



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

CHARAKTERIZACE ZADNÍCH STRAN SOLÁRNÍCH ČLÁNKŮ

CHARACTERIZATION BACKSIDES OF SOLAR CELLS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. LUDĚK WINKLER

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. Luděk Winkler

ID: 83119

Ročník: 2

Akademický rok: 2009/2010

NÁZEV TÉMATU:

Charakterizace zadních stran solárních článků

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s technologií výroby monokrystalických solárních článků ve firmě Solartec s.r.o. Aplikujte diagnostické metody využívající rekombinačních jevů při charakterizaci zadních stran solárních článků. Získaná data porovnejte s diagnostikou předních stran a výsledek vyhodnoťte.

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 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.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá charakterizací zadních stran solárních článků. K popisu materiálových vlastností z pohledu zadní strany solárního článku je využito metod elektroluminiscence, emise světla z mikroplasmatu a LBIC (Light Beam Induced Current). Získané výsledky jsou porovnány s výsledky analýzy předních stran. Dále je v práci popsán potenciál jaký se u zadních stran skrývá.

Abstract

This thesis deals with the characterization back side of solar cells. In order to describe the quality of material from the point of view of a back side solar cell, the method of photoluminescence, the method of light emitting from micro plasma and LBIC (Light Beam Induced Current) is used. Gained results are compared with the results of front side analysis. Next, the thesis describes back side potential.

Klíčová slova

Zadní strana solárního článku, elektroluminiscence, metoda emise světla z mikroplasmatu

Keywords

Back side of solar cell, photoluminescence, method light emitting from micro plasma

Bibliografická citace

WINKLER, L. *Charakterizace zadních stran solárních článků*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 51 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jan Dolenský.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Charakterizace zadních stran solárních článků jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor 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/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Janovi Dolenskému za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

OBSAH

1.	Úvod	7
2.	Vývoj fotovoltaiky.....	8
2.1.	První generace	8
2.2.	Druhá generace	8
2.3.	Třetí generace	9
3.	Princip činnosti a výroby solárního článku	11
3.1.	Základní podstata přeměny solární energie	11
3.2.	Fotoelektrické jevy v polovodičích	12
3.2.1.	Vnitřní fotoelektrický jev	12
3.2.2.	Fotovodivost	15
3.3.	Osvětlení PN přechodu solárního článku	17
3.4.	Postup výroby monokrystalických solárních článků	22
4.	Zadní strany solárních článků.....	25
4.1.	Koncepty využitelností zadní strany solárního článku	25
4.2.	Struktura zadní strany IBC článku	27
5.	Metody charakterizace solárního článku	29
5.1.	Měření elektrických parametrů solárních článků	29
5.2.	Měření materiálových vlastností a defektů.....	30
5.2.1.	Měření elektrických vlastností	31
5.2.2.	Měření materiálových vlastností a defektů.....	32
6.	Praktická část.....	35
6.1.	Popis pracoviště.....	35
6.2.	Užité měřicí metody	36
6.3.	Zhodnocení výsledků laboratorního měření	37
7.	Závěr	50
8.	Seznam použité literatury	51

1. Úvod

V této práci bude pojednáno o solárních článcích a problematice, která je s nimi spojenou. U křemíkových solárních článků budou zkoumány především zadní strany. První část této práce by měla tvořit teoretický základ dané problematiky. Bude zde pojednáno krátce o vývoji fotovoltaiky a věci s tím spojených. Dále si kompletně rozebereme PN přechod, kterým je solární článek v základní podstatě tvořen a podrobně se budeme věnovat jevům, které v něm vznikají při osvětlení a následném vzniku elektrické energie.

V experimentální části této práce bude pojednáno o možnostech úpravy solárních článků, které se naskytují. Dále zde budou rozebrány a odzkoušeny měřicí metody, kterými budeme zkoumat solární články ze zadní strany. Následně je možné se seznámit s podrobným vyhodnocením této práce, co se nám naskytá za nové pohledy z tohoto pohledu laboratorní činnosti.

Fotovoltaika – technologie, která umožňuje výrobu elektrické energie přímo ze slunečního záření.

Fotovoltaiku lze chápat jako technologii s neomezeným růstovým potenciálem a časově neomezenou možností výroby elektrické energie. Nejedná se však pouze o zajímavou technologii, ale také o vyspělé (hi-tech) průmyslové odvětví, které ve světě zažívá neobvyklý rozvoj a pozitivně ovlivňuje nejen obchodní aktivity, ale např. také zaměstnanost nebo kvalifikaci vědeckých pracovníků. Tuto skutečnost pochopily již mnohé vyspělé země světa včetně zemí Evropské unie, snaží se fotovoltaiku podporovat a v delším časovém horizontu jí přisuzují nezastupitelné místo v energetickém „mixu“. Tento aspekt nabývá na významu zejména vzhledem k narůstající energetické závislosti mnohých zemí. Dále zejména ekologickými a bezpečnostními otázkami klasických způsobů výroby energie a dalším negativním aspektům současné i budoucí energetiky. V tomto kontextu lze tedy fotovoltaiku po odstranění některých překážek, zejména ekonomických, vnímat jako jedno z dostupných řešení, jako univerzálně použitelný energetický zdroj, jako technologii, která jde ruku v ruce s trvale udržitelným rozvojem a dnes tolik probíranou ekologií.

2. Vývoj fotovoltaiky

Pojem fotovoltaika pochází ze dvou slov, řeckého φώς [phos] = světlo a ze jména italského fyzika Alessandra Volty. Objev fotovoltaického jevu se pak připisuje Alexandru Edmondovi Becquerelovi, který jej jako devatenáctiletý mladík odhalil při experimentech v roce 1839. Prvotní pokusy s fotočlánky spadají do sedmdesátých let 19. století, kdy byly poprvé zjištěny změny vodivosti selenu při jeho osvětlení a kolem r. 1883 byl sestaven první selenový fotočlánek s tenkou vrstvou zlata (Charles Fritts, účinnost pod 1 %). V roce 1904 jej fyzikálně popsal Albert Einstein a v roce 1921 mu byla za „práce pro rozvoj teoretické fyziky, zejména objev zákona fotoelektrického efektu“ udělena Nobelova cena. První patent na solární článek pak byl podán v roce 1946 Russellem Ohlem, který také stál na počátku rozvoje křemíkových solárních článků. První skutečný fotovoltaický článek s 6 % účinností byl vyroben z krystalického křemíku v roce 1954 v Bellových laboratořích (G.L. Pearson, Daryl Chapin, Calvin Fuller).

Větší rozvoj fotovoltaiky nastává v šedesátých letech s nástupem kosmického výzkumu, sluneční články slouží jako zdroj energie pro družice. Vůbec první družicí využívající k zisku energie sluneční paprsky byl ruský Sputnik 3, vypuštěný 15. května 1957. Dalším důležitým mezníkem pro rozvoj fotovoltaiky a zejména výzkumu a vývoje v této oblasti byla celosvětová ropná krize v roce 1973. Dnes je již využití fotovoltaiky různorodé a využívá se ve všech odvětvích ve všedním životě.

2.1. První generace

První generací se nazývají fotovoltaické články využívající jako základ křemíkové desky. Jsou dnes nejrozšířenější technologií na trhu (cca 90 %) a dosahují poměrně vysoké účinnosti přeměny (v sériové výrobě 16 až 19 %, speciální struktury až 24 %). Komerčně se začaly prodávat v sedmdesátých letech. Přestože je jejich výroba relativně drahá (a to zejména z důvodu drahého vstupního materiálu – krystalického křemíku), budou ještě v několika dalších letech na trhu dominovat.

2.2. Druhá generace

Impulsem pro rozvoj článků druhé generace byla především snaha o snížení výrobních nákladů úsporou drahého základního materiálu – křemíku. Články druhé generace se

vyznačují 100 krát až 1000 krát tenčí aktivní absorbující polovodičovou vrstvou (thin-film) a jejími představiteli jsou např. články z amorfního a mikrokrytalického křemíku (případně silicon-germania, či silicon-karbidu, ale také tzv. směsné polovodiče z materiálů jako Cu, In, Ga, S, Se, označované obecně jako CIS struktury). S úsporou materiálu došlo v porovnání s články první generace k poklesu výrobních nákladů (a tedy za předpokladu velkosériové výroby i k poklesu ceny), nicméně dosahovaná účinnost je obvykle nižší (v sériové výrobě obecně pod 10%). Nespornou výhodou tenkovrstvých článků je možnost volby substrátu (na něž se tenkovrstvé struktury deponují) a v případě použití flexibilních materiálů (organické, kovové či textilní folie) i značně širší aplikační sféra. Komerčně se začaly články druhé generace prodávat v polovině osmdesátých let.

2.3. Třetí generace

Pokus o „fotovoltaickou revoluci“ představují solární články třetí generace. Zde je hlavním cílem nejen snaha o maximalizaci počtu absorbovaných fotonů a následně generovaných párů elektron - díra („proudový“ zisk), ale i maximalizace využití energie dopadajících fotonů („napět'ový“ zisk fotovoltaických článků). Existuje řada směrů, kterým je ve výzkumu věnována pozornost:

- vícevrstvé solárních články (z tenkých vrstev)
- články s vícenásobnými pásy
- články, které by využívaly „horké“ nosiče náboje pro generaci více párů elektronů a děr
- termofotovoltaická přeměna, kde absorbér je současně i radiátorem vyzařujícím selektivně na jedné energii
- termofotonická přeměna, kde absorbér je nahrazen elektroluminiscencí
- články využívají kvantových jevů v kvantových tečkách nebo kvantových jamách
- prostorově strukturované články vznikající samoorganizací při růstu aktivní vrstvy
- organické články (např. na bázi objemových heteropřechodů)

Zatím jediným komerčním příkladem dobře fungujících článků třetí generace (přímo navazující na FV druhé generace) jsou vícevrstvé struktury (dvojevrstvé – tzv. tandemy a trojevrstvé články), z nichž každá sub-struktura (p-i-n) absorbuje určitou část spektra a maximalizuje se tak energetická využitelnost fotonů. Příkladem tandemového solárního článku je struktura skládající se z p-i-n přechodu amorfního (hydrogenovaného) křemíku (a-Si:H) a p-i-n přechodu mikrokrystalického (hydrogenovaného) křemíku ($\mu\text{c-Si:H}$). Amorfní křemík má vysokou absorpci v oblasti modré, zelené a žluté části spektra, mikrokrystalický křemík pak dobře absorbuje i v oblasti červené a infračervené. Mikrokrystalický křemík může být nahrazen i „slitinou“ křemíku s germaniem a dle zvoleného poměru obou materiálů se dají upravovat jejich optické (i elektrické) vlastnosti. Tohoto materiálů se např. využívá komerčně právě pro trojevrstvé solární články, kde dva spodní články jsou vyrobeny s různou koncentrací Si a Ge. Základní podmínkou pro dobrou funkci vícevrstvých článků je, aby každý z článků generoval stejný proud. V opačném případě, horší (příp. nejhorší) z článků limituje dosažitelnou účinnost. Výsledné napětí je pak dané součtem obou (příp. všech) článků.

3. Princip činnosti a výroby solárního článku

3.1. Základní podstata přeměny solární energie

Fotogenerace. Fotovoltaické články jsou polovodičové diody. Jejich materiál absorbuje dopadající energii fotonu a tím se vytváří pár elektron-díra. Při tomto fotovoltaickém ději velmi záleží na E_g (šířka zakázaného pásu polovodiče). V ideálním případě žádný foton o energii menší než E_g nevygeneruje pár elektron-díra a všechny fotony s energií vyšší než je E_g vygenerují tento pár. Zbylá energie se nevyužívá a je přeměněna na teplo (tuto energii lze využít v případě použití termofotovoltaických článků).

J_{ph} (maximální proudová hustota) je pak dána počtem fotonů dopadajících na fotovoltaický článek s energií větší než je E_g . Tato proudová hustota klesá s rostoucí šířkou zakázaného pásu. Naopak čím vyšší je E_g , tím lépe se transformuje energie elektronového páru elektron-díra a nedochází k spontánnímu zániku tohoto páru. Rozumný kompromis pro šířku zakázaného pásu je $E_g > 1,1$ eV [4], kdy maximum energie světelného toku generuje páry elektron-díra a zhruba polovina solární energie se transformuje do elektrické.

Této limity lze dosáhnout pouze tehdy, pokud se zabrání ztrátám odrazem a pokud je absorbující vrstva materiálu dostatečně tlustá, aby článek absorboval všechny dopadající fotony. Tato podmínka je zvláště obtížná pro polovodiče s nepřímým typem zakázaného pásu (jako je monokrystalický křemík), kvůli jejich velmi nízkému koeficientu absorpce, a je lépe splnitelná pro materiály jako je amorfni křemík nebo polovodiče s přímým zakázaným pásem.

Nábojová separace. Dalším krokem je separace vygenerovaného elektronu a díry. V tomto kroku je přitahován elektron k jedné elektrodě a díra k druhé a to vnitřním elektrickým polem PN přechodu.

Optimální hodnota E_g pro celkovou energetickou konverzi při nejvyšší účinnosti zahrnující i separaci elektronu a díry je $E_g \approx 1,5$ eV [4] s limitou účinnosti dosahující 30 % [5]. Galium Arsenid (GaAs), Indium Fosfid (InP), a Kadmium Telurid (CdTe) jsou polovodiče, které mají hodnotu zakázaného pásu velmi blízko $E_g = 1,5$ eV. Bohužel první dva jsou příliš drahé na výrobu velkého množství fotovoltaických článků a CdTe je nepoužitelný pro svou toxicitu. Krystalické křemíkové články v laboratorních podmínkách se blíží svojí účinností přeměny solární energie na elektrickou k 25 %, ale jejich výroba je velice obtížná a je nepoužitelná pro komerční použití. Komerčně vyráběné křemíkové fotovoltaické články se svojí účinností přibližují k hranici 15 %.

Způsob jak překonat horní hranici účinnosti vede přes použití vícepřechodových technologií (multijunction cells). Jedná se o optické kaskády dvou nebo více fotovoltaických článků s různou šířkou zakázaného pásu. Tyto technologie vedou k velice zajímavým laboratorním experimentům s výslednou až 32,6 % účinností při použití fokusovaných slunečních paprsků. Bohužel i tyto technologie zatím nelze využít v komerčním nasazení.

Koncentrované sluneční světlo dovoluje překročit teoretickou hranici účinnosti. Bohužel užití takto koncentrovaného slunečního světla je spojeno s vysokými teplotami a s vysokou proudovou hustotou v článcích. Navíc zařízení, které koncentruje sluneční záření bývá spojeno s mechanickými prvky kratší životnosti a velice prodražuje samotný fotovoltaický systém. Z těchto důvodů koncentrované fotovoltaické systémy nenašly zatím široké uplatnění.

