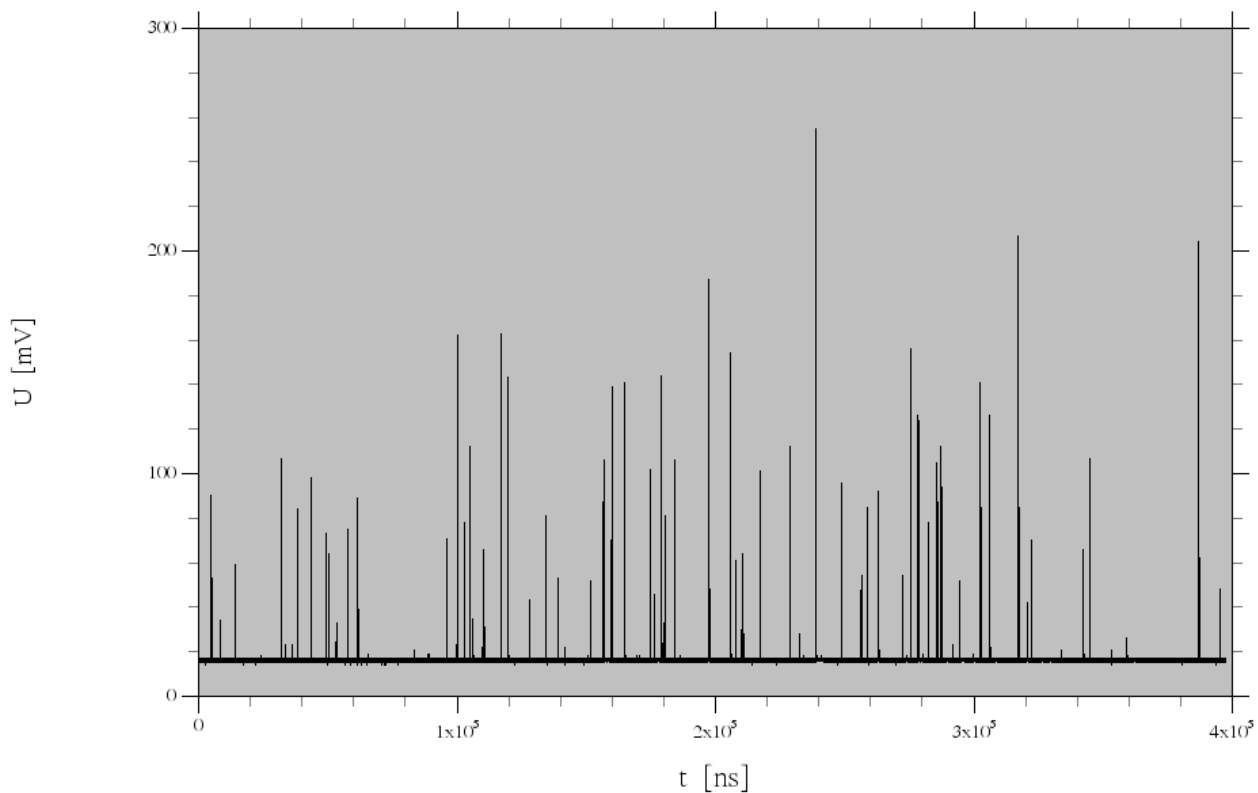
- Microsoft® Windows® Vista®/XP®/2000
- Mac OS X
- GNU/Linux

Výrobce doporučuje ovládací software LabVIEW, LabWindows/CVI, Measurement Studio, LabVIEW SignalExpress, podpora je i pro programovací jazyky ANSI C/C++, C#, Visual Basic .NET, Visual Basic 6.0. Právě programovací jazyky poskytují možnost vytvoření libovolného programu pro obsluhu měřicí karty, který může být přizpůsoben potřebám měření.

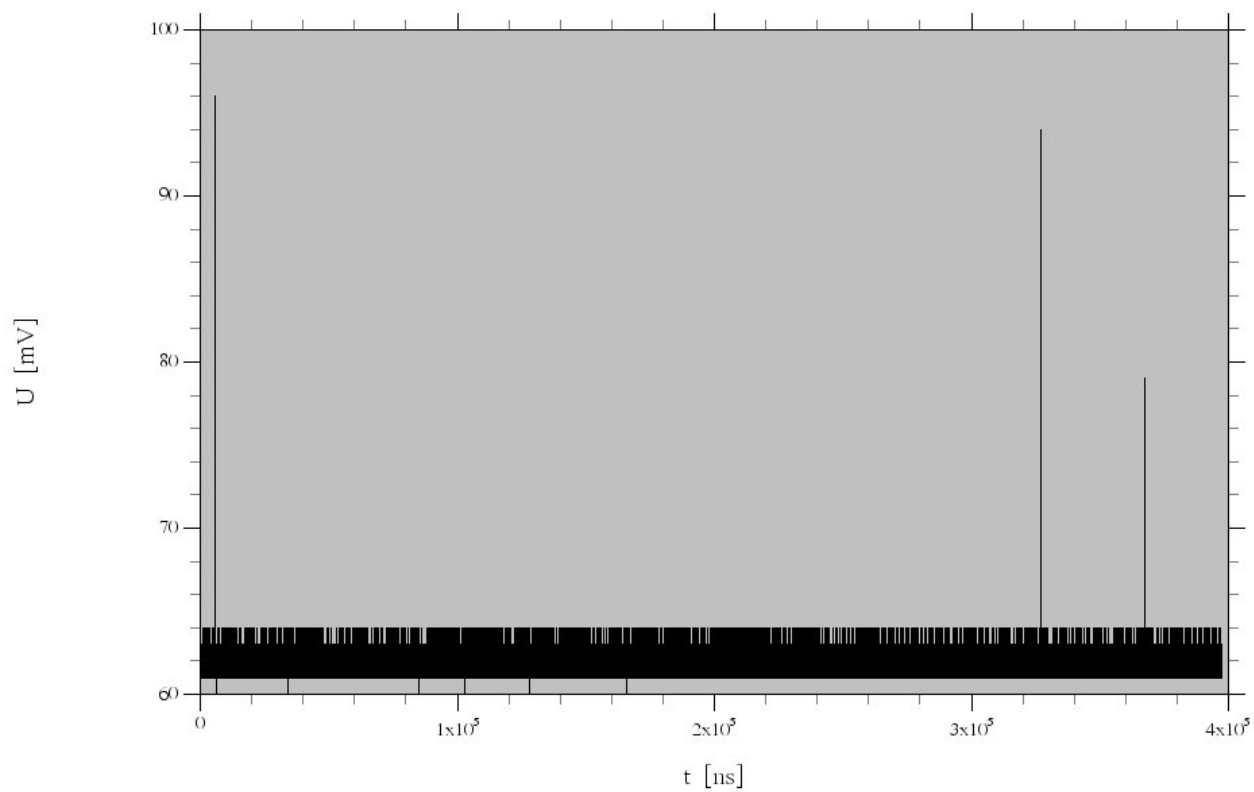
3.2.4 Snížení vlivu vlastního šumu fotonásobiče a zvýšení citlivosti

Prvními experimenty byl zjištěn velký vlastní šum měřicí cesty, který byl impulzního charakteru. Způsobuje maskování měřeného signálu s nízkou intenzitou. Při měření povrchu solárního článku dochází k potlačení více než 20% lokálních oblastí s emisí záření. V úvahu přichází vnikání denního záření do stíněného pracoviště, vlastní šum trubice fotonásobiče nebo vlastní šum elektroniky fotonásobiče. Bližším studiem vlastností trubice fotonásobiče bylo zjištěno, že fotokatoda je tvořena směsí kovů, blíže nespecifikované výrobcem, chová se však jako běžný kov po stránce překonávání výstupní práce z kovů vlivem teploty. Elektrony jsou tak uvolňovány a tvoří elektronový mrak nad fotokatodou. Stejně uvolnění elektronů z fotokatody způsobuje také dopadající kvantum záření. Uvolněné elektrony putují trubicí přes dynody, kde dochází k násobení množství elektronů (násobení) a dopadají na anodu. Výsledný proudový impulz koresponduje s množstvím uvolněných elektronů na fotokatodě. Ve výsledku pak nelze určit důvod vzniku konkrétního impulzu, zda byl způsoben temným proudem, či dopadajícím zářením. Se zvyšující intenzitou záření dochází ke zvyšování pravděpodobnosti, že daný impulz byl způsoben zářením. U měření podobných tomuto je nezbytné měřit co nejmenší intenzity záření. Do měřicí cesty je vložen útlum, tvořený optickým vláknem, vázáním optického vlákna (trubice fotonásobiče má snímací okénko o průměru jednotek cm, optické vlákno pouze desetiny mm), polarizačními filtry při měření spektra záření z lokálních oblastí, apod.

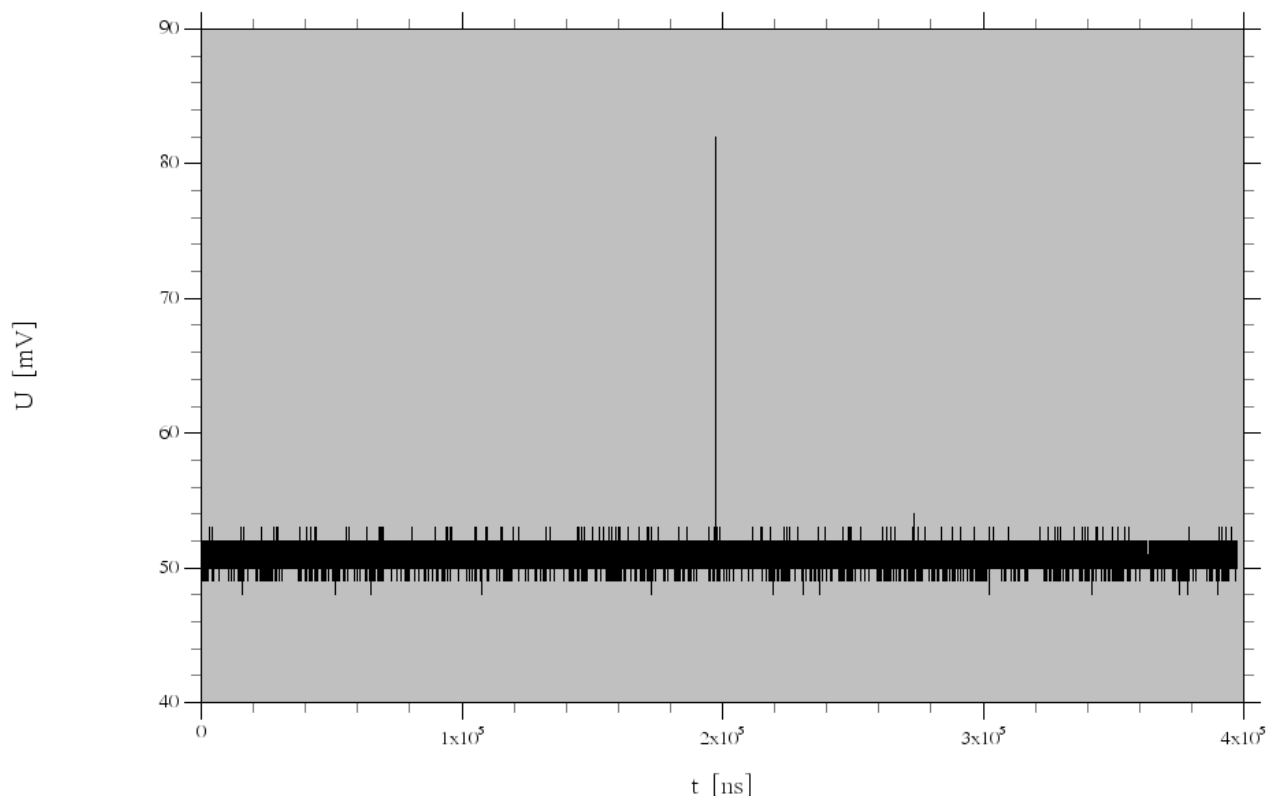
Jak již bylo uvedeno v kapitole 3.1.7, použití trubice není doporučeno pro teploty okolí vyšší než 75°C z důvodu exponenciálního nárůstu temného proudu. Při teplotě fotokatody rovné 10°C je tento proud 10^{-7} A, při nárůstu o dalších 10°C se však zdvojnásobuje. Temný proud způsobuje aditivní šum, který je závislý pouze na teplotě, svou velikostí tak určuje nejmenší možnou měřitelnou úroveň signálu.



Obr. 40: Časový průběh vlastního šumu měřicí cesty (teplota okolí trubice 26°C)



Obr. 41: Časový průběh vlastního šumu měřicí cesty (teplota okolí trubice $-4,5^\circ\text{C}$)



Obr. 42: Časový průběh vlastního šumu měřící cesty (teplota okolí trubice -24°C)

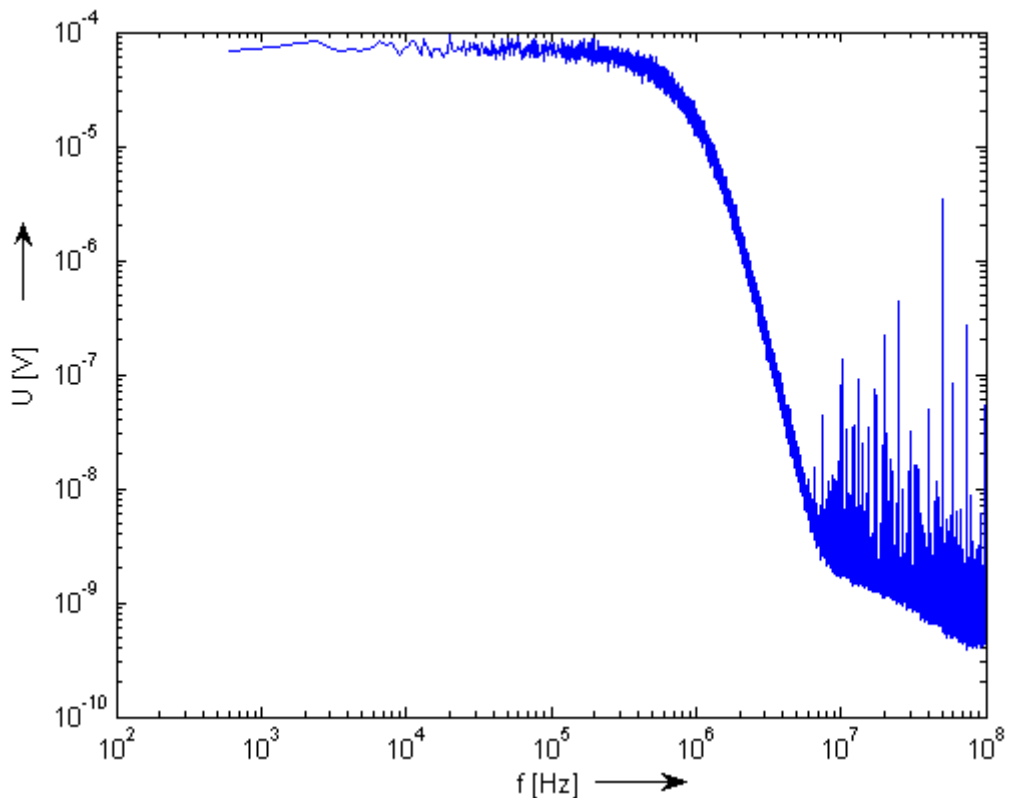
Na obrázcích 40 až 42 jsou uvedeny časové průběhy při nulové intenzitě vstupního záření (vlastní šum) pro tři různé velikosti okolní teploty trubice fotonásobiče. První průběh znázorňuje impulzní šum nechlazené trubice. Teplota okolí 26°C . Rozhodující je však teplota fotokatody, která má ještě o několik stupňů vyšší teplotu díky ztrátovému výkonu elektronky při provozu. Na průběhu z obr. 40 je možno pozorovat mnoho úzkých impulzů různé velikosti a náhodně rozprostřené, dosahující velikosti až 240mV . Pokud by impulzy byly rozprostřeny periodicky, bylo by možno vyloučit náhodný děj emise elektronů z fotokatody ze zdrojů rušení. Kolísání stejnosměrné složky mezi jednotlivými časovými průběhy není podstatné, poukazuje pouze na nastavení offsetu fotonásobiče.

Druhý časový průběh na obrázku 41 je poplatný pro chlazení trubice fotonásobiče na $-4,5^{\circ}\text{C}$. Počet impulzů výrazně poklesl, v celém průběhu jsou pouze tři, jejich velikost se zmenšila, maximální amplituda činí 36mV , což je pokles na méně než šestinu oproti předchozímu případu. Objevuje se zde také další typ šumu o vyšším kmitočtu, který v předchozím případě nebylo možno dost dobře odhalit. Šetřením bylo zjištěno, že jde o periodický signál s frekvencí 50Hz generovaný z elektronických obvodů fotonásobiče. Vliv tohoto rušení nebudeme v této chvíli uvažovat.

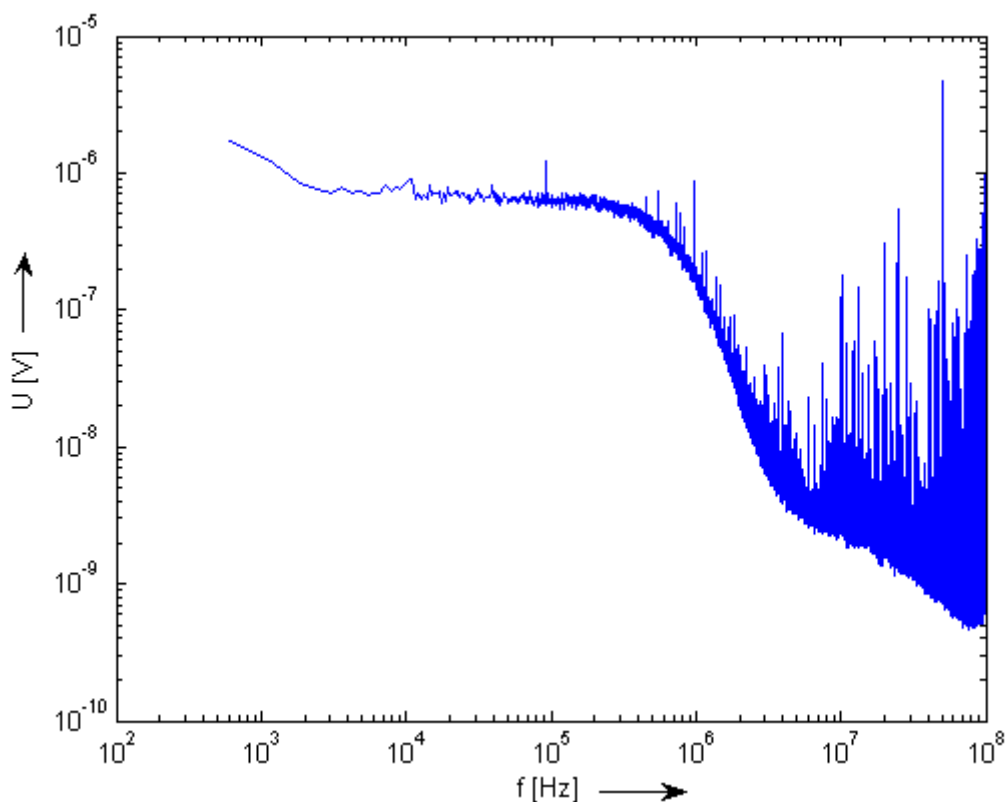
Při dalším snižování teploty trubice již nedochází k dalšímu výraznému poklesu temného proudu, jelikož se jedná o exponenciální závislost velikosti tohoto proudu na teplotě a v oblasti pod -2°C je změna již minimální. Částečně se však snižuje část rušivého periodického signálu výše uvedeného. Je to díky umístění části elektronických obvodů přímo do trubice fotonásobiče a při chlazení dochází také k odstínění obvodů. Celková amplituda periodického signálu se snížila přibližně na polovinu, zůstávají stále izolované impulzy s amplitudou rovnou původnímu periodickému signálu. Odpovídající časový průběh je uveden na obrázku 42.

Do výsledných naměřených dat se významně nepříznivě projevuje pouze temný proud, jehož následky jsou impulzy o výšce několikanásobně větší než je amplituda periodického šumu.

Dále byla provedena analýza celé problematiky ve frekvenčním spektru pomocí zpracování předchozího časového průběhu vzorkovaného osciloskopem rychlou fourierovou transformací (FFT) pro preciznější znázornění. Na obrázku 43 je uvedeno spektrum vypočítané ze 100 realizací časových intervalů stejné délky jako předchozí uvedené. To je z důvodu získání dostatečně dlouhé celkové realizaci pro kvalitní matematické zpracování spektra. To je při teplotě okolí trubice rovno 26° C konstantní od minimální frekvence až do 300kHz. Pak začne monotónně klesat. Frekvence vyšší než 10MHz není vhodné uvažovat, nenesou žádnou informaci a jsou způsobeny interferencemi ve spojovacích vodičích, čemu odpovídá také jejich nestálá velikost a nehladkost průběhu spektra v této oblasti.



