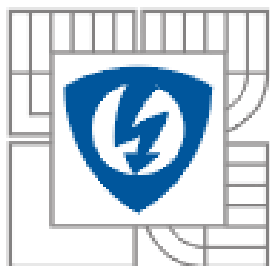


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF ELECTROTECHNOLOGY

## TESTER FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ A PANELŮ

*TECHNOLOGICAL PROCESS CHARACTERIZATION*

*SEMESTRALNÍ PRÁCE*

*BACHELOR'S THESIS*

*AUTOR PRÁCE*

AUTHOR

*STANISLAV PAVLÍK*

*VEDOUCÍ PRÁCE*

SUPERVISOR

*ING. JIŘÍ VAŇEK, PH.D.*

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ  
Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií  
Ústav elektrotechnologie

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor  
Mikroelektronika a technologie

**Student:** Stanislav Pavlík  
**Ročník:** 3

**ID:** 134382  
**Akademický rok:** 2013/14

**NÁZEV TÉMATU:**

## Tester fotovoltaických článků a panelů

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s metodami testování kvality fotovoltaických článků a panelů. Navrhněte přípravek pro testování solárních článků pomocí stávajícího zařízení PASAN SunSim 3c. Na vybraných solárních článcích proveďte test s použitím tohoto simulátoru a tyto články použijte jako referenční pro kalibraci laboratorního testeru solárních článků polské výroby. Výsledky jednotlivých testerů vyhodnoťte.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:


Podle pokynů vedoucího bakalářské práce.

**Termín zadání:** 10.2.2014

**Termín odevzdání:** 5.6.2014

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Jiří Vaněk, Ph.D.

**Konzultanti bakalářské práce:**

  
doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.  
předseda oborové rady



### UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské 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 bakalářská práce se zabývá základy funkce a měření fotovoltaických panelů a článků. V práci představuji metody detekce defektů a charakteristik solárních článků a panelů zejména pak metodu FLASH. Dále pak dovybavit solární simulátor PASAN SunSim 3C držákem fotovoltaických článků a provést kalibraci a návrh pracoviště proměření kontinuální metodou.

## **Klíčová slova:**

Fotovoltaický panel, Fotovoltaický článek, FLASH, diagnostika, V-A charakteristika.

## **Abstract**

This semestral thesis introduces basics of function of the photovoltaic panels and cells. In this thesis I introduce methods for detection of defect and characteristics of the solar cells. Main diagnostics method introduced in this work is method called FLASH. Next thing is to create for solar simulator PASAN SunSim 3C holder for testing of the photovoltaic cells and calibrate older continual simulator.

## **Key words**

Photovoltaic panel, photovoltaic cell, FLASH, diagnostics, I-V characteristics.

PAVLÍK, S. *Tester fotovoltaických článků a panelů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 43 s. Vedoucí semestrální práce doc. Ing. Jiří Vaněk, Ph.D..

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Tester fotovoltaických článků a panelů jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské 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 bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské 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. Jiřímu Vaňkovi, Ph.D. a panu Martinu Šturmovi za metodické a cíleně orientované rady k vypracování semestrální práce a také panu Miroslavu Tobolovi a firmě Gatema za pomoc při konstrukci držáku solárních článků.

## Obsah

Abstrakt .....	3
Úvod .....	8
1 Základní pojmy ve fotovoltaice .....	9
1.1 Co je to fotovoltaický článek .....	9
1.2 Princip funkce .....	10
1.2.1 Fotovoltaický panel .....	11
1.3 Druhy křemíku pro výrobu solárních článků .....	12
1.3.1 Monokrystalický křemíkový článek .....	13
1.3.2 Polykrystalický křemíkový článek .....	13
1.3.3 Amorfni křemíkový článek .....	14
2 Testovací metody .....	14
2.1 Luminiscenční metody .....	14
2.1.1 Elektroluminiscence .....	14
2.1.2 Fotoluminiscence .....	15
2.2 Voltampérová charakteristika FV článků .....	16
2.2.1 Standardní testovací podmínky .....	17
2.2.2 Voltampérová charakteristika FV článků při vysokých teplotách .....	18
2.2.3 Kontinuální metoda .....	18
2.2.4 Metoda FLASH .....	19
3 Solární simulátor využívající FLASH metodu .....	20
3.1 PASAN .....	20
3.1.1 PASAN SunSim 3C .....	20
4 Praktická část .....	22
4.1 Návrh držáku .....	22
4.2 Měření voltampérové charakteristiky fotovoltaického článku .....	24
4.3 Měření metodou elektroluminiscence .....	25
4.4 Měření kontinuální metodou pod sluncem .....	28
4.5 Měření metodou FLASH .....	31
4.6 Měření kontinuální metodou .....	33
Závěr .....	40
Literatura .....	41

Seznam obrázků .....	42
Seznam Rovnic.....	43
Seznam tabulek .....	43
Seznam zkratek .....	43

## Úvod

V dnešní době se využívání fotovoltaické energie stává jedním z nejdynamičtěji se rozvíjejících trhů na světě. S rostoucím počtem vyrobených článků a panelů je potřeba také lepších, přesnějších a časově méně náročných metod testování solárních článků. K takovýmto novým metodám patří i metoda FLASH při které se během jednoho či mnoha krátkých záblesků generovaných pomocí normované výbojky měří volt ampérová charakteristika ze které se dají vyčíst důležité parametry pro hodnocení solárních článků.



# 1 Základní pojmy ve fotovoltaice

## 1.1 Co je to fotovoltaický článek

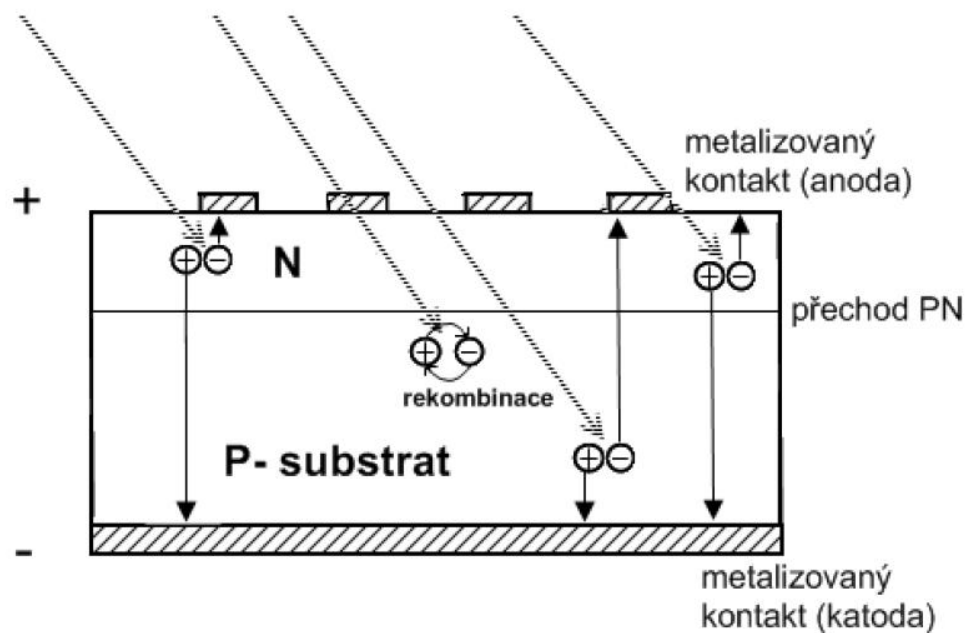
Fotovoltaický jev byl objeven již roku 1839 Francouzem Antoine César Becquerelem (1788-1878). První funkční solární článek sestrojil v roce 1884 americký vynálezce Charles Fritts, tedy celých 45 let po Becquerelově objevu fotovoltaického jevu. Frittsův článek byl vyroben ze selenového polovodiče, který byl potažen velmi tenkou vrstvou zlata a měl účinnost přibližně 1%. Ovšem na své komplexní pochopení si fotovoltaický jev musel počkat až do roku 1904 kdy jej ve své práci „O heuristickém hledisku dotýkajícím se vzniku a přeměny světla“, popsal fyzik Albert Einstein, který za něj později dostal Nobelovu cenu. Zde Einstein popsal myšlenku světelných kvant (fotonů) a ukázal jak mohou být použity k vysvětlení takových jevů jako je fotoelektrický efekt. V této době ovšem neměly tyto první selenové články vzhledem k nízké účinnosti a vysoké ceně žádnou šanci na uplatnění při výrobě elektřiny, nicméně se začaly využívat jako světelný senzor pro určování času expozice snímku ve fotoaparátech. Vynálezcem solárního článku takového, jak ho známe dnes je Russell Ohl (1898-1987). Tento americký inženýr pracoval ve 30. letech 20. století na výzkumu materiálů pro telekomunikační firmu AT&T Bell. V roce 1939 objevil tzv. "P-N přechod", což je oblast na rozhraní polovodiče typu P a polovodiče typu N. P-N přechod se chová jako hradlo, tudíž propouští elektrický proud pouze jedním směrem. P-N přechodů se využívá v polovodičových součástkách jako jsou diody nebo tranzistory. Právě při vývoji materiálů pro výrobu tranzistoru vznikl jako vedlejší produkt solární článek, v té době nazvaný jako "světlocitlivé zařízení" s konverzní účinností okolo 5%. Současné nejvíce rozšířené monokrystalické články mívají účinnost okolo 16%. [1]



Obrázek 1 Fotovoltaický článek [2]

## 1.2 Princip funkce

Při dopadu fotonu na povrch solárního článku za předpokladu že je foton pohlcen dochází k využívání vnitřního fotovoltaického jevu při dopadu fotonu s dostatečnou energií (alespoň 1,1eV) se z atomů materiálu vyrazí záporný elektron a na jeho místě zůstává díra která má kladný náboj. Dochází k takzvané generaci páru elektron-díra. Tyto volné elektrony a vzniklé díry se elektrickým polem oddělí, takže v oblasti tudíž v oblasti N P-N přechodu vzniká přebytek volných elektronů a oblasti P zase přebytek děr díky čemuž vzniklo mezi elektrodami P a N napětí, které je pro křemíkové články běžně rovno 0,5V až 0,6V. Při spojení obou elektrod dochází k vyrovnání elektrického náboje a mezi elektrodami protéká elektrický proud.



Obrázek 2 Princip funkce PN přechodu [3]

### 1.2.1 Fotovoltaický panel

Fotovoltaický panel je tvořen několika desítkami v sérii zapojených fotovoltaických článků. Pro dosažení vysoké životnosti je fotovoltaický panel chráněn před mechanickým poškozením laminátovým sklem a pevným hliníkovým či duralovým rámem. Moderní panely mají antireflexní vrstvu z oxidů titanu, čímž je dosaženo minimální emisivity (snižují se energetické ztráty vlivem odrazu světla).



Obrázek 3 Fotovoltaický panel [4]

### 1.3 Druhy křemíku pro výrobu solárních článků

Solární články se dají vyrábět z mnoha různých materiálů, ovšem na dnešním trhu si nejdůležitější místo díky své nízké ceně a díky dobře zvládnutým technologiím jeho opracování zajistil křemík.



Obrázek 4 Kus křemíku [5]

Tabulka 1 Typické hodnoty efektivity solárních článků [6]

Typ solárního Článku	Typická efektivita článků za běžných podmínek (%)	Maximální naměřená efektivita článků za běžných podmínek (%)	Maximální naměřená hodnota článků v laboratoři (%)
Monokrystalický křemík	12 - 16	22	25
Multikrystalický křemík	11 - 14	16	20
Amorfní křemík	5 - 7	12	16

### 1.3.1 Monokrystalický křemíkový článek

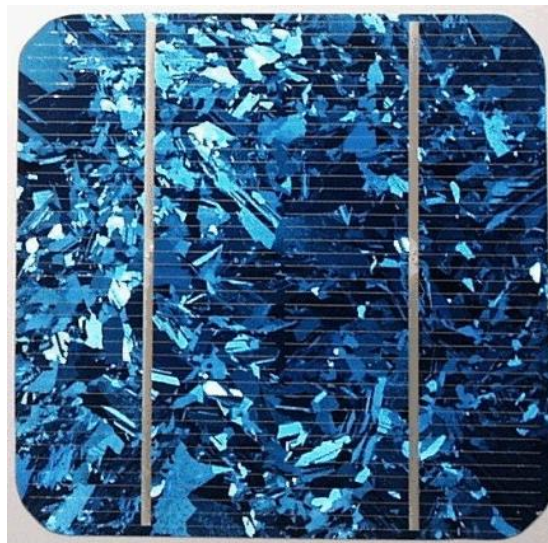
Tyto články se na trhu vyskytují od sedmdesátých let. Mají relativně vysokou cenu, jelikož jejich výroba je energeticky velmi náročná vzhledem k vysoké spotřebě velmi čistého monokrystalického křemíku vyráběného Czochranského metodou, kdy se z kádinky křemíkové taveniny za otáčivého pohybu tahá rostoucí monokrystal křemíku. Hlavní výhodou těchto článků je vysoká účinnost a velmi dobrá životnost. V dnešní době tvoří největší část trhu.



Obrázek 5 Monokrystalický křemíkový článek [7]

### 1.3.2 Polykrystalický křemíkový článek

Polykrystalické křemíkové články znamenají zajímavou a perspektivní vývojovou cestu. Během posledního desetiletí došlo k významnému poklesu spotřeby energie potřebné pro výrobu polykrystalického křemíku o dostatečné čistotě pro výrobu solárních článků. Tyto články se vyrábí odléváním čistého křemíku do forem a jejich následným nařezáním na plátky.