Platí tedy:

- Volné nosiče náboje se mohou v polovodiči uvolňovat světlem až od určité barvy (tzn. od určité vlnové délky níže).
- Přebytečná energie fotonu, která překračuje mezní energii, je přeměněna většinou v teplo
- Každý foton energeticky vyhovující λ (vlnové délce záření vygeneruje) jeden pohyblivý nosič náboje
- Každý z nosičů náboje vzniklý absorpcí světla může veškerou energii přijatou při odtržení od původního atomu předat spotřebiči coby užitečnou energii.

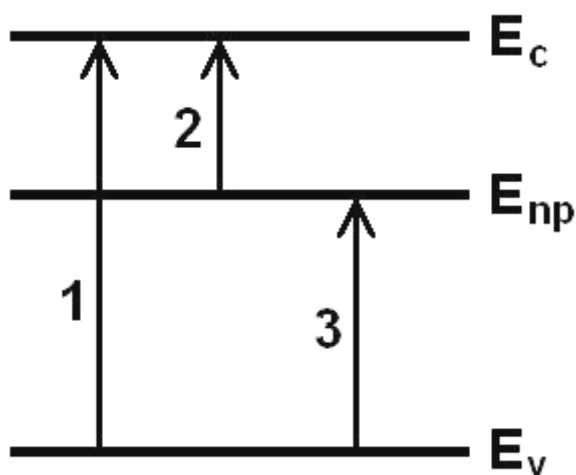
Tyto výchozí podmínky vymezují první nejvyšší hranici účinnosti, které může solární článek dosáhnout.

3.2. Fotoelektrické jevy v polovodičích

3.2.1. Vnitřní fotoelektrický jev

Vnitřní fotoelektrický jev je proces ionizace atomů polovodičů vlivem světla, který vede ke generování nadbytečných, nerovnovážných nosičů náboje. Dodatečná vodivost podmíněna vnitřním fotoelektrickým jevem nazýváme *fotovodivost*.

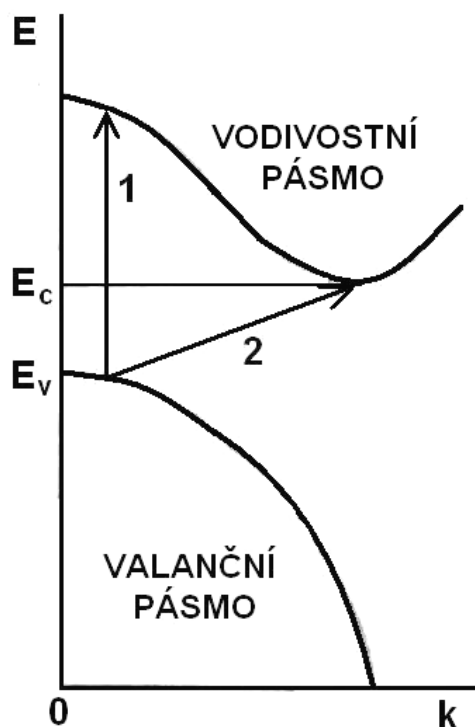
Prvotním procesem u vnitřního fotoelektrického jevu je absorpce fotonu s energií, která je dostatečná k vybuzení elektronu do vodivého pásu (přechody 1, 2 na obr. 3.1) nebo na lokální hladiny ležící v základním pásmu polovodiče (přechod 3). Přechod 1 vede ke generování páru elektron–díra, zatím co v důsledku přechodu 2 a 3 vznikají nosiče jen jednoho znaménka.



Obr. 3.1: Schéma možných optických přechodů elektronu

Když jde o optické vybuzení elektronu z valenčního pásma do vodivostního pásma, pozorujeme vlastní fotovodivost, kterou vytvářejí nosiče obou znamének. Energie fotonu $h\nu$ nesmí přitom být menší, jak šířka zakázaného pásma polovodiče ($h\nu \geq E_g = E_c - E_v$).

Pro přímé a nepřímé optické přechody elektronů krystalické mřížky platí zákon zachování kvaziimpulzu. Při interakci fotonu a elektronu přímý (vertikální) optický přechod (přechod 1, obr. 3.2). V krystalické mřížce je však značně pravděpodobný i složitější proces: interakce fotonu, elektronu a fononu (kvanta kmitů krystalické mřížky). Při takovém vzájemném působení elektron v podstatě nabírá energii fotonu a mění svoje vlnové číslo na úkor fotonu (přechod 2, obr. 3.2). Takové přechody nazýváme nepřímými (nevertikálními) optickými přechody[1].



Obr. 3.2: Přímé (1) a nepřímé (2) optické mezipásmové přechody

V případě složitějšího energetického pásma může přímým optickým přechodem zodpovědět větší energie jako přechodem termickým. Protože pravděpodobnost nepřímých optických přechodů je menší jak pravděpodobnost přímých přechodů, v absorpčních energetických spektrech fotonu, které zodpovídají přímým přechodem, musí být pozorovatelné více nebo méně prudké nárůsty absorpci a v důsledku toho i fotovodivosti.

Vlastní absorpční pásmo, které má vždy výrazně dlouhovlnnou hranu, může mít principálně i krátkovlnnou. v mnohých případech se však vodivostní pásmo překrývá s vyššími dovolenými pásmy a vznikající spektrum je spojitě. Proto se absorpční spektrum a spektrální závislost vnitřního fotoelektrického jevu rozprostírá daleko do krátkovlnných oblastí. Při velkých energiích fotonu ($h\nu \geq 2E_g$) fotopřechod elektronu do vodivostního pásma může být současně provázený jevem nárazové ionizace, která vede k uvolnění některých elektronů a děr. Následkem toho se teorie vnitřního fotoelektrického jevu shoduje s teorií absorpce jen v určitých oblastech spektra v blízkosti dlouhovlnné hrany vlastního absorpčního přechodu.

3.2.2. Fotovodivost

Nerovnovážné elektrony a díry, které vznikají jako důsledek interakce látky s fotony dostatečně vysokých energií, mohou mít bezprostředně po procesu ionizace mnohem větší energii jak je střední energie rovnovážných nosičů k_0T . Následkem vzájemného působení s fotony a defekty krystalové mřížky se nerovnovážné nosiče náboje rychle ohřívají na teplotu mřížky. Jejich energie se potom tedy rovná střední teplotní energii rovnovážných nosičů náboje. Tento proces proběhne za čas $\approx 10^{-10}$ až 10^{-12} s, který se rovná relaxační době nosičů náboje s ohledem na energii. Doba života nerovnovážných nosičů náboje značně převyšuje tuto veličinu a má hodnotu 10^{-2} až 10^{-8} s, a tedy po větší část doby života do rekombinace kinetická energie nerovnovážných nosičů náboje odpovídá střední tepelné energii rovnovážných nosičů. Z toho důvodu můžeme předpokládat, že v pásmech je rozdělení nerovnovážných nosičů náboje podle energie takové, jako při rovnovážných. To znamená, že pohyblivosti nerovnovážných nosičů se neliší od pohyblivostí rovnovážných, protože pohyblivosti elektronů μ_n a děr μ_p jsou určeny charakterem interakce nosičů náboje s mřížkou a závisí na rozdělení nosičů podle energie.

Generace nosičů náboje pod vlivem světla vede takto ke změně elektrické vodivosti polovodiče σ , která při existenci nerovnovážných elektronů s koncentrací Δn a děr s koncentrací Δp můžeme zapsat ve tvaru

$$\sigma = e[(n_0 + \Delta n)\mu_n + (p_0 + \Delta p)\mu_p] \quad (3.1)$$

kde n_0 a p_0 jsou koncentrace rovnovážných elektronů a děr. Nadbytečnost (nerovnovážná) vodivost, která se rovná rozdílu vodivosti polovodiče při osvětlení (σ) a bez osvětlení (σ_0), představuje vodivost

$$\sigma_f = \sigma - \sigma_0 = e(\Delta n\mu_n + \Delta p\mu_p) \quad (3.2)$$

Koncentrace nerovnovážných nosičů Δn a Δp závisí na intenzitě a době trvání osvětlení polovodiče.

Označíme množství nosičů náboje generovaných vlivem osvětlení $\Delta n'$ a $\Delta p'$. $\Delta n'$ a $\Delta p'$ musí být úměrné světelné energii pohlcené v objemové jednotce polovodiče za jednotku času. Když se intenzita monochromatického osvětlení vrstvy o tloušťce dx rovná I a koeficient absorpce látky je α , potom se množství světelné energie pohlcené za jednotku času v objemové jednotce rovná

$$-\frac{dI}{dx} = \alpha I \quad (3.3)$$

Počet generovaných nosičů $\Delta n'$ a $\Delta p'$ je tedy úměrný veličině αI . Pro oblast vlastní absorpce

$$\Delta n' = \Delta p' = \beta \alpha I \quad (3.4)$$

Koeficient úměrnosti β nazýváme kvantovým výtěžkem (fotoaktivitou), protože určuje počet párů nosičů náboje generovaných jednotlivým množstvím světla, když intenzitu světla I měříme počtem částic za sekundu. Kvantový výtěžek obvykle není větší jak jedna.

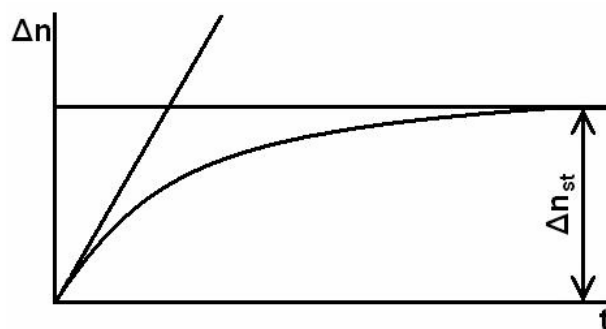
Při nepřetržitém osvětlení polovodiče světlem s konstantní intenzitou nastane stacionární stav charakterizovaný konstantou koncentrace nerovnovážných nosičů náboje Δn a Δp . Najdeme závislost Δn a Δp v čase t a určíme stacionární hodnotu koncentrace nerovnovážných nosičů náboje tak předpokládáme, že intenzita světla je konstantní v celém objemu vzorku, což vede k homogenní generaci nosičů náboje.

Ihned po zapojení zdroje světla úměrně se zvětšováním koncentrace nerovnovážných nosičů náboje začíná narůstat proces rekombinace. Protože rychlost generování nerovnovážných nosičů náboje při konstantním osvětlení zůstává konstantní, intenzita rekombinace rychle dosáhne intenzitu procesu generování nosičů a ustálí se na stacionární hodnotě nerovnovážné koncentrace fotonosičů Δn_{st} a Δp_{st} . (obr3.3).

Velikost těchto koncentrací jsou určeny množstvím nosičů generovaných světlem ($\beta \alpha I$), které se zdržuje v pásnu až rekombinace (do doby života τ)

$$\Delta n_{st} = \beta \alpha I \tau_n \quad (3.5)$$

$$\Delta p_{st} = \beta \alpha I \tau_p \quad (3.6)$$



Obr. 3.3: Časová změna koncentrace nosičů náboje při osvětlení

Stacionární hodnotě koncentrace nerovnovážných nosičů odpovídá stacionární stav nerovnovážné vodivosti

$$\Delta\sigma_{st} = \Delta\sigma_{nst} + \Delta\sigma_{pst} = e\beta\alpha I(\tau_n\mu_n + \tau_p\mu_p) \quad (3.7)$$

Veličiny α a β charakterizují vzájemné působení světla s látkou a popisují procesy generace nerovnovážných nosičů; pohyblivosti a doby života charakterizují interakci nosičů s látkou a determinují procesy transportu a rekombinace nerovnovážných nosičů náboje.

Když jeden z členů ve vztahu (3.7) je značně větší než druhý následkem rozdílných pohyblivostí (např. $\mu_n \gg \mu_p$), nebo doba života (např. $\tau_n \gg \tau_p$), potom je fotovodivost způsobena nosiči jednoho znaménka (v daném příkladě elektrony) a nazývá se monopólní

$$\Delta\sigma_{st} = e\alpha\beta I\tau_n\mu_n \quad (3.8)$$

3.3. Osvětlení PN přechodu solárního článku

Jestliže osvětlíme PN přechod světlem, vznikne nám fotoelektromotorické napětí, které se nazývá *elektromotorický bariérové napětí*. Na PN přechodu vzniká kontaktní rozdíl potenciálů. Potenciálová bariéra, která tímto vznikne je podmíněna elektrickým polem. Tohle elektrické pole je vytvořeno v důsledku difúze nosičů náboje přes PN přechod. U termodynamické rovnováhy je poloha Fermiho hladiny v celém systému konstantní. Energetické schéma PN přechodu pro tento případ je znázorněno na obr 3.4a.

Přes PN přechod se přesunují z oblasti N do oblasti P proudy elektronů $j_n^{(n)}$ a děr $j_p^{(n)}$ a opačným směrem z oblasti P do oblasti N proudy elektronů $j_p^{(p)}$ a děr $j_n^{(p)}$. Jestliže u

navrhovaných směrů přesunu budeme vycházet z obr 3.4, pak můžeme podmínky rovnováhy zapsat následovně:

$$-j_n^{(n)} + j_n^{(p)} - j_p^{(p)} + j_p^{(n)} = 0 \quad (3.9)$$

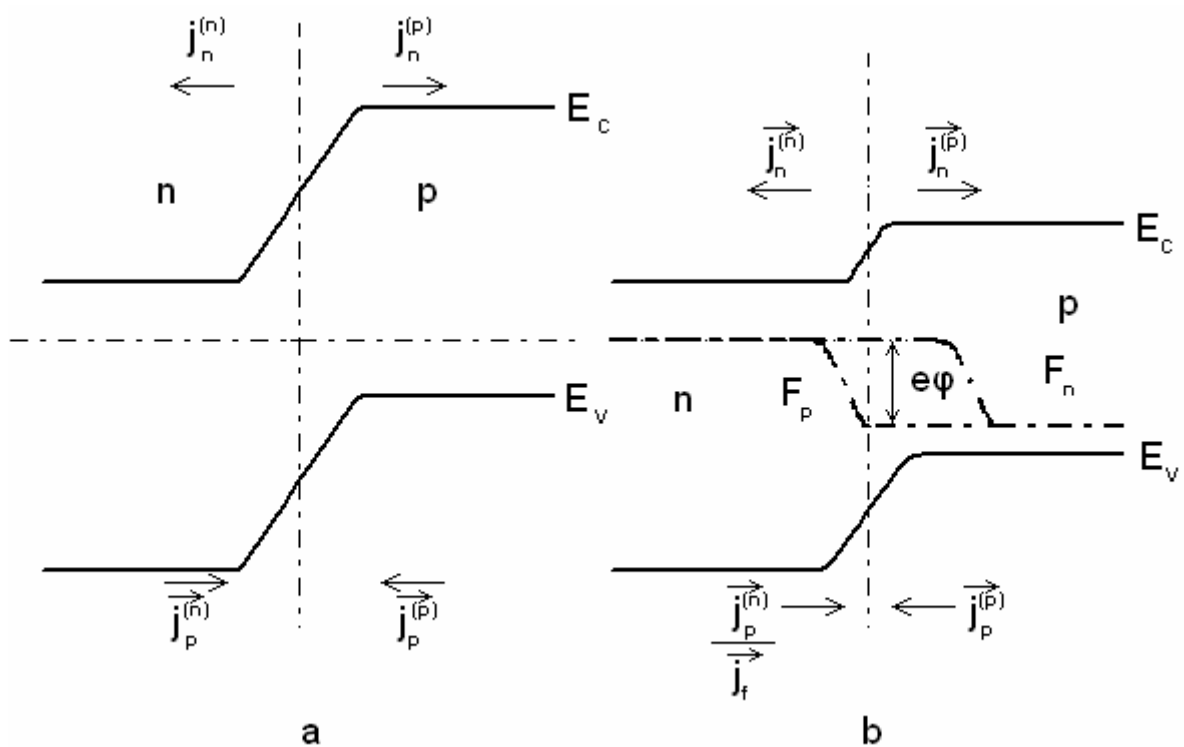
Z této rovnice lze odvodit, že oba páry proudů elektronů a děr jsou rovny nule

$$-j_n^{(n)} + j_n^{(p)} = 0 \quad \text{a} \quad -j_p^{(p)} + j_p^{(n)} = 0 \quad (3.10)$$

vzhledem k této skutečnosti a vzhledem k termodynamické rovnováze, je množství nosičů náboje přímého a zpětného směru stejné. Proudů minoritních nosičů elektronů z oblasti P a děr z oblasti N nejsou ničím jiným, než elektronovou a složkou nasyceného proudu voltampérové charakteristiky diody. Pak celkový nasycený proud je roven

$$j_s = j_{ns} + j_{ps} = \frac{eD_n n_p}{L_n} + \frac{eD_p n_n}{L_p} \quad (3.11)$$