Obr. 43: Spektrum signálu při teplotě 26° C



Obr. 44: Spektrum signálu při teplotě $-4,5^{\circ}\text{C}$

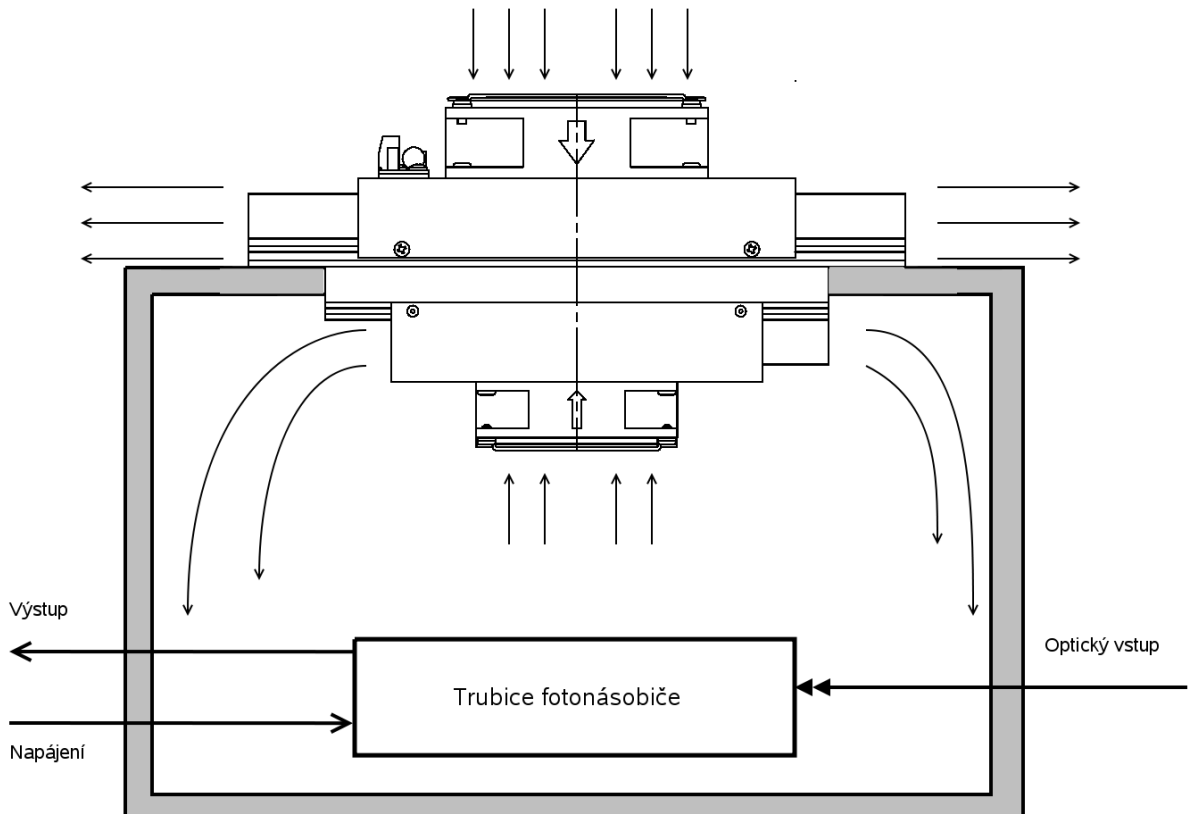
Důležitá je hodnota napětí v konstantní části spektra po proložení této části přímkou. Tato hodnota je rovna $7 \cdot 10^{-5}$ V. Druhou klíčovou hodnotou je frekvence konce linearitu. Průběh má posléze klesající tendenci. Spektrum odpovídá typickému geračně-rekombinačnímu signálu, které má také část konstantní a část lineárního poklesu.

Chlazením trubice fotonásobiče dochází k omezení počtu impulzů v časové oblasti, tomu odpovídá snížení napětí v konstantní části spektra po proložení této části přímkou na hodnotu $6 \cdot 10^{-7}$ V. Oproti předchozímu je to snížení více než o dva řády, což znamená možnost měření signálů s intenzitou o dva řády nižší než v případě s nechlazenou trubicí. Spektrum je tvarově podobné předchozímu, frekvence zlomu je stejná, jak ukazuje obrázek 44.

Chlazení trubice fotonásobiče

K chlazení trubice fotonásobiče byla pro zkoumání vlivu teploty na velikost temného proudu vyrobena chladicí komora s regulací teplot v rozsahu 25°C až -25°C . Jak již bylo uvedeno výše, měřením bylo zjištěno, že pro snížení vlivu temného proudu je dostačující chlazení trubice na teplotu -5°C . Nižší teplota nemá velký vliv na další výrazné snižování temného proudu, navíc působí velké prodlevy při měření. Vždy je nutné teplotu trubice stabilizovat, aby byla konstantní po celou dobu měření.

Pro účely měření bylo zvoleno chlazení pomocí peltierova článku. Peltierův článek funguje na základě Peltierova jevu, který objevil v roce 1834 Jean C. Peltier. Při průchodu proudu obvodem se dvěma rozdílnými vodiči zapojenými v sérii (většinou vizmut a tellurid), jedna z jejich styčných ploch se ochlazuje a druhá zahřívá. Maximální výkon peltierova článku se definuje při nulovém rozdílu teplot obou vodičů jako tepelný výkon na „chladné“ straně. Tepelný výkon na druhém vodiči je povýšen o vlastní spotřebu článku. Druhou charakteristickou hodnotou je maximální rozdíl teplot. Pro každou dvojici různých materiálů je odlišná.



Obr. 45: Termobox pro chlazení

Výhody peltierova článku jsou:

- cena,
- malé rozměry,
- malá tepelná setrvačnost,
- dosažení teplot až -20°C ,
- snadná regulace výkonu,
- tichý provoz,
- teoreticky neomezená životnost,
- možnost chlazení velmi malých ploch (100mm^2).

Naopak mezi nevýhody patří:

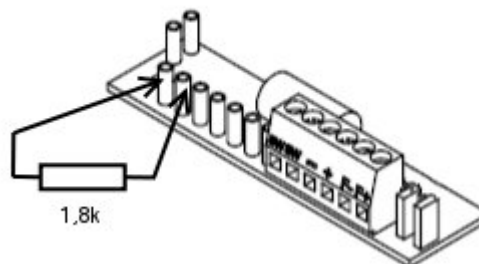
- malá účinnost (menší než u tepelných čerpadel),
- vyšší cena v případě vyšších výkonů

Peltierovy články jsou dostupné v mnoha provedeních. Nejdostupnější jsou nezapouzdřené. Jedná se o velkoplošné bimetalové spojení s vyvedenými napájecími přívody. Jsou běžně k dostání od velikostí jednotek cm^2 do jednotek dm^2 pro různá napájecí napětí – 3,3V, 5V, 12V, 24V apod. Druhou možností provedení článků je zapouzdření do modulu. Jedná se po mechanické stránce o mezistupeň mezi nezapouzdřeným článkem a výslednou konstrukcí. Moduly jsou rozděleny do několika skupin podle média pro přenos tepelné energie. Na každé straně článku může být realizován přenos libovolným typem média: **vzduch**, **kapalina**, **kontakt**. Je tedy možno vybrat modul pro konkrétní účel použití. V případě chlazení trubice fotonásobiče byla zvolena varianta provedení modulu vzduch-vzduch s následujícími parametry:

Tabulka 4: Parametry použitého peltierova článku

Název	<i>Supercool AA-100-24-22-00-00</i>
Provedení	<i>kaskádní</i>
Chladicí výkon při $dT=0^\circ\text{C}$ [W]	<i>102 W</i>
Jmenovité napájecí napětí [VDC]	<i>24 V_{DC}</i>
Maximální napájecí napětí [VDC]	<i>30 V_{DC}</i>
Jmenovitý napájecí proud [A]	<i>5,6 A</i>
Maximální inicializační proud [A]	<i>6,6 A</i>
Regulátor teploty	<i>ano</i>
Rozsah regulace teploty	<i>0°C až 20°C</i>
Rozsah provozní teploty	<i>-10°C až 50°C</i>
Teplotní pojistka	<i>85°C</i>
Hmotnost	<i>4,0 kg</i>

Modul je opatřen z každé strany profilovaným chladičem. Je vsazen do tepelně izolovaného boxu – obr. 45. Cirkulace studeného vzduchu uvnitř termoboxu je zajištěna osazeným ventilátorem, vzduch obtéká trubicí fotonásobiče. Výrobce udává u tohoto typu maximální výkon 102W, maximální rozdíl teplot 43°C . Pro třetinový výkon může být dosažitelný rozdíl teplot maximálně 30°C , což zcela dostačuje. Modul je opatřen regulátorem teploty, kterým lze nastavit výstupní teplotu v rozmezí 20°C až 0°C . Pro měření je nutné tento regulátor vyřadit z činnosti z důvodu dosažení nejnižší možné teploty. Z tohoto důvodu byl odpojen termistor regulátoru a je nahrazen pevným rezistorem s hodnotou $1,8\text{k}\Omega$, zobrazeno na obr. 46.



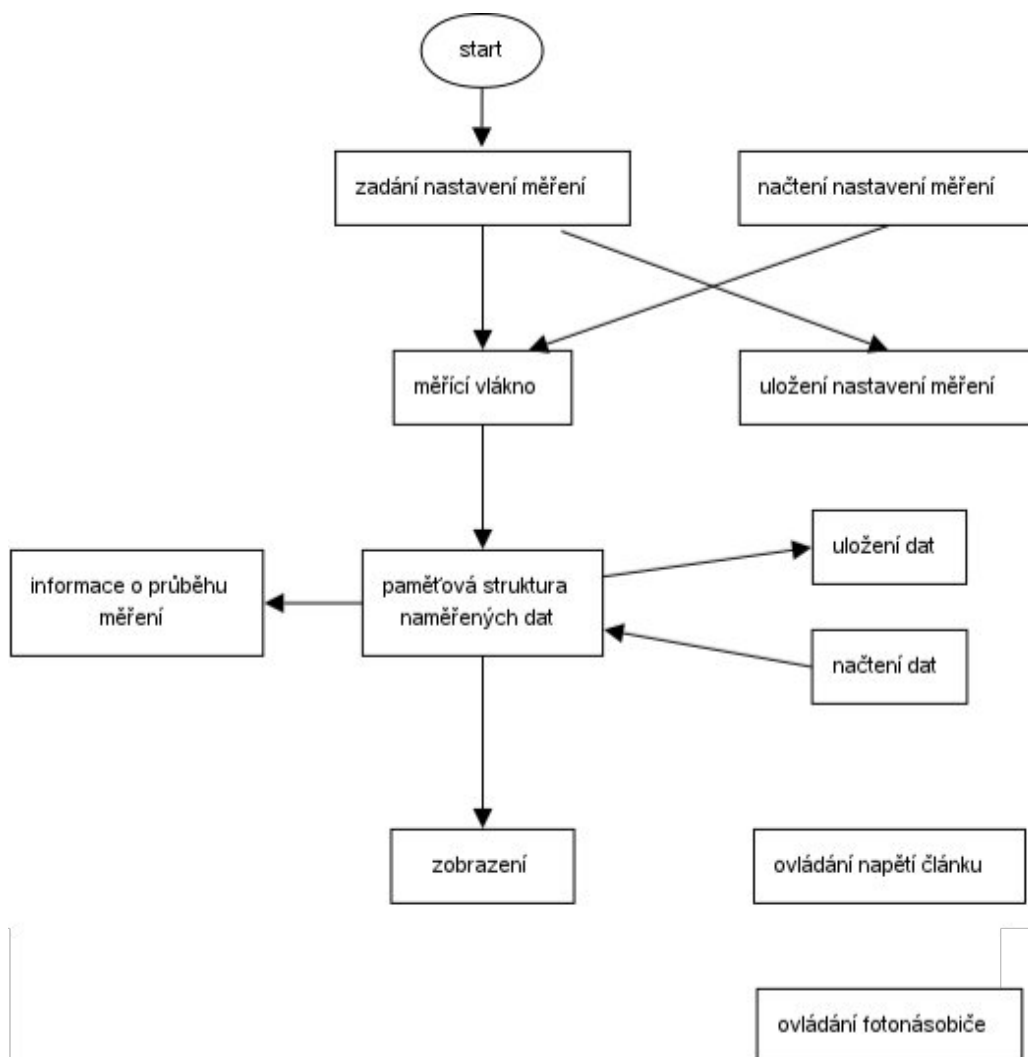
Obr. 46: Odpojení teplotního regulátoru

Hodnota odporu rezistoru odpovídá odporu vestavěného termistoru při teplotě 30°C, při jakékoliv nastavené teplotě regulátorem nedojde k odpojení peltierova článku důsledkem dosažení požadované teploty, odpor rezistoru zůstává konstantní a nezávislý na teplotě. Jistou možností by bylo odpojení celého regulátoru (umístěn na horní straně modulu), tím by byly odpojeny i jistící obvody, zabráňující tepelnému přetížení peltierova článku, přepět'ová ochrana aj.

3.2.5 Měřicí program

Program pro měření emise z povrchu solárních článků realizuje obsluhu měřicí karty, ovládání trojitého zdroje napětí pro volbu závěrného napětí na článku a pro volbu stavu fotonásobiče – zapnuto/vypnuto. Zároveň zpracovává naměřená data, umožňuje jejich jednoduchý management. Po naměření potřebných dat lze zobrazit výsledky. Další podstatnou funkcí programu je management měřicích nastavení, což je veškeré nastavení, které je třeba definovat před zahájením měření, tyto nastavení dokáže uchovávat pro pozdější využití.

Z důvodu co nejvyšší nezávislosti na nativním měřicím prostředí, operačním systému a pro vysokou variabilitu výsledného měřicího programu byl vybrán jazyk C++ a s ním spojené programovací prostředí Borland Builder C++ verze 6.0.



Obr. 47: Struktura měřicího programu

Na obrázku 47 je zobrazena struktura měřicího programu. Program je rozdělen na několik základních částí. Jádrem procesu získávání a interpretace dat je měřicí vlákno. Stará se o obsluhu měřicí karty podle algoritmu se vstupem daným měřicím nastavením, vykonává základní zpracování a ukládání do paměti, nezávisle na běhu zbylé části programu. Nezávislost je volena z důvodu vyššího komfortu obsluhy a izolování běhu měření, což má za následek plynulý běh obsluha může navíc při probíhajícím měření vykonávat obslužné práce managementu nebo zobrazovat již naměřená data.

Další samostatnou částí je zpracování a zobrazení výsledků. Využívá samostatný algoritmus zpracování, nezasahující do již naměřených dat. Lze zobrazit data jednotlivě i se zohledněním vůči jiným měřením. Navíc v části zobrazení jsou vypočítávány charakteristické údaje, vypovídající o povaze naměřených dat po statistické stránce. Hlavním spojujícím článkem celého programu je paměťová struktura naměřených dat. V ní jsou střídána data, následně zpřístupněna ostatním částem programu, které s ní pracují. Jsou definovány procedury pro načítání a ukládání dat z paměťové struktury naměřených dat do souborů. Po ukončení programu jsou takto zapsaná data uchována a je možno je načíst při dalším spuštění programu pro zobrazení či porovnání s nově naměřenými daty.

Před započítím měření je nutno definovat měřicímu vláknu postup měření a určit základní nastavení. Tato informace je získávána načtením souboru s nastavením nebo zadáním uživatele přímo v grafickém rozhraní programu. Opět toto nastavení lze uchovat uložením do souboru s nastavením.

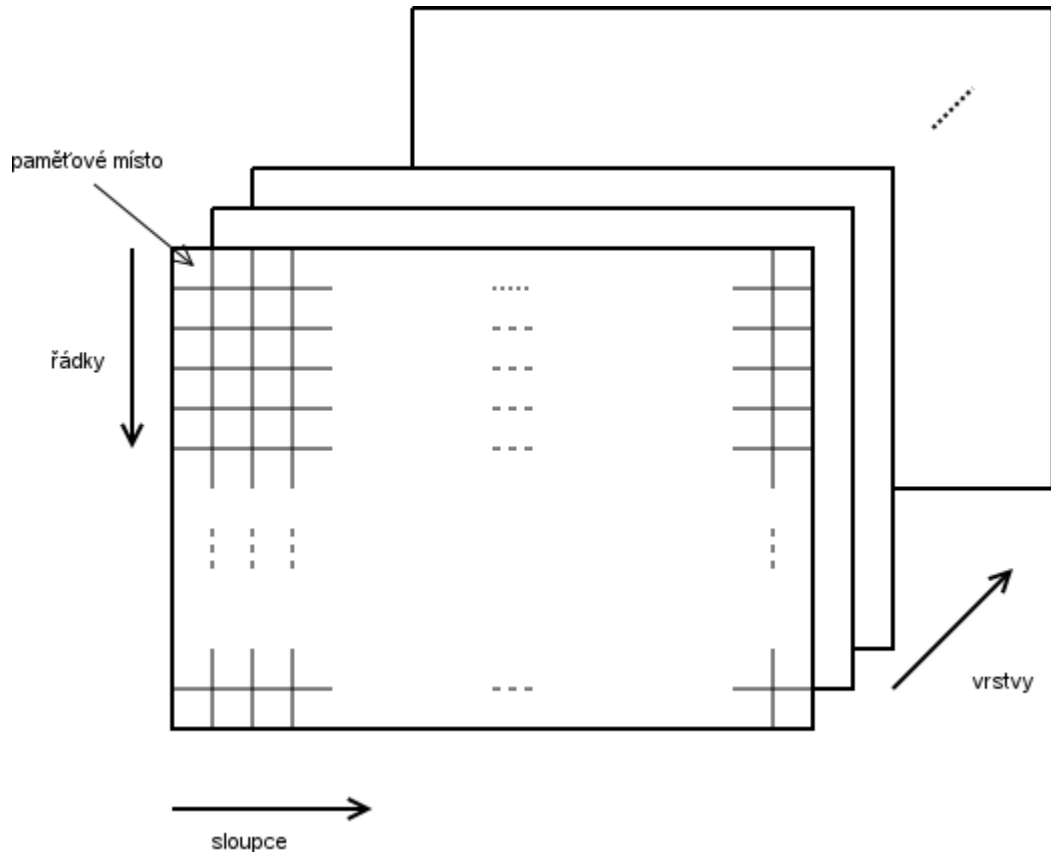
Dalšími doplňujícími částmi programu jsou:

- ovládání napětí článku – nastavuje napětí na článku a čte hodnotu proudu
- ovládání fotonásobiče – pomocí zdroje napětí řídí vstup fotonásobiče „povolení k funkci“
- zobrazení informací o průběhu měření – aktuální naměřená hodnota a postup měření v procentech

Paměťová struktura naměřených dat

Jak již bylo řečeno základní vazbou programu je paměťová struktura naměřených dat, do které jsou ukládána naměřená nebo načtená data. Tato struktura je dynamicky alokované trojrozměrné pole typu float s deklarací:

```
float ***poledat=0;
```



Obr. 48: Paměťová struktura naměřených dat

Toto pole si lze představit jako několik vrstev dvourozměrných matic, tak jak zobrazuje obrázek 48. Jedna vrstva představuje paměťový prostor jedné realizace měření, celkem je jich 40, přičemž poslední je vyhrazena pro matici zobrazení a předposlední pro aktuální měření. Pro současný stav měření byla zvolena velikost jedné matice 200 sloupců na 200 řádků. Veškeré funkce, provádějící operace s prvky paměťové struktury naměřených dat, dostávají jako vstupní parametr volání číslo vrstvy nad kterou mohou operovat.

Paměťová struktura nastavení měření

Před začátkem měření je nutné definovat základní parametry, podle kterých se bude měřící algoritmus řídit. Z tohoto důvodu je zavedena struktura, obsahující tyto údaje. Je definována takto:

```
struct measuredata
{double minx;
double miny;
double maxx;
double maxy;
double stepx;
double stepy;
int    fvz; } *measet;
```

Tato struktura tedy obsahuje souřadnice výchozího a koncového bodu – *mix* a *miny* jsou souřadnice výchozího bodu, analogicky pro koncový – *maxx* a *maxy*. Dále jsou zde uvedeny kroky v jednotlivých osách – *stepx*, *stepy*, jedná se o inkrement při každém posuvu v dané ose. Posledním parametrem je vzorkovací frekvence – *fvz*.

Měřicí vlákno

Aby program nepracoval v blokovém režimu při měření, bylo zavedeno samostatné vlákno, běžící na pozadí. Pokud by tomu tak nebylo, program by byl zablokovaný při čekání na změření požadovaného počtu vzorků měřicí kartou a nebyla by tak možná obsluha programu. To by zabraňovalo jakékoliv manipulaci s předchozími výsledky, jejich zobrazování a zpracovávání, v neposlední řadě by bránilo zásahům do běžícího měření. Vlákno jako takové je obsluhováno samostatně rozdělovačem procesorového času, v době vzorkování je tedy uspáno do vyvolání přerušení. Náleží pod hlavní program, ale běh je samostatný.