Obrázek 6 Polykrystalický křemíkový článek [7]

### 1.3.3 Amorfni křemíkový článok

Tyto články mají výhodu, že jsou jednodušší na výrobu a ohebnější než předchozí dva typy. Jejich výroba probíhá napařováním několika tenkých vrstev křemíku s příměsí germania a několika dalších prvků na plastový, kovový nebo nerezový povrch.



Obrázek 7 Amorfni křemíkový článok [8]

## 2 Testovací metody

### 2.1 Luminiscenční metody

Pokud látce s luminiscenčními vlastnostmi dodáme energii, například světelným zářením, která je vyšší než v jeho rovnovážném stavu bude se snažit dostat zpět do rovnovážného stavu tím, že se tuto energii bude vyzařovat do svého okolí. Luminiscence se dále dělí podle jevů, které ji vyvolávají.

Tyto metody jsou velmi výhodné pro hledání mechanických či materiálových defektů solárních článků, jako například vírového defektu způsobeného příměsí kyslíku při tažení ingotu čistého křemíku Czochranského metodou, nebo mechanického poškození článku.

#### 2.1.1 Elektroluminiscence

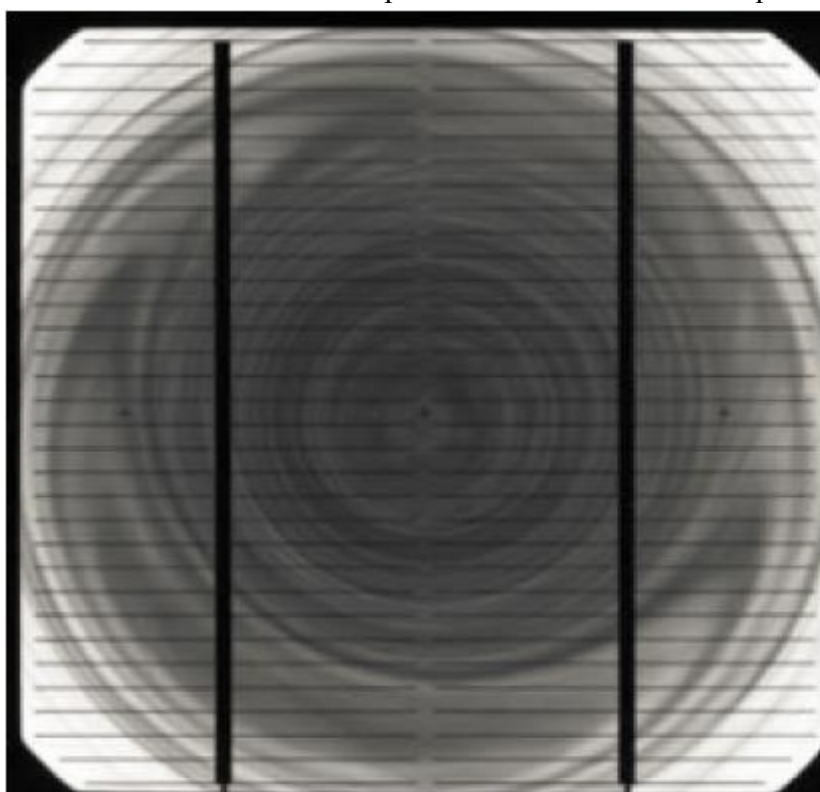
Elektroluminiscence vzniká v důsledku přiložení elektrického pole a následného průchodu elektrického proudu látkou.

Elektroluminiscence je jedna z nejrychlejších diagnostických metod pro odhalení plošných defektů na ploše křemíkového solárního článku. Pokud se fotovoltaický panel nebo samostatný solární článek připojí ke zdroji elektrického proudu v propustném směru, dochází k nárůstu náboje mezi jednotlivými vodivostními pásy. Pokud dojde k překročení energetické hladiny, dochází ke spuštění zářivé rekombinace.

Výsledkem těchto měření jsou fotografie ve stupních šedi. Tyto fotografie jsou pořizovány nízkou šumovou kamerou CCD. Pro snížení tepelného šumu na minimum je u této kamery podchlazený snímací čip. Tmavá místa znázorňují neprocházející proud nebo nedostatečnou zářivou rekombinaci, která má za následek lokální snížení účinnosti fotovoltaického panelu nebo solárního článku. Světlá místa na fotografiích znázorňují místa, kde dochází k zářivé rekombinaci. Světlá místa jsou tedy v pořádku.[9]

### 2.1.2 Fotoluminiscence

Fotoluminiscence je jev, při kterém dochází ke spontánní emisi záření z materiálu vyvolanou budícím elektromagnetickým zářením (světlem), kdy budící světelné záření má kratší vlnovou délku nežli světlo produkované lumiscenčními pochody.



Obrázek 8 Vřetový defekt nalezený fotoluminiscencí [8]

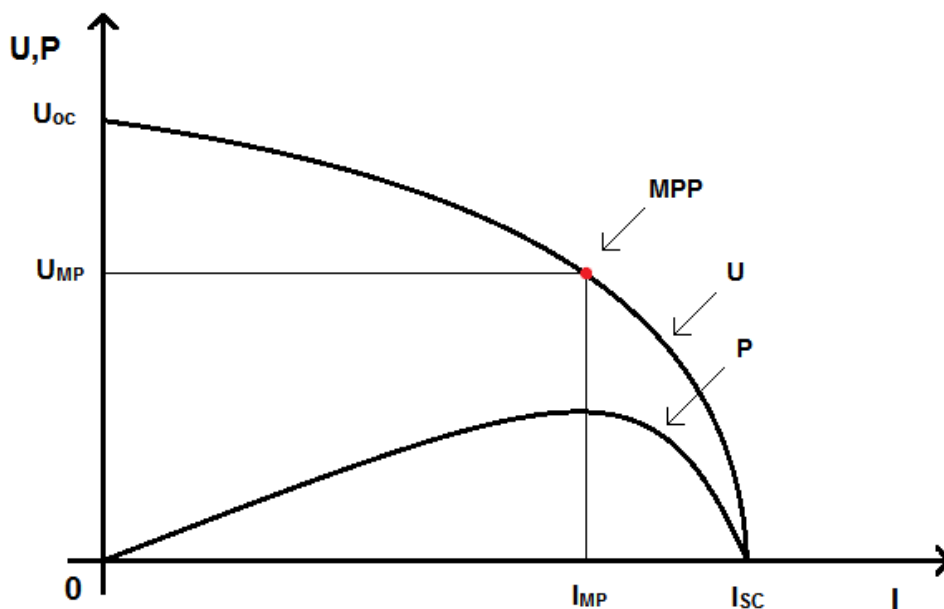
## 2.2 Voltampérová charakteristika FV článků

Voltampérová charakteristika je základní informací o činnosti fotovoltaického článku. Jejími krajními veličinami jsou napětí na prázdko označované  $U_{0C}$  a proud na krátko označovaný  $I_{SC}$ . Napětí na prázdko představuje napětí na ozářeném článku v případě že na článek není připojen žádný spotřebič, tudíž je odpor mezi elektrodami ideálně nekonečný. Proud na krátko pak představuje maximální zkratový proud, který je schopen článek dodávat za daného osvětlení.

Výkon solárního článku se rovná součinu proudu a napětí v daném bodě charakteristiky. Důležitým bodem charakteristiky je bod maximálního výkonu, který bývá značen MPP o napětí  $U_{MP}$  a proudu  $I_{MP}$ .

$$P = U_{MP} \cdot I_{MP}$$

Rovnice 1 Výkon solárního článku.



Obrázek 9 Zatěžovací výkonová charakteristika fotovoltaického článku [6]

Dalšími charakteristickými hodnotami je faktor plnění (značí se  $FF$  - Fill Factor) a účinnost (značí se  $\eta$ ).

Činitel plnění je charakterizován jako podíl maximálního výkonu v bodě  $MPP$  a maximálního výkonu definovaného pomocí napětí na prázdko a proudu na krátko. Jeho rovnice je tedy:

$$FF = (U_{MP} \cdot I_{MP}) / (U_{0C} \cdot I_{SC})$$

Rovnice 2 Faktor plnění



Pro účinnost solárního článku platí, že je to podíl maximálního výkonu článku v bodě MPP a výkonu dopadajícího slunečního záření, které značíme  $P_{in}$ .

$$\eta = (U_{MP} \cdot I_{MP}) / P_{in}$$

### Rovnice 3 Účinnost solárního článku

Sériový odpor  $R_s$  představuje přechodové odpory na jednotlivých kontaktech vlivem odporu přívodních vodičů a paralelní odpor  $R_p$  představuje parazitní jev, který je způsoben defekty krystalické mřížky a svodovým proudem kolem okrajů článku. Hodnoty sériového a paralelního odporu mají vliv na účinnost ( $\eta$ ) a také na spektrální citlivost solárních článků.

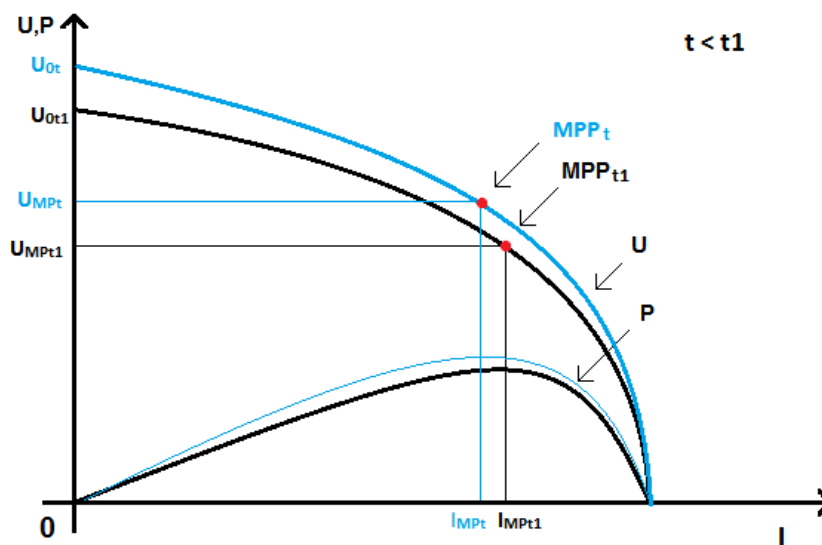
Všechny tyto faktory musejí být testovány za standardních testovacích podmínek.

#### 2.2.1 Standardní testovací podmínky

Pro měření fotovoltaických článků a panelů jsou mezinárodní elektrotechnickou komisí IEC vydány příslušné normy zavazující dodržení testovacích podmínek. Solární články je nutno testovat za teploty  $STC = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ , intenzitě slunečního záření  $1000 \text{ Wm}^{-2}$  a definovaném koeficientu atmosférické masy (AM), jež definuje vlastnosti spektra světla u hladiny moře, které světlo získá po projití dráhy v zemské atmosféře v poměru ku dráze světla, které by dopadalo kolmo na hladinu, jež se rovná  $AM = 1,5$ . Shrnutí těchto podmínek se nalézá v normě IEC 60904.[6]

## 2.2.2 Voltampérová charakteristika FV článků při vysokých teplotách

Vlivem zvýšené teploty se zvýší difúzní hodnota minoritních nosičů náboje a zmenší se energetická mezera polovodiče, což vede ke zvýšení fotonového proudu. Tento nárůst je ovšem zanedbatelný, významnějším je v tomto případě pokles napětí naprázdno. Při déle trvající sluneční intenzitě nebo zhoršených podmínkách chlazení článku (například bezvětrí) kdy teplota vzduchu dosahuje 40 °C, může povrchová teplota článku dosáhnout až 80 °C. Při takovýchto teplotách dochází ke změně elektrických vlastností článku, které vedou ke snížení zatěžovací charakteristiky směrem k nižšímu napětí, tento pokles způsobí snížení dodávaného výkonu.[6]



Obrázek 10 Vliv teploty na výkon fotovoltaického článku [6]

## 2.2.3 Kontinuální metoda

Tato metoda měření Voltampérové charakteristiky využívá neustálého osvětlení solárního článku za pomoci umělého osvětlení, jež by mělo splňovat standardní testovací podmínky uvedené v normě IEC 60904.

U této metody se během osvětlení článku postupně zvyšuje či snižuje zátěž připojená mezi jednotlivé kontakty solárního článku a při každé změně zátěže se změní hodnota napětí a proudu, dokud se nedoměří až k okrajovým hodnotám (proud na krátko a napětí naprázdno).



Obrázek 11 Měřicí přístroj od firmy Systemy PV i Pomiarowe

#### 2.2.4 Metoda FLASH

Flash metoda je nejmladší testovací metodou ze zde zmíněných, ale již se rychle zabydluje na trhu. Metoda využívá zkoumání V-A charakteristiky fotovoltaického článku a panelu. K tomuto testování se využívá krátký záblesk světla o vysoké intenzitě ( $1000\text{W}/\text{cm}^2$  dle nomy IEC 60904-9). Často se volí výbojky MetalHalogenidové, jejichž doba životnosti se pohybuje většinou od 10 000 do 10 000 000 záblesků v závislosti na typu výbojky, každý výrobce dodává k prodanému výrobku minimální počet záblesků, které musí výbojka vydržet.[9]

## 3 Solární simulátor využívající FLASH metodu

### 3.1 PASAN

Firma PASAN je švýcarského původu a zabývá se výrobou testovacích zařízení pro fotovoltaické články a panely. Firma se prezentuje jako jeden z nejkvalitnějších výrobců testovací techniky pro fotovoltaiku s praxí přes 25 let. Pro testování FLASH testem firma nabízí dvě zařízení, které se liší možností testované velikosti fotovoltaických panelů a celkové velikosti zařízení.[9]

#### 3.1.1 PASAN SunSim 3C

Jedná se zařízení sestavené firmou PASAN skládající se ze 4 fyzických jednotek zábleskového generátoru, osvitového boxu, elektronické zátěže a monitorovacího článku. K zařízení je také dodáván 5,5 m dlouhý zatemňovací tunel. V tomto zařízení se dají testovat solární panely do velikosti 2x2 m. Firma nadále uvádí, že toto zařízení je alespoň dvakrát přesnější nežli zařízení klasifikované normou IEC 60904-9 jako třída A.[10]



Obrázek 12 Zábleskový generátor, elektronická zátěž a osvitová jednotka [12]

**Zábleskový generátor** je napájecí jednotkou pro osvitovou lampu. Skříň ukrývá několik vysokonapěťových kondenzátorů, které společně skladují energii potřebnou pro záblesk. Elektronické karty kontrolují nabíjení a vybití kondenzátorů. Tyto elektronické karty navíc ukazují současné napětí kondenzátorů na LCD displeji.

