



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

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

MĚŘICÍ PRACOVNÍ MÍSTO FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ S ŘÍZENÍM TEPLoty

MEASURING WORKPLACE OF SOLAR CELLS WITH TEMPERATURE CONTROL

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

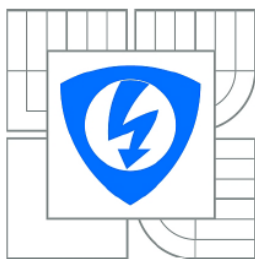
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. ROMAN GVRITISHVILI

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. ALEŠ VESELÝ

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektrotechnologie

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektrotechnická výroba a management

Student: Bc. Roman Gvritishvili

ID: 132178

Ročník: 2

Akademický rok: 2011/2012

NÁZEV TÉMATU:

Měřicí pracoviště fotovoltaických článků s řízením teploty

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s diagnostickými metodami solárních článků a metodami kontroly teploty a měření teploty. Na základě těchto poznatků sestavte pracoviště pro měření fotovoltaických článků s řízením teploty. Na tomto pracovišti pak proveďte měření pomocí dostupných měřicích metod.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího diplomové práce.

Termín zadání: 6.2.2012

Termín odevzdání: 24.5.2012

Vedoucí práce: Ing. Aleš Veselý

Konzultanti diplomové práce:

prof. Ing. Jiří Kazelle, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Prohlášení

Prohlašuji, že svoje diplomovou práci na téma ***Měřicí pracoviště fotovoltaických článků s řízením teploty*** jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrálního projektu 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 24. května 2012

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu semestrálního projektu Ing. Aleši Veselému, za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování projektu.

V Brně dne 24. května 2012

.....
podpis autora

ABSTRAKT

Diplomová práce se v první části zabývá teoretickým popisem základů fotovoltaiky, principem FV článku, druhů poruch se vyskytujících v solárních článcích. Byly také popsány měřicí metody fotovoltaických článků a metody měření a kontroly teploty. Druhá část diplomové práce se zabývá praktickým měřením solárních článků metodou elektroluminiscence při různých teplotách měření. V této kapitole je také popsáno sestavené měřicí pracoviště solárních článků s řízením teploty.

Klíčová slova: diagnostické metody fotovoltaických článků, pracoviště pro měření solárních článků, elektroluminiscence.

ABSTRACT

Master`s thesis in the first part deals with the theoretical description of the basics of photovoltaics, principles of solar cell, failures occurring in solar cells. There were also described diagnostic methods for measuring the solar cells and methods of temperature measurements and control. The second part of the thesis deals with the practical measurements of solar cells by electroluminescence at different temperatures. This chapter also describes measuring workplace of solar cells with temperature control.

Key words: diagnostic methods for measuring the solar cells, workplace for measurement of photovoltaics panels, electroluminescence.

GVRITISHVILI, R. *Měřicí pracoviště fotovoltaických článků s řízením teploty*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 48 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Aleš Veselý

Obsah

Úvod.....	9
1. Základy fotovoltaické teorie	10
1.1 Princip solárního článku	11
1.2 Solární panel	12
2. Typy defektů, vznikajících v solárních článcích	14
2.1 Bodové poruchy	14
2.2 Čárové poruchy	16
2.3 Plošné poruchy	17
3. Diagnostické metody fotovoltaických článků.....	18
3.1 Detekční metody pro měření materiálových vlastností a defektů.....	18
3.1.1 Metoda LBIC.....	18
3.1.2 Elektroluminiscence.....	20
3.1.3 Fotoluminiscence	21
3.1.4 Luminiscence mikroplazmy.....	22
3.2 Metody měření elektrických vlastností solárních článků	23
3.2.1 VA charakteristika	23
3.2.2 Zábleskový solární simulátor	24
4. Metody kontroly a měření teploty	26
4.1 Křemíková teplotní čidla	26
4.2 Bimetalové snímače teploty.....	27
4.3 Kapalně a plynově teploměry	27
4.4 Teplotní indikátor	28
4.5 Termistory.....	28
4.6 Bezkontaktní infračervené teploměry (pyrometry).....	29
4.7 Odporová teplotní čidla	30
4.8 Termočlánky	31
5. Praktická část.....	32
5.1 Měřicí pracoviště	32
5.1.1 Peltierův článek	34
5.1.2 Regulátor napětí.....	34
5.1.3 Vodní chlazení.....	36
5.1.4 CCD kamera G2-3200	37
5.2 Měření solárních článků metodou elektroluminiscence.....	38
5.2.1 Výsledky měření.....	39

5.2.2 Zhodnocení.....	45
Závěr	46
Seznam použité literatury	47
Přílohy	48

Seznam obrázků

Obr. 1 Schéma solárního článku.....	11
Obr. 2 Křemíkový solární panel	12
Obr. 3 Organický solární panel.....	13
Obr. 4 Vakance, intersticiál a cizí atom v krystalové mřížce.....	14
Obr. 5 Znazornění Schottkyho a Frenkelových poruch v krystalové mřížce.....	15
Obr. 6 Hranová dislokace v krystalové mřížce.....	16
Obr. 7 Šroubová dislokace v krystalové mřížce	16
Obr. 8 Ideální uspořádání.....	17
Obr. 9 Vrstevná chyba	17
Obr. 10 Objemové a povrchové defekty solárního článku [12]	18
Obr. 11 Schéma měřicího pracoviště LBIC[12].....	19
Obr. 12 Schéma měření metodou elektroluminiscence	20
Obr. 13 Poruchy článků zjištěné pomocí elektroluminiscenční metody.....	21
Obr. 14 Schéma měření metodou fotoluminiscence	22
Obr. 15 Schéma měření metodou luminiscence mikroplazmy.....	23
Obr. 16 Poruchy článku zjištěné metodou luminiscence mikroplazmy.....	23
Obr. 17 VA charakteristika kvalitního solárního článku [9]	24
Obr. 18 Měřicí pracoviště solárních panelů metodou solárního simulátoru	24
Obr. 19 Křemíkový snímač teploty [8]	26
Obr. 20 Bimetalový teploměr [8].....	27
Obr. 21 Plynový teploměr pro měření teplot v potrubí a nádržích.....	27
Obr. 22 Termoindikátor [8].....	28
Obr. 23 NTC termistor	29
Obr. 24 Pyrometr	30
Obr. 25 Platinové teplotní čidlo [3]	30
Obr. 26 Termočládková sonda [8]	31
Obr. 27 Blokové schéma měřicího pracoviště [6]	32
Obr. 28 Měřicí pracoviště.....	33
Obr. 29 Bronzová deska s kontaktním polem	33
Obr. 30 Peltierův clánek [3]	34
Obr. 31 Regulátor napětí - principiální schéma [6]	35
Obr. 32 Vodní blok [6].....	36
Obr. 33 Vodní čerpadlo Laing D5 24V [6]	36
Obr. 34 Digitální multimetr Diametral EX411	37
Obr. 35 CCD kamera G2-3200.....	37
Obr. 36 kvantová účinnost čipu KAF-3200ME [7]	38
Obr. 37 Solární článek, přední a zadní strana.....	38
Obr. 38 Vzorek č. 2 sada 2 v =6°C I=2,5A U=1,4V t=240s	40
Obr. 39 Vzorek č. 2 sada 2 v =12°C I=2,5A U=1,4V t=240s	40
Obr. 40 Vzorek č. 2 sada 2 v =24°C I=2,49A U=1,3V t=240s	40
Obr. 41 Vzorek č. 2 sada 2 v =40°C I=2,5A U=1,3V t=240s	40
Obr. 42 Vzorek č. 2 sada 2 v =60°C I=2,5A U=1,2V t=240s	40
Obr. 43 Vzorek č. 2 sada 2 v =70°C I=2,5A U=1,2V t=240s	40
Obr. 44 Vzorek č. 1 sada 2 v =6°C I=2,49A U=1,4V t=240s	41
Obr. 45 Vzorek č. 1 sada 2 v =12°C I=2,48A U=1,3V t=240s	41
Obr. 46 Vzorek č. 1 sada 2 v =24°C I=2,49A U=1,3V t=240s	41
Obr. 47 Vzorek č. 1 sada 2 v =40°C I=2,49A U=1,3V t=240s	41
Obr. 48 Vzorek č. 1 sada 2 v =60°C I=2,5A U=1,2V t=240s	42
Obr. 49 Vzorek č. 1 sada 2 v =70°C I=2,5A U=1,2V t=240s	42

Obr. 50 Vzorek č. 28 sada 1 v =6°C I=2,5A U=1,4V t=240s	42
Obr. 51 Vzorek č. 28 sada 1 v =12°C I=2,5A U=1,4V t=240s	42
Obr. 52 Vzorek č. 28 sada 1 v =27°C I=2,5A U=1,3V t=240s	43
Obr. 53 Vzorek č. 28 sada 1 v =40°C I=2,5A U=1,2V t=240s	43
Obr. 54 Vzorek č. 28 sada 1 v =40°C I=2,5A U=1,2V t=240s	43
Obr. 55 Vzorek č. 28 sada 1 v =70°C I=2,5A U=1,2V t=240s	43
Obr. 56 Vzorek č. 13 sada 1 v =6°C I=2,5A U=1,4V t=240s	44
Obr. 57 Vzorek č. 13 sada 1 v =15°C I=2,5A U=1,4V t=240s	44
Obr. 58 Vzorek č. 13 sada 1 v =26°C I=2,53A U=1,3V t=240s	44
Obr. 59 Vzorek č. 13 sada 1 v =40°C I=2,51A U=1,3V t=240s	44
Obr. 60 Vzorek č. 13 sada 1 v =60°C I=2,51A U=1,2V t=240s	45
Obr. 61 Vzorek č. 13 sada 1 v =70°C I=2,5A U=1,2V t=240s	45

Úvod

Současná civilizace potřebuje stále větší množství elektrické energie. I když jsou nevýznamnějšími zdroji této energie tepelné a jaderné elektrárny, roste i význam dalších zdrojů. Z alternativních zdrojů se nejrychleji rozvíjí fotovoltaika – přímá přeměna energie slunečního záření na energii elektrickou. I když byl fotovoltaický jev poprvé pozorován už v roce 1839, trvalo více než 120 let, než došlo k jeho širšímu praktickému využití. Zásadní impuls ke studiu fotovoltaiky přinesl teprve rozvoj polovodičové techniky. Nejpoužívanějším materiálem pro výrobu fotovoltaických (solárních, slunečních) článků je křemík, který dosahuje poměrně vysoké účinnosti přeměny energie záření.

V průběhu činnosti fotovoltaických elektráren je důležité, aby se vlastnosti fotovoltaických panelů měnily co nejméně. Týká se to hlavně účinnosti solárních článků, která nejvíce ovlivňuje návratnost investice do fotovoltaických systémů. Účinnost solárních článků je ovlivněna jejich schopností absorbovat energii dopadajícího fotonu a dále schopností tuto energii využít pro vykonávání elektrické práce. Různé druhy materiálových a výrobních defektů mohou ovlivňovat schopnost využití této energie pro elektrickou práci, a proto je důležité mít kvalitní diagnostické nástroje, které dovedou detekovat různé typy defektů, analyzovat je a v případě negativního vlivu minimalizovat jejich dopady.

1. Základy fotovoltaické teorie

Fotoelektrický jev či fotoefekt je fyzikální jev, při němž jsou elektrony uvolňovány (vyzařovány, emitovány) z látky (nejčastěji z kovu) v důsledku absorpce elektromagnetického záření (např. rentgenové záření nebo viditelného světla) látkou. Emitované elektrony jsou pak označovány jako fotoelektrony a jejich uvolňování se označuje jako fotoelektrická emise (fotoemise). Pokud jev probíhá na povrchu látky, tzn. působením vnějšího elektromagnetického záření se elektrony uvolňují do okolí látky, hovoří se o vnějším fotoelektrickém jevu. Fotoelektrický jev však může probíhat i uvnitř látky, kdy uvolněné elektrony látku neopouští, ale zůstávají v ní jako vodivostní elektrony. V takovém případě se hovoří o vnitřním fotoelektrickém jevu. Pokud na látku dopadají elektrony, které způsobují vyzařování fotonů, mluví se o inverzním (obráceném) fotoelektrickém jevu. Bylo zjištěno, že při osvětlení některých látek (především kovy) se tyto látky nabíjí. Např. zinek osvětlený ultrafialovým světlem se nabije kladně. Při ozáření vzorku spektrem elektromagnetického vlnění byly přítom pohlceny krátké vlnové délky a delší vlny ve spektru zůstaly. Pro krátké vlnové délky došlo k emisi vodivostních elektronů z kovu. Počet těchto elektronů rostl s intenzitou vlnění. Jevo byl ale pozorován jen pro krátké vlnové délky, pro velké délky vln jev nenastal při libovolné intenzitě. Pro krátké vlnové délky se se zvýšením intenzity dopadajícího záření zvyšoval počet uvolněných elektronů, avšak intenzita neovlivnila energii těchto elektronů. Podle představ klasické fyziky by elektronům měla být předána kinetická energie dopadajícího elektromagnetického vlnění. Energie elektromagnetických vln souvisí s intenzitou záření, tzn. energie vyzařovaných elektronů by měla záviset na intenzitě dopadajícího záření. Experimenty však ukázaly, že kinetická energie vyzařovaných elektronů je závislá na frekvenci a nikoliv na intenzitě dopadajícího záření. [12]

Experimentálně bylo zjištěno, že pokud frekvence dopadajícího záření klesne pod tzv. mezní (prahový) kmitočet ν_0 , fotoemise se neobjevuje. Mezní frekvence je charakteristickou vlastností každé látky. Pokud je frekvence ν dopadajícího záření vyšší než mezní frekvence ν_0 , mají fotoelektrony energii v rozmezí od nuly do určité maximální hodnoty E_{max} . Maximální hodnota energie E_{max} je lineární funkcí frekvence a platí pro ni vztah:

$$E_{max} = h(\nu - \nu_0) = h\nu - h\nu_0 \quad (1)$$

kde h je Planckova konstanta.

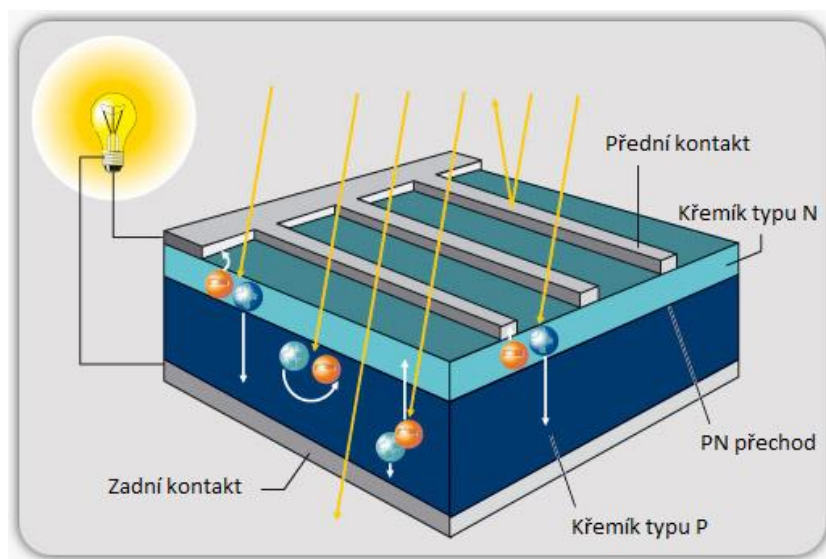
Tyto vlastnosti fotoelektrického jevu není klasická fyzika schopná vysvětlit.