Jestliže budeme zkoumáno chování osvětleného PN přechodu, kde bude osvětlena pouze jedna z oblastí (např. elektrony), tak jak je tomu na obr 3.4b, pak přítomné světlo zapříčiní v elektronovém polovodiči generování párů elektron-díra. Když vzdálenost od místa vzniku párů k PN přechodu znázorňuje veličinu menší než je délka difuzního posunu, pak se páry v důsledku difúze přibližují k přechodu, kde se pod vlivem kontaktního pole oddělí. Díry, pro které potenciálová bariéra neexistuje projdou kontaktním polem do polovodiče typu P. Dodatečný proud typu P, který je vyvolaný osvětlením označíme j_f . Změnu koncentrace elektronů můžeme zanedbat, protože nerovnovážné elektrony rychle nabývají rozdíl teploty vzorky jen velmi malá část z nich překoná potenciálovou bariéru a přejde do polovodiče typu P. Dodatečný děrový proud, který přechází z polovodiče N a nabíjí kladně polovodič typu P ve vztahu k polovodiči typu N. Následkem toho se hladina energie elektronů v oblasti P snižuje, jak je znázorněno na obr 3.4b. Tím, díky separaci nábojů dojde ke vzniku dodatečné složky elektrického pole a tudíž ke vzniku potenciálového rozdílu na PN přechodu, který představuje fotoelektromotorické napětí. Zároveň se mění i velikost potenciálové bariéry, která byla u neosvětleného PN přechodu. Vznikající fotoelektromotorické napětí tuto bariéru zmenšuje a to opět vede ke vzniku dodatečných toků majoritních nosičů, které směřují proti sobě. Odpovídající proudy vždy směřují stejným směrem z oblasti P do oblasti N (obr 3.4b). Tyto proudy mají podobný charakter, jako proudy tekoucí přes přechod, když k němu přiložíme napětí v propustném směru.



Obr. 3.4: Energetické schéma PN přechodu a proudy nosiče náboje při termodynamické rovnováze (a) a při osvětlení (b)

Stacionární stav nastane tehdy, jestliže množství párů elektron-díra vybuzených světlem je rovno počtu nosičů náboje, který je odváděn díky proudem přes PN přechod do vnějšího zdroje, kde protéká proud j . Proto se osvětlený polovodič, který obsahuje PN přechod, bude jevit jako fotočlánek.

K určení bariérového fotoelektrického napětí, které odpovídá stacionárnímu stavu, lze vyvodit vztah:

$$j_f - j_n^{(n)} + j_n^{(p)} - j_p^{(p)} + j_p^{(n)} = j \quad (3.12)$$

Z obr 3.4b vyplývá, že hodnoty proudů minoritních nosičů $j_n^{(p)}$ a $j_p^{(n)}$ při osvětlení, se v tomto vztahu rovnají hodnotám, které mají v rovnovážném stavu

$$j_n^{(p)} = j_{ns} \quad \text{a} \quad j_p^{(n)} = j_{ps} \quad (3.13)$$

Proudy osvětlených majoritních nosičů $j_n^{(n)}$ a $j_p^{(p)}$ se zvětší o $e\varphi$, což je způsobeno zmenšením potenciálové bariéry

$$j_n^{(n)} = j_{ns} \exp\left(\frac{e\varphi}{k_0T}\right) \quad (3.14)$$

$$j_p^{(p)} = j_{ps} \exp\left(\frac{e\varphi}{k_0T}\right) \quad (3.15)$$

Jestliže dosadíme rovnice 3.13 až 3.15 do výrazu 3.12 pak dostaneme vztah

$$j_f - j_{ns} \left[\exp\left(\frac{e\varphi}{k_0T}\right) - 1 \right] - j_{ps} \left[\exp\left(\frac{e\varphi}{k_0T}\right) - 1 \right] = j \quad (3.16)$$

a to se rovná

$$j_f = j_s \left[\exp\left(\frac{e\varphi}{k_0T}\right) - 1 \right] + j \quad (3.17)$$

z čehož pro potenciálový rozdíl PN přechodu vyjádříme

$$\varphi = \frac{k_0T}{e} \ln \left[1 + \frac{j_f - j}{j_s} \right] \quad (3.18)$$

Tato rovnice se nazývá *všeobecnou rovnicí fotodiody* a vyhovuje všem režimům.

K určení bariérového fotoelektromotorického napětí, které je stejné jako napětí naprázdno, je nutné j položit rovno 0 ($j=0$). Potom

$$\varphi_{ven} = \frac{k_0T}{e} \ln \left(1 + \frac{j_f}{j_s} \right) \quad (3.19)$$

Hodnota j_f je dána počtem nerovnovážných děr, které byly vygenerovány za pomoci světla a které se dostali do PN přechodu. Když počet světelných částic dopadajících každou sekundu na určitou plochu označíme I , a jejich kvantový výtěžek (počet párů nosiče vygenerovaných jednou částicí dopadajícího světla) označíme β a počet nerekombinovaných párů nosiče náboje, které dorazily k PN přechodu označíme γ , pak

$$j_f = e\gamma\beta I \quad (3.20)$$

Odkud

$$\varphi_{ven} = \frac{k_0 T}{e} \ln \left(1 + \frac{e \gamma \beta I}{j_s} \right) \quad (3.21)$$

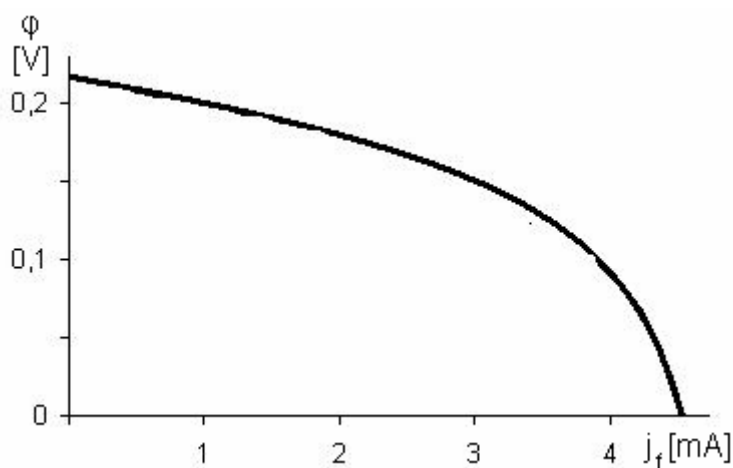
Při vysoké úrovni osvětlení, když $\frac{j_f}{j_s} \gg 1$, dostaneme

$$\varphi_{ven} = \frac{k_0 T}{e} \ln \frac{e \gamma \beta I}{j_s} \quad (3.22)$$

A při nízké úrovni osvětlení, když $\frac{j_f}{j_s} \ll 1$ a logaritmus rozložíme, pak

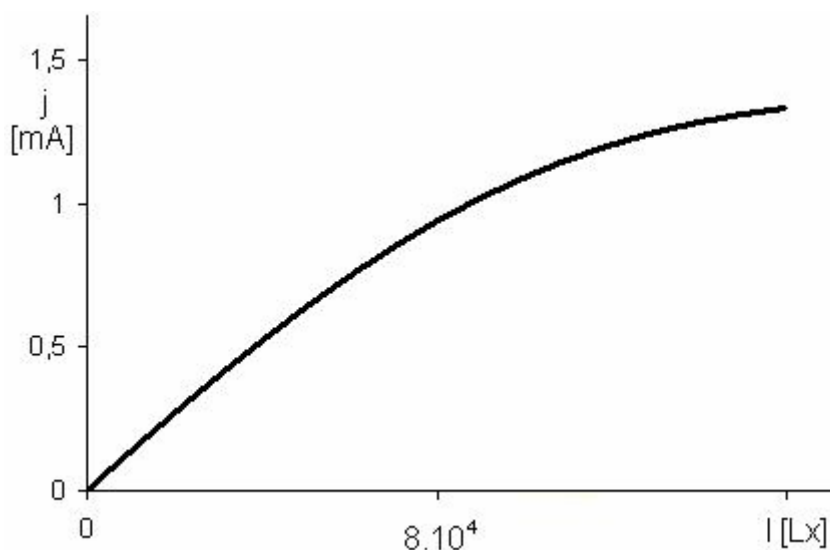
$$\varphi_{ven} = k_0 T \frac{\gamma \beta I}{j_s} \quad (3.23)$$

Z toho můžeme odvodit, že bariérové fotoelektromotorické napětí při nízké úrovni světla, je úměrné intenzitě světla.



Obr. 3.5: Voltampérová charakteristika germániové fotodiody

Získané závislosti bariérového fotoelektromotorického napětí a intenzity osvětlení jsou dosti podobné s exponenciálními údaji, což můžeme zhlednout na obr 3.5 a 3.6, na kterých je graficky zpracována voltampérová a luxampérová pro germániovou fotodiodu v bariérovém režimu. Z obr. 3.5 můžeme vypočítat, že malému proudu odpovídá extrémní hodnota fotoelektromotorického napětí, při daném osvětlení.



Obr. 3.6: Luxampérová charakteristika germániové fotodiody

3.4. Postup výroby monokrystalických solárních článků

Monokrystalické křemíkové solární články se skládají z několika vrstev, přičemž na spodní i vrchní straně je nanášena vodivá metalizace, která odvádí proud z článku. Nad spodním kontaktem je nanášena tenká vrstva P^+ o průměru v řádu $0,1\mu\text{m}$ s vysokou dotací příměsí (větší než 10^{24} atom/ m^3). Pak následuje tlustá vrstva P, která je řádově několik stovek μm tlustá a s menší dotací příměsí (menší než 10^{24} atom/ m^3). Nad ní je tenká oblast typu N o tloušťce do $1\mu\text{m}$ s dotací příměsí menší než 10^{26} atom/ m^3 a je pokryta sběrnou vodivou sítí a antireflexní vrstvou. Sběrná síť musí mít co nejmenší odpor a co nejmenší sběrnou plochu (u 4^{e} článků zabírá 8,04% povrchu), aby nevznikaly ztráty a nezmenšovala se plocha článku.

Pro monokrystalické články je možné použít následující postup a v upravené verzi také pro multikrystalické křemíkové desky. Etapy výroby jsou následující:

- Alkalické leptání – plátky polovodiče typu P se odleptávají mokrou chemickou cestou o několik mikrometrů pomocí bóru, přičemž zároveň dojde k zarovnání poškozené vrstvy při řezání.
- Texturace - Na povrchu Si desky se leptáním vytvoří mikroskopické pyramidy, které zlepšují pohlcování světla (světlo se neodráží od článku, ale na pyramidkách se pod různými úhly lomí a odráží na okolní strany pyramid). Texturování se provádí jak u článků z monokrystalického tak i polykrystalického materiálu.
- Vytvoření PN přechodu na přední straně křemíkových desek difúzí fosforu. Difúze se provádí ve vyhřívané peci při teplotě $+800^{\circ}\text{C}$, kdy se dostává do povrchové vrstvy fosfor z nosného plynu a dochází ke vzniku N vrstvy. Poté se plátky poskládají a nechá se působit kyslíková plazma o vysokém kmitočtu, která izoluje N vrstvu na hranách. K zajištění nízkého kontaktního odporu je potřebné dosáhnout vysoké koncentrace fosforu pod tisknutými kontakty.
- Deponování antireflexní vrstvy - Jako antireflexní povlak se používá oxid titaničitý (TiO_2) a nitridy křemíku (SiN_x). Povlak se na povrch článku nanáší nejčastěji napařováním (CVD). Kromě antireflexních vlastností plní povlak ještě funkci pasivační vrstvy, což zlepšuje elektrické vlastnosti článku.
- Tisk zadní strany metodou sítotisku - Hliníková vrstva natisknutá na zadní stranu článku vytvoří kontaktní pole (BSF – back surface field). Protože na hliník nelze pájet, musí se natisknout ještě vrstva Al/Ag, aby spoje byly pájitelné. Pro zjednodušení výrobního postupu lze tisk Al a Al/Ag sloučit do jednoho kroku a tisknout přímo vrstvu Al/Ag. Následuje tisk přední strany.
- Sintrace kovové pasty - Vrstvy se spékají při vysoké teplotě, kdy obsažený hliník v pastě proniká skrz N vrstvu a mění ji na typ P.
- Testování – testování elektrických a optických vlastností

Výrobní postup je neustále vylepšován a hledá se cesta ke zvýšení celkové účinnosti monokrystalického křemíkového článku, který má stále největší účinnost ze všech druhů fotovoltaických článků.