**Osvitový box** má v sobě u tohoto typu zařízení dvě osvětové trubice, jež vydávají deseti milisekundový záblesk světla potřebný pro měření voltampérové charakteristiky. Osvitový box má masku ve tvaru hvězdy a zajišťuje uniformitu rozložení světelného záření. Zábleskové trubice mají garantovanou dobu životnosti 10 000 záblesků. Běžná doba životnosti se pohybuje okolo 15 000 záblesků.

**Elektronická zátěž** provádí změnu zatěžovacího odporu během doby záblesku pro proměření V-A charakteristiky.

**Monitorovací článek** slouží k monitorování intenzity světelného záření v oblasti definované pro testování solárních panelů.[11]



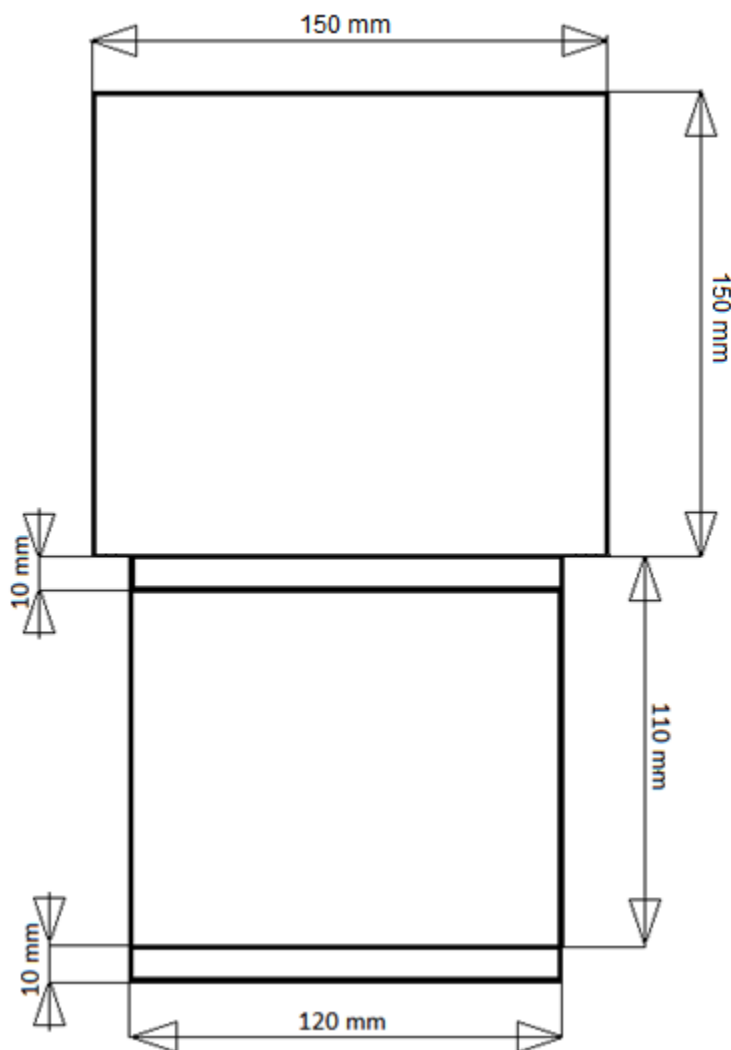
Obrázek 13 Monitorovací článek [12]

## 4 Praktická část

Jelikož přístroj PASAN 3C byl vyvinut k měření solárních panelů, není k němu dodáván držák na solární články. Proto byla potřeba sestavit držák, jenž by byl kompatibilní s tímto přístrojem a dal se uchytit ke konstrukci zatemňovacího tunelu tohoto zařízení.

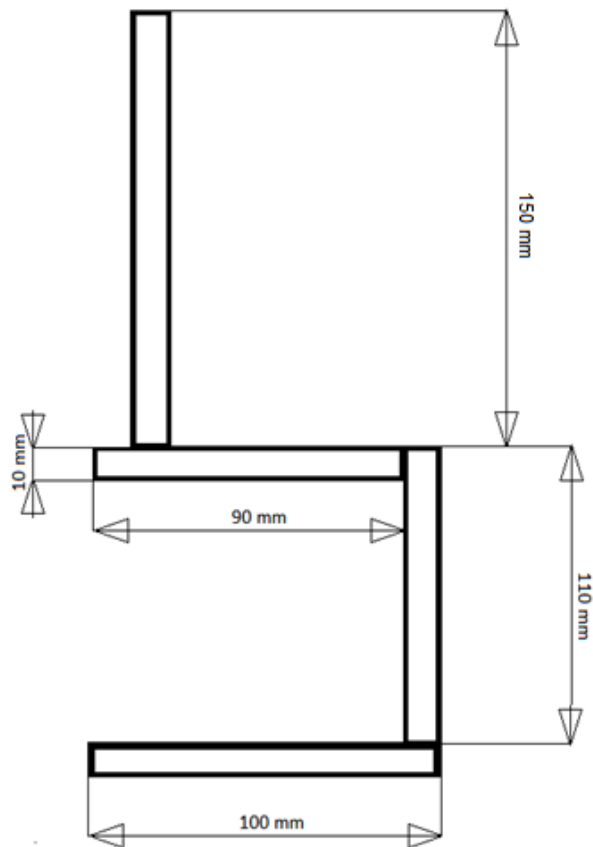
### 4.1 Návrh držáku

Vzhledem k jednoduchosti opracování jsem se rozhodl jako hlavní materiál pro výrobu držáku použít dřevo a za pomoci vrtů jej spojit.

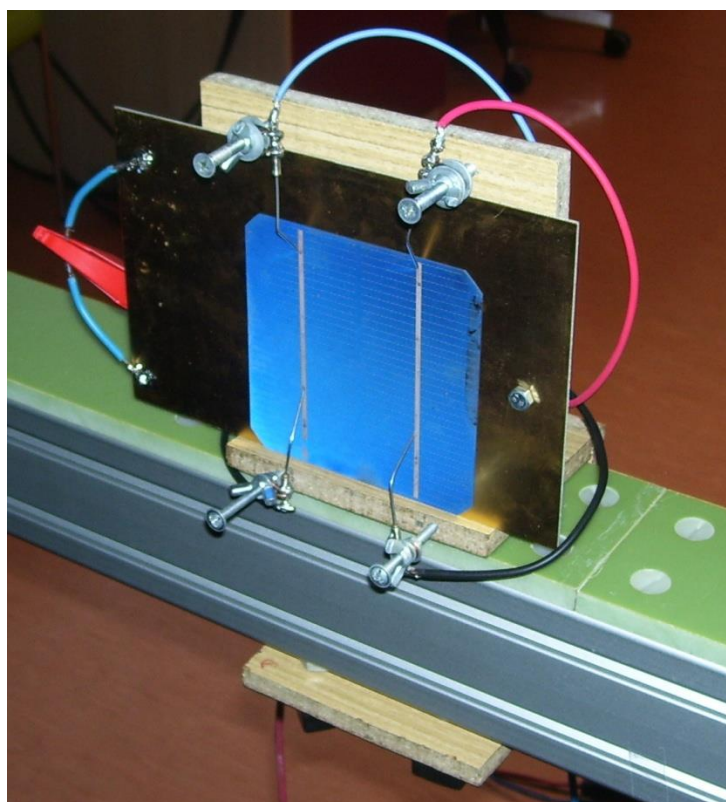


Obrázek 14 Narys držáku pro fotovoltaické články

Po sestavení základní části držáku bylo potřeba vytvořit svodové kontakty pro možnost měření V-A charakteristik. Pro odebrání záporného napětí jsem využil cuprexitovou desku přidělanou k svrchní části článku čelící výbojkám a jako druhý kontakt jsem využil měděné dráty. Po prvních pokusech při nichž jsem zjistil že přípravek má vysoký odpor nechal jsem pozlatit cuprexitovou destičku a vybavil přípravek čtyřmi měřicí hroty, které zároveň vytvářejí přítlačnou vůli na měřený solární článek.



Obrázek 15 Bokorys držáku pro fotovoltaické články

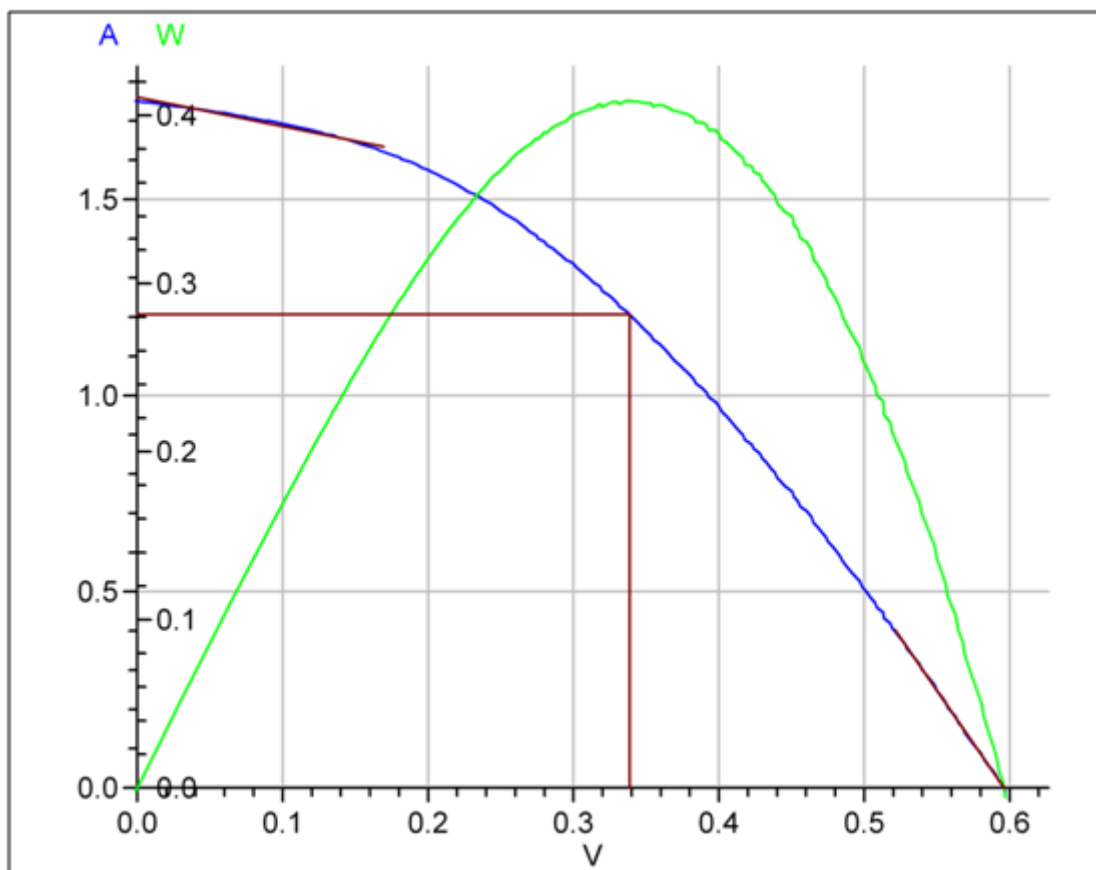


Obrázek 16 Držák připojený ke konstrukci přístroje PASAN SunSim 3C

## 4.2 Měření voltampérové charakteristiky fotovoltaického článku

Měření fotovoltaických článků jsem prováděl v laboratořích VUT Brno prvním testovaným článkem byl článek s pracovním označením 710B1. Článek jsem přichytl do držáku a nakontaktoval. Poté jsem jej upevnil na konstrukci a zatáhl se závěs poté proběhlo samotné měření. Proběhl 10 milisekundový záblesk a přístroj vyhodnotil data. Z těchto dat byl sestaven graf a odečteny důležité údaje. Článek byl testován zábleskem o intenzitě  $1000 \text{ W/m}^2$ .

Měření tohoto článku proběhlo za teploty  $23,9 \text{ }^\circ\text{C}$ . Proud na krátko se rovnal  $1,76\text{A}$ , napětí na prázdko  $0,596\text{V}$ , fill faktor byl  $38,95\%$ . Bod nejvyššího výkonu ležel na napětí  $0,339\text{V}$  a proudu  $1,206\text{A}$ . Nejvyšší dosažený výkon byl  $0,409\text{W}$ . Sériový odpor se rovnal  $0,2 \text{ Ohmů}$  a paralelní byl  $1,2 \text{ Ohmů}$ . Účinnost tohoto článku byla pouhá  $4\%$ . Což pravděpodobně měla za vinu převážně vysoká hodnota sériového a také paralelního odporu. Nejpravděpodobnější příčinou tohoto jevu byl pravděpodobně samotný držák, jenž jsem posléze dovybavil pozlacenou cuprextitovou deskou a přítlačnými kontakty.