Fotoelektrický jev je jev, který v roce 1887 poprvé popsal Heinrich Hertz. Pozoroval z pohledu tehdejší fyziky nevysvětlitelné chování elektromagnetického vlnění při dopadu na povrch kovu. Kvantové vysvětlení poskytl Albert Einstein. Einstein za vysvětlení fotoelektrického jevu a za svůj přínos k teoretické fyzice dostal Nobelovu cenu v roce 1921. [12]

Fotovoltaika, tj. přímá přeměna energie slunečního záření na elektrickou energii, má dnes ve světové energetice nezastupitelné místo. Jak ukazují dostupné údaje, solární energie se v České Republice za poslední dva roky rozrostla doslova nadsvětelnou rychlostí. Jen za poslední rok se počet fotovoltaických elektráren zčtyřnásobil a jejich výkon vzrostl více než sedmkrát. V současné době v České republice funguje 8880 solárních elektráren, které produkují 575,47Mwe solární energie. Jaký bude další vývoj se předem příliš přesně odhadnout nedá, vzhledem k plánovaným omezením fotovoltaiky v ČR však lze předpokládat, že vývoj bude nadále pokračovat pomalejším tempem. Z hlediska vývojových trendů se význam fotovoltaiky jako energetického zdroje neustále zvyšuje. Od svého objevu v roce 1839 do roku 1940 byl fotovoltaický jev zajímavým objektem pro fyzikální bádání. Až s rozvojem polovodičové technologie (zejména po zvládnutí přípravy monokrystalického Si), se začíná uvažovat o možném využití jako zdroj energie pro kosmický výzkum. Křemík je velmi vhodný materiál pro výrobu solárních článků, protože z hlediska šířky zakázaného pásu je u křemíku možno dosáhnout velmi vysoké účinnosti generace volných nosičů. Zároveň u křemíku, jako základního materiálu pro mikroelektroniku se podařilo velmi dobře zvládnout všechny operace potřebné k vytváření struktur.

1.1 Princip solárního článku

Prostřednictvím solárních článků se zářivá energie Slunce přeměňuje na elektrický proud pomocí fotoelektrického jevu. K účelu získávání elektrické energie se hodí pouze tzv. vnitřní fotoefekt, zejména fotoefekt na hradlové vrstvě. Při fotoefektu na hradlové vrstvě elektrony vybuzené zářením neopouštějí látku, nýbrž: fungují jako volné nosiče náboje. Ať je typ článku jakýkoliv, vždy se jedná o velkoplošnou polovodičovou součástku s jedním nebo i více PN přechody.



Obr. 1 Schéma solárního článku

Rozměry komerčně vyráběných solárních článků nejsou větší než 200 [mm] a tloušťka nepřesahuje přes 400 [μm]. Jedná se tedy o velice tenké destičky. Přední strana solárního článku je uzpůsobena k pohlcování slunečního záření. Solární články jsou ve většině případů opatřeny ze přední i zadní strany kovovými kontakty pro připojení sběrných vodičů. Každá strana destičky je obohacena atomy vhodných prvků tak, aby jedna byla kladná a druhá záporná. V ozářeném solárním článku jsou vybuzeny elektricky nabitě částice (pár elektron díra). Elektrony a díry jsou poté separovány vnitřním elektrickým polem PN přechodu. Rozdělení náboje má za následek napěťový rozdíl mezi předním (-) a zadním (+) kontaktem článku. Zátěží připojenou mezi oba kontakty potom protéká stejnosměrný elektrický proud, jenž je přímo úměrný ploše solárních článků a intenzitě dopadajícího slunečního záření.

1.2 Solární panel

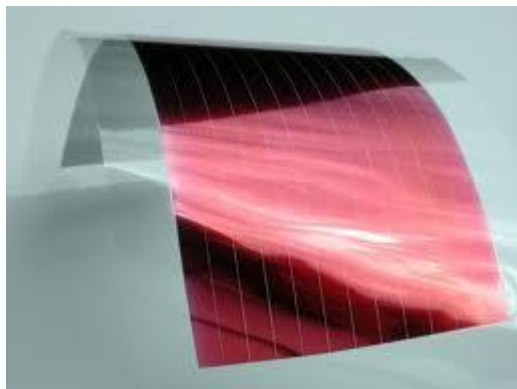
Solární panel je tvořený solárními (fotovoltaickými) články, které mohou být tvořeny polovodičovými (obr. 2) nebo organickými prvky (obr. 3), které mění světelnou energii v energii elektrickou. Přímou přeměnou světla na elektrickou energii se dnes zabývá samostatná specializace. Fotoelektrický efekt vysvětluje vznik volných elektrických nosičů dopadem záření. Celkově se daří za pomoci křemíkových solárních panelů přeměnit v elektrickou energii jen asi 17 % energie dopadajícího záření. Při použití organických solárních panelů vyvinutých v Izraeli by měla být účinnost až 25 %.



Obr. 2 Křemíkový solární panel

Solární články jsou tvořeny polovodičovými plátkami tenčími než 1 mm. Na spodní straně je plošná průchozí elektroda. Horní elektroda má plošné uspořádání tvaru dlouhých prstů zasahujících do plochy. Tak může světlo na plochu svítit. Povrch solárního článku je chráněn

skleněnou vrstvou sloužící jako antireflexní vrstva. A tak je zabezpečeno, aby co nejvíce světla vniklo do polovodiče. Antireflexní vrstvy se většinou tvoří napařením oxidu titanu. Tím získá článek svůj tmavomodrý vzhled. Jako polovodičový materiál se používá převážně křemík. Jiné polovodičové materiály, např. galium arsenid, kadmiumsulfid, kadmiumtellurid, selenid mědi a india, nebo sirič galia se zatím zkoušejí. Krycí sklo chrání povrch solárních článků i před vlivy prostředí.



Obr. 3 Organický solární panel

Novou technologii výroby sluneční energie za pomoci speciální techniky, pomocí fotosyntézy vyvinuli izraelští vědci z Telavivské univerzity. Novou technologií by měly být geneticky zkonstruované bílkoviny, které mají využívat fotosyntézu k výrobě elektrické energie. Nové články by měly být levnější než současné křemíkové. 1 m² solárního panelu na křemíkové bázi v současné době vyjde na 200 dolarů, zatímco stejná plocha solárního panelu z geneticky zkonstruované bílkoviny (*Protein Structure Initiative, PSI*) vyjde na 1 dolar. Větší má být i účinnost, která se má zvýšit z 12-14 % u křemíkových panelů až na 25 %. Nová technologie je umožněna díky poznatkům z genetického inženýrství a nanotechnologií.

2. Typy defektů, vznikajících v solárních člancích

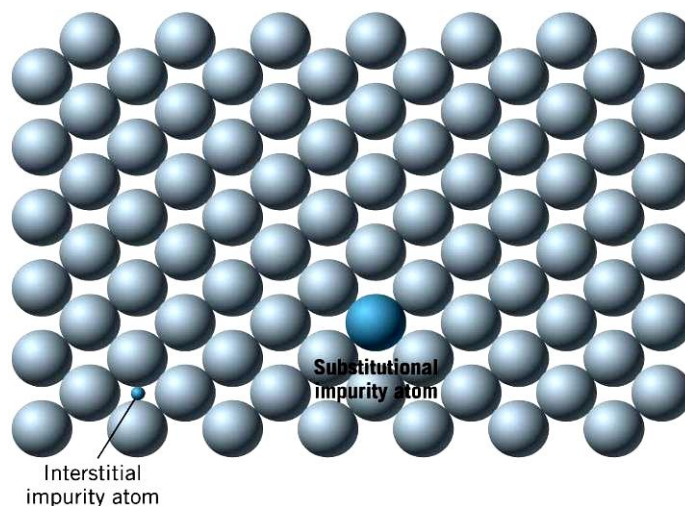
Defekty, které zhoršují elektrické vlastnosti krystalických křemíkových solárních článků, mají charakter poruchy krystalické mřížky. Poruchy podle jejich typu můžeme rozdělit na:

- Bodové poruchy (vakance – chybějící atom, intersticiální částice – částice mimo pravidelný bod mřížky, příměsi – cizí atomy v krystalu)
- Čárové poruchy (dislokační čáry – chybějící celé souvislé skupiny částic)
- Plošné a objemové poruchy (precipitáty – ostrůvky jiné krystalické struktury)

Většina těchto poruch ovlivňuje elektrické parametry. Ne všechny jsou samozřejmě nežádoucí. Díky různým příměsím lze měnit typ polovodiče z intrinsického na N nebo P typ. Bohužel některé defekty zvyšují rekombinaci, zkracují dobu životnosti a jinak brání využití světelné energie pro vykonání elektrické práce. Tyto defekty je potřeba lokalizovat a v technologickém procesu zabránit jejich vzniku. Podle původu defektů je můžeme rozdělit na defekty materiálové, které vznikají při výrobě substrátu a polovodičových struktur průnikem nečistot, a procesní, způsobené mechanickým nebo jiným poškozením v průběhu technologického procesu. [13]

2.1 Bodové poruchy

Substitučně a intersticiálně zabudovaný cizí atom jsou na obr. 4. Intersticiál – částice umístěna v mezimřížkovém prostoru mřížky. Cizí atom - nahrazuje původní základní atom – substituční.



Obr. 4 Vakance, intersticiál a cizí atom v krystalové mřížce

Koncentrace vakancí určíme podle vztahu:

$$n_v = N \cdot \exp\left(-\frac{W_v}{kT}\right) \quad (2)$$

Kde:

N koncentrace uzlových bodů krystalové mříže (m^{-3})

W_v ... energie nutná pro vznik vakance (eV)

k Boltzmannova konstanta ($\text{J}\cdot\text{K}^{-1}$)

T teplota ($^{\circ}\text{K}$)

Koncentrace intersticiálů určíme podle vztahu:

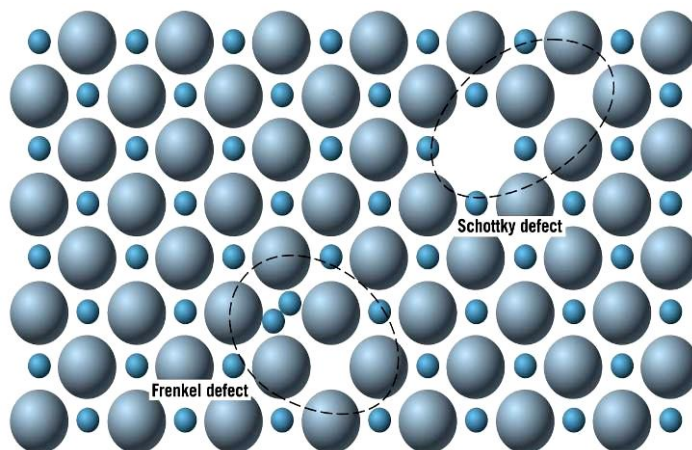
$$n_i = c \cdot N \cdot \exp\left(-\frac{W_i}{kT}\right) \quad (3)$$

c konstanta

W_i ... energie nutná pro vznik intersticiální poruchy (eV) [5]

Kombinace intersticiální poruchy a vakanční poruchy vznikne přemístěním atomu z řádné polohy v mříži do polohy intersticiální a nazývá se Frenkelova porucha (obr. 5).

Schottkyho porucha (obr. 5) se vyskytuje v iontových krystalech: kationtová vakance je vyvážena aniontovou vakancí, obě poruchy tvoří společný pár. Je zřejmé, že v okolí poruch dojde k dalším lokálním vysunutím atomů z řádných mřížových poloh. Tato skutečnost může být také interpretována jako lokální deformace mříže a bývá znázorňována deformací sítě mřížových čar.

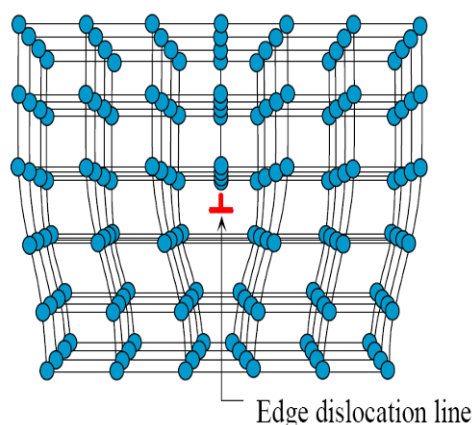


Obr. 5 Znázornění Schottkyho a Frenkelových poruch v krystalové mřížce

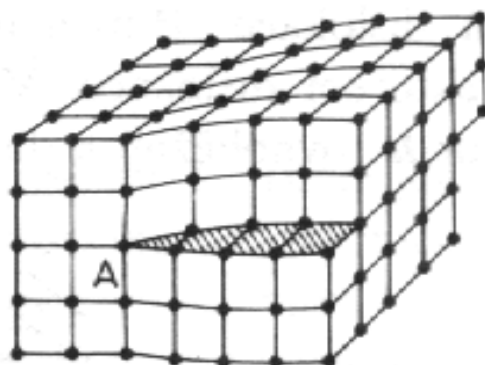
U molekulárních krystalů může být povaha bodových poruch složitější v důsledku možných nepravidelných poloh molekul.

2.2 Čárové poruchy

Čárové poruchy (dislokace) – poruchy v krystalové mřížce jsou uloženy podél spojitých čar určitého směru. Na obr. 6 je znázorněna hranová dislokace. Její vznik si můžeme představit tak, že krystal byl rozříznut podél roviny procházející shora dolů a do vzniklého řezu byla vložena polovina. Podobnou situaci bychom obdrželi, kdybychom v dolní části krystalu jednu atomovou polovinu odstranili. Okraj vložené poloviny je čárová porucha. [5]



Obr. 6 Hranová dislokace v krystalové mřížce



Obr. 7 Šroubová dislokace v krystalové mřížce

Šroubová dislokace je znázorněna na obr. 7. Její vznik si můžeme představit tak, že krystal byl rozříznut v rovině, která je na obr. 7 vyšrafovaná až k přímce procházející bodem A kolmo na čelní stěnu. Horní část krystalu byla zasunuta dozadu o jednu meziatomovou vzdálenost a pak byl krystal opět spojen. Maximální porušení je podél přímky procházející bodem A, kolem dislokační čáry. Dislokace je porušení krystalové struktury podél určité čáry, a proto se někdy označuje jako čárová porucha. Délka dislokace (dislokační čáry) může být rovna až rozměru krystalu.