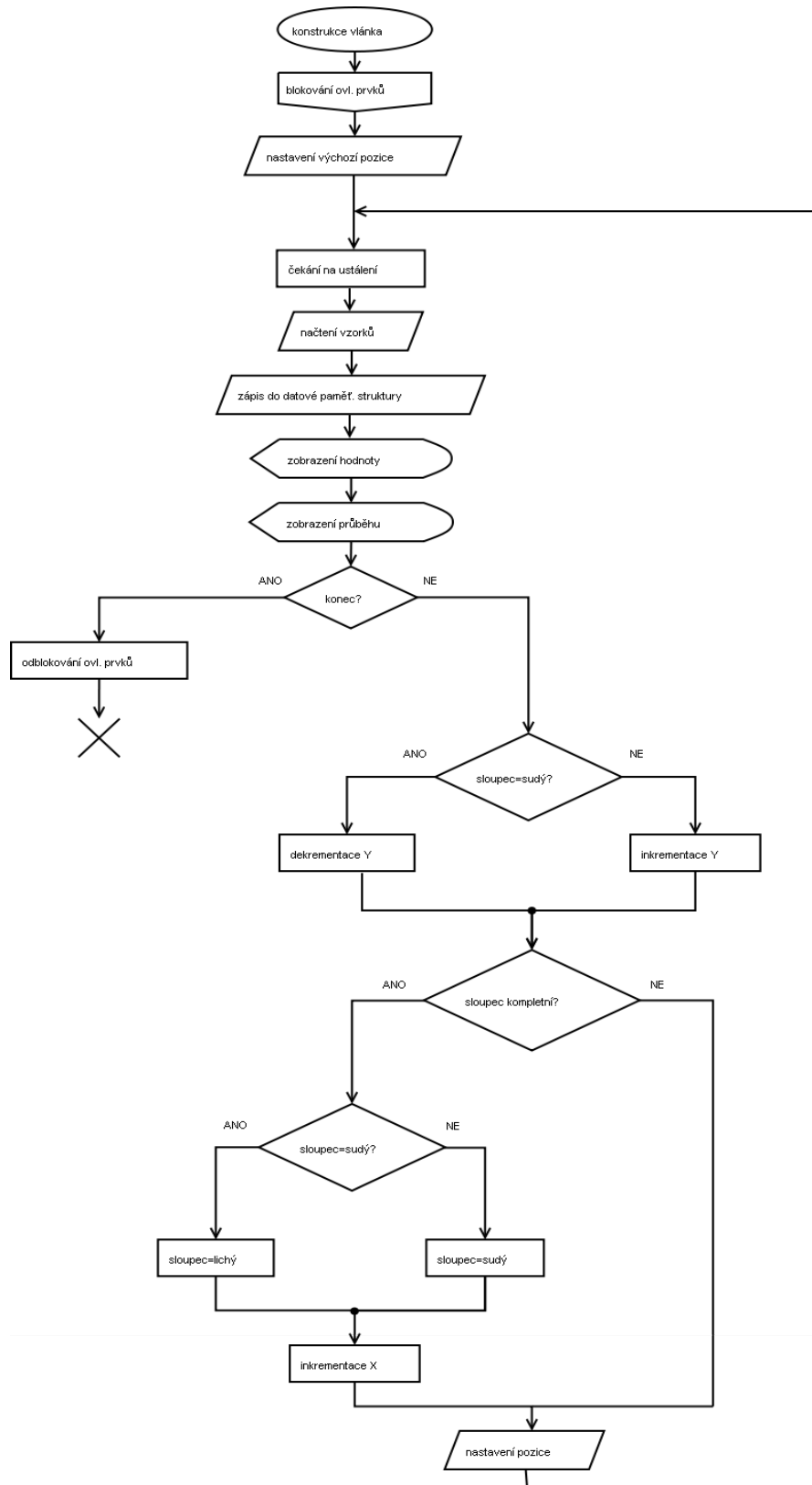
Vlákno je definováno funkcí, která je volána při každém dokončení měření definovaného počtu vzorků. Nejedná se tedy o standardní definici vlákna, je využito přímo popisovače přerušení od karty.

Na obrázku 49 je uveden vývojový diagram. Nutným předpokladem před sestavením vlákna je definování postupu měření, uvedeným v platné paměťové struktuře nastavení měření. V dalším kroku dojde ke zkonstruování vlákna. Během měření je nežádoucí jakýkoliv zásah do měřícího postupu, je tedy nutné odpojit veškeré vazby mezi aktuální strukturou a uživatelským rozhraním. Tohoto efektu je docíleno zneviditelněním některých ovládacích prvků (bude popsáno dále).

Nejprve je nutné nastavit souřadnice výchozí polohy měření. Po každém novém nastavení souřadnic vlákna nad povrchem článku je nutné vyčkat definovanou dobu. Při ní se veškeré mechanické jevy, jež by měly negativní dopad na přesnou lokalizaci nastaveného bodu, ustálí do přijatelných mezí útlumu. Tato prodleva u většiny měření byla rovna 5 ms.

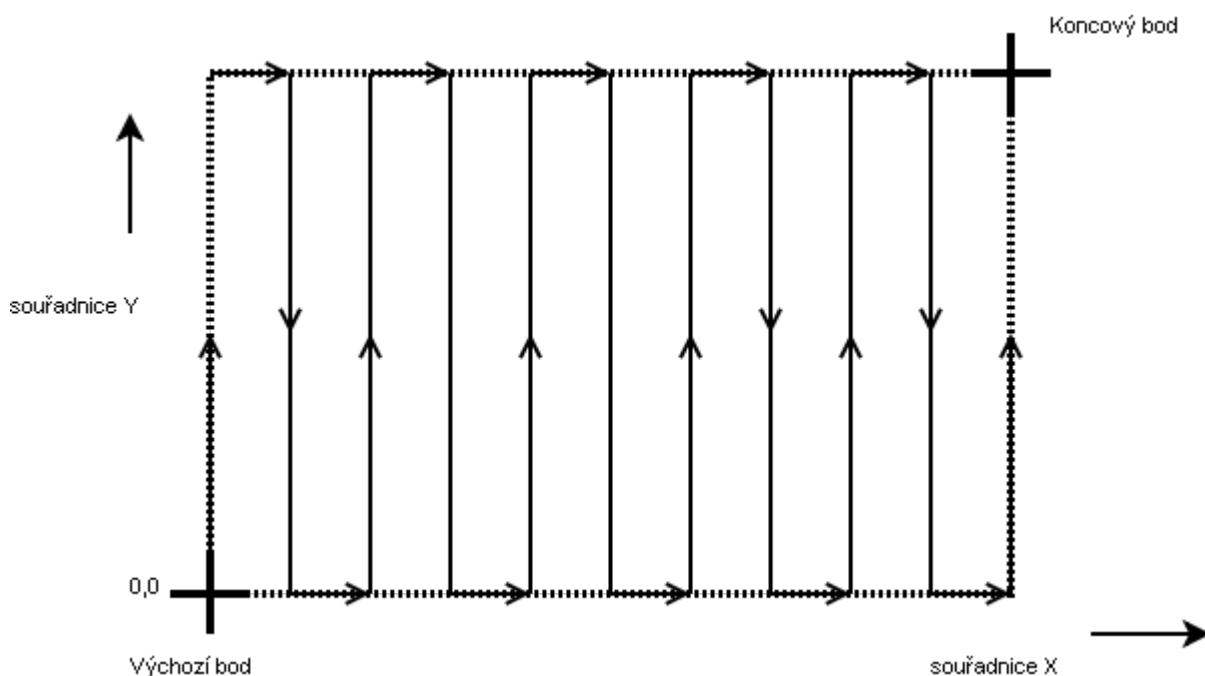
Následně tedy možno sejmout potřebný počet vzorků. V tomto případě není nutné průměrovat velké množství vzorků, je měřena střední hodnota vyhlazeného průběhu, je zcela dostačující změření a zprůměrování 20-ti vzorků. Průměr těchto hodnot tedy můžeme nazvat hodnotou výslednou, která je zapsána do datové paměťové struktury do vrstvy 37 na příslušnou pozici. Tato hodnota je také zobrazována v uživatelském rozhraní z důvodu vizualizace případné přítomnosti emise z lokálních oblastí. Je také dopočítáván stav průběhu měření v procentech, který má pouze informativní charakter pro obsluhu programu.

Za povšimnutí stojí předávané parametry měřicímu vláknu obsažené v paměťové struktuře nastavení měření. Jsou zde mimo jiné uvedeny přímo inkrementy v obou osách, ne počet kroků. Z toho plyne výhoda zadávání vzdálenosti sousedních bodů o velikost průměru vlákna, což je hodnota známá. Je tedy zřejmé, že nemusí být vždy přesně dosaženo koncového bodu, zadávaného jako vstupní parametr, někdy může dojít k jeho překročení.



Obr. 49: Vývojový diagram měřícího vlákna

Následující rozhodnutí testuje dosažení posledního bodu a tedy konce měření. V případě všech naměřených hodnot obnoví nastavení všech ovládacích prvků a ukončí se běh vlákna, v případě absence některých dat se pokračuje ve smyčce dále. Je testováno, zda sloupec (pohyb vlákna ve směru souřadnice Y) je sudý nebo lichý, což odpovídá faktu, zda je postupováno po souřadnici Y v kladném nebo záporném směru. Tomu je nutné upravit následující nastavení souřadnice Y na vyšší nebo nižší o jeden krok. Následuje testování, zda bylo dosaženo posledního bodu v daném sloupci. To se týká obou směrů, tedy v prvním případě dosažení maxima, ve druhém minima hodnot pro souřadnici Y. Pokud je tedy aktuální pozice poslední, dojde k označení aktuální hodnoty sloupce za opačnou, byl-li lichý, nyní bude sudý. Dále se inkrementuje hodnota souřadnice X. V případě, že nebylo dosaženo poslední pozice v sloupci Y, dojde rovnou k nastavení pozice vlákna a opakování běhu smyčky od místa čekání na ustálení polohy vlákna. Takto se prochází cyklem do doby dosažení koncového bodu. Obrázek 50 zobrazuje jak takový pohyb vlákna nad povrchem vypadá.



Obr. 50. Pohyb vlákna nad povrchem

Výsledkem běhu měřícího vlákna je tedy naplnění datové struktury na vrstvě 37 a uvolnění ovládacích prvků uživatelského rozhraní pro zadávání nastavení měření. Ukončení běhu je také signalizováno hodnotou 100% v ukazateli průběhu.

Datový soubor

Soubory s daty jsou umístěny v adresáři `./data/`, s příponou `.dat`. Jejich název je zkopírován z popisku vrstvy paměťové struktury naměřených dat viz níže. Soubor je textový pro snazší orientaci, manipulaci a kontrole naměřených dat pomocí běžných textových editorů, tvořen záhlavím s informacemi o podmínkách měření a různých doplňujícími informacemi. Dále následují data seřazena do sloupcového vektoru, každý prvek vektoru je tvořen novým řádkem souboru. Bezpečnostní opatření proti zneužití nebo ztrátě dat nebudeme v tomto případě uvažovat, není tedy nutné podnikat žádné významné zabezpečovací kroky implementující bezpečnostní algoritmy.

Následující ukázka datového souboru demonstruje jeho strukturu:

```
-- Soubor s daty --
Měření proběhlo dne: 12.4.2008 v 15:24
Název měřených dat: 24-1-10V
Rastr: 200x200
Napětí zdroje: 10V
0.358144825612892
0.358144825612892
0.358654419240938
0.359164012868985
0.360183200125077
0.359673606497031
0.360692793753123
0.360183200125077
0.359164012868985
0.361202387381169
0.360692793753123
0.360692793753123
0.359164012868985
.
.
.
0.362221574637262
EOF
```

Jako první je uveden popis souboru, následuje časová značka, název získaný z pojmenování měření, rastr měření, násobek těchto dvou čísel odpovídá počtu řádků s čísly (pouze orientační význam) a posledním údajem je hodnota závěrného napětí na daném článku nastavené na zdroji napětí 0 až 50V.

Mezi hlavičku a data není vřazen žádný oddělovač, program detekuje data na základě platné číslice na začátku řádku, každý řádek hlavičky tedy musí začínat na libovolný znak mimo číslice. Na konci souboru je uveden znak EOF. To je zavedeno především pro chybný počet řádků v souboru (neočekávaná chyba ukládání nebo manipulace se souborem), kdy by byla očekávána ještě další data, funkce načítání souboru je tak informována o konci souboru a lze vygenerovat chybové hlášení. Samozřejmě samotná metoda přístupu k souboru umožňuje též zjistit konec souboru, byla však zvolena tato varianta.

Soubor s nastavením

Soubory s nastavením jsou umístěny v adresáři *./nastaveni/* , s příponou *.set* . Jejich název je zkopírován z popisku paměťové struktury nastavení měření viz níže. Soubor je textový pro snazší orientaci, kontrole a úpravě nastavení pomocí běžných textových editorů, tvořen záhlavím s nezbytnými informacemi, popisky hodnot a k nim přiřazené hodnoty nastavení. Hodnoty nastavení jsou prvky paměťové struktury nastavení měření pro konkrétní index.

Následující ukázka souboru s nastavením demonstruje jeho strukturu:

```
-- Soubor s nastavenim mereni --
Nastaveni vytvoreno dne: 12.4.2008 v 15:24
Identifikator nastaveni: 24-1-10V
pocatecni bod, souradnice x:
1,35987
pocatecni bod, souradnice y:
0,18324
koncovy bod, souradnice x:
9,56998
koncovy bod, souradnice y:
4,65751
krok v ose x:
0,10262
krok v ose y:
0,02467
vzorkovaci frekvence:
1000
EOF
```

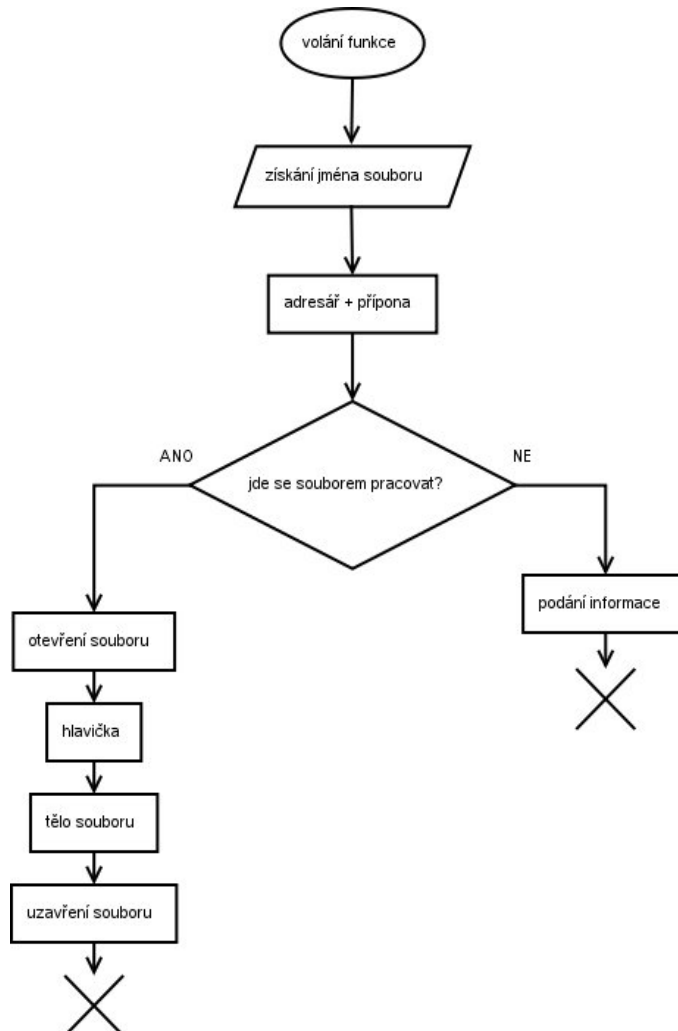
Jako první je uveden popis souboru, následuje časová značka, identifikátor získaný z pojmenování konkrétního nastavení v programu, následují dvojice řádků, první uvádí o jakou hodnotu nastavení jde, druhá je pak konkrétní číslo. Mimo hodnoty frekvence jsou všechny čísla s desetinným separátorem zastoupeným v tomto případě desetinnou čárkou. Na konec je opět uvedena značka souboru EOF pro kontrolu souboru.

Funkce pro manipulaci se soubory

Jsou definovány čtyři funkce pro manipulaci s datovými soubory a soubory pro nastavení měření. Jejich prototypy jsou následující:

```
bool readdatafile(int index);
bool writedatafile(int index);
bool readsetupfile(int index);
bool writesetupfile(int index);
```

Jsou volány s hodnotou integer, jež odpovídá číslu vrstvy paměťové struktury naměřených dat. Vrací hodnotu false při neúspěchu, true při úspěšném vykonání všech potřebných operací. Pro čtení ze souborů je použita knihovna „stdio“ a pro zápis knihovna „fstream“. Samozřejmě obě knihovny dokáží zápis i čtení souborů. Všechny čtyři funkce se dají zobecnit do jednoho vývojového diagramu, který je uveden na obrázku 51.



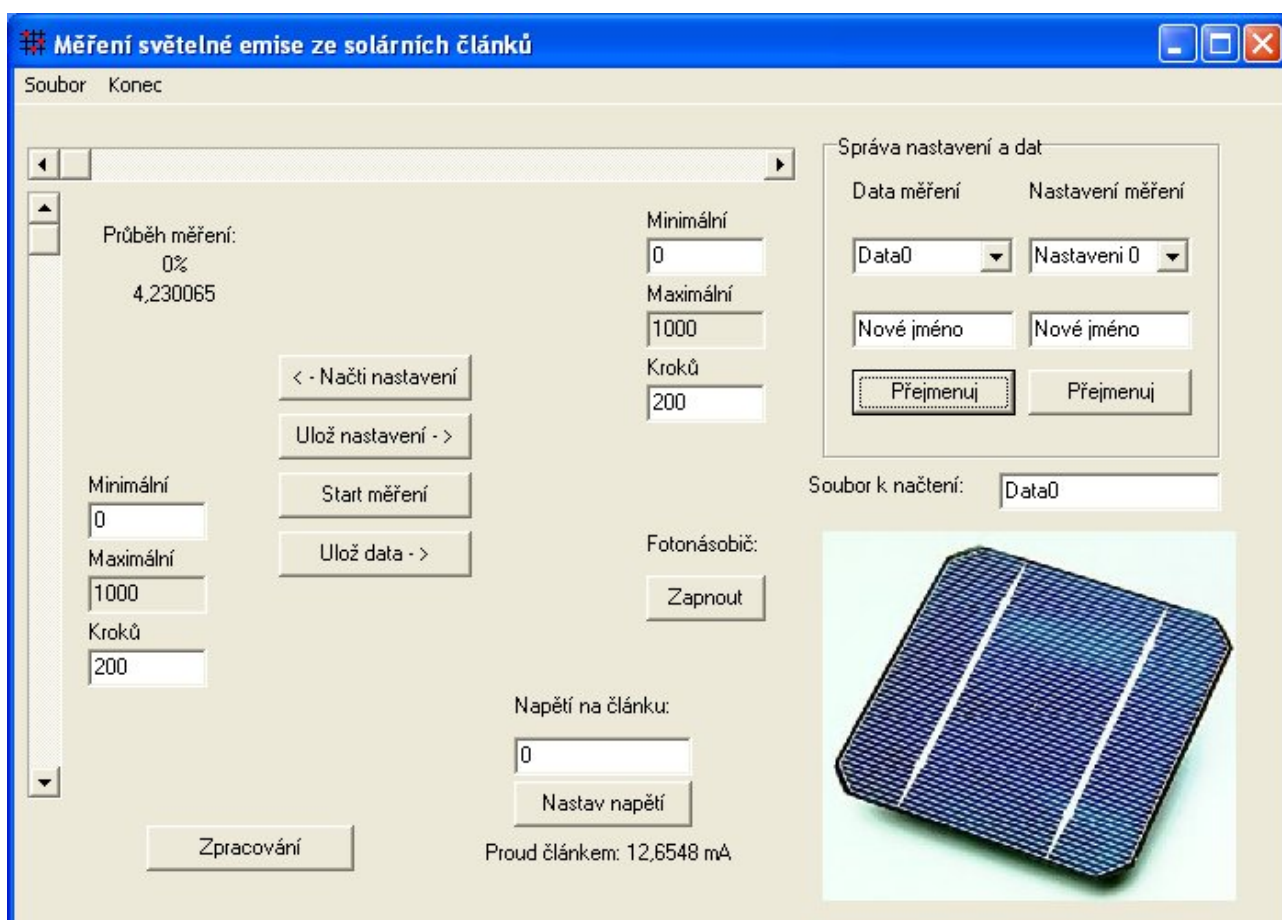
Obr.51: Vývojový diagram funkcí pro práci se soubory

Nejprve je nutné ujistit kostru jména souboru, to je získáváno při načítání z vstupního pole pro jméno souboru nebo z popisovače položky seznamu dat nebo nastavení. Dále je nutno sestavit řetězec s cestou k souboru, který musí obsahovat adresář (/data/ pro datový typ souboru, /set/ pro soubor typu nastavení) a příponu souboru (*.dat pro datový typ souboru, *.set pro soubor s nastavením).

Samozřejmostí je ověřit, zda je možné soubor otevřít (čtení) nebo vytvořit (zápis). Pokud ne, vygeneruje se chybové hlášení a uživatel je informován o této skutečnosti, dojde k ukončení funkce s návratovou hodnotou false. V opačném případě se soubor otevře/vytvoří, načte se hlavička / uloží se hlavička souboru, načte se tělo souboru / zapíše se tělo souboru. Až jsou veškeré položky v souboru zapsány, soubor se uzavře a dojde k ukončení funkce s návratovou hodnotou true.

Obsah hlaviček a těl souborů byl uveden dříve. Hlavička má pouze informativní charakter, pokud má obsah jiný, než uvedený nebo zcela chybí, je programem ignorována. Případné informace v hlavičce obsažené byly především určeny pro informace při načítání souboru textovými editory, případné využití při úpravách programu.