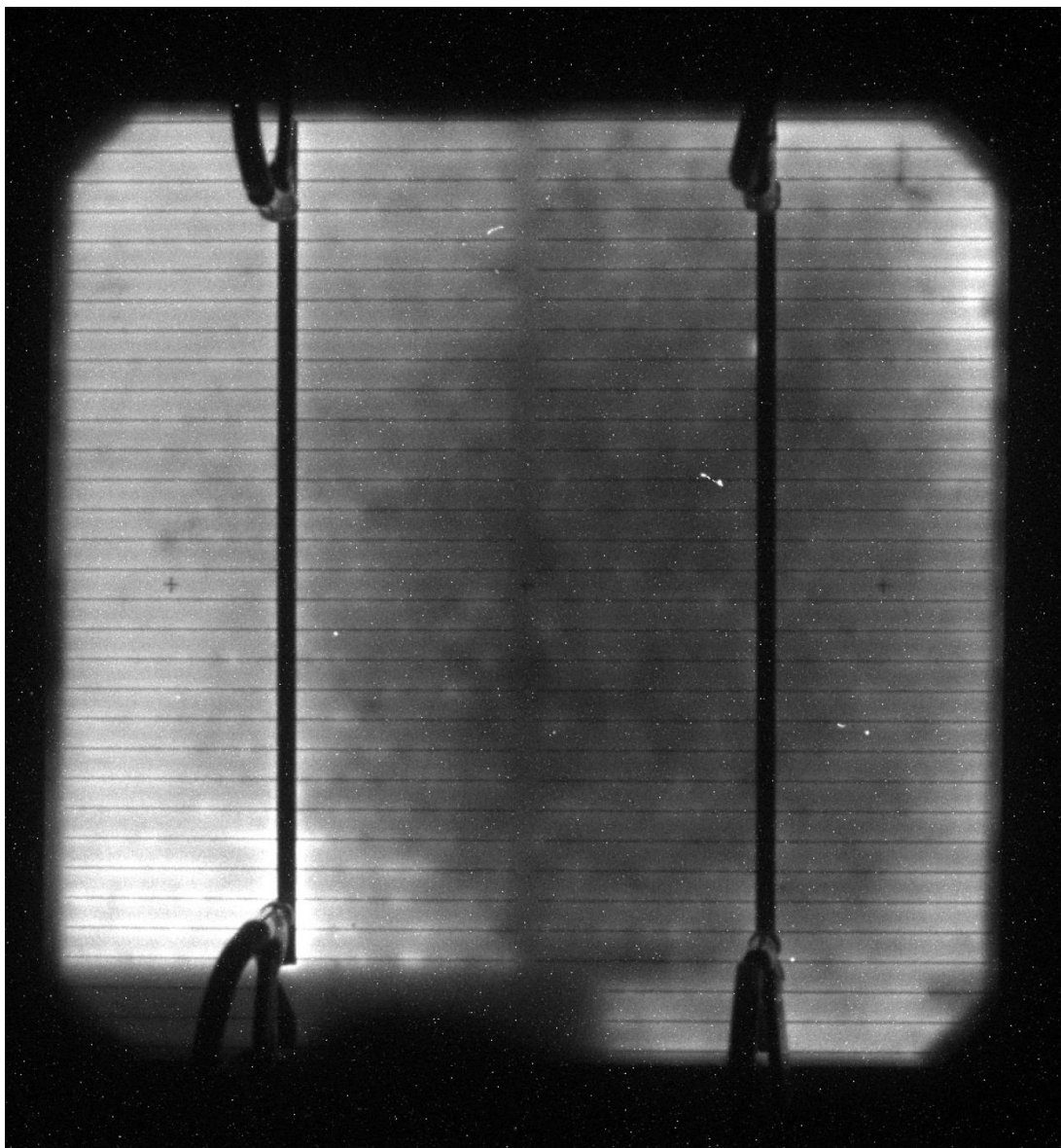


Obrázek 17 V-A charakteristika fotovoltaického článku 710B1



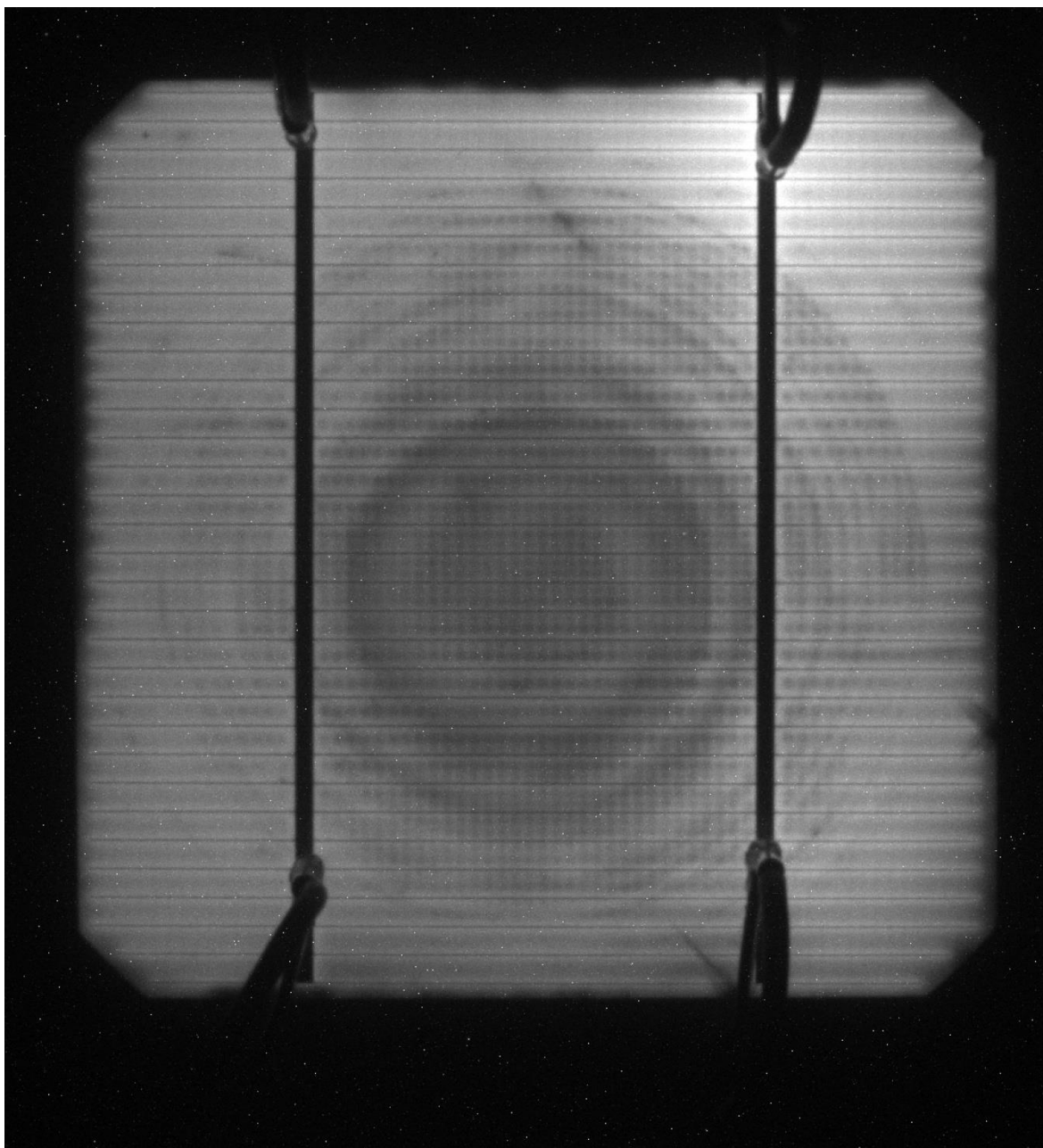
### 4.3 Měření metodou elektroluminiscence

Za pomoci metody elektroluminiscence jsem změřil 2 články, jenž mi byly poskytnuty školou. Tyto články dostaly pracovní název vzorek číslo 2 a vzorek číslo 5 oba byly vyrobeny z monokrystalického křemíku se stranami 10 cm. Cílem bylo odhalit případné výrobní či poškozením způsobené defekty, které by se mohly negativně podílet na výsledné účinnosti solárních článků.



Obrázek 18 Fotka článku 2

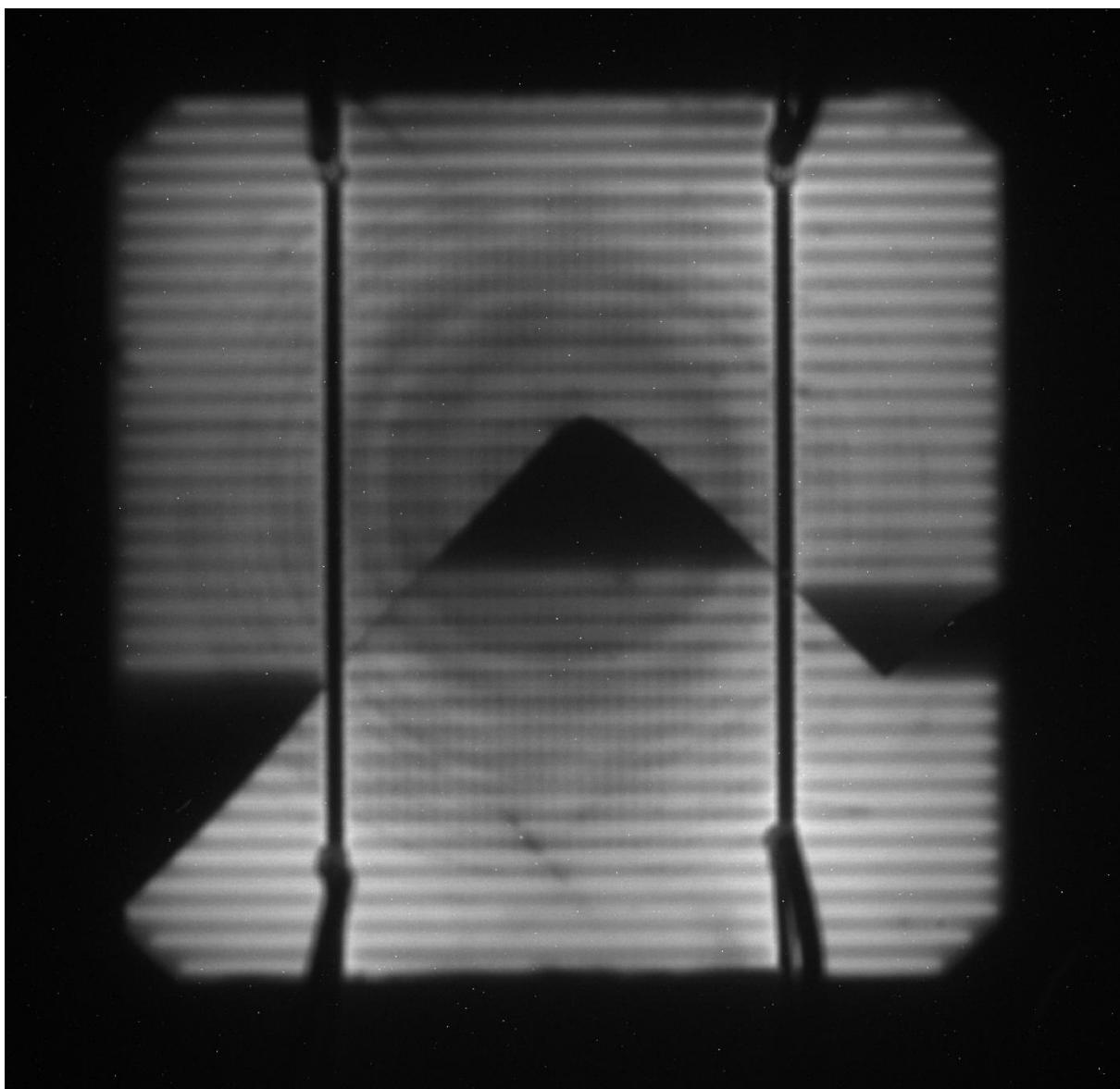
Na tomto článku je jasně vidět tmavá levá dolní polovina, jenž díky poškození sběrnice při elektroluminiscenci nezáří, tato tmavá část při světelném osvětlení dodává nižší množství proudu, jelikož se zvedá její sériový odpor. Dále na této fotografii můžeme rozeznat, že pravá polovina tohoto článku je již více degradovaná nežli levá. Tato fotografie byla pořízena při napětí 1V a proudu 1,03A. Histogram tohoto obrázku je Low 256,High 898.



**Obrázek 19 Článek 5**

Na článku nazvaném vzorek 5 je patrně vidět vírový defekt vzniklý při tažení monokrystalu křemíku Czochranského metodou. Tato fotografie byla pořízena při napětí 1V a proudu 1A. Histogram tohoto obrázku je Low 256, High 1539.

Během prováděných měření došlo k poškození solárního článku číslo 5, tento článek se rozlomil na dva kusy. U těchto dvou kusů jsem následně spájel jejich sběrnice a tento článek následně podrobil elektroluminiscenci.