2.3 Plošné poruchy

Plošné poruchy – poruchy v krystalu jsou uloženy podél určitých ploch (obr. 9)



Obr. 8 Ideální uspořádání



Obr. 9 Vrstevná chyba

Změna koordinace atomů celé roviny může vzniknout poruchou v pravidelnosti vrstvení rovin během krystalizace. Nejběžnějším typem plošných poruch jsou hranice vznikající při růstu krystalu mezi jednotlivými zrny.

3. Diagnostické metody fotovoltaických článků

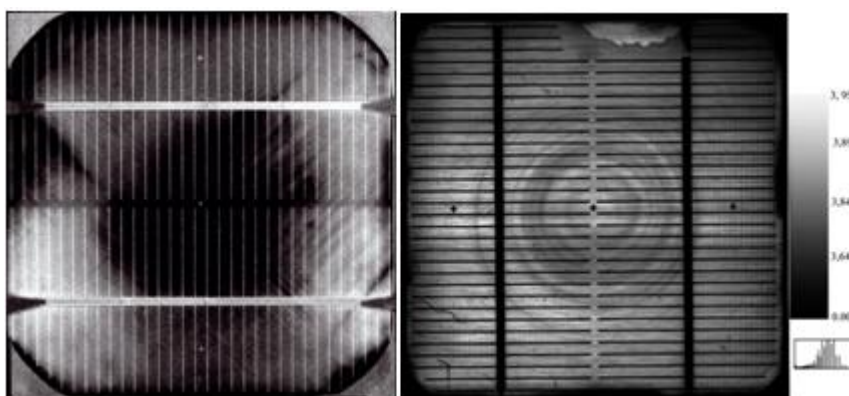
Základním analytickým nástrojem používaným ve výzkumu i v komerční výrobě je třídění solárních článků pomocí vyhodnocování charakteristik U-I a naměřené účinnosti. K této činnosti se běžně používá zábleskový solární simulátor s měřicím zařízením, které je schopné během velmi krátké doby vyhodnotit základní parametry testovaného článku. Bohužel toto zařízení nelze použít pro analyzování příčiny zmíněných parametrů solárních článků.

Pro tyto účely je vhodné použít další analytické metody, které dovedou citlivěji detekovat existenci defektů ve struktuře solárního článku (šumová analýza PN přechodu) a lokalizovat daný defekt (LBIC, LBIV, elektroluminiscence, fotoluminiscence atd.) [13]

3.1 Detekční metody pro měření materiálových vlastností a defektů

3.1.1 Metoda LBIC

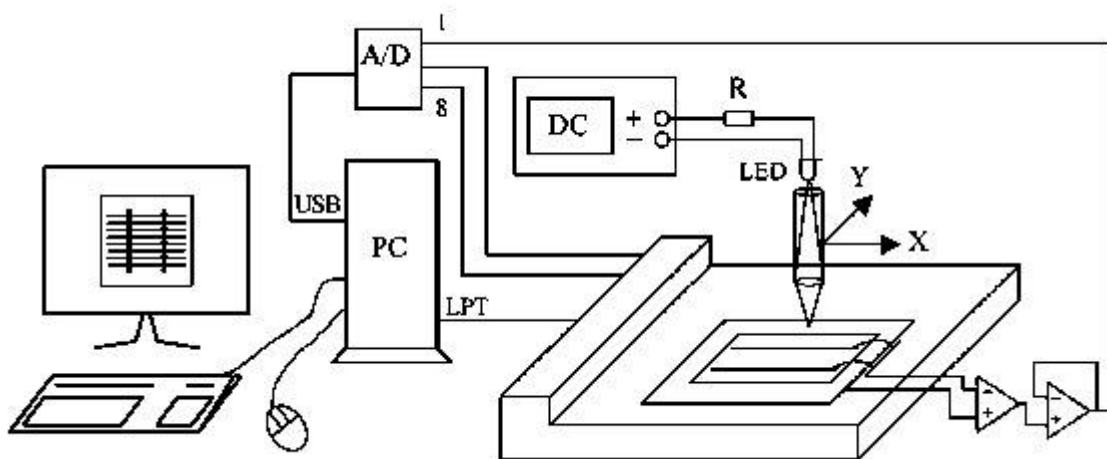
Detekční metoda LBIC je používána jako univerzální metoda detekce lokálních defektů nejen ve struktuře solárních článků. Vybavení měřicího pracoviště umožňuje jednoduchou výměnu světelného zdroje. Za světelný zdroj jsou zde zvoleny různé vlnové délky LED zaostřené pomocí speciálního přípravku. Výhodou těchto zdrojů světla je jejich dlouhá životnost a nízké náklady. Různé vlnové délky penetrují v odlišných hloubkách struktury solárního článku a zobrazují tak objemové a povrchové defekty (obr. 10).



Obr. 10 Objemové a povrchové defekty solárního článku [12]

Technika LBI (Light Beam Induced) je metoda, kdy světelný paprsek skenuje povrch solárních článků a pomocí měřicího zesilovače signálu jsou data postupně snímána do počítače a je vytvářena mapa odezvy měřeného článku na světelný paprsek. Podle hlavní měřicí veličiny pak rozlišujeme mezi měřením LBIC (current), LBIV (voltage), případně LBIP (power). Metoda LBIC je takové měření, kdy pomocí převodníku proud–napětí měříme proudovou odezvu, metodou LBIV (Light Beam Induced Voltage) snímáme napěťovou odezvu a u LBIP (Light Beam Induced Power) se snažíme nastavit pracovní bod měřených veličin do bodu maximálního

výkonu. V ideálním případě LBIC, kdy by měl převodník proud–napětí nulový vnitřní odpor, by se měřená veličina rovnala hodnotě ISC lokálního osvětlení solárního článku. Pro měření metody LBIC ale postačuje, aby zátěžový odpor měřicího převodníku byl menší než polovina ideální zátěže maximálního výkonu, což v praxi znamená odpor menší než $0,1 \Omega$. Naopak, pro měření LBIV je důležité, aby byl vnitřní odpor měřicího zesilovače co největší. Tuto podmínku splňuje většina měřicích zařízení pro měření napětí, proto realizace metody LBIV není tak technicky náročná jako nastavení pracovního bodu metody LBIC. [12]



Obr. 11 Schéma měřicího pracoviště LBIC[12]

PC-měřicí počítač, DC-stabilizovaný zdroj napětí světelného zdroje, LED – zdroj konstantního světelného toku, A/D – převodník proud-napětí, LPT – skenovací zařízení

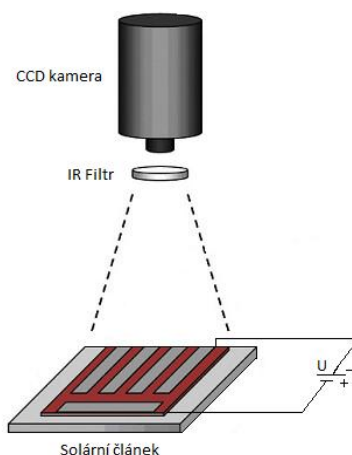
Během měření LBIC je světelný paprsek zaostřen na vzorek a díky lokální proudové odezvě z článku získáme XY charakteristiku rozložení proudu. Získaná data se uspořádají do proudové mapy a v podstatě modelují chování celého článku po jeho jednotlivých částech. Z takto vzniklých proudových map potom můžeme určit většinu lokálních defektů v solárním článku. V dalším kroku je nutné (automaticky nebo ručně) nastavit stupeň šedi zobrazované oblasti pro dobré zobrazení jednotlivých defektů, a to podle nalezených odchylek. Přesnost proudových map závisí především na druhu použitého světelného zdroje (fokusace, vlnová délka – hloubka vniku) a na kroku posunu (míra přesnosti), s jakým se daný vzorek analyzuje.

Výstupem měření je matice číselných hodnot, kterou lze převést na mapu bodů s různým stupněm šedé barvy. Tato mapa signalizuje velikost proudové odezvy a dále ji lze analyzovat běžnými grafickými metodami. V případě potřeby ji lze také matematicky zpracovávat v původní podobě matice hodnot a použít analytické nástroje maticového počtu. Obě tyto metody mohou vést k podobným závěrům a sloužit k podrobné analýze vlastností fotovoltaických článků a technologických kroků jejich výroby. Zajímavých výsledků lze

dosáhnout porovnáním měření LBIC a LBIV při použití různých typů světelných zdrojů a vlnových délek světelného záření.

3.1.2 Elektroluminiscence

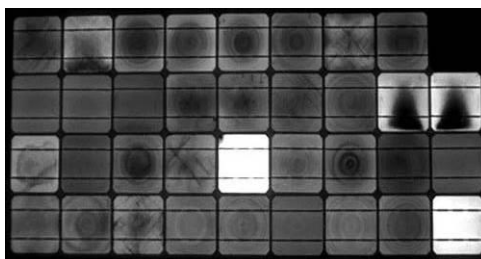
Elektroluminiscence je fyzikální děj, kdy při průchodu elektrického proudu polovodičovým přechodem dochází k emitování světelného záření. Z hlediska optických vlastností polovodiče můžeme rozdělit polovodiče na polovodiče s přímým mezipásmovým přechodem a s nepřímým mezipásmovým přechodem. U polovodičů s přímým mezipásmovým přechodem, jako je GaAs, při rekombinaci páru elektron–díra je vysoká pravděpodobnost vyzáření fotonu o energii rovnající se šířce zakázaného pásu v místě přímého přechodu. Této vlastnosti se využívá u LED diod a polovodičových laserů. U polovodičů s nepřímým mezipásmovým přechodem se při generačně-rekombinačních dějích kromě energie fotonů účastní i fonony (tepelné kmity krystalografické mřížky). Z tohoto důvodu tyto materiály nejsou vhodné pro optoelektroniku. Přestože je pravděpodobnost vyzáření fotonu při rekombinačních dějích u těchto polovodičů nižší a je tu větší neurčitost energie vyzářeného fotonu, lze tuto metodu použít pro generování světelné emise a s její pomocí analyzovat struktury polovodičových přechodů P-N, jako jsou solární články. Tato metoda umožňuje detekci materiálových a procesních defektů solárního článku. Ve výsledcích měření lze také pozorovat rozložení proudové hustoty v článku. Během měření je článek připojen ke zdroji napětí v propustném směru (obr. 12). [12]



Obr. 12 Schéma měření metodou elektroluminiscence

Detekce defektů a rozložení proudu ze snímku spočívá v rozlišení tmavých a světlých míst. Ideální solární článek by měl vykazovat konstantní proudovou hustotu v celé ploše přechodu, a tím i jeho vyzářené světlo by mělo mít na celé ploše stejnou intenzitu. Místa s nižší intenzitou světla (malé tmavší body) indikují poruchu ve struktuře materiálu (nehomogenita difuzní vrstvy přechodu P-N). Porucha může být dána nepravidelností ve struktuře monokrystalu. Naopak

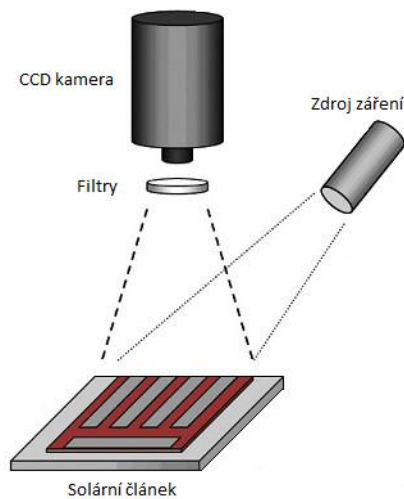
výrazně světlejší místa znázorňují oblasti s vyšší proudovou hustotou (obr.13). Jak je vidět na snímcích, jde většinou o místa blízko kontaktů solárního článku.



Obr. 13 Poruchy článků zjištěné pomoci elektroluminiscenční metody

3.1.3 Fotoluminiscence

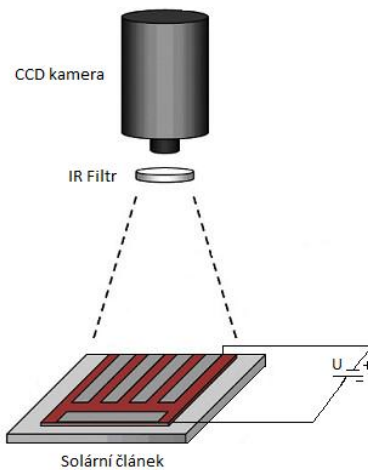
Využití fotoluminiscence jako metody analýzy povrchů nabízí mnohé výhody. Dá se pomocí ní zjišťovat struktura tenkých vrstev, neboť nerovnosti či příměsi se projeví ve spektru. V závislosti na vlnové délce a intenzitě použitého laserového svazku se dají pozorovat různé vrstvy vzorku. Výpočet hloubky měřené vrstvy je složitější. Závisí jak na vlnové délce a intenzitě použitého laseru, tak na dielektrické funkci materiálu, propustnosti a odrazivosti materiálu. Při měření je lepší vzorek chladit na co nejnižší teploty, aby píky ve spektru byly snadněji rozpoznatelné, ale mnohdy postačí měření při pokojové teplotě. Tato metoda je nedestruktivní a nevyžaduje vakuové prostředí. V současnosti jsou k dispozici lasery, umožňující tvořit velice krátké pulzy (až 1 ps), pomocí nichž se dají podrobně zkoumat mechanismy absorpce a rekombinace. Jelikož spektrum fotoluminiscence není ovlivněno tlakem, lze ji používat při pozorování růstu polovodičových monokrystalů, což se děje právě za vysokých tlaků. Na rozdíl od ostatních optických analytických metod využívajících jevů reflexe a absorpce, fotoluminiscence neklade nároky na polohu zdroje, křivost povrchu a tloušťku vzorku. Největší nevýhoda této metody spočívá v podmínce, aby pozorovaný materiál byl opticky aktivní (schopen emitovat fotony). Navíc pokud je na povrchu velké množství chemických nečistot nebo nerovností, stane se, že se energie dodaná laserem rozptýlí při nezáživých procesech. Metoda fotoluminiscence je podobná metodě elektroluminiscence. Pro tuto metodu můžeme použít stejné zařízení jako pro metodu elektroluminiscence (obr. 14). Při fotoluminiscenci je nutné pro zářivou rekombinaci energii dodávat vnějším světelným zdrojem. Článek je ozařován světelným zařízením o určité vlnové délce a tato složka musí být poté odfiltrována pomocí příslušného filtru, který je umístěn před CCD kamerou. [12]



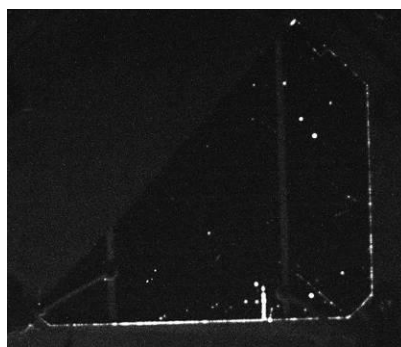
Obr. 14 Schéma měření metodou fotoluminiscence

