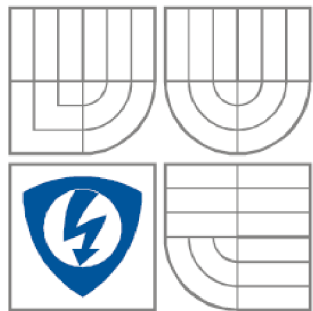




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ
V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

FOTOVOLTAICKÝ ČLÁNEK PRO KONCENTRÁTOROVÝ SYSTÉM

PHOTOVOLTAIC CELL FOR CONCENTRATOR SYSTEM

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

VOJTĚCH STRAŠKRABA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří VANĚK, Ph.D.

BRNO 2013

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce se zabývá koncentrátorovými fotovoltaickými systémy. Hlavním tématem jsou fotovoltaické články a jejich vlastnosti. Práce se podrobně zabývá fyzikálními procesy u fotovoltaických článků, typy článků a jejich specifiky a také možnostmi zpracování pro dosažení lepších vlastností pro koncentrátorové systémy.

V praktické části je provedeno měření a analýza elektrických charakteristik 9 různých monokrystalických křemíkových článků. Z těchto je pak vybrán nejúčinnější článek jako vhodný pro další použití jako referenční článek.

Klíčové slova

Koncentrátor, fotovoltaika, solární článek, fotovoltaický článek

Abstract

The subject of this master's thesis is to introduce concentrator photovoltaic systems. Main subject of presented work are photovoltaic cells and their features and characteristics. The work deals with physical fundamentals of solar cells, type of cells and their specifics and discusses possible treatment for achieving better characteristics of concentrator systems.

In the practical part is realized measurement and analysis of electrical characteristics of 9 different monocrystalline silicon cells. From those is the most efficient cell chosen for further use as reference cell.

Key words

Concentrator, photovoltaic, solar cell, photovoltaic cell

Bibliografická citace práce:

STRAŠKRABA, V. *Fotovoltaický článek pro koncentrátorový systém*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 40s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Vaněk, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Fotovoltaický článek pro koncentrátorový systém 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 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 30. Května 2013

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Jiřímu Vaňkovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce. Děkuji panu doc. RNDr. Petru Mikulíkovi, Ph.D. za vstřícné rady ohledně technologie výroby solárních článků. Dále děkuji firmě Solartec s.r.o. za poskytnutí vzorků pro měření.

V Brně dne 30. Května 2013

.....
podpis autora

Obsah

Seznam obrázků	5
Seznam tabulek.....	6
1 Úvod	7
1.1 Základní vlastnosti koncentrátorů	7
1.2 Historie a budoucnost koncentrátorů.....	7
2 Teoretický základ	9
2.1 Princip fotovoltaického článku.....	9
2.2 Náhradní obvod fotovoltaického článku	11
2.3 Účinnost fotovoltaického článku.....	12
2.4 Technologie výroby fotovoltaických článků	16
2.4.1 Výroba substrátu	16
2.4.2 Výroba fotovoltaického článku	18
2.5 Požadavky na koncentrátorové fotovoltaické články	20
2.6 Vliv teploty na články.....	21
2.7 Chladiče	22
2.8 Návrh článku pro koncentrátor	23
2.9 Dostupné materiály a technologie.....	23
2.10 Vliv sériového odporu	23
2.11 Zapouzdření pro odvod tepla.....	26
3 Měření a výběr referenčního článku	27
3.1 Popis měřicího pracoviště	27
3.2 Popis měřených FV článků	31
3.3 Výsledky měření a výběr referenčního článku	34
4 Čisté prostory na ÚFKL MUNI.....	37
5 Výroba fotovoltaického článku	38
6 Závěr.....	39
7 Seznam použité literatury a zdrojů	40

Seznam obrázků

Obrázek 1	Přechod elektronu z valenční do vodivostní hladiny [6].....	9
Obrázek 2	Vlastnosti P-N přechodu [6]	10
Obrázek 3	Schéma fotovoltaického článku	10
Obrázek 4	Náhradní obvod fotovoltaického článku	11
Obrázek 5	Graf závislosti účinnosti na šířce zakázaného pásu [6]	12
Obrázek 6	Graf závislosti max. účinnosti článku dle počtu PN přechodů [6]	13
Obrázek 7	Účinnost článků vzrůstá s koncentrací záření [7]	14
Obrázek 8	Typická struktura 3-přechodového článku [7]	14
Obrázek 9	Vývoj špičkové účinnosti článků rozličných technologií v období let 1976 - 2011 ...	15
Obrázek 10	Czochralského metoda tažení ingotu – monokrystalické články	16
Obrázek 11	Metoda tavení ve formě – polykrystalické články.....	17
Obrázek 12	Procesní kroky ve výrobě článku	19
Obrázek 13	Pec pro difuzi příměsí	19
Obrázek 14	Charakteristiky špičkového koncentračního článku [10]	21
Obrázek 15	Graf závislosti parametrů c-Si článku na teplotě	21
Obrázek 16	Princip pasivního a aktivního chlazení	22
Obrázek 17	3D distribuční model článku se základními obvodovými jednotkami [2]	23
Obrázek 18	3D distribuční model článku se základními obvodovými jednotkami [2]	24
Obrázek 19	Součásti sériového odporu v reálném fotovoltaickém článku	24
Obrázek 20	Vliv parazitních odporů na AV charakteristiku.....	25
Obrázek 21	Způsob uchycení článku na podložku [11]	26
Obrázek 22	Měřicí pracoviště	27
Obrázek 23	Měřicí přípravek	27
Obrázek 24	Spektrum AM1.5g (modrá křivka) [13].....	28
Obrázek 25	Porovnání spektra AM1.5g (zelená křivka) a spektra halogenové výbojky (červená křivka) [14]	29
Obrázek 26	Přípravek pro připojení článku	29
Obrázek 27	Pyranometr	30
Obrázek 28	IR teploměr CEM DT8819	30
Obrázek 29	FV článek rozměru 72×48 mm	31
Obrázek 30	FV článek rozměru 27×20 mm	31
Obrázek 31	FV článek rozměru 16×60 mm	31
Obrázek 32	Nedokonalá metalizace	32
Obrázek 33	Nedokonalá metalizace, oxidace metalizace.....	32
Obrázek 34	Vrpy na spodní straně článku	33
Obrázek 35	Oxidace metalizace a pasivace	33
Obrázek 36	Charakteristiky článků rozměru (72x48) mm.....	35
Obrázek 37	Charakteristiky článků rozměru (27x20) mm.....	36
Obrázek 38	Charakteristiky článků rozměru (16x60) mm.....	36

Seznam tabulek

Tabulka 1 Složky sériového odporu reálného fotovoltaického článku	24
Tabulka 2 Testovací podmínky	34
Tabulka 3 Elektrické charakteristiky článků	34
Tabulka 4 Seznam zařízení v čistých prostorech.....	37

1 Úvod

1.1 Základní vlastnosti koncentrátorů

Fotovoltaické (FV) koncentrátorů jsou systémy používající čočky či zrcadla ke koncentrování slunečních paprsků na FV články. Důvodem k tomuto řešení je snížení velikosti článku k dosažení požadovaného výkonu; čili nahrazení drahého materiálu nutného k výrobě polovodičového článku za levnější materiál k výrobě optického členu. Díky tomuto lze sáhnout k výkonnějším FV článkům, jež by byly bez použití koncentrátoru příliš drahé v poměru ke generovanému výkonu. Ve výsledku je možno lehce dosáhnout účinnosti konverze energie více než $\eta = 20\%$ s tím, že nejvyšší dosud dosažená účinnost je více než $\eta = 40\%$ (oproti cca. $\eta = 32\%$ bez koncentrace u stejného článku). Navzdory jednoduchému principu se ukázalo masové praktické provedení obtížnější, ačkoliv se tímto směrem provádí výzkum od samého počátku zkoumání fotovoltaiky. Hlavní technické problémy pramení z náročných požadavků na samotné umístění článků do modulu a to z důvodů velkého tepelného toku a proudového zatížení, jakož i potřeby ekonomicky výhodnějších a hlavně spolehlivějších sledovacích systémů.

Největší nevýhodou koncentrátorů je ta, že mohou efektivně vyrábět energii pouze pod přímým slunečním zářením. Difuzní ozáření se na produkci energie prakticky nepodílí, proto je jejich použití v místech s nízkými úhrny přímého ozáření méně výhodné.

Hlavní překážky uplatnění na trhu jsou především ekonomického charakteru; koncentrátorů byly zamýšleny k výrobě velkého množství neznečišťující obnovitelné energie, avšak finanční náklady nemohou ani v dnešní době bez dotací konkurovat energii z fosilních zdrojů či nejbližšímu konkurentovi – větrné energii. Cenový rozdíl se zmenšuje, ale je zřejmé, že až vzrůstající náklady na energii z fosilních zdrojů a větší tlak na rozšíření neznečišťujících zdrojů energie může vést k masovějšímu použití FV koncentrátorů potažmo fotovoltaiky.

Použití koncentrátorů se však nemusí omezovat pouze na velké elektrárny, využití se dá nalézt i v jiných než masových aplikacích. První variantou jsou místa, kde je zavedení elektrické sítě buď nemožné anebo ekonomicky nevýhodné, avšak elektřina je nutná pro chod zařízení – jsou to tedy odlehlá vědecká či výzkumná pracoviště, odlehlá lidská sídla či námořní loď. Druhou variantou využití jsou místa, kde jsou omezené prostory pro instalaci tradiční fotovoltaiky a použití koncentrátorů může přinést vyšší energetickou produkci při zachování velikosti plochy zastavěné FV elektrárnou.

1.2 Historie a budoucnost koncentrátorů

Koncept a využití koncentrátorů byl znám již od počátků pokusů s fotovoltaikou, protože velké množství solárních termálně-elektrických systémů je používalo k dosažení vysokých teplot nutných k účinné přeměně energie. Tyto systémy stavěly na reflexních koncentrátorech s relativně nedokonalou technologií skleněných zrcadel. První použití americkým vynálezcem Frankem Shumanem v Egyptě roku 1913 používalo reflexní žlaby a účinnost se pohybovala okolo $\eta \sim 3-4\%$, naproti tomu u fotovoltaických článků bylo takovéto účinnosti dosaženo až o 40let později. [1]

Moderní rozvoj fotovoltaiky se datuje až od roku 1954. Výzkumníci firmy Bell laboratories (USA) náhodou pozorovali generaci napětí na PN přechodu křemíkové diody při rozsvícení

světlech v místnosti a již příští rok oznamují produkci článku z krystalického křemíku s účinností $\eta = 6\%$ [2]. Vysoká cena však byla překážkou rozšíření jako zdroje energie na zemi kromě malých experimentálních aplikací či ostrovních systémů. Cena však rozhodně nebyla překážkou pro vesmírný výzkum, kde našel objev rozsáhlé uplatnění a dodnes je to jeden z hlavních způsobů zásobování vesmírných družic energií. Další vývoj se zaměřoval na zvýšení účinnosti a především snížení ceny. V 60. letech 20. století započalo zkoumání článků pod koncentrovaným osvětlením a bylo zjištěno, že mohou pracovat pod koncentracemi v řádech několika stovek násobků běžného slunečního osvětlení. Kritickými se ukázalo snížení sériového odporu z důvodu velkých proudových hustot a zajištění dostatečně nízké teploty článků. Většiny pokroků u FV koncentrátorových systémů bylo dosaženo zvládnutím těchto problémů.

Navzdory tomuto ranému nadšení nedošlo květšímu pokroku a rozšíření koncentrátorů před příchodem ropné krize roku 1973, jež rozpoutala diskuzi a zájem o nahrazení fosilních paliv obnovitelnými zdroji. Největší pozornost tématu byla věnována v USA, kde byly v 70. letech vytvořeny několikery vládní programy a agentury (např. The Sandia national laboratories concentrator program) zaměřující se na obnovitelné zdroje, kam fotovoltaika patří. Jako hlavní cíl bylo vytyčena komerční dostupnost FV systémů v ceně 2USD/Wp do roku 1981. Tento cíl se však ukázal jako příliš idealistický a této ceny bylo dosaženo až o 20let později. Během tohoto programu byly vyvinuty a vyzkoušeny různé technologie koncentrátorů:

- reflexní paraboly
- reflexní žlaby
- Fresnelovy čočky s bodovým ohniskem
- lineární Fresnelovy čočky
- luminiscenční koncentrátor
- kompozitní parabolické koncentrátor
- malé hemostatické pole s centrálními FV moduly

Tyto prototypy dosahovaly v 70. letech 20. století účinnosti od 5% do 12% a v dalších letech bylo dosaženo účinnosti až $\eta = 15\%$.

Dalším seskupením zabývajícím se koncentrátor byl institut EPRI. Tam se vývoj zaměřil na vysokokoncentrační systémy, z nichž vyplynul vývoj k termofotovoltaické přeměně, u které byla teoretická účinnost stanovena až na $\eta = 50\%$ a byla dosažena $\eta = 26\%$. Tento koncept funguje na absorpci elektronů pouze blízko vodivého pásu polovodiče, ostatní části spektra jsou odrazeny zpět do zářiče.