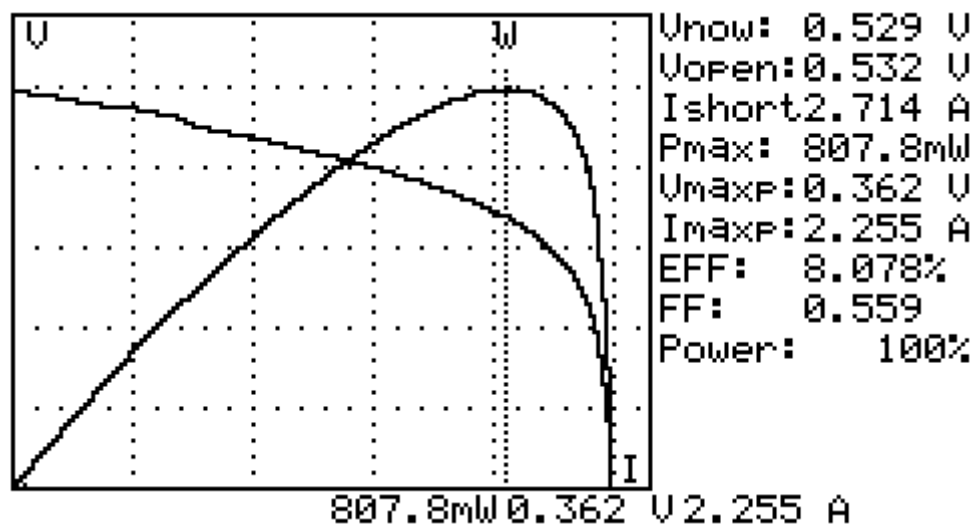
**Obrázek 20 Článek 5 po jeho mechanickém poškození poškození**

Tato fotografie byla pořízena při napětí 1,4V a proudu 2A. Histogram tohoto obrázku je Low 256, High 3591. Teplota při měření tohoto článku byla 25,5°C. Na článku jdou jasně vidět tmavá místa kde byly přerušeny vodorovné sběrnice do nichž neproudí elektrický proud.

Tato měření proběhla za pomoci integrované chlazené CCD kamery s čipem KAF3200MEC2 vyráběné firmou Moravian Instruments.

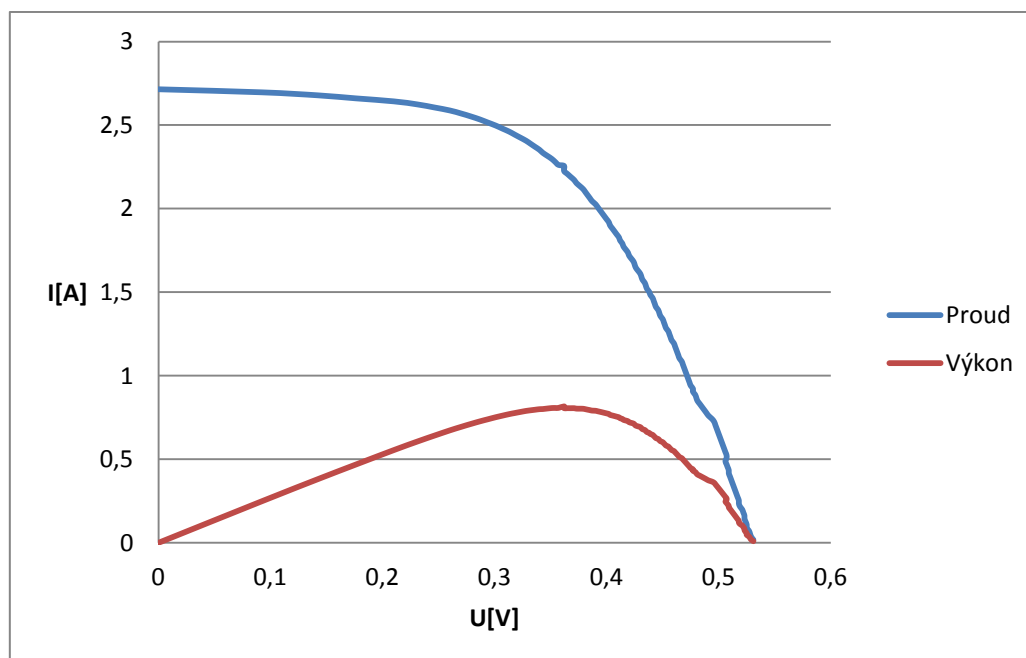
#### 4.4 Měření kontinuální metodou pod sluncem

Toto měření se provádělo za pomoci přístroje Prowa Solar Module analyzer schopným měřit články a panely do 12A a 60V. Dále jsem použil expozimetr SPM-1116 SD, teploměr, PC s nainstalovaným softwarem od firmy Prowa a školní přípravek pro uchycení solárních článků.



Obrázek 21 Záznam z displeje přístroje Prowa znázorňující výsledky měření článku vzorek 2

Pro toto měření bylo potřebné, aby solární článek byl vhodně nastaven ke slunci a intenzita slunečního záření byla  $1000 \text{ W/m}^2$ . U tohoto měření jsem naměřil teplotu  $25^\circ\text{C}$ .

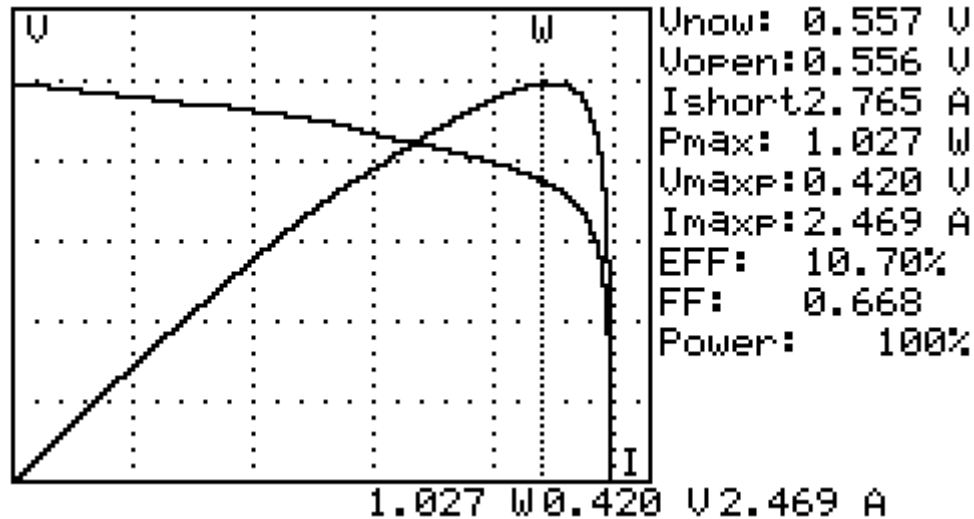


Obrázek 22 V-A charakteristika článku 2

U tohoto článku jsem naměřil napětí na prázdko  $0,532 \text{ V}$ , napětí na krátko  $2,714 \text{ A}$ , maximální bod výkonu se rovnal  $807 \text{ mW}$  při napětí  $0,362 \text{ V}$  a proudu  $2,225 \text{ A}$ . Efektivita tohoto článku byla  $8,078$  procent a Fill Factor  $0,559$ . Za nízkou hodnotu efektivitě tohoto článku může pravděpodobně vysoká míra jeho degradace, způsobená stářím článku

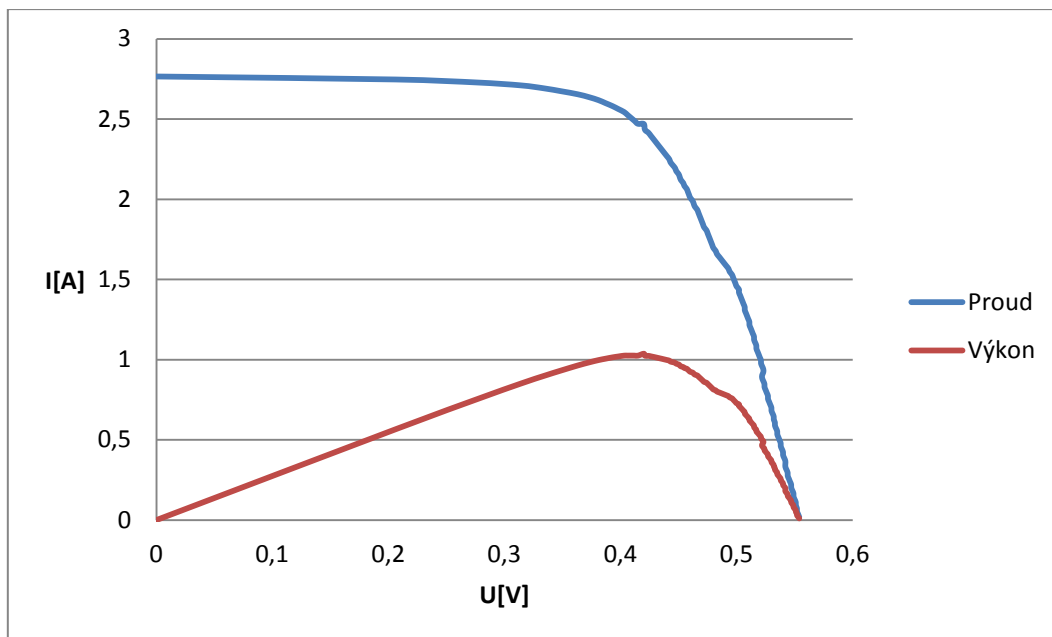
společně s menšími defekty, jako například poškození jeho sběrnice patrné z elektroluminiscence.

Následně jsem vyměnil článek v držáku za článek číslo 5, provedl kontrolu intenzity slunečního svitu a další měření.



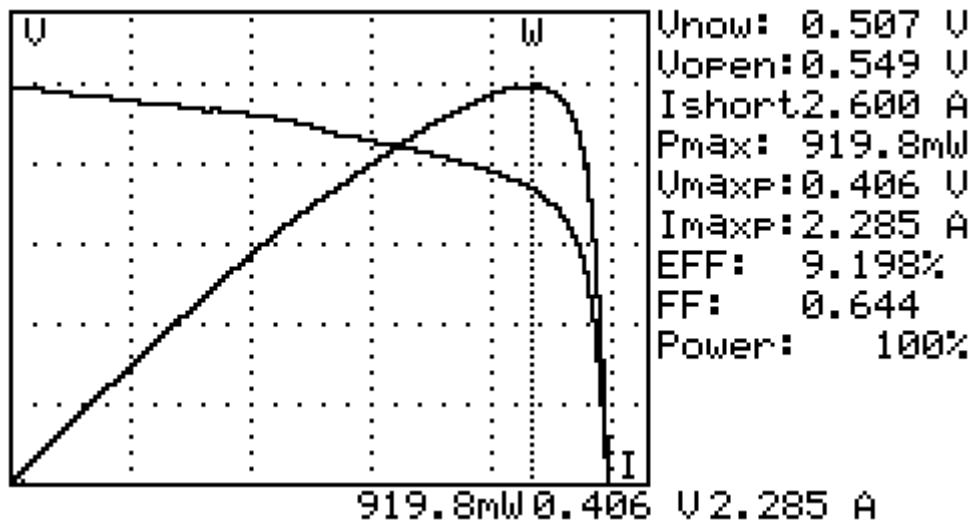
Obrázek 23 Záznam z displeje přístroje Prowa znázorňující výsledky měření článku 5 před jeho poškozením.

Toto měření se provádělo za teploty 25°C.



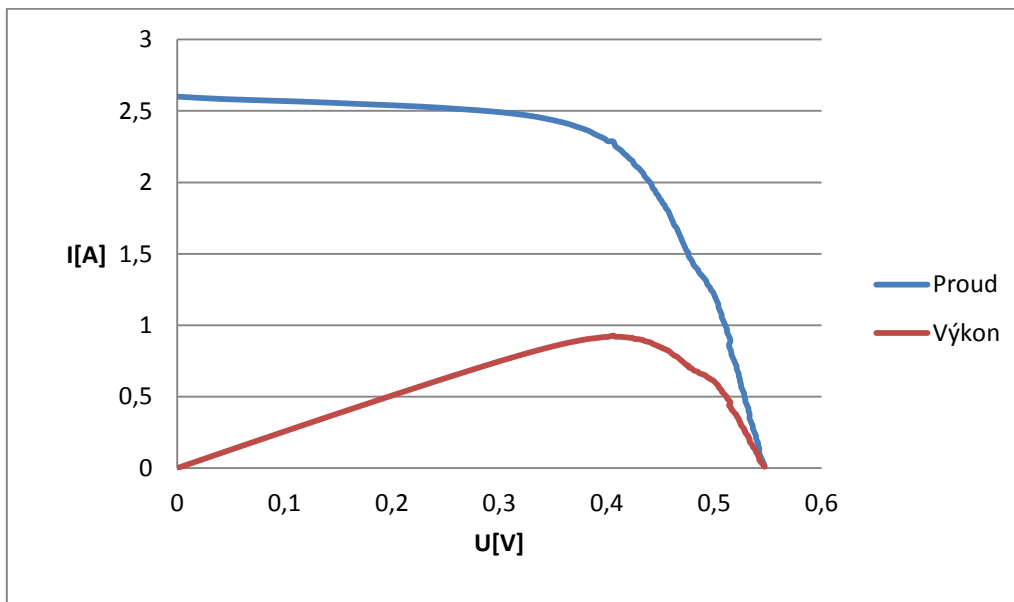
Obrázek 24 V-A charakteristika článku číslo 5 před jeho poškozením

U článku 5 před jeho poškozením jsem při  $1000\text{W/m}^2$  naměřil napětí na prázdko 0,556V, proud na krátko 2,765A, maximální bod výkonu se rovnal 1,027W při napětí 0,42V a proudu 2,469A. Efektivita tohoto článku byla 10,7% a Fill Factor 0,668%. Tento článek byl i přes jeho vírový defekt o více než dvě procenta efektivnější než předchozí článek.



Obrázek 25 Záznam z displeje přístroje Prowa po mechanickém poškození solárního článku

Při tomto měření jsem naměřil teplotu 27°C.