3.1.4 Luminiscence mikroplazmy

Tato metoda využívá vzniku lokálních center mikroplazmy v místech strukturálních defektů při napětí v závěrném směru blízcímu se k průraznému napětí. Mikroplazma se neprojevuje pouze vyzařováním světelného záření, ale projevuje se i tzv. šumem mikroplazmy. Šum mikroplazmy byl poprvé studován na křemíkových PN přechodech polarizovaných v závěrném směru. Bylo zjištěno, že v nestabilním stavu je proud PN přechodem tvořen posloupností impulzů konstantní amplitudy a náhodné doby trvání a vzniku. Střední doba trvání impulzu závisí na závěrném napětí na přechodu. První impulzy jsou velmi úzké, při zvyšování závěrného napětí roste jejich šířka a tím i střední proud, až při dosažení určitého napětí je proud stabilní. Při vyšších napětích se může tento jev opakovat. Princip vzniku emise světla z mikroplazmy je následující. V místech, kde dislokační porucha (nedokonalost krystalické mřížky) protíná PN přechod, dochází k lokálnímu lavinovému výboji, který je doprovázen šumem. Tento šum se objevuje při dostatečně velkých závěrných napětích, ale nižších, než je napětí lavinového průrazu. Velikost závěrného napětí potřebného k pozorování tohoto jevu je silně závislá na ploše článku, resp. dodaného výkonu do článku. Vznik mikroplazmy při výboji v polovodiči je obvykle doprovázen emisí světla, která je zachycena CCD kamerou a následně analyzována. V solárním článku, jako plošném PN přechodu, vzniká mikroplazma v místech, ve kterých je PN přechod nehomogenní nebo je například poškozen. V oblasti mikroplazmy může protékat značně velký proud a tím způsobit lokální ohřev v takové úrovni, kdy může dojít ke zničení PN přechodu. Proto je nutné při této metodě pečlivě nastavovat závěrné napětí. Jinak může dojít k nevratnému poškození struktury PN přechodu a k znehodnocení celého článku. Pro tuto metodu můžeme použít stejné měřicí pracoviště jako pro metodu elektroluminiscence. Úprava spočívá v opačné polaritě napájecího napětí (obr. 15). [12]



Obr. 15 Schéma měření metodou luminiscence mikroplazmy

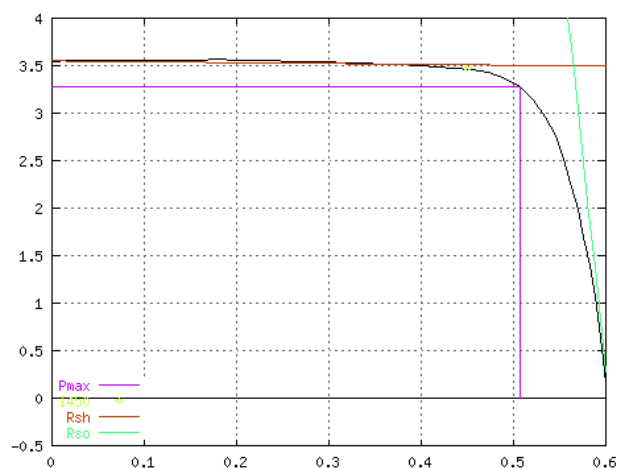


Obr. 16 Poruchy článku zjištěné metodou luminiscence mikroplazmy

3.2 Metody měření elektrických vlastností solárních článků

3.2.1 VA charakteristika

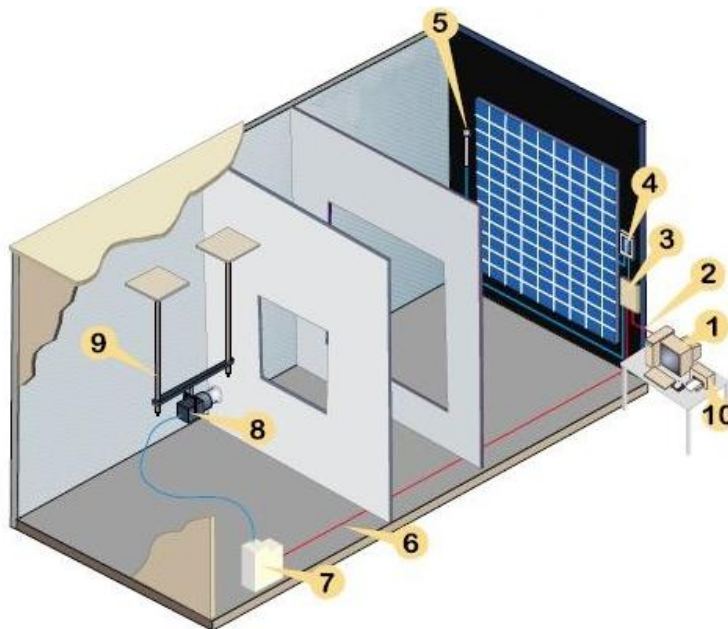
Voltampérová charakteristika solárního článku udává závislost stejnosměrného proudu na stejnosměrném napětí (obr. 17). Její tvar se získá změnou velikosti zatěžovacího odporu připojeného k solárnímu článku. Touto metodou můžeme lehce proměřit článek v propustném i závěrném směru.



Obr. 17 VA charakteristika kvalitního solárního článku [9]

3.2.2 Zábleskový solární simulátor

Solární simulátor se používá pro měření výstupních elektrických vlastností solárních článků nebo panelů. Toto zařízení osvětluje článek zářením o intenzitě $1000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ jehož složení odpovídá slunečnímu spektru AM 1,5 při teplotě 25°C . Měřicí pracoviště této metody se skládá z temné komory ve které je umístěn solární simulátor (obr. 18). Po dopadu záření z výbojky simulátoru jsou vyhodnocovány parametry testovaného modulu na připojeném počítači. Temná komora zajišťuje přesně definovatelné podmínky měření.



Obr. 18 Měřicí pracoviště solárních panelů metodou solárního simulátoru

Popis obrázku 18:

1. Počítač + software
2. RS 232 kabel
3. Elektronické ovládání
4. Měřicí článek s senzorem teploty
5. Senzor okolní teploty
6. Kabel pro flash generátor
7. Flash generátor
8. Xenonová výbojka + filtrující optika
9. Držák hlavy výbojky
10. Tiskárna

4. Metody kontroly a měření teploty

Regulace teploty je základem mnoha technologických procesů. Měření teploty tekutin, plynů, pevných povrchů nebo sypkých materiálů – každý případ má svoji zvláštnost, kterou je nutno znát, aby výsledky provedeného měření maximálně odpovídali dané problematice. Existuje velké množství teplotních čidel, vyrobených s použitím různých fyzikálních zákonů. Některé z nich výborně jsou specifické pro určité měřicí úkoly, jiné jsou univerzální. Daná kapitola popisuje hlavní typy snímačů pro měření teploty, jejich vlastnosti, silné a slabé stránky, měření pro které jsou určeny.

Pokud vezmeme v úvahu teplotní senzory pro průmyslové aplikace, můžeme je rozdělit do několika hlavních skupin: křemíková teplotní čidla, bimetalové snímače, kapalná a plynová teploměry, termistory, teplotní ukazatele, termočlánky, odporové teploměry, infračervené snímače teploty.

4.1 Křemíková teplotní čidla

Křemíková teplotní čidla využívají závislost odporu polovodivého křemíku na teplotě. Teplotní rozsah měření těchto čidel je -50 až $+150^{\circ}\text{C}$. Umístění citlivého prvku do pouzdra čidla, ale i využití obvodů zesílení a zpracování signálů, zajišťuje dobrou linearitu a přesnost měření. Energeticky nezávislá paměť integrovaná do takového čidla umožňuje individuální kalibrování každého zařízení. Velkou výhodou daného druhu snímačů je široká oblast typů výstupních rozhraní: buď to napětí, proud, odpor nebo digitální výstup, umožňující zapojení čidla do datových sítí. Nevýhodou lze konstatovat úzký teplotní rozsah a relativně velké rozměry ve srovnání s jinými druhy čidel, zejména termočlánky. Křemíkové snímače teploty se používají hlavně k měření povrchové teploty a teploty vzduchu, především jako soustava nejrůznějších elektronických zařízení. [8]



Obr. 19 Křemíkový snímač teploty [8]

4.2 Bimetalové snímače teploty

Bimetalový snímač teploty, jak jehož název předovídá, se skládá ze dvou různých kovových desek slepených k sobě. Různé kovy mají různé koeficienty roztažnosti při určité teplotě. Například konstantan má menší změnu rozměrů za vysokých teplot oproti železu, jehož změna rozměrů je značná. Při spojení pásků vyrobených z těchto kovů, tak při zahřátí (nebo ochlazení) dojde k jejich zakřivení. V bimetalových senzorech takto spojené pásky zapínají nebo vypínají kontakty relé, nebo posouvají ručičku na indikátoru přístroje. Rozsah bimetalických senzorů je -40°C až 550°C . Používají se k měření povrchu pevných látek, řídce pro měření teploty kapaliny. Výhodou snímačů je jednoduchost a spolehlivost návrhu, schopnost pracovat bez elektrického proudu a nízká cena. Nicméně, bimetalové teplotní čidla mají velký rozptyl vlastností, a zároveň velkou spínací hysterezi, zejména při nízkých teplotách. Mezi hlavními oblastmi použití bimetalických teplotních čidel patří automobilový průmysl, vytápění a ohřev vody. [8]



Obr. 20 Bimetalový teploměr [8]

4.3 Kapalně a plynově teploměry

Kapalně a plynově teploměry jsou nejstarší typy snímačů teploty. První stupnice teploty byla nabízena Fahrenheitem na začátku 18. století hlavně pro kapalně teploměry. Kapalně teploměry používají efekt expanze kapalin při zvětšení teploty. Jako kapalina se používá líh nebo rtuť v rozsahu pokojových teplot. Za účelem měření při nízkých teplotách, např. v kryogenní technice, může být použit kapalný neon, a pro měření vysokých teplot obvykle používají galium, které se nachází v kapalném stavu už od 20°C . [8]



Obr. 21 Plynový teploměr pro měření teplot v potrubí a nádržích

Plynové teploměry využívají efekt expanze na přechodu látky z kapalného stavu do plynného. Plyn tlačí přes membránu a spojuje elektrické kontakty. Měřicí rozsah pro kapalné a plynné teploměry je -200 až 500°C. Teploměry této třídy se obvykle používají pro vizuální kontrolu teploty a nebo jako termostat v různých ohřívacích a chladicích zařízeních. [8]

4.4 Teplotní indikátor

Teplotní indikátory jsou látky, které mění svoji barvu působením teploty. Tato změna barvy může být vratná nebo nevratná. V rozsahu pokojových teplot se používají teplotní ukazatele založené na tekutých krystalech, které postupně mění svoji barvu se změnou teploty. Tyto změny jsou obvykle reverzibilní. Vyrábějí se ve tvaru filmu, často s lepicí podložkou, a slouží pro rychlou vizuální kontrolu teploty. Pro měření při příliš vysokých a nízkých teplotách používají se nevratné termoindikátory. To znamená, že když hodnota teploty překročila přípustnou hodnotu, indikátor změní barvu nevratně. Kontrola teploty pomocí takových indikátorů se používá při sledování mražených potravin. Hlavní výhodou těchto ukazatelů teploty je nízká cena. [8]

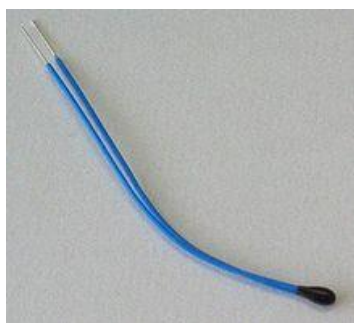


Obr. 22 Termoindikátor [8]

4.5 Termistory

Termistor je elektrotechnická součástka, jejíž elektrický odpor je závislý na teplotě. Rozlišujeme dva druhy termistorů - NTC a PTC termistor. NTC (někdy označovaný jako negistor) je termistor s negativním teplotním koeficientem, což znamená, že se zahřátím součástky odpor klesá. U PTC (někdy označovaný jako pozistor) termistoru se zahřátím odpor roste. NTC termistor se používá také jako teplotní čidlo (k měření teploty) - musíme znát VA charakteristiku termistoru. Měření se realizuje tzv. můstkovou výchylkovou metodou (lze měřit až s přesností 10-5 K). Speciální NTC termistory byly součástí žhavicích obvodů elektronkových zařízení. Sloužily jako ochrana proti přepálení vláken elektronek, zapojených v sérii. NTC termistor má opačnou teplotní charakteristiku než vlákna (jeho odpor s teplotou klesá), a tak zpočátku tlumil protékající proud. Tím umožnil postupné prohřátí všech vláken. Pokud by nebyl zařazen, hrozilo,

že jedno z vláken se zahřeje dříve, vzroste tím proti ostatním vláknům jeho odpor a takto vzniklý velký úbytek napětí způsobí přepálení vlákna. PTC termistor lze využít například k omezení proudu obvodem, kdy průchod většího množství proudu vyvolá ohřátí součástky, které má díky tomu vyšší odpor. Termistory se vyrábějí z oxidu různých kovů (Mn, Co, Ni, Cu, Ti, U, aj.), jež se rozemele na prášek (vyrábí se tzv. Práškovou metalurgií), přidají se další příměsi a pojídlo a poté se za vysokého tlaku slisuje na žádaný tvar a spéká při vysoké teplotě (přes 1000 °C). Výrobek se nechá zestárnout, aby se jeho vlastnosti stabilizovaly. Lisuje se do tvaru tyčinek, perliček, korálků, kotoučků nebo podložek malých rozměrů (řádu 1 až 10 mm). U termistorů lze pracovat pouze s malými proudy (asi 50 μA), proto se musí použít velmi citlivých měřících přístrojů. Termistory mají velký vnitřní odpor, proto je odpor jejich přívodních vodičů zanedbatelný. Jejich velikost umožňuje téměř bodové měření teploty a spolu s vysokou citlivostí splňují tyto součástky základní nároky na miniaturizaci techniky. Jejich většímu rozšíření brání jejich časová nestabilita a za nevýhodu lze považovat značnou nelineární závislost jejich odporu na teplotě (proto zde nemůžeme použít například trojčlenku pro výpočet odporu při určité teplotě (při známém počátečním odporu při určité teplotě). Rozmezí teplotního použití termistorů bývá od -200°C do + 300°C. [8]



Obr. 23 NTC termistor

4.6 Bezkontaktní infračervené teploměry (pyrometry)

Infračervené teploměry (obr. 24) jsou určeny pro dálkové měření teploty povrchu. Při měření bezkontaktním infračerveným teploměrem je využívána skutečnost, že každé těleso, jehož teplota je vyšší než absolutní nula (tj. asi -273 °C), vyzařuje energii. Množství vyzářené energie roste se vzrůstající teplotou tělesa. [1]



Obr. 24 Pyrometr

Pro bezkontaktní měření teploty se používá infračervená část spektra vyzařované energie. Množství vyzářené energie je dáno kromě teploty také emisivitou vyzařujícího tělesa. Emisivita je jeden z důležitých faktorů ovlivňujících měření. Rozsah měření je -45 až 3000°C . Pro měření v různých tepelných rozsazích se používají různé části infračerveného spektra. Mezi hlavními výhodami pyrometrů patří rychlá odezva (nejrychlejší teplotní čidla), možnost měření teploty pohybujících se objektů, měření v odlehlých a nebezpečných místech. Jedná se o bezdotykové měření teploty, proto je zde vyloučen kontakt a následná kontaminace měřeného objektu, což je využitelné v polovodičovém nebo farmaceutickém průmyslu. [1] [8]

4.7 Odporová teplotní čidla

Odporová teplotní čidla jsou rezistory vyrobené z platiny, mědi nebo niklu. Existují ve tvaru drátového rezistoru nebo ve tvaru kovové vrstvy naprášené na izolační podklad, častěji keramický nebo skleněný. Platina se často používá v odporových teplotních čidlech kvůli své vysoké stabilitě a linearitě změn odporu s vlivem teploty. Měď se používá hlavně pro měření nízkých teplot, nikl pro měření pokojové teploty. Pro ochranu od vnějších vlivů se čidla umísťují do ochranných kovových pouzder a izolují keramickými materiály, jako oxid hlinitý a oxid hořečnatý. Tato izolace zároveň brání vibracím a rázům na čidlo. Nicméně, spolu s další izolací se zvyšuje doba odezvy čidla na náhlé změny teploty. Platinové teplotní čidla jsou nejpřesnější, kromě toho jsou standardizované, což výrazně zjednodušuje jejich použití. Vyrábějí se standardní čidla o impedancích $100\ \Omega$ a $1000\ \Omega$. Měřicí rozsah daných čidel je -180 až $600\ ^{\circ}\text{C}$. [8]



Obr. 25 Platinové teplotní čidlo [3]

4.8 Termočlánky

Termočlánek je snímač pro měření teploty. Sestává ze dvou různorodých kovů, spojených do jednoho bodu.