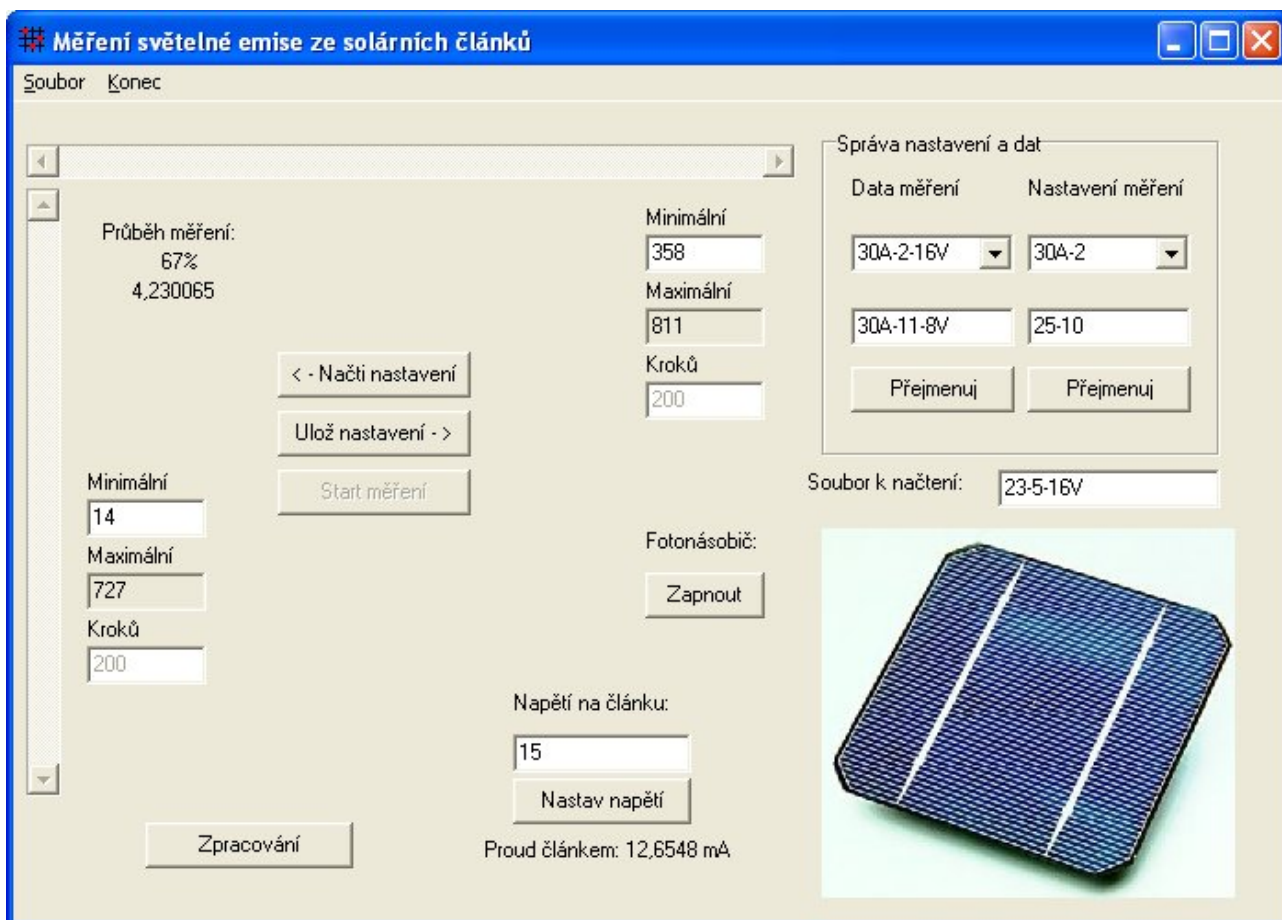
Uživatelské rozhraní



Obr. 52: Uživatelské rozhraní programu - inicializace

Bylo vytvořeno grafické uživatelské rozhraní obsahující všechny prvky potřebné pro obsluhu již uvedených funkcí a pro plné využití variability návrhu. Na obrázku 52 je uvedeno toto rozhraní po inicializaci. Obsahuje dva základní posuvníky, horizontální pro posuv ramene zapisovače v ose X, vertikální pro posuv v ose Y, editovací políčka pro minimální, maximální hodnotu a počet kroků v každé ose, část pro správu nastavení a dat, ovládání fotonásobiče, závěrného napětí zdroje, informaci o proudu ze zdroje odebíraného, základní menu pro práci se soubory. Blok zadání nastavení měření z obrázku 47 je sestaven z posuvníků a políček minimální, maximální a kroků. Kliknutím do příslušného políčka *minimální* nebo *maximální*, vepsáním hodnoty nebo nastavením hodnoty pomocí posuvníku je dosaženo nastavení odpovídající položky aktuální paměťové struktury nastavení.

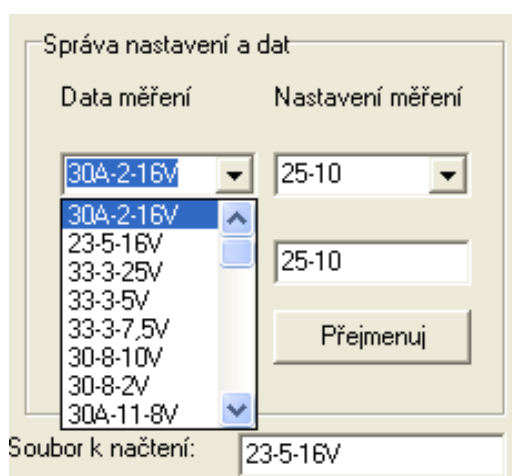
Vepsáním do položky *kroků* je v náležící ose vypočítána velikost inkrementu v jednotlivém kroku diferencí maximální a minimální hodnoty, podělené počtem kroků. Hodnota tohoto inkrementu je vepsána do paměťové struktury nastavení na příslušnou pozici. Takto nastavené parametry měření jsou předávány přímo měřicímu vláknu, případně je lze uložit pro pozdější využití. Do kolonky *napětí na článku* je možno vepsat hodnotu závěrného napětí na článku s desetinnou čárkou, tlačítkem *nastav napětí* je toto napětí aktualizováno. Přibližně každou vteřinu je přepisován údaj *proud článkem*, vyčítaný ze zdroje. Funkce fotonásobiče je ovlivňována přítomností logické úrovně napětí na vstupu pro povolení funkce, tlačítkem fotonásobič *zapnout / vypnout* je ovládán druhý kanál zdroje, kterým je nastavováno napětí 0V pro vypnutí a 5V pro zapnutí fotonásobiče.



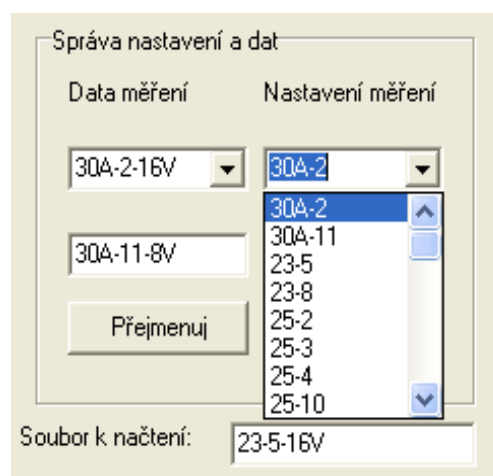
Obr. 53: Uživatelské rozhraní programu - měření

Je vhodné fotonásobič vypínat při každém otevření opticky izolovaného prostředí z důvodu výměny vzorků. Tlačítko *zpracování* přepíná aktivní okno na část programu pro zpracování, přičemž již běžící měření zůstává zachováno, při návratu jsou veškeré prvky ve stejném stavu, nedochází k načtení výchozího stavu.

Volba aktuální vrstvy paměťové struktury naměřených dat a struktury nastavení měření, změna jejich popisů se provádí v sekci *správa nastavení a dat*. Každý rolovací výběr obsahuje 37 položek s výchozími názvy *Data0* až *Data36*, *Nastavení0* až *Nastavení36*. Do políčka *Nové jméno* je možno vepsat nový popis, tlačítkem *Přejmenuj* je změněn název aktuální položky rolovacím výběru na uvedený. Takto je možno měnit popisky vrstev obou paměťových struktur. Tyto popisky jsou použity pro názvy ukládaných souborů.



Obr. 55: Sada naměřených dat

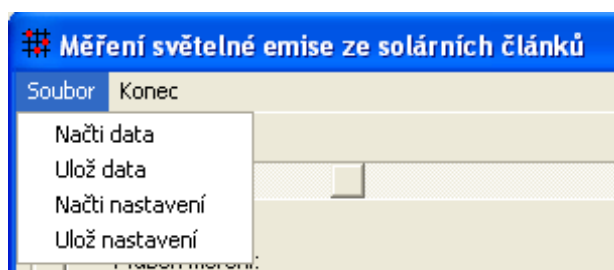


Obr. 54: Sada nastavení měření

Políčko *soubor k načtení* je určeno pro zadávání názvu souboru, který má být načten. V hlavním menu programu jsou umístěny nabídky *Soubor* a *Konec*. Nabídka *Soubor* obsahuje další položky, jak ukazuje obrázek 56. Jsou to *Načti data*, *Ulož data*, *Načti nastavení*, *Ulož nastavení*. Těmto položkám jsou přiřazeny funkce pro načítání a ukládání vrstev paměťových struktur do souborů.

Do aktuální vrstvy paměťové struktury nastavení měření lze zapsat hodnoty nastavené posuvníky a editačními poly pomocí tlačítka *Ulož nastavení ->*, naopak načíst nastavení z aktuální vrstvy tak, aby bylo použito pro aktuální měření lze provést tlačítkem *<- Načti nastavení*.

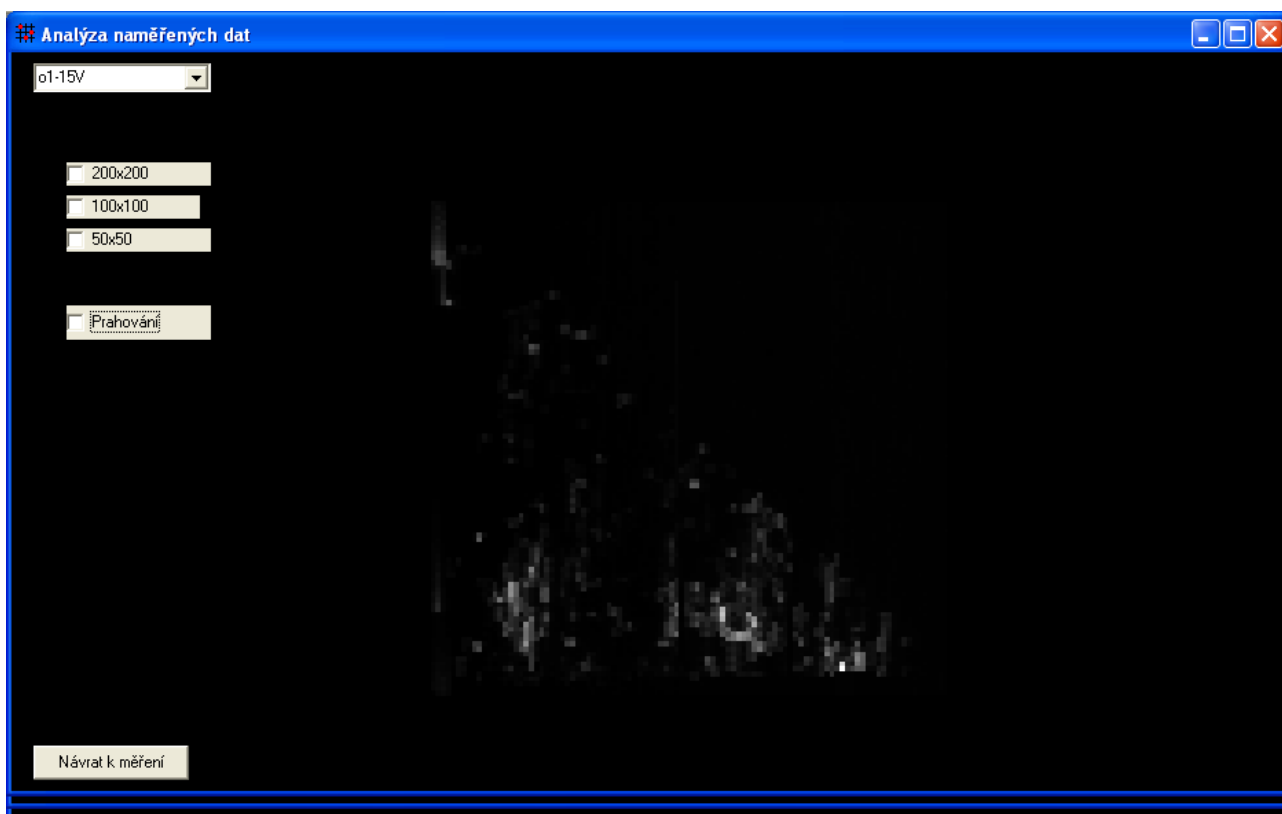
Tlačítkem *Start* měření se spouští vlastní proces měření vytvořením měřicího vlákna. Po dobu měření zůstávají neaktivní některé prvky ovládacího formuláře, jako jsou posuvníky, políčka s počty kroků, tlačítka *Start měření* a *Ulož data ->*. Toto tlačítko, které slouží k uložení právě naměřených dat, umístěných do vrstvy 37 paměťové struktury naměřených dat do zvolené vrstvy pomocí rolovacího seznamu v oblasti *Správa nastavení a dat*.



Obr. 56: Menu programu

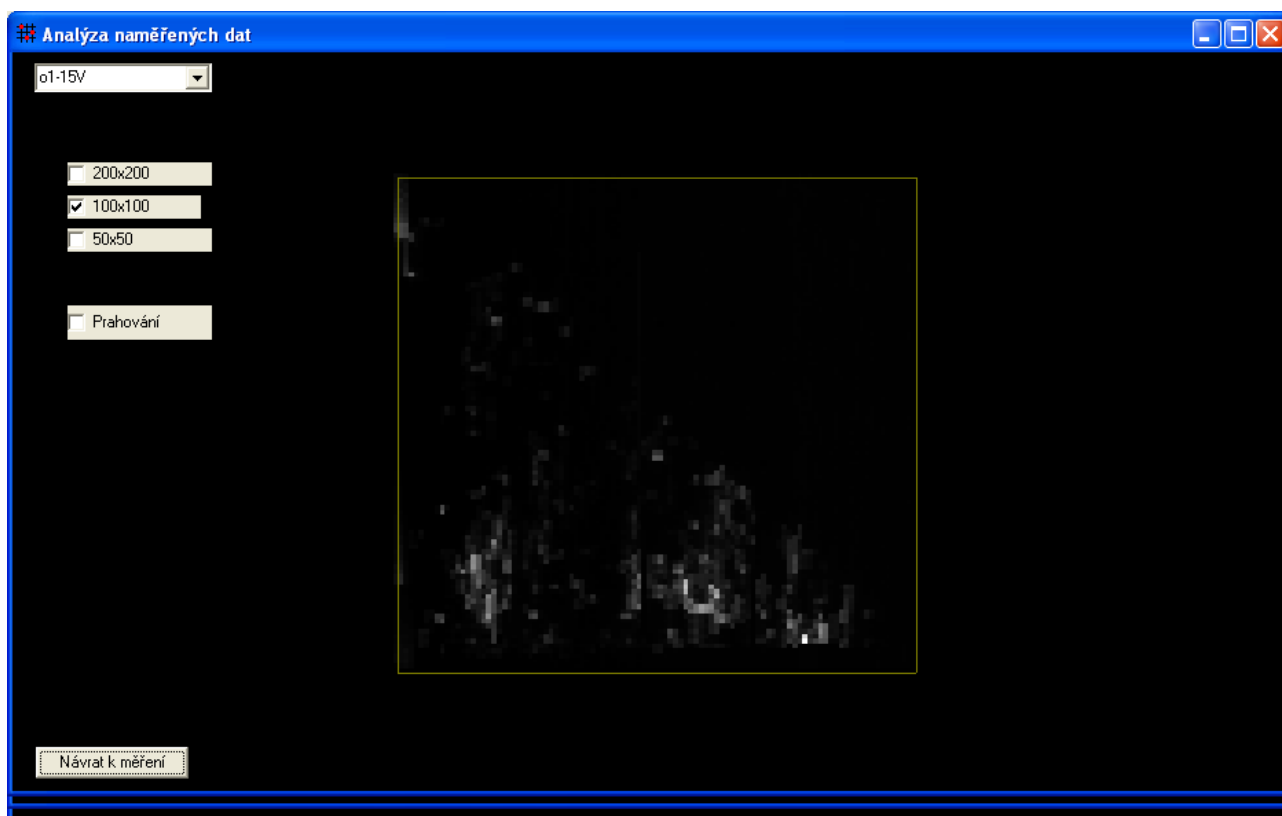
Zobrazovací část

Tlačítkem *zpracování* na hlavním formuláři je možno přepnout do zobrazovací části programu, měřicí okno je zneviditelněno, spuštěné měření je však stále aktivní. Celá plocha zobrazovacího okna je využita pro vykreslování naměřených dat. Z důvodu co nejvyšší vykreslovací rychlosti je použita knihovna OpenGL®, umožňující využití 3D akcelerace grafické karty. Ukázka zobrazovacího okna je na obrázku 57.



Obr.57: Zobrazovací část

V levém horním rohu okna je použit rolovací seznam, který je kopií rolovacího seznamu sady naměřených dat z měřicího formuláře. Tímto prvkem lze přepínat mezi naměřenými daty. Pod tímto rolovacím seznamem se nachází trojice zatrhávacích políček. Pokud je některé označeno, do plochy okna je vykreslen čtverec, který znázorňuje oblast měření a odděluje naměřenou plochu od okolní plochy okna. Většinou je měřeno s rastry 50 x 50 bodů, 100 x 100 bodů a 200 x 200 bodů, proto jsou předdefinovány tyto tři velikosti okrajů. Na obrázku 55 je ukázka zobrazení rámu, s rastrem 100x100 bodů.

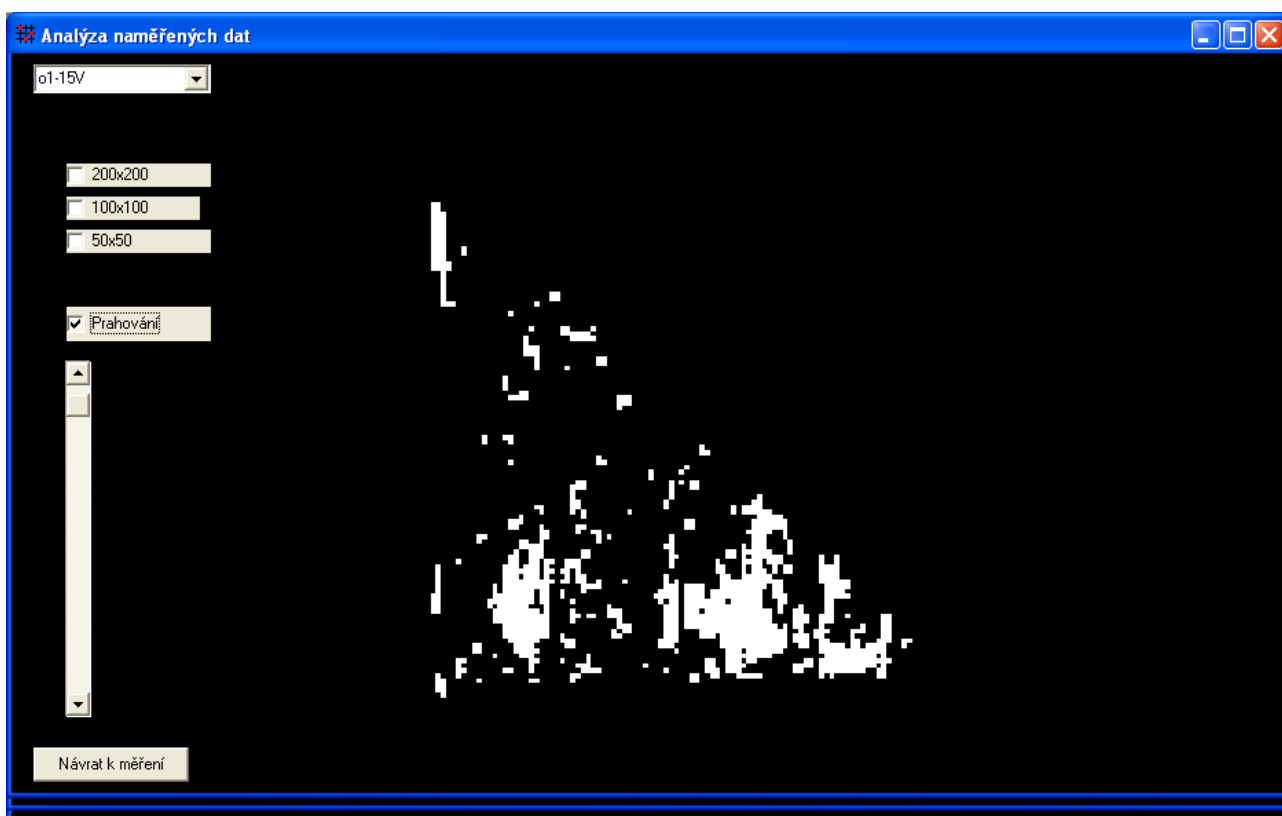


Obr.58: Ohraničení měřené plochy

Je možno si všimnout, tímto způsobem je přesně ohraněna měřená oblast, nemá tedy význam hledat případný bod mimo označené meze. Tento fakt je velmi důležitý při zobrazení vzorků, které mají velmi málo nebo žádné emitující lokální oblasti.