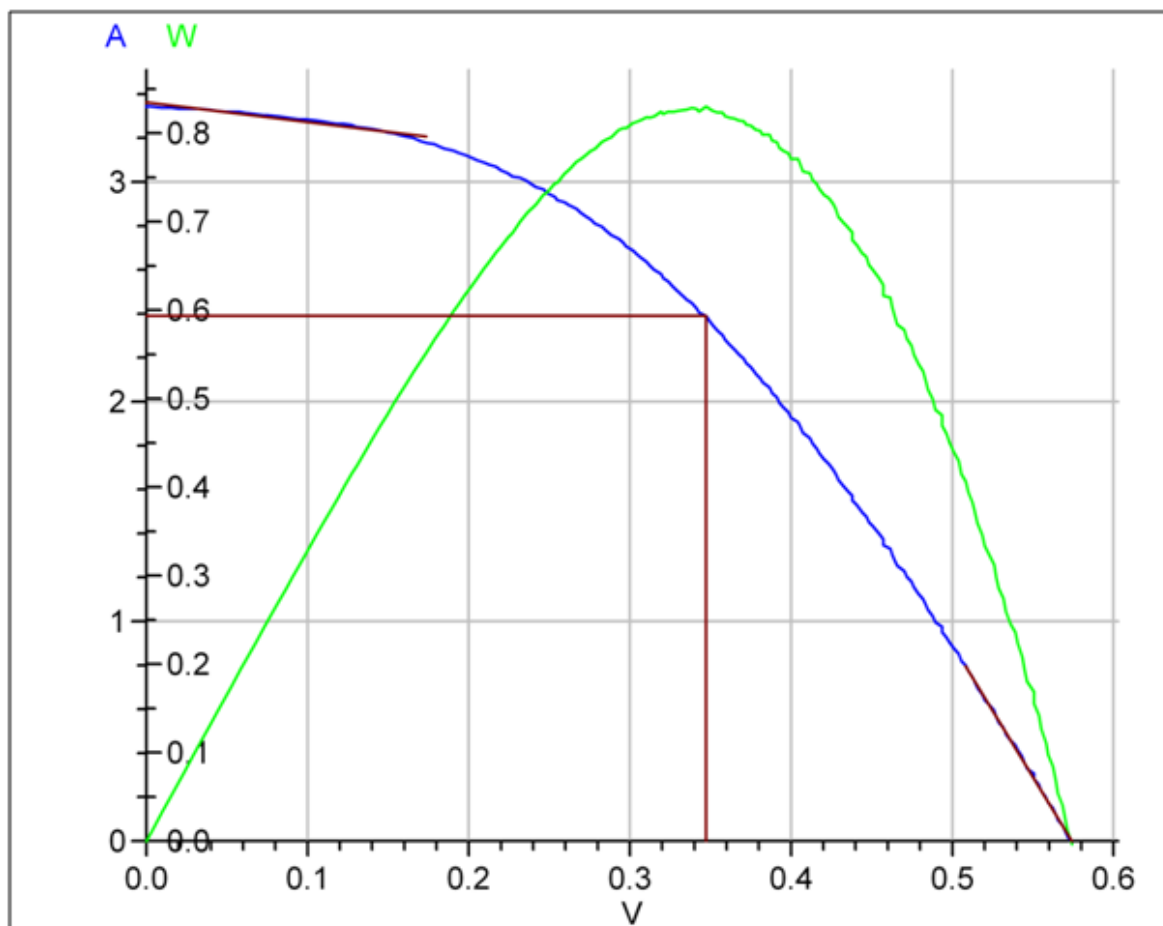


Obrázek 26 V-A charakteristika článku číslo 5 po jeho poškození

Po mechanickém poškození článku jsem naměřil proud na krátko 2,285A, napětí na prázdko 0,549V, maximální bod výkonu se rovnal 919,8mW při napětí 0,42V a proudu 2,469A. Efektivita tohoto článku byla 9,198% a Fill Factor 0,644%. Tento článek po poškození měl efektivitu o procento a půl nižší než před poškozením.

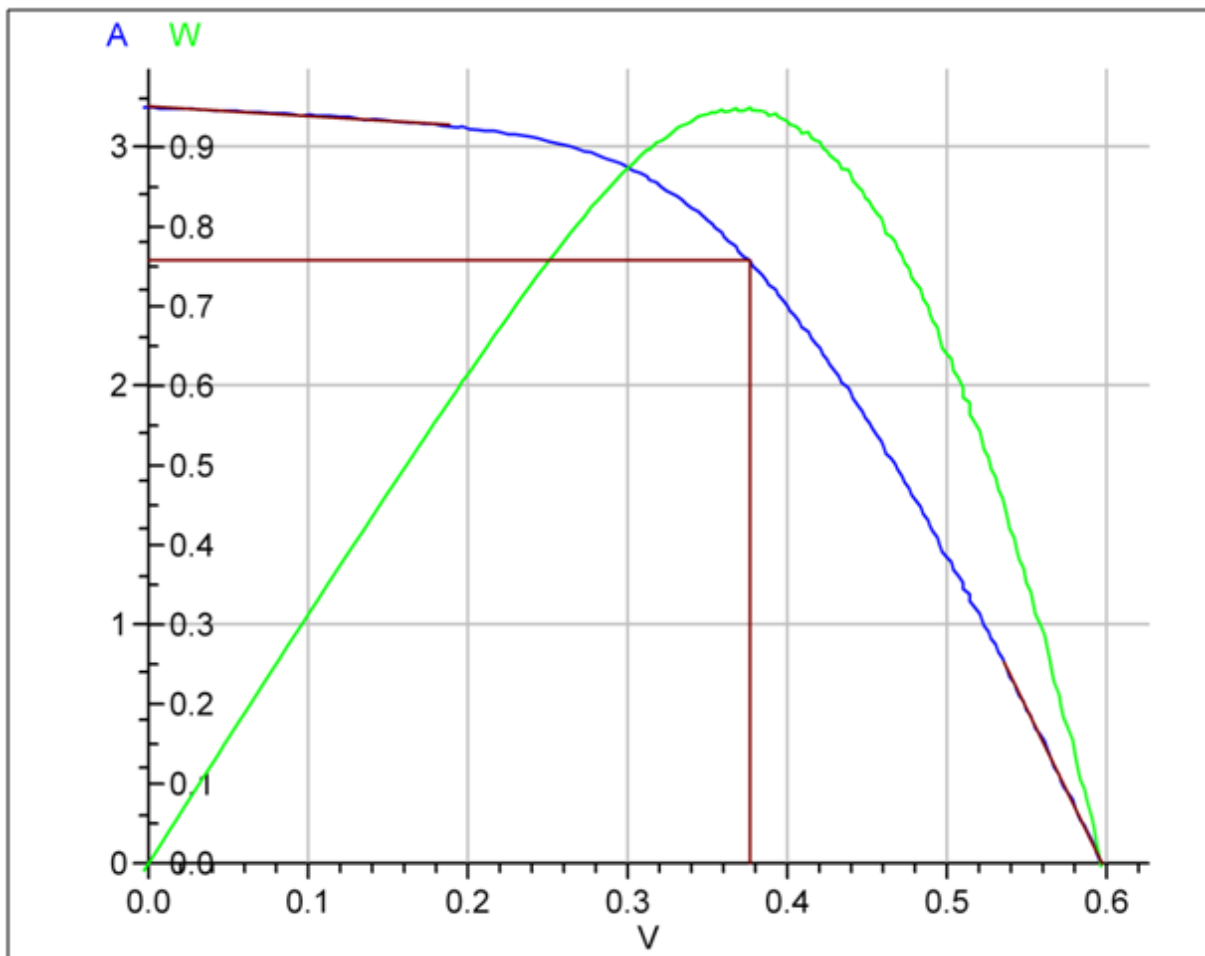
## 4.5 Měření metodou FLASH

Toto měření probíhalo za použití přístroje PASAN 3C. Do držáku jsem postupně nainstaloval oba z testovacích článků. Oba tyto články byly testovány zábleskem o intenzitě  $1000\text{W/m}^2$ .



Obrázek 27 V-A charakteristika solárního článku vzorek 2

Při záblesku jsem změřil, že efektivita tohoto článku byla 8,26%. Tento výsledek byl pravděpodobně způsoben vysokým stupněm degradace článku společně s jeho defekty. Měření tohoto článku proběhlo za teploty  $23,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Proud na krátko se rovnal  $3,333\text{A}$ , napětí na prázdno  $0,575\text{V}$ , fill faktor byl 42,9%. Bod nejvyššího výkonu ležel na napětí  $0,347\text{V}$  a proudu  $2,483\text{A}$ , nejvyšší dosažený výkon byl  $0,826\text{W}$ . Sériový odpor se rovnal  $0,08\text{ Ohmům}$  a paralelní byl  $1,1\text{ Ohmům}$ .



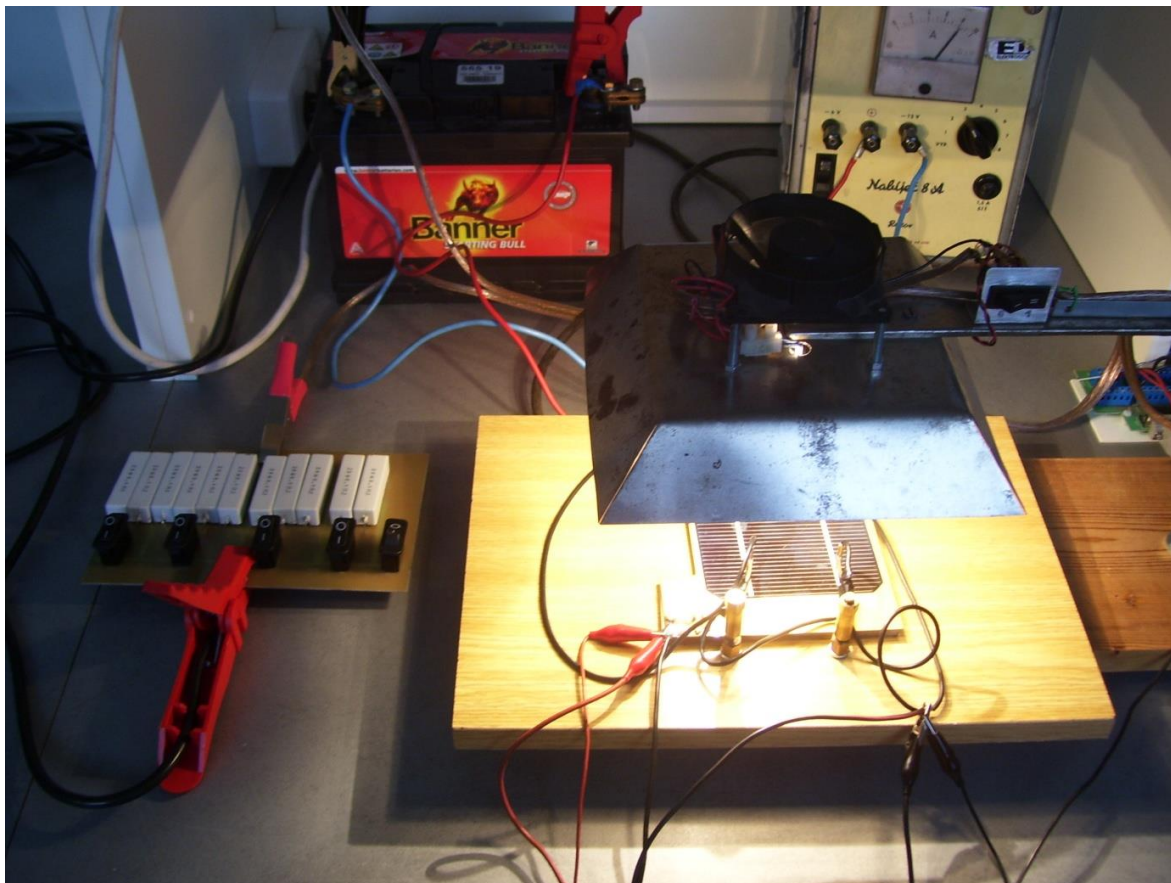
Obrázek 28 V-A charakteristika solárního článku vzorek 5 po jeho mechanickém poškození

U druhého článku jsem naměřil proud na krátko 3,167A, napětí na prázdko 0,597V, maximální výkon byl 0,950W při napětí 0,377V a proudu 2,522A. Změřená efektivita tohoto článku byla přesně 9,5%. Měření proběhlo za teploty 23,8°C. Efektivita tohoto článku byla 9,5% a Fill Factor se rovnal 50,23. Sériový odpor se rovnal 0,075 ohmů a paralelní 2,5 ohmů.



## 4.6 Měření kontinuální metodou

Měřicí pracoviště jsem sestavil z 12V autobaterie, 8 ampérové nabíječky R115, přípravku využívaného jako bočník pro měření proudu osvětlovacího přípravku vybaveného čtyřmi paralelně řazenými žárovkami s patičkami G6.35 o celkovém předepsaném výkonu 300W multimetru Agilent 34401A. Použité žárovky byly dvě JC 12V 50W a dvě SYLVANIA FCR A1/215 každá o výkonu 100W. Pro měření intenzity svitu žárovek jsem využil expozimetr SPM-1116 SD.



Obrázek 29 Fotka měřícího pracoviště

Jako další bylo potřeba zjistit odhadovaný proud tekoucí do osvětlení, ten jsem zjistil na základě rovnice pro výpočet výkonu.