Tab. č.1: Základní parametry solárních článků

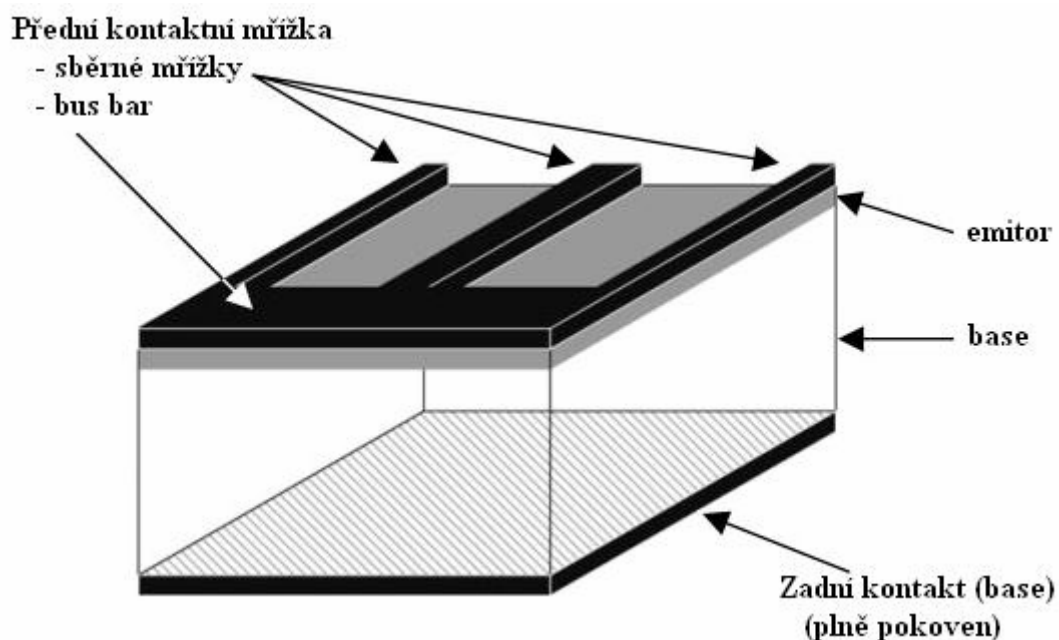
Parametr	Emitor (n- <i>typ</i>)	Báze (p- <i>typ</i>)
Tloušťka [μm]	0,5	300
Dopace [cm^{-3}]	1×10^{19}	1×10^{16}
Difúzní konstanta minoritních nosičů [$\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$]	2	40
Doba života minoritních nosičů [s]	1×10^{-6}	5×10^{-6}
Difúzní délka minoritních nosičů [μm]	14	140
Povrchová rekombinační rychlost [$\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$]	10 000	10 000
Odrazivost	0,05	-
Absorpce: v 500 nm / cm^{-1}	15 000	-
: v 1 μm / cm^{-1}	35	-

4. Zadní strany solárních článků

4.1. Koncepty využitelností zadní strany solárního článku

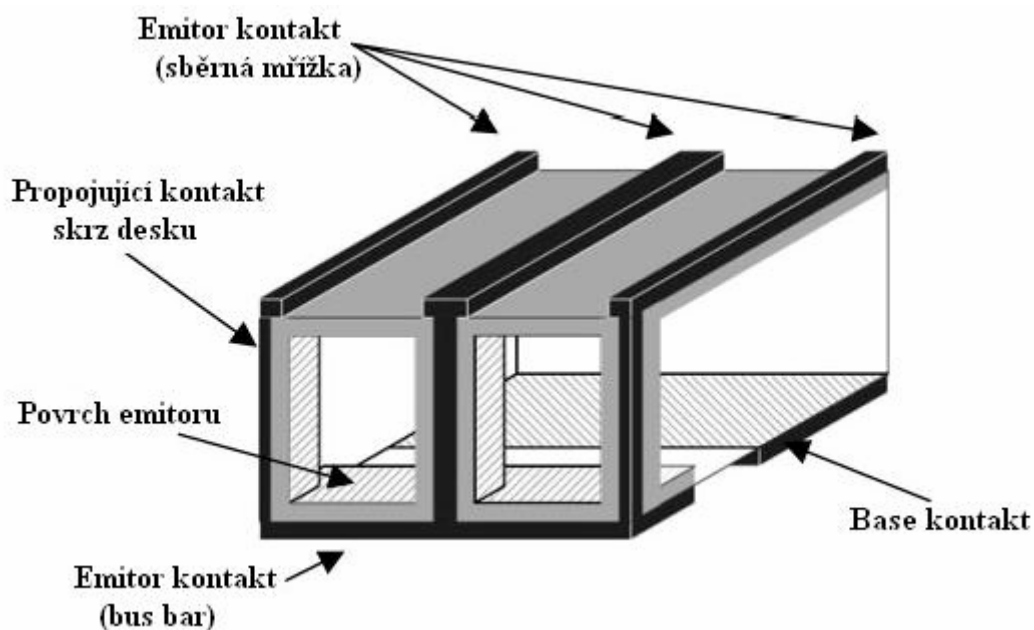
V této kapitole bych rád shrnul výzkum a vývoj zadních stran solárních článků za poslední desetiletí. Ještě před vstupem do dané problematiky by bylo vhodné představit strukturální vlastnosti. Metallisation wrap-through (MWT), emitter wrap-through (EWT) a back-junction (BJ) buněčné struktury. Tyto 3 typy tvoří základní dělení buněčné struktury zadních stran solárních článků.

Na obr. 4.2 je znázorněno schématické konvenční rozložení monokrystalického křemíku v solárních člancích. Křemík je hlavní stavební prvek solárních článků. Základní materiál křemíku (base) je typu P a dotovaná vrstva (emitor) je typu N. Na emitoru je umístěna kovová mřížka solárního článku (přední plocha). Slouží k připojení přístrojů na solární články. Zadní plocha bývá často celá pokryta pokovenou vrstvou (jak můžete vidět na obr. 4.2) oproti přední straně, kde je zapotřebí zamezit optickým ztrátám. Pokrytí přední strany musí být ale dostatečně husté, aby se zamezilo i vzniku odporových ztrát. Tudíž se hledá optimální kompromis. Většina výrobců na předních stěně používají tenké rovnoběžné linie svedené do centrální sběrnice (bus bar). Bus bary jsou poměrně široké a slouží k připojení solárního článku.



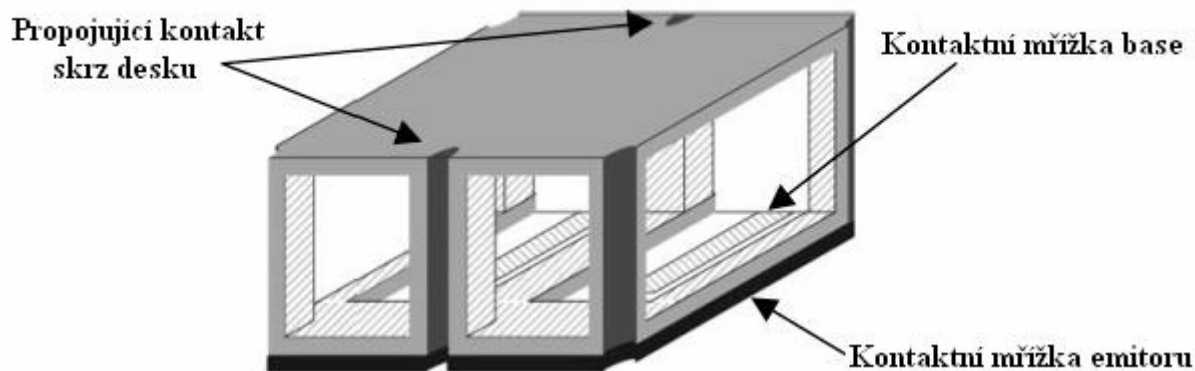
Obr. 4.2: Schématické znázornění konvenčních solárních článků[8]

Schematické rozložení solárního článku Metallisation wrap-through (MWT) je znázorněno na obr. 4.3. Jedná se o koncept, kde emitor je umístěn na přední plochu. Dále lze na obr. 4.3 pozorovat způsob převedení části předního kontaktu na zadní plochu solárního článku, což je zajištěno pomocí otvorů skrze destičku. Tím pádem se více odkryje přední plocha a silný bus bar se přesune na zadní stranu solárního článku.



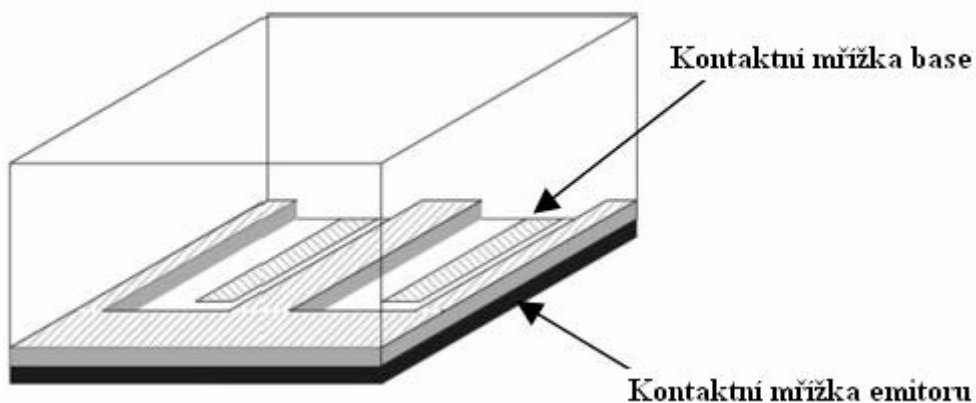
Obr. 4.3: Schématické znázornění MWT solárních článků[8]

V konceptu emitter wrap-through (EWT) článků je stále zachována vrstva emitoru na přední stěně článku, ovšem již bez jakéhokoli pokovení (stínění). Veškeré kontakty jsou umístěny na zadní ploše článku. Na obr. 4.4. je znázorněno, jakým způsobem je připojen kontakt na emitor a přesunut na zadní stranu. Toto propojení je zajištěno pomocí jamek v substrátu, které jsou obaleny vrstvou emitoru.



Obr. 4.4: Schématické znázornění EWT solárních článků[8]

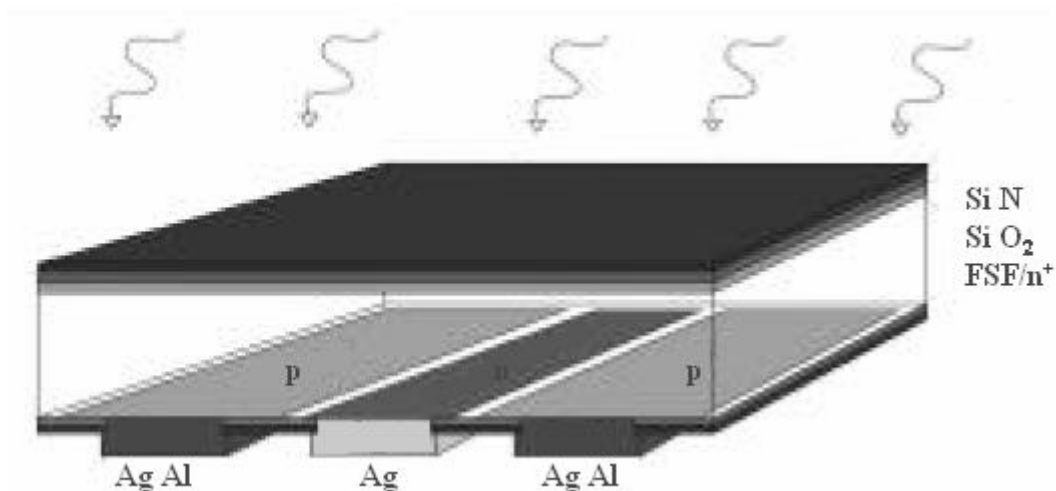
A na závěr back-junction (BJ) koncept, kde emitor se již nenachází v blízkosti přední plochy, ale je přesunut spolu s kontakty na zadní plochu jak je znázorněno na obr. 4.5.



Obr. 4.5: Schématické znázornění BJ solárních článků[8]

4.2. Struktura zadní strany IBC článku

U solárních článků se v dnešní době klade důraz na spolehlivost a účinnost. Z tohoto důvodu firmy, zabývající se touto problematikou, investují nemalé finanční částky do výzkumu a vývoje. Jedním z prvořadých cílů u moderních solárních článků je snížení výrobních nákladů a zvýšení výkonu (účinnosti). Vývoj zadních stran je dnes především zaměřen na možnost snadného kontaktování článků a větší hustotu pokrytí, stejně tak jako použití tenčího substrátu s větší plochou.



Obr. 4.1: Design struktury IBC článku [9]

V těchto dvou ohledech má zadní interdigitální kontakt (IBC) článků největší výhody. Výhodou IBC článku je především to, že nemusíme hledat kompromis mezi zastíněním přední strany a odporovými ztrátami a to zejména u velkých substrátů. Navíc článek typu IBC profitují i z použité velice tenké desky. Testy u IBC článků potvrdily vysokou účinnost.

Konstrukce IBC článků se výrazně liší od tištěných článků. Je zpracována na N typu dotovaného substrátu. A to z důvodu vyšší doby života nosiče a difúzní délce ve srovnání s P typem substrátu. IBC článek nemá žádné kontakty na přední straně. Veškeré sběrné kontakty jsou umístěny na zadní straně solárního článku.

5. Metody charakterizace solárního článku

5.1. Měření elektrických parametrů solárních článků

Elektrické parametry jsou nejdůležitějšími při určování vlastností a výkonu vyrobených solárních článků ve společnosti Solartec s.r.o. Měření probíhá při intenzitě osvětlení 1 kW/m^2 při teplotě 25°C . Spektrální složení odpovídá slunečnímu spektru AM1,5.

Základním parametrem, který se sleduje, je proud tekoucí článkem při napětí 450 mV (značí se I_{450}). Jde o tzv. třídící proud, pomocí kterého jsou solární články rozděleny do výkonnostních tříd.

Následující elektrické globální parametry se zjišťují u všech sériově vyrobených článků. Jedině tak je možnost zajistit vysokou kvalitu produkovaných článků a následně celých panelů.

- Zkratový proud (I_{SC})

Proud tekoucí článkem při 0 V . Lze ho měřit pouze speciálním přístrojem, protože běžné ampérmetry mají vnitřní odpor kolem $100 \text{ m}\Omega$ a napětí na článku může být při takovém měření cca 300 mV .

- Napětí naprázdno (U_{OC})

Napětí solárního článku bez připojené zátěže.

- Maximální proud (I_M)

Proud, při kterém článek dodává největší výkon.

- Maximální napětí (U_M)

Napětí, při kterém článek dodává největší výkon.

- Maximální výkon (P_M)

Výkon, který je článek schopen dodávat do spotřebiče. Největší výkon článku je na charakteristice přibližně uprostřed naměřeného „kolena“. Připojené zařízení by mělo být navrženo tak, aby odebíralo energii z článku právě v tomto místě. Jen tak lze maximálně využít celkový výkon článku.

$$P_M = |U_M \cdot I_M| \quad (5.1)$$

- Ideální sluneční výkon (P_O)

Jeho hodnota je určena vztahem (5.2)

$$P_O = |I_{SC} \cdot U_{OC}| \quad (5.2)$$

- Sériový odpor (R_{SO})

Odpor, který je určen součtem odporu substrátu, vrstev, přechodů a kontaktů.

- Paralelní odpor (R_{SH})

Tento odpor je určujícím pro kvalitu PN přechodu v oblasti vnitřních zkratů, především výskytu nežádoucích krystalových defektů.