Kromě těchto organizací se provádí hlubší výzkum fotovoltaických aplikací samozřejmě i v jiných částech světa – především Japonsku, Německu a Španělsku. Důvody pro studium a vývoj fotovoltaiky jsou rozmanité a v každé zemi je motivace lehce odlišná, ať již je to velká energetická spotřeba, dlouhodobé ekologické cíle, výhodnost polohy země s velkým slunečním osvětlením či prostá orientace na udávání směru vývoje energetických zdrojů.

Jedním z vývojových cílů ve výzkumu je dosahování co nejvyšší účinnosti článku. Tato oblast byla až donedávna výsadou institucí zřízených za státní peníze, protože samotný výzkum je drahý a komerční uplatnění nejisté či žádné. To se změnilo 19. dubna 2011, kdy americká firma Solar Junction založená roku 2007 oznámila dosažení rekordní účinnosti článku $\eta = 43,5\%$ pod koncentrací 405x. [4]

2 Teoretický základ

2.1 Princip fotovoltaického článku

Polovodičové fotovoltaické články jsou ve své podstatě velmi jednoduché zařízení. Nejběžněji používané křemíkové krystalické články si lze zjednodušit jako diodu, na jejímž PN přechodu se vlivem dopadu světelného záření generují nosiče náboje. Procesy probíhající v tomto zařízení popisuje fyzika kvant. Množství nosičů náboje závisí na energii dopadajících fotonů dodané elektronům ve valenčním pásu, které posléze přecházejí do pásu vodivostního; tato energie vzhledem k vlnové povaze fotonů závisí na vlnové délce λ a je vyjádřena vztahem:

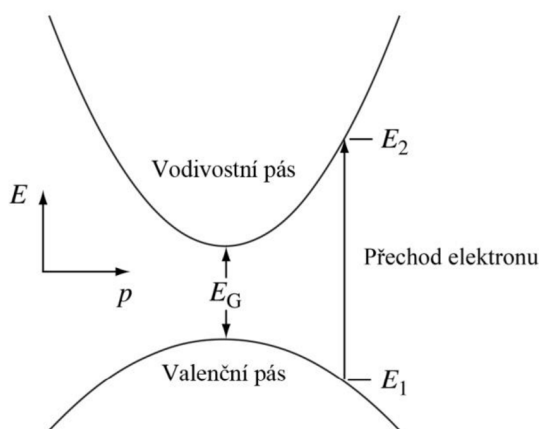
$$E_\lambda = \frac{hc}{\lambda} \quad [1]$$

kde h je Planckova konstanta a c rychlost světla. Množství vzniklých nosičů náboje dále závisí na vzdálenosti valenčního E_v a vodivostního E_c pásu, resp. šířce zakázaného pásu polovodiče E_G . Množství energie (kvanta) pro přechod elektronu je tedy dán touto vzdáleností.

Numericky se dá tento proces vyjádřit jako:

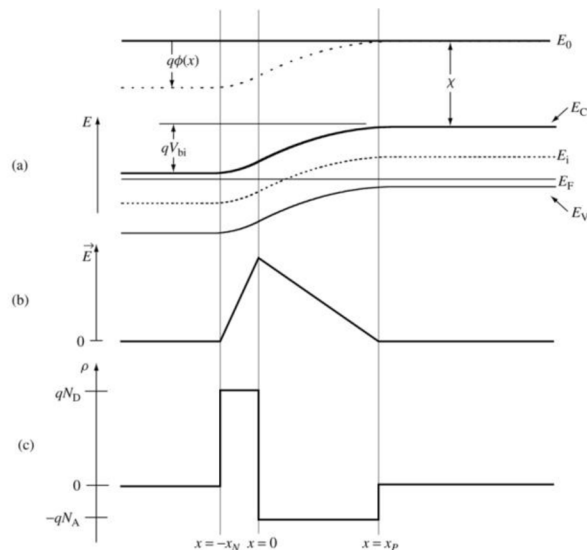
$$h\nu = E_v - E_c > E_G \quad [2]$$

a graficky pak:



Obrázek 1 Přechod elektronu z valenční do vodivostní hladiny [6]

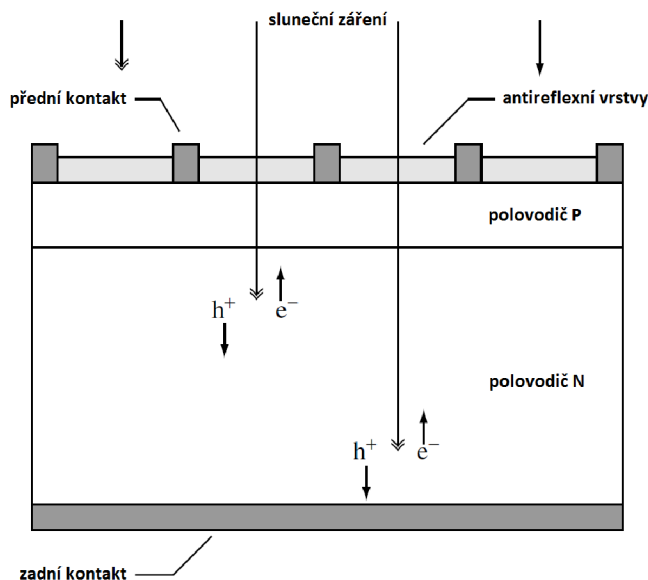
Při znalosti vlastností polovodiče v rovnovážném stavu a patřičných rovnic dokážeme graficky znázornit pásový model přechodu (a), rozložení elektrického pole (b) a rozložení náboje (c):



Obrázek 2 Vlastnosti P-N přechodu [6]

Fotovoltaické články se dále vyznačují elektrickými vlastnostmi: napětím naprázdno U_{OC} a proudem nakrátko I_{SC} , sériovým R_s a paralelním odporem R_{sh} , a volt-ampérovou charakteristikou. Z těchto primárních veličin je možné spočítat výkon článku P a dále jeho účinnost η přeměny slunečního záření na elektrickou energii.

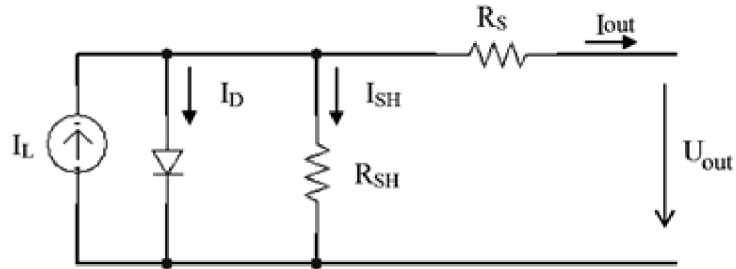
Schéma řezu fotovoltaickým článkem ukazuje Obrázek 3. Tento je tvořen substrátem, který je dopován příměsí pro vytvoření PN přechodu, zadní strana je opatřena metalizací v celé ploše, přední strana je opatřena sběrníci prstů metalizace a antireflexními vrstvami.



Obrázek 3 Schéma fotovoltaického článku

2.2 Náhradní obvod fotovoltaického článku

Schéma náhradního obvodu fotovoltaického článku je ukázáno na Obrázek 4. [2]



Obrázek 4 Náhradní obvod fotovoltaického článku

Proud fotovoltaickým článkem I_{out} závisí na efektivitě přeměny slunečního záření, které generuje proud I_L ; parametru A_0 náhradní diody závisícím na tom, zda dominuje rekombinace v kvazineutrálních oblastech či v depleční vrstvě; a především na sériovém odporu R_s a paralelním odporu R_{SH} :

$$I_{out} = I_L - I_D \left[e^{q(V+IR_S)/A_0kT} - 1 \right] - \frac{V + IR_S}{R_{SH}} \quad [3]$$

Napětí fotovoltaického článku V_{out} lze pak přepsat:

$$V_{out} = \frac{I_L - I_D \left[e^{q(V+IR_S)/A_0kT} - 1 \right]}{R_{SH}} \quad [4]$$

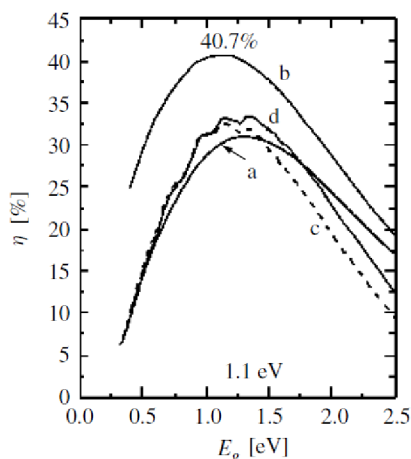
Využití těchto rovnic v praxi však není velké, protože parametry článků se určují experimentálně pomocí průmyslových testerů.

2.3 Účinnost fotovoltaického článku

Dle teoretických poznatků je nejvyšší možná účinnost fotovoltaické konverze u článku s jedním přechodem stanovena na $\eta = 40,7\%$ při osvětlení černým tělesem o teplotě 6000K. [3] Teoretická maximální účinnost článku s jedním přechodem je pak dána rovnicí:

$$\eta = \frac{\{qV[\dot{N}_s - \dot{N}_r(qV)]\}_{\max}}{\sigma_{SB}T_S^4} \quad [5]$$

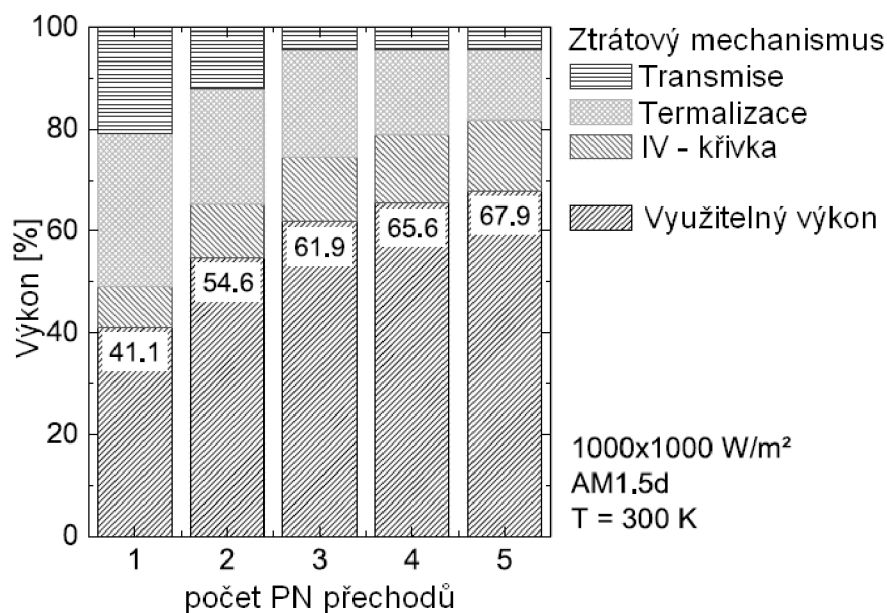
Graficky vyjádřeno:



Obrázek 5 Graf závislosti účinnosti na šířce zakázaného pásu [6]

Kde křivka *a* odpovídá emisi černého tělesa ($1595,9 \text{ Wm}^{-2}$), křivka *b* emisi plně koncentrovaného černého tělesa ($7349,0 \times 10^4 \text{ Wm}^{-2}$), křivka *c* spektru AM1.5D ($767,2 \text{ Wm}^{-2}$) a křivka *d* spektru AM1.5G ($962,5 \text{ Wm}^{-2}$).

Účinnost je dále možné vylepšit použitím více různých struktur v článku a vytvořením více přechodů. U článku s dvěma přechody je tato hodnota již $\eta = 54,5\%$ a pro článek s třemi přechody $\eta = 63,2\%$. Limity navyšování účinnosti a ztrátové mechanismy jsou porovnány v následujícím grafu:



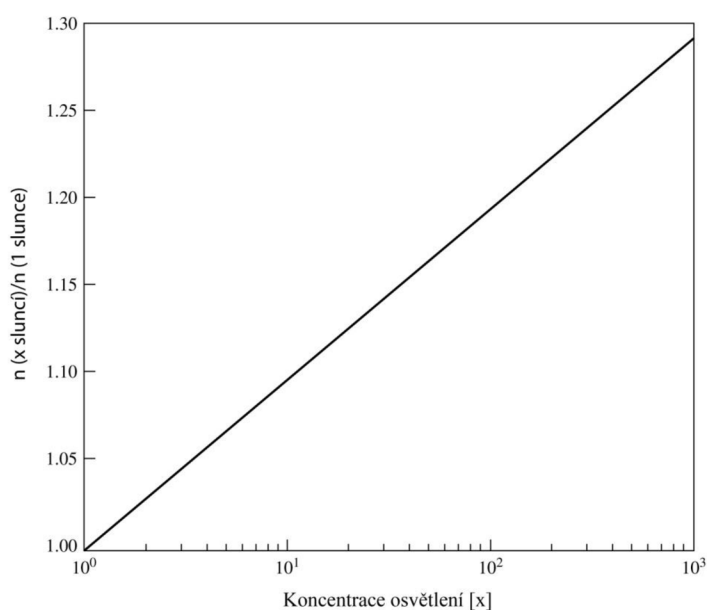
Obrázek 6 Graf závislosti max. účinnosti článku dle počtu PN přechodů [6]

V případě uvažování ideálního článku s nekonečným množstvím přechodů osvětlených monochromatickým světlem je udávána maximální teoretická hodnota účinnosti $\eta = 86,8\%$ pro osvit černým tělesem teploty 6000K a při okolní teplotě 300K. Tyto teoretické hodnoty však nejsou reálně dosažitelné, ať již kvůli dostupným materiálům, jejich zpracování, způsobu kontaktování či jiným.