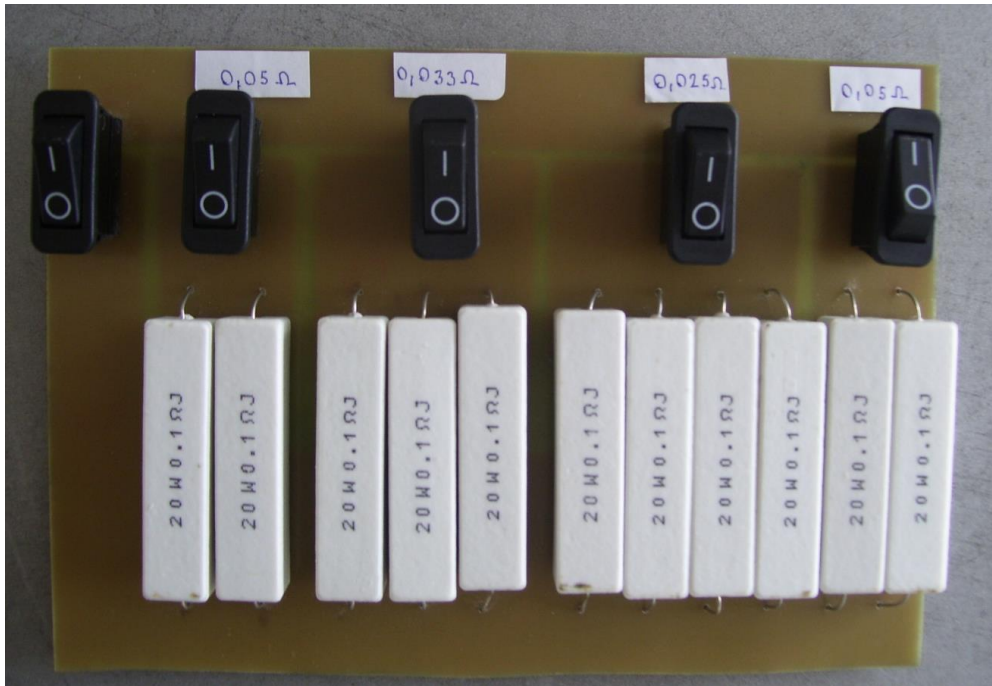
$$P = U * I$$

A jelikož vím, že osvitová jednotka je napájena baterií o napětí 12V a jmenovitý výkon je 300W, pak proud tekoucí do osvětlení je:

$$I = P/U$$
$$I = \frac{300W}{12V} = 25A$$

Odhadovaný proud tekoucí z baterie je tedy 25A.

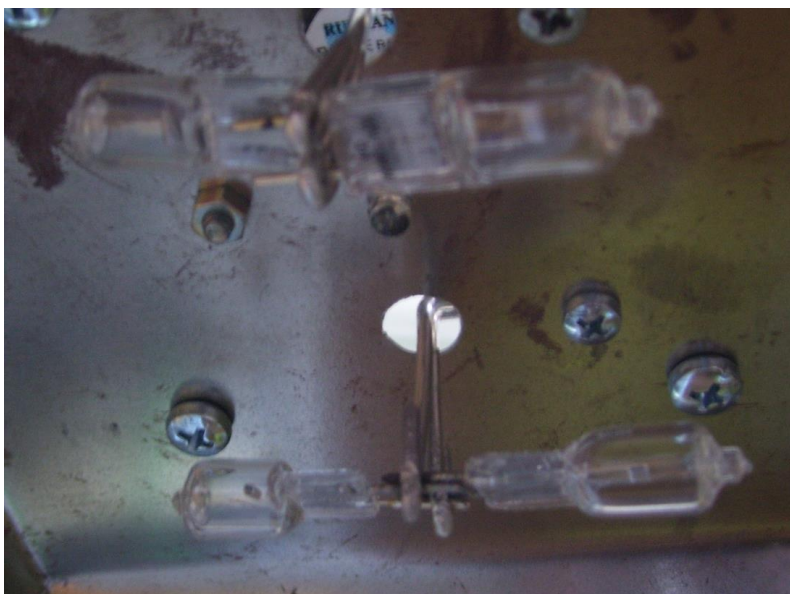
Předřadník je konstruován za pomoci jedenácti paralelně řazených 0,1 ohmových výkonových odporů schopných pracovat do ztrátového výkonu 20W. Přípravek je vybaven 5 spínači pro případnou změnu odporu bočnicku. Při sepnutí všech odporových spínačů je výsledný odpor 0,0090909 ohmů.



**Obrázek 30** Přípravek využitý jako bočník

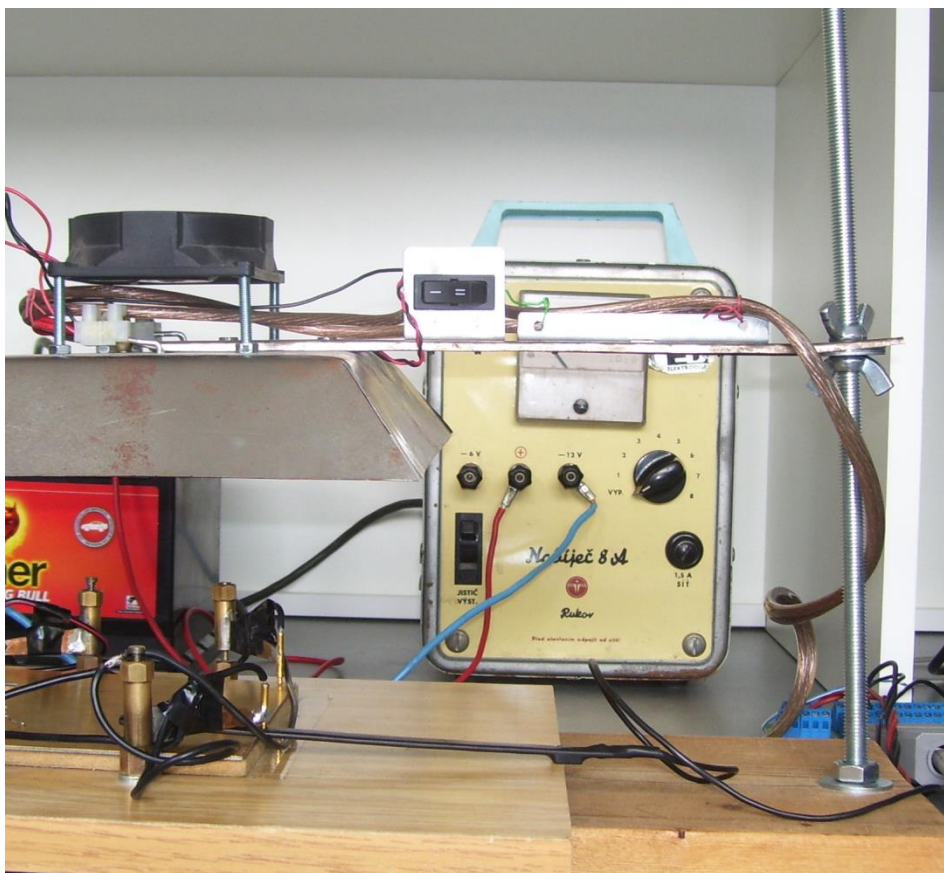
Nabíječka R1115 zde byla využita pro zajištění konstantního proudu tekoucího do obvodu.

Měření spočívá ve změně intenzity záření za pomoci změny vzdálenosti osvětlení od solárního článku. Pro získání hodnot obdobným výsledkům získaným přístrojem PASAN SunSim 3C použitým jako etalon, bylo nejdříve potřeba zjistit, jaké výsledky získáme při osvětlení  $1000\text{W}/\text{m}^2$ . Následně bylo potřeba zjistit při jaké hodnotě osvitu se výsledky budou podobat s měřením zhotoveným za pomoci přístroje PASAN 3C.



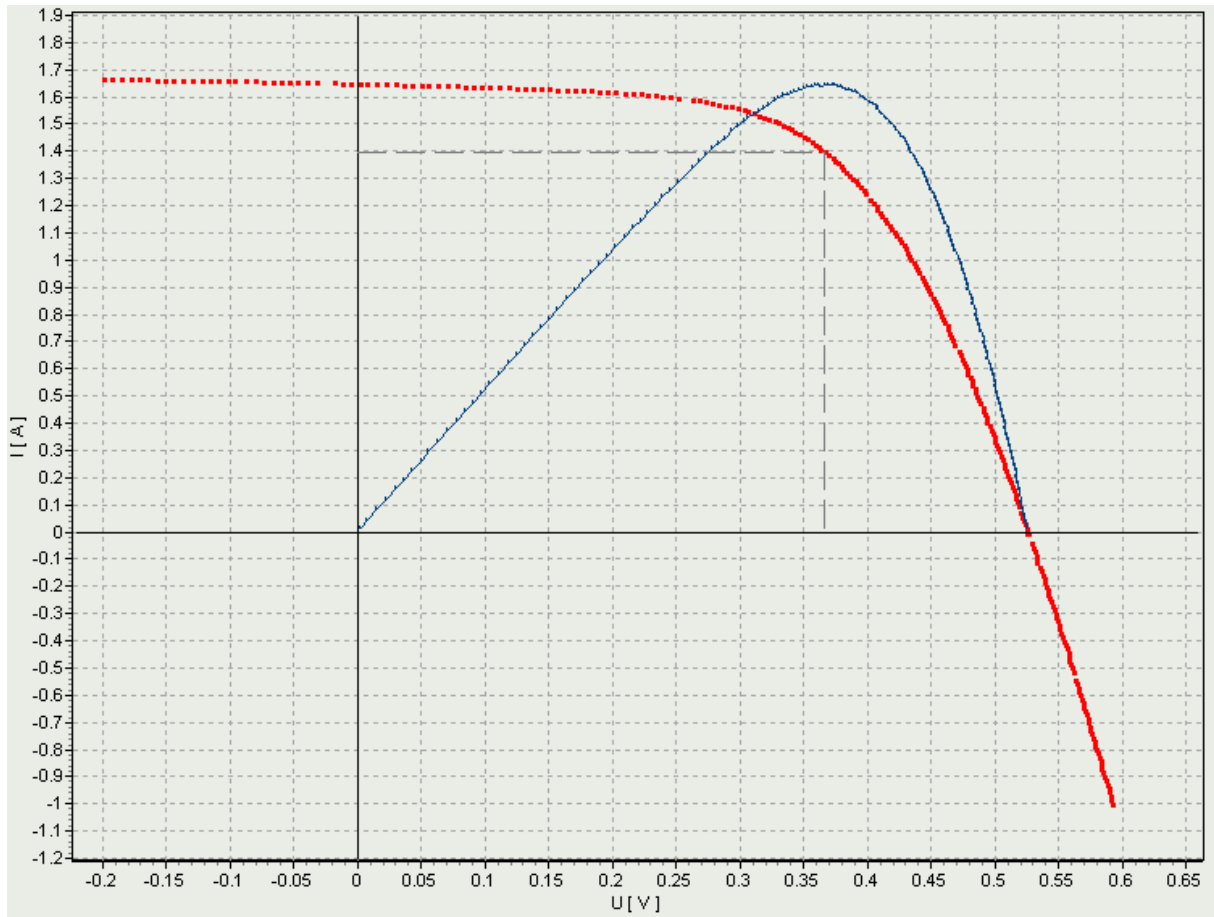
Obrázek 31 Uchycení žárovek

Měřicí systém od firmy Systemy PV i Pomiarowe je vybaven i vlastní sondou pro měření intenzity záření, ovšem tato sonda již neposkytuje věrohodné informace o intenzitě záření. Proto zde beru jako směrodatný údaj hodnotu poskytnutou expozimetrem.



Obrázek 32 Fotka posuvného ramena osvitů

Pro první měření na tomto pracovišti bylo potřeba zjistit jaká je potřebná vzdálenost od osvitových žárovek pro dosažení záření o intenzitě  $1000\text{W}/\text{m}^2$ . Této intenzity záření se mi podařilo dosáhnout ve vzdálenosti 15,9cm od osvitových žárovek. Napětí baterie odečtené altimetrem Agilent bylo 11,89V a napětí odečtené na bočníku bylo 0,23V, z čehož jsem ohmovým zákonem zjistil, že proud tekoucí do osvětlení se rovnal 25,3A.



Obrázek 33 Měření článku číslo 2 kontinuální metodou při  $1000\text{W}/\text{m}^2$

Při osvětlení tohoto článku jsem naměřil napětí na prázdko bylo 0,5264V, proud na krátko byl 1,645A. Maximální dosažený výkon tohoto článku byl 0,512W při napětí 0,3667V a proudu 1,397A.