- Charakteristický odpor (R_{CH})

Je určen podle vztahu (5.3) [7] poměrem napětí naprázdno a zkratového proudu.

$$R_{CH} = \frac{U_{OC}}{I_{SC}} \quad (5.3)$$

- Činitel zaplnění (FF - Fill Factor) lze určit pomocí jednoduchého vztahu (5.4)

$$FF = \frac{I_M \cdot U_M}{I_{SC} \cdot U_{OC}} = \frac{P_M}{P_O} \cdot 100[\%] \quad (5.4)$$

- Účinnost solárního článku (EEF – Energy Efficiency Factor)

U monokrystalických článků se pohybuje okolo 15%.

5.2. Měření materiálových vlastností a defektů

K určování vlastností křemíkových solárních článků se používá několik metod. Některé se používají pro zjišťování elektrických vlastností a parametrů přechodu, další metody zkoumají defekty materiálu vyrobených článků.

5.2.1. Měření elektrických vlastností

Solární simulátor

Pro měření elektrických vlastností sériově vyrobených křemíkových solárních článků se ve společnosti Solartec s.r.o. používá tzv. solární simulátor s testerem. Toto zařízení osvětluje článek zářením o intenzitě 1000 W/m² jehož spektrální složení odpovídá slunečnímu spektru AM 1,5, při teplotě 25°C. Tímto simulátorem je zajištěné rychlé měření všech důležitých elektrických parametrů, viz kap.5.1.

VA charakteristika

Další metodou pro určení vlastností solárních článků, je měření VA charakteristiky za tmy. 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 poměrně snadno proměřit článek v propustném i závěrném směru. Při změně výšky potenciálové bariéry PN přechodu bude ovlivněn proud majoritních nosičů přechodem, proud minoritních nosičů v opačném směru zůstává stejný.

V propustném směru při snížení potenciálové bariéry difunduje přes přechod více majoritních elektronů a děr. Tím se zvýší difúzní proud, driftový proud naopak klesne. Majoritní nosiče po průchodu přechodem injektují do kvazineutrálních oblastí na obou stranách přechodu. Tím zvyšují koncentraci minoritních nosičů. Proud v propustném směru proto exponenciálně závisí na přiloženém napětí.

V závěrném směru dojde při zvýšení potenciálové bariéry ke snížení majoritního počtu nosičů, čímž dojde ke snížení difúzního proudu. Driftový proud však zůstává stejný. V kvazineutrálních oblastech tak klesne koncentrace minoritních nosičů náboje.

CV charakteristika

Dalším možným využitím programu EasyPlot je měření CV charakteristik. To se používá jako nástroj pro určení parametrů struktury polovodičových součástek. Teorii kapacity je možné vysvětlit na principu deskového kondenzátoru. Kdykoliv je mezi náboje odlišné polarity vloženo elektrické pole, objeví se mezi náboji elektrický potenciál, který je definován vztahem (5.5)

$$q = C \cdot V \tag{5.5}$$

Dioda (PN přechod) je nejjednodušší polovodičovou součástí, na které lze pozorovat výskyt kapacity. Kapacita vzniká v depletiční oblasti modulací střídavým napětím. Přechod na diodě je podobný přechodu solárního článku. Na přechodu vzniká zaprvé bariérová kapacita vytvořená dvojrivrstvou prostorového náboje v depletiční vrstvě a zadruhé difúzní kapacita, která je tvořena akumulací náboje důsledkem průchodu proudu přes přechod. Celková kapacita přechodu je určena součtem obou zmiňovaných. Z průběhu závislosti kapacity na napětí můžeme usoudit o jaký charakter přechodu se jedná. Pokud je $n = -1/2$ jedná se o strmý Schottkyho přechod, $n = -1/3$ charakterizuje Shockleyho přechod. Měření křemíkových solárních článků se provádí podle závislosti $C^{-2} = f(U)$. Ze směrnic přímky výsledných grafů lze určit především koncentraci příměsí. Navíc průsečík této závislosti s napěťovou osou určuje difúzní potenciál.

5.2.2. Měření materiálových vlastností a defektů

Elektroluminiscence

Tato metoda zobrazuje výsledky tak, že je možné je vizuálně kontrolovat. Výsledky je možné srovnat s metodou LBIC, ale celkové měření trvá pouze několik sekund, kdežto u metody LBIC několik hodin. Tato metoda také detekuje některé defekty, které LBIC neodhalí.

Nejčastější měření solárního článku probíhá v propustném směru, kdy se při dopadu slunečního záření aktivuje přechod PN. V této metodě naopak dochází ke světelné emisi díky zářivé rekombinaci křemíku při průchodu proudu. Defekty nevyzařují žádné světlo a jsou jasně viditelné.

EL emise, díky zářivé mezipásmové rekombinaci při pokojové teplotě v propustném směru krystalického solárního článku, je zkoumána komerčně používanou CCD kamerou a využívá převážně šedou stupnici zobrazení. Zanedbáme-li opětné využití fotonů, můžeme říci že, měření fotonového proudu přímo souvisí s lokálním rozdělením kvazi Fermiho hladin $E_{Fn} - E_{Fp}$ a vychází tak ze vztahu

$$\Phi_{EL} \propto \int_0^w U_{rad} dz = \int_0^w B p n_- dz = n_i^2 \int_0^w B \exp\left(\frac{E_{Fn} - E_{Fp}}{k_B T}\right) dz \quad (5.6)$$

kde w je tloušťka článku. Pokud analyzujeme EL zobrazení, je důležité vědět, že do elektroluminiscenčního signálu přispívají tři složky. Díky zužování zakázaného pásu je PN

přechod více dopován emitory a BSF oblast je více porovnávána se základnou(base). Navzdory malé tloušťce těchto oblastí lze očekávat vysoké příspěvky do EL signálu. Nicméně zářivý rekombinační koeficient B silně závisí na koncentraci volných nosičů náboje a značně klesá s rostoucím dotací koncentrace. Pokud vezmeme v úvahu oba efekty, můžeme spočítat kumulaci zářivé rekombinační rychlosti U_{rad} pro průmyslově vyráběný solární článek.

Výsledné zobrazení umožňuje vizuálně rozlišit jednotlivé defekty a určit případně jejich příčinu.

Mikroplasma

Další metodou, při které se využívá CCD kamera je metoda měření mikroplasmem. Solární článek je však zapojen v závěrném směru a regulovatelným zdrojem je zvyšováno napětí s opačnou polaritou. Výsledkem je vybuzení fotonů a dojde k zářivé rekombinaci v lokálních místech, kde dochází k lavinovým průrazům různé intenzity. Tato místa mohou způsobit průraz celého článku. Pokud dojde na jednom místě k silnému výboji, je možné tento jev pozorovat v temné komoře i pouhým okem. Tento jev však má za následek degradaci nebo úplné zničení solárního článku.

Na metody elektroluminiscence a vyzařování světla z mikroplasmatu se zaměří praktická část této práce.

LBIC

Jednou z používaných metod pro charakterizaci solárních článků je metoda LBIC (Light Beam Induced Current). Jedná se o metodu, při které fokusovaným paprskem světla (laser) ozařujeme postupně v osách XY celý článek. Výsledkem je proudová mapa, která popisuje chování článku. Z této mapy lze vyčíst větší část lokálních defektů. Aby byly výsledky co možná nejlepší, je potřeba správně zvolit kontrast obrázku. Výsledek této metody je také závislý na vlnové délce použitého laseru. Pro každou barvu je různá hloubka vniku do materiálu. Pro ještě lepší výsledek je vhodné nastavit co možná nejmenší krok (přesnost).

Výhodou této metody je přehledný výsledek v podobě proudové mapy celého článku, ze které můžeme snadno určit defekty materiálu. Taky můžeme snadno změnit barvu

použitého laseru a proměřit článek na jiných vlnových délkách. Nevýhodou je relativně dlouhá doba při nejdetailejším snímání [7].

Rychlé rastrování

Ze stejného fyzikálního principu vychází další metoda. Jde o metodu rychlého rastrování. Rozdíl je ve způsobu použití světelného zdroje. Oproti metodě LBIC, které používá bodový zdroj světla silně fokusovaný, používá metoda rychlého rastrování jako zdroj světla pás sestavený z LED pro SMD aplikace. Tento pás má délku přes 100 mm a dokáže tak bez problémů ozářit článek v celé šířce. Samotné snímání probíhá postupně v osách X a Y. Následně lze z proudových odezvy rozpoznat rozložení defektů na ploše celého článku. Tato metoda umožňuje stejně jako LBIC použít zdroj světla o různých vlnových délkách a provést měření pro různé hloubky vniku. V současné době ještě není pořádně prozkoumaná. Má však díky rychlosti měření potenciál do budoucna a je žádoucí ji dále vyvíjet.

LBIV

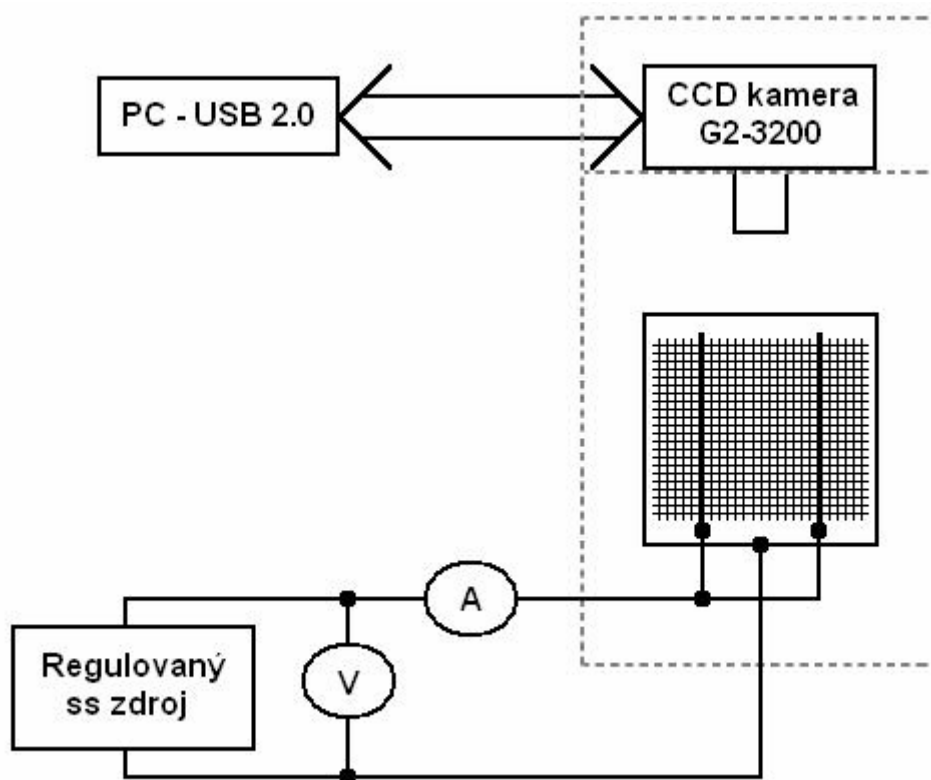
Poslední metodou, pracující na principu odezvy na ozáření polovodičového přechodu, je metoda LBIV (Light Beam Induced Voltage). V principu jde o skenování vrstev solárních článků pro detekci defektů za pomoci lokálního ozáření monochromatickým světlem o různé vlnové délce. Odezvou na ozáření je pak napěťová mapa, ze které lze určit defekty v solárním článku.

6. Praktická část

Experimentální část této práce bude věnována především rozboru zadních stran solárních článků a případné porovnání s předními stranami. K tomuto účelu využijeme laboratorní pracoviště, které je blokově znázorněno na obr. 6.1. Zadní strany solárních článků budou zkoumány pomocí metody elektroluminiscence a vyzařování světla z mikroplasmatu. Princip těchto metod je popsán níže v kapitole 5.2.2 Měření materiálových vlastností a defektů.

6.1. Popis pracoviště

Celé laboratorní pracoviště znázorněné na blokovém schématu obr.6.1 se nachází na Ústavu elektrotechnologie VUT v Brně. Pracoviště je určeno ke zkoumání solárních článků. A to především ke zkoumání materiálových defektů v solárních člancích. Skládá se ze zatemněné komory, ve které je umístěna snímací CCD kamera G2-3200. Pod ní je na kontaktním poli umístěn zkoumaný solární článek. Cílem tohoto měření je diagnostikovat zadní strany solárních článků a následně je porovnat s hodnotami zjištěnými u předních stran. Z tohoto důvodu bude solární článek nejprve snímán z přední strany a následně otočen, aby bylo možné tyto výsledky porovnat a vyvodit patřičné závěry. Kontaktní pole (solární článek) je napájeno pomocí regulovatelného zdroje stejnosměrného napětí a proudu AGILENT. Data, která CCD kamera zachytí, jsou pomocí rozhraní USB 2.0 přenesena do počítače a za pomocí programu SIMS zpracovány. Pomocí programu SIMS lze kompletně s CCD kamerou komunikovat a také ji nastavit dle našich potřeb. Následně v tomto programu můžeme příchozí data z CCD kamery editovat.



Obr. 6.1: Blokové schéma laboratorního pracoviště

6.2. Užité měřící metody

Metoda elektroluminiscence

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. Princip této metody spočívá, jak již napovídá název, v elektroluminiscenci. Elektroluminiscence je děj, při kterém dochází k přeměně elektrické energie na světelnou. Projevuje se u polovodičů se širokým zakázaným pásmem. Solární článek obsahuje také PN přechod. V podstatě se jedná o přechod s velkou plochou. Po připojení ke zdroji napětí se pak solární článek chová jako LED dioda s velkou plochou.

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 světlá (malé tmavší body) indikují poruchu ve struktuře materiálu (nehomogenita difúzní vrstvy PN přechodu). Porucha může být dána nepravidelností ve struktuře monokrystalu. Naopak výrazně světlejší místa znázorňují oblasti s vyšší proudovou hustotou. Jak je vidět na snímcích, jde většinou o místa kontaktů se solárním článkem.

Metoda vyzařování světla z mikroplasmatu

Tato metoda umožňuje detekci procesních defektů solárního článku. Během měření je článek připojen ke zdroji napětí v závěrném směru. Princip vzniku emise světla z mikroplasmatu 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 závislé na ploše článku, resp. dodaného výkonu do článku. Vznik mikroplasmy při výboji v polovodiči je obvykle doprovázen emisí světla, kterou zachycujeme kamerou a následně analyzujeme. V solárním článku, jako plošném PN přechodu, vzniká mikroplasma v místech, ve kterých je PN přechod nehomogenní nebo je například poškozen škrábancem. V oblasti mikroplasmy může protékat značně velký proud a tím způsobit lokální ohřev v takové úrovni, kdy může dojít k zničení PN přechodu. Proto je nutné při této metodě pečlivě nastavovat závěrné napětí. Jinak může dojít k nevratnému poškození struktury.

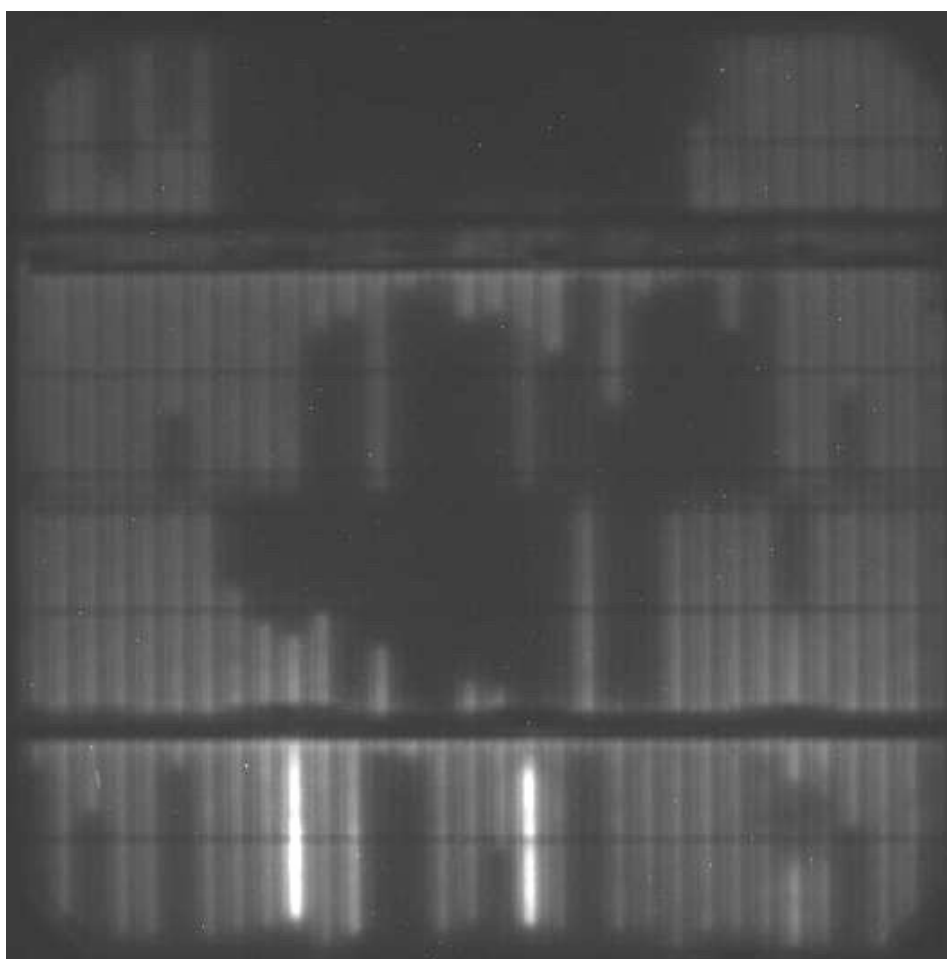
6.3. Zhodnocení výsledků laboratorního měření

Laboratorní měření bylo prováděno v laboratoři na Ústavu elektrotechnologie. Bylo využito dostupných zdrojů. K odzkoušení zadních stran solárních článků bylo zamýšleno využít metodu elektroluminiscence a metodu vyzařování světla z mikroplasmatu. Princip těchto metod již byl popsán níže. V následujícím pojednání je možné zhlédnout výsledky měření, které jsou graficky přehledně zpracovány.

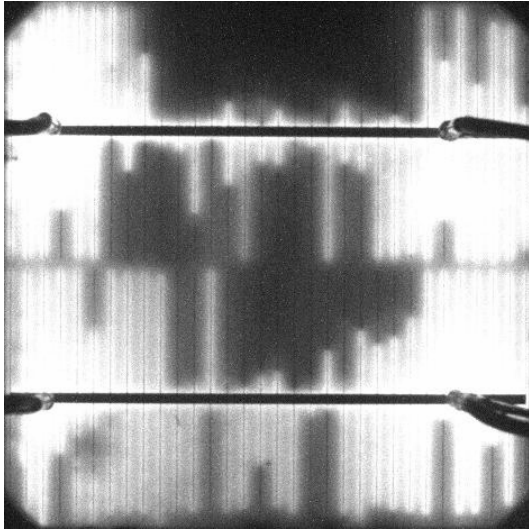
Elektroluminiscence

Na snímku, který je na obr. 6.2, je znázorněna zadní strana solárního článku. Tento snímek byl pořízen za pomoci metody elektroluminiscence. Solární článek byl napájen zdrojem stejnosměrného napětí $U = 1,7 \text{ V}$ a proudem $I = 4 \text{ V}$ a zapojen v propustném směru pro

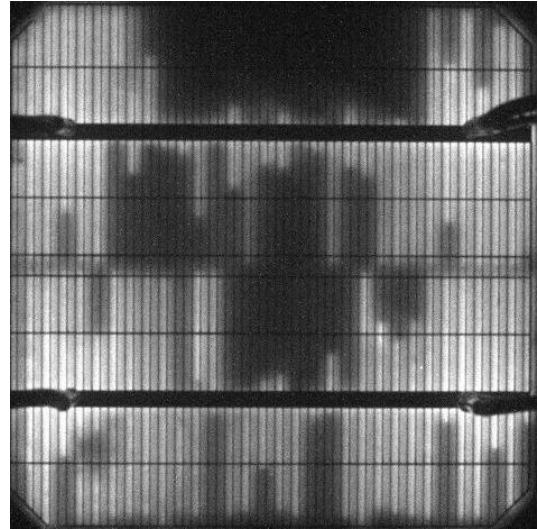
zadní stranu (v podstatě se jedná o zapojení v závěrném směru pro přední stranu solárního článku a přitom je zkoumána zadní strana). Na obr. 6.2 můžeme pozorovat rozložení proudové hustoty. Světlá místa jsou běžně fungující místa, kde dochází k rekombinačním procesům v solárním článku. Tmavá místa jsou naprosto nefunkční části solárního článku. Tato nefunkčnost solárního článku může být způsobena ať již průrazem PN přechodu nebo nehomogenitou v difúzní vrstvě materiálu (chybou při výrobě), popřípadě špatným nekontaktováním daného místa. Jak můžete vidět, solární článek je již přibližně z jedné čtvrtiny nefunkční. V tomto případě je to zřejmě způsobeno průrazem PN přechodu. Dále je možno si povšimnout dvou extrémně světlých proužků. Tyto místa značí , že se zde nachází oblast s vyšší proudovou hustotou, což může být způsobeno např. nižším odporem článku než v okolí.



Obr. 6.2: Zadní strana solárního článku č.25 (měřeno při: $U=1,7\text{ V}$; $I=4\text{ A}$; filtr-clear; snímáno 50 s metodou elektroluminiscence)



Obr.6.3: Čl.25 front ($U=1,8\text{ V}$; $I=2,51\text{ A}$)

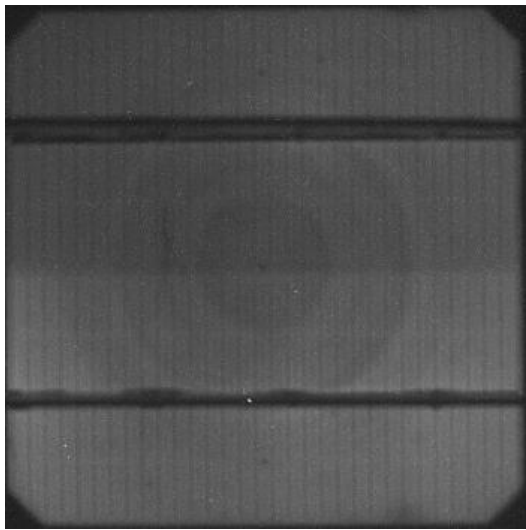


Obr.6.4: Čl.25 back ($U=1,8\text{ V}$; $I=2,51\text{ A}$)

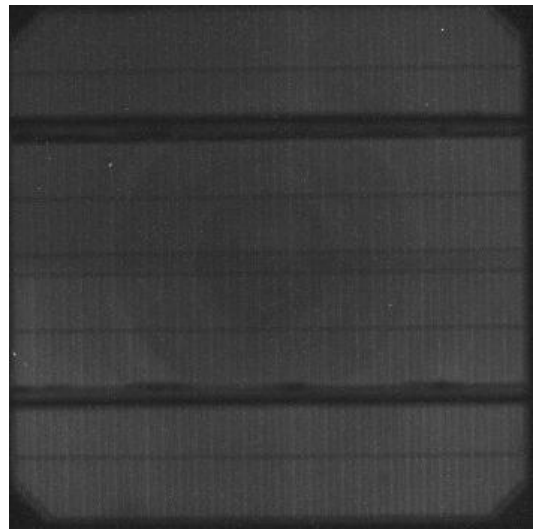
Obr. 6.3 a 6.4: filtr IR; snímáno 60 s metodou elektroluminiscence

Tyto snímky nám názorně porovnávají přední a zadní stranu solárního článku. Dané body na těchto snímcích se shodují díky tomu, že snímek zadní strany byl zrcadlen podle osy x . Díky tomuto a nefunkčním částem solárního článku lze snadno pozorovat, že zobrazené procesy na obou snímcích probíhající v solárním článku si odpovídají. Tudíž rekombinační proces lze pozorovat i ze zadní strany.

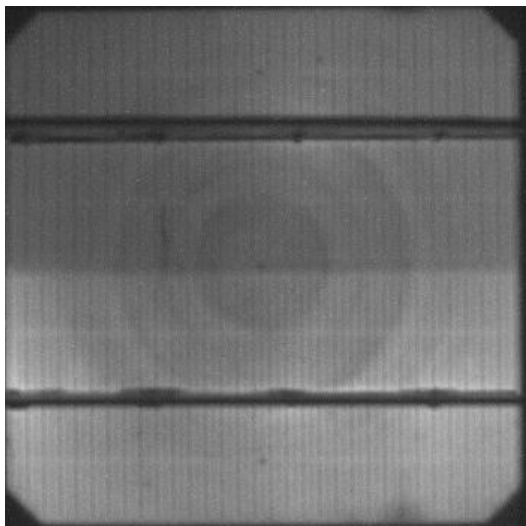
Snímky zobrazené na obr. 6.5 – 6.10 byly snímány také za pomoci metody elektroluminiscence, filtr nastaven na clear a uzávěrka na 200 s. V následující matici, složené ze snímků jednoho solárního článku s označením čl.28, lze pozorovat vývoj intenzity proudové hustoty v závislosti na regulaci budícího napětí a proudu. Také zde můžeme srovnat, jak se defekty a rozložení proudové hustoty projevují na přední a zadní straně solárního článku při shodném nastavení. V prvním sloupci je článek otočen přední stranou k CCD kameře a ve druhém sloupci je otočen zadní stranou k CCD kameře.



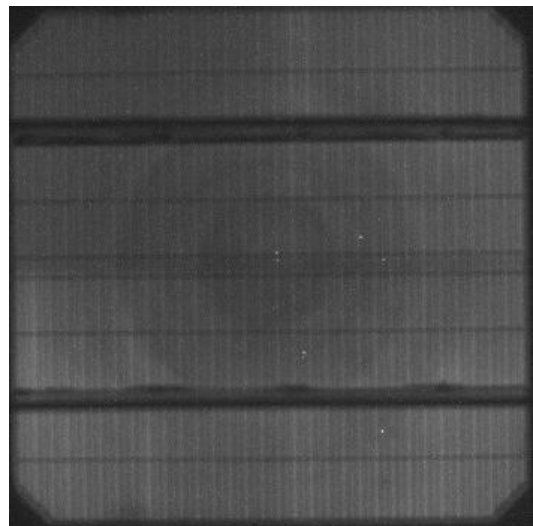
Obr.6.5: Čl.28 front ($U=0,8\text{ V}$; $I=1,09\text{ A}$)



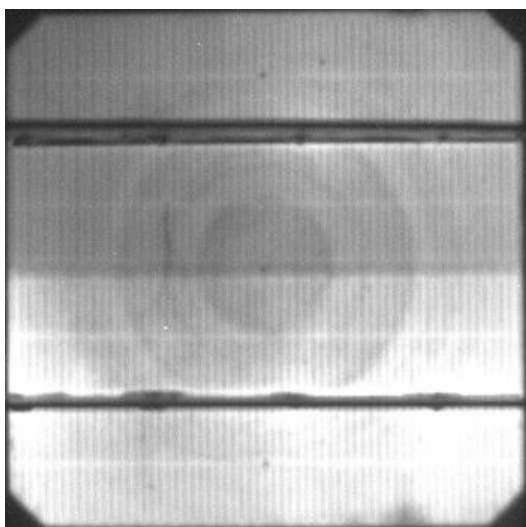
Obr.6.6: Čl.28 back ($U=0,8\text{ V}$; $I=1,09\text{ A}$)



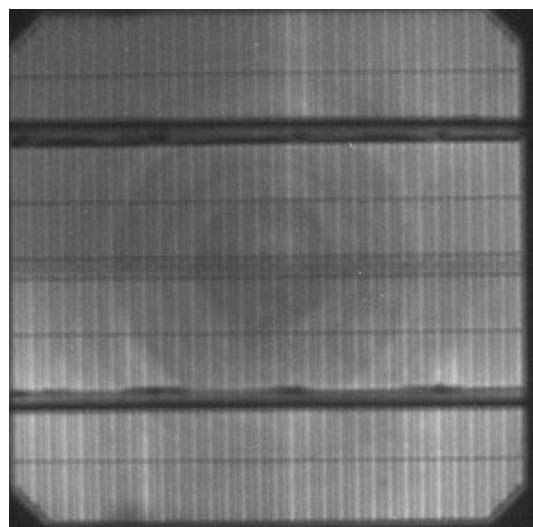
Obr.6.7: Čl.28 front ($U=0,9\text{ V}$; $I=1,55\text{ A}$)



Obr.6.8: Čl.28 back ($U=0,9\text{ V}$; $I=1,55\text{ A}$)



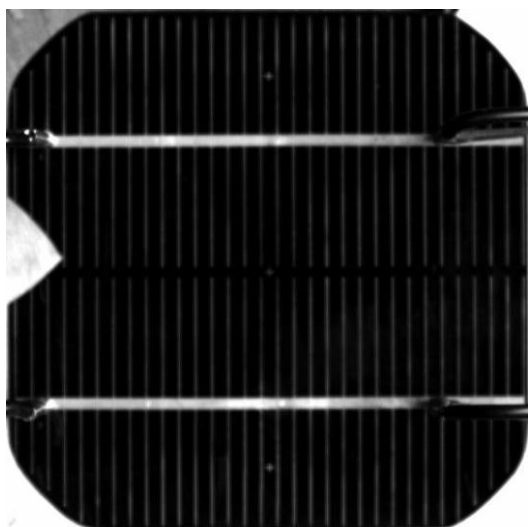
Obr.6.9: Čl.28 front ($U=1,2\text{ V}$; $I=2,53\text{ A}$)



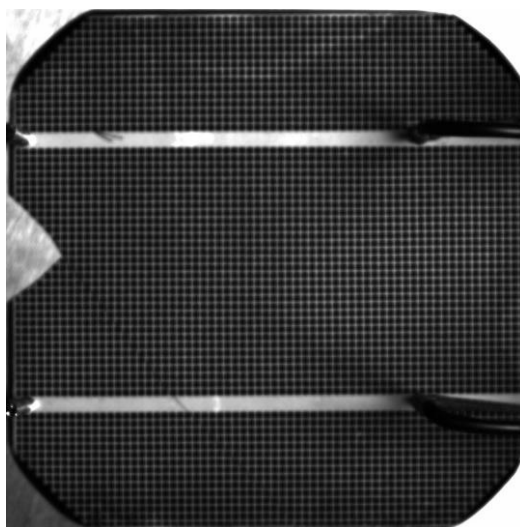
Obr.6.10: Čl.28 back ($U=1,2\text{ V}$; $I=2,53\text{ A}$)

Obr. 6.5-6.10: filtr-clear; snímáno 200 s metodou elektroluminiscence

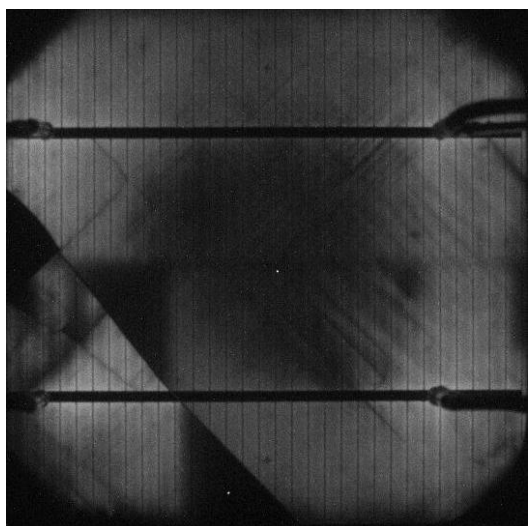
U přední a zadní strany jsou vidět téměř shodné defekty. Na všech snímcích je možné pozorovat vírový defekt (swirl defekt), který se projevuje soustřednými kružnicemi na solárním článku. Pozorovatelnost tohoto defektu je se zvyšující se hodnotou budícího napětí a proudu znatelnější. Dále na těchto snímcích je možno spatřit, že zadní strana se jeví, jako více kontrastní k odhalení jakékoli drobné nehomogenity proudové hustoty, oproti straně přední. Teoreticky by solární článek měl mít po celé ploše stejnou proudovou hustotu. Při testování solárního článku si můžeme povšimnout, že při snímání předních stran mají drobné proudové nerovnosti, odhalené na zadních stranách, tendenci splynout a pomalu přecházet do kontrastní barvy, jak je znázorněno na obr. 6.7. Oproti tomu na obr. 6.8, při stejném nastavení vstupních veličin, je již na tmavším podkladu jasně znatelná odchylka v proudové hustotě, která se potvrdila i po zvýšení vstupního napětí a proudu na obr. 6.10. Tuto pozici bychom mohli brát, jako počátek nehomogenity solárního článku. Kdežto na přední straně při shodném nastavení již to samé místo splývalo do jedné zářící plochy, což je možné pozorovat na snímku obr. 6.9.



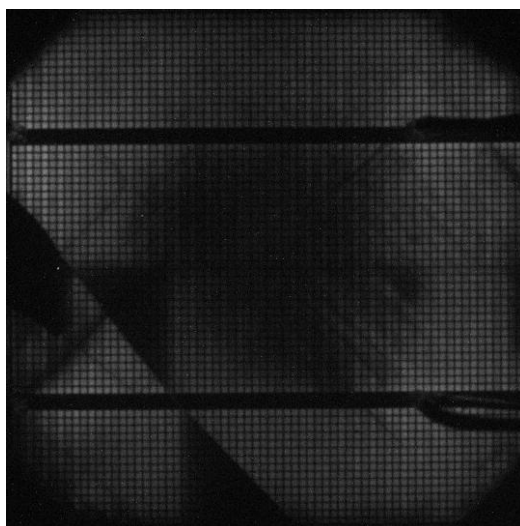
Obr. 6.11: Čl.PN front (přední strana SČ)



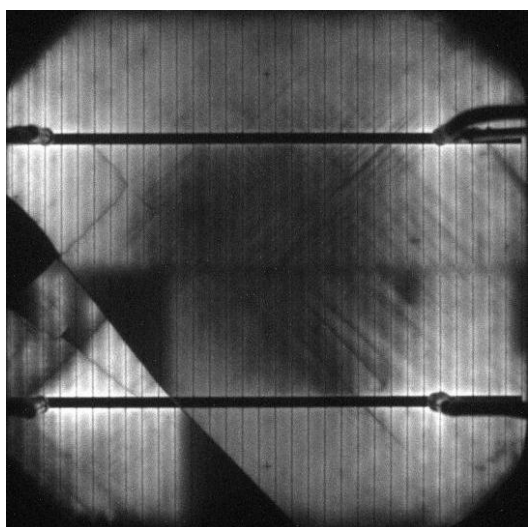
Obr. 6.12: Čl.PN back (zadní strana SČ)



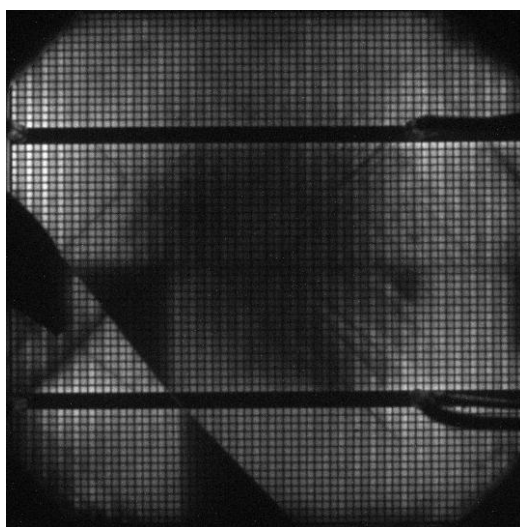
Obr. 6.13: Čl.PN front ($U=1,3 V$; $I=2 A$)



Obr. 6.14: Čl.PN back ($U=1,3 V$; $I=2 A$)



Obr. 6.15: Čl.PN front ($U=1,9 V$; $I=2,96 A$)

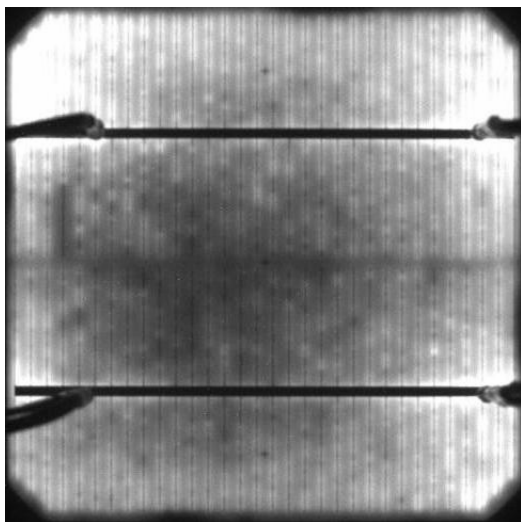


Obr. 6.16: Čl.PN back ($U=1,9 V$; $I=2,96 A$)

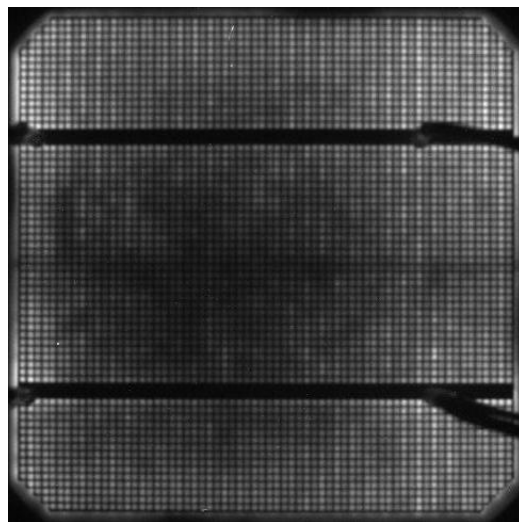
Obr. 6.11 – 6.12: filtr-clear; snímáno 50 s Jedná se pouze o snímky, které představují orientaci článku. Snímek zadní strany je vždy zrcadlen podle horizontální osy (x) a to z toho důvodu, aby bylo možné snadněji porovnávat defekty předních a zadních stran (příslušná místa na snímcích)

Obr. 6.13 – 6.16: filtr-clear; snímáno 50 s metodou elektroluminiscence

Tento článek na snímcích obr- 6.11 – 6.16 je zlomen v levém dolním rohu. Lom je patrný na snímcích z metody elektroluminiscence, kde jsou zobrazeny nefunkční místa trojúhelníkového tvaru. Dále se zde projevil druhý nejběžnější defekt u solárních článků a to defekt vnitřního pnutí základního materiálu, tedy křemíku. Tento defekt je typický pro špatně řízený proces výroby monokrystalického křemíku, který se provádí nejčastěji Czochralského metodou. Zmíněná vada ovlivní větší množství po sobě jdoucích solárních článků, což je silně nežádoucí. Jak již u metody elektroluminiscence víme, tak i tento defektní projev lze pozorovat z obou stran solárního článku a naskýtají se nám plně totožné pohledy. Dále na tomto článku můžeme pozorovat skrytý lom v horní polovině nalevo. Tato skutečnost není patrná pouhým okem a může být způsobena tím, že solární článek je namáhán ve více směrech. Výsledkem tohoto skrytého lomu může být do budoucna kompletní rozlomení solárního článku.



Obr.6.17: Čl.BSE front ($U=1,7 V$; $I=2,5 A$)

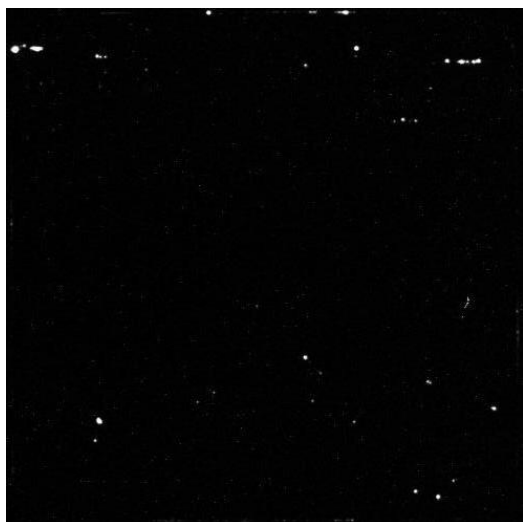


Obr.6.18: Čl.BSE back ($U=1,7 V$; $I=2,5 A$)

Obr. 6.17-6.18: filtr-clear; snímáno 50 s metodou elektroluminiscence

Na snímcích obr. 6.17 – 6.18 získaných pomocí metody elektroluminiscence je patrná značná přítomnost nečistot v solárním článku. Nečistoty jsou zataveny v základním materiálu, kde pak působí jako defekt.

Mikroplasma



Obr. 6.19: Čl.BSE front ($U=11\text{ V}$; $I=0,44\text{ A}$)



Obr. 6.20: Čl.BSE back ($U=11\text{ V}$; $I=0,44\text{ A}$)

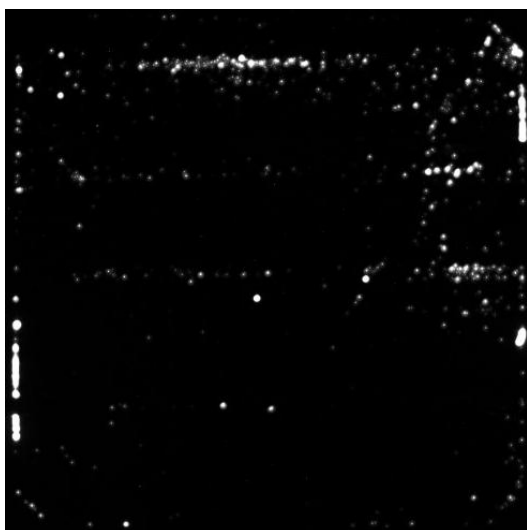


Obr. 6.21: Čl.BSE back ($U=12\text{ V}$; $I=0,52\text{ A}$)

Obr. 6.19-6.21: filtr-clear; snímáno 50 s metodou vyzařování z mikroplasmatu

Nyní se dostáváme k další metodě zkoumání solárních článků a to metodě vyzařování z mikroplasmatu. Výsledky této metody můžete pozorovat na snímcích počínaje obr. 6.19. Princip této metody byl přiblížen níže. Ze snímku přední strany obr.6.19 je patrné, že se

mikroplasmaty na tomto něm nachází a že se jedná o bodové poruchy. Na přední straně se projevují jako zářivé body. Jestliže pomíneme mikroplasmaty vyzařující z okrajů solárního článku, pak u stejného nastavení budících parametrů pro zadní stranu obr.6.20 lze spatřit nepatrné body odpovídající mikroplasmě detekované na přední straně. Není jednoznačné, zda – li se jedná opravdu o mikroplasmy nebo jsou zde zachyceny drobné nečistoty (šum). Z tohoto důvodu byly zvýšeny budící parametry pro solární článek k hraničním $U = 12 \text{ V}$ na dobu nezbytně nutnou k měření, protože u této metody může dojít k průrazu, tudíž destrukci solárního článku. Tato skutečnost potvrdila zobrazené mikroplasmaty na zadní straně (obr. 6.21). Ba dokonce se projeví nové, které u předchozího nastavení nebyli pozorovány. Ovšem četnost výskytu mikroplasmatu stále neodpovídá četnosti přední strany.