U koncentrovaného záření dále dochází ke zvýšení účinnosti z důvodu vysokoúrovňové injekce nosičů. Účinnost teoreticky narůstá lineárně do koncentrace v řádů tisíců sluncí. Proud se zvyšováním intenzity narůstá téměř lineárně, dochází však ke zvýšení napětí naprázdno V_{oc} dle rovnice:

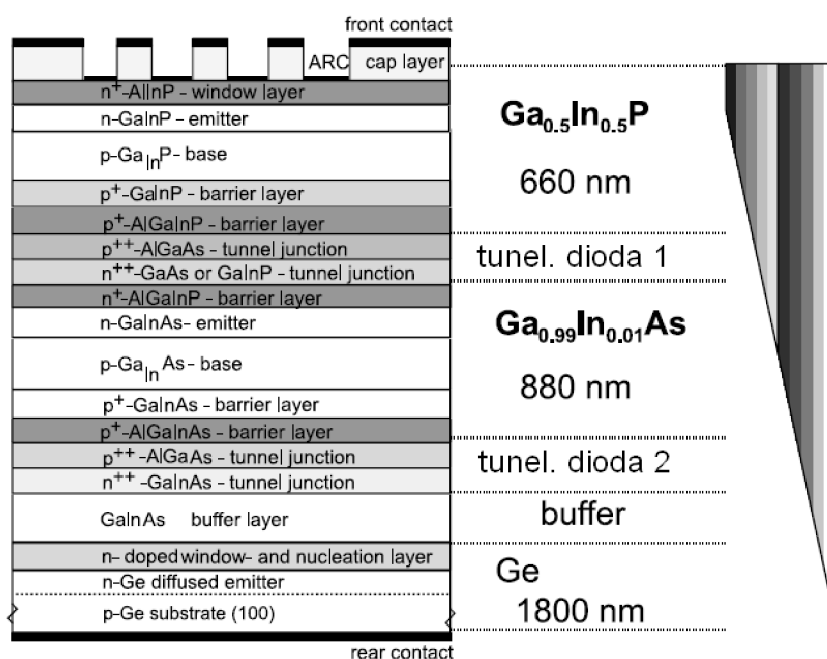
$$V_{oc} \approx (kT/e) \ln(J_{sc} / J_o) \quad [6]$$

Kde J_{sc} je proudový tok nakrátko a J_o proudový tok v zátěži. Z rovnice tedy vyplývá, že s každou dekadou zvýšení J_{sc} vlivem větší intenzity osvětlení dojde ke zvýšení napětí naprázdno o 60 mV u ideálního článku s jedním přechodem a teplotě 300 K. V praxi to znamená, že u článku s dvěma přechody bude pod koncentrací 1000 sluncí účinnost vyšší až o 15% a u článku s třemi přechody až o 21% oproti účinnosti bez koncentrace.



Obrázek 7 Účinnost článků vzrůstá s koncentrací záření [7]

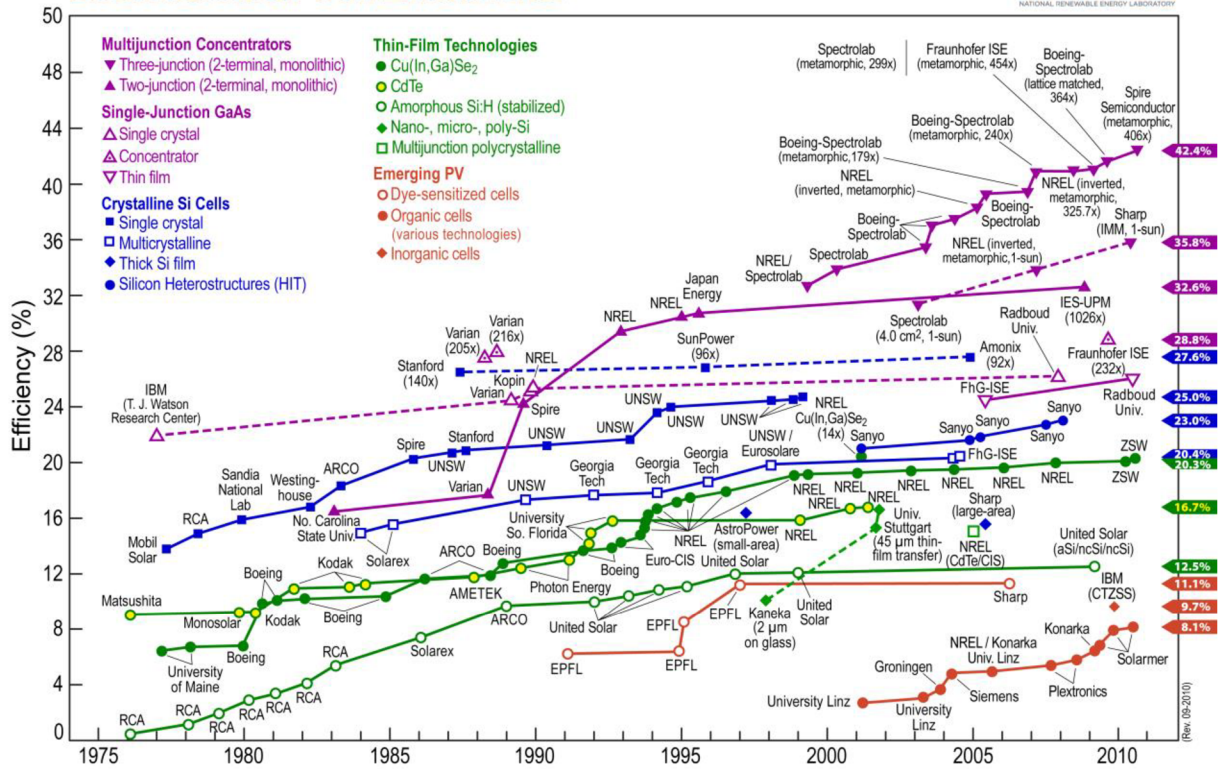
Reálný článek s více přechody pak je tvořen přechody sloučenin III a V skupiny prvků, tedy různým složením sloučenin $Ga_x-In_{1-x}P_x$ či $(Al_x-Ga_{1-x})_yIn_{1-y}As$. Příkladem je typická struktura monolitického 3-přechodového článku:



Obrázek 8 Typická struktura 3-přechodového článku [7]

Vývoj fotovoltaických článků se neustále posouvá dopředu. Pro demonstraci vývoje účinnosti jednotlivých technologií, ať již obyčejných či koncentrátorových článků, je uveden graf zvyšování účinnosti laboratorních článků za období 1976 – 2011 (Obrázek 9) [8]

Best Research-Cell Efficiencies



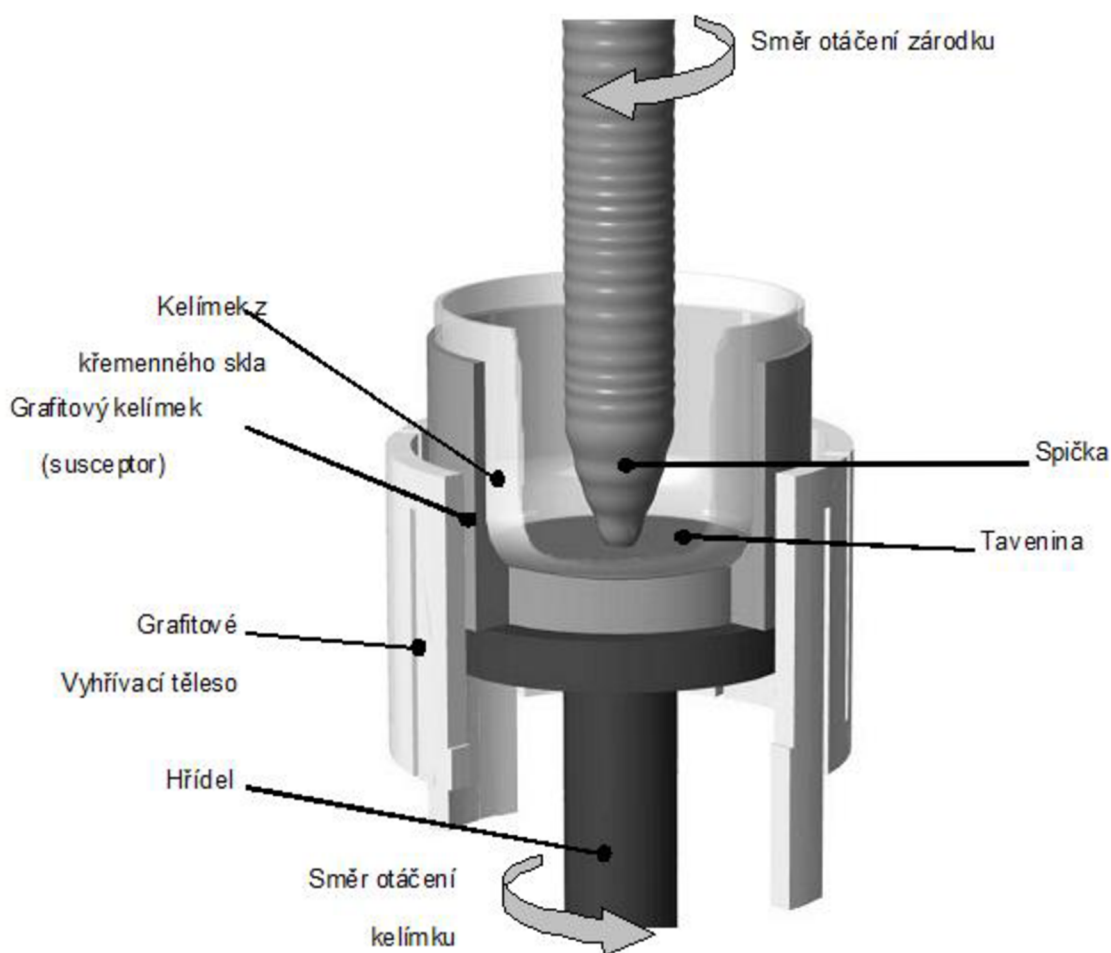
Obrázek 9 Vývoj špičkové účinnosti článků rozličných technologií v období let 1976 - 2011

2.4 Technologie výroby fotovoltaických článků

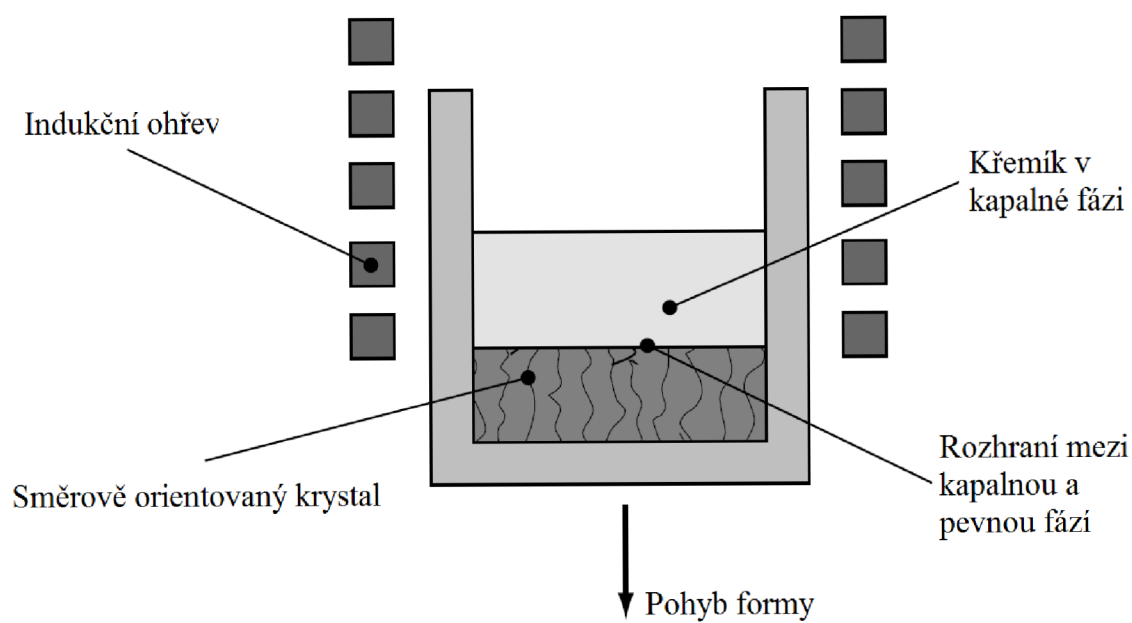
Technologie výroby fotovoltaických článků je komplexní proces. Typů fotovoltaických článků je rozličné množství, uvedena bude technologie výroby krystalických článků.

2.4.1 Výroba substrátu

Krystalické články se dělí na monokrystalické, jejichž základní materiál neboli ingot pro výrobu substrátu je vyráběn především Czochralského metodou, a polykrystalické, jejichž ingot je vytvářen roztavením suroviny ve formě. Ingot je následně rozřezán na plátky tenké řádově stovky um, tzv. wafery. Tyto jsou dotovány příměsí typu P, dochází k úpravě povrchu a hran a poté selekci vadných kusů.