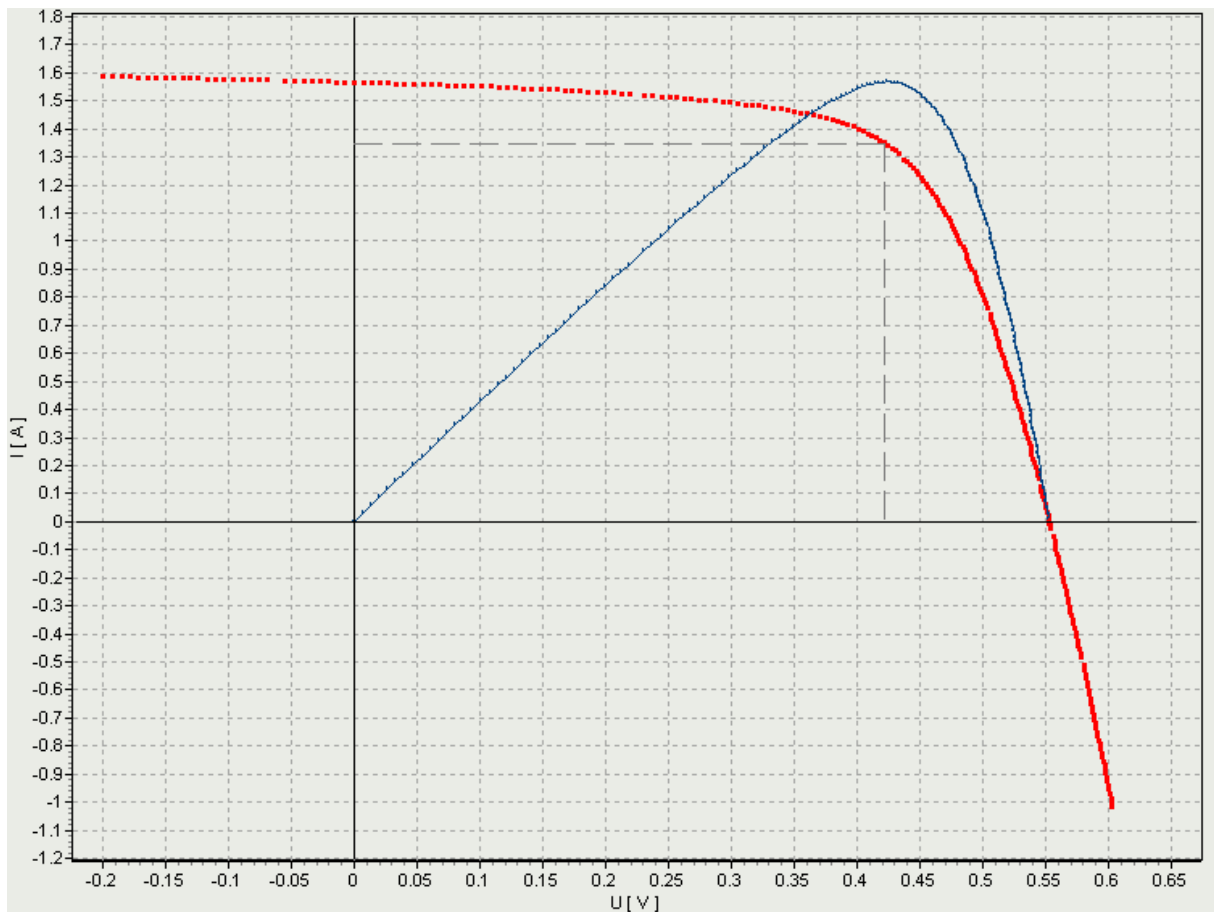
Z těchto hodnot jsem dále dopočítal účinnost a Fill Factor podle rovnic [3] a [2] :

$$\eta = (0,3667\text{V} \cdot 1,397\text{A}) / 1000 \text{ W}/\text{m}^2 = 5,1227\%$$

$$\text{FF} = (0,3667\text{V} \cdot 1,397\text{A}) / (0,5264\text{V} \cdot 1,645\text{A}) = 0,5916\%$$

Z těchto hodnot je jasné, že při této intenzitě záření  $1000\text{W}/\text{m}^2$  se výsledky neshodují s výsledky získanými přístrojem PASAN 3C, proto bylo zapotřebí zvýšit intenzitu osvětlení.

Pro toto měření byly zachovány stejné podmínky osvitu jako u měření předchozího.



Obrázek 34 Měření článku číslo 5 po poškození kontinuální metodou při  $1000\text{W/m}^2$

Při osvitu tohoto článku bylo naměřeno napětí na prázdko  $0,5525\text{V}$ , proud na krátko byl  $1,567\text{A}$ . Maximální dosažený výkon tohoto článku byl  $0,569\text{W}$  při napětí  $0,4217\text{V}$  a proudu  $1,349\text{A}$ .

Z těchto hodnot jsem dále dopočítal účinnost a Fill Factor podle rovnic [3] a [2] :

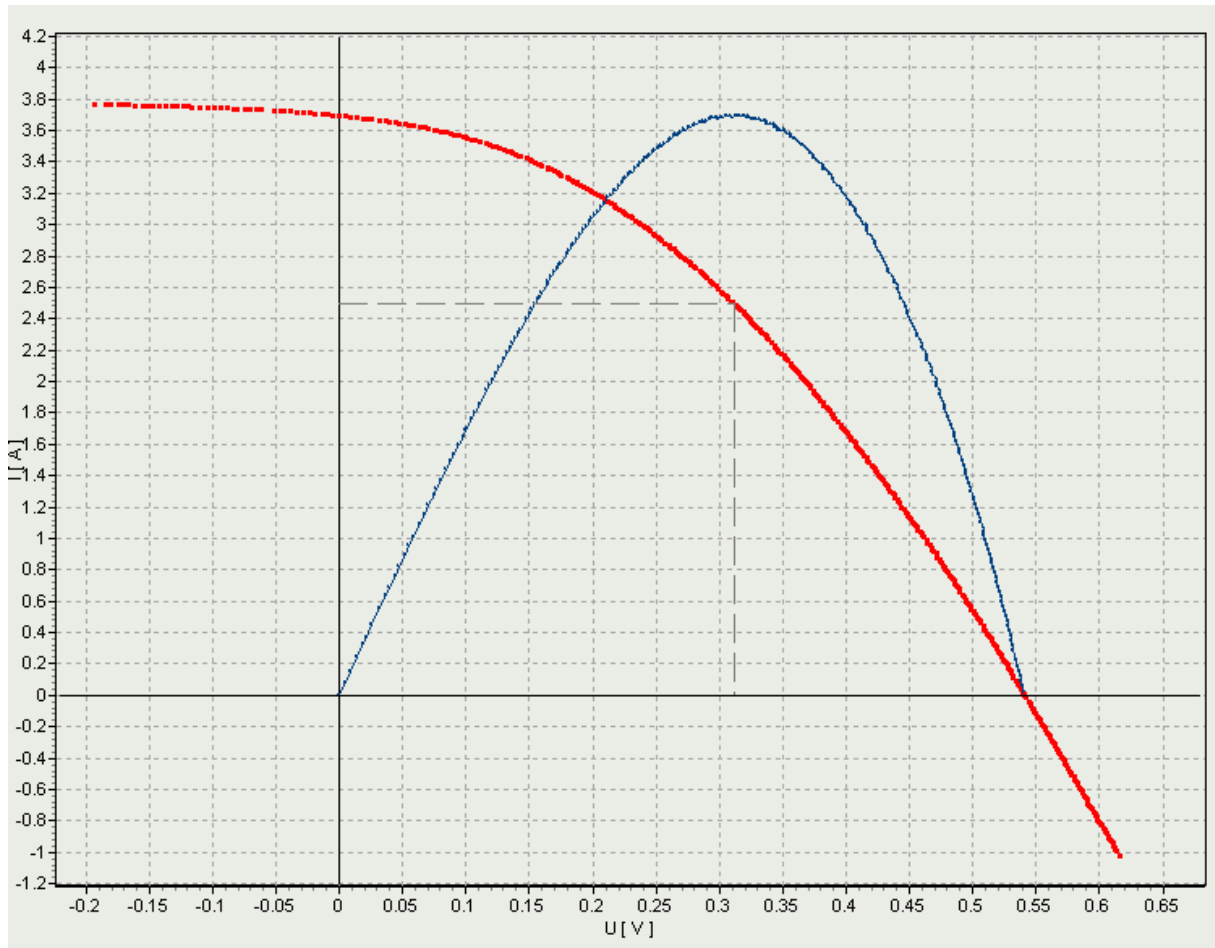
$$\eta = (0,4217\text{V} \cdot 1,349\text{A}) / 1000 \text{ W/m}^2 = 5,6887\%$$

$$\text{FF} = (0,4217\text{V} \cdot 1,349\text{A}) / (0,5525\text{V} \cdot 1,567\text{A}) = 0,6571\%$$

Z těchto hodnot je jasné, že při této intenzitě záření  $1000\text{W/m}^2$  se výsledky nepodobají s výsledky získanými přístrojem PASAN 3C použitým jako etalon.

Posléze bylo potřeba najít při jaké hodnotě intenzity záření a jaké vzdálenosti od osvětlení se výsledky mého měření budou co nejvíce podobat výsledkům naměřeným přístrojem PASAN.

Nejbližších výsledků pro oba články jsem dosáhl při intenzitě osvitu  $1810\text{W}/\text{m}^2$  a vzdálenosti článků od zdroje světla  $10,4\text{ cm}$ . Při odečtu z multimetru jsem zjistil, že napětí na bočníku je rovno  $0,225\text{V}$ . Z toho vyplývá, že proud tekoucí bočníkem je  $24,75\text{A}$ .



**Obrázek 35 V-A charakteristika článku číslo 2**

Při tomto měření jsme zjistily proud na krátko  $3,695\text{A}$ , napětí na prázdko  $0,5409\text{V}$ . Maximální naměřený výkon byl  $0,805\text{W}$  při napětí  $0,3180\text{V}$  a proudu  $2,534\text{A}$ .

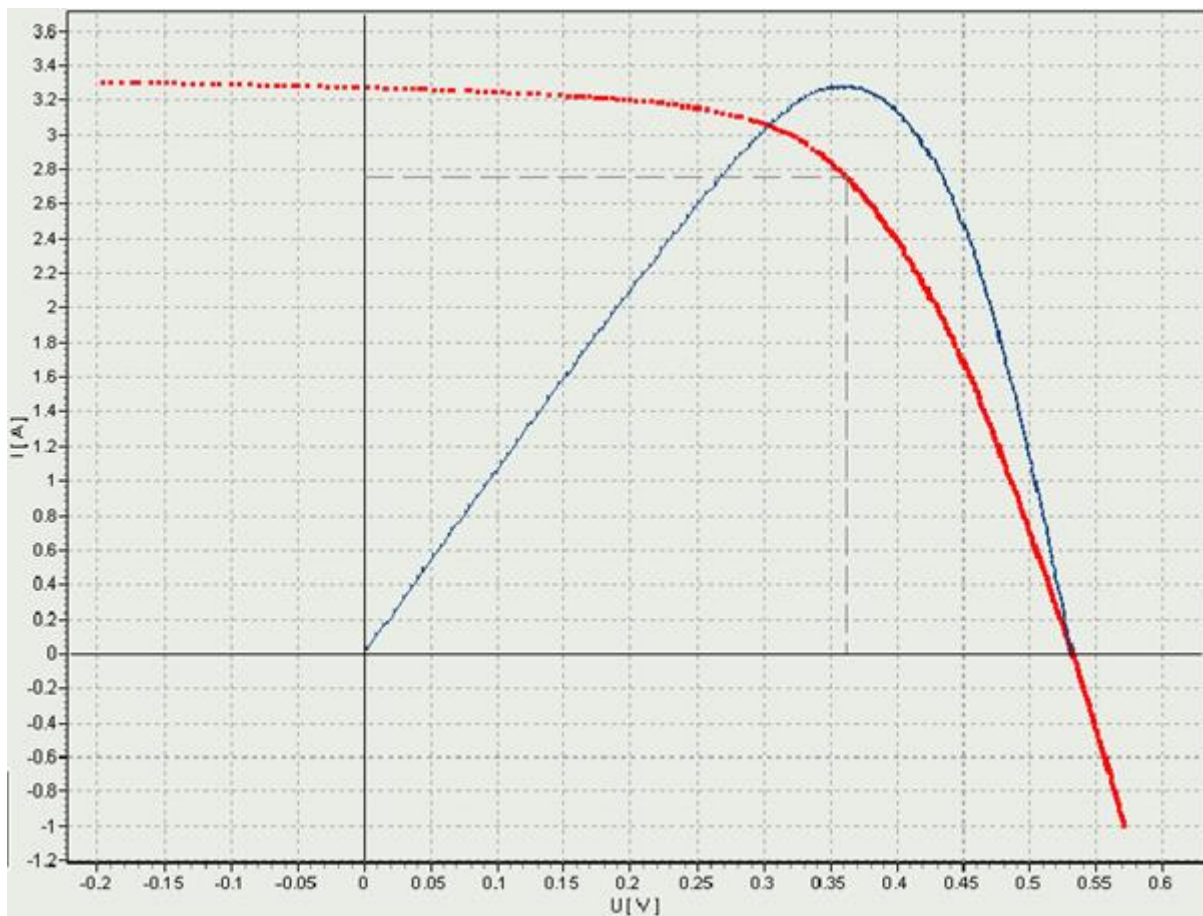
Z těchto hodnot jsem dále dopočítal účinnost a Fill Factor podle rovnic [3] a [2] :

$$\eta = ( 0,318\text{V} \cdot 2,534\text{A} ) / 1000\text{W}/\text{m}^2 = 8,06\%$$

$$\text{FF} = (0,318 \cdot 2,534) / (0,5409 \cdot 3,695) = 40,3\%$$

Tyto výsledky se již mnohem více přibližují hodnotám získaným přístrojem PASAN 3C využitým jako etalon. Proto jsem se rozhodnul využít tuto vzdálenost článku od osvitu. Odchylka efektivnosti tohoto měření od přístroje PASAN 3C i tak tvořila  $0,2\%$ .

Při využití stejného nastavení přípravku jsem změřil i článek číslo 5.



Obrázek 36 V-A charakteristika článku 5

Při tomto měření jsme zjistily proud na krátko 3,695A a napětí na prázdko 0,5409V. Maximální naměřený výkon byl 0,969W při napětí 0,3526V a proudu 2,750A.

Z těchto hodnot jsem dále dopočítal účinnost a Fill Factor podle rovnic [3] a [2] :

$$\eta = (0,3526V \cdot 2,750A) / 1000W/m^2 = 9,6965\%$$

$$FF = (0,3526V \cdot 2,750A) / (0,5409V \cdot 3,695A) = 0,4852\%$$

Toto měření bylo mnohem blíže výsledkům získaným přístrojem PASAN než měření při  $1000W/m^2$ . Odchylka efektivity zde byla 0,1965%

## Závěr

V této práci jsou zmíněny základní vlastnosti fotovoltaických článků a panelů. Dále tato práce pojednává o způsobech jejich testování za pomoci různých metod. Tato práce zmiňuje metody fotoluminiscence a elektroluminiscence zabývající se odhalováním defektů a mechanických poškození solárních článků. Poté jsou zde zