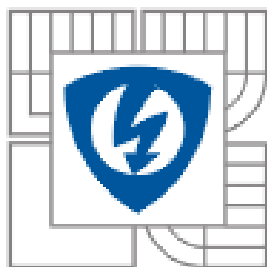


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

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

VLIV TEPLOTNÍCH ZÁVISLOSTÍ LUMINISCENCE SOLÁRNÍCH ČLÁNKŮ

INFLUENCE OF TEMPERATURE DEPENDENCE OF LUMINISCENCE SOLAR CELLS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

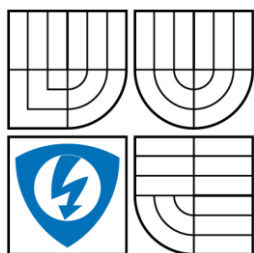
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. MICHAL KOUTNÝ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. JAN DOLENSKÝ

BRNO 2010



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektrotechnologie

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektrotechnická výroba a management

Student: Bc. Michal Koutný **ID:** 89034
Ročník: 2 **Akademický rok:** 2009/2010

NÁZEV TÉMATU:

Vliv teplotních závislostí luminiscence solárních článků

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s diagnostickými metodami využívajícími luminiscenci solárních článků a s vlivem teploty na projev jednotlivých typů defektů. Vhodně upravte měřicí pracoviště pro měření teplotních závislostí. Naměřená data zpracujte a vyhodnoťte teplotní závislosti defektů.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 8.2.2010

Termín odevzdání: 27.5.2010

Vedoucí práce: Ing. Jan Dolenský

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 následku 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 c.40/2009 Sb.

Abstrakt:

Tato práce se zabývá diagnostikou defektů solárních článků pomocí nedestruktivních metod. Defekty jsou detekovány metodami elektroluminiscence a luminiscence mikroplazmy v teplotní závislosti. Teplota bude regulována Peltierovými články. Použitím rozdílných teplot můžeme získávat objektivnější výsledky diagnostiky defektů díky simulování reálných podmínek, ve kterých solární články pracují.

Abstract:

This work deals with determination defects in solar cells using non-destructive methods. Defects are determining by electroluminescence method and microplasma method in temperature influence. Temperature will be changed by Peltier cells. By using this various temperatures during the testing we can receive more objective results thanks to simulated operation conditions.

Klíčová slova:

Solární článek, defekt, teplotní závislost, elektroluminiscence, luminiscence mikroplazmy, Peltierův článek

Keywords:

Solar cell, defect, temperature influence, electroluminescence method, microplasma method, Peltier cell

Bibliografická citace díla:

KOUTNÝ, M. *Vliv teplotních závislostí luminiscence solárních článků*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 52 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jan Dolenský

Prohlášení autora o původnosti díla:

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

V Brně dne 27. 5. 2010

Poděkování:

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Janu Dolenskému za metodické a cíleně orientované vedení při plnění úkolů realizovaných v návaznosti na diplomovou práci. Dále děkuji Ing. Zbyňku Valovi za poskytnutou metodickou pomoc a odborné rady.

OBSAH

ÚVOD	9
1 HISTORIE	10
1.1 VÝVOJ FOTOVOLTAIKY V ČESKÉ REPUBLICE	10
2 ZÁKLADNÍ PRINCIPY FOTOVOLTAICKÉ PŘEMĚNY ENERGIE	12
2.1 NÁHRADNÍ MODEL SOLÁRNÍHO ČLÁNKU	17
2.2 GENERACE A REKOMBINACE	18
3 MATERIÁLY PRO SOLÁRNÍ ČLÁNKY	19
3.1 KŘEMÍK	19
3.1.1 <i>Monokrystalický křemík (Si-mono)</i>	19
3.1.2 <i>Polykrystalický křemík (Si-poly)</i>	20
3.2 ARSENID GALIA (GAAS)	21
3.3 TENKOVRSŤVÉ SOLÁRNÍ ČLÁNKY	21
3.3.1 <i>Tenkovrstvý amorfni křemík</i>	22
3.3.2 <i>Telurid kademnatý (CdTe)</i>	22
3.4 BUDOUCNOST MATERIÁLŮ PRO VÝROBU SOLÁRNÍCH ČLÁNKŮ	22
4 PŘEHLED ELEKTRICKÝCH PARAMETRŮ A VZORCŮ UŽÍVANÝCH VE FOTOVOLTAICE	23
4.1 VLIV TEPLoty NA ELEKTRICKÉ PARAMETRY SOLÁRNÍCH ČLÁNKŮ	26
5 MĚŘICÍ METODY PRO ANALÝZU SOLÁRNÍCH ČLÁNKŮ	28
5.1 MĚŘENÍ ELEKTRICKÝCH VLASTNOSTÍ	28
5.1.1 <i>Solární simulátor</i>	28
5.1.2 <i>VA charakteristika</i>	28
5.2 MĚŘENÍ MATERIÁLOVÝCH VLASTNOSTÍ A DEFEKTŮ	28
5.2.1 <i>LBIC (Light Beam Induced Current)</i>	28
5.2.2 <i>Elektroluminiscence</i>	28
5.2.3 <i>Fotoluminiscence</i>	29
5.2.4 <i>Luminiscence mikroplazmy</i>	30
6 PRAKTICKÁ ČÁST	31
6.1 INOVACE PRACOVIŠTĚ	31
6.1.1 <i>Peltierův článek</i>	32
6.1.2 <i>Regulátor napětí</i>	33
6.1.3 <i>Vodní chlazení</i>	34
6.2 CHARAKTERISTIKA DEFEKTŮ SOLÁRNÍCH ČLÁNKŮ	37
6.2.1 <i>Materiálové defekty (Grow Defects)</i>	37
6.2.2 <i>Procesní defekty (Processing Induced Defects)</i>	38
6.3 VLIV TEPLoty NA PROJEV DEFEKTŮ	38
6.3.1 <i>Metoda luminiscence mikroplazmy</i>	38
6.3.1 <i>Metoda elektroluminiscence</i>	42
6.1 ZHODNOCENÍ	44

7	ZÁVĚR	45
8	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	46
9	SEZNAM SYMBOLŮ	48
10	PŘÍLOHY	50

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Schematické znázornění funkce solárního článku.....	13
Obr. 2 Model energetických hladin PV článku a fotovoltaické přeměny energie [2] .	14
Obr. 3 Spektrum slunečního záření po průchodu atmosférou s vyznačením vlnových délek a energií fotonů i s vyznačením šířky zakázaného pásu. Pro názornost je vyznačena i typická citlivost křemíkového PV článku [2]	15
Obr. 4 Voltampérové charakteristiky osvětleného solárního článku při různých intenzitách osvětlení a při konstantní teplotě $t = 50^{\circ}\text{C}$	16
Obr. 5 Voltampérové charakteristiky osvětleného solárního článku na bázi krystalického křemíku při různých teplotách při konstantní intenzitě osvětlení $I = 1000\text{W}/\text{m}^2$ [2].....	16
Obr. 6 Náhradní model solárního článku.....	17
Obr. 7 Monokrystalický křemíkový solární článek (přední a zadní strana)	20
Obr. 8 Multikrystalický solární článek	21
Obr. 9 Voltampérová charakteristika s vyznačenými parametry.....	23
Obr. 10 Vliv teploty na VA charakteristiky solárního článku při intenzitě osvětlení $1000\text{ W}/\text{m}^2$ [13].....	26
Obr. 11 Hodnoty U_{OC} solárního článku v závislosti na jeho teplotě pro různé intenzity záření [13]	27
Obr. 12 Schéma měření metodou elektroluminiscence	29
Obr. 13 Schéma měření metodou fotoluminiscence.....	29
Obr. 14 Schéma měření metodou luminiscence mikroplazmy	30
Obr. 15 Blokové schéma měřicího pracoviště	31
Obr. 16 Peltierův článek	32
Obr. 17 Regulátor napětí	34
Obr. 18 Vodní blok EK Water Block Supreme	35
Obr. 19 Čerpadlo Laing D5 12V	35
Obr. 20 Radiátor - Black ICE Radiator Extreme 480	36
Obr. 21 Expanzní nádoba EK RES 400	36
Obr. 22 Metoda elektroluminiscence Swirl defekt.....	37

Obr. 23 Metoda elektroluminiscence pnutí v křemíku.....	37
Obr. 24 Metoda elektroluminiscence – poškrábání a odštípnutí článku	38
Obr. 25 Luminiscence mikroplazmy – $U = 15\text{ V}$ a rozdílná teplota, $T = 303\text{ K}$ černá barva, $T = 338\text{ K}$ bílá barva [3].....	39
Obr. 26 Luminiscence mikroplazmy – Závislost počtu defektů (%) na teplotě (K) [3]	40
Obr. 27 $U = 10\text{ V}$, $I = 0,19\text{ A}$, $T = 297\text{ K}$, doba expozice 25 s.....	41
Obr. 28 $U = 10\text{ V}$, $I = 0,19\text{ A}$, $T = 313\text{ K}$, doba expozice 25 s.....	41
Obr. 29 $U = 10\text{ V}$, $I = 0,23\text{ A}$, $T = 333\text{ K}$, doba expozice 25 s.....	41
Obr. 30 $U = 10\text{ V}$, $I = 0,29\text{ A}$, $T = 353\text{ K}$, doba expozice 25 s.....	41
Obr. 31 $I = 1\text{ A}$, $U = 1,03\text{ V}$, $T = 303\text{ K}$	43
Obr. 32 $I = 1\text{ A}$, $U = 1,03\text{ V}$, $T = 338\text{ K}$	43
Obr. 33 $I = 1,97\text{ A}$, $U = 1,03\text{ V}$, $T = 303\text{ K}$	43
Obr. 34 $I = 1,97\text{ A}$, $U = 1,03\text{ V}$, $T = 338\text{ K}$	43
Obr. 35 $I = 3,03\text{ A}$, $U = 1,6\text{ V}$, $T = 313\text{ K}$	44

Úvod

Získávání elektrické energie přímo ze slunečního záření je z hlediska životního prostředí nejčistším a nejšetnějším způsobem její výroby. Solární články, jako prvky pro přeměnu energie Slunce na elektrickou energii, se začaly ve větší míře využívat v padesátých letech 20. století, kdy se podařilo vyrobit články o dostatečném výkonu. Pro svoji vysokou cenu bylo jejich uplatnění možné jen ve vesmírném programu. Po rozšíření ve vesmíru se o vývoj solárních článků začalo zajímat více firem. Jejich cílem bylo rozšíření použití na Zemi. Velký rozvoj přišel kolem roku 1973, kdy byla celosvětová ropná krize.

Účinnost přeměny slunečního záření na elektřinu umožňuje získat se současnými solárními systémy z jednoho metru aktivní plochy až 110 kWh elektrické energie za rok. Zatímco v mnoha aplikacích na odlehlých místech bez připojení k elektrorozvodné síti je fotovoltaika technicky i ekonomicky výhodnější řešení ve srovnání se stávajícími klasickými zdroji, při dodávce do sítě je elektrická energie z fotovoltaických systémů stále ještě dražší.

Pro hromadnou výrobu solárních článků se používá především křemík, přestože podobnými vlastnostmi se vyznačuje většina polovodičů. Je vhodný zejména z toho důvodu, že je snadno dostupný, asi 1/3 zemské kůry tvoří SiO_2 , je lehce tavitelný a lehce krystalizuje. V neposlední řadě hraje také velkou roli to, že se vyznačuje dostatečnou pevností, dobrou zpracovatelností a že není toxický.

Existuje však dostatek důvodů, proč vyvíjet úsilí o další rozvoj fotovoltaiky. Vyspělé země světa více či méně intenzivně podporují nejen rozvoj fotovoltaiky, ale i ostatních obnovitelných zdrojů energie, jako strategického prostředku pro zajištění kontinuity energetických zdrojů v časovém horizontu do roku 2050. Fotovoltaika nabízí časově neomezenou možnost výroby elektrické energie. Technologie využívající sluneční záření má teoreticky neomezený růstový potenciál. Fotovoltaika by se měla stát významným prvkem trvale udržitelného energetického systému s minimálním dopadem na životní prostředí.

1 Historie

Historie solárního článku se začala datovat už roku 1839, kdy francouzský experimentální fyzik Alexandre Edmund Becquerel, při pokusech se dvěma kovovými elektrodami umístěnými v elektro vodném roztoku zjistil, že při osvětlení zařízení vzrostlo na elektrodách napětí. Fotovoltaický jev tak byl díky němu na světě. V roce 1877 byl objeven fotovoltaický efekt na selenu a byl vyroben první solární článek. Důležitým krokem v historii fotovoltaiky byl objev způsobu růstu monokrystalu křemíku polským vědcem Czochralským v roce 1918. Přestože byl fotovoltaický efekt postupně objeven i u jiných prvků, sulfid kadmia nebo oxid mědi, křemík se postupem času ukázal jako nejvýhodnější. Za vynálezce křemíkového solárního článku bývá označován Američan Russel Ohl, stalo se tak v roce 1941. Patent na „převaděč solární energie“ však nakonec dostali D. M. Chapin, C. S. Fuller a G. L. Pearson v roce 1954, kteří později předvedli křemíkové solární články s 4,5 % a později 6 % účinností.

Výraznější rozvoj fotovoltaiky přichází v šedesátých letech jak jinak než s nástupem kosmického výzkumu. Solární články v té době začaly sloužit jako výhodný zdroj energie pro vesmírné družice. Celosvětová ropná krize v roce 1973 pak nastartovala rozsáhlý výzkum fotovoltaické přeměny sluneční energie v energii elektrickou jako potenciálního zdroje nejčistší energie pro celou Zemi. V současné době jsou již technická řešení pro využití sluneční energie k výrobě elektrické energie k dispozici v uspokojivé podobě. Účinnost přeměny slunečního záření na elektřinu se v současnosti pohybuje v rozmezí mezi 10 a 15 %.

1.1 Vývoj fotovoltaiky v České republice

V průběhu poslední dekády 20. století bylo využívání fotovoltaických systémů v České republice spíše sporadické. Praktické aplikace byly téměř výhradně zaměřeny na malé ostrovní systémy pro nezávislé napájení objektů a zařízení v lokalitách bez připojení k rozvodné síti. Jednalo se vesměs o soukromé rekreační chaty, ve kterých fotovoltaický systém poskytuje možnost napájet osvětlení a drobné elektrické spotřebiče. Systém je v takovém případě sestaven většinou z jednoho solárního panelu (10–100 W), akumulátorové baterie a regulátoru dobíjení. V některých případech bývá systém doplněn střídačem, který umožňuje připojit i běžné síťové spotřebiče. Větší aplikací tohoto charakteru je například fotovoltaický systém s výkonem 370 W pro napájení osvětlení horské chaty.

Na ulicích některých měst (např. Brno a Ostrava) byly nainstalovány parkovací automaty napájené z malých solárních panelů. V několika málo případech byly solární panely použity pro napájení měřicích, registračních a komunikačních zařízení

instalovaných v terénu, kde se možnost přivedení elektrické sítě jevila velmi problematickou, až takřka nemožnou.

Velmi pozvolna se objevovaly systémy s připojením na rozvodnou síť. Prvním větším systémem byla fotovoltaická elektrárna na vrcholu hory Mravenečník v Jeseníkách. Volně stojící elektrárnu s výkonem 10 kW financovala v roce 1998 společnost ČEZ, a. s. Po problémech souvisejících s její odlehlostí se vlastník rozhodl elektrárnu přestěhovat k informačnímu centru u jaderné elektrárny Dukovany.

Na nové budově vedení společnosti Pražská energetika, a.s., v Praze ve Vršovicích byl v roce 2001 spuštěn do provozu demonstrační fotovoltaický systém s možností srovnat chování solárních panelů za různých podmínek – orientace, sklon a zastínění. Souhrnný instalovaný výkon solárních panelů je 2,55 kW.

Od roku 2000 pak nastává nová fáze vývoje fotovoltaiky v České republice. Postupně jsou státní správou a místní samosprávou zaváděny podpůrné nástroje na podporu fotovoltaiky, a to jak podpora demonstračních projektů, tak podpora vývoje a výzkumu. Nicméně zatím ještě není jasně definovaný program rozvoje s měřitelným cílem. Současné aktivity vyplývající ze stávajících podpor mají demonstrační charakter s cílem zvýšit povědomí o fotovoltaice.

Od roku 2003 byly Státním fondem životního prostředí poskytovány 30 % dotace na instalace FVS pro privátní i právnické osoby. Pobídka k instalacím je navíc podpořena zvýšenou výkupní sazbou za dodanou elektrickou energii do sítě a to ve výši až 13 Kč/kWh .