Obr. 26 Termočláneková sonda [8]

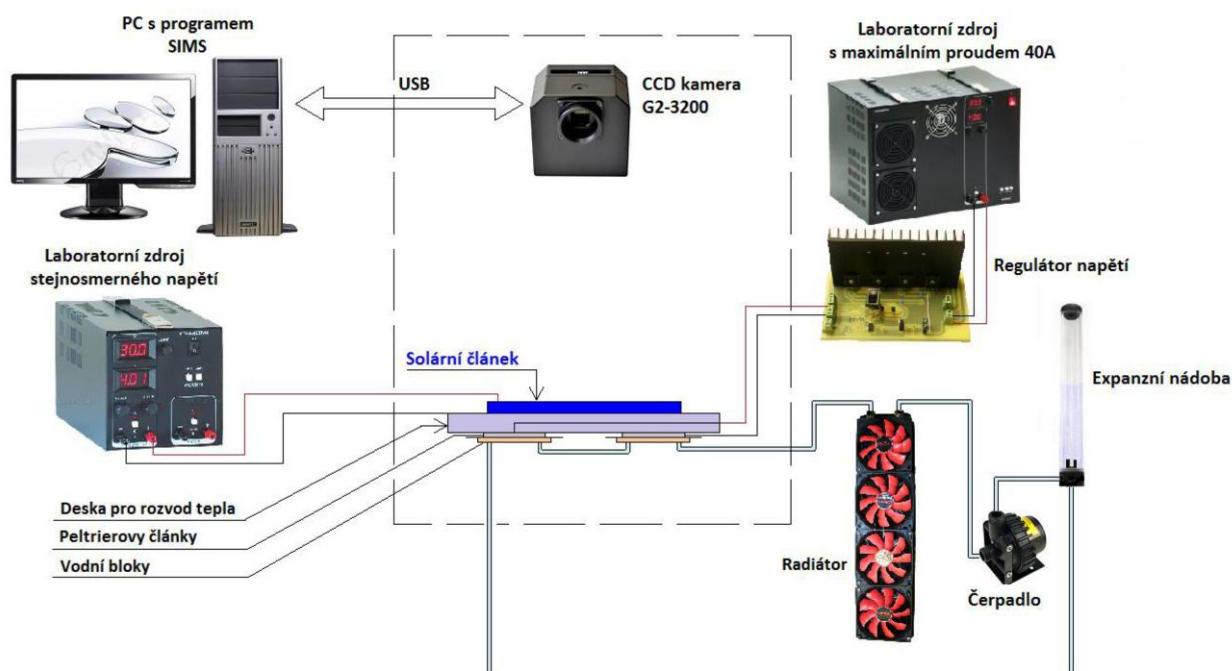
Když je tento spoj dvou kovů zahříván nebo chlazen, vzniká napětí souvztažné k teplotě (termoelektrický jev). Experimentálně byly vybrány dvojice kovů, které jsou nejvhodnější pro měření teploty, jejichž vlastnostmi jsou vysoká citlivost, časová stabilita, vysokou odolnost vůči vnějším působením. Nejvýznamnějšími páry kovů jsou chromel-konstantan, železo-konstantan, chromel-alumel, platinarhodium-platina. Každý typ dvojic se používá pro určité úkoly. Například chromel-alumelové termočlánky (typ K) mají vysokou citlivost a stabilitu a jsou schopny pracovat při teplotách až 1300°C v oxidační nebo neutrální atmosféře. Je to jeden z nejpoužívanějších typů termočláneků. Termočlánky železo-konstantan (typ J) se používá ve vakuu nebo inertní atmosféře při teplotách až 500°C. Při vyšších teplotách (až 1500°C) se používají platinarhodium-platinové termočlánky typů S nebo R umístěné do keramických ochranných krytů. Tento typ termočláneků výborně měří teplotu ve vakuu, oxidačním a neutrálním prostředí. Termočlánekové slitiny jsou dodávány jako dráty. [8]

5. Praktická část

Podle zadání diplomové práce, metodou měření fotovoltaických článků byla zvolena metoda elektroluminiscence. Účelem měření bylo zjistit vliv teploty solárního článku na elektroluminiscenční záření a rovněž určit rozsah teplot, při kterých danou metodu lze efektivně používat. Za tímto účelem bylo nutné sestavit měřicí pracoviště fotovoltaických článků s možností nastavení a kontroly teploty.

5.1 Měřicí pracoviště

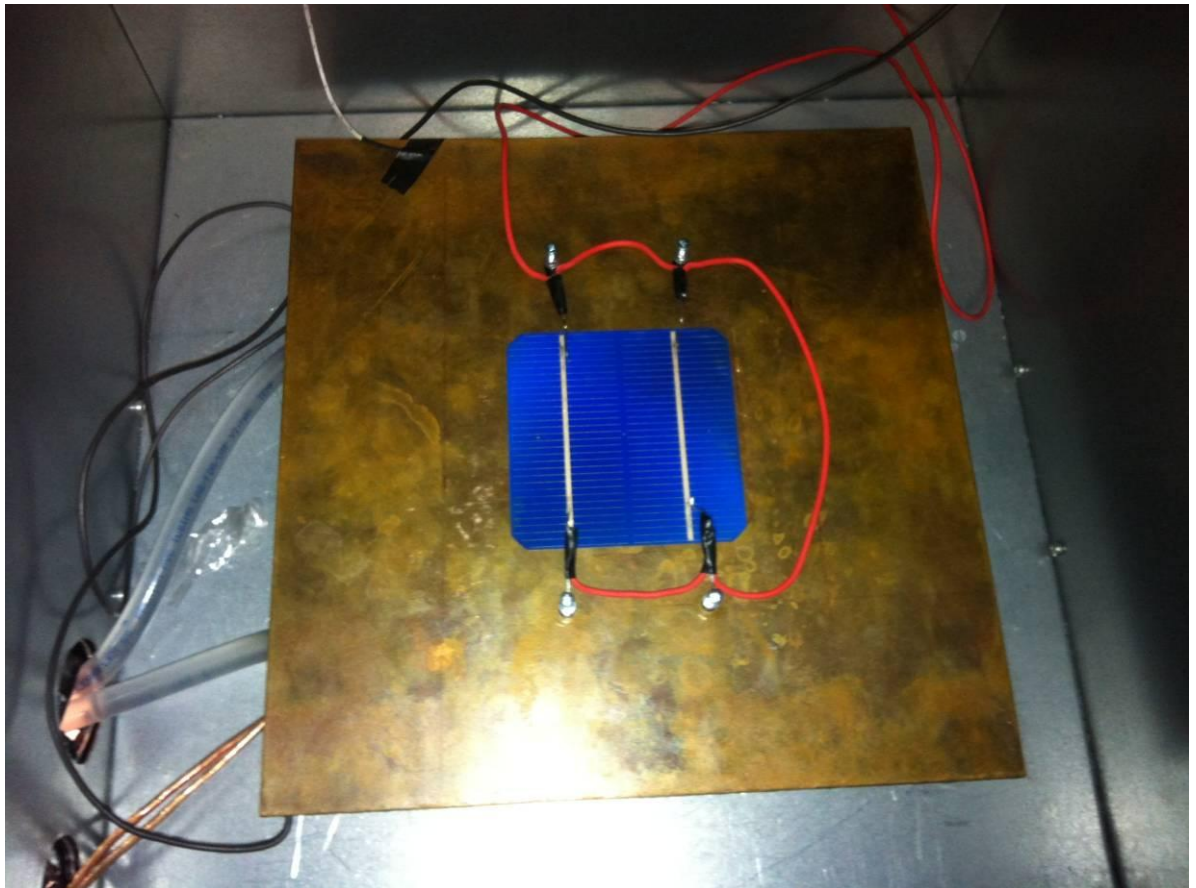
Měřicí pracoviště (obr. 28) se skládá z temné komory, v níž je umístěna bronzová podložka pro měření solárních článků s kontaktním polem pro jeho napájení. Bronzová deska (obr. 29) v tomto případě slouží jako kladný (zadní) kontakt solárního článku. Bronz jako materiál pro podložku byla vybrána z důvodu její dobrých vlastností tepelné vodivosti. V horní části komory je umístěna vysoce citlivá nízkošumová CCD kamera s infračerveným filtrem na objektivu. Kamera je připojena k počítači pomocí USB rozhraní pro přenos snímaných dat. Na počítači je nainstalován speciální program SIMS pro ovládání kamerou a zpracování údajů. Na dolní straně bronzové podložky jsou upevněny čtyř Peltierových článků pro ohřev a chlazení měřeného článku. Pro odvod tepla z Peltierových článků je využito vodní chlazení. Pro regulace teploty Peltierových článků se používá regulátor napětí.



Obr. 27 Blokové schéma měřicího pracoviště [6]



Obr. 28 Měřicí pracoviště

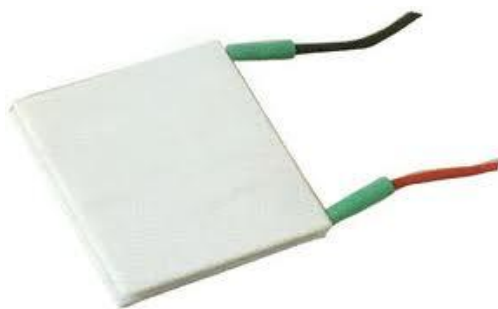


Obr. 29 Bronzová deska s kontaktním polem

5.1.1 Peltierův článek

Pro ohřev a chlazení článku bude sloužit Peltierův článek. Tento článek funguje na principu Peltierova jevu, který byl objeven v roce 1834. Peltierův jev je inverzní k Seebeckovu jevu, který funguje na principu dvou spojených vodičů z různých kovů do uzavřeného obvodu. Mají-li spoje různou teplotu, teče obvodem elektrický proud. Peltierův jev nastává tehdy, protéká-li stejnosměrný elektrický proud z vnějšího zdroje Seebeckovým obvodem. Potom vzniká teplotní rozdíl mezi oběma kovy. Prochází-li proud z vnějšího zdroje daným spojením stejným směrem, jaký má proud při ohřátí tohoto spoje v Seebeckově jevu, pak se daný spoj ochlazuje. Prochází-li proud směrem opačným, pak se spoj ohřívá. Peltierův efekt závisí na druhu kovů a na jejich teplotě. Peltierovy články se vyrábí v různých velikostech. Pro běžné použití jsou vyráběny jako čtvercové placky s rozměry od 10x10 mm do 120x120 mm s tloušťkou 3 – 6 mm. Chladicí výkon těchto článků může být až stovky wattů. Rozdíl teplot mezi přední a zadní stranou může dosahovat až 80 °C. Pokud potřebujeme vyšší chladicí výkon, spojují se tyto články do série, do tzv. Peltierových termobaterií. Výhodou Peltierových článků je soustředění topného či chladicího účinku na malou plochu, na druhou stranu jejich nevýhodou je příliš vysoká spotřeba. Bude použito čtyř Peltierových článků M-TEC1-12730, jejichž rozměry jsou 62x62x4,8 mm. Maximální proud těchto článků je 30 A, napětí 16,2 V.

Peltierovy články budou připevněny pomocí montážních spon vodních bloků k bronzové desce, která nám bude sloužit pro rovnoměrné rozložení tepla na testovaném solárním článku. [6]



Obr. 30 Peltierův článek [3]

5.1.2 Regulátor napětí

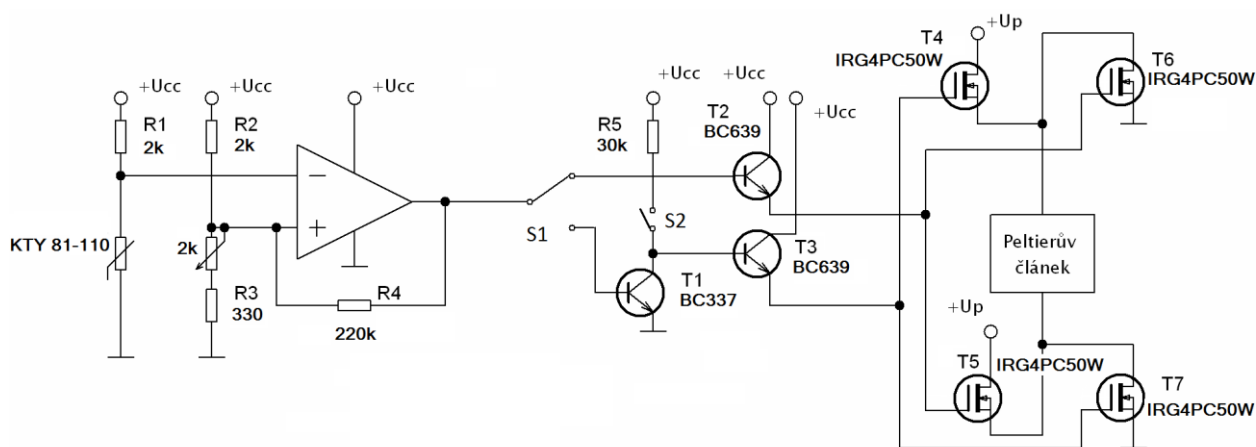
Aby bylo dosaženo požadované teploty, bude k regulaci napájení Peltierova článku použit regulátor napětí. Přípravek pro regulaci teploty solárního článku využívá oba režimy použití Peltierova článku, chlazení a zahřívání.