Obrázek 10 Czochralského metoda tažení ingotu – monokrystalické články

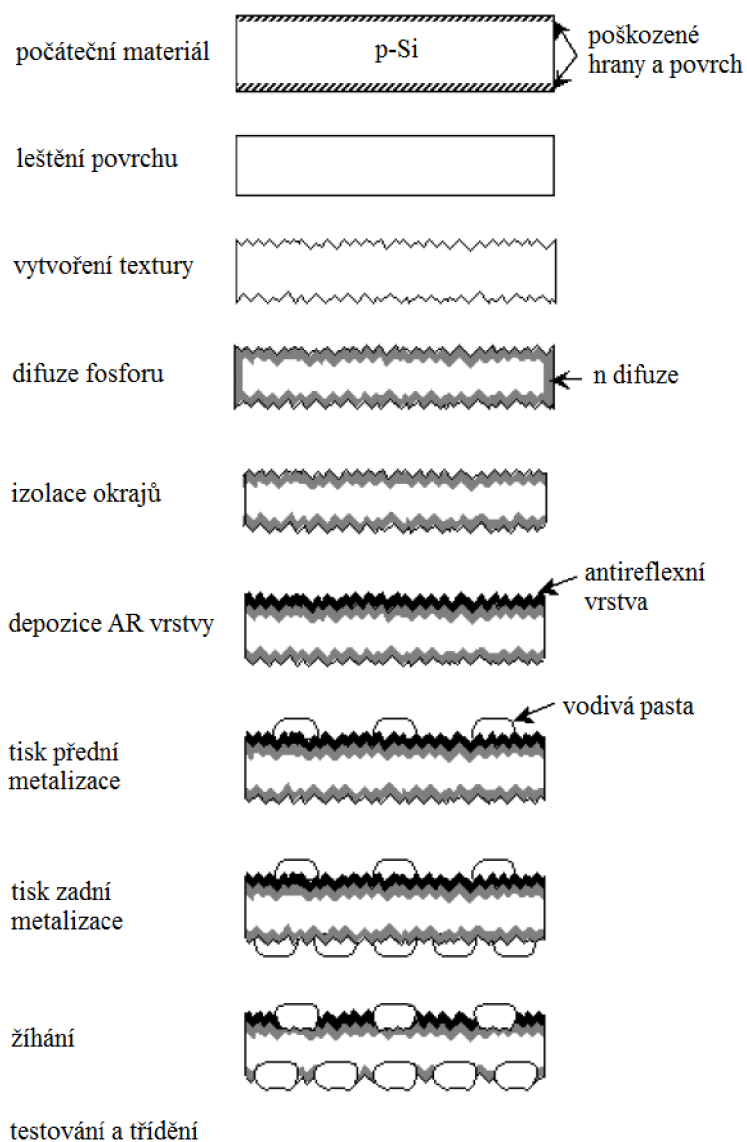


Obrázek 11 Metoda tavení ve formě – polykrystalické články

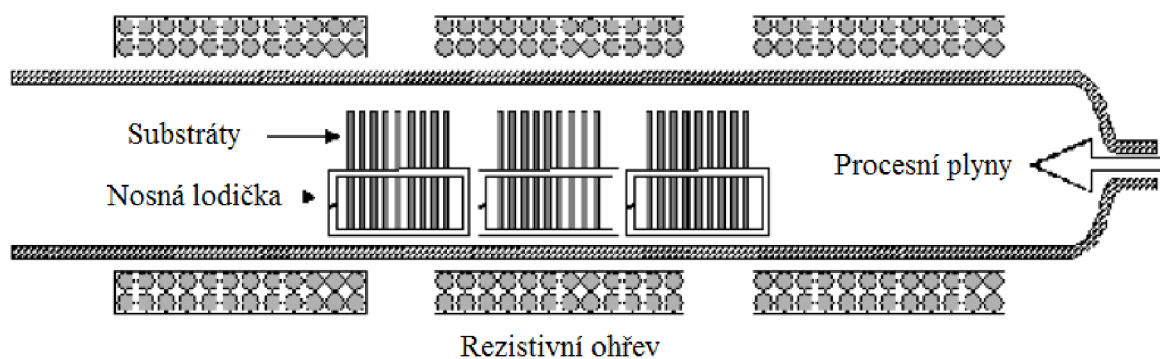
2.4.2 Výroba fotovoltaického článku

Jednotlivé základní kroky výroby článku ukazuje Obrázek 12. Sekvence kroků je následující:

- 1) Počáteční materiál neboli substrát má čtvercový tvar s délkou hrany mezi 10 a 15 cm, tloušťky 200 – 350 μm . Tento je dotovaný příměsí P-typu.
- 2) Desky substrátu mají z výroby mikrotrhliny na povrchu způsobené technologií jejich řezání pomocí drátu, a proto je nutné povrchovou vrstvu odstranit leštěním do hloubky cca 10 μm .
- 3) Pro snížení odrazivosti je na povrchu vytvořena nepravidelná textura. Tento proces probíhá leptáním horkým roztokem NaOH.
- 4) V následujícím kroku dochází k difuzi příměsí N typu, kterou je typicky fosfor. Difuze probíhá v peci při teplotě okolo 950°C vháněním čistého plynného fosforu či vodních par spolu s fosforem. Pec je ukázána na Obrázek 13
- 5) V peci dochází k difuzi na celém povrchu substrátu, a proto je nutné odstranění vrstvy na okrajích a jejich izolování. Odstranění probíhá v plazmové peci, kdy jsou substráty naskládány na sebe a vystaveny rozžhaveným sloučeninám fosforu. Variantou je laserové řezání.
- 6) Následuje depozice antireflexních vrstev na přední stranu substrátu. Antireflexní vrstva je tvořena oxidem titaničitým TiO_2 , který má téměř ideální antireflexní vlastnosti – tedy úhel lomu. Rozšířenou metodou je chemická parní depozice za atmosférického tlaku při teplotě okolo 200°C.
- 7) Šablonový tisk přední metalizace musí zaručit nízký kontaktní odpor, přesné a tenké vodiče, dobré mechanické přilnutí a především dobrou pájitelnost a zapouzdřitelnost.
- 8) Tisk zadní metalizace je v podstatě shodný s tiskem přední metalizace. Variantou je vakuové naprašování celé plochy zadní strany substrátu.
- 9) Žihání metalizace je prováděno kvůli vnoření kontaktů do vrstvy substrátu a tím lepší vodivosti.
- 10) Testování je v průmyslové velkovýrobě prováděno rychlým automatickým testerem pomocí krátkého záblesku. Vyrobené články jsou poté třízeny podle odečtených elektrických charakteristik.



Obrázek 12 Procesní kroky ve výrobě článku



Obrázek 13 Pec pro difuzi příměsí

2.5 Požadavky na koncentrátorové fotovoltaické články

Koncentrátorové systémy používají stejné materiály pro výrobu článků jako tradiční fotovoltaické panely. Jedná se tedy o články z krystalického křemíku, GaAs články či články s více PN přechody. Konstrukce systémů je rozmanitá a proto se nároky kladené na články značně liší. Malé koncentrace umožňují použít buď standartních panelů či vhodně uložených standartních článků, u koncentrací v řádu desítek či stovek sluncí však již nejsou takovéto články vhodné. Používají se proto články navrhnuté speciálně pro tyto aplikace. Nároky na koncentrátorové články jsou vyšší, než na ty standartní. Jedná se především o zvýšené teplotní namáhání a velké proudové hustoty v článku dané osvitem o několik řádů vyšším než bez koncentrace.

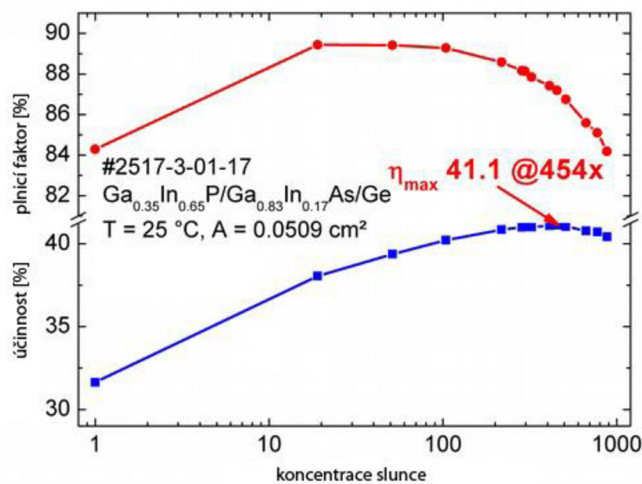
Standartní články určené pro aplikace bez koncentrace je přesto možné použít. Při koncentraci 10x bylo při měření pozorováno přibližně o 10 % zvýšená účinnost [5]. Při vyšší koncentraci však již budou významně narůstat odporové ztráty a to více, než poroste napětí naprázdno. Účinnost článku se tedy bude zvyšovat pouze do určité hodnoty koncentrace, nad kterou bude zase klesat. Také výrazně poroste teplotní namáhání a proudy článkem nad hodnoty, se kterými se při návrhu počítalo. Z tohoto důvodu je jejich použití omezené a při vyšších koncentracích je více než vhodné použití speciálních článků.

Nejdůležitějším poznatkem při studiu koncentrátorových systémů je tedy fakt, že se zvýšením koncentrace je možné dosahovat vyšší účinnosti článků. Výzkum článků pro koncentrátorové systémy se tedy zaměřuje na dosažení co nejvyšší účinnosti. Pro její dosažení je žádoucí splnit co nejlépe tyto požadavky [5][8]:

- vysoká kvalita materiálu s dlouhou dobou života minoritních nosičů
- dobrý návrh difuzí kvůli minimalizaci ztrát odporových a rekombinačních
- špičková pasivace povrchu
- dobrá pasivace okrajů článku (především u malých článků)
- špičkové zvládnutí odrazivosti a zachycení světla
- dobrý návrh metalizace pro minimalizaci optické a odporové ztráty vlivem zastínění článku pod kontaktem

V případě zvládnutí všech těchto problémů může účinnost teoreticky vzrůstat až do koncentrace v řádu tisíců násobků osvitu.

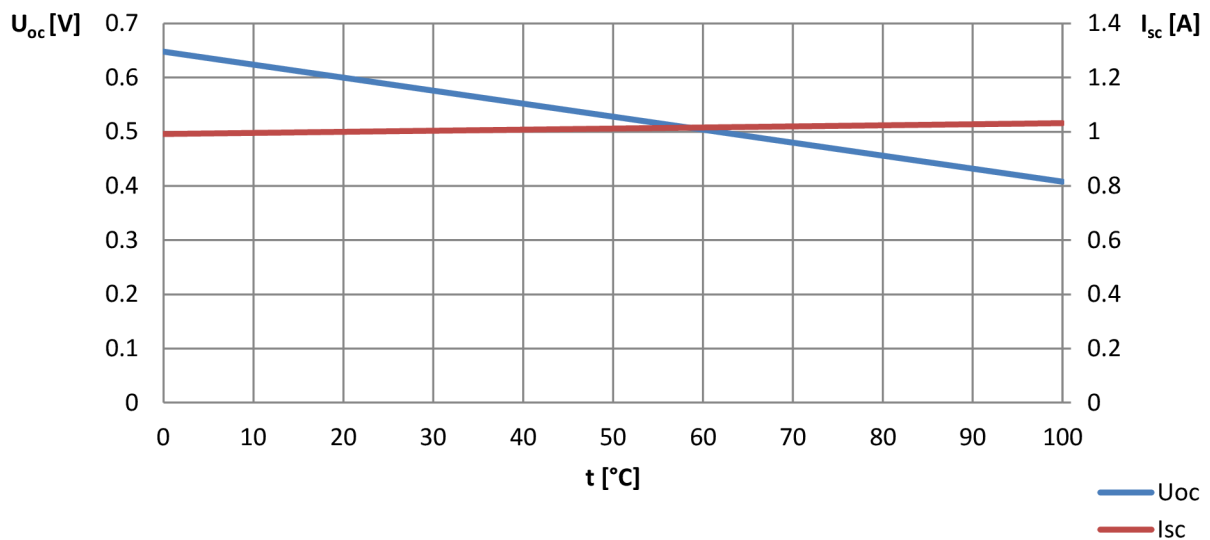
Praktickým zvládnutím výše popsaných požadavků je dosahováno čím dál vyšší účinnosti článků. Za několik desítek let vývoje došlo k významnému zvýšení účinnosti článků a rekordní hodnota se neustále posouvá nahoru. Většinou se jí daří dosáhnout pod koncentrací v řádu stovek násobků, a jak již bylo zmíněno výše, aktuální nejvyšší dosažená účinnost článku se prozatím zastavila na hodnotě 43,5%. Pro názornost je uvedena graf zvýšení účinnosti a plnicího faktoru předchozího rekordního článku z laboratoří Fraunhofer ISE v Německu [10].



Obrázek 14 Charakteristiky špičkového koncentračního článku [10]

2.6 Vliv teploty na články

Z hlediska vlivu na elektrické vlastnosti článků se zvýšená teplota projeví především snížením napětí na svorkách článku, což má na výsledný výkon a účinnost článku největší efekt. Pokles napětí naprázdno U_{oc} je u krystalického křemíku dle teoretických předpokladů přibližně $0,4\% \cdot K^{-1}$ [1]. Se stoupající teplotou nepatrně vzrůstá proud nakrátko, avšak jedná se o jeden či dva řády nižší hodnoty než u poklesu napětí (tedy typicky maximálně o $0,04\% \cdot K^{-1}$), proto nemá tento jev výrazný vliv na výsledný výkon. Graf názorně ukazuje vliv změny teploty na parametry Si článku (Obrázek 15).