Do roku 2006 se instalovaný výkon fotovoltaických elektráren pohyboval kolem 1 MWp o což se nejvíce zasloužil projekt "Slunce do škol". V roce 2007 vzrostl instalovaný výkon na 5,3 MWp. Největší rozvoj fotovoltaických elektráren nastal v roce 2008, kdy jejich instalovaný výkon překročil 50 MWp. Na konci roku 2009 byl instalovaný výkon 411 MWp. Za tento boom může především podpora ze strany státu, který si ale uvědomil, že tato podpora byla nastavena nerovnovážně. Zatímco solární energie pokrývá 7 % celkové výroby z obnovitelných zdrojů, spotřebuje přitom kolem 40 % prostředků. Proto vláda schválila, že od roku 2011 bude moci snižovat výkupní ceny solární energie více než o 5 % ročně.

2 Základní principy fotovoltaické přeměny energie

K fotovoltaické přeměně energie elektromagnetického záření na energii elektrickou dochází v polovodičových solárních článcích. Nejběžnější jsou solární články na bázi krystalického křemíku.

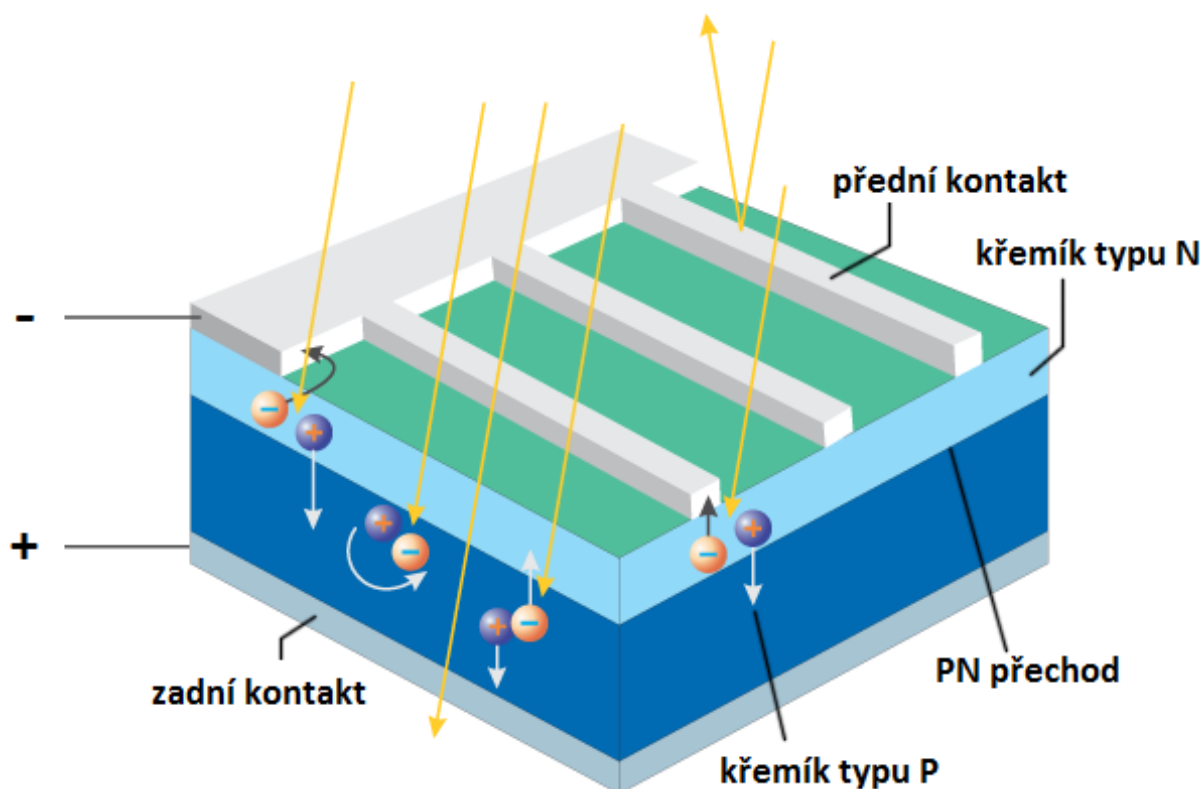
Podle typu nosiče náboje dělíme polovodiče na vlastní (intrinsické) a příměsové. Příměsové polovodiče mohou být typu N (majoritními nosiči náboje jsou elektrony) nebo typu P (majoritními nosiči jsou díry, které se chovají jako částice s kladným nábojem).

Křemík (atom Si) obsahuje 14 elektronů, má krystalovou strukturu diamantu, takže každý atom Si je obklopen čtyřmi nejbližšími sousedy. Poslední čtyři elektrony (valenční) vytvářejí s těmito sousedy kovalentní vazby. Energie volného elektronu, který nepodléhá působení žádných sil, může nabývat libovolných hodnot. Naproti tomu energie elektronu v krystalu křemíku nabývá pouze určitých hodnot v důsledku pohybu v poli periodického potenciálu. Tyto hladiny energie jsou rozděleny do pásů nazývaných "pásky dovolených energií". Pásky dovolených energií jsou odděleny "pásky zakázaných energií".

Důležitou roli hrají tyto pásy: valenční pás (za velmi nízkých teplot poslední obsazený), poslední zakázaný pás a vodivostní pás (za velmi nízkých teplot první neobsazený). Valenční pás se skládá z energetických stavů valenčních elektronů. Protože těchto stavů je stejný počet jako valenčních elektronů v celém krystalu, budou za velmi nízkých teplot všechny obsazené. Po valenčním pásu následuje pás zakázaných energií, tzn., že žádný elektron nemůže mít energii odpovídající stavu v tomto pásu. Dále následuje pás vodivostní, jehož stavy za velmi nízkých teplot nejsou obsazené. Uvnitř pásů dovolených energií jsou rozdíly mezi jednotlivými energetickými hladinami neměřitelně malé. [2]

K fotovoltaické přeměně dochází v polovodičových solárních článcích, kde se energie dopadajících fotonů mění na elektrickou energii. Jedná se v podstatě o velkoplošnou diodu, přechod PN je orientován kolmo k čelní ploše mezi přední a zadní stranou. Pokud na solární článek dopadají fotony s větší energií, než jaká odpovídá šířce zakázaného pásu, tyto fotony generují páry elektron - díra. Tak odevzdávají svou energii a pohlcují se. Případný přebytek energie většinou předají kmitům mřížky a tak ho přemění v teplo, což vede k ohřevu materiálu polovodiče. Páry elektron - díra generované v oblasti přechodu PN jsou od sebe odděleny elektrickým polem E mezi vázanými prostorovými náboji, díry jsou urychleny ve směru pole, elektrony opačně. Mezi opačnými póly solárního článku se objeví elektrické napětí a po zapojení do elektrického obvodu teče obvodem stejnosměrný elektrický proud. Schematické znázornění funkce solárního článku můžeme vidět na

obr. 1. Solární článek se tak stává zdrojem elektrické energie. Ve tmě se článek chová jako polovodičová dioda.



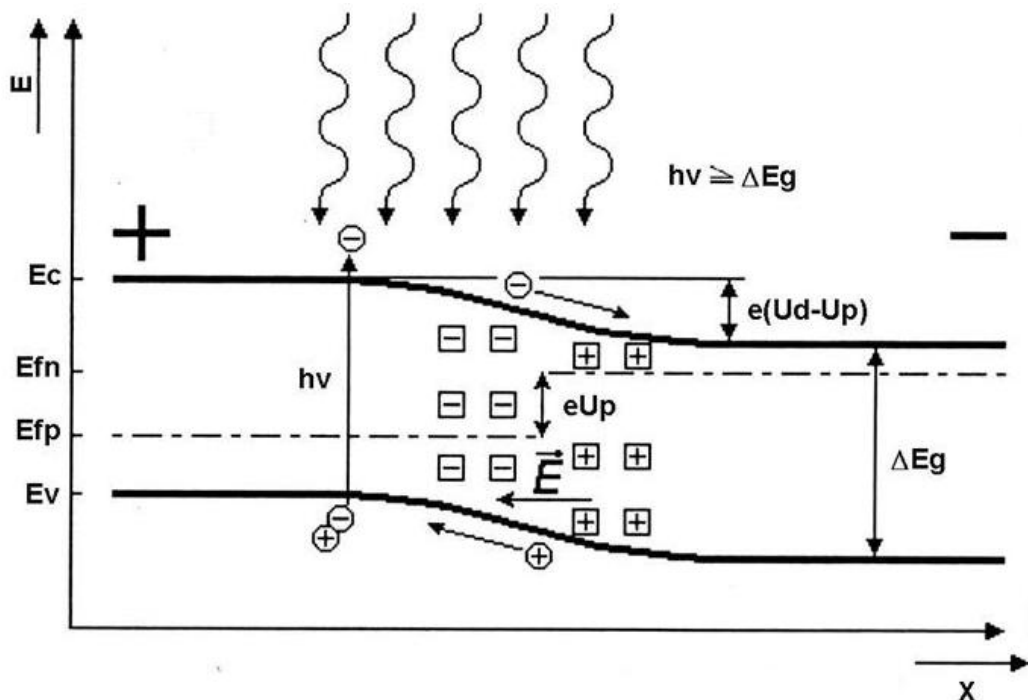
Obr. 1 Schematické znázornění funkce solárního článku

Na obr. 2 je znázorněn pásový model při osvětlení solárního článku, který není zapojen v elektrickém obvodu. Dopadající fotony poruší rovnováhu nebo lépe řečeno ustaví jinou rovnováhu. Zvýší se generace párů elektron - díra, v oblasti přechodu jsou generované elektrony a díry jsou urychlovány v elektrickém poli E ve směru šipek (v závěrném směru to odpovídá proudu tekoucímu zdrojem od záporného pólu ke kladnému), strana typu P se nabíjí kladně a strana typu N se nabíjí záporně.

Potenciálová bariéra U_D se sníží, Fermiho hladiny v oblastech typu P a typu N se rozdělí, a rozdíl mezi nimi odpovídá fotovoltaickému napětí U_P , které je rovněž vyznačeno. Toto napětí může maximálně odpovídat vyrovnání původního zakřivení pásů, což u křemíkových solárních článků bývá kolem $U_P \approx 0,6$ V. Další zvýšení intenzity ozáření článku už fotovoltaické napětí naprázdno nezvýší, neboť fotovoltaické napětí se vykompenzuje s opačným napětím prostorových nábojů na přechodu PN a už nedochází k oddělování směru pohybu generovaných elektronů a děr v oblasti přechodu PN.

Problém lze chápat i tak, že snížení potenciálové bariéry U_D při osvětlení vede ke zvýšení rekombinačního toku elektronů do polovodiče typu P a rekombinačního toku děr opačně, a tak se kompenzuje zvýšení difúzního proudu v důsledku oddělování

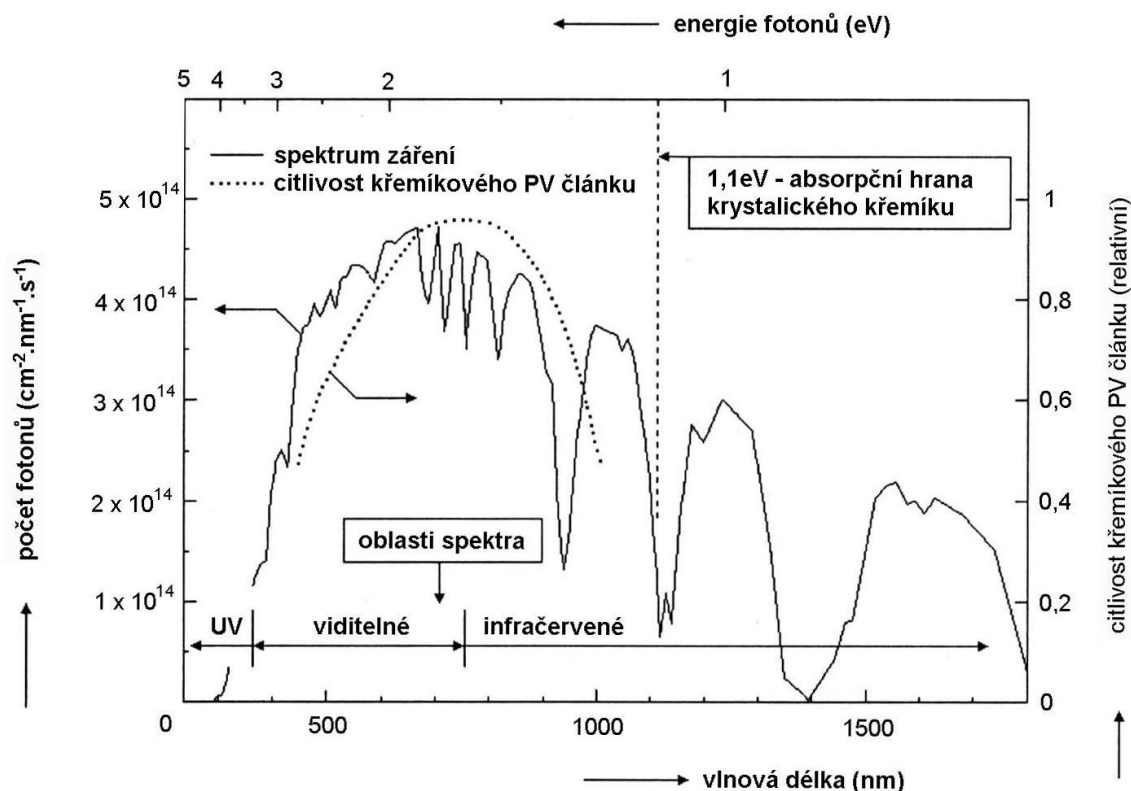
generovaných elektronů a děr v elektrickém poli E mezi vázanými prostorovými náboji v oblasti přechodu PN. Vzniklé fotovoltaické napětí se tak podílí na ustavení nové rovnováhy.



Obr. 2 Model energetických hladin PV článku a fotovoltaické přeměny energie [1]

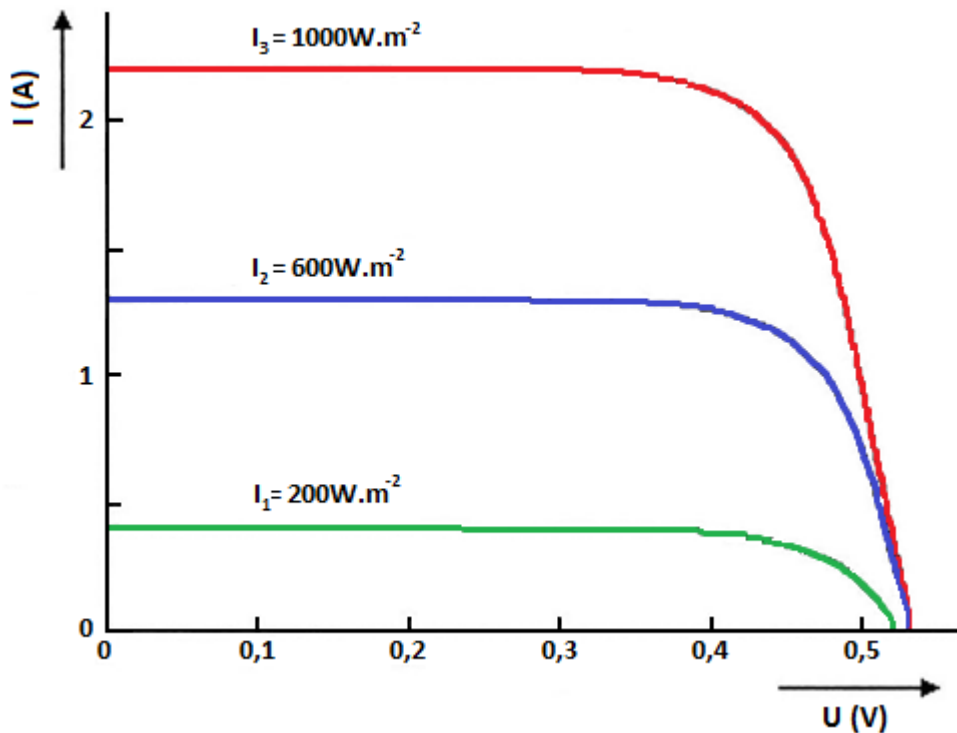
Zapojíme-li osvětlený solární článek do elektrického obvodu, vodivé spojení obou pólů znamená snížení fotovoltaického napětí (v tomto případě elektromotorického napětí zdroje) a tím i změnu v zakřivení pásů vedoucí k opětovnému zvýšení potenciálové bariéry $U_D - U_P$. Tím se sníží rekombinační proud a převládne termální proud v důsledku oddělování generovaných elektronů a děr v elektrickém poli E mezi vázanými prostorovými náboji. Součet obou proudů tedy už nebude nulový a výsledný proud bude dodáván do elektrického obvodu solárním článkem jakožto zdrojem.

Protože šířka zakázaného pásu krystalického křemíku je $\Delta E_G \approx 1,1$ eV, jsou krystalické křemíkové solární články citlivé na fotony viditelného a blízkého infračerveného záření s vlnovými délkami kratšími než zhruba $\lambda < 1100$ nm. Na obr. 3. je spektrum slunečního záření po průchodu atmosférou s vyznačením vlnových délek a energií fotonů i s vyznačením šířky zakázaného pásu křemíku neboli absorpční hrany.

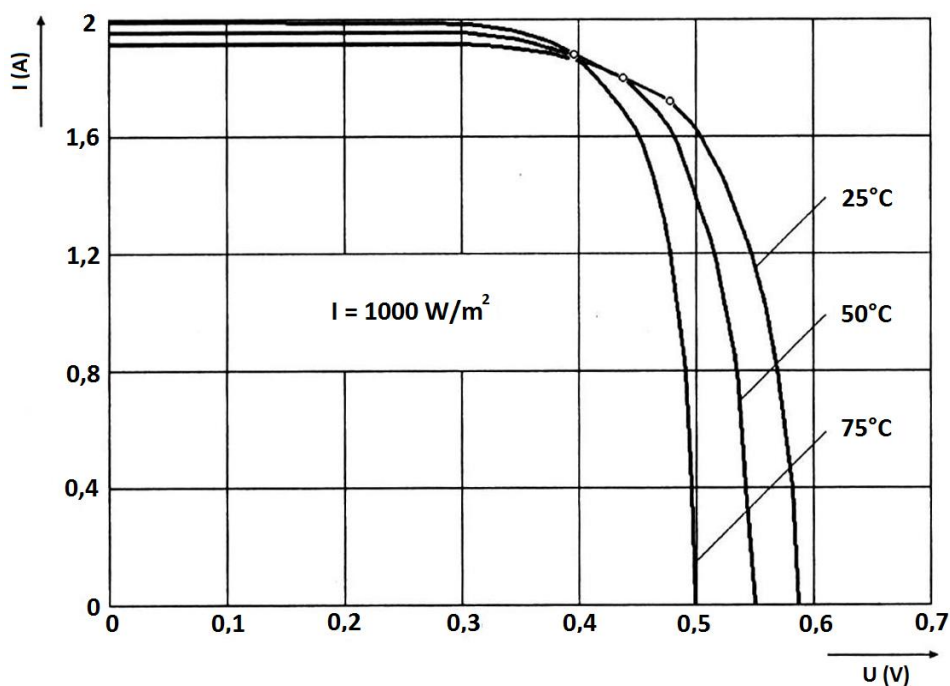


Obr. 3 Spektrum slunečního záření po průchodu atmosférou s vyznačením vlnových délek a energií fotonů i s vyznačením šířky zakázaného pásu. Pro názornost je vyznačena i typická citlivost křemíkového PV článku [2]

Na obr. 4 jsou voltampérové charakteristiky osvětleného solárního článku na bázi krystalického křemíku zapojeného do elektrického obvodu. Jednotlivé křivky odpovídají různým intenzitám osvětlení. Průsečíky křivek se svislou osou udávají proud nakrátko, odpovídají tedy "nulovému" odporu ve vnějším obvodu neboli zkratování obou pólů solárního článku. Roste-li odpor zátěže, pohybujeme se od těchto bodů po křivkách směrem rostoucího napětí (doprava). Průsečíky křivek s vodorovnou osou udávají napětí naprázdno, odpovídají tedy "nekonečnému" odporu ve vnějším obvodu neboli rozpojení obvodu. Optimální zátěž solárního článku má takový odpor, při kterém pracovní bod leží v tom bodě volt-ampérové charakteristiky, ve kterém součin napětí a proudu má největší hodnotu. Tehdy článek poskytuje maximální možný výkon.



Obr. 4 Voltampérové charakteristiky osvětleného solárního článku při různých intenzitách osvětlení a při konstantní teplotě $t = 50^\circ\text{C}$

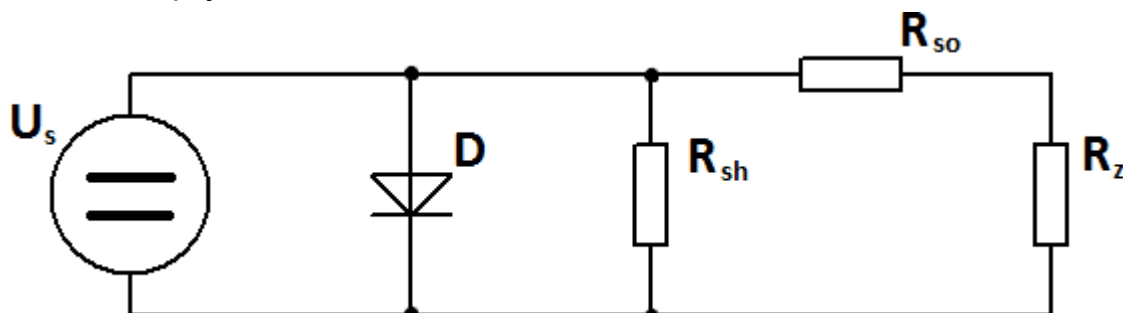


Obr. 5 Voltampérové charakteristiky osvětleného solárního článku na bázi krystalického křemíku při různých teplotách při konstantní intenzitě osvětlení $I = 1000 \text{ W/m}^2$ [2]

Obr. 5 ukazuje, jak se voltampérové charakteristiky osvětleného solárního článku na bázi krystalického křemíku mění s teplotou při konstantní intenzitě osvětlení. Je vidět, že s rostoucí teplotou roste proud nakrátko, ale klesá napětí naprázdno. Při rostoucí teplotě klesá maximální výkon dodávaný článkem při konstantní intenzitě osvětlení, a tak klesá i účinnost fotovoltaické přeměny energie. [2]

2.1 Náhradní model solárního článku

Solární článek můžeme popsat pomocí vlastností klasického PN přechodu a náhradního zapojení



Obr. 6 Náhradní model solárního článku

Solární článek lze popsat pomocí vztahu pro výpočet celkové hustoty proudu J , stejně jako klasický PN přechod,

$$J = J_n + J_p = q \left(\frac{D_n}{L_n} \cdot n_{p0} + \frac{D_p}{L_p} \cdot p_{n0} \right) \cdot \left(e^{\frac{qU}{kT}} - 1 \right) \quad (1)$$

kde J_n a J_p je proudová hustota elektronů a děr,

D_n a D_p jsou difúzní koeficienty elektronů a děr,

L_n a L_p je difúzní délka elektronů a děr,

n_{p0} a p_{n0} je koncentrace elektronů a děr v polovodiči v rovnovážném vztahu.

Tento vztah obvykle označujeme jako jednodiodový model solárního článku. Ovšem tento vztah zanedbává šířku depletiční vrstvy PN přechodu. Musíme tedy uvažovat tepelnou generaci párů, elektron – díra, v této oblasti a proto musíme vztah (1) rozšířit na vztah (2), který je obvykle označován jako dvoudiodový model solárního článku.

$$J = q \cdot \left(\frac{D_n}{L_n p_{p0}} + \frac{D_p}{L_p n_{n0}} \right) \cdot n_i^2 \cdot e^{\frac{qU}{kT}} + \frac{qd}{2\tau_{sc}} \cdot e^{\frac{qU}{2kT}} \quad (2)$$

Generačně – rekombinační složka proudu se však uplatňuje při malých napětích. Při vyšších napětích se projevuje prakticky pouze difúzní složka proudu. [10]

2.2 Generace a rekombinace

Každý fyzikální systém má snahu vracet se do rovnovážného stavu. Stejně je to i v polovodiči, v kterém došlo k narušení rovnovážných koncentrací elektronů a děr. Působením vnějších vlivů může dojít ke zvýšení generace párů elektron - díra. Podle toho o jaký typ vnějšího působení se jedná, mluvíme o generaci fotoelektrické (vlivem dopadu záření), termické (vlivem lokálního zahřátí) a injekci (vlivem injekce nosičů z kontaktu či přechodu). Výsledkem je porušení termodynamické rovnováhy, pro kterou platí vztah $n_0 \cdot p_0 = n_i^2$ a vznik tzv. nadbytečných nosičů náboje Δn a Δp , které mají snahu rekombinovat a vracet tak polovodič zpět do rovnovážného stavu. Rozeznáváme tři druhy rekombinace:

1. *přímou (mezipásovou) rekombinaci*, tj. přímý přestup elektronu z vodivostního do valenčního pásu, elektron ztrácí ionizační energii naráz. Podle typu uvolněné energie rozlišujeme:

- zářivou (fotonovou) rekombinaci – při přechodu se generuje foton,
- nezářivou (fotonovou) rekombinaci – při nezářivé rekombinaci dopadající foton předává svoji energii krystalové mřížce,
- nárazovou neboli Augerovu rekombinaci - srážka tří nosičů, z nichž dva rekombinují a současně odevzdají energii třetímu, který přejde na vyšší energetickou hladinu;

2. *nepřímou (postupnou) rekombinaci*, která se uskutečňuje přes hladiny defektů nebo příměsí (nazýváme je rekombinační centra nebo pasti) uvnitř zakázaného pásu a opět může nastat rekombinace zářivá, nezářivá a nárazová;

3. *povrchovou rekombinaci*, což je nepřímá rekombinace, která nastane u povrchu polovodiče. [4]

Rekombinuje-li elektron s dírou, odevzdává energii zhruba rovnu šířce zakázaného pásu. Injekcí majoritních nosičů do polovodiče opačné vodivosti při přiložení napětí na PN přechod v propustném směru se zvýší pravděpodobnost rekombinace a často k ní dochází. Při rekombinaci každého páru elektron – díra se uvolní určité kvantum energie, které se může buď vyzářit mimo krystal, nebo být absorbováno v krystalové mřížce, což se projeví zvyšující se teplotou krystalu. Pravděpodobnost zářivé rekombinace roste se zvětšující se šířkou zakázaného pásu. [4]

3 Materiály pro solární články

Solární články jsou vyráběny především z polovodičových materiálů speciálně upravených k využití vnitřního fotovoltaického jevu. O vhodnosti polovodičového materiálu rozhoduje šířka zakázaného pásu energií pro daný materiál. Tato hodnota by měla ležet v rozmezí od 1,1 eV do 1,7 eV. [11] Vyžaduje se také, aby se použité materiály vyznačovaly dlouhou dobou života a vysokou pohyblivostí minoritních nosičů náboje.

Z technologického pohledu se nejvíce využívají tři materiály, které se chovají jako polovodiče:

- křemík
- arsenid galia
- sulfid kademnatý

3.1 Křemík

Dnes je to nejvíce používaný materiál pro výrobu solárních článků. Využívají se tři druhy křemíku – polykrystalický a monokrystalický a amorfni na bázi tenkých vrstev. Křemík má několik výhod: je hojně zastoupený v zemské kůře, především ve formě oxidu křemičitého SiO_2 , proto ho můžeme relativně snadno a levně získat, dále neohrožuje životní prostředí a je to jeden s nejvíce prozkoumaných polovodičových materiálů.

3.1.1 Monokrystalický křemík (Si-mono)

Monokrystalický křemík získáváme pomocí Czochralského metody. U této metody se kusovým polykrystalickým křemíkem naplní kelímek z nejčistšího křemenného skla. V peci je zahřívám a po jeho roztavení se přivede do kontaktu s očkovacím křemíkovým krystalem, na jehož konci tuhne a tento krystal roste. Očkovací krystal je tažen svisle vzhůru při současném otáčení kolem svislé osy. Touto metodou bohužel nepřipravíme dokonale čistý monokrystal, protože je zde nevyhnutelný kontakt křemíkové taveniny s křemenným sklem kelímku a tím se dostávají do monokrystalu elektricky aktivní nečistoty, dále při této metodě vznikají bodové defekty mřížky a jejich shluky. Poslední částí této metody je rozřezání krystalu drátovou pilou na tloušťky 200 – 300 μm .

Další metody pro výrobu monokrystalického křemíku jsou:

- metoda zónového tavení
- dotování

Pro výrobu solárních článků musíme použít co nejčistší křemík. Bohužel čištění křemíku je velmi drahé, což způsobuje vysokou cenu těchto článků. Pro jejich výrobu můžeme použít i znečištěný křemík, který má nevhodné vlastnosti. Ve znečištěném křemíku jsou nečistoty velmi drobné a jsou rozptýlené po celém objektu. Elektrony a fotony poté do nich naráží a snižuje se účinnost článků a tím i jejich výkon. Postup pro využití špinavého křemíku se zakládá na tom, že nečistá křemíková tavenina se ochlazuje velmi pomalu. Tím se docílí toho, že nečistoty vykrystalizují ve větších kusech a nejsou tudíž roztroušeny tak hustě po objemu. To umožní lepší průchod elektronů a fotonů. Při pomalém ochlazování také vznikají větší krystaly křemíku, čímž se také zvyšuje účinnost.

Dnes se účinnost u běžně používaných monokrystalických solárních článků pohybuje mezi 15 – 18 %. Nejvyšší dosažená účinnost je 40 %. Bylo jí dosaženo v Národní laboratoři pro obnovitelnou energii v USA na článku s trojnásobným přechodem. Toto výrazné zvýšení účinnosti se přisuzuje zlepšení hodnot napětí naprázdno, zdokonalení optického návrhu článků, využívají širšího spektra vlnových délek, stejně jako pokroku v samotné křemíkové technologii i technologiích montáže.

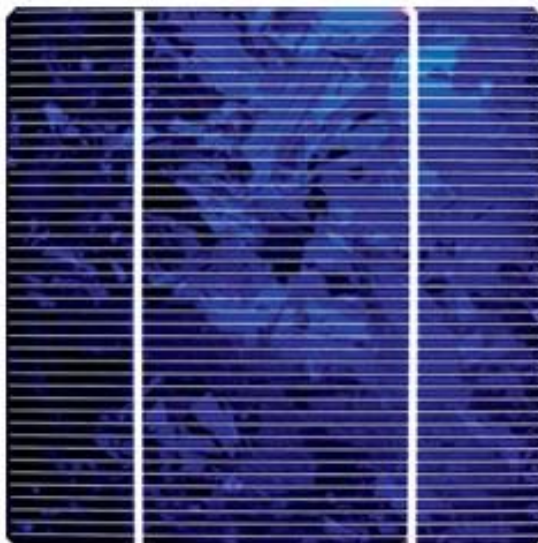
Monokrystalický křemík je výhodnější pro vyšší výkony solárních článků a při dostatečné intenzitě osvětlení má vyšší účinnost než článek polykrystalický.



Obr. 7 Monokrystalický křemíkový solární článek (přední a zadní strana)

3.1.2 Polykrystalický křemík (Si-poly)

Polykrystalický křemík se vyrábí litím do kokyl. Ingoty jsou pak vhodně povrchově opracovány a řezány na desky. Tak lze vyrobit méně kvalitní křemík a tím článek s nižší účinností. Metoda je však méně ekonomicky náročná a umožňuje použití méně kvalitních surovin. Polykrystalické články obecně vykazují nižší účinnost. Proto je cílem výroby křemík s co největšími krystaly.



Obr. 8 Multikrystalický solární článek

Polykrystalické články vykazují účinnost 13 až 16 %, která je daná především ztrátami na hranicích zrn. Proto se výrobci snaží zhotovovat polykrystalický křemík s co největšími krystaly.

Polykrystalický křemík je vhodnější pro menší výkony a jeho výhodou je poměrně dobrá účinnost i při nižší intenzitě osvětlení.

3.2 Arsenid galia (GaAs)

Po křemíku je to druhý nejpoužívanější materiál pro výrobu solárních článků. Velkou výhodou této sloučeniny je vyšší účinnost přeměny světla, která dosahuje 20 %. Tyto články mají zároveň vyšší odolnost proti tvrdému kosmickému záření. Další výhodou je, že při vyšších teplotách, kolem 100°C, neztrácejí svůj výkon. Mezi nevýhody patří mnohem vyšší cena a vyšší hustota než má krystalický křemík a také jsou články vyrobené z arseniku galia podstatně křehčí než křemíkové. Články vyrobené z arsenidu galia využívají oblast světelného spektra směrem k červené barvě. Účinnost těchto článků je okolo 21 %.