Další zatrhávací políčko s označením *prahování* je pomůckou při určování počtu izolovaných emitujících oblastí. Při zatržení této funkce je zobrazen posuvník, jehož krajní polohy odpovídají minimální a maximální zobrazované hodnotě. Nastavením posuvníku do libovolné polohy je určena hranice světlosti bodu (velikost naměřené hodnoty), od které směrem k vyšším hodnotám bude zobrazovaný bod nahrazen bílou barvou. Hodnoty nižší budou zobrazeny černě, budou tedy ignorovány. Pokud je nastavena vhodná hranice, lze snadno určovat počty emitujících oblastí – obrázek 59. Nevýhoda tohoto zobrazení spočívá ve ztrátě informace o intenzitě emise, v některých shlucích není možno zcela přesně takto stanovit, zda se jedná o silně zářící bod nebo shluk několika bodů. Při velkém počtu emitujících bodů nelze tuto funkci s úspěchem použít. Tuto funkci je možno využít jen u některých měření, tím se řadí tato funkce mezi podpůrné, nikoliv stěžejní pro zpracování naměřených dat.

Algoritmus zobrazení je následující: z rolovacího seznamu je vybráno měření, tím je určena vrstva paměťové struktury naměřených dat, ve které jsou tyto data uložena, následně je provedena normalizace, kdy nejmenší naměřená hodnota odpovídá nule, nejvyšší hodnota 1,0, ostatní data jsou rozprostřena mezi tyto krajní hodnoty. Všechny hodnoty jsou uloženy ve vrstvě 38 paměťové struktury naměřených dat, dále je proveden výpočet některých statistických údajů. V této chvíli jsou pouze vypočítávány, v případě potřeby mohou být zobrazeny. Jakmile jsou potřebné výpočty dokončeny, je zavolána funkce realizující sestavení obrazu (konstrukce scény v definici OpenGL®). Postupuje se po řádcích, každý bod je reprezentován čtvercem s barvou danou naměřenou hodnotou (větší hodnoty jsou světlejší), tyto čtverce se vzájemně dotýkají hranami.



Obr. 59: Použití funkce prahování – velký počet bodů

Vytvořený obrazec je vykreslen základním perspektivním pohledem, přitom je zohledněna funkce prahování. Zobrazení je případně doplněno obdélníkem, znázorňujícím okraj naměřených dat. Jakékoliv přibližování, translace a rotace obrazu jsou v rámci funkcí OpenGL®, nedochází k novému vykreslování, tyto data jsou podrobeny pouze transformačním funkcím. Tímto je snížen výpočetní výkon při změnách pohledu.

4 Výsledky měření

4.1 Emise ze vzorků solárních článků

Bylo provedeno základní měření všech vzorků solárních článků pro nejvyšší přípustný ztrátový výkon 2 W, kdy ještě nedochází k destruktivním vlivům díky zvýšené teplotě přechodu a zároveň je aktivních nejvyšší množství zářících bodů, pro odvod tepla z povrchu je dostačující ventilátor uvnitř opticky izolovaného prostředí. Každý článek má svoje specifické vlastnosti odlišné od ostatních, maximálního přípustného ztrátového výkonu je dosahováno při různých hodnotách závěrných napětí.

Vzorky jsou děleny a označeny podle rozdílných technologií výroby nebo použitých dílčích operací při jejich výrobě, vykazují různé vlastnosti, mají i různě velké nárůsty závěrného proudu, proto je nutné uvažovat celkový ztrátový výkon na PN přechodu na rozdíl od hodnoty závěrného proudu.

Výsledné obrazce emise z povrchu článků jsou uvedeny v příloze A. První číslice v označení vzorku znamená označení technologicky specifické výrobní série, druhá číslice pořadí vzorku v příslušné sérii a poslední hodnota udává velikost použitého závěrného napětí, zakončená znakem „V“. Výstupem zobrazovací části měřicího programu je obrázek v barevném modelu RGB, kde emitující bod je znázorněn světlou barvou, neaktivní oblasti černou. Pro tisk je vhodné invertovat paletu barev, aby odpovídal barevnému modelu CMYK. Nyní tmavé body odpovídají oblastem s emisí. Veškeré dále uváděné výsledky měření mají invertovaný rozsah barev.

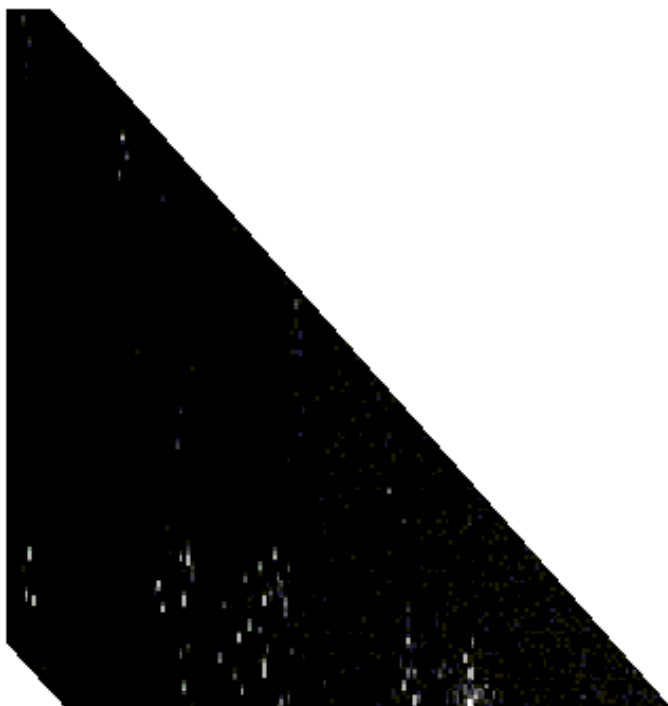
O vzorcích série 23 lze konstatovat nízkou koncentraci, případně žádný výskyt zářících (defektních) oblastí. Vzorky 23-1, 23-1 i 23-6 nevykazují žádnou takovou oblast, vzorek 23-3 má dvě především díky vyššímu závěrnému napětí, kdy je pravděpodobnost výskytu vyšší.

Všechny vzorky série 30A obsahují ve srovnání s předchozí sérií velký počet oblastí s emisí záření. Je zde možné pozorovat podobnou četnost zářících oblastí u vzorků s nižším závěrným napětí jako u těch s vyšším závěrným napětí. Z toho plyne rovnoměrnost rozložení v rozsahu závěrného napětí.

Série 32 obsahuje nejvyšší množství defektních oblastí, uplatňuje se zde především vliv špatné pasivace okrajových oblastí. Další vzorky jsou 33-3 a 40-1, které jsou jediní zástupci svých sérií, nelze konstatovat nic o příslušné sérii, vzorek 33-3 obsahuje přibližně stejný počet oblastí emise jako řada 32, naopak vzorek 40-1 je bez jakékoliv oblasti, avšak při velmi nízkém závěrném napětí.

4.2 Počet emitujících bodů v závislosti na velikosti závěrného napětí

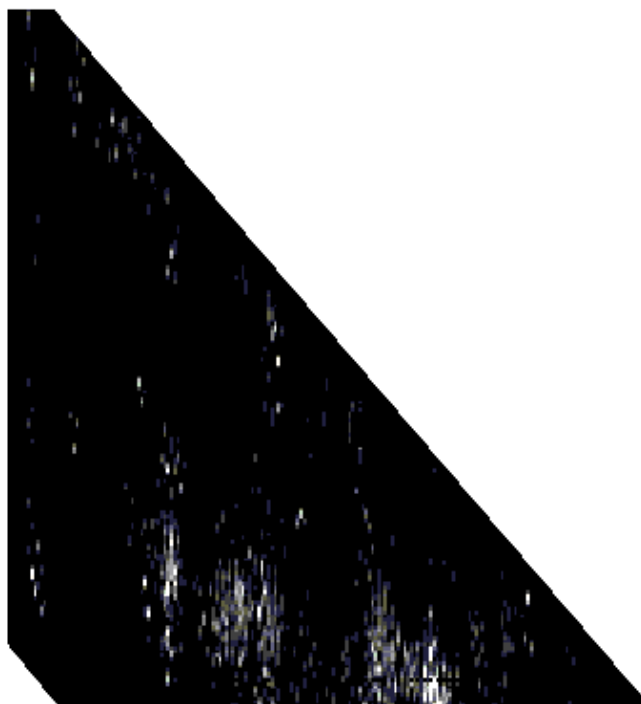
Byl měřen vzorek solárního článku Z1 pro tři různé hodnoty závěrného napětí pro ověření teoretického předpokladu o přibývajícím počtu bodů a zvyšující se jejich intenzitě v závislosti se zvyšujícím se závěrným napětím. Na následujících obrázcích vzorek Z1 při $U_r=6$ V (obrázek 61), $U_r=9$ V (obrázek 60) a $U_r=12$ V (obr. 3), což je opět v toleranci hranice nedestruktivního ztrátového výkonu. Tvar obrázků kopíruje skutečný tvar úlomku článku Z1.



Obr. 60. Emise ze vzorku Z1 při 6 V



Obr. 61. Emise ze vzorku Z1 při 9 V

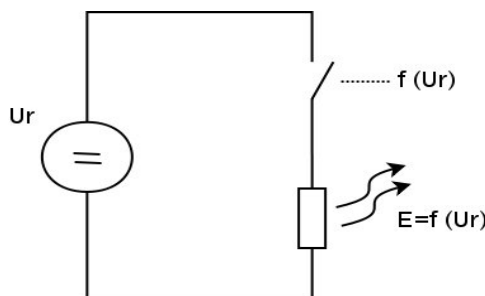


Obr. 62. Emise ze vzorku Z1 při 12 V

Při $U_r=6$ V je světlých bodů relativně málo, mají i nízkou světlost při $U_r=9$ V jsou světlé body seskupeny ve dvou hlavních makrooblastech, přibývají i osamocené body rovnoměrně rozprostřené po povrchu, nakonec pro $U_r=12$ V je zaznamenán nárůst mnoha dalších emitujících oblastí, ty které byly aktivní při 6V jsou nyní velmi světlé.

Toto měření potvrzuje závislost počtu lokálních defektů a velikosti jejich emise na velikosti závěrného napětí. Můžeme si tedy představit defektní oblast jako napětím řízený spínač s konstantní hodnotou odporu, v závislosti na napětí, které je vyšší než spínací se mění velikost proudu touto defektní oblastí - obrázek 63. Množství emitovaného záření je tedy úměrná ztrátovému výkonu defektní oblastí danou vztahem:

$$P_{ztr} = U_r \cdot I_r \quad (4)$$



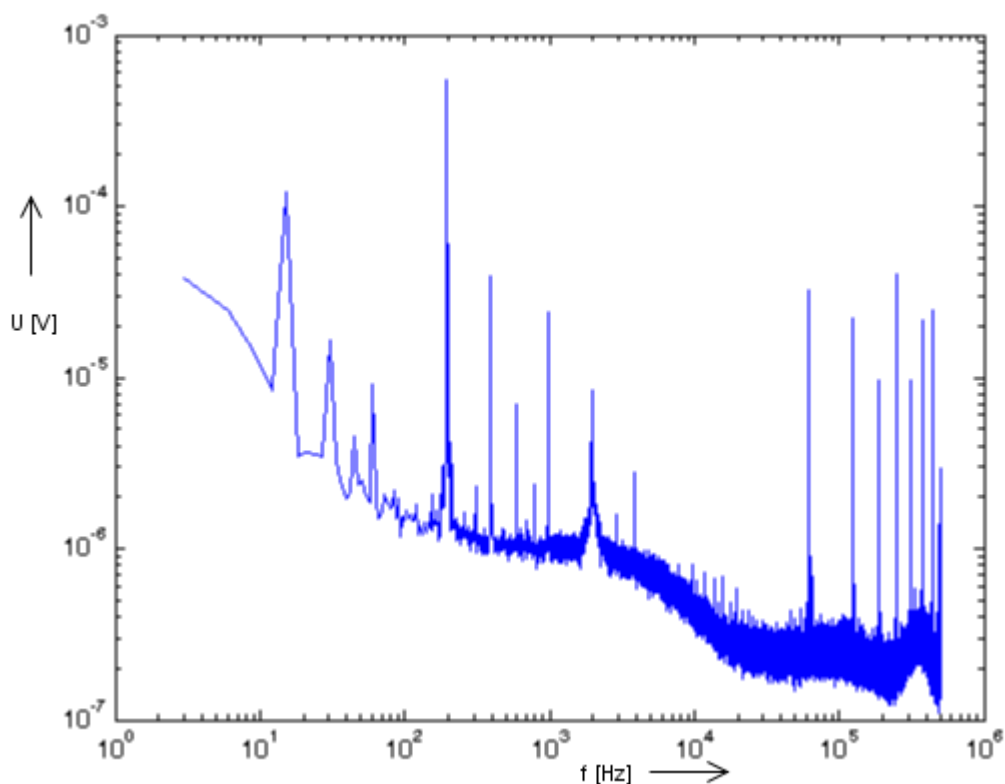
Obr. 63: Elektrický model zářícího bodu

4.3 Spektrum signálu na výstupu fotonásobiče

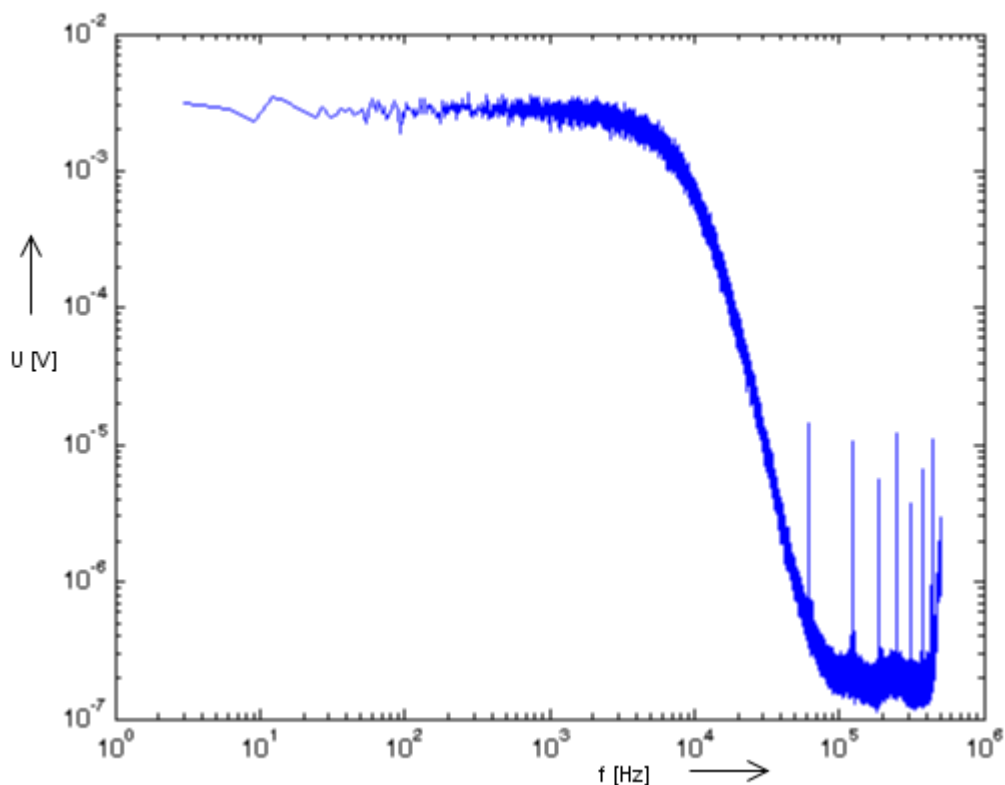
Pro posouzení vhodnosti nastavení filtru předzesilovače a návrhu logaritmického zesilovače bylo provedeno měření spektra výstupního signálu fotonásobiče. Obrázek 64 odpovídá spektru výstupního signálu pro oblast bez výskytu emise záření. Filtr předzesilovače (obr. 27) je laděn na kmitočty 0Hz až 30Hz se strmostí 12dB/oct, je tak získávána střední hodnota impulzního signálu výstupu fotonásobiče pro měření A/D převodníkem. Obrázek 64 je možné použít pro posouzení vlastního šumu přenosové cesty do které je nutné zahrnout funkci optické izolace části souřadnicového zapisovače od okolí, vliv temného proudu trubice fotonásobiče, průnik rušivého záření do pláště optického vlákna, elektrický šum ovládací elektroniky fotonásobiče.

Na obrázku 65 je uvedeno spektrum výstupního signálu fotonásobiče pro oblast s emisí záření, je zde vidět konstantní spektrum až do frekvence 300 kHz, pak monotónně klesá. Není tedy nutné uvažovat kmitočty vyšší než 300 kHz. Vzhledem ke konstantnosti spektra by mělo být měření nezávislé na výběru rozsahu hodnot jeho frekvencí od 0Hz do 300kHz, z praktického hlediska je nejvýhodnější filtr typu dolní propust.

Tímto je ověřena vhodnost návrhu nastavení filtru zesilovače, na logaritmický zesilovač nejsou kladeny vysoké požadavky z hlediska vstupní úrovně napětí. Zároveň je odstup signálu od šumu dostatečný, střední hodnota signálu v uvažovaném rozmezí frekvencí je více než 100x větší než šumu.



Obr. 64: Spektrum výstupu fotonásobiče, oblast bez emise (teplota fotonásobiče -26°C)

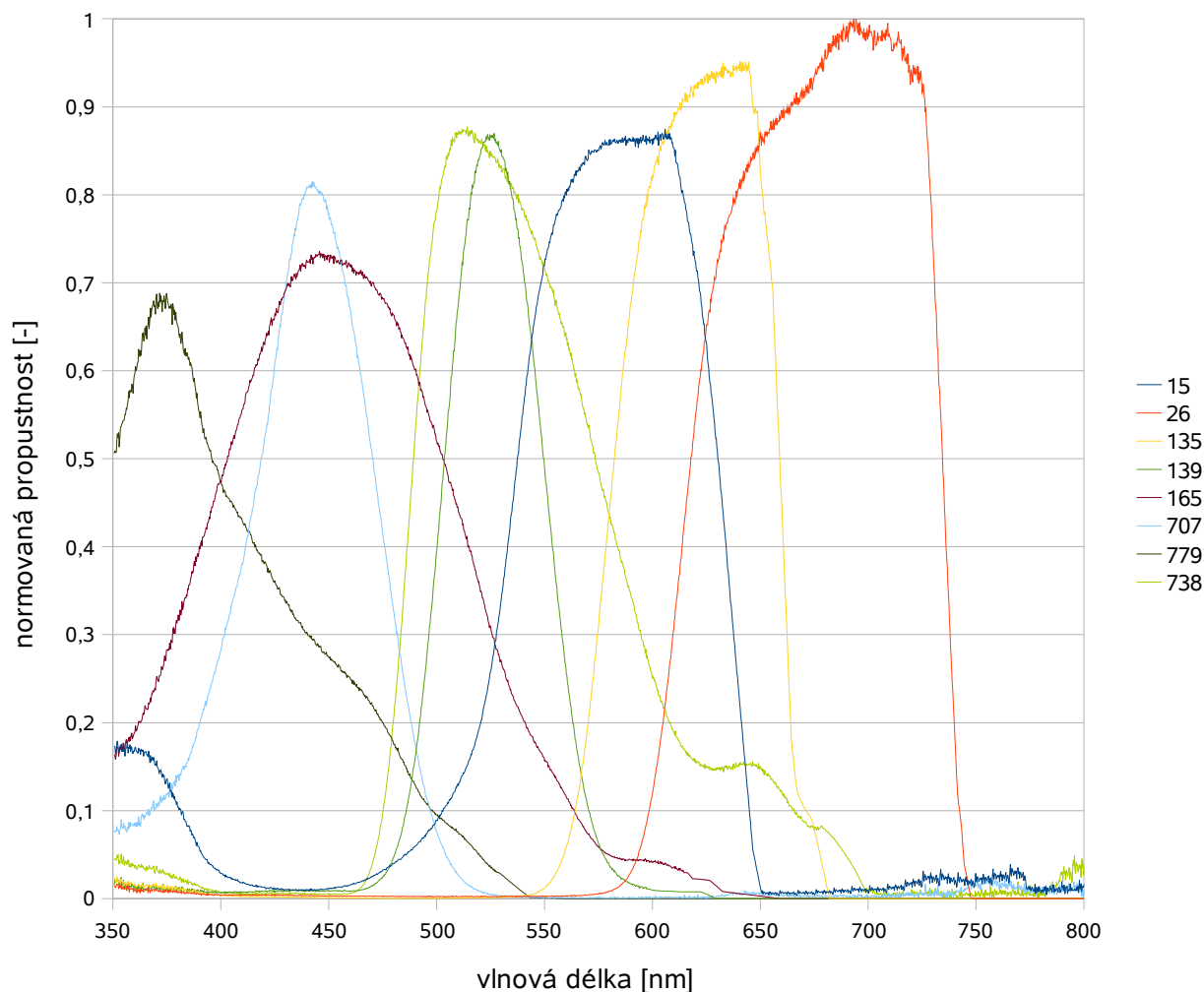


Obr. 65: Spektrum výstupu fotonásobiče – oblast emise (teplota fotonásobiče -26°C)

4.4 Spektrum záření z lokálních oblastí

Důležitou vlastností emise záření z lokálních oblastí je určení její vlnové délky. Na základě tohoto poznatku je možno určit fyzikální podstatu vzniku této emise. Ideálním řešením by bylo použití optického analyzátoru přímo na emitované záření, to má velmi malou intenzitu. V případě měření s optickým spektrálním analyzátozem URT-220X se nepodařilo zachytit emisi ani s velmi dlouhou integrační dobou. Uspokojivým řešením je použití optických filtrů se známou charakteristikou přenosu a vřazení do optické cesty. Fotonásobič je dostatečně citlivý i při snížení intenzity vstupujícího záření vlivem aplikace filtru.

U použitých páskových filtrů byla změřena přenosová charakteristika výše uvedeným optickým spektrálním analyzátozem, pro srovnání jsou všechny filtry uvedeny do jednoho grafu na obrázku 66.



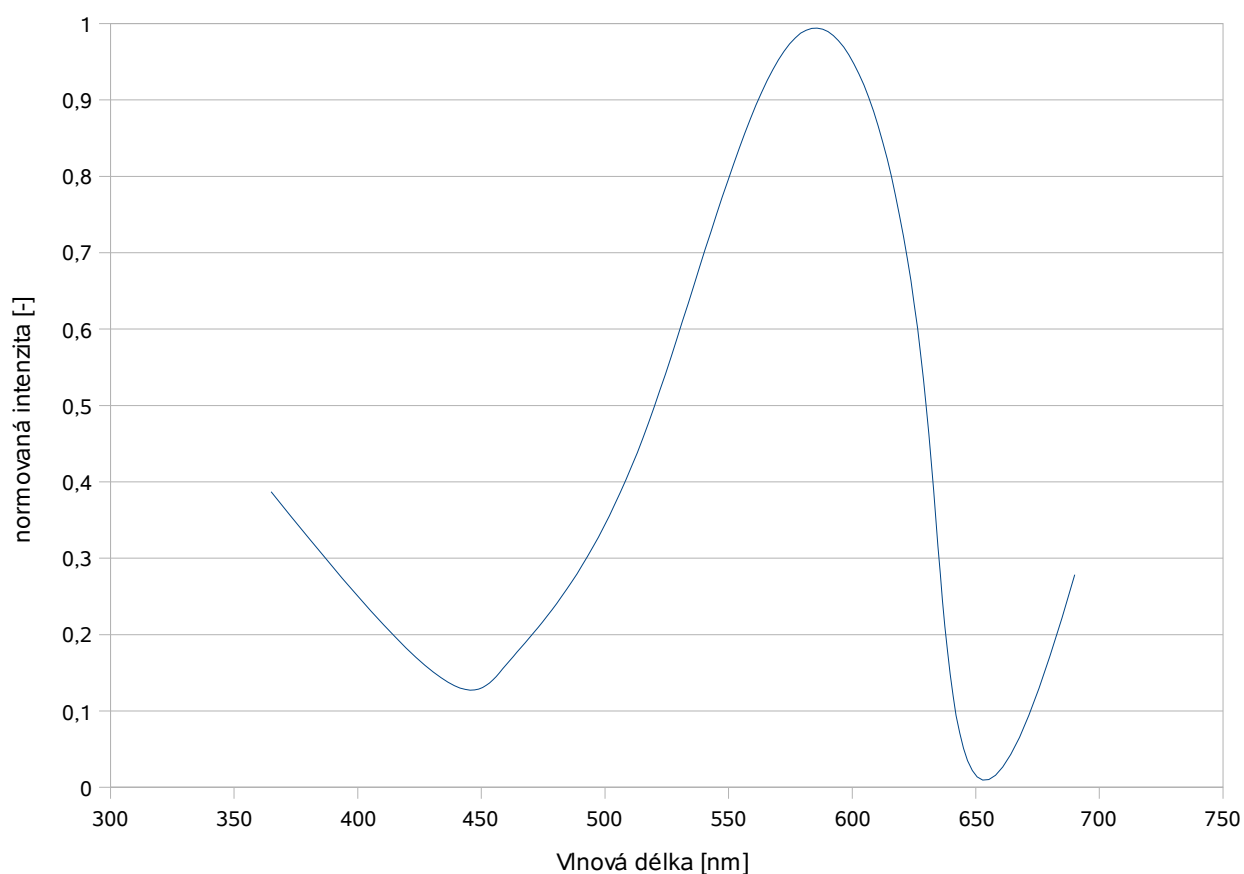
Obr. 66: Přenosové charakteristiky optických filtrů

Filtry jsou značeny specifickým značením, pro jednoduchost platí tabulka pro určení střední hodnoty propustného pásma filtrů z názvů:

Tabulka 5: Názvy optických filtrů a středy propustných pásem

Název filtru	Střední hodnota propustného pásma [nm]
15	580
26	590
135	640
139	525
165	452
707	442
738	515
779	365

Filtry byly postupně vřazovány do optické přenosové cesty, byla zkoumán předpoklad, že všechny body nemusí mít stejné spektrum záření. Tato teoretická úvaha se nepotvrdila, je možno tedy stanovit spektrum záření z jedné lokální oblasti a nazvat ho spektrem společným pro záření ze všech lokálních oblastí. Byla nastavena stálá poloha optického vlákna nad povrchem solárního článku, zajištěna dostatečná teplotní stabilita a i přes všechny tyto opatření byl sledován drift výstupní úrovně bez použití filtru. Při výpočtech byl tento drift připočten. Výsledné spektrum záření, které bylo pro názornost normováno, je uvedeno na obrázku 67. Maximum se nachází na vlnové délce 570nm. Pro zlepšení přesnosti měření by bylo vhodné použít větší sadu filtrů.

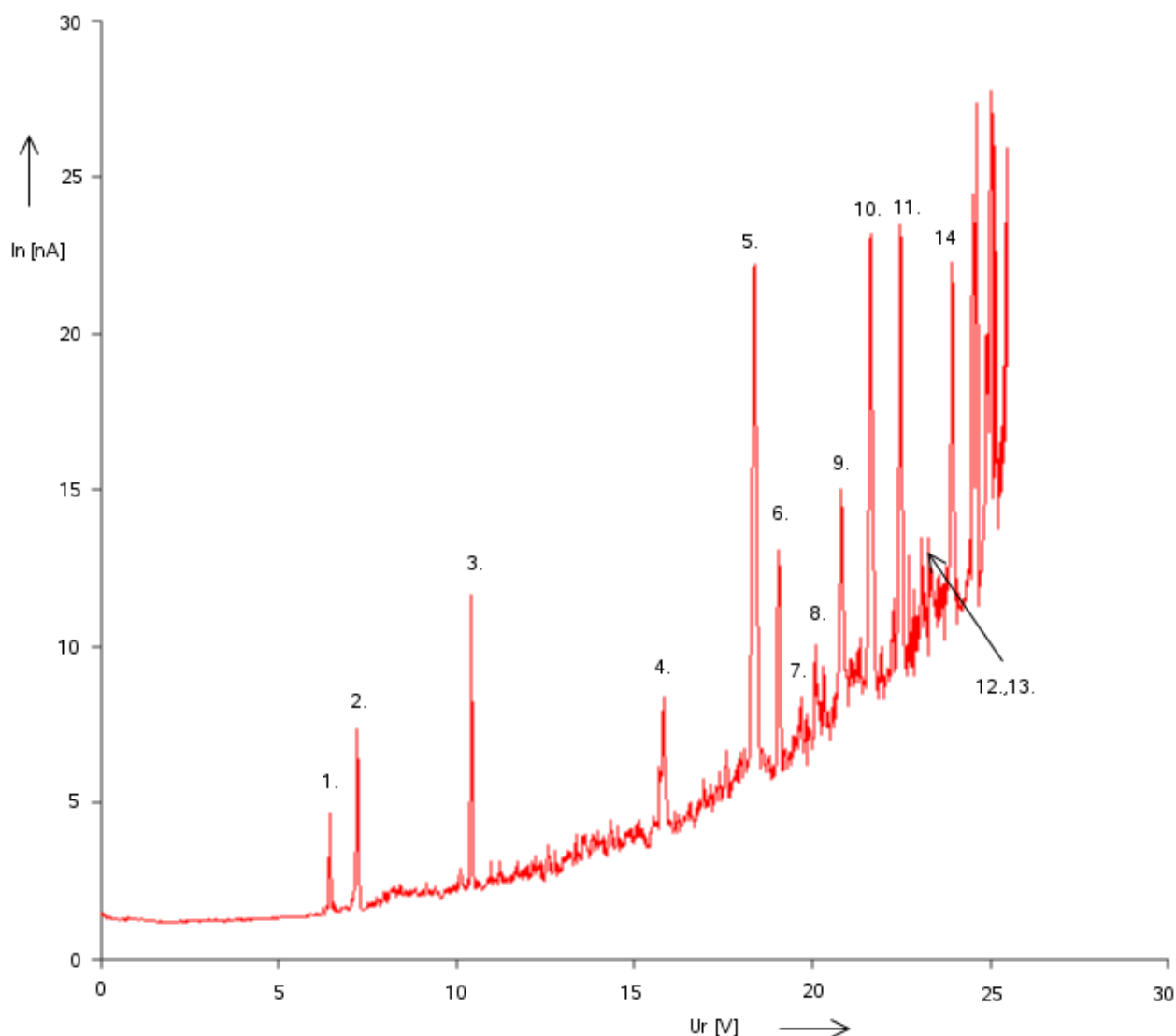


Obr. 67: Spektrum záření z lokálních oblastí

4.5 Jev způsobující vznik emise z lokálních oblastí

Pro tento experiment byl použit vzorek 33-3, který má dostatečný počet defektních oblastí. Byly zachyceny snímky emise z povrchu pro 20 různých hodnot závěrných napětí se zvyšující tendencí, u každého byl pozorován přírůstek počtu bodů oproti předchozím. Dále bylo u tohoto vzorku provedeno měření efektivní hodnoty šumového proudu (viz kapitola 2.4.3) také v závislosti na závěrném napětí. Na změřené charakteristice (obr. 68) jsou vyznačeny špičky, ověřením bylo zjištěno, že tyto špičky odpovídají bistabilním oblastem mikroplazmatu. Jsou očíslovány vzestupně do hodnoty závěrného napětí 23V.

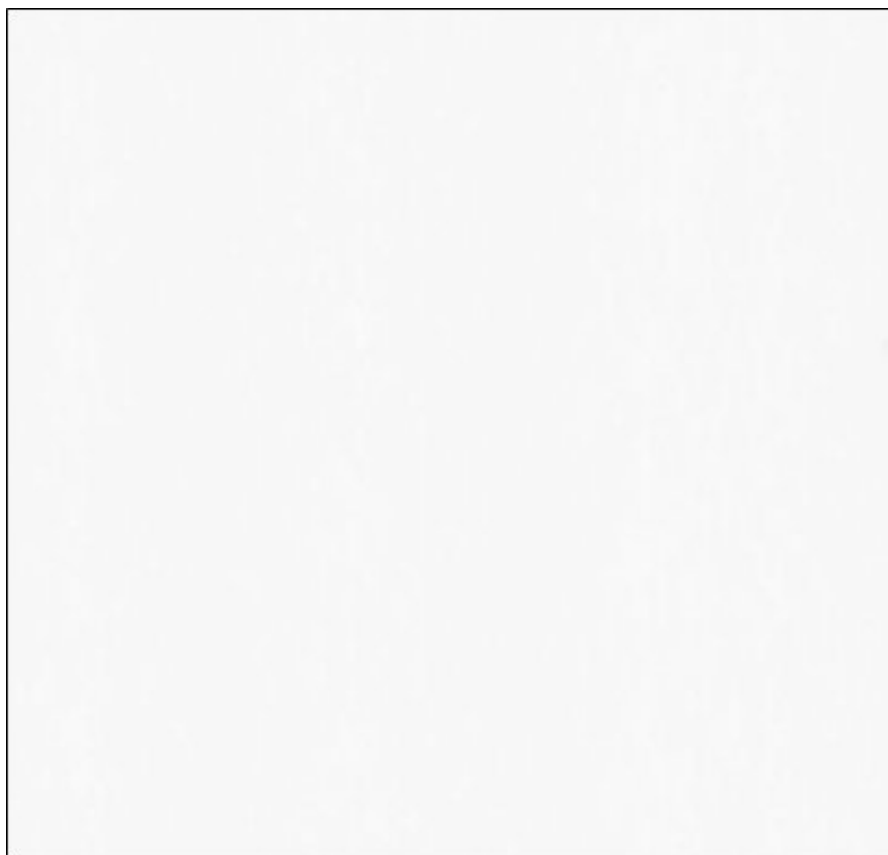
V dalším textu bude ukázán vztah mezi špičkami na charakteristice efektivní hodnoty šumového proudu a body na snímcích emise.



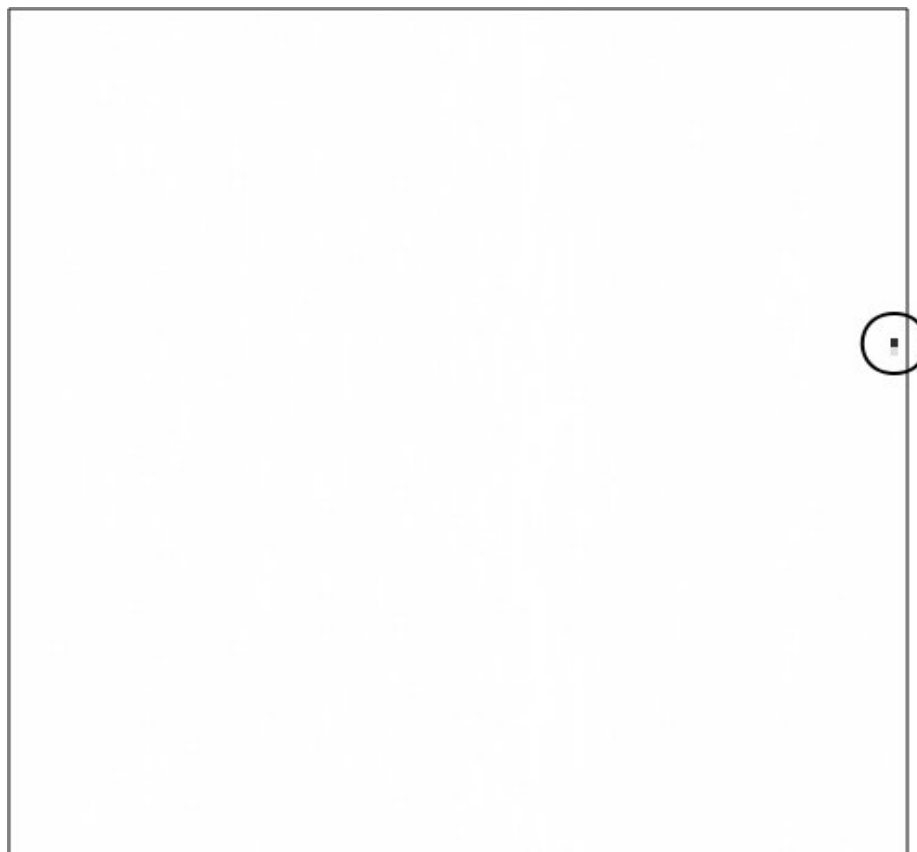
Obr. 68: Závislost efektivní hodnoty šumového proudu na závěrném napětí

Snímek emise na obrázku 69 evidentně neobsahuje žádný bod, tomu odpovídá i absence významné špičky šumového proudu do napětí 5,833 V. Při zvýšení napětí na 6,791 V (obrázek 70) se jeden bod objevuje, jedná se o bod označený pořadovým číslem 1. Druhý bod (obrázek 71) se objevuje v intervalu napětí 6,791 V a 7,764 V, což odpovídá v šumové charakteristice špičce s pořadím 2. Následuje několik snímků, které nevykazují přírůstek, ale ani úbytek počtu bodů, až v intervalu 10,670 V a 11,641 V lze nalézt další nový bod, v pořadí 3. (obrázek 72) Tomuto bodu odpovídá špička s pořadovým číslem 3. Další bod (obrázek 73) se nalézá v intervalu napětí 14,494 V a 16,464 V – špička číslo 4. Výskyt dvou nových emitujících bodů je zaznamenán mezi 18,361 V a 19,297 V (obrázek 74), v šumové charakteristice tomu odpovídá dvojice špiček 5 a 6. Následně přibývají další izolované oblasti, vždy jsou na snímcích emise označeny kroužkem, v šumové charakteristice odpovídají špičkám s pořadovými čísly 7 až 14. Měření bylo provedeno do závěrného napětí 25 V, od hodnoty 23 V však přibývá příliš velké množství bodů a nelze přesně určit jejich počet ani v šumové charakteristice, je proto uvažováno pouze do 23 V závěrného napětí. Níže uvedené obrázky jsou uvedeny pouze pro napětí výskytů nových bodů.

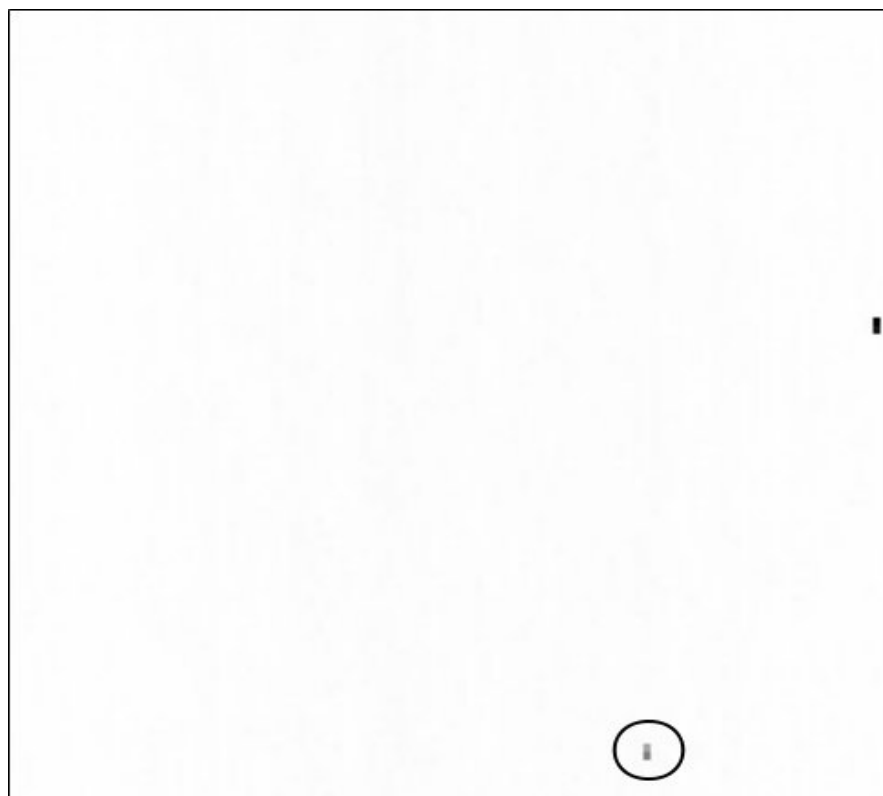
Tímto způsobem byl ke každé špičce závislosti efektivní hodnoty šumového proudu přiřazen právě jeden emitující bod, odpovídající oblasti mikroplazmatu, která byla ověřena dle tvaru šumu v časové oblasti (viz. kapitola 2.4.1). Emise je tvořena tedy výhradně lokálními oblastmi vykazujícími vedením proudu v mikroplazmatu.