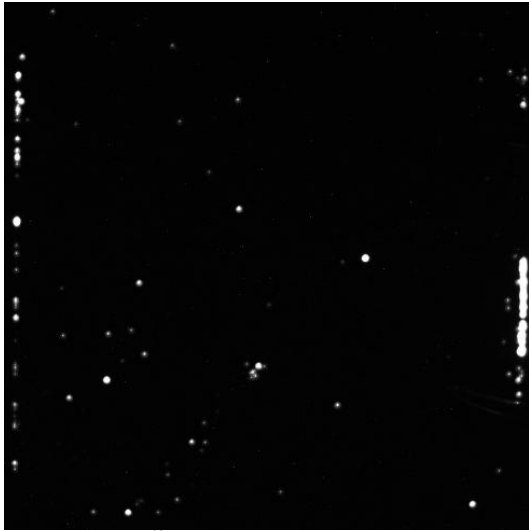
Obr.6.22: Čl.25 front ($U=11 \text{ V}$; $I=1,12 \text{ A}$)



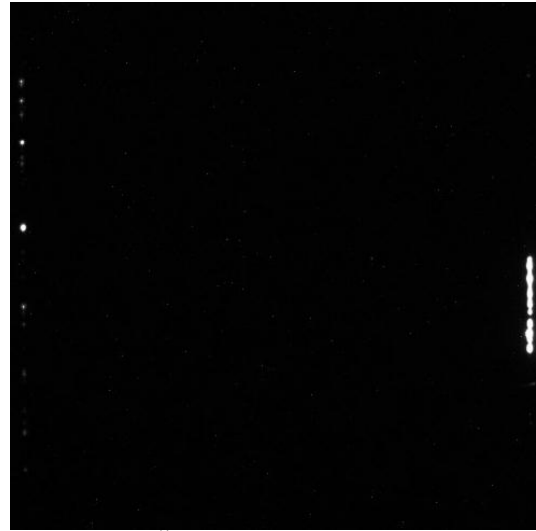
Obr.6.23: Čl.25 back ($U=11 \text{ V}$; $I=1,12 \text{ A}$)

Obr. 6.22 - 6.23: filtr IR; snímáno 60 s metodou vyzařování z mikroplasmatu

Shodnou metodou byli zkoumány solární články s označením čl.25 a čl.28. Zadní strany těchto článků byly zobrazeny na snímcích obr.6.23 a obr.6.25. Opět, jestliže pomíneme zářící okraje, u nichž nelze jednoznačně určit ze které strany vyzařují, pak zjistíme, že se na zadních stranách mikroplasmaty neprojevují.



Obr.6.24: Čl.28 front ($U=11\text{ V}$; $I=0,39\text{ A}$)



Obr.6.25: Čl.28 back ($U=12\text{ V}$; $I=0,49\text{ A}$)

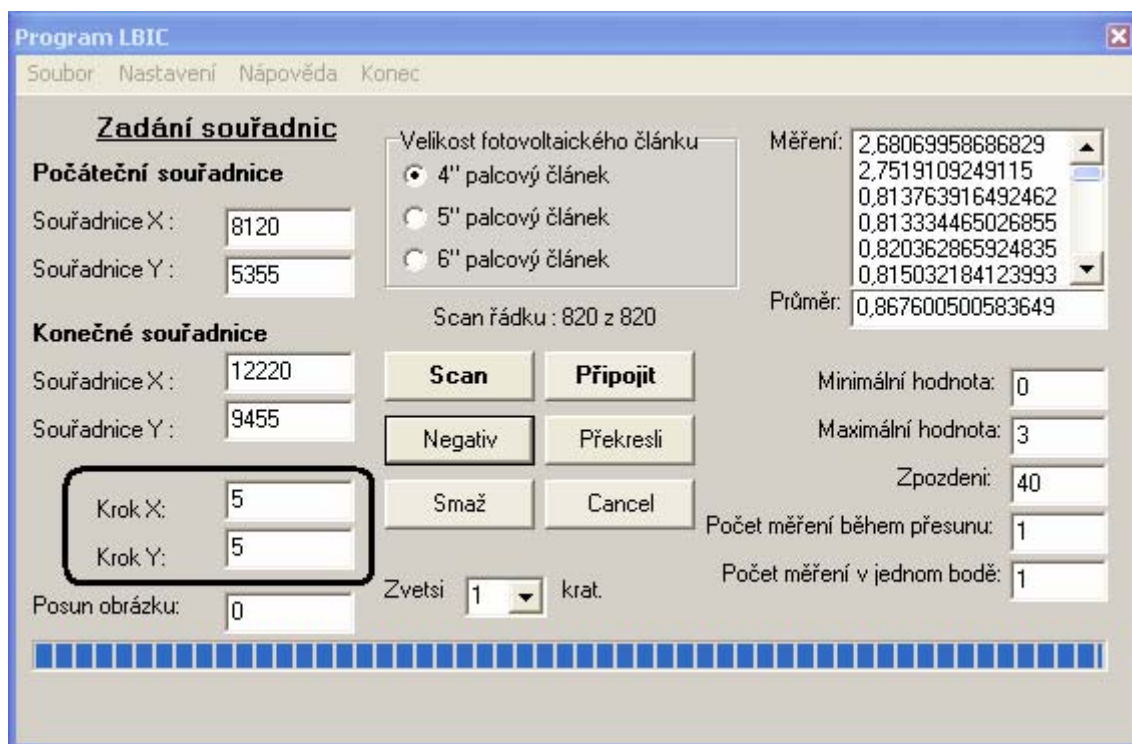
Obr. 6.24 - 6.25: filtr IR; snímáno 60 s metodou vyzařování z mikroplasmatu

Teoreticky by tomu tak opravdu mělo být, jelikož skutečnosti zjištěné měřením odpovídají teorii. A to, že defekty, jako je např. swirl, pnutí jsou defekty materiálu, rozložené v celém objemu solárního článku. Tudíž by mohli být zjištěny i ze zadních stran solárních článků. Tato skutečnost byla opět podložena výsledky z laboratorních měření. Oproti tomu vyzařování mikroplasmatu je defekt bodový, který vzniká na vrcholku pyramid v N^+ vrstvě solárního článku. A z toho důvodu nejsou schopny tyto poruchy prodifundovat skrze celý článek. Jediná možnost jak vysvětlit, že některé body dokázali být zachyceny na zadní straně u čl.BSE na obr 6.20 a obr.6.21 se naskytá to, že alespoň částečně zasahovali do vrstvy N a tudíž byli hlubšího rázu.

LBIC

Jako poslední metodu, která byla použita k charakterizaci zadních stran solárních článků, byla metoda LBIC. U této metody bylo prakticky odzkoušeno nové pracoviště v laboratoři na Ústavu elektrotechnologie VUT v Brně. Toto pracoviště bylo sestrojeno Ing. Filipem Kučerou a byl zde použit nový měřicí přístroj Agilent 34411A vyroben v roce 2010, který je schopen odečíst 50 000 hodnot za sekundu. Také byl ve spolupráci s Ing. Filipem Kučerou úspěšně odzkoušen nový program, který byl vyvinut pro toto pracoviště. Otestován byl solární článek s označením čl.PN, na kterém se projevil defekt pnutí a byl analyzován metodou elektroluminiscence níže. Snímky obr. 6.13 – 6.16. Je možno tudíž

porovnat tyto metody a jejich potenciál při analýze zadních stran. Tyto metody by měli zobrazovat podobné defekty.

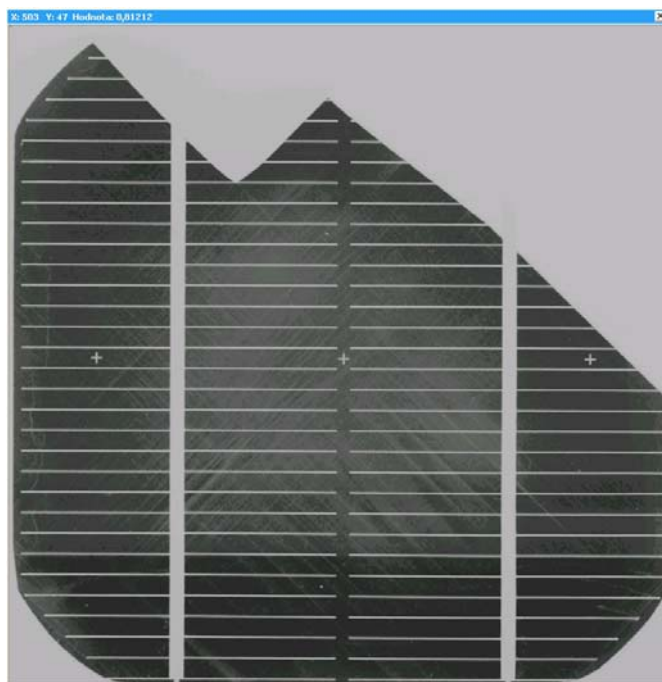


Obr 6.26: Okno programu LBIC

Metoda LBIC má nevýhodu v tom, že je zdlouhavá, oproti metodě elektroluminiscence. A to z důvodu, že LBIC skenuje článek bod po bodu. V označeném okénku na obr. 6.26 je možné nastavit velikost kroku skenování solárního článku. Tomu poté nepřímouměrně odpovídá doba skenování. Pro zobrazený krok 5x5 a 4“solární článek je tato doba analýzy přibližně 15 hodin. Rozteč sousedních bodů na solárním článku je 125 μm . Jestliže tento krok změníme na 10x10, pak se doba sníží přibližně na 4,5hodiny. Rozteč sousedních bodů je 250 μm . Obě tyto možnosti značně převyšují čas analýzy metodou elektroluminiscence, který je řádově desítky vteřin.

Pomocí již zmíněné metody LBIC, jejíž princip je popsán v kapitole 5.2.2, byly analyzovány solární články z obou stran. Výsledky jsou uvedené na snímcích obr. 6.27 (přední strana) a obr. 6.28 (zadní strana). Jedná se o solární článek s označením čl.PN, který již byl analyzován dříve metodou elektroluminiscence. Snímky obr.6.13 – obr 6.16 reprezentují výsledky této metody a lze je porovnat se snímky pořízenými metodou LBIC. U snímků předních stran obou metod je na první pohled zřejmé, že se jedná o defekt pnutí. Metoda LBIC má oproti metodě elektroluminiscence značně detailnější pohled na defekt pnutí, což je výhodou. Z tohoto hlediska porovnáme strany zadní. Je nutno konstatovat, že

metoda LBIC je k analýze zadních stran téměř bezvýznamná. U snímku pořízeného metodou LBIC obr.6.28 je s velkou obtíží rozeznatelný defekt pnutí. Tato skutečnost bude zřejmě způsobena kontaktní mřížkou zadní strany, která je mnohem hustší než u strany přední a je na snímku znatelná mimo plochu defektu.



Obr 6.27: Čl.PN, front, dioda RED 524nm $I_D=10mA$, krok 5x5, LBIC



Obr 6.28: Čl.PN, backt, dioda RED 524nm $I_D=10mA$, krok 5x5, LBIC

Dále je možno si povšimnout, že metoda LBIC nedokáže rozeznat nefunkční části solárních článků, které jsou u tohoto článku způsobeny zlomen a jsou trojúhelníkového tvaru, jelikož jsou odpojeny od hlavních bus barů. Tato skutečnost byla potvrzena i u článku čl.25, který je znázorněn na obr.6.2. Jedna z hlavních výhod metody elektroluminiscence je také ta, že dokáže odhalit skryté lomy solárních článku, které jsou prvopočátečním signálem narušené struktury a předurčují lom solárního článku.

7. Závěr

Tato práce je členěna na dvě základní části. V první části je zpracována teorie, kde je možno přiblížit danou problematiku solárních článků. Z počátku je zde představen vývoj fotovoltaiky. Následně je zde definováno několik jevů účastnících se fyzikálních procesů v solárním článku, základní charakterizace elektrických vlastností monokrystalického solárních článků a především je zde podrobně zpracován potenciál, který by se mohl skrývat v zadních stranách solárních článků.

Na počátku praktické části je rozbor metod, které se využívají při zkoumání solárních článků. Všechny popsané metody nám dohromady charakterizují solární článek a dávají nám podrobný přehled o tom co se v solárním článku děje a jaké jsou jeho vlastnosti. K charakterizaci zadních stran solárních článků byly vybrány metody elektroluminiscence, emise světla z mikropřímouky a LBIC. Jejich výhody, nevýhody a potenciál je popsán podrobně v praktické části této práce.

Hlavním cílem této práce bylo po praktické stránce aplikovat diagnostické metody využívající rekombinačních jevů při charakterizaci zadních stran solárního článku a následně získaná data vyhodnotit ve srovnání s předními stranami. Tyto úkoly byly splněny a jsou zde podrobně rozebrány.

Z dosažených výsledků lze konstatovat, že k charakterizaci zadních stran solárního článku je nejvhodnější metoda elektroluminiscence. Pro účel této diplomové práce a následný výzkum bylo upraveno pracoviště využívající CCD kamery. Hlavní výhodou tohoto pracoviště je rychlost analýzy solárního článku řádově vteřiny oproti LBIC.

Hlavní potenciál analýzy zadní strany je v tom, že probíhající zářivá rekombinace nelze pozorovat s takovou intenzitou jako u přední strany. Jelikož se musí prozářit celý článek, tak je dosaženo odstínění nežádoucího zastínění zářivými místy. Veškeré defekty byly, proto zřetelněji pozorovatelné a bylo možno je snadno lokalizovat. Vše je přehledně zpracováno v praktické části této práce.

Analýza zadní strany za pomoci CCD kamery nám velice přesně lokalizuje místa s maximální proudovou hustotou. Tyto místa navrhuji nadále podrobně analyzovat a vzniklým poznatkům upravit výrobní postupy. Je zde možnost zvýšení účinnosti solárních článků a tím hlavně zefektivnění ekonomických aspektů výzkumu a výroby. Vyšší produkce levnějších článků výrazně ovlivní množství produkovaných emisí a jejich dopad na životní prostředí.

8. Seznam použité literatury

- [1] K. V. ŠALIMOVOVÁ, *Fyzika polovodičů*. 1.vyd., Alfa Bratislava 1978. 448 s.
- [2] VANĚK, J., KŘIVÁK, P., NOVÁK, V. : *Alternativní zdroje energie – elektronický text*, VUT FEKT Brno 2006. 158 s.
- [3] LIBRA, M., POULEK, V.: *Solární energie*. 2.vyd., Česká zemědělská universita Praha 2006. 149 s. ISBN -80-213-1488-5
- [4] Krieg, B., *Elektřina ze slunce*, Ostrava, 1993
- [5] Vojtěchovský, K., *Solární fotovoltaické systémy, Obnovitelné zdroje energie*, FCC PUBLIC, 2001
- [6] CZECH RE AGENCY, *Fotovoltaika pro každého*, [Online]. 2008. [3.11.2008] URL:< <http://www.czrea.org/cs/druhy-oze/fotovoltaika#hist> >
- [7] VAŠÍČEK, T., *Charakterizace vlastností křemíkových krystalických solárních článků*. 1.vyd., VUT Brno 2004, 53 s.
- [8] E. VAN KERSCHAUER, G. BEAUCARNE, *Progress in photovoltaic: research and application*, [Online]. 2009 [3.4.2009] URL:<www.iee.ac.cn/fckeditor/UserFiles/File/tyndc/reference/19938777865185.pdf>
- [9] H. HAVERKAMP, M. McCANN, F. HUSTER, P. FATH, *Screen printed low-cost IBC solar cells – preparatory investigations*, [Online]. 2009 [19.3.2009] URL:<http://www.uni-konstanz.de/pv/publikationen/papers/barcelona2005/2CV.5.40_Haverkamp.pdf >
- [10] A. GOETZBERGER, J. KNOBLOCH, B. VOSS, *Crystalline silicon solar cells*, 1.vyd., 528 s. ISBN 0-471-97144-8
- [11] T. MARKVART, L. CASTAÑER, *Solar cells Materiále, nabufecture and Operation*, 1.vyd., 555 s. ISBN 978-1-85617-457-1