3.3 Tenkovrstvé solární články

V dnešní době probíhá intenzivní vývoj tenkovrstvých solárních článků, například z amorfního křemíku. K výrobě těchto článků je potřeba méně polovodičového materiálu a mohou tedy být podstatně levnější. Úspora materiálu je patrná při porovnání tloušťky krystalického článku, jehož tloušťka je asi 300 μm , a tenkovrstvého článku, který má tloušťku asi 1 μm . Nevýhodou těchto článků je nižší účinnost, okolo 10 %.

Pro výrobu tenkovrstvých solárních článků je nezbytný materiál s velkým absorpčním koeficientem a technologie výroby, umožňující realizovat vysoce stabilní

tenké vrstvy s vysokou účinností fotovoltaické přeměny. Nejčastějším materiálem pro výrobu je amorfni křemík, někdy v kombinaci s mikrokystalickým křemíkem. Dále se vyrábějí z CdTe (telurid kademnatý) a mohou být realizovány na ohebných fóliích, čím se usnadní některé aplikace.

3.3.1 Tenkovrstvý amorfni křemík

Tenkovrstvá technologie napařování nebo naprašování amorfniho křemíku přinesla významný pokrok z hlediska spotřeby křemíku. Ujaly se především články na bázi hydrogenizovaného amorfniho křemíku, protože mají příznivé optoelektronické vlastnosti. Šírku zakázaného pásu mají 1,7 eV a součinitel absorpce ve viditelné části větší než 10^{-6} m^{-1} . Vzhledem k vysokému absorpčnímu koeficientu postačuje k využití spektra slunečního záření vrstva 1 μm . Při použití krystalického křemíku musíme použít vrstvu 200 μm . Tenké vrstvy se nanášejí na běžně dostupné materiály jako je sklo nebo ocel.

Jejich nevýhodou je nízká účinnost a to pouze 5 – 8 %, která klesá postupem času.

3.3.2 Telurid kademnatý (CdTe)

Díky svým vlastnostem je považován za velmi nadějný materiál pro fotovoltaiku. Jeho šírka zakázaného pásu je 1,5 eV při teplotě 25°C a má velmi vysoký činitel absorpce. Proudová hustota J_{SC} dosahuje až 26 A/cm², napětí naprázdno U_{OC} až 850 mV. Typická struktura CdTe článků se skládá z n-CdS a p-CdTe heteropřechodů o tloušťce 1,5 μm nanesených na skleněném substrátu.

CdTe články nacházejí uplatnění pro napájení malých zařízení především pro jejich nízkou cenu.

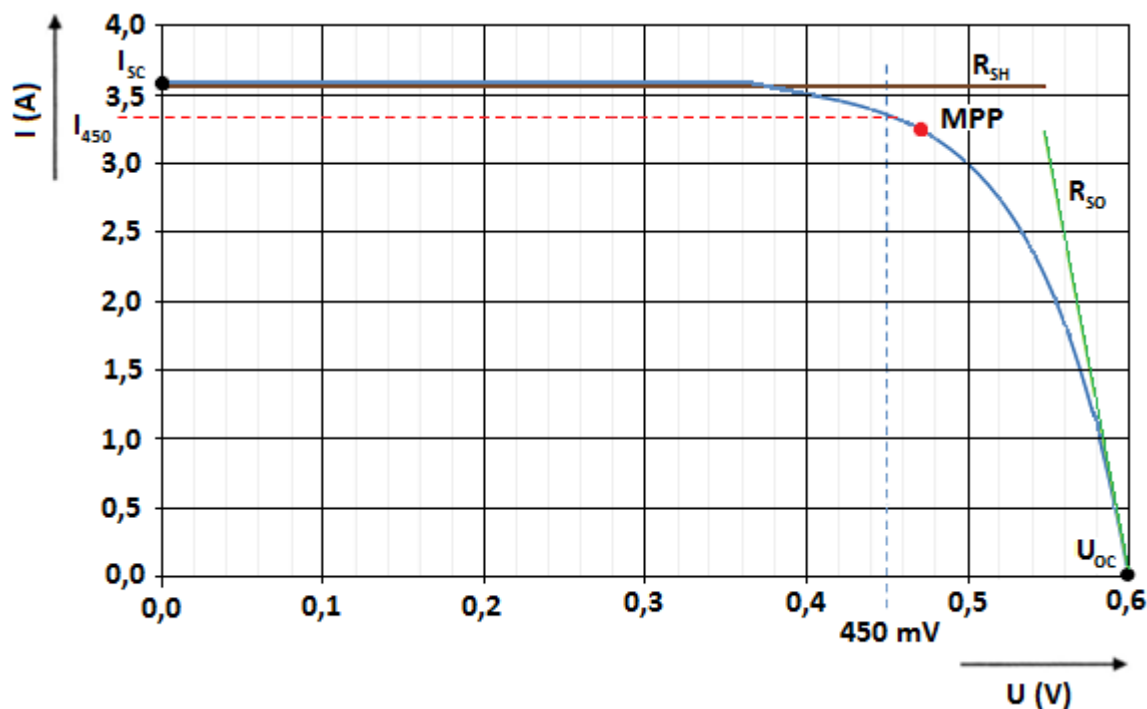
3.4 Budoucnost materiálů pro výrobu solárních článků

U poslední představené technologie je využita povrchová vrstva na bázi průhledného polymeru, na kterém jsou v pravidelném rozestupu rozmístěny miniaturní nanodrátky z monokrystalického křemíku. Tloušťka jednotlivých nanotyčinek je od 0,5 – 2 μm s délkou 30 – 200 μm , pro porovnání lidský vlas má průměr okolo 50 – 90 μm . Tento křemíkový “les” nanodrátků je vysazen na ohebném umělohmotném, maximálně 0,2 mm tenkém filmu, celá vrstva se tak může přizpůsobit nerovnému povrchu.

Výhoda těchto krátkých nanovláken je v tom, že absorbují záření po celé své délce, čímž se výrazně zvýší účinná plocha. Navíc v porovnání s kompaktní destičkou solárního článku vyžadují mnohem méně křemíku, dokonce jen setinu při úspěšnějších variantách.

4 Přehled elektrických parametrů a vzorců užívaných ve fotovoltaice

Parametry solárních článků se popisují voltampérovou charakteristikou, která udává závislost proudu na napětí. Z této charakteristiky se dají odečíst základní parametry solárních článků.



Obr. 9 Voltampérová charakteristika s vyznačenými parametry

Proud nakrátko (I_{sc}) - tento proud je získáván při $U = 0$ V, a je roven proudu generovaného světlem I_L , jestliže je sériový odpor $R_s = 0 \Omega$. Je to maximální proud, který může článek dodávat při daném osvětlení. Je závislý na intenzitě osvětlení, velikosti ozářené plochy, teplotě. Největší běžně dostupné články mají při plném osvětlení proud nad hranicí 6 A.

Napětí naprázdno (U_{oc}) - je získáváno při $I = 0$ A, je to napětí na svorkách článku bez připojené zátěže. Je maximálním napětím článku při dané intenzitě osvětlení a teplotě. U monokrystalického článku je cca 0,6 V.

Pracovní bod - je bod na voltampérové charakteristice, ve kterém solární článek momentálně pracuje. Poloha pracovního bodu je závislá na vlastnostech spotřebiče. Zpravidla se snažíme, aby byla poloha pracovního bodu totožná s polohou MPP.

Leží-li pracovní bod v režimu nakrátko nebo naprázdno, nedodává článek žádný výkon.

Na polohu pracovního bodu má výrazný vliv teplota. Při déle trvajícím slunečním intenzitě nebo zhoršených podmínkách chlazení článku (bezvětrí), kdy teplota vzduchu dosahuje 40°C, dochází ke zvýšení povrchové teploty článku až na 80°C. Při takto vysokých teplotách dochází ke změně elektrických vlastností článku, která vede ke snížení svorkového napětí na zatěžovací charakteristice. Pokles svorkového napětí způsobí snížení dodávaného výkonu do zátěže. Jelikož k tomuto jevu dochází právě při nejvyšší sluneční intenzitě, může dojít až ke ztrátám 75 % z dosažitelné denní výroby článku. Ke kompenzaci tohoto jevu může sloužit optimalizační zařízení, které pracuje na principu řízení optimálního odporu zátěže. [6]

Proud při napětí 450mV (I_{450}) - Proud I_{450} je proud protékající článkem při napětí 450 mV. Parametr je důležitý pro první třídění do jednotlivých výkonnostních skupin.

Maximální proud (I_M) – proud, při kterém článek dodává maximální výkon

Maximální napětí (U_M) – napětí, při kterém článek dodává maximální výkon

Vnitřní odpor (R_M) - vnitřní odpor článku při maximálním výkonu

$$R_m = \frac{U_m}{I_m} \quad (3)$$

Sériový odpor (R_{SO} – *Serial Resistance*) - příliš vysoká hodnota sériového odporu způsobuje, že svorkové napětí solárního článku bude tím menší, čím bude větší úbytek napětí na sériovém odporu. Je ovlivněn především odporem substrátu, kontaktů a přechodů. [11]

Paralelní odpor (R_{SH} – *Shunt Resistance*) - na tento druh odporu působí hlavně ztráty na hranách článků. Důležité jsou také krystalové defekty a precipitáty cizích příměsí v oblasti přechodu. Pokud je hodnota tohoto odporu příliš nízká, značí to vadný článek. Tento článek se chová jako by byl uvnitř zkratovaný. [11]

Sériový a paralelní odpor nám dávají poznatek o kvalitě solárního článku.

Reflexivita (R) – vypočítá se z indexu lomu polovodiče podle vztahu:

$$R = \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2 \quad (4)$$

Maximální výkon (P_M) - je to maximální výkon, který může článek dodávat. Bod P_M je přibližně uprostřed ohybu voltampérové charakteristiky. Zařízení pro sledování MPP - maximálního pracovního bodu se snaží přizpůsobovat parametry zátěže, pro využití maximálního výkonu článků, a určíme ho pomocí rovnice (5). Vztah pro výpočet:

$$P_M = |U_M \cdot I_M| \quad (5)$$

Intenzita v místě měření (P_D) - standardní použitý zdroj má 1000 W/m^2

Maximum Power Point - MPP je bod na voltampérové charakteristice s maximálním výkonem. Tento bod se udává prostřednictvím napěťové a proudové souřadnice s indexem m.

Účinnost světelné konverze článku EEF (Energy Efficiency Factor) - Účinnost přeměny slunečního záření solárního článku je dána vlastnostmi materiálu, ze kterého je článek vyroben. Tento materiál ovlivňuje spektrální citlivost (rozložení spektrální citlivosti) článku na dopadající záření. To znamená, že článek využívá energii různých vlnových délek s různou účinností. Monokrystalické články mají účinnost zpravidla v rozsahu 15 až 18 %; polykrystalické v rozsahu 13 až 16 %.

Účinnost solárního článku je definována následujícím vztahem:

$$\eta = \frac{P_m}{P_{\text{rad}}} = \frac{P_m}{E \cdot A_C} \quad (6)$$

kde P_{rad} výkon dopadajícího záření

E intenzita osvětlení při standardizovaných zkušebních podmínkách

A_C plocha solárního článku (m^2)

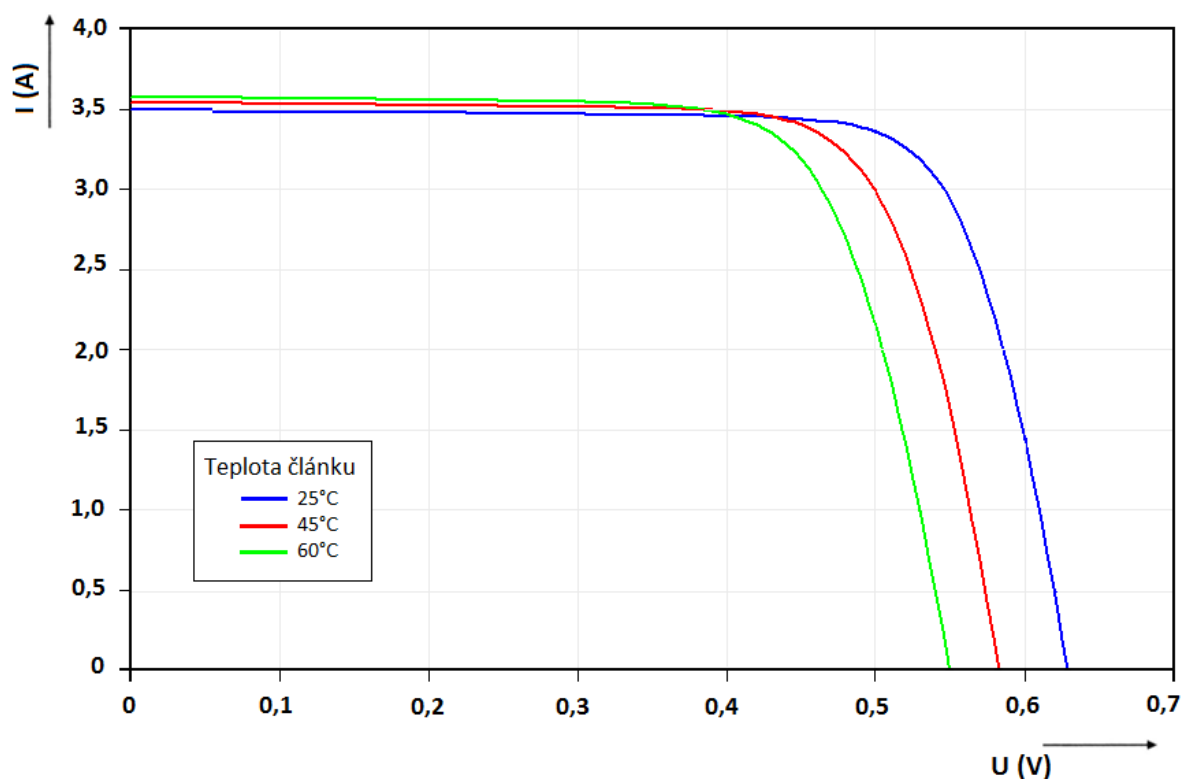
Činitel plnění (FF - Fill Factor) - Parametr FF udává poměr mezi maximálním výkonem a výkonem daným napětím naprázdno a proudem nakrátko. Je závislý na kvalitě kontaktů, morfologii materiálu a odporu aktivní polovodivé vrstvy. Tento poměr se uvádí jako tzv. činitel plnění a je definován následujícím vztahem:

$$FF = \frac{U_m \cdot I_m}{U_{OC} \cdot I_{SC}} = \eta_{ef} \quad (7)$$

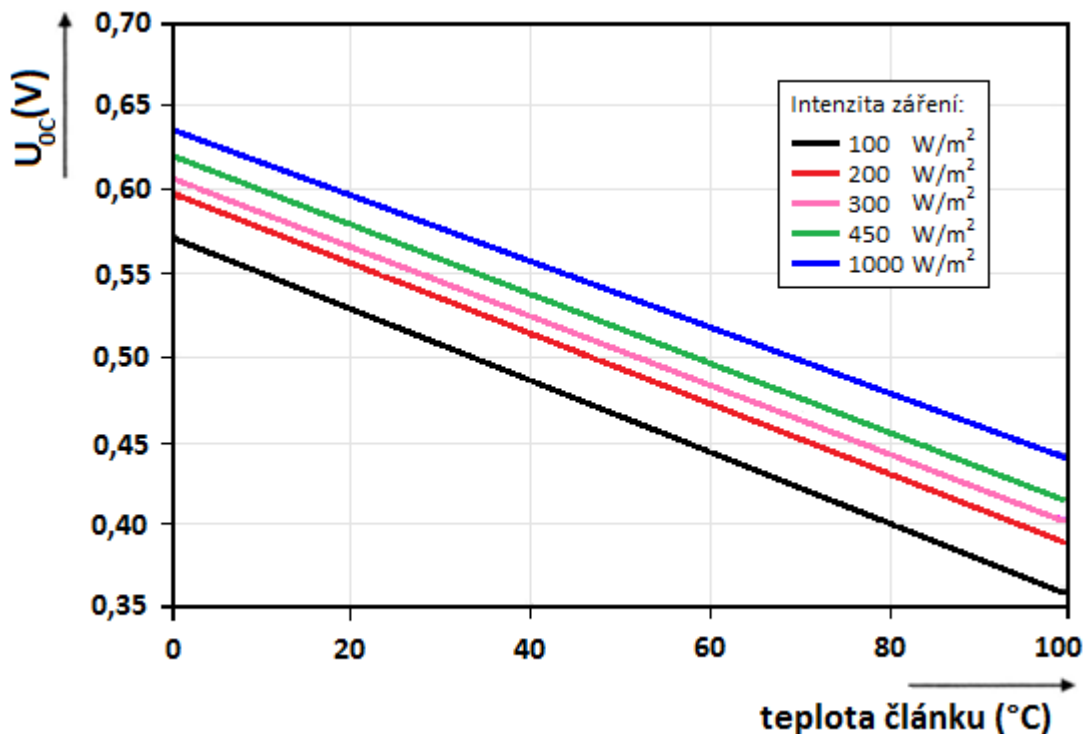
4.1 Vliv teploty na elektrické parametry solárních článků

Pokud se změní teplota solárního článku, projeví se to nejvíce na změně hodnoty napětí naprázdno U_{OC} . U krystalického křemíku je dle teorií pokles napětí naprázdno U_{OC} o 0,4 % s každým zvýšením teploty o 1°C.