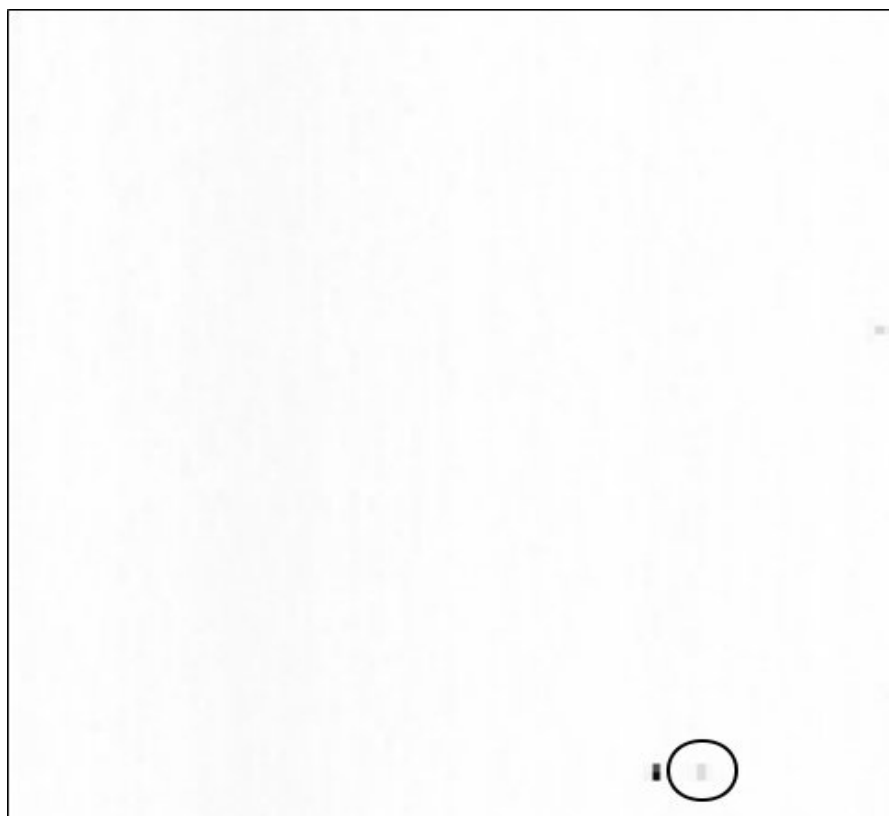
Obr. 69: vzorek 33-3 pro 5,833 V



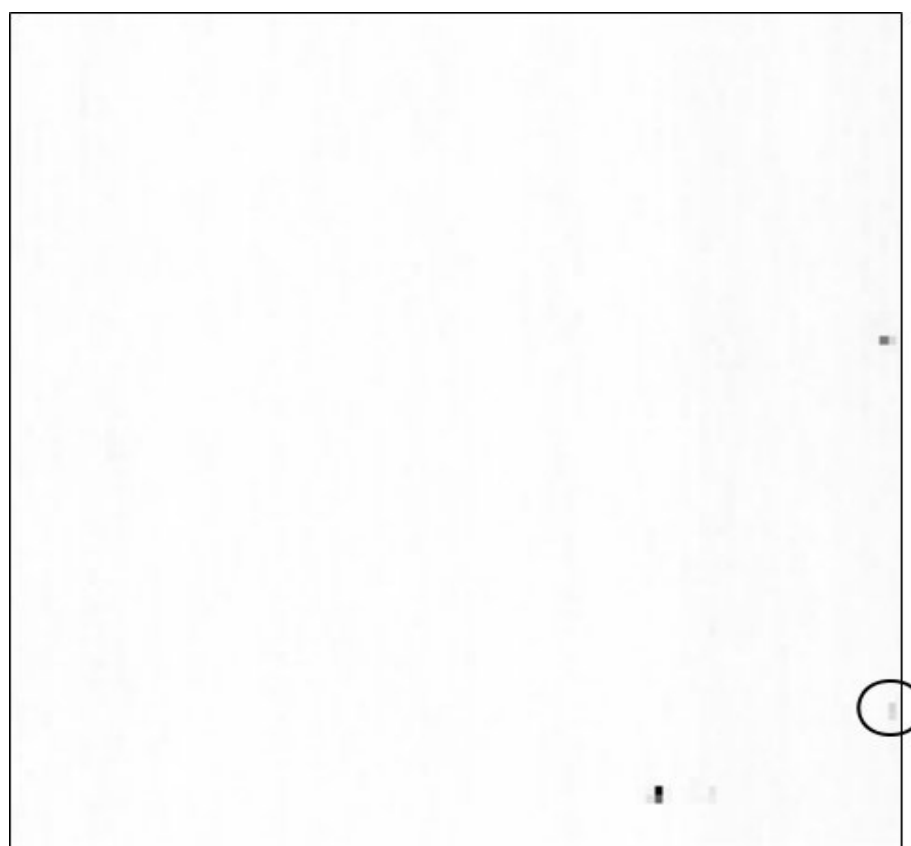
Obr. 70: Vzorek 33-3 pro 6,791 V



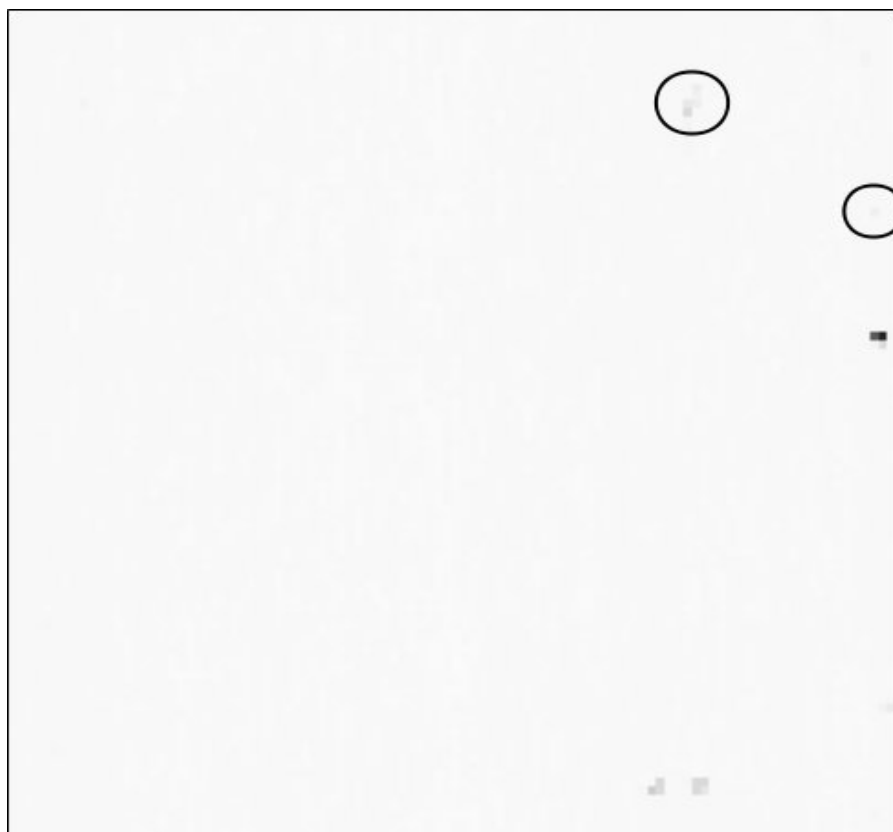
Obr. 71: Vzorek 33-3 pro 7,764 V



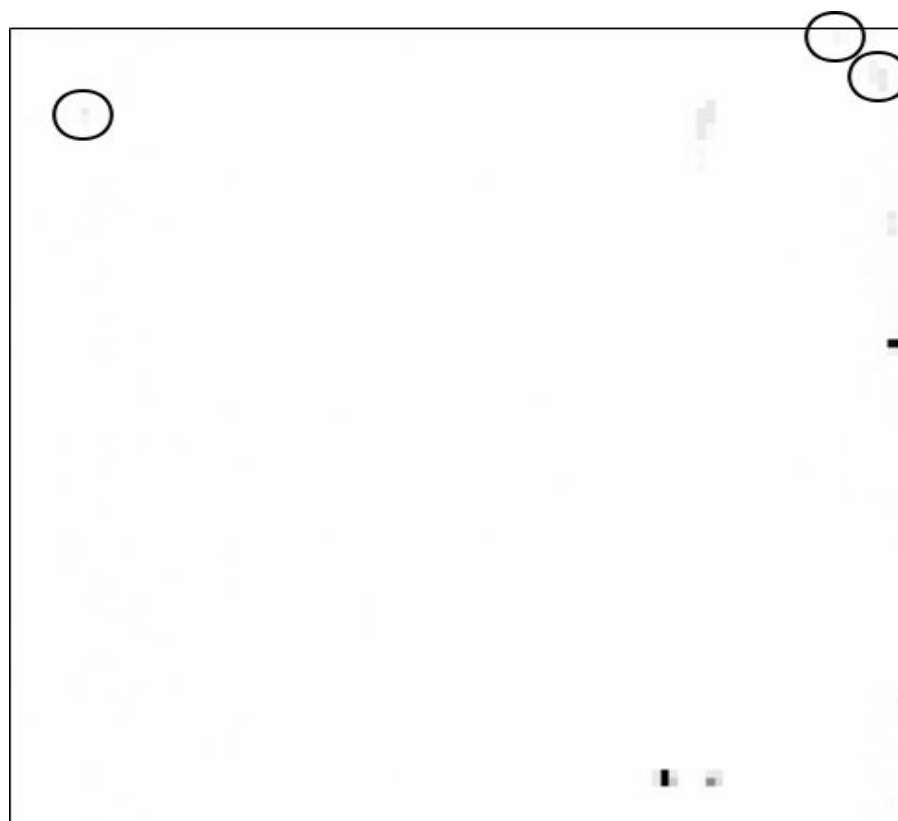
Obr. 72: Vzorek 33-3 pro 11,641 V



Obr. 73: Vzorek 33-3 pro 16,464 V



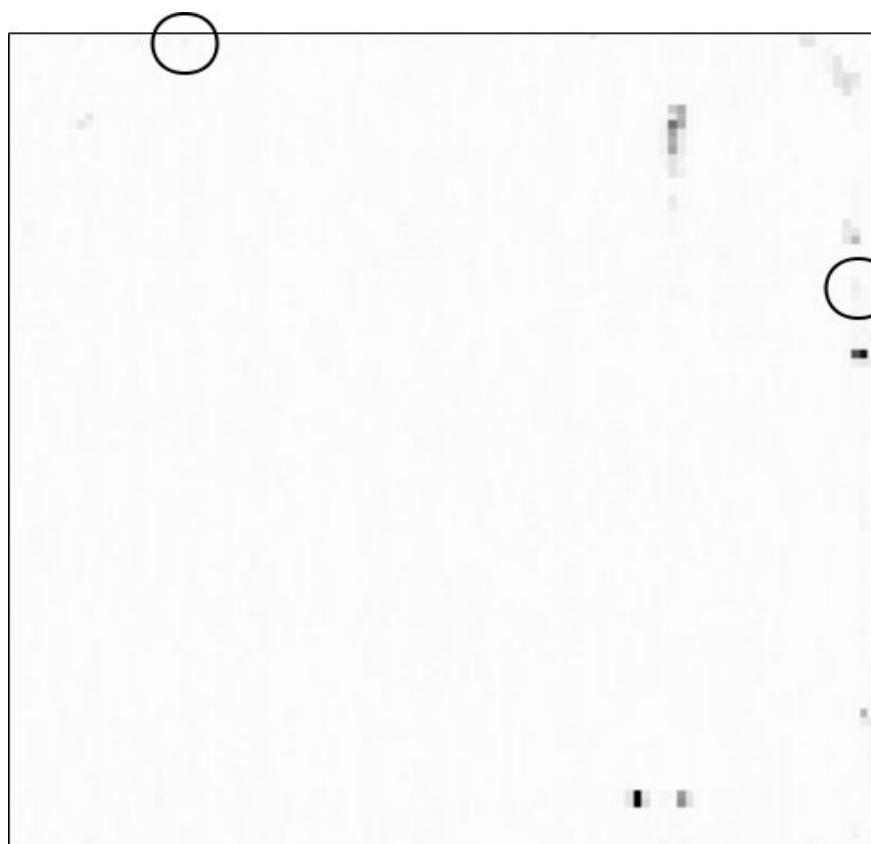
Obr. 74: Vzorek 33-3 pro 19,294 V



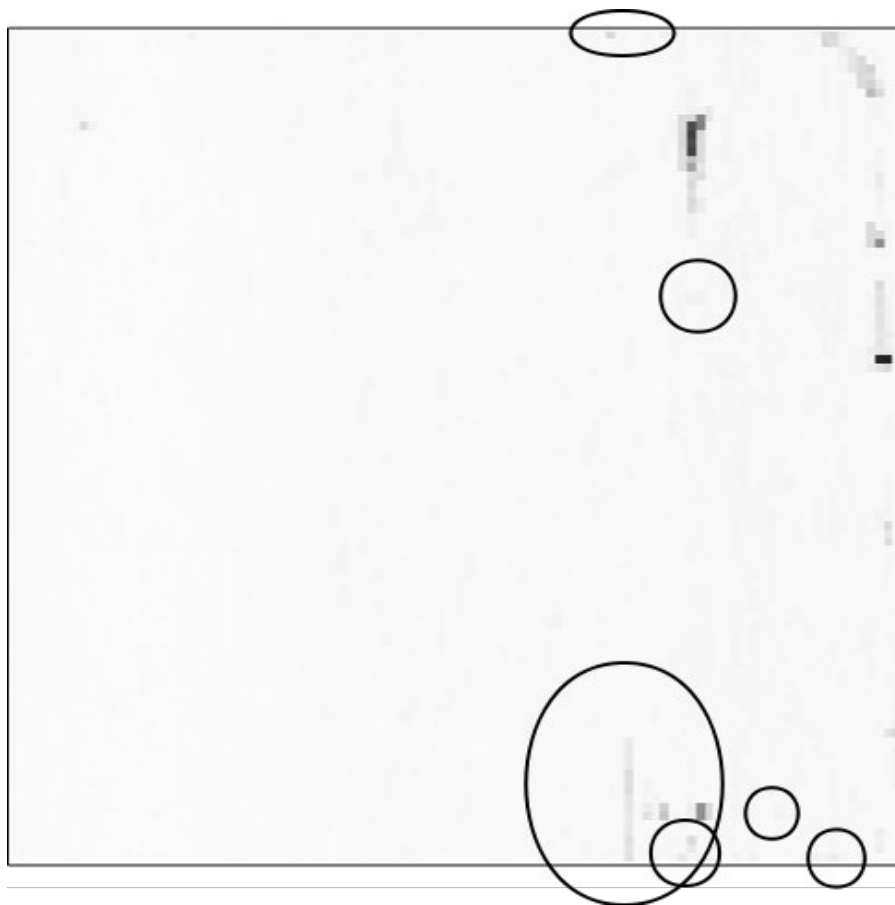
Obr. 75: Vzorek 33-3 pro 20,23 V



Obr. 76: Vzorek 33-3 pro 21,14 V



Obr. 77: Vzorek 33-3 pro 22,04 V



Obr. 78: Vzorek 33-3 pro 22,96 V

5 Závěr

U mnoha elektrických součástí využívajících ke své činnosti PN přechod se vyskytují lokální defekty. Tyto defekty se mohou projevit při závěrně polarizovaném přechodu vznikem lokálních lavinových výbojů. V mnoha případech jsou tyto výboje doprovázeny emisí záření, které nese informace o procesech probíhajících v dané oblasti. Byla popsána spojitost vzniku lokálního záření z oblastí PN přechodu solárního článku se vznikem mikroplazmatu v defektních oblastech PN přechodu, kdy je vedení proudu oblastní mikroplazmatu v PN přechodu zpravidla doprovázeno emisí světelného záření.

Byly diskutovány různé možnosti měření této emise, jejich citlivost a vhodnost použití pro konkrétní případ vybraných typů solárních článků s ohledem pro pozdější zaznamenávání. Z uvedených možností použití snímacího prvku záření byl použit fotonásobič z důvodu dostatečně velké citlivosti na vstupní záření. S ohledem na jeho charakteristické vlastnosti bylo blokově navrženo měřicí pracoviště. Analogový souřadnicový zapisovač pohybuje koncem optického vlákna nad povrchem solárního článku, který je napájen v závěrném režimu zdrojem napětí 0 V až 50 V.

Optickým vláknem se přenáší signál ke vstupu fotonásobiče, jeho trubice s elektronkou je umístěna v tepelně izolovaném prostředí. Peltierovým článkem se snižuje teplota trubice fotonásobiče pro snížení tzv. temného proudu, který způsobuje příliš velké rušení v měřicí cestě, poměr signál / šum (S/N) by byl bez chlazení příliš nízký pro potřeby měření. Byl dokázán vliv temného proudu na měřený signál, zjištěn vztah temného proudu fotonásobiče a teploty. Výsledné ochlazování trubice fotonásobiče na teplotu -5°C bylo shledáno jako optimální z hlediska poklesu temného proudu a zároveň byl zohledněn čas teplotního ustálení před započítáním měření. Další snižování teploty by vedlo pouze k prodloužení času, potřebného pro ustálení teploty.

Výstup z trubice fotonásobiče i jeho napájení zdrojem vysokého napětí jsou přivedeny do řídicí části fotonásobiče, kde je umístěna potřebná ovládací elektronika. Souřadnicový zapisovač se solárním článkem je umístěn do opticky izolovaného prostředí, do kterého byl umístěn i ventilátor pro odvod ztrátového výkonu z povrchu článku. Veškeré přívodní vodiče opticky izolovaného prostředí jsou přizpůsobeny k zamezení průniku okolního záření do vstupu optického vlákna.

Výstup fotonásobiče je veden přes logaritmický zesilovač, který má za úkol upravit dynamiku signálu pro snížení vlivu kvantovacího šumu A/D převodníku. Následuje nízkošumový zesilovač s vestavěnými filtry. Bylo dokázáno, že filtrace spektra frekvencí od 0 Hz do 30 Hz nemá za následek snížení vypovídající schopnosti měření, zároveň tím lze snížit odebíraný počet vzorků A/D převodníkem a urychlit tak proces měření. Logaritmický zesilovač i zesilovač s filtry jsou napájeny z akumulátorů pro odstranění rušivých vlivů z napájecí sítě. Ovládání zapisovače je uskutečňováno D/A převodníky v měřicí kartě, přes sběrnici IEEE 488 je ovládán zdroj závěrného napětí solárního článku, zdroj pro povolení funkce fotonásobiče, osciloskop připojen pro zaznamenávání obrazovek měřených časových průběhů.

Realizovaný program obsluhuje měřicí kartu a sběrnici IEEE 488 přes USB adaptér. Dovoluje měřit, zaznamenávat a zpracovávat emisi záření z povrchů solárních článků, obsahuje zásobník naměřených dat, zásobník nastavení měření, funkce pro ukládání do externích souborů a načítání, nezávislý proces měření. Část zpracování dat vypočítává statistické údaje měřených dat, zobrazuje do dvourozměrného obrazu prostorovou emisi, umožňuje využít funkci prahování úrovní a základní předvolené ohraničení měřené plochy. Výsledné dvourozměrné zobrazení lze přibližovat i posunovat v osách kolmých ke směru pohledu.

Byla diskutována vhodnost použití vybraného optického vlákna pro přenos emise záření do povrchu solárního článku do trubice fotonásobiče, uvedený přehled různých druhů vláken a jejich vlastností přímo vede k výběru zvoleného plastového vlákna. K tomuto vláknu byly naměřeny charakteristické vlastnosti jako jsou měrný útlum, numerická apertura a útlumová charakteristika. Tím byla potvrzena vhodnost použití vlákna.

Po zhodnocení správné funkce měřicího pracoviště byly změřeny emise z různých sérií solárních článků stejné generace, byly demonstrovány vzájemné odlišnosti. Dále byla zkoumána závislost počtu emitujících bodů a jejich intenzity na velikosti závěrného napětí, došlo k ověření počáteční teoretické úvahy, kdy počet bodů a jejich intenzita je přímo závislá na velikosti závěrného napětí.

Pro určení spektra záření z lokálních oblastí byly použity optické filtry vřazené do optické cesty, jejich útlumová charakteristika byla změřena pomocí optického spektrálního analyzátoru. Veškeré emitující body, vykazují stejný charakter, mají tedy stejný princip vzniku emise, z naměřených hodnot intenzity záření pro všechny filtry byl zkonstruováno vyžářované spektrum, maximum se nachází na vlnové délce 580 nm, na obou stranách klesá.

Další zkoumanou vlastností je vztah mezi významnými špičkami v charakteristice závislosti efektivní hodnoty šumového proudu na závěrném napětí a konkrétními emitujícími body u vzorku solárního článku s označením 33-3 . Měřením v časové oblasti bylo prokázáno, že špičky ve zmíněné charakteristice odpovídají bistabilním oblastem mikroplazmatu. Pro 20 různých hodnot napětí byla měřena emise z povrchu solárního článku a označeny nově aktivované body. Těmto bodům lze přiřadit jednotlivé špičky v charakteristice efektivní hodnoty šumového proudu na závěrném napětí, je tedy možno konstatovat, že důvodem vzniku emise záření z povrchu solárního článku je vedení proudu mikroplazmatem.

6 Použitá literatura

- [1] MCKAY, K.G. Photon Emission from Avalanche Breakdown in Silicon. Physical review. Bell Telephone Laboratories, Murray Hill, New Jersey : [s.n.], 1956. Vol. 102. s. 369-375.
- [2] KOKTAVÝ, P., ŠIKULA, J. Reverse Biased P-N Junction Noise in GaAsP Diodes with Avalanche Breakdown Induced Microplasmas. Fluctuation and Noise Letters, ISSN 0219-4775, 2002, Vol. 2, No 2, p. L65 - L70.
- [3] NATIONAL , Instruments. Test and Measurement Equipments : Data Acquisition Cards [online]. 2005 [cit. 2007-12-18]. Dostupný z WWW: <<http://www.ni.com/dataacquisition/>>.
- [4] CLARK, Dave, et al. Lasers may brighten the solar cell market. PHOTONICS SPECTRA. 2007, June 6, s. 54-56.
- [5] Wikipedia: Solar cell [online]. 2007 [cit. 2007-10-10]. Dostupný z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_cell>.
- [6] KOKTAVÝ, Pavel, et al. Noise Diagnostic of Solar Cells. [s.l.] : [s.n.], 2007. 4 s.
- [7] KOKTAVÝ, Pavel. Nedeštruktivní diagnostika a fyzika dielektrik. [s.l.] : [s.n.], 2006. 102 s.
- [8] MCGILL, Michael; RACINE, Drew. OCLC : Online Computer Library Center. In ARMS, Caroline (ed.). Campus strategies for libraries and electronic information. Bedford (Mass.) : Digital Press, 1990, s. 36-56.
- [9] CHYNOWETH, A.G., MCKAY, K.G. Light Emission and Noise Studies of Individual Microplasmas in Silicon. 1st edition. Vol. 30. Bell Laboratories, Inc., Murray Hill, New Jersey : [s.n.], 1959. Journal of applied physics. 11, s. 1811-1812.
- [10] 40% Efficient Solar Cells [online]. 2006, 15.12.2007 [cit. 2007-12-16]. Dostupný z WWW: <http://www.treehugger.com/files/2007/04/stateofheart_m.php>
- [11] The University of New Wales. Future Students - What are Photovoltaic Devices [online]. 2007, 29.3.2007 [cit. 2007-11-25]. Dostupný z WWW: <<http://www.pv.unsw.edu.au/future-students/pv-devices/how-they-work.asp>>
- [12] Wikipedia:Fotovoltaický článek [online]. 2006, 10.12.2007 [cit. 2007-12-10]. Dostupný z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Fotovoltaický_článek>.
- [13] Scout:Wearable Solar Technology [online]. 2007, 13.6.2007 [cit. 2007-11-21]. Dostupný z WWW: <<http://www.cscout.com/blog/2007/07/13/wearable-solar-technology.html>>
- [14] Ciba Inc., Ciba Specialty Chemicals and VTT Technical Research Centre of Finland collaborate in printed electronics [online]. 2007, 31.01.2007 [cit. 2007-12-15], Basel, Switzerland . Dostupný z WWW: <<http://www.cibasc.com/ja/index/med-index.htm>>
- [15] King Mongkut's University of Technology Thonburi, The Physics of Photovoltaic Cells [online]. 2000, [cit. 2007-11-19]. Dostupný z WWW: <<http://www.jgsee.kmutt.ac.th/exell/Solar/PVCells.html>>
- [16] http://lucy.troja.mff.cuni.cz/~tichy/elektross/soucastky/zadny_prechod/fotorezistor.html

- [17] Wikipedia: Fotorezistor [online]. 2006 , 10.12.2007 [cit. 2007-12-10]. Dostupný z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Fotorezistor>>.
- [18] Fotoelektrické součástky [online]. 2005, 8.2.2005 [cit.2007-11-20] Dostupný z WWW: <www.sous.cz/struna/skripta/files/16.pdf>
- [19] Akademon : Server pro technologické inovace, dobrodružství poznání a nejnovější poznatky vědy [online]. 2004 [cit. 2008-05-10]. Dostupný z WWW: <<http://www.akademon.cz/default.asp?source=0403>>
- [20] Wikipedia: Peltierův článek [online]. 2006 , 20.10.2007 [cit. 2007-12-20]. Dostupný z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Peltierův_článek>.
- [21] Loard technologies : Thermoelectric cooling [online]. 2001 [cit. 2008-03-04]. Dostupný z WWW: <<http://www.supercool.se/>>.
- [22] FILKA, Miloslav. Optické sítě : Přednášky. 1. vyd. Brno : [s.n.], 2007. 214 s.
- [23] Wikipedia: Optické vlákno [online]. 2006 , 14.12.2007 [cit. 2008-03-02]. Dostupný z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Optické_vlákno>.
- [24] Arsenal : Minikamera CCD 2-M [online]. c2006 [cit. 2008-03-08]. Dostupný z WWW: <<http://www.arsenal.cz/cz/katalog-mikroskopu-a-prislusenstvi/prislusenstvi/ccd-kamery/ccd-2-m/c6071>>.