Teplota solárního článku je snímána termistorem KTY81-110 s pozitivní teplotní závislostí. Termistor je podepřen rezistorem R1 s nastaveným pracovním proudem do 4 mA pro zajištění správné činnosti termistoru. Napětí na termistoru je přivedeno na invertující vstup operačního

zesilovače. Na neinvertující vstup operačního zesilovače je přivedeno napětí řízeného děliče napětí složeného z rezistorů R2, R3 a potenciometru P1. Řízeným děličem je nastaveno referenční napětí požadované teploty. Cejchování stupnice je provedeno kalibračním měřením. Operační zesilovač je zapojen jako invertující komparátor s hysterezí. Hystereze je zavedena rezistorem R4 z výstupu komparátoru na neinvertující vstup. Hystereze je nastavena přibližně na změnu teploty o 4 °C, čímž se zamezí rozkmitání obvodu při srovnání napětí vstupů komparátoru. Napájení komparátoru je nesymetrické. Je-li napětí termistoru vyšší než referenční napětí, respektive teplota článku vyšší než nastavená, na výstupu komparátoru je nulové napětí. V opačném případě je na výstupu komparátoru napětí blízké napájecímu. Výstup komparátoru je přiveden k mechanickému přepínači S1 pro volbu režimu. Přepínač S2 bude sloužit k připojení budící části druhého režimu.

Peltierův článek je schopen chladit, ale i hřát, v závislosti na polaritě přivedeného napětí. V zahřívacím režimu je výstup komparátoru přiveden na budič tvořený tranzistorem T2 v zapojení se společným emitorem. Zesílený signál je přiveden na tranzistory T5 a T6, jenž spínají napětí s opačnou polaritou na Peltierův článek. V chladícím režimu je nutno změnit logickou hodnotu výstupu operačního zesilovače a připnout Peltierův článek se správnou polaritou. Výstup komparátoru zesilovače je proto přiveden na vstup invertoru tvořeného tranzistorem T1 v zapojení se společným kolektorem. Proud kolektoru je omezen rezistorem R5. Výstup invertoru je přiveden na budič T3, jehož výstup spíná tranzistory T4 a T7 a tím proud Peltierovým článkem.

Spínací tranzistory pro napájení Peltierova článku budou navrženy s ohledem na jeho parametry. Předpokládá se velký proud, proto budou použity výkonové spínací tranzistory IGBT. Pro napájení Peltierových článků bude použit externí zdroj o patřičném výkonu. Dále bude nutno zajistit dostatečné chlazení oteplené strany Peltierova článku. [6]



Obr. 31 Regulátor napětí - principiální schéma [6]

Při měření s použitím vysokého elektrického proudu došlo k přetížení daného regulátoru napětí a další měření probíhalo při napájení Peltierových článků přímo laboratorním zdrojem s maximálním proudem 40A.

5.1.3 Vodní chlazení

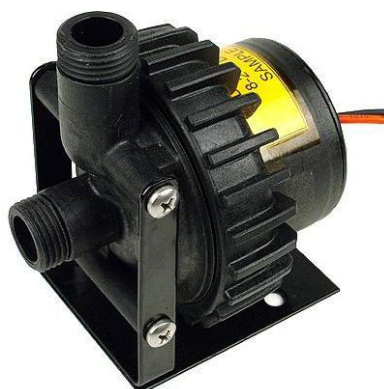
Při použití Peltierova článku je jedna strana ochlazována a druhá zahřívána. Při teplotě 10 °C na ochlazované straně, byla teplota na zahřívané cca 60 °C, ale po krátké době došlo k prohřátí Peltierova článku a teplota byla na obou stranách stejná a to 64 °C. Proto bylo nutno vyřešit odvod tepla. Pro odvod tohoto nežádoucího tepla bylo navrženo vodní chlazení. Pro chlazení solárního článku byly použity čtyři Peltierovy články. Každý z těchto článků má ztrátový výkon 260 W, proto muselo být navrženo vodní chlazení s chladícím výkonem minimálně 1040 W. Vodní chlazení je složeno ze čtyř vodních bloků EK Water Block Supreme obr. 32. [6]



Obr. 32 Vodní blok [6]

Na spodní straně vodních bloků je nanesená teplovodivá pasta, která umožňuje dokonalý přenos tepla mezi ohřívanou stranou Peltierova článku a vodního bloku.

Další důležitou částí vodního chlazení je čerpadlo. Bylo použito čerpadlo Laing D5 24V, které má maximální průtok 1500 l/m³ (obr. 33).



Obr. 33 Vodní čerpadlo Laing D5 24V [6]

K ochlazení vodní kapaliny byl do okruhu vodního chlazení zapojen radiátor Black ICE Extreme 480, na který jsou uchyceny čtyři ventilátory o rozměrech 120×120mm. Jako chladicí kapalina je použita destilovaná voda, která zaručí absenci vodní řasy a oxidace měděných částí.

Jako snímač teploty solárního článku byl použit digitální multimetr Diametral EX411 (obr. 34) s funkcí teploměru. Snímacím čidlem je termočlánek.



Obr. 34 Digitální multimetr Diametral EX411

5.1.4 CCD kamera G2-3200

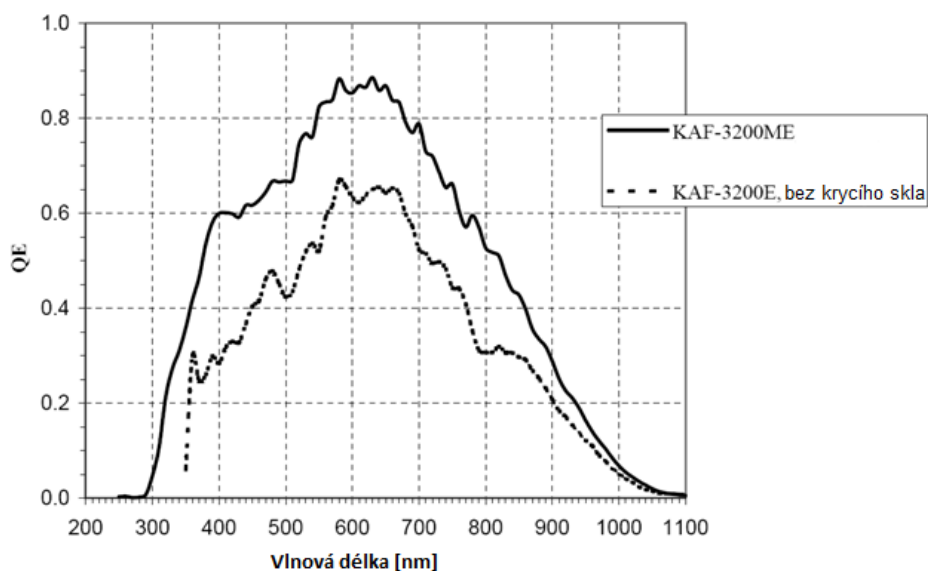
Pro snímání luminiscenční záření solárního článku je použita CCD kamera G2-3200 (obr. 35) výrobce Moravské přístroje a.s. Tato kamera používá vysoce citlivý, nízkošumový CCD čip Kodak KAF-3200 ME, jehož kvantová účinnost je mezi 80 a 90%. Temný proud těchto čipů je velice malý ve srovnání s jinými čipy pro profesionální vědecké aplikace — výsledný poměr signál/šum je tedy velice příznivý. [7]



Obr. 35 CCD kamera G2-3200

Kamera se ovládá počítačem na rozdíl např. digitálních fotoaparátů, a je napájena neregulovaným napětím 12V DC. Je vybavená efektivním dvoustupňovým chlazením s Peltierovými články, čímž udržuje čip hluboce zmrazený, aby byl minimalizován tepelný šum. Při měření čip byl chlazen do teploty $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Filtrové kolo, zabudované v těle kamery, je

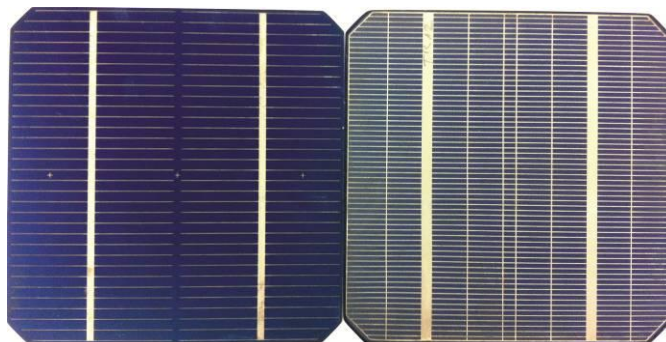
používáno k výběru pouze specifické části elektromagnetického spektra. S kamerou je používán objektiv Canon 28-80mm a další IR filtr, který umožňuje detekce elektroluminiscenčního záření. Výstupní snímky jsou ve stupních šedi. Defekty článků jsou charakterizovány malou nebo žádnou intenzitou luminiscenčního záření.



Obr. 36 kvantová účinnost čipu KAF-3200ME [7]

5.2 Měření solárních článků metodou elektroluminiscence

Metodou elektroluminiscence na výše popsaném pracovišti bylo proměřeno a prozkoumáno celkem 11 vzorků monokrystalických křemíkových článků (obr. 37) českého výrobce Solartec, s.r.o, které mají různé typy defektů.



Obr. 37 Solární článek, přední a zadní strana

Defekty solárních článků můžeme rozdělit na materiálové defekty a procesní defekty. Nejvýznamnějšími materiálovými defekty jsou vírové defekty a defekty pnutí v křemíku. Co se týče defektů procesních, rozlišujeme mechanické poškození a nehomogenitu difúzní vrstvy solárních článků. Měření probíhalo v rozsahu teplot 6 až 70°C. Doba snímání byla zvolena 240s,

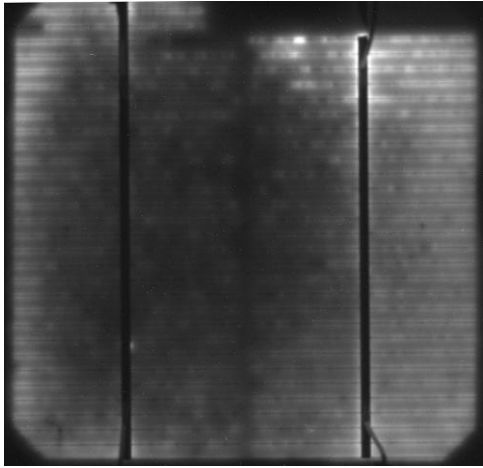
aby na snímku bylo co nejmíň šumů. Vzorky solárních článků byly vybrány ze dvou sad. Každý vzorek má své pořadové číslo, které je napsáno na igelitovém sáčku, do něhož je článek umístěn. Z důvodu poškození regulátoru napětí a následující nutnosti zapojení Peltierových článků přímo do laboratorního zdroje napětí a proudu byla provedena kalibrace závislosti teploty na napájecím proudu Peltierových článků. Hodnoty kalibrace jsou vyneseny do tabulky 1.

Tab. 1 Kalibrace Peltierových článků

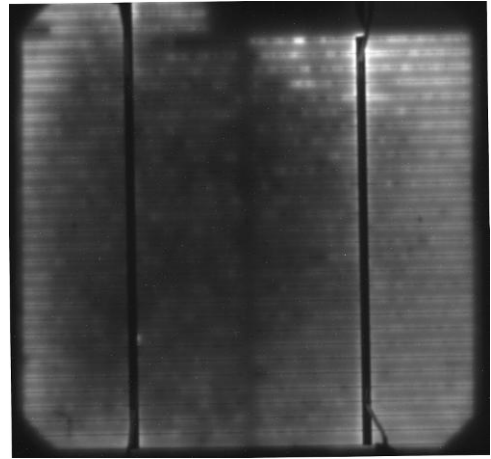
Chlazení			Ohřev		
I [A]	U [V]	v [°C]	I [A]	U [V]	v [°C]
2	1,4	22	2	1,6	28
4	2,6	20	4	2,9	40
6	3,9	18	6	4,1	35
8	5,1	16	8	5,8	42
10	6,3	14	10	7,2	44
12	7,5	13	12	9,2	52
14	8,6	12	14	10,9	58
16	9,7	11	16	12,7	65
18	10,9	11	18	14,8	71
20	12,1	10	20	15,7	77
22	13,3	10	22	18,2	84
24	14,4	9	24	20,2	95
26	15,7	8	26	22,8	103
28	16,8	8	28	25,1	115
30	17,4	6	30	27,1	122

5.2.1 Výsledky měření

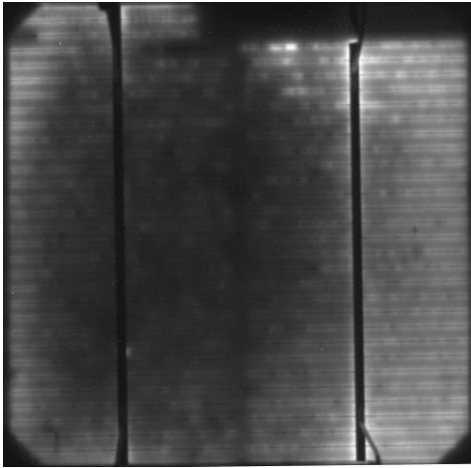
Solární článek číslo 2 ze sady 2 byl změřen při teplotách 6, 12, 24, 40, 60, 70 °C (obr. 38 až 43). Vzorek má několik procesních defektů. Článek chybí kontakty, což je možné vidět v horní části obrázku. Je to vyzváno procesní chybou metalizace. Tento defekt je viditelný na první pohled. Sítotisk, kterým se nanáší vrchní metalizace není dotažen do konce a vznikne tak defekt, který značně ovlivňuje odvod generovaného proudu ze solárního článku. Tento defekt je odhalitelný všemi dostupnými diagnostickými metodami solárních článků. Článek také má porušený kontakt v levé horní části a mechanické poškození v levé dolní části obrázku. Tyto poruchy ovlivňují nerovnoměrnost rozložení proudové hustoty tohoto článku a snižují jeho účinnost. V levé dolní části lze pozorovat mechanické poškození článku, což je defekt, který vzniká při neopatrné manipulaci s článkem. Při poškrábání dochází k zhmoždění vrchní vrstvy solárního článku. Při porovnání obrázků lze vidět, že elektroluminiscenční záření např. při teplotě 6°C je významně větší než při teplotách 60 a 70°C.