Snížením napětí naprázdno se sníží i výkon solárního článku a tím i účinnost. Pokles účinnosti článku v závislosti na jeho teplotě pro různé hodnoty intenzity záření můžeme vidět na obr. 11, tyto parametry jsou měřeny na monokrystalickém solárním článku vyrobeném firmou Solartec s.r.o.



Obr. 10 Vliv teploty na VA charakteristiky solárního článku při intenzitě osvětlení 1000 W/m^2 [13]



Obr. 11 Hodnoty U_{oc} solárního článku v závislosti na jeho teplotě pro různé intenzity záření [13]

Vlivem teploty je tedy účinnost solárních článků vyšší během zimy než během léta. Účinnost článků se také mění v průběhu dne, v létě mohou dosahovat teplotního rozdílu až 50°C .

Ostatní parametry článků se také mění se změnou teploty, ale jejich vliv již není tak velký. Mezi tyto parametry patří proud nakrátko I_{sc} , který se vzrůstající teplotou mírně zvyšuje, což je patrné z VA charakteristiky na obr. 10. Dále hodnota činitele plnění, který se vzrůstající teplotou mírně klesá. Hodnota sériového odporu se zvyšující se teplotou lineárně zvyšuje a hodnota paralelního odporu mírně lineárně klesá.

Při aplikacích solárních článků se jejich teplota při provozu zvyšuje, a proto musíme zajistit jejich chlazení, abychom omezili jejich zahřívání, např. cirkulací okolního vzduchu. [13]

5 Měřicí metody pro analýzu solárních článků

Pro analýzu solárních článků se využívá několik druhů metod. Pomocí těchto metod můžeme zjišťovat elektrické vlastnosti a parametry přechodů, dalšími můžeme sledovat defekty materiálu vyrobených solárních článků.

5.1 Měření elektrických vlastností

5.1.1 Solární simulátor

Solární simulátor se používá pro měření elektrických vlastností sériově vyrobených křemíkových solárních článků. Toto zařízení osvětluje článek zářením o intenzitě 1000 W/m^2 jehož složení odpovídá slunečnímu spektru AM 1,5 při teplotě 25°C . Tímto simulátorem je zajištěné rychlé měření všech důležitých elektrických parametrů, které jsou zobrazeny do grafu pomocí VA charakteristiky.

5.1.2 VA charakteristika

Další metoda pro měření je měření VA charakteristiky solárních článků ve tmě. Za použití softwarového nástroje EasyPlot je možné měřit VA charakteristiky pasivních elektrotechnických součástek. V případě solárního článku se jedná o PN přechod. Touto metodou můžeme lehce proměřit článek v propustném i závěrném směru.

5.2 Měření materiálových vlastností a defektů

5.2.1 LBIC (Light Beam Induced Current)

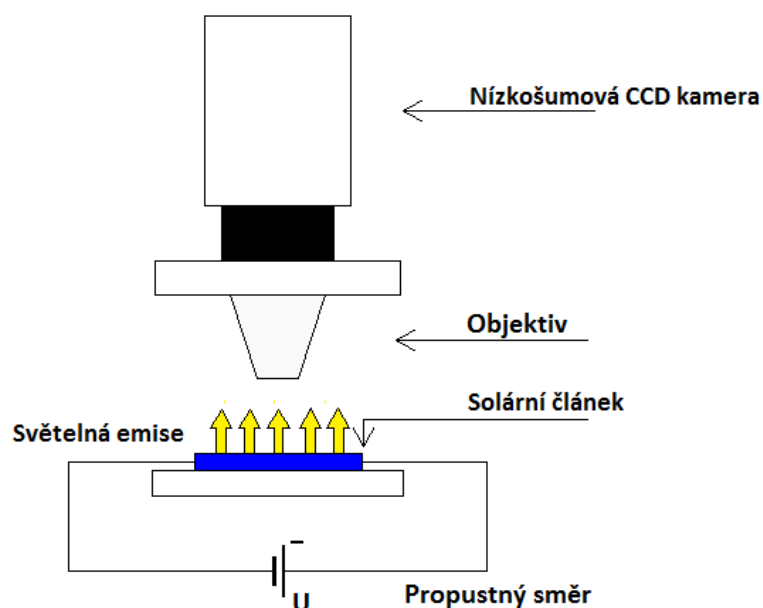
Tato metoda je jednou z nejpoužívanějších. Při této metodě se fokusovaným laserovým paprskem světla ozařujeme postupně celý článek v osách XY. Výsledkem je proudová mapa, která popisuje chování článku. Z této mapy lze vyčíst větší část lokálních defektů. Nevýhodou této metody je poměrně dlouhá doba měření, které může trvat i několik hodin.

Přesnost proudových map závisí především na druhu použitého laseru (hloubka vniku) a na kroku (míra přesnosti), s jakým se daný vzorek analyzuje.

5.2.2 Elektroluminiscence

Tato metoda odstraňuje nevýhodu metody LBIC, jejíž nevýhoda je dlouhá doba měření. Tato intenzivně se zkoumá teprve pár let. Tato metoda vyhodnocuje defekty pomocí metody elektroluminiscence, která má expozici pouze pár sekund. Měření vychází z reciproční funkce solárního článku, v němž po připojení na zdroj napětí nebo proudu, dochází k zářivé rekombinaci elektronů a děr, a tím ke světelné emisi. Záření je snímáno pomocí nízkošumové CCD kamery.

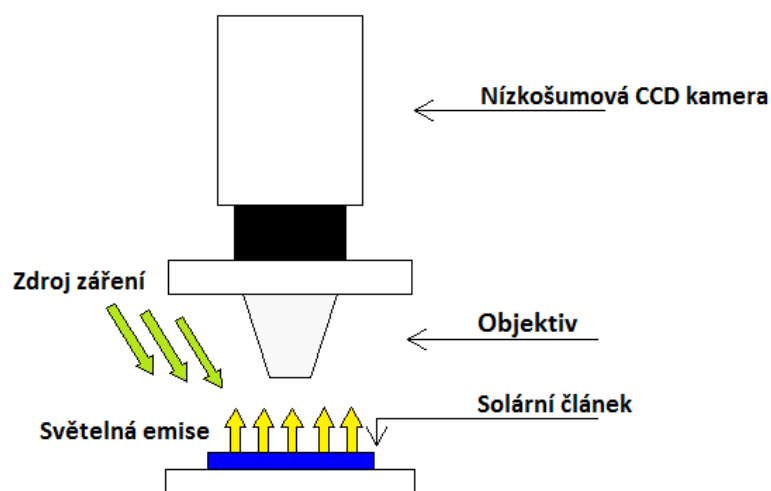
Defekty na solárních článcích nevyzařují žádné světlo a jsou tedy na snímcích snadno pozorovatelné. Tato metoda nemusí být použita pouze na solární články, ale můžeme ji použít i na sestavené panely.



Obr. 12 Schéma měření metodou elektroluminiscence

5.2.3 Fotoluminiscence

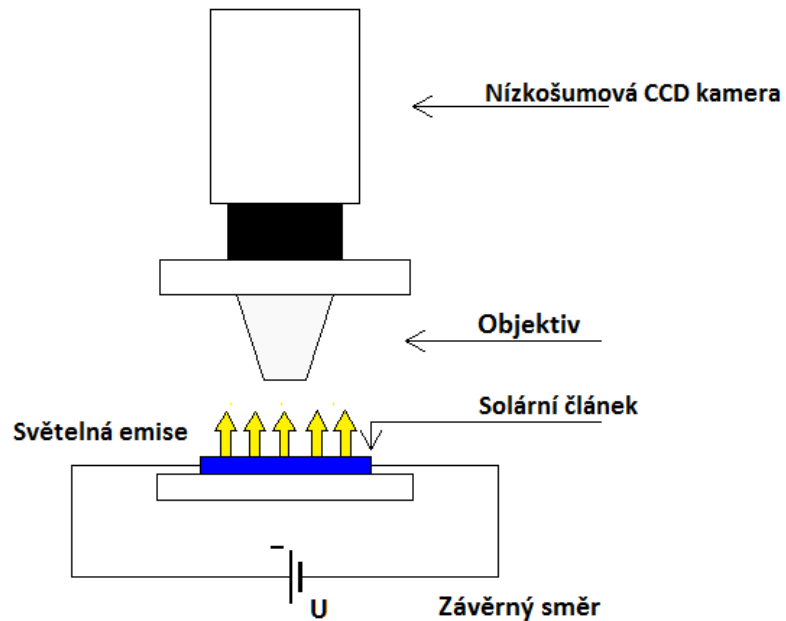
Metoda fotoluminiscence je podobná metodě elektroluminiscence. Pro tuto metodu můžeme použít stejné zařízení jako pro metodu elektroluminiscence. Při fotoluminiscenci je nutné pro zářivou rekombinaci energii dodávat vnějším světelným zdrojem. Článek je ozařován světelným zařízením o určité vlnové délce a tato složka musí být poté odfiltrována pomocí příslušného filtru, který je umístěn před CCD kamerou.



Obr. 13 Schéma měření metodou fotoluminiscence

5.2.4 Luminiscence mikroplazmy

Pro tuto metodu můžeme použít stejné měřicí pracoviště jako pro metodu elektroluminiscence. Úprava spočívá v opačné polaritě napájecího napětí. U této metody dochází v solárním článku vlivem závěrného proudu ke vzniku luminiscenčních mikroplazem. Na jejich vzniku se podílí nedokonalosti v krystalické mřížce PN přechodu. Nejčastěji jsou reprezentovány bodovými poruchami, které ovlivňují závěrný proud a velikost průrazného napětí přechodu. Nejvíce se tyto poruchy vyskytují na hranách solárního článku.

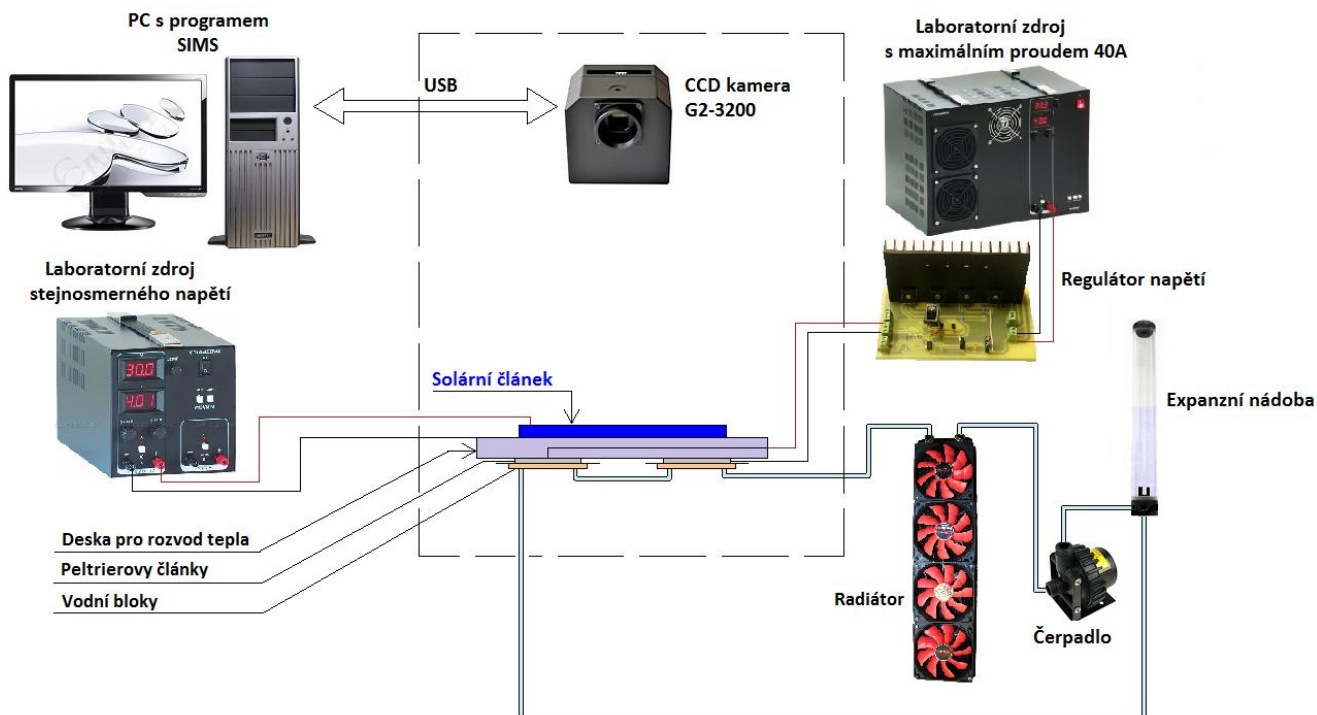


Obr. 14 Schéma měření metodou luminiscence mikroplazmy

6 Praktická část

6.1 Inovace pracoviště

Aby bylo možné proměřit teplotní závislosti defektů solárních článků, bylo nutné inovovat stávající pracoviště. Budeme používat nízkošumovou CCD kameru G2-3200, která je připojena k počítači pomocí USB portu a komunikuje pomocí komunikačního programu SIMS, který je dodáván ke kameře. Solární článek bude připojen k laboratornímu zdroji stejnosměrného napětí pomocí kontaktního pole. Jako zadní kontakt bude použita bronzová deska s rozměry 30x30x1 cm, která bude zároveň sloužit pro rovnoměrné rozložení teploty. Na horní straně této desky bude po celém obvodu vyfrézována drážka, do které se bude vlévat tekutý dusík pro rychlejší ochlazení plochy. Pro ohřev a chlazení solárního článku bude využito Peltierových článků, tyto Peltierovy články budou připevněny pomocí montážních spon na spodní straně bronzové desky. Aby bylo možné regulovat teplotu těchto článků, byl sestaven regulátor napětí. Odvod tepla z Peltierových článků nám zajistí okruh vodního chlazení. Vše bude uzavřeno ve světlotěsné komoře, aby okolní světlo neovlivňovalo výsledky měření.



Obr. 15 Blokové schéma měřicího pracoviště

6.1.1 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. Teče-li proud z vnějšího zdroje daným spojem 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. [15]

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.



Obr. 16 Peltierův článek

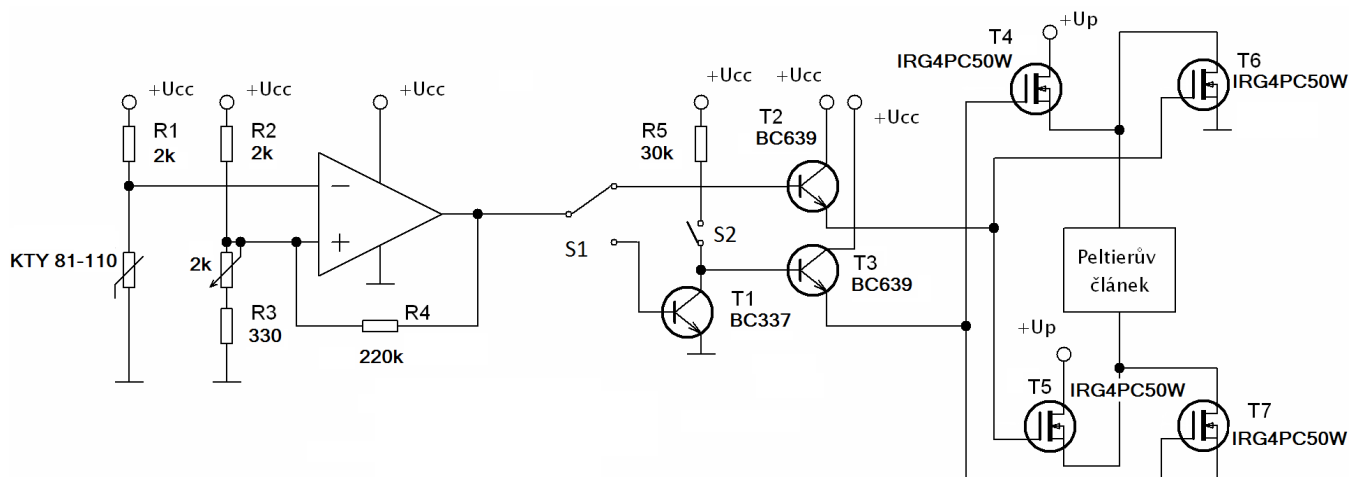
6.1.2 Regulátor napětí

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.