Obrázek 15 Graf závislosti parametrů c-Si článku na teplotě

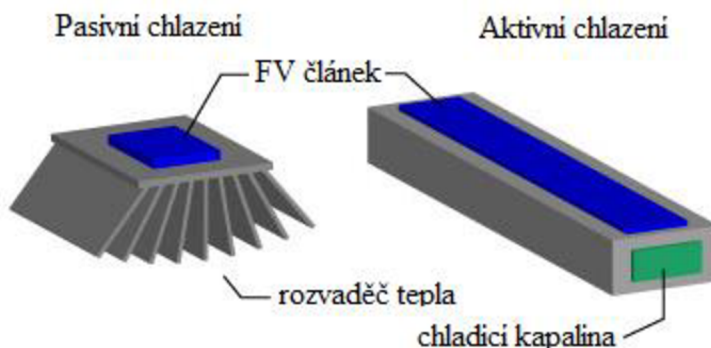
Kromě vlivu na elektrické vlastnosti článků se změny teploty projevují i u dalších parametrů. Tyto je důležité brát v potaz zejména při návrhu chlazení. Materiál článků se vyznačuje tepelnou vodivostí, tepelným odporem a délkovou roztažností při změně teploty. Například nejběžnější články křemíkové mají oproti GaAs článkům lepší tepelnou vodivost a trpí menší roztažností při zvýšené teplotě.

2.7 Chladiče

Koncentrování slunečního záření nepřináší jen výhody v podobě vyšší konverzní účinnosti článků, ale i nevýhody spojené s větším zahříváním. Světelné záření je přeměněno na elektrickou energii pouze zčásti, zbylá větší část se přemění na tepelnou energii. Tato tepelná energie u normálních FV systémů nezpůsobuje problémy, protože je odváděna bez použití speciálních chladičích komponent. Konstrukce koncentrátorových systémů však již musí řešit efektivní odvod tepla od článků kvůli zachování optimální teploty pro provoz a ochraně před jejich samotným zničením u systémů s velkou koncentrací.

Pro chlazení článků se používají rozličné typy chladičů. V drtivé většině jsou vyrobeny z kovů, nejčastěji z hliníku či mědi, které mají nejlepší tepelnou vodivost. Tyto se obecně rozlišují jako pasivní či aktivní. Aktivní chladiče se od pasivních odlišují použitím komponent pro hnaní chladicího média přes chladicí prvek, mohou to tedy být větráky pro foukání vzduchu či čerpadla pro pohon chladicí kapaliny. Chladicí médium nejčastěji mívá teplotu okolí, ale je také možné jeho chlazení pro dosažení nižších teplot článku.

Články je nutno k chladiči uchytit takovým způsobem, aby byly zároveň izolovány dokonale elektricky, ale naopak mohly co nejlépe předávat teplo do chladiče. V případě elektrické izolace spodní strany článků je možné připájení přímo na chladič a takovéto spojení je nejvýhodnější pro efektivní chlazení. V případě, že takovéto umístění není možné, je nutné články přichytit pomocí nevodivého materiálu. Typicky se jedná o různé keramické substráty, teplovodivé podložky či pasty. Důležité je mít při návrhu na mysli odlišné tepelné roztažnosti materiálů, protože pnutí může dojít k poškození článků. Propojení proto bývá realizováno buď materiálem se shodnou tepelnou roztažností, anebo materiálem elastickým, který vyrovná odlišnou roztažnost článku a chladiče samotného.



Obrázek 16 Princip pasivního a aktivního chlazení

2.8 Návrh článku pro koncentrátor

Poznatky ohledně vlastností článku a ztrát, které se v něm vyskytují, vedou k nutnosti vyřešení několika nejdůležitějších problémů:

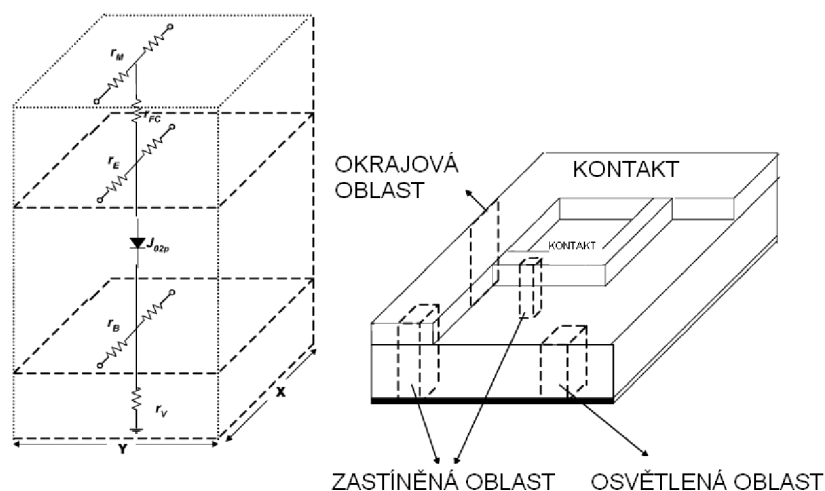
- Volba vhodného substrátu a technologie zpracování, také s přihlédnutím k dostupnosti
- Snížení sériového odporu
- Efektivní návrh kontaktů
- Vhodné zapouzdření pro odvod ztrátového tepla

2.9 Dostupné materiály a technologie

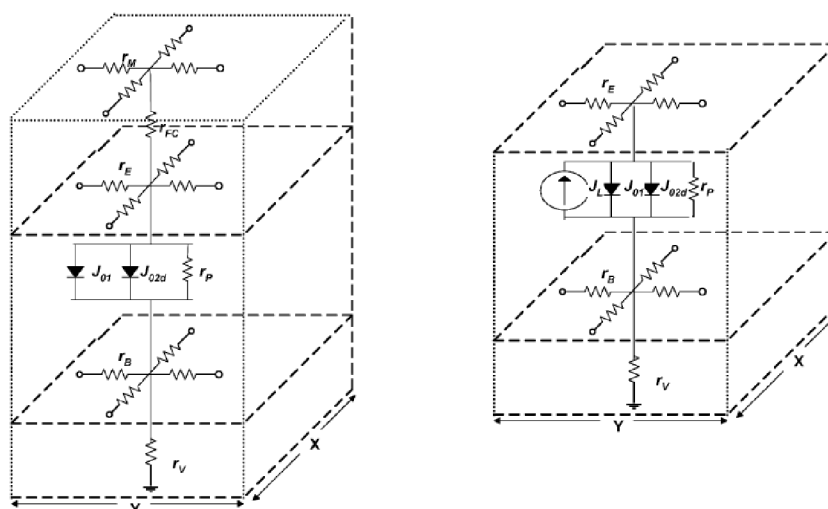
S přihlédnutím k dostupnosti a možnostem zpracování se jako nejvhodnější jeví výroba článku na bázi krystalické křemíku, germania a jejich kombinaci, či kombinace gallium-arsenid. Jako substrát je vhodné použít P-typ z důvodu přibližně 3x vyšší pohyblivosti elektronů oproti dírákům.

2.10 Vliv sériového odporu

Jedním z největších problémů způsobujících snížení výkonu je sériový odpor článku. Ten je tvořen různými složkami a názorně jej popisuje obrázek 3D distribučního modelu článku se základními obvodovými jednotkami:

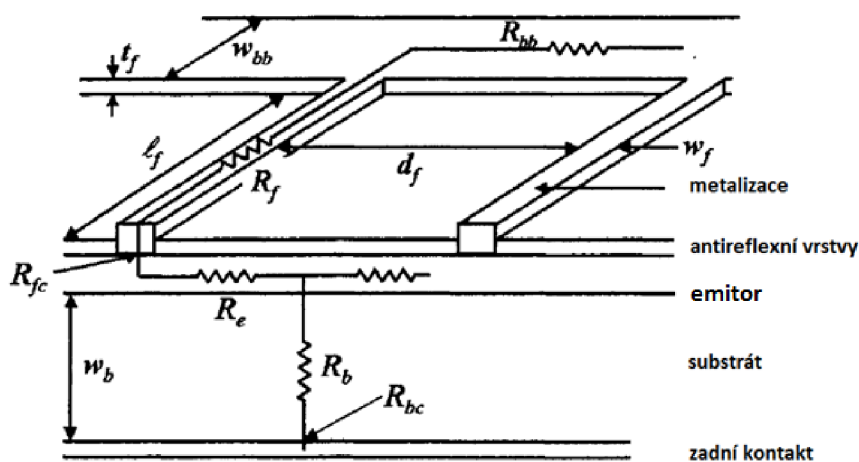


Obrázek 17 3D distribuční model článku se základními obvodovými jednotkami [2]



Obrázek 18 3D distribuční model článku se základními obvodovými jednotkami [2]

Sériový odpor reálného fotovoltaického článku s definovanými rozměry a znalostí vlastností použitých materiálů se pak spočítá jako kombinace odporů jednotlivých složek uvedených v tabulce 1. [2] Jak vyplývá z obrázku, podstatnou složkou sériového odporu jsou odpory kontaktů, a proto je vhodné jejich návrh provést tak, aby byl co nejvíce snížen. Odpor samotného substrátu je pak dán vlastnostmi použitého materiálu a proto nelze ovlivnit v takové míře.

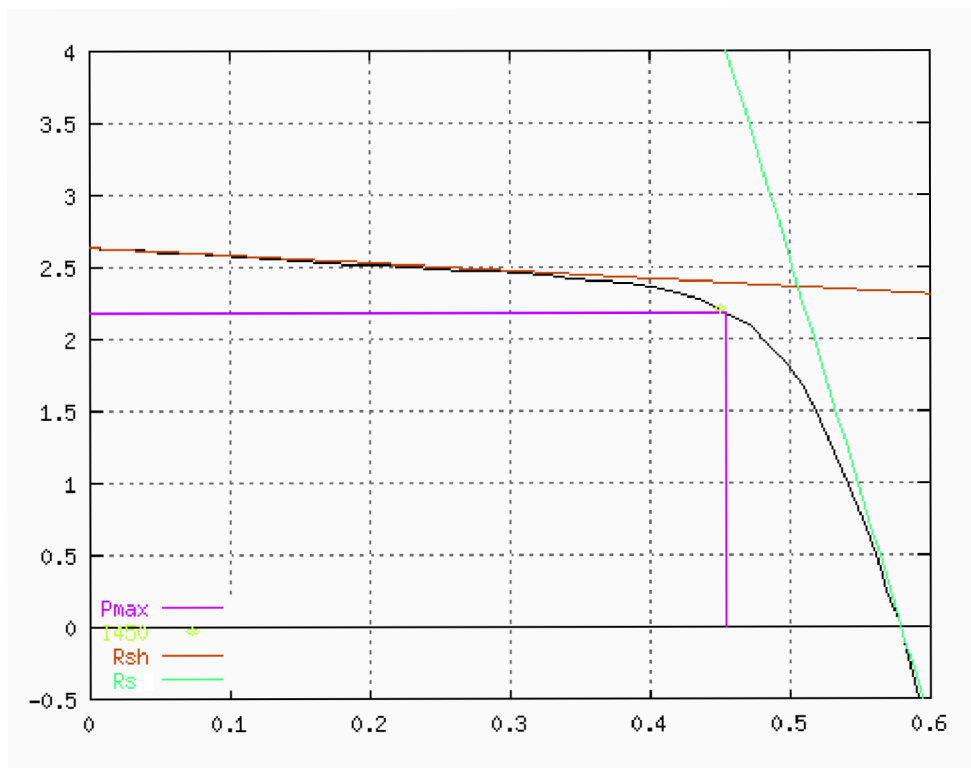


Obrázek 19 Součásti sériového odporu v reálném fotovoltaickém článku

Tabulka 1 Složky sériového odporu reálného fotovoltaického článku

Složka odporu	Značka
Odpor emitoru	R_e
Odpor substrátu	R_b
Odpor kontaktů: horní metalizace	R_{fc}
Odpor kontaktů: zadní metalizace	R_{bc}
Odpor prstu metalizace	R_f
Odpor sběrnice	R_{bb}

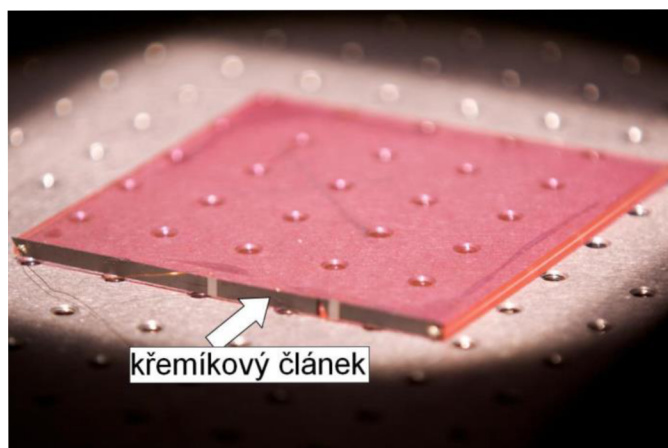
Vliv parazitního odporu se na křivce A-V charakteristiky projeví jejím posunem v určitém směru. V případě sériového odporu R_s dojde ke snížení napětí v bodě maximálního výkonu a nepatrnému poklesu proudu. V případě paralelního odporu R_{sh} dojde ke snížení proudu v bodě maximálního výkonu a nepatrnému snížení napětí. [12]



Obrázek 20 Vliv parazitních odporů na AV charakteristiku

2.11 Zapouzdření pro odvod tepla

Nejefektivnější způsob zapouzdření se jeví použití stejného přístupu jako u výkonných LED diod. V případě 1000-násobné koncentrace záření bude dopadat na 1 cm^2 článku 1 W energie, kdy při dosažené účinnosti 30 % bude ztrátové teplo přibližně 700 mW. Článek není třeba chladit aktivním chladičem, pro odvod takovýchto hodnot postačuje pasivní chladič. Uchycení článku k pasivu je příhodné provést MJC letováním či teplovodivou pastou na měděnou podložku z důvodu dobrého vedení tepla.