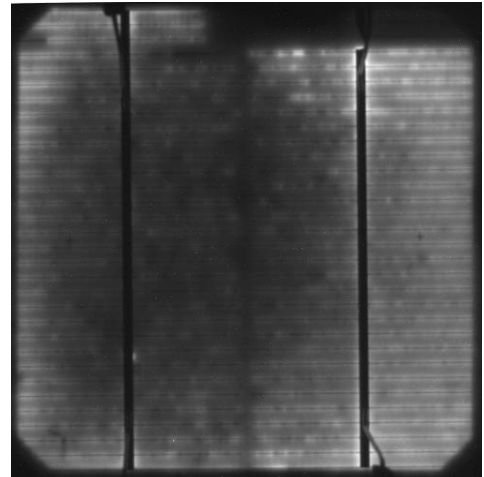
Obr. 38 Vzorek č. 2 sada 2 $v = 6\text{ }^{\circ}\text{C}$ $I = 2,5\text{ A}$
 $U = 1,4\text{ V}$ $t = 240\text{ s}$



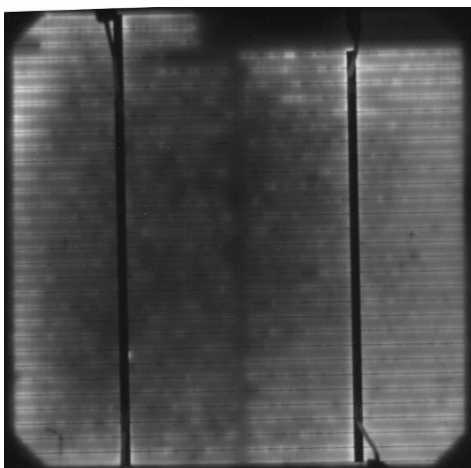
Obr. 39 Vzorek č. 2 sada 2 $v = 12\text{ }^{\circ}\text{C}$ $I = 2,5\text{ A}$
 $U = 1,4\text{ V}$ $t = 240\text{ s}$



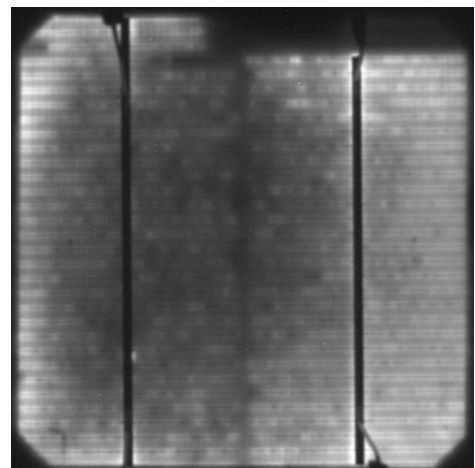
Obr. 40 Vzorek č. 2 sada 2 $v = 24\text{ }^{\circ}\text{C}$ $I = 2,49\text{ A}$
 $U = 1,3\text{ V}$ $t = 240\text{ s}$



Obr. 41 Vzorek č. 2 sada 2 $v = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ $I = 2,5\text{ A}$
 $U = 1,3\text{ V}$ $t = 240\text{ s}$

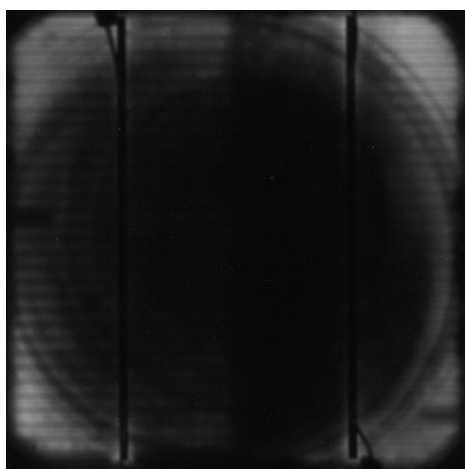


Obr. 42 Vzorek č. 2 sada 2 $v = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ $I = 2,5\text{ A}$
 $U = 1,2\text{ V}$, $t = 240\text{ s}$

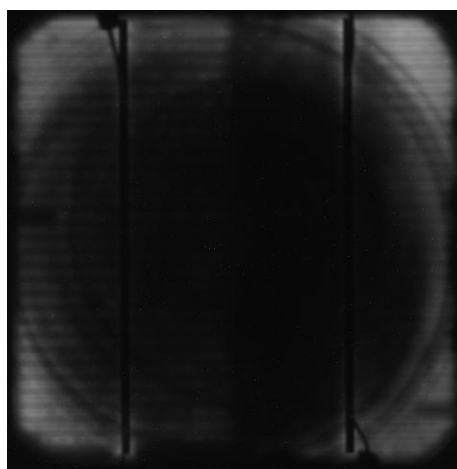


Obr. 43 Vzorek č. 2 sada 2 $v = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ $I = 2,5\text{ A}$
 $U = 1,2\text{ V}$ $t = 240\text{ s}$

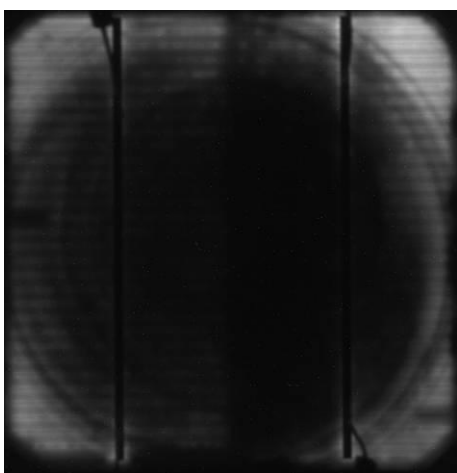
Vzorek solárního článku č. 1 (obr. 44 až 49) ze sady 2 byl změřen při teplotách 6, 12, 24, 40, 60 a 70°C. Na tomto solárním článku byl detekován silný vírový defekt, který zabírá většinu plochy solárního článku. Daný defekt byl způsoben již při výrobě monokrystalického křemíku a svým rozsahem může zasáhnout celý ingot monokrystalu nebo jeho značnou část. Účinnost tohoto článku je silně ovlivněná tímto defektem. V pravém dolním rohu a na levé straně článku je vidět, že je přerušovaný sběrný kontakt. V pravém horním rohu článku se projevuje velká proudová hustota, proto tato část vyzařuje nejvíce. Pravá hrana článku je špatně obroušená při výrobě. Dochází tak ke zkratu spodní a vrchní části. Z těchto obrázků vyplývá že vírový defekt solárního článků je tmavější a hůř pozorován při nízkých teplotách než při vysokých.



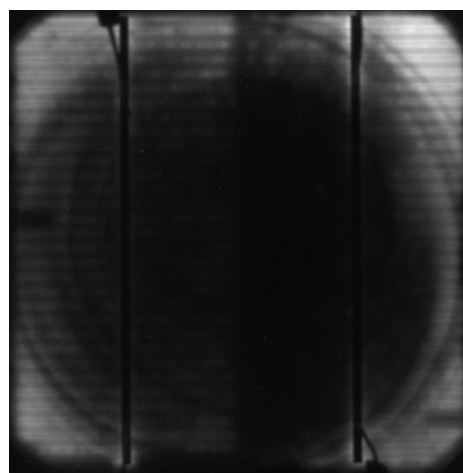
Obr. 44 Vzorek č. 1 sada 2 $v = 6\text{ }^{\circ}\text{C}$ $I = 2,49\text{ A}$
 $U = 1,4\text{ V}$ $t = 240\text{ s}$



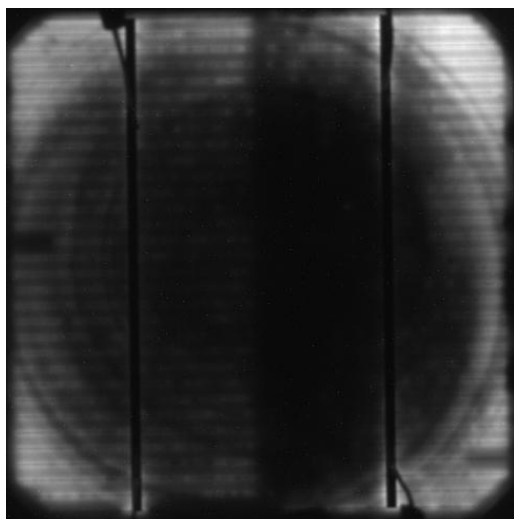
Obr. 45 Vzorek č. 1 sada 2 $v = 12\text{ }^{\circ}\text{C}$ $I = 2,48\text{ A}$
 $U = 1,3\text{ V}$ $t = 240\text{ s}$



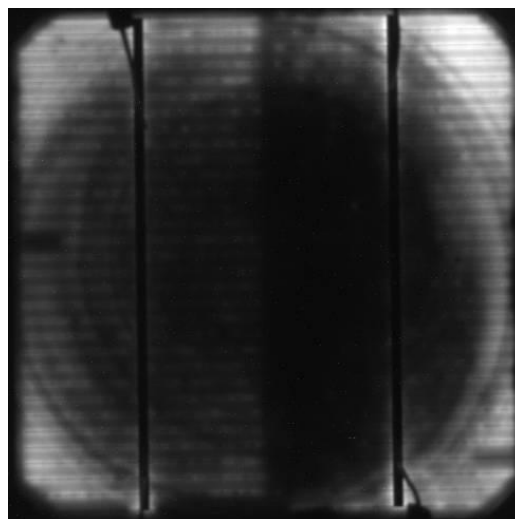
Obr. 46 Vzorek č. 1 sada 2 $v = 24\text{ }^{\circ}\text{C}$ $I = 2,49\text{ A}$
 $U = 1,3\text{ V}$ $t = 240\text{ s}$



Obr. 47 Vzorek č. 1 sada 2 $v = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ $I = 2,49\text{ A}$
 $U = 1,3\text{ V}$ $t = 240\text{ s}$

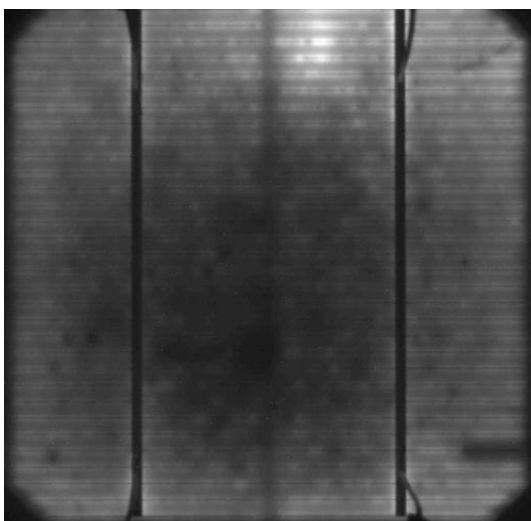


Obr. 48 Vzorek č. 1 sada 2 $v = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ $I = 2,5\text{ A}$
 $U = 1,2\text{ V}$ $t = 240\text{ s}$

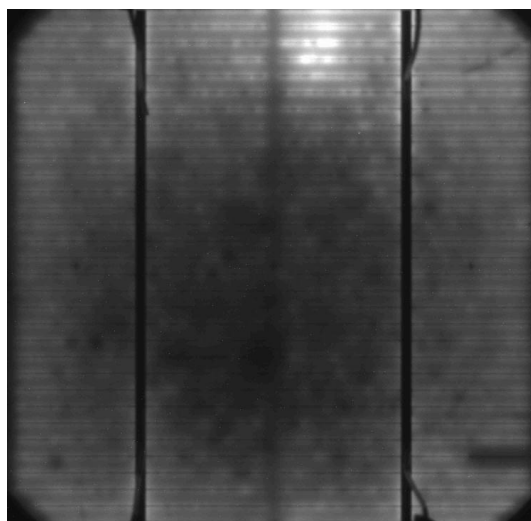


Obr. 49 Vzorek č. 1 sada 2 $v = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ $I = 2,5\text{ A}$
 $U = 1,2\text{ V}$ $t = 240\text{ s}$

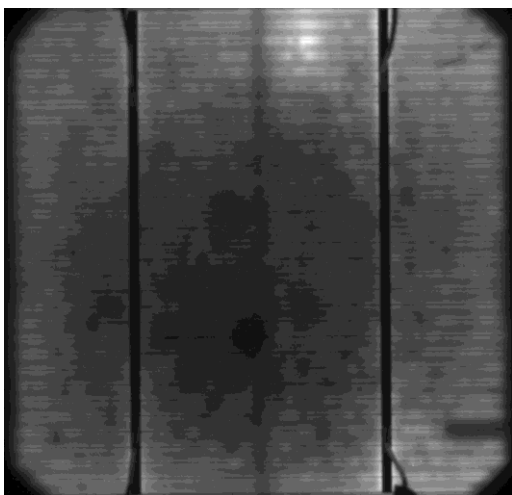
Další změřený vzorek je pod číslem 28 ze sady 1. Tento vzorek byl změřen při teplotách 6, 12, 27, 40, 60, 70 °C. Tmavější oblast uprostřed tohoto solárního článku indikuje o defektu vyvolaným procesem difúze. Nehomogenita difúzní vrstvy je lépe pozorovatelná na snímkách solárního článků při vysokých teplotách. Článek také má vadný sběrný kontakt v pravé dolní části a mechanické poškození v pravém horním rohu.