Obr. 17 Regulátor napětí

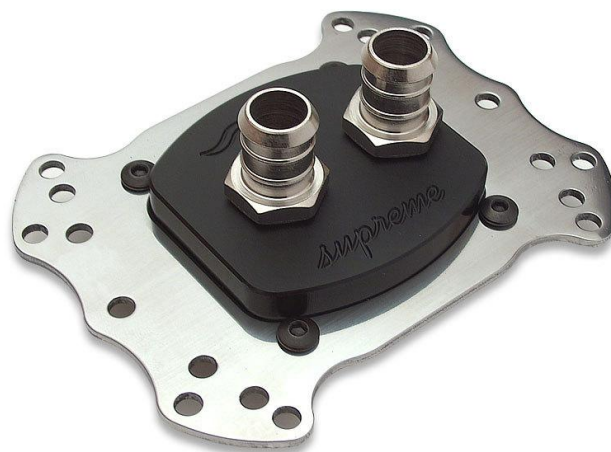
Při konstrukci regulátoru a následném testování bylo zjištěno, že navržená deska plošného spoje byla špatně dimenzovaná. Při vyšším zatížení došlo k přerušení vodivých cest ve výkonové části obvodu z důvodu velkého proudu. Proto byl pro testování do zbylých cest ve výkonové části vpájen drát, který umožnil vyšší proudové zatížení. Následně byla navržena deska plošného spoje s vyšší proudovou zatížitelností. Byla navržena deska, která má silnější cesty u výkonové části regulátoru a zemní kontakt byl vylit polygonem pro lepší rozložení proudu. Pro výrobu desky bude použit kvalitnější fotocuprexid se silnější vrstvou mědi, 70 μm . Teoretické proudové zatížení je 30 A. Pro zlepšení proudového zatížení bude celá DPS pocínována a do výkonové oblasti budou vpájeny pevné měděné vodiče.

6.1.3 Vodní chlazení

Jak již bylo napsáno výše, 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 60°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, které se vyznačují nejlepším chladícím výkonem na trhu, obr. 18.



Obr. 18 Vodní blok EK Water Block Supreme

Na spodní straně těchto bloků bude nanесena teplovodivá pasta, která zaručí dokonalý přenos tepla mezi ohřívanou stranou Peltierova článku a vodního bloku.

Další důležitou částí vodního chlazení je čerpadlo. Bylo použito čerpadlo Laing D5 12V, která má maximální průtok 1500 l/m^3 a patří mezi nejvýkonnější čerpadlo pro tyto typy vodního chlazení.



Obr. 19 Čerpadlo Laing D5 12V

Dále, aby nedocházelo k ohřevu chladicí kapaliny, byl do okruhu vodního chlazení zapojen radiátor Black ICE Radiator Extreme 480, na který budou uchyceny čtyři ventilátory o rozměrech $120 \times 120 \text{ mm}$, které nám zvýší chladicí výkon radiátoru.



Obr. 20 Radiátor - Black ICE Radiator Extreme 480

Jako chladicí kapalina bude použita destilovaná voda se speciální příměsí, která nám zaručí, že se v chladicím okruhu nebude usazovat vodní řasa a nebudou oxidovat měděné části. Tato kapalina bude uchována v expanzní nádobě EK RES 400 s obsahem 500 ml.



Obr. 21 Expanzní nádoba EK RES 400

6.2 Charakteristika defektů solárních článků

Defekty u monokrystalických solárních článků vznikají jak při samotné výrobě křemíku, tak při následném technologickém procesu výroby článků.

Defekty můžeme rozdělit do dvou skupin:

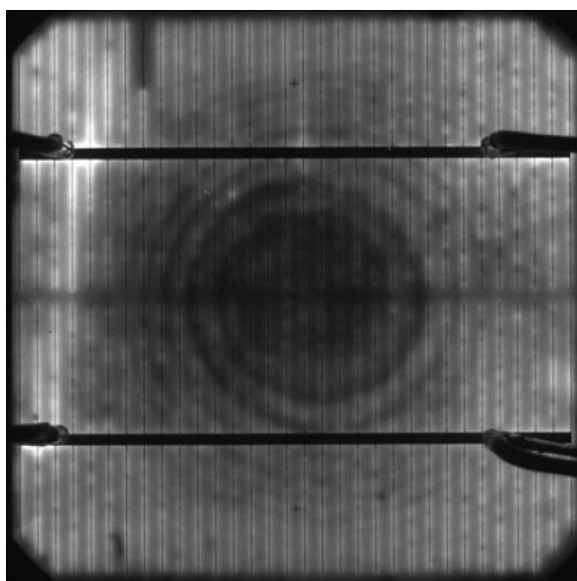
- Materiálové defekty (Grow Defects)
- Procesní defekty (Processing Induced Defects)

Obě skupiny defektů jsou velice rozsáhlé, a proto se zaměřím především na chyby vyskytující se nejčastěji při metodách elektroluminiscence a luminiscence mikroplazmy.

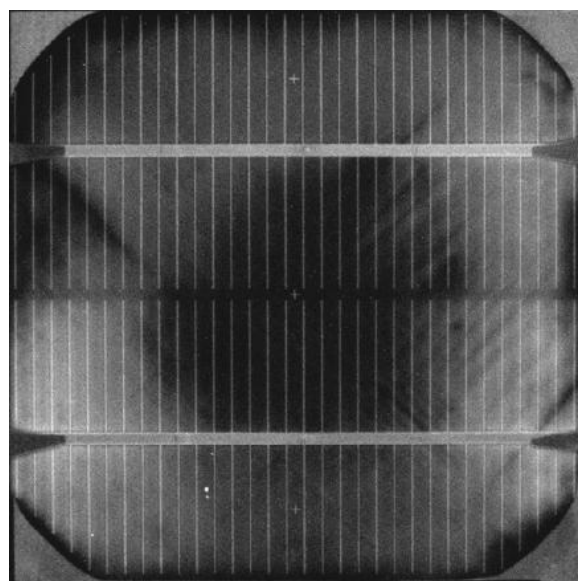
6.2.1 Materiálové defekty (Grow Defects)

Mezi nejznámější materiálové defekty patří tzv. vírové defekty (Swirl Defects) a defekty pnutí v křemíku (Solar Stress).

Vírový defekt je vada, která má tvar soustředných kružnic, jež vznikají při procesu výroby křemíkového ingotu (CZ Si). Tyto kružnice vznikají z důvodu injekce příměsí (např. kyslíku) do křemíku rozpouštěním křemenných nádob při rotačním pohybu během Czochralského metody. Úrovní koncentrace kyslíku a stupněm jeho precipitace v SiO_2 lze tedy ovládat i celkovou hustotu těchto vrstevných chyb. Ke zviditelnění jednotlivých křivek se využívá selektivního leptání. Přítomnost tohoto typu defektu může mít celou řadu nežádoucích aspektů. Např. může působit jako centrum pro generaci - rekombinaci a tím zvyšovat závěrný proud na PN přechodech nebo snižovat dobu života minoritních nosičů proudu. [10]



Obr. 22 Metoda elektroluminiscence
Swirl defekt



Obr. 23 Metoda elektroluminiscence
pnutí v křemíku

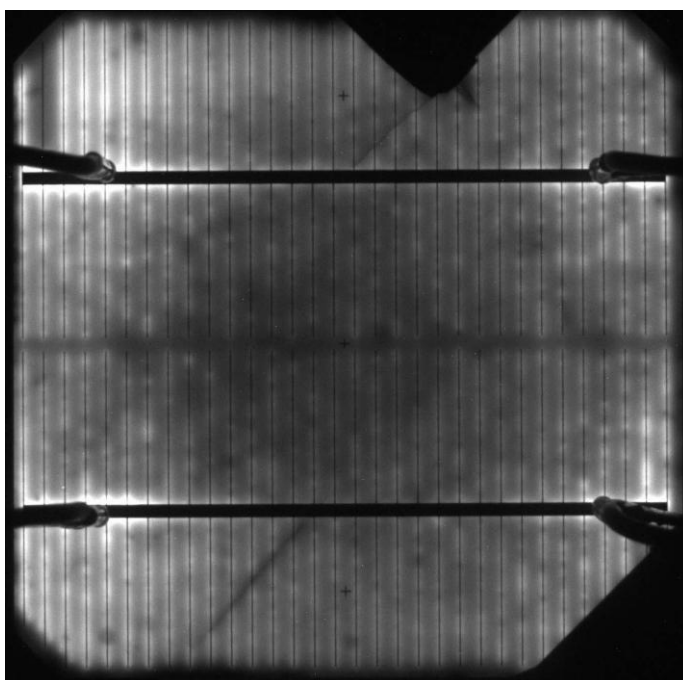
6.2.2 Procesní defekty (*Processing Induced Defects*)

Procesní defekty vznikají při samotné výrobě solárního článku.

Za základní procesní defekty považujeme:

- mechanické poškození – do této skupiny se řadí především poškrábání solárního článku nebo okrajové odštípnutí
- nehomogenita difúzní vrstvy
- vypálení drážky posuvníku pece

Abychom eliminovali procesní defekty, musíme při výrobě a manipulaci se solárními články dodržovat předepsané normy.



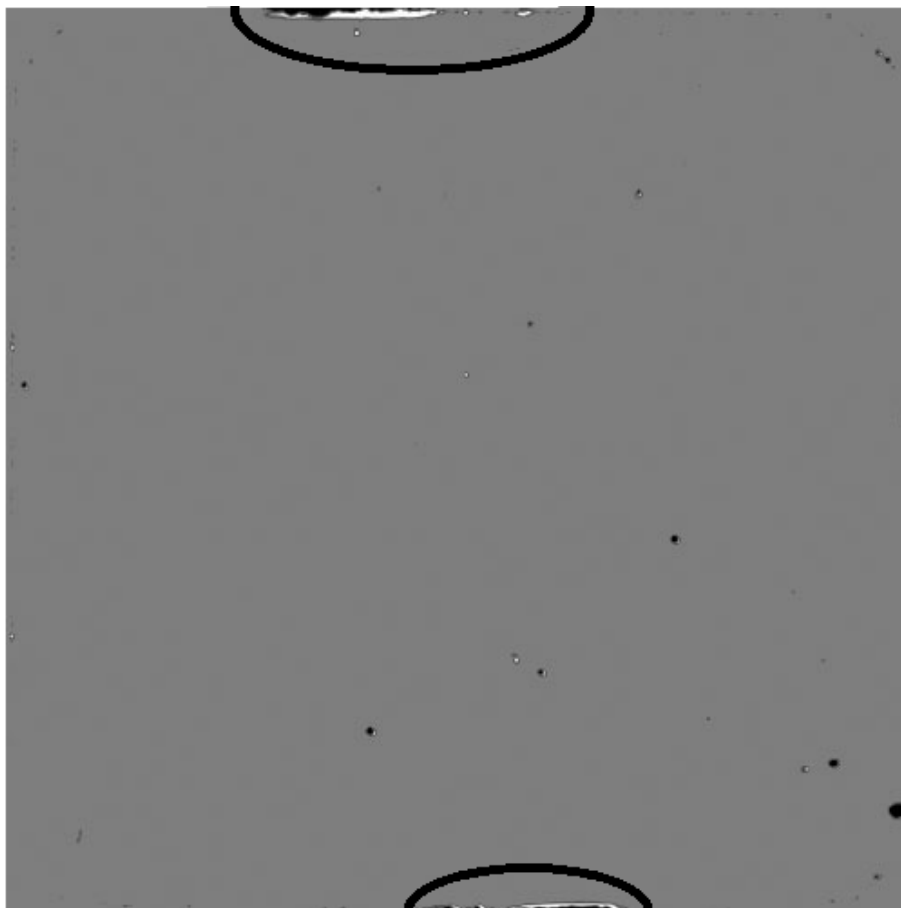
Obr. 24 Metoda elektroluminiscence – poškrábání a odštípnutí článku

6.3 Vliv teploty na projev defektů

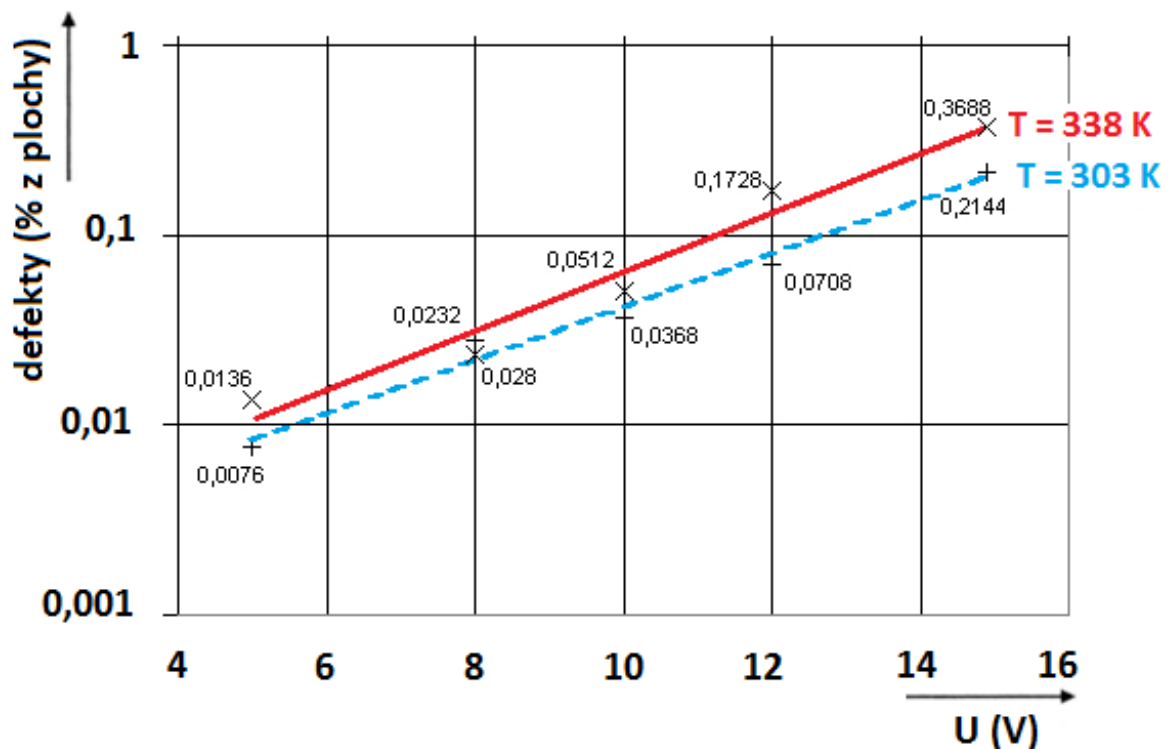
6.3.1 Metoda luminiscence mikroplazmy

Solární článek je připojen k závěrnému napětí stejnosměrného laboratorního zdroje. Na spodní straně kontaktní plochy jsou upevněny Peltierovy články, které slouží k regulaci teploty. Vznik mikroplazmy je ovlivněn několika faktory. Prvním z faktorů jsou defekty v krystalové mřížce křemíku způsobené nehomogenitou parametrů, díky kterým vzniká mikroplazma. Druhým faktorem je dislokace PN přechodu v místech, kde je PN přechod tenčí nebo mechanicky poškozen. Z tohoto důvodu vzniká mikroplazma, která způsobí emisi světla. Mikroplazmatické poruchy nejsou generovány v plynu, jako je tomu v ostatních případech, ale přímo v křemíkovém waferu. Množství mikroplazmatických poruch je závislé na velikosti

přiloženého závěrného napětí a teplotě. Se zvyšující se teplotou vzrůstá také množství viditelných defektů v solárním článku. Z tohoto důvodu je možné detekovat více defektů ve struktuře solárního článku. Tento fakt můžeme vidět na obr 25., kde je graficky znázorněna závislost počtu viditelných defektů na celé ploše solárního článku při zvyšující se teplotě. Nejvíce defektů je patrné na horní a spodní hraně solárního článku, označeno černou elipsou.