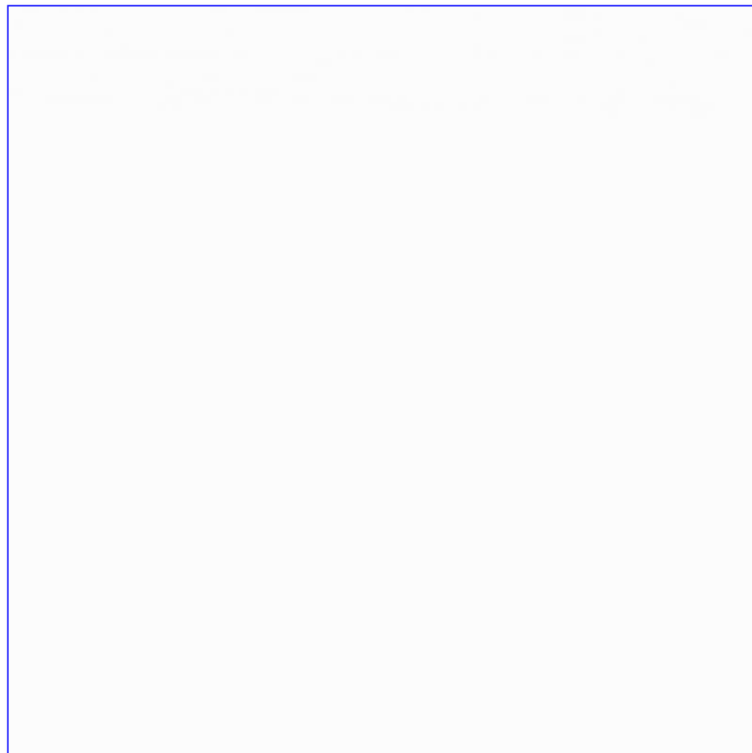
7 Seznam příloh

A. Emise z povrchů článků	75
B. Fotografie pracoviště	99

Seznam použitých veličin zkratek a symbolů

I_0	saturační proud diodou
e	elementární náboj
U	napětí
k_b	boltzmanova konstanta
T	teplota
I_L	fotogenerovaný proud
LED	luminiscenční dioda
g	koeficient generace
r	koeficient rekombinace
ω	úhlová rychlost
S_i	spektrální výkon
CCD	charge-coupled device (nábojově spřezžený člen)
U_i	efektivní hodnota napětí kvantovacího šumu
U_m	napěťový rozsah převodníku
SM	jednovidové vlákno (single mode)
MM	mnohovidové vlákno (multi mode)
NA	numerická apertura
θ	úhel odklonu od osy vlákna
P_{opt}	výkon vyzářený z konce vlákna
WDM	system optického vlnového mutliplexu
$DWDM$	system hustého optického vlnového mutliplexu
U_r	závěrné napětí
I_r	závěrný proud
A_U	napěťové zesílení

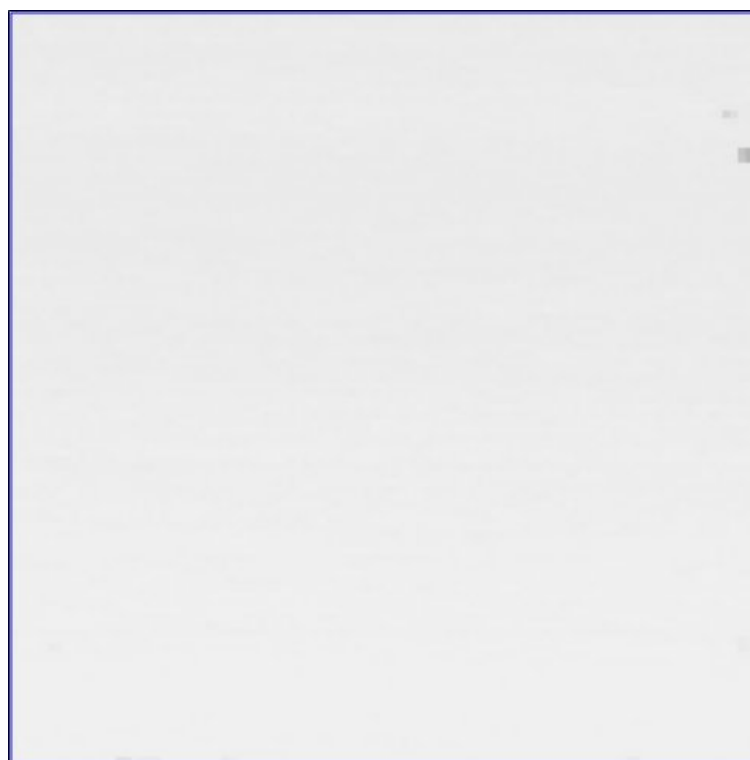
A Emise z povrchu článků



Měření 1: Vzorek 23-1 pro 6 V



Měření 2: Vzorek 23-2 pro 6 V



Měření 3: Vzorek 23-3 pro 25 V



Měření 4: Vzorek 23-6 pro 4 V



Měření 5: Vzorek 30A-10 pro 7 V



Měření 6: Vzorek 30A-11 pro 8 V



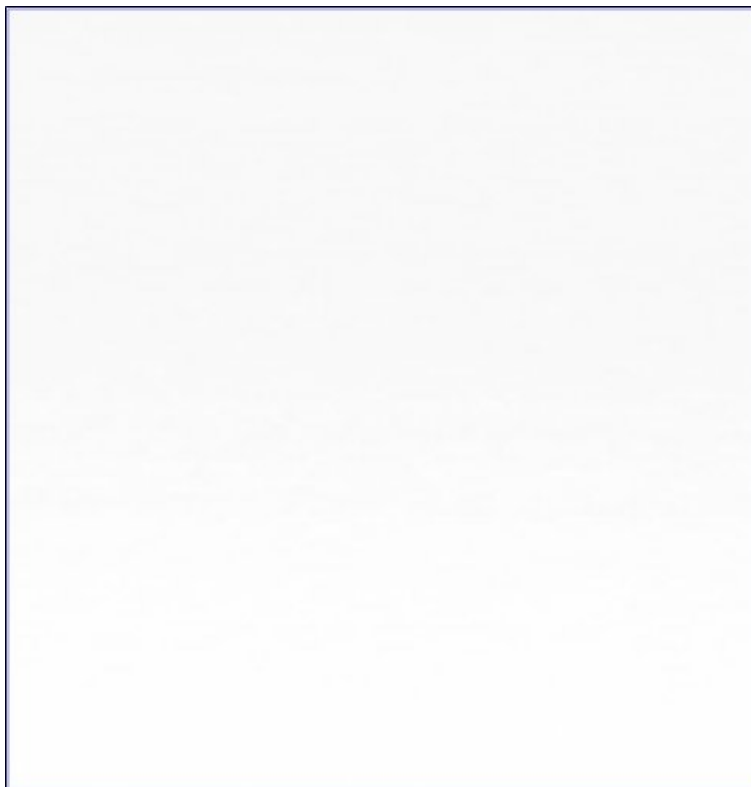
Měření 7: Vzorek 30A-2 pro 20 V



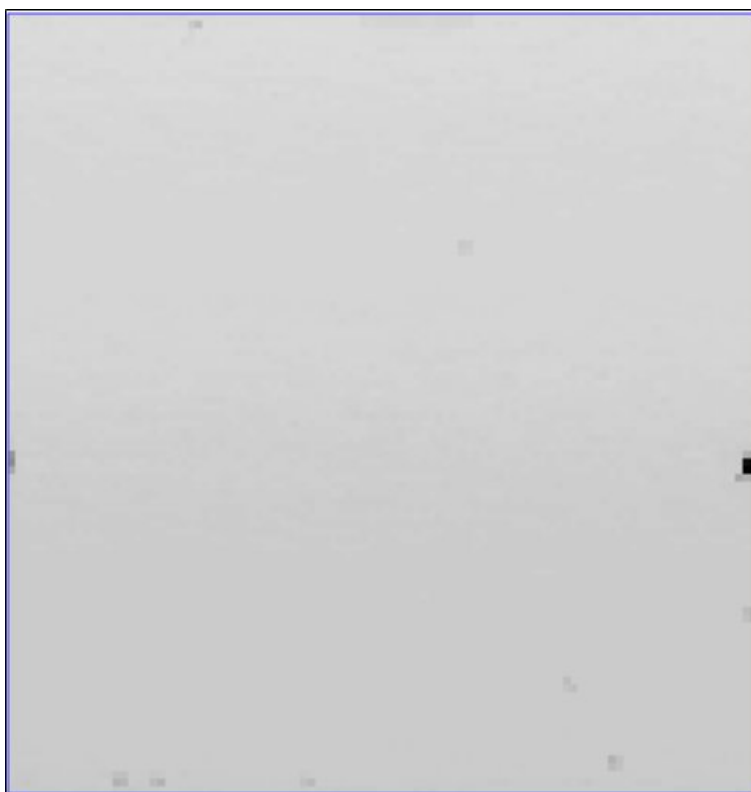
Měření 8: Vzorek 30A-3 pro 16 V



Měření 9: Vzorek 30A-4 pro 16 V



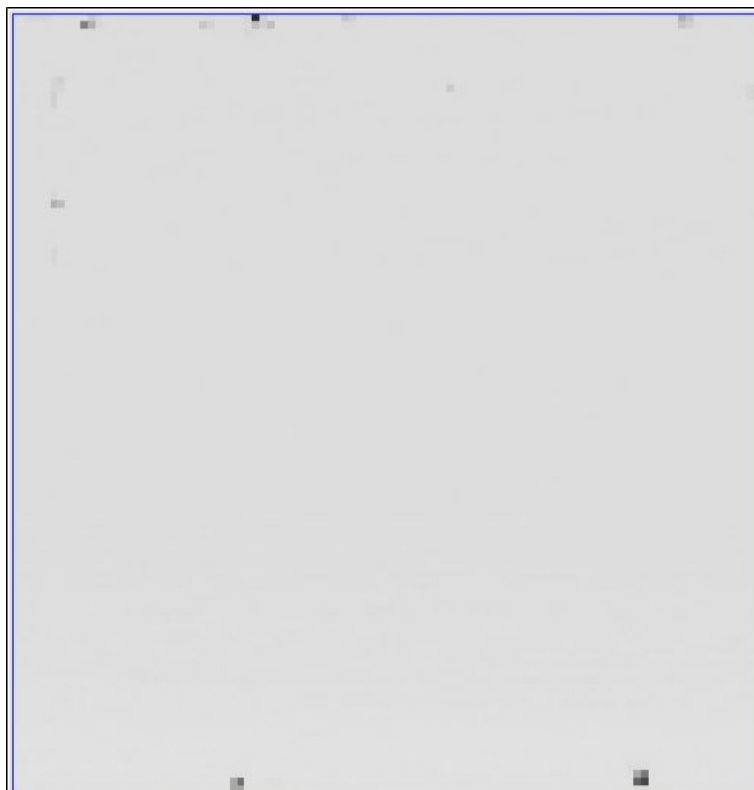
Měření 10: Vzorek 30-2 pro 8 V



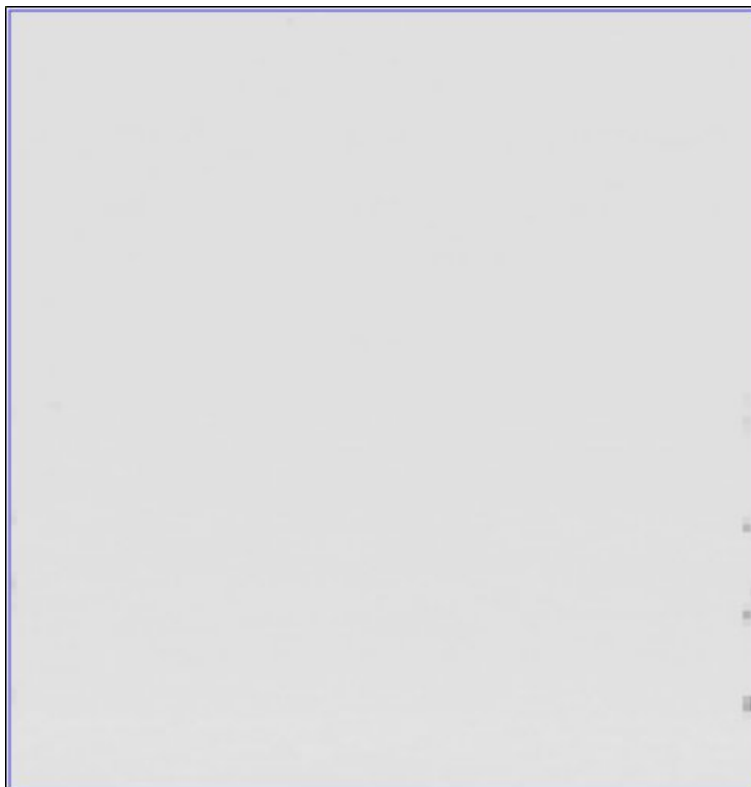
Měření 11: Vzorek 30-4 pro 20 V



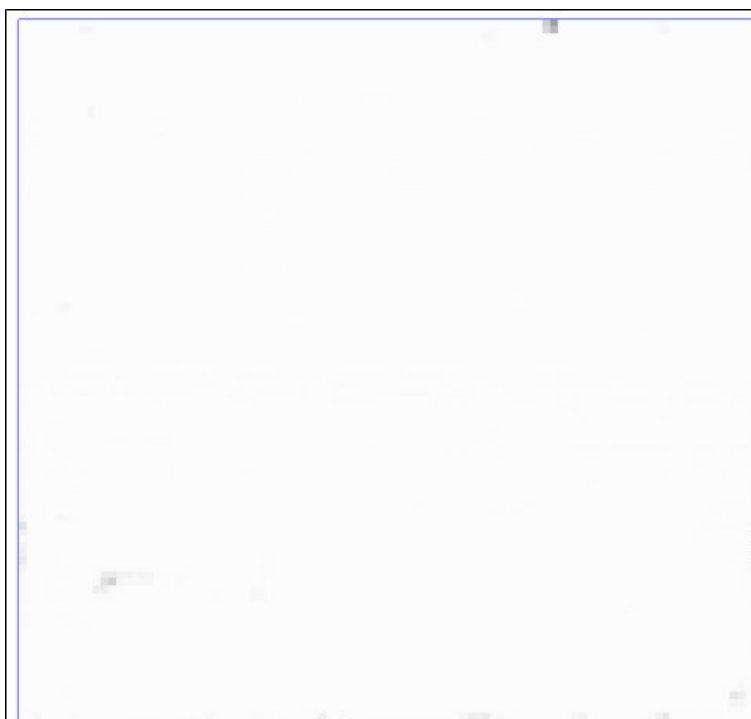
Měření 12: Vzorek 32-1 pro 12 V



Měření 13: Vzorek 32-16 pro 8 V



Měření 14: Vzorek 32-4 pro 6 V

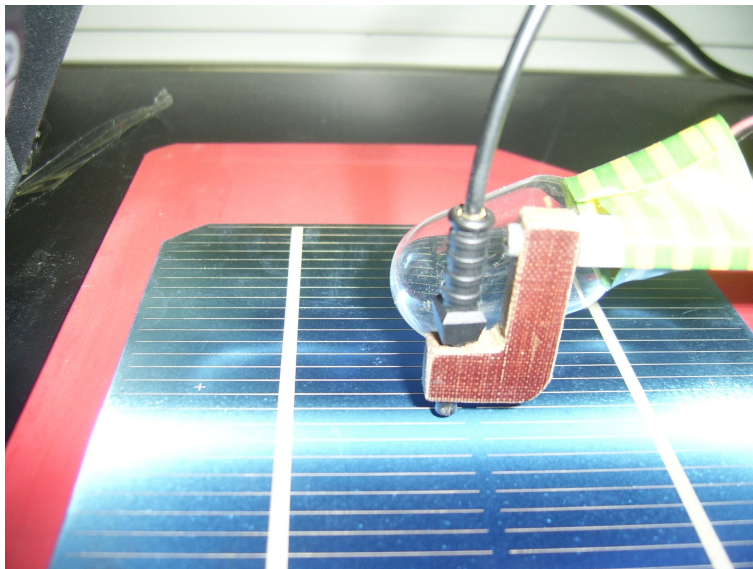


Měření 15: Vzorek 33-3 pro 20 V

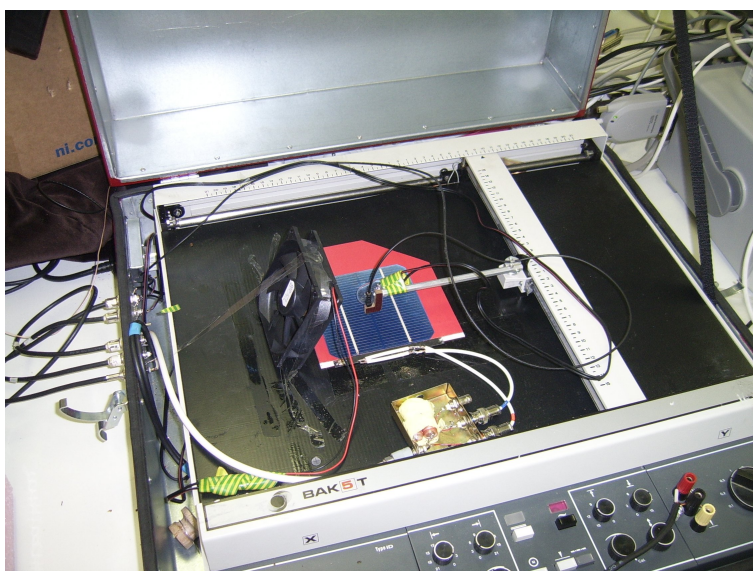


Měření 16: Vzorek 40-1 pro 3 V

B Fotografie pracoviště



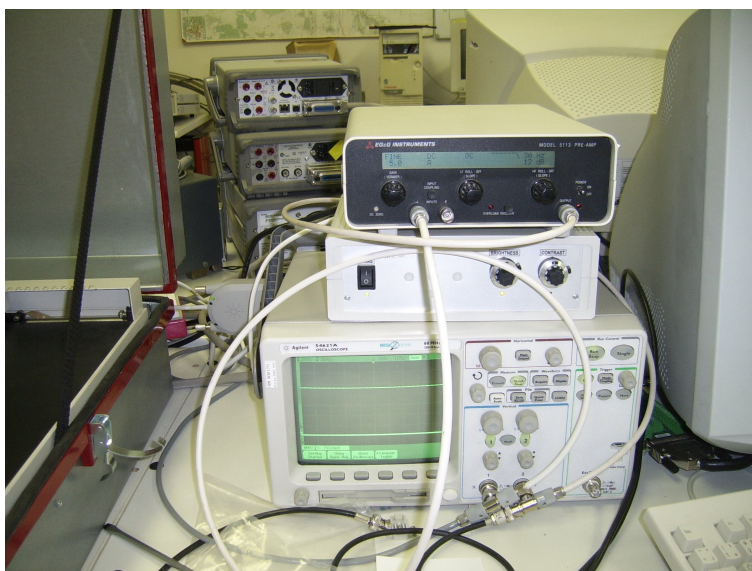
Fotografie 1: Umístění konce vlákna v ramínku zapisovače nad povrchem solárního článku



Fotografie 2: Souřadnicový zapisovač v opticky oddělující konstrukci



Fotografie 3: Opticky izolované oddělení, vpravo tepelně izolované oddělení s peltierovým článkem



Fotografie 4: Osciloskop, řídicí elektronika fotonásobiče a nízkošumový předzesilovač