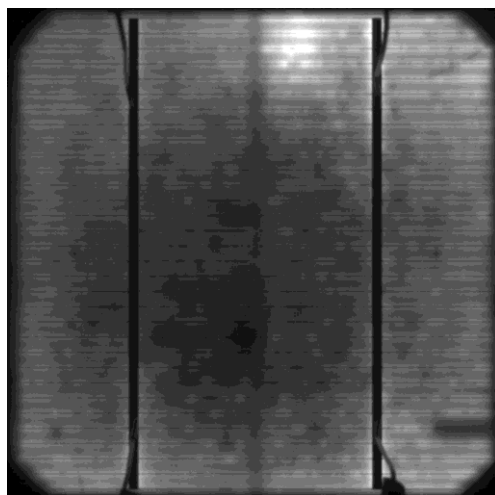
Obr. 50 Vzorek č. 28 sada 1 $v = 6\text{ }^{\circ}\text{C}$ $I = 2,5\text{ A}$ $U = 1,4\text{ V}$
 $t = 240\text{ s}$



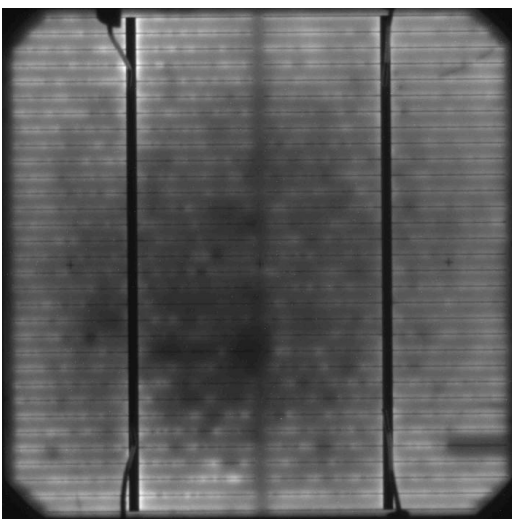
Obr. 51 Vzorek č. 28 sada 1 $v = 12\text{ }^{\circ}\text{C}$ $I = 2,5\text{ A}$
 $U = 1,4\text{ V}$ $t = 240\text{ s}$



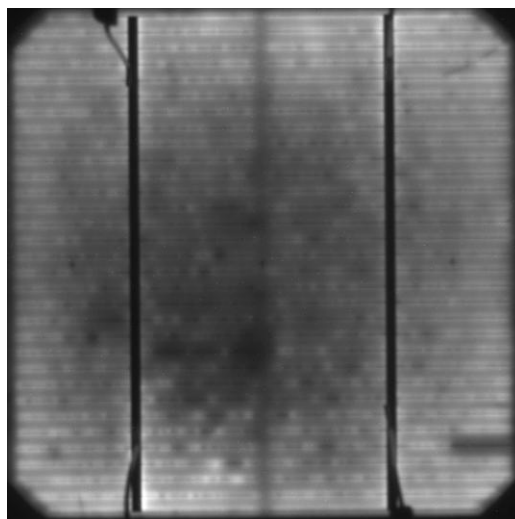
Obr. 52 Vzorek č. 28 sada 1 $v = 27^{\circ}\text{C}$ $I = 2,5\text{ A}$ $U = 1,3\text{ V}$
 $t = 240\text{ s}$



Obr. 53 Vzorek č. 28 sada 1 $v = 40^{\circ}\text{C}$ $I = 2,5\text{ A}$
 $U = 1,2\text{ V}$ $t = 240\text{ s}$

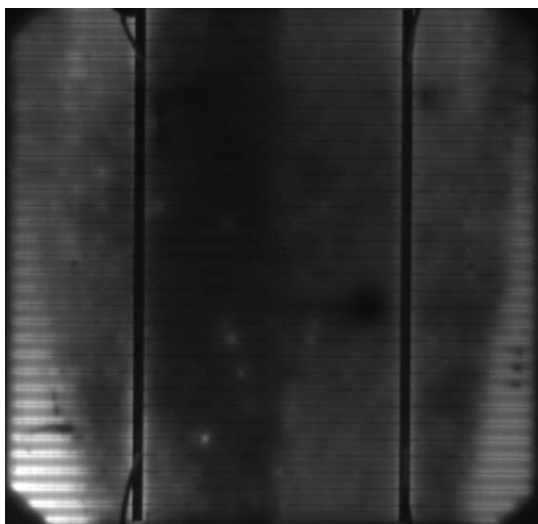


Obr. 54 Vzorek č. 28 sada 1 $v = 40^{\circ}\text{C}$ $I = 2,5\text{ A}$ $U = 1,2\text{ V}$
 $t = 240\text{ s}$

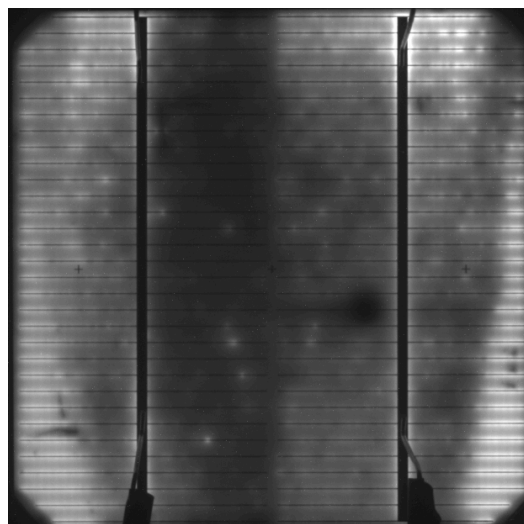


Obr. 55 Vzorek č. 28 sada 1 $v = 70^{\circ}\text{C}$ $I = 2,5\text{ A}$
 $U = 1,2\text{ V}$ $t = 240\text{ s}$

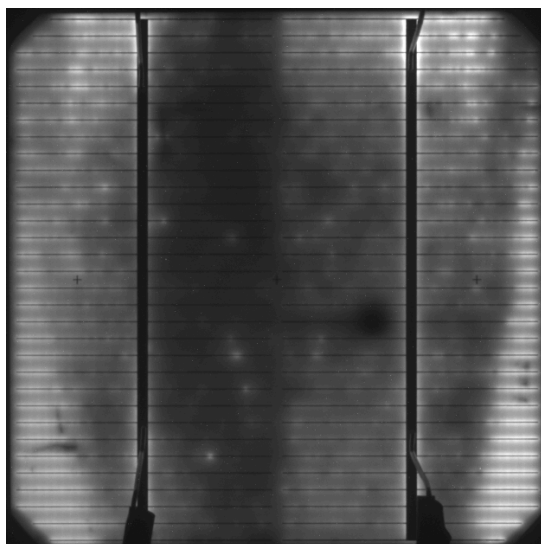
U vzorku č. 13 ze sady 2 (obr. 56 až 61) jsou pozorovány bodové poruchy a mechanické poškození solárního článku škrábnutím. Bodovou poruchu lze dobře vidět v pravé dolní čtvrti obrázku. Tento druh poruch může být působen zabudováním nečistot do křemíkového substrátu. Článek byl změřen při teplotách 6, 15, 26, 40, 60 a 70°C. Jako i u předchozích měřených vzorků nejlepší možnost pozorování poruch byla při vysokých teplotách solárního článku. Při teplotě vzorku 6°C elektroluminiscenční záření v poškozených oblastech je velmi slabé. Při této teplotě nelze například správně určit velikost výše popsané bodové poruchy. Se zvýšením teploty poškozené oblasti se stávají jasnější.



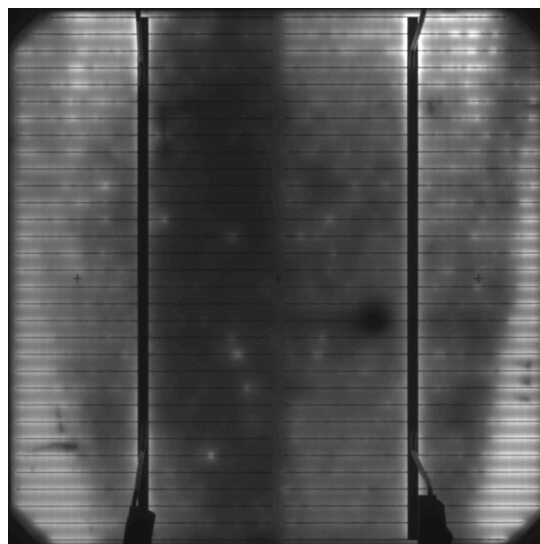
Obr. 56 Vzorek č. 13 sada 1 $v = 6\text{ °C}$ $I = 2,5\text{ A}$ $U = 1,4\text{ V}$
 $t = 240\text{ s}$



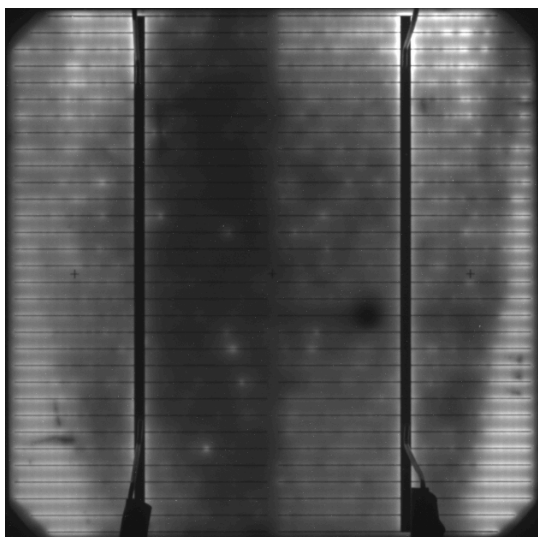
Obr. 57 Vzorek č. 13 sada 1 $v = 15\text{ °C}$ $I = 2,5\text{ A}$
 $U = 1,4\text{ V}$ $t = 240\text{ s}$



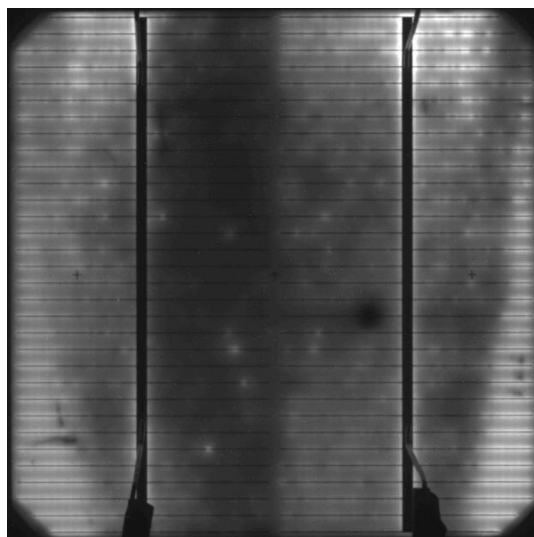
Obr. 58 Vzorek č. 13 sada 1 $v = 26\text{ °C}$ $I = 2,53\text{ A}$
 $U = 1,3\text{ V}$ $t = 240\text{ s}$



Obr. 59 Vzorek č. 13 sada 1 $v = 40\text{ °C}$ $I = 2,51\text{ A}$
 $U = 1,3\text{ V}$ $t = 240\text{ s}$



Obr. 60 Vzorek č. 13 sada 1 $v = 60\text{ °C}$ $I = 2,51\text{ A}$
 $U = 1,2\text{ V}$ $t = 240\text{ s}$



Obr. 61 Vzorek č. 13 sada 1 $v = 70\text{ °C}$ $I = 2,5\text{ A}$
 $U = 1,2\text{ V}$ $t = 240\text{ s}$

5.2.2 Zhodnocení

Při porovnání obrázků, získaných během měření fotovoltaických článků metodou elektroluminiscence bylo zjištěno, že se při různých teplotách článku mění intenzita elektroluminiscenčního záření. To je dáno tím, že intenzita elektroluminiscenčního záření je přímo úměrná celkovému počtu minoritních nosičů v křemíkovém substrátu. Počet minoritních nosičů klesá v místech krystalických defektů a jako důsledek klesá elektroluminiscenční emise. Teplota výrazněji působí na vnitřní nedostatky křemíku (např. krystalografické vady a hranice zrn) než na vnější (např. poškození křemíkové desky), poněvadž difuzní délka a doba života minoritních nosičů závisí na úrovni zachycení elektronů. Proto, když teplota stoupá, intenzita elektroluminiscenčního záření se zvyšuje ve vnitřních poruchách křemíkového substrátu. Z provedených měření vyplývá, že metoda elektroluminiscence umožňuje kvalitní měření solárních článků v rozsahu teplot 6 až 70 °C. Ale lze konstatovat ten fakt, že při teplotách vyšších než pokojová, metoda elektroluminiscence funguje efektivněji než při nižších. Nicméně, je nutno dávat pozor na vysoké teploty, aby nedošlo k tepelnému poškození solárního článku nebo k jeho zničení. Zařízení, na němž se provádělo měření solárních článků, neumožňuje dosáhnout velmi nízkých teplot. Proto se nepovedlo zjistit, při jak nízké teplotě metoda elektroluminiscence přestane fungovat. Stávající měřicí pracoviště lze v budoucnu renovovat pro dosažení nízkých teplot, např. použitím kryogenních plynů pro zmrazení bronzové podložky, na které je umístěn solární článek.

Závěr

Tato diplomová práce se v první části zabývá teoretickým studiem fotovoltaického jevu, principu solárního článku a solárních panelů, poruch se vyskytujících v křemíkovém krystalu. V níž jsou uvedeny a podrobně popsány aktuální diagnostické metody fotovoltaických článků a panelů. V kapitole č. 4 jsou podrobně probrány metody měření a kontroly teploty. Byly popsány elektrické a mechanické snímače teploty, byly uvedeny jejich vlastnosti, oblasti použití, rozsahy měření.

V praktické části diplomové práce byl probrán princip činnosti měřicího pracoviště a uveden popis jeho jednotlivých částí. Výsledky měření jsou v kapitole 5.2.1. Tato kapitola obsahuje snímky změřených solárních článků metodou elektroluminiscence při různých teplotách. Defekty detekované v těchto článcích jsou podrobně popsány a byly také vysvětleny příčiny jejich vzniku. Na konci práce bylo provedeno zhodnocení porovnání změřených článků. Elektroluminiscenční snímky ostatních změřených článků spolu s originálními soubory programu SIMS z důvodu jejich velkého množství byly uloženy na CD.

Seznam použité literatury

- [1] DÍTĚ, I. Bezkontaktní infračervené teploměry. [online]. [cit. 2012-05-18]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=25918
- [2] DOLENSKÝ, J: *Charakterizace elektrických vlastností křemíkových krystalických solárních článků*. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. 2007. 50 s.
- [3] GM electronic. [online]. [cit. 2012-05-16]. Dostupné z: <http://www.gme.cz/>
- [4] JANDOVÁ, K.: *Diagnostické metody plošného rozložení defektů solárních článků*. Dizertační práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 91 s.
- [5] JIRÁK, J.: AUTRATA, R., LIEDERMANN, K., ROZSÍVALOVÁ, Z., SEDLAŘIKOVÁ, M. *Materiály a technická dokumentace, část materiály v elektrotechnice*. Sriptum. Brno: Vysoké učení technické v Brně. 127 stran.
- [6] KOUTNÝ, M. *Vliv teplotních závislostí luminiscence solárních článků*. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 52 s.
- [7] Moravian Instruments Inc. [online]. [cit. 2012-05-18]. Dostupné z: <http://ccd.mii.cz/>
- [8] NIKITIN, S. *Обзор датчиков температуры*. [online]. [cit. 2012-05-17]. Dostupné z: <http://d.17-71.com/2009/04/14/obzor-datchikov-temperatury/>
- [9] Solartec, s.r.o. [online]. [cit. 2012-05-18]. Dostupné z: <http://www.solartec.cz/cs.html>
- [10] TSUJII, S., SUGIMURA, E., HIRATA, K.: *Classification of Defects in Polycrystalline Si by Temperature Dependence of Electroluminescence under Forward and Reverse-biases*. Takayama, Japan, Nara Institute of Science and Technology (NAIST), 2010
- [11] VALA, Z: *Fotoluminiscenční metody detekce defektů solárních článků*. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně: 2009. 64 s.
- [12] VANĚK, J. *Aktuální trendy diagnostických metod FV článků pro maximalizaci délky životnosti panelů*. [online]. s. 6 [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: <http://www.cemc.cz/OZE2011/116.pdf>
- [13] VANĚK, J. Diagnostické metody fotovoltaických článků. [online]. 2010 [cit. 2012-05-10]. Dostupné z: <http://www.asb-portal.cz/tzb/energie/diagnosticke-metody-fotovoltaickyh-clanku-2100.html>
- [14] VANĚK, J., KŘIVÍK, P., NOVÁK, V.: *Alternativní zdroje energie*. Skriptum. Vysoké učení Technické v Brně: 2006. 158 s.

Přílohy

Přílohy jsou k dispozici na přiloženém CD.