Obr. 25 Luminiscence mikroplazmy – $U = 15 \text{ V}$ a rozdílná teplota, $T = 303 \text{ K}$ černá barva, $T = 338 \text{ K}$ bílá barva [3]



Obr. 26 Luminiscence mikroplazmy – Závislost počtu defektů (%) na teplotě (K) [3]

Obr. 26 ukazuje množství mikroplazmy na celé ploše solárního článku v závislosti na velikosti závěrného napětí při teplotách 303 K a 338 K. Je to exponenciální závislost, která může být popsána univerzální Boltzmannovou rovnicí:

$$k(T) = A_K \cdot \exp(-B \cdot V / kT) \quad (8)$$

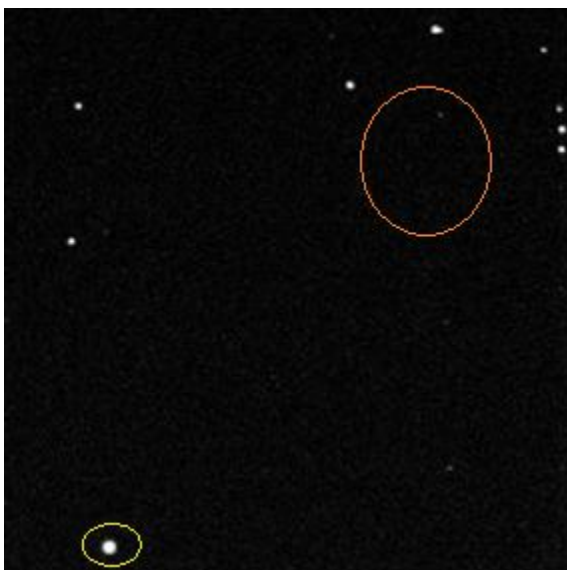
Kde $k(T)$ je množství zdrojů mikroplazmy na celé ploše solárního článku, konstanty A a B jsou materiálové konstanty.

Pro křemíkový solární článek je konstanta A rovna $1,7 \cdot 10^{-3}$ a konstanta B je rovna $9,395 \cdot 10^{-3}$ eV.

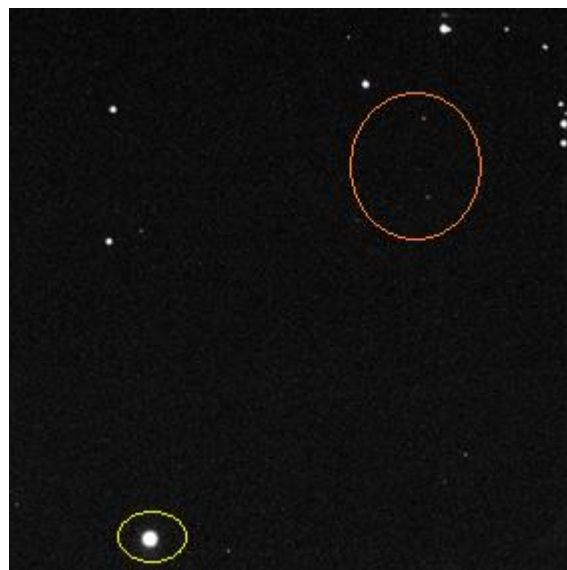
Výsledná rovnice popisující celkové množství zdrojů mikroplazmy na celé ploše solárního článku je:

$$defekty = 1,7 \cdot 10^{-3} \cdot \exp(-9,395 \cdot 10^{-3} \cdot V / kT) \quad (\% \text{ z plochy}) \quad (9)$$

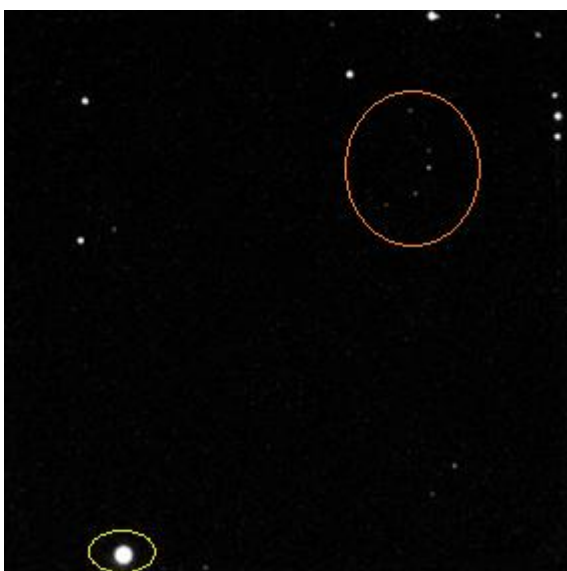
Z rovnice (9) můžeme vidět, že teplotní závislost je téměř exponenciální. Porovnání závislosti pro obě teploty, obr. 26, ukazuje, že se vzrůstající teplotou a napětím, se počet defektů zvyšuje téměř symetricky.



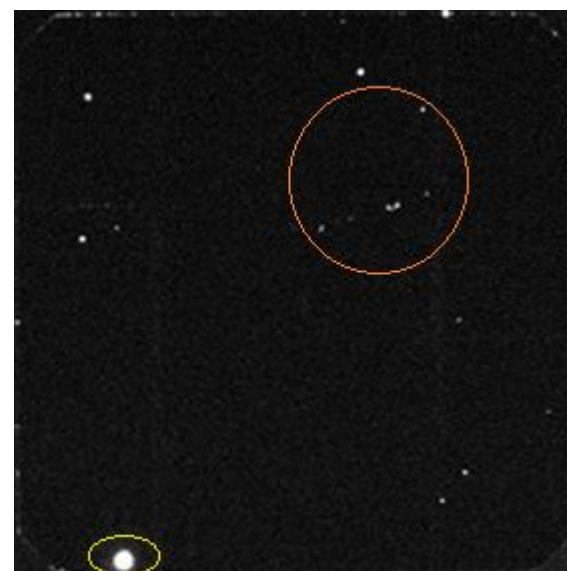
Obr. 27 $U = 10 \text{ V}$, $I = 0,19 \text{ A}$, $T = 297 \text{ K}$,
doba expozice 25 s



Obr. 28 $U = 10 \text{ V}$, $I = 0,19 \text{ A}$, $T = 313 \text{ K}$,
doba expozice 25 s



Obr. 29 $U = 10 \text{ V}$, $I = 0,23 \text{ A}$, $T = 333 \text{ K}$,
doba expozice 25 s



Obr. 30 $U = 10 \text{ V}$, $I = 0,29 \text{ A}$, $T = 353 \text{ K}$,
doba expozice 25 s

Pro snímky na obr. 27 až 30 byla použita metoda luminiscence mikroplazmy při napětí na solárním článku $U = 10 \text{ V}$ spolu se změnou teploty. Článek byl zahříván z teploty 297 K po teplotu 353 K, jednotlivé snímky byly pořízeny při ohřevu článku o 20 K. Na snímcích je možné vidět, že se zvyšující se teplotou se mírně zvyšuje počet defektů, které se při pokojové teplotě, 297 K, neprojevily. Nejlépe je tento jev možno vidět v levém spodním rohu, označeno žlutou barvou, kde se zvyšuje intenzita luminiscence mikroplazmy při rostoucí teplotě. Dále můžeme tento jev vidět v místě označeném oranžovou barvou, kde se naopak při pokojové teplotě neobjevuje žádná

luminiscence mikroplazmy a s rostoucí teplotou se jejich počet zvyšuje. Z měření je také patrné, že při zvyšující se teplotě se zvyšuje proud solárního článku. Je to způsobeno vyšší pohyblivostí nosičů náboje.

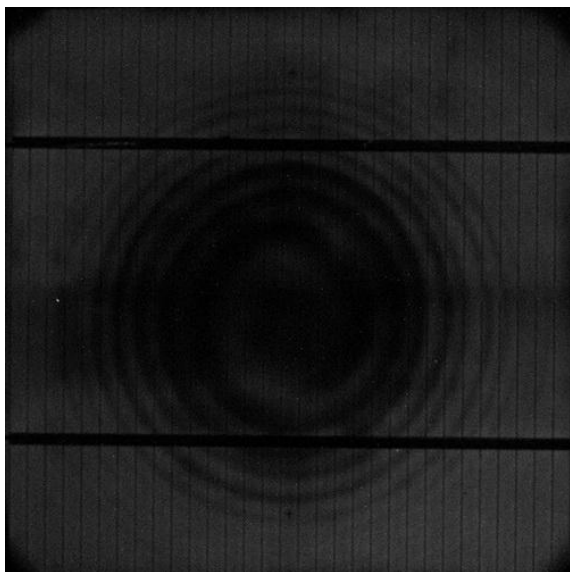
6.3.1 Metoda elektroluminiscence

Metoda elektroluminiscence je rychlá metoda poskytující informace o elektrických, optických a materiálových vlastnostech solárních článků. Na snímcích také můžeme pozorovat rozložení proudové hustoty. Metoda je založena na skutečnosti, že solární články po připojení ke zdroji proudu v propustném směru, emitují záření v infračerveném spektru. Hlavní proces světelné emise je vyvolán mezipásmovou rekombinací. Intenzita záření je přímo úměrná difúzní délce nosičů náboje [6]. V oblastech, kde rekombinace nastává dříve, přes defektně sníženou vzdálenost mezipásmového prostoru, je intenzita záření nižší. Solární článek se po připojení ke zdroji proudu chová jako LED dioda s velkou plochou PN přechodu.

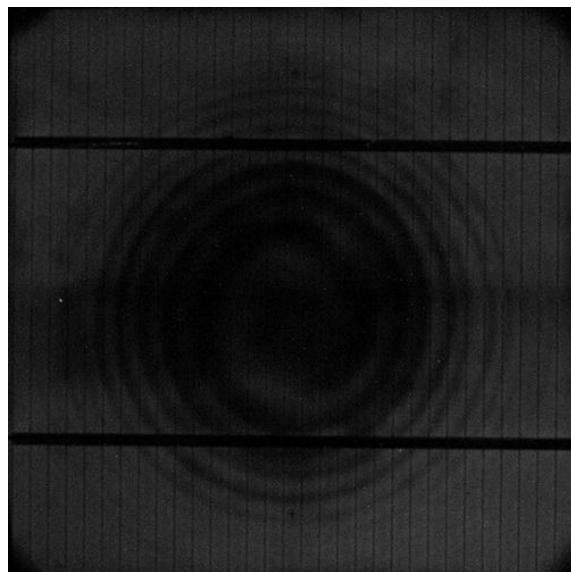
Díky zářivé mezipásmové rekombinaci při pokojové teplotě může být solární článek sledován pomocí nízkošumové CCD kamery. Detekce defektů spočívá v rozlišení světlých a tmavých míst na pořízeném snímku. Na snímcích jsou sběrné kontakty solárního článku tmavé, protože jsou vyrobeny ze stříbrné pasty a tudíž na nich nedochází k elektroluminiscenčnímu jevu. Elektroluminiscenční záření pozorujeme jako světlou plochu s různou intenzitou. Ideálně vyrobený solární článek, by měl vykazovat rovnoměrnou proudovou hustotu na celé ploše solárního článku a z tohoto důvodu by měla být pozorována světelná emise se stejnou intenzitou po celé ploše. Místa s nižší intenzitou indikují defekt ve struktuře materiálu a místa s vyšší intenzitou indikují vyšší proudovou hustotu.

Obr. 31 až 34 byly měřeny při různých teplotách. Na solárním článku byl detekován SWIRL defekt. Při teplotě 303 K je pozorovaný SWIRL defekt tmavější než při teplotě 338 K. Defekt je tmavější, protože minoritní nosiče mají kratší dobu života při teplotě 303 K než při vyšší teplotě. Tento fakt je lépe viditelný na obr. 33, který byl pořízen při teplotě 303 K, a obr. 34, který byl pořízen při teplotě 338 K. Dále na snímcích můžeme pozorovat uprostřed článku nehomogenitu difúzní vrstvy PN přechodu a na obr. 33 a 34 je v oblasti kontaktů možné pozorovat světlejší místa, která nám znázorňují oblasti s vyšší proudovou hustotou.

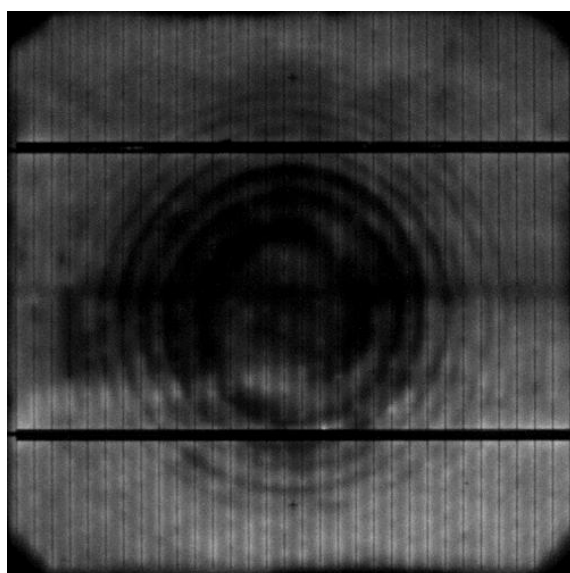
Vyšší proudová hustota je lépe pozorovatelná na obr. 35, kde je možné vidět zvýšenou proudovou hustotu v okolí obou sběrných kontaktů. Dále na diagnostikovaném článku můžeme vidět procesní defekty, a je možné pozorovat velké škrábance, které vznikly neopatrnou manipulací se solárním článkem.



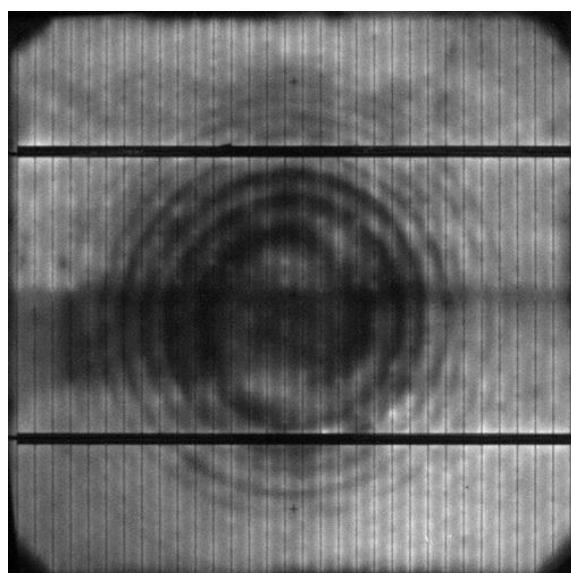
Obr. 31 $I = 1 \text{ A}$, $U = 1,03 \text{ V}$, $T = 303 \text{ K}$



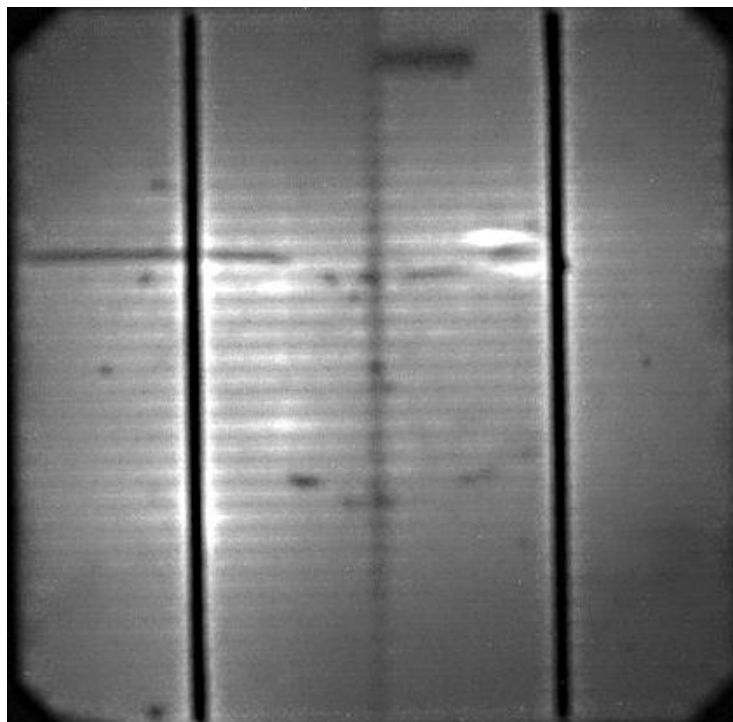
Obr. 32 $I = 1 \text{ A}$, $U = 1,03 \text{ V}$, $T = 338 \text{ K}$



Obr. 33 $I = 1,97 \text{ A}$, $U = 1,03 \text{ V}$, $T = 303 \text{ K}$



Obr. 34 $I = 1,97 \text{ A}$, $U = 1,03 \text{ V}$, $T = 338 \text{ K}$



Obr. 35 $I = 3,03 \text{ A}$, $U = 1,6 \text{ V}$, $T = 313 \text{ K}$

6.1 Zhodnocení

Výsledkem této práce bylo sestavení nového pracoviště, na kterém bude možno diagnostikovat defekty solárních článků v závislosti na teplotě. Pomocí tohoto pracoviště je možno simulovat reálné podmínky, ve kterých solární články běžně pracují.