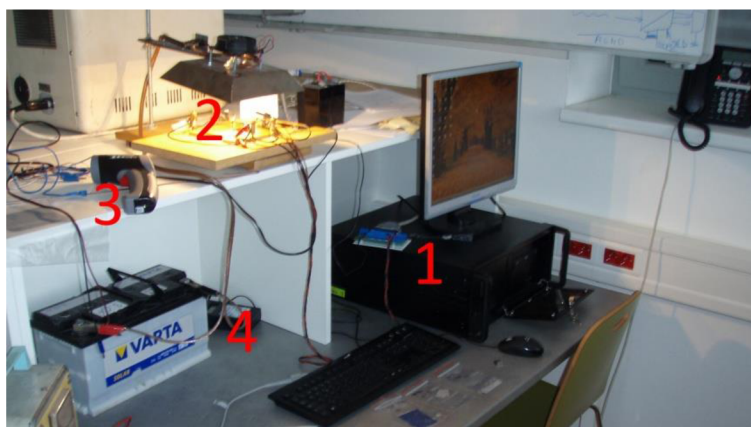
Obrázek 21 Způsob uchycení článku na podložku [11]

3 Měření a výběr referenčního článku

3.1 Popis měřicího pracoviště

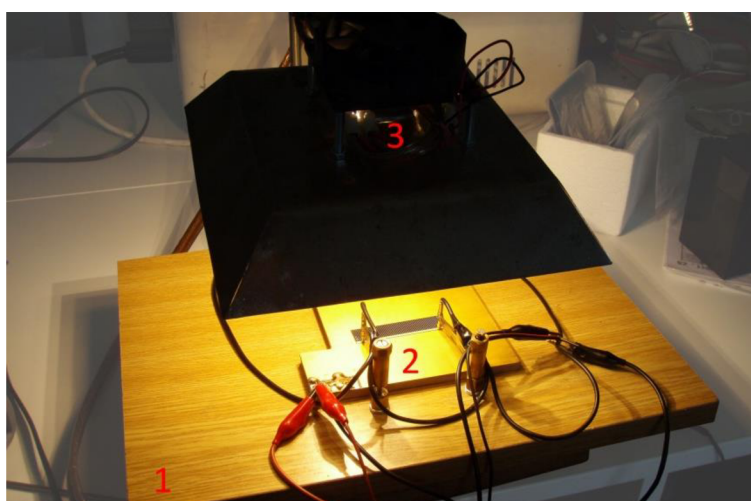
Měřicí pracoviště se skládá z přístroje pro měření elektrických charakteristik článků, měřicího přípravku, měřiče intenzity osvětlení a dále je k dispozici IR teploměr (viz. Obrázek 22).

Přístroj pro měření elektrických charakteristik IV tracer Solarlab je připojen k osobnímu počítači a ovládán pomocí dodaného software. Kromě měření A-V charakteristik článků a panelů umožňuje analýzu parazitních odporů a měření závislosti charakteristik na intenzitě osvětlení a teplotě. (viz. Obrázek 22 - popis 1)



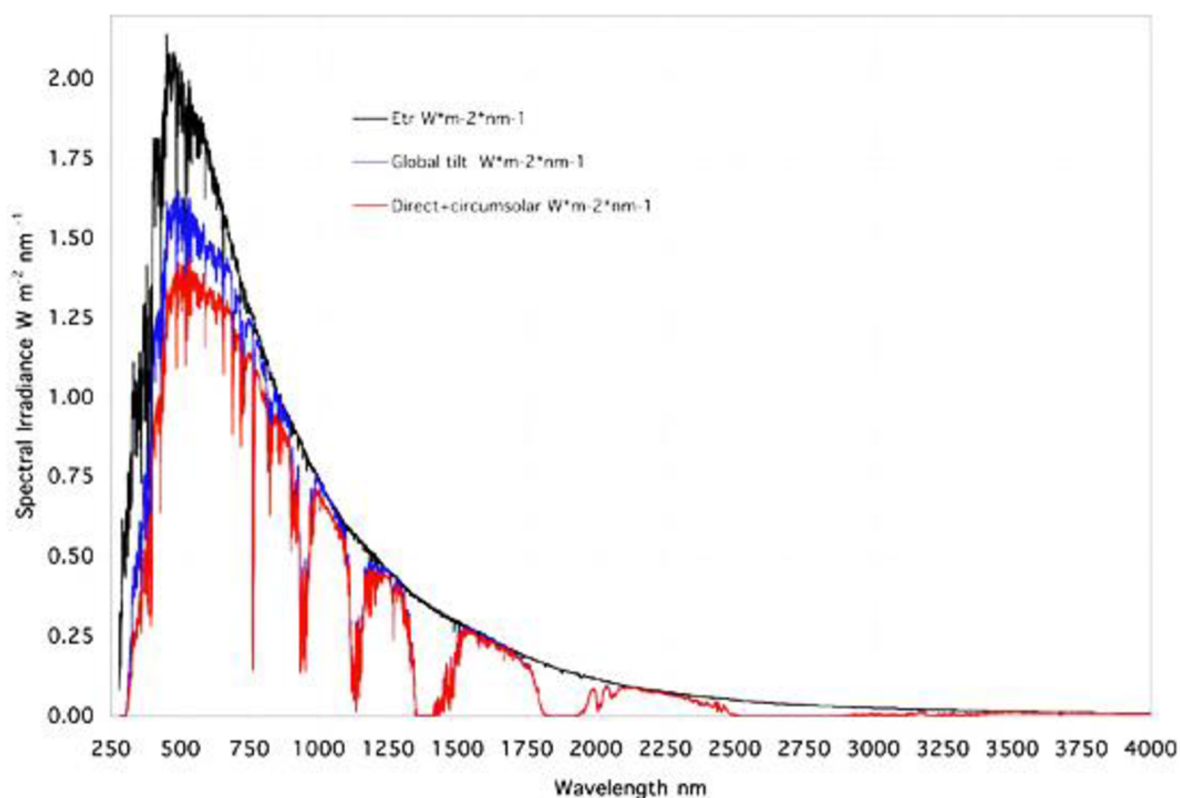
Obrázek 22 Měřicí pracoviště

Měřicí přípravek sestává ze základní dřevotřískové desky (1), elektrodového systému pro připojení měřených článků (2), a zářivky pod zahnutým odrazným plechem s aktivním chladičím větrákem (3). Zdroj světla je kalibrován na intenzitu záření 1000 Wm^{-2} v rovině měřeného článku. Jako zdroj elektrické energie slouží autobaterie s napětím 12V. (viz. Obrázek 22 – popis 2 a 4; Obrázek 23).

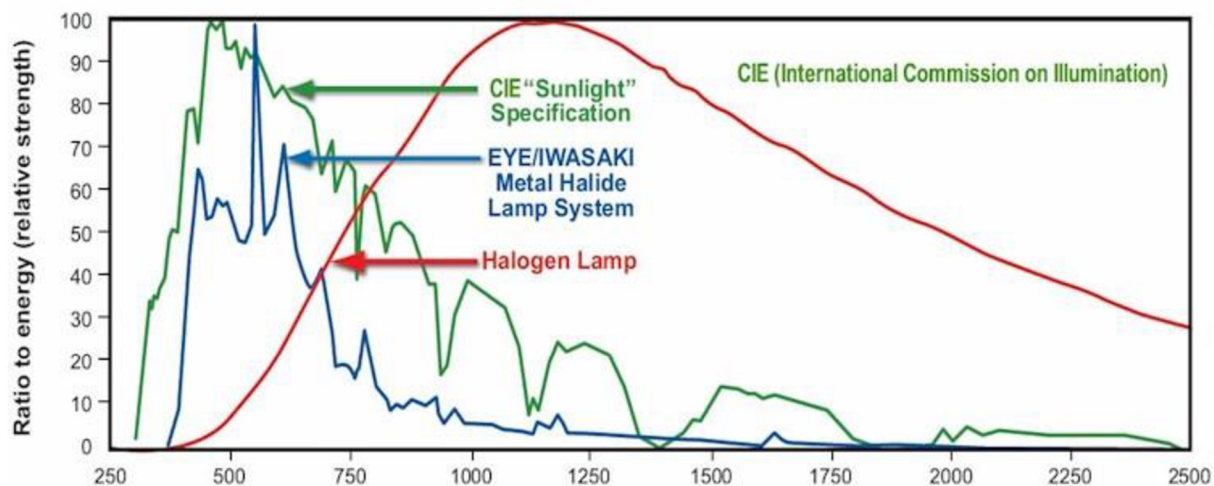


Obrázek 23 Měřicí přípravek

Pro charakterizaci článků je nutné znát spektrum světelného zdroje. Standardní testovací podmínky pro charakterizaci článků počítají se spektrem *AM1.5g* neboli spektrem dopadajícího slunečního záření na povrchu země pod úhlem paprsků 45° . Halogenové výbojky použité v konstrukci měřicího přípravku nejsou označeny, proto je uvažováno spektrum typické pro běžnou halogenovou výbojku. Toto spektrum se od slunečního spektra liší, vrchol charakteristiky se nachází mimo viditelné spektrum. Obrázek 24 ukazuje charakteristickou křivku spektra *AM1.5g* a Obrázek 25 ukazuje porovnání spektra *AM1.5g* a spektra halogenové výbojky. Rozdíl ve spektrálních vlastnostech zdroje je v tomto případě zanedbán, protože má malý vliv na měření a konstrukce dokonalého zdroje světla není cílem této práce.

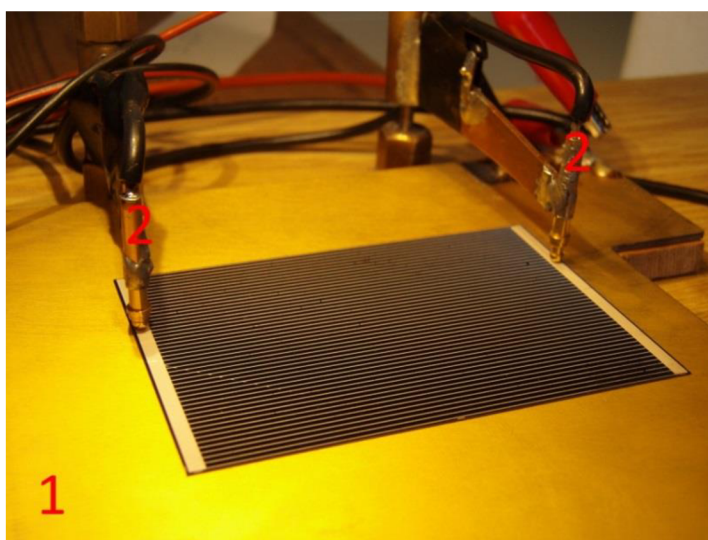


Obrázek 24 Spektrum *AM1.5g* (modrá křivka) [13]



Obrázek 25 Porovnání spektra AM1.5g (zelená křivka) a spektra halogenové výbojky (červená křivka) [14]

Elektrodový systém je řešen tak, že plocha pro umístění článku je elektroda jednoho pólu (1) a článek je přitlačen k této ploše elektrodami druhého pólu (2). (viz. Obrázek 26)



Obrázek 26 Přípravek pro připojení článku

Kalibrace intenzity osvětlení je provedena nastavením zdroje světla do správné výšky. Ověření správné intenzity bylo provedeno pyranometrem TM-RS-81, typ SG420. (viz. Obrázek 27)



Obrázek 27 Pyranometr

Posledním použitým přístrojem byl IR teploměr CEM DT8819.