Metody elektroluminiscence a luminiscence mikroplazmy nám umožňují detekci defektů solárních článků s relativně krátkou dobou měření. Výhodou této metody je jednoduchost měřicího pracoviště. V kombinaci s moderním pracovištěm pro diagnostiku defektů v závislosti na teplotě můžeme diagnostikovat defekty, které by při pokojové teplotě nebyly viditelné. Tyto defekty jsou viditelné při vyšších teplotách z důvodů vyšší rychlosti volných částic. Naopak při velmi nízkých teplotách není možné diagnostikovat větší množství defektů, protože s klesající teplotou se snižuje pohyblivost nosičů náboje.

7 Závěr

Cílem této práce bylo seznámení se s moderními diagnostickými metodami pro analýzu defektů krystalických solárních článků v teplotní závislosti. Byly zkoumány metody využívající luminiscenci solárních článků. Analýza solárních článků byla provedena pomocí metod využívajících CCD kameru. Konkrétně byly zkoumány metody elektroluminiscence a luminiscence mikroplazmy.

Nově bylo vytvořeno měřicí pracoviště, které umožňuje pozorovat změnu defektů v závislosti na teplotě. Byl sestaven regulátor napětí, který umožnil nastavení požadované teploty solárního článku. Pomocí regulace teploty můžeme pozorovat defekty, které se při měření za běžných teplot neprojeví.

Pomocí obou metod se podařilo diagnostikovat nejčastější defekty v solárních člancích (materiálové i procesní). Při zvýšení teploty bylo prokázáno, že se v solárním článku zvýší množství detekovaných defektů. Při použití metody luminiscence mikroplazmy dochází při zvyšování teploty k téměř symetrickému růstu počtu detekovaných defektů. Tato změna je také závislá na velikosti přiloženého napětí. Při napětí 5 V se při změně teploty z 303 K na teplotu 338 K zvýšilo množství defektů o cca 0,05 %, při napětí 15 V byla tato změna cca 0,15 %.

Použité metody, elektroluminiscence a luminiscence mikroplazmy, ve spojení s pracovištěm pro regulaci teploty, mají v sobě vysoký potenciál pro použití v praxi při testování vyrobených solárních článků. Proto by měl probíhat další výzkum v oblasti teplotních závislostí a jejich projevu na defekty v solárních člancích.

Spojením nízkošumové CCD kamery a pracoviště pro regulaci teploty by výroba získala další významný diagnostický nástroj pro zvýšení kvality výroby a zvýšení účinnosti solárních článků. Je to dáno především rychlostí měření, kdy se doba expozice u obou metod pohybuje v rámci několika sekund a dále poměrně jednoduchým měřicím pracovištěm.

Pokud bude dosaženo vyšší kvality a vyšších výkonů solárních článků při současném snižování výrobních nákladů, může tím být dosaženo většího rozvoje solárních systémů a tím omezení emisí, které vznikají při spalování tuhých paliv při výrobě energií.

8 Seznam použité literatury

- [1] KOLEKTIV AUTORŮ: *Obnovitelné zdroje energie možnosti jejich uplatnění v České republice*. ČEZ a.s. 2007. 183 s.
- [2] LIBRA, M., POULEK V.: *Solární energie*. Praha: ČUZ, 2005. 122 s. ISBN 80-213-1335-8
- [3] DOLENSKÝ, J, VESELÝ A., VANĚK J., HROZEK J.: *Dianostics methods of solar cells in dependence on temperature*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 8 s.
- [4] BRZOBOHATÝ, J., MUSIL, V., BAJER, A., BOUŠEK, J.: *Elektrotechnické součástky*. Skriptum Vysoké učení technické v Brně: 2002. 205 s.
- [5] Yates, T., A.: *Solar Cells in Concentrating Systems and Their High Temperature Limitations*. Santa Cruz: University of California: 09/2003. 49 s.
- [6] VALA, Z: *Fotoluminiscenční metody detekce defektů solárních článků*. Brno: Vysoké učení technické v Brně: 2009. 64 s.
- [7] VAŠIČEK, T: *Charakterizace vlastností křemíkových krystalických solárních článků*. Brno: Vysoké učení technické v Brně: 2004. 53 s.
- [8] FRANGSUWANNARAK, T., CHO, E.C., CONIBEER, G., HUANG, Y., TRUPKE, T., GREEN, M. A.: *Analysis of the Effect of Silicon Quantum Dot Density on the Photoluminescence Spectra of Silicon Dot/Silicon Dioxide Superlattice*. 21. EU PVSEC, Dresden: 2006.
- [9] TRUPKE, T., BARDOS, R. A., ABBOT, M.D.: *Fast Photoluminescence Imaging of Silicon Wafers*. University of New South Wales, Sydney: 2007, . 4 s.
- [10] DOLENSKÝ, J: *Charakterizace elektrických vlastností křemíkových krystalických solárních článků*. Brno: Vysoké učení technické v Brně: 2007. 50 s.
- [11] VANĚK, J., KŘIVÁK, P., NOVÁK, V.: *Alternativní zdroje energie*. Skriptum Vysoké učení technické v Brně: 2006. 158 s.
- [12] KOLEKTIV AUTORŮ: *Solární systémy s FV/FT panely a jejich využití*. Sborník příspěvků z odborného semináře, v rámci projektu VaV/SN/3/174/05, 2007. 39 s.
- [13] KLÍMA, P.: *Fotovoltaika v České republice a EU*. přednáška, 3. fotovoltaická konference, Brno: 2008.
- [14] Fyzikální podstata fotovoltaické přeměny solární energie. *Světlo*. 2006. 3 s.

- [15] *HW.cz* [online]. 1999 [cit. 2010-05-04]. Peltierovy termobaterie. Dostupné z WWW: <<http://hw.cz/Teorie-a-praxe/Dokumentace/ART652-Peltierovy-termobaterie.html>>.
- [16] *Skupina ČEZ* [online]. 2008 [cit. 2010-11-17]. Slunce, výroba elektřiny. Dostupné z WWW: <<http://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/obnovitelne-zdroje/slunce.html>>.
- [17] *Czech RE Agency* [online]. 2009 [cit. 2010-04-21]. Czech RE Agency. Dostupné z WWW: <<http://www.czrea.org/cs/studie-a-analyzy/vyhledy>>.
- [18] *Phono Solar* [online]. 2009 [cit. 2010-02-13]. Fotovoltaické a větrné elektrárny. Dostupné z WWW: <<http://www.phonosolar.cz/historie>>.

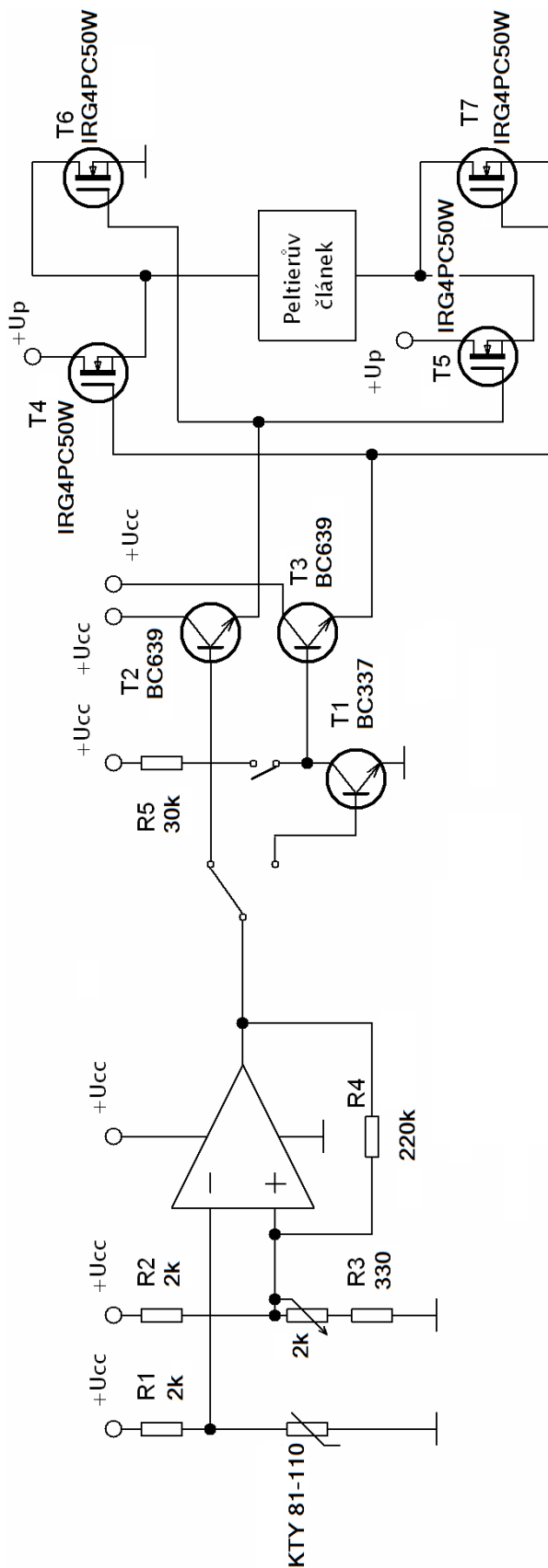
9 Seznam symbolů

A_C	- plocha fotovoltaického článku
A_K	- materiálová konstanta; pro křemík $A_K = 1,7 \cdot 10^{-3}$
B	- materiálová konstanta; pro křemík $B = 9,395 \cdot 10^{-3} \text{ eV}$
CCD	- typ snímače kamery
CdS	- sulfid kademnatý
CdTe	- telurid kademnatý
CZ Si	- krystalický křemík tvářen Czochralského metodou
D_n, D_p	- difúzní koeficienty elektronů a děr
E	- intenzita elektrického pole; intenzita osvětlení
EFF	- účinnost solárního článku (Energy Efficiency Factor)
FF	- činitel plnění (Fill Factor)
GaAs	- arsenid galia
I_{450}	- proud při napětí 450mV
I_M	- proud maximálního výkonu
I_{SC}	- zkratový proud
J_n, J_p	- proudová hustota elektronů a děr
J_{SC}	- proudová hustota
LBIC	- rastrovací metoda pro diagnostiku solárních článků (Light Beam Induced Current)
L_n, L_p	- difúzní délka elektronů a děr
MPP	- pracovní bod maximálního výkonu (Maximum Power Point)
n_i^2	- koncentrace nosičů
n_{P0}, p_{N0}	- je koncentrace elektronů a děr v polovodiči v rovnovážném vztahu
P	- pracovní bod
P_D	- intenzita v místě měření
P_M	- maximální výkon
P_{rad}	- výkon dopadajícího záření
q	- elementární náboj, $q = 1,60218 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
R	- reflexivita
R_M	- vnitřní odpor
R_{SH}	- paralelní odpor

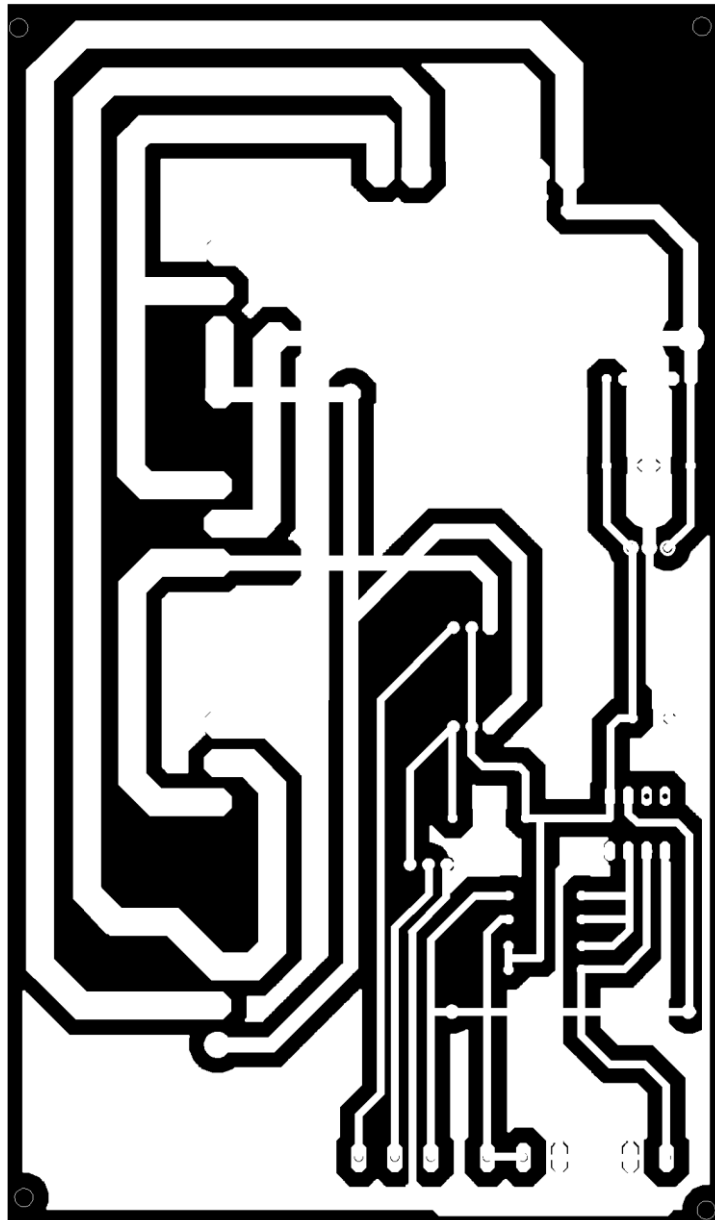
R_{SO}	- sériový odpor
Si-mono	- monokrystalický křemík
SIMS	- program pro ovládání kamery (Simple Image Manipulation System)
SiO_2	- oxid křemičitý
Si-poly	- polykrystalický křemík
T	- teplota
U_D	- potenciálová bariéra
U_M	- napětí maximálního výkonu
U_{OC}	- napětí naprázdno
U_P	- fotovoltaické napětí
ΔE_G	- šířka zakázaného pásu
$\Delta n, \Delta p$	- změna koncentrace elektronů a děr
λ	- vlnová délka
FVS	- fotovoltaický systém

10 Přílohy

a) Schéma regulátoru napětí



b) Předloha pro výrobu DPS regulátoru napětí



c) Soupis součástí pro regulátor napětí

Název	kusů
MRR 2K	2x
MRR 330R	1x
MRR 220K	1x
MRR 30K	1x
PC16MLK002.5	1x
KTY81-110	1x
LM311	1x
BC337-25 PHI	1x
BC639	2x
IRG4PC40W	4x
E22M/50V	2x
CK 100N/63V	3x
7809	1x
ARK128V-A-3P	4x
GL535	4x
CHL20B	1x

d) Soupis použitých částí pro inovaci pracoviště

Název	kusů
Čerpadlo - Laing D5 12V Vario 1/2" AG	1x
Ventilátor - Enermax Magma UCMA12 - 120mm	4x
Radiátor - Black ICE Radiator GT Xtreme 480 - Black	1x
Bloky - EK Water Blocks Supreme - Acetal	4x
Expanzní nádoba - EK RES 400 rev2	1x
Fitinky 1/4"	14x
Redukce 1/2" na 1/4"	2x
Hadice průměr 10mm, 3m	2x
Peltierův článek M-TEC1-12730	4x