Obrázek 28 IR teploměr CEM DT8819

3.2 Popis měřených FV článků

Pro praktické měření byly od firmy Solartec s.r.o. získány vzorky fotovoltaických článků. Jedná se o monokrystalické křemíkové FV články s metalizací typu Al-BSF, která je nanesena metodou sítotisku. Na zadní straně jsou články pokoveny v celé ploše, na přední jsou natisknuty kontakty a úzké vodiče pro snížení zastínění článku vlastní metalizací. Dodané články již byly používány, proto se na nich vyskytují vady. Celkový počet článků je 9 kusů, z toho:

- 1) 3 ks článků rozměru 72×48 mm



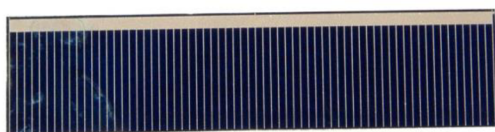
Obrázek 29 FV článek rozměru 72×48 mm

- 2) 3 ks článků rozměru 27×20 mm



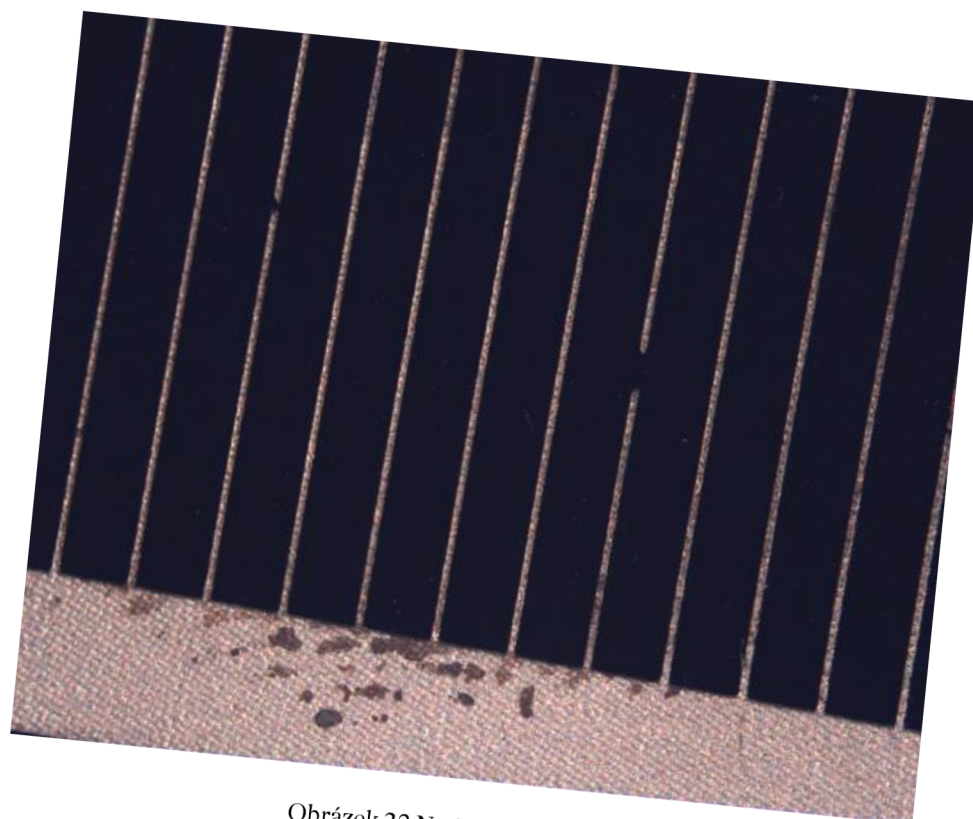
Obrázek 30 FV článek rozměru 27×20 mm

- 3) 3 ks článků rozměru 16×60 mm

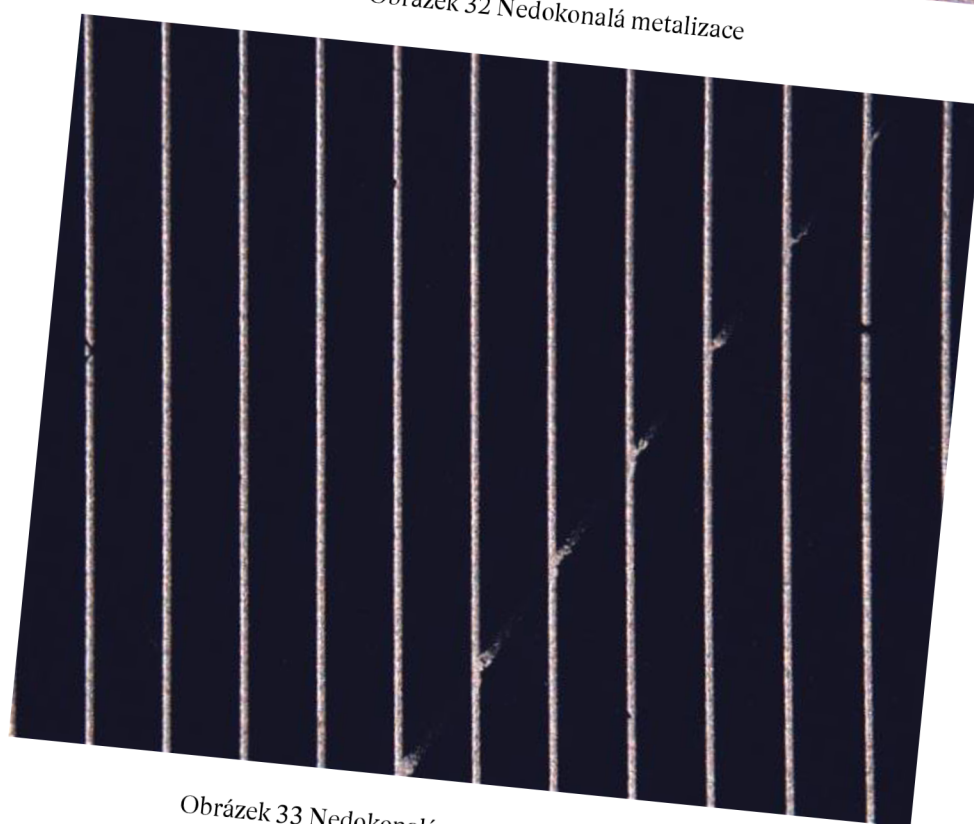


Obrázek 31 FV článek rozměru 16×60 mm

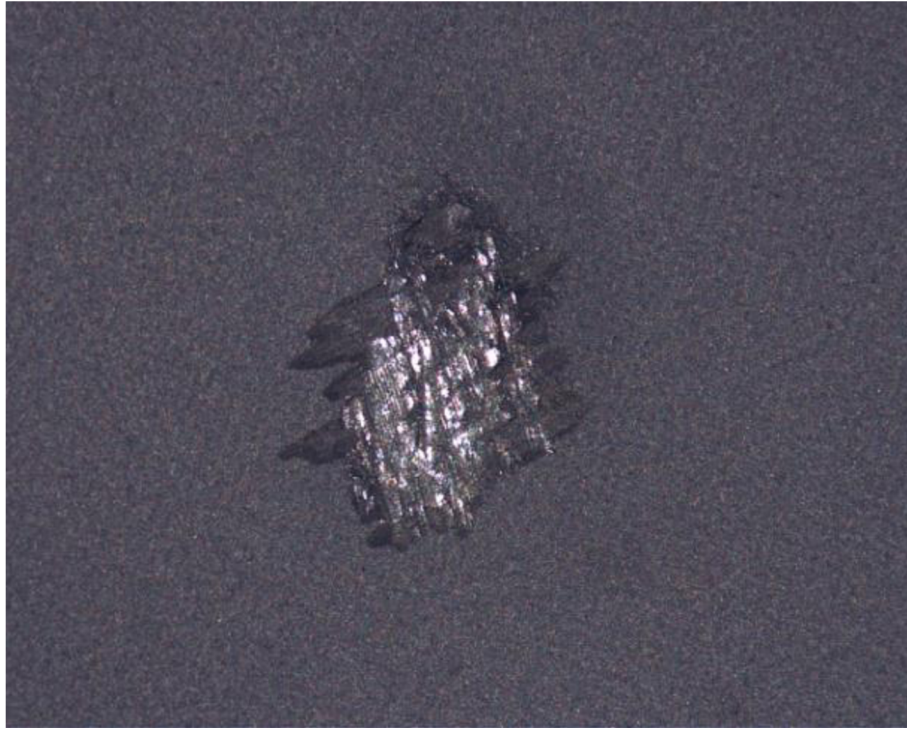
Před vlastním měřením byly články podrobeny vizuální kontrole pod mikroskopem Olympus SZ-21 a instalovanou digitální kamerou uEye UI-1440-C byly pořízeny snímky vad nalezených na článcích. Pro dokonalejší analýzu vad článků by byla vhodnější metoda elektroluminiscence, tato však nebyla v době zpracování práce dostupná. Zjištěné závady jsou dvojího původu – buď vznikly již při výrobě článků, anebo byly vytvořeny během jejich používání. Mezi pozorované závady vzniklé při výrobě patří především nedokonalé vytvoření metalizace, mezi závady vzniklé používáním pak nečistoty, vrypy, oxidace povrchu.



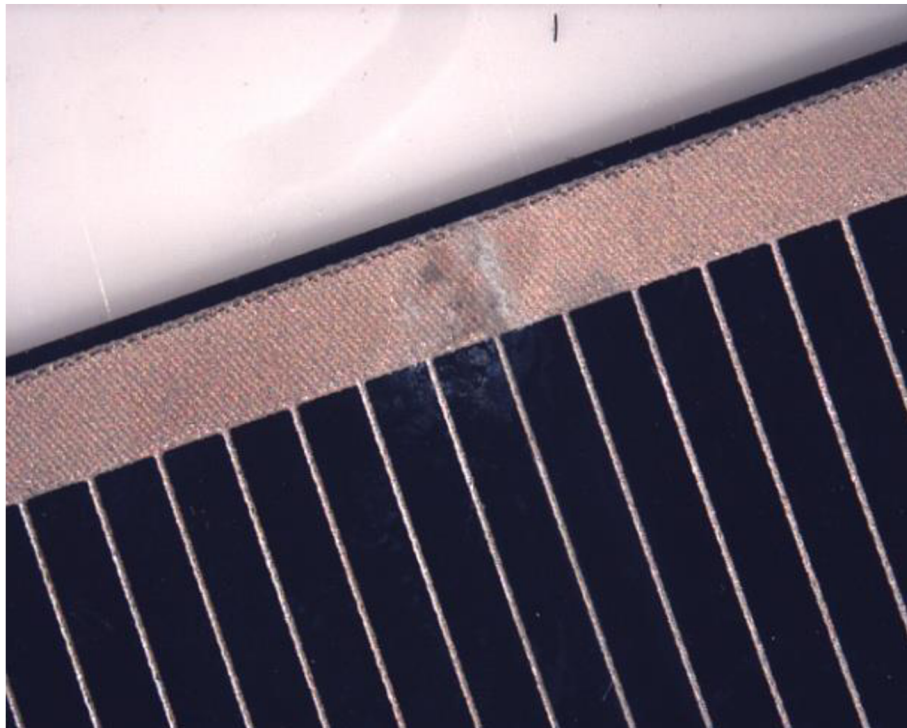
Obrázek 32 Nedokonalá metalizace



Obrázek 33 Nedokonalá metalizace, oxidace metalizace



Obrázek 34 Vrypy na spodní straně článku



Obrázek 35 Oxidace metalizace a pasivace

3.3 Výsledky měření a výběr referenčního článku

Články byly změřeny za testovacích podmínek uvedených v tabulce Tabulka 2 Testovací podmínky. Z naměřených hodnot byly sestrojeny grafy A-V a P-V charakteristik a vypočítány určující hodnoty pro charakterizaci článků, zaznamenané do tabulky 1.

Tabulka 2 Testovací podmínky

záření v rovině článku	[W/m ²]	1000
spektrum	[-]	halogenová výbojka
teplota článku	[°C]	40

Tabulka 3 Elektrické charakteristiky článků

článek	U _{oc} [mV]	I _{sc} [mA]	U _m [mV]	I _m [mA]	P [mW]	FF [-]	η [%] @40°C
72x48 čl.1	568,6	534,2	459,5	495,6	227,73	0,75	6,59
72x48 čl.2	566,7	504,9	446,7	464,9	207,67	0,73	6,01
72x48 čl.3	552,1	613,6	434,5	565,9	245,88	0,73	7,11
27x20 čl.1	576,8	106,8	464,6	93,8	43,58	0,71	8,07
27x20 čl.2	546,6	97,9	417,2	81,9	34,17	0,64	6,33
27x20 čl.3	563,0	97,5	449,4	85,9	38,60	0,70	7,15
16x60 čl.1	566,7	188,8	461,8	172,8	79,80	0,75	8,31
16x60 čl.2	567,2	172,5	461,3	155,8	71,87	0,73	7,49
16x60 čl.3	569,4	174,4	464,3	160,9	74,71	0,75	7,78

Vysvětlivka:

U_{oc}... napětí naprázdno

I_{sc}... proud nakrátko

U_m... napětí v bodě maximálního výkonu

I_m... proud v bodě maximálního výkonu

P... výkon pod daným osvětlením, výpočet dle vzorce:

$$P = U_m \cdot I_m \quad [7]$$

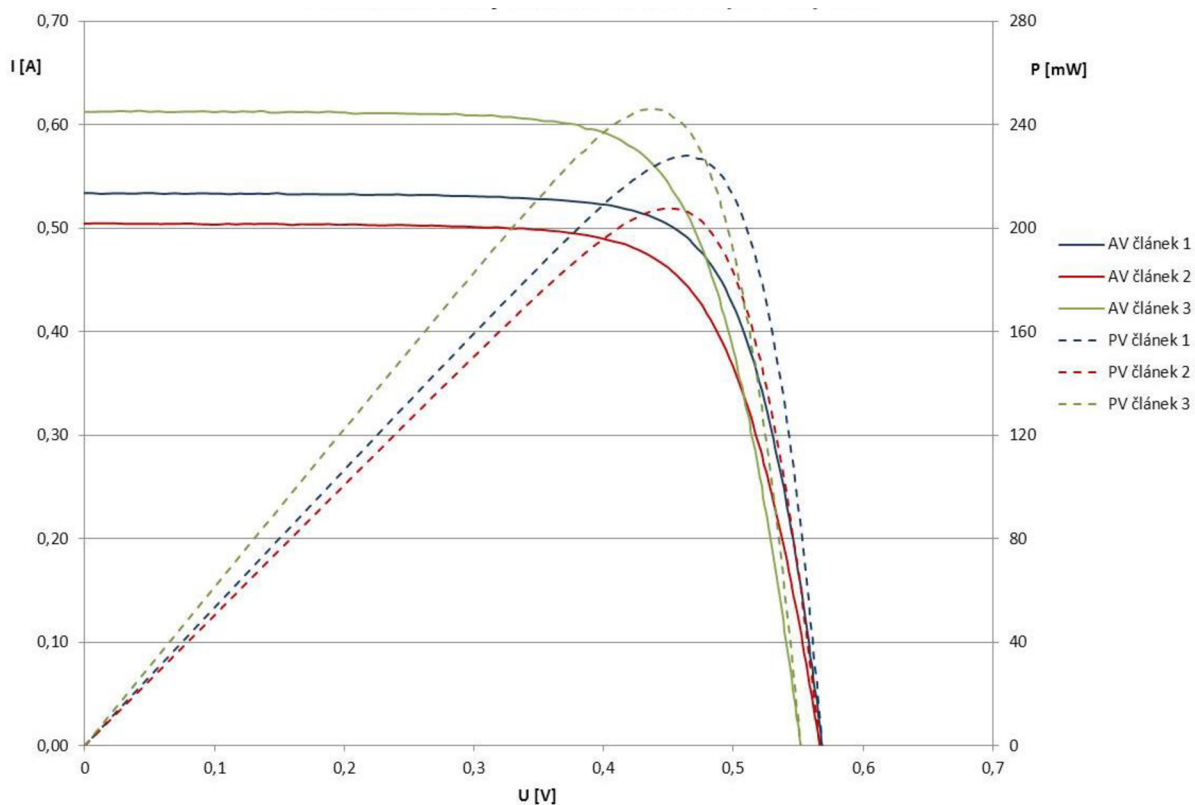
FF... fill factor, výpočet dle vzorce:

$$FF = \frac{P}{U_{oc} \cdot I_{sc}} \quad [8]$$

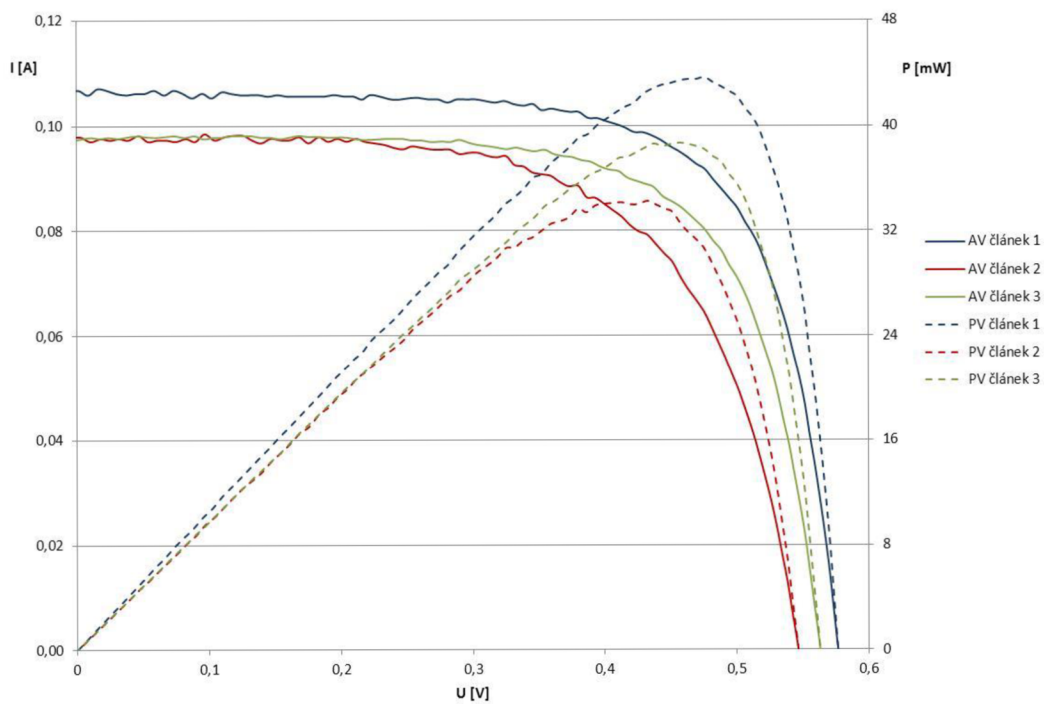
η... účinnost článku, výpočet dle vzorce:

$$\eta = \frac{P}{E \cdot S}, \text{ kde } E \text{ je intenzita dopadajícího záření a } S \text{ plocha článku} \quad [9]$$

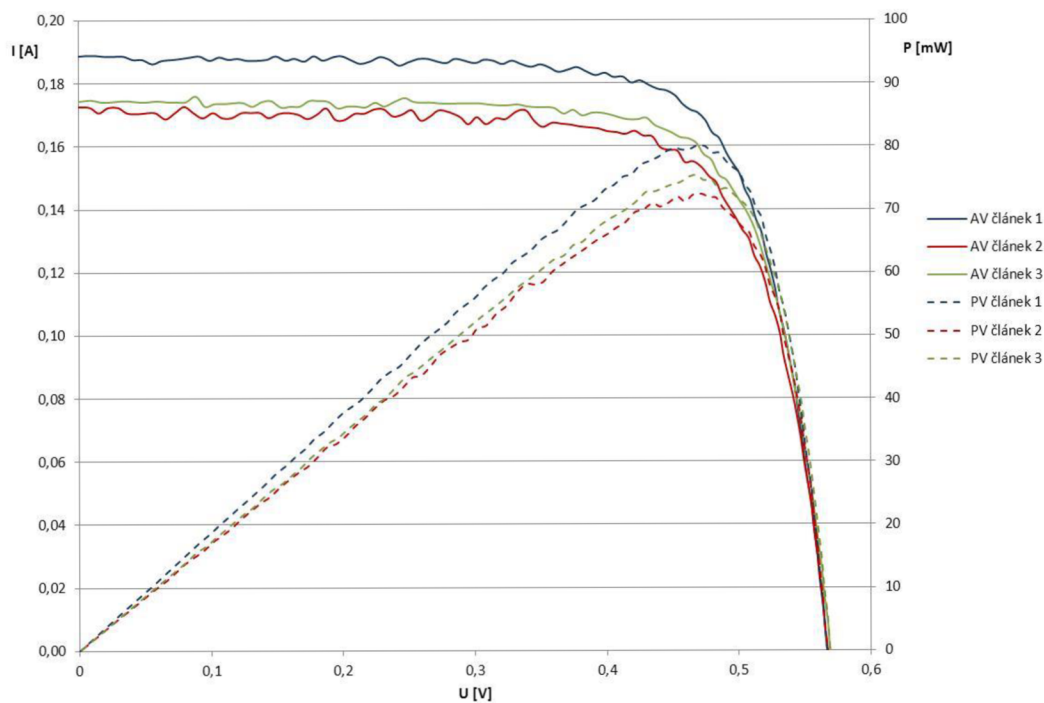
Z výše uvedeného vyplývá, že články menších velikostí se jeví jako účinnější. Tento jev není nejspíše dán jejich menší plochou, ale zřejmě lépe provedenou výrobou a menším poškozením. Také mají tyto články menší metalizované plochy v poměru k celkové ploše článku a tudíž menší ztráty vlastním zastíněním, při kterém se zvyšuje parazitní odpor. Zjištěné lepší vlastnosti menších článků jsou výhodné i pro další výzkum, protože je možná konstrukce menšího koncentrátoru s menší osvětlenou plochou. Jako referenční byly tedy vybrány články rozměru 27x20 mm. Tento rozměr se také jeví jako nejvhodnější z důvodu malé plochy a díky tomu omezení velikosti samotné koncentrátorové optiky.



Obrázek 36 Charakteristiky článků rozměru (72x48) mm



Obrázek 37 Charakteristiky článků rozměru (27x20) mm



Obrázek 38 Charakteristiky článků rozměru (16x60) mm

4 Čisté prostory na ÚFKL MUNI

Výroba polovodičových prvků musí probíhat v čistých prostorech, kde je prašnost prostředí výrazně nižší, než v běžné atmosféře. Pro výrobu fotovoltaických článků není kvalita čistoty natolik kritická jako u výroby mikroelektronických struktur, a to z důvodu mnohem větší velikosti struktur, přesto však není možné provádět výrobu článků v běžné atmosféře s přijatelnou výtěžností procesu. Prostory splňují třídu čistoty 100.

Laboratoř čistých prostor disponuje zařízeními pro celý proces výroby polovodičových struktur a tyto jsou shrnuty v tabulce Tabulka 4 Seznam zařízení v čistých prostorách.

Tabulka 4 Seznam zařízení v čistých prostorách

Zařízení	Proces
Oxidační pec DA62	Mokrý či suchá oxidace, rozdifundování příměsí
Spinner	Nanášení laku a čištění desek
Baker	Vytvrzení fotolaku
Fotolitograf Perkin-Elmer	Expozice masek
Difuzní pec DA62	Difúze a rozdifundování bóru
Difuzní pec DA62	Difúze a rozdifundování fosforu
Chemické boxy	Leptání a oplach desek, vyvolání laku
Diamantové pero	Popis desek
Naprašovačka MRC603	Naprašování metalizace
Pec na žíhání metalizace	Žíhání metalizace
Hydrofobizátor	Hydrofobizace desek
Sušička	Sušení desek

5 Výroba fotovoltaického článku

Výroba navrženého fotovoltaického článku nebyla provedena z kapacitních důvodů laboratoře na Ústavu fyziky kondenzovaných látek Masarykovy univerzity v průběhu letního semestru. Výroba první série vzorků je naplánována v průběhu měsíce června.

6 Závěr

Diplomová práce teoreticky shrnuje poznatky o koncentrátorových systémech a fotovoltaických článcích pro ně vhodných. Zabývá se představením principu fotovoltaické přeměny slunečního záření na elektrický proud, fyzikálními vlastnostmi článků a parametry článků pro koncentrátorové systémy. Jsou shrnuty hlavní překážky zvyšování účinnosti článků a nastíněna možnost jejich řešení.

Bylo tedy zjištěno, že koncentrátorové systémy představují perspektivní možnost rozvoje fotovoltaiky. Slibují snížení nákladů na výrobu elektřiny ze slunce a to především díky nahrazení drahých FV článků levnější optikou a vyšší účinností provozu. Oproti normálním systémům mají své nevýhody, především ve složitější konstrukci, montáži a údržbě. Tyto jsou však kompenzovány většími dosažitelnými výkony a vyšší účinností článků při koncentrovaném osvitu. Hodí se především do velmi slunných lokalit, protože nedokáží efektivně využít difuzní záření.

V praktické části byla provedena charakterizace vlastností vzorků monokrystalických fotovoltaických článků poskytnutých firmou Solartec s.r.o. Na základě měření jejich elektrických charakteristik a následného posouzení účinnosti byly vybrány články vhodné jako referenční pro porovnání s vyrobenými články.

Výroba článků nebyla provedena z důvodu nízké kapacity výroby čistých prostor. První zkušební série je naplánována do výroby v průběhu měsíce června 2013.

7 Seznam použité literatury a zdrojů

- [1] http://en.wikipedia.org/wiki/Concentrating_solar_power [19.4.2013]
- [2] Antonio Luque, Steven Hegedus: *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*, 2003, John Wiley & Sons Ltd, Velká Británie
- [3] W. Shockley, H. J. Queisser, *Journal of Applied Physics*, vol. 32, pp. 510- 519, 1961
- [4] <http://cleantechnica.com/2011/04/19/solar-junction-breaks-concentrated-solar-world-record-with-43-5-efficiency/> [19.4.2013]
- [5] <http://www.ferro.com/NR/rdonlyres/98ED59E8-AFBF-4EE0-9263-AE62CC0840AE/4325/EnvironmentallyFriendlyConductorMaterials.pdf> [30.4.2013]
- [6] <http://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/5517-historie-a-perspektivy-oze-fotovoltaika-mene-rozsirene-technologie> [30.4.2013]
- [7] Tom Markvart, Luis CastaVer: *Solar Cells: Materials, Manufacture and Operation*, 2005, Elsevier Ltd., Velká Británie
- [8] [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:PVeff\(rev100921\).jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:PVeff(rev100921).jpg) [30.4.2013]
- [9] Antonio L. Luque, Viacheslav M. Andreev: *Concentrator photovoltaics*, 2007, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Německo
- [10] <http://www.ise.fraunhofer.de/press-and-media/press-releases/press-releases-2009/world-record-41.1-efficiency-reached-for-multi-junction-solar-cells-at-fraunhofer-ise> [30.4.2013]
- [11] <http://faculty1.ucmerced.edu/Assets/sghosh/Image/sample.jpg> [30.4.2013]
- [12] <http://test.solartec.cz/files/images/projekty/zajimavosti/mereni-clanku/charakteristika-1.gif> [30.4.2013]
- [13] <http://rredc.nrel.gov/solar/spectra/am1.5/> [30.4.2013]
- [14] http://www.eyesolarlux.com/MH-halogen_spectrum_plot.jpg [30.4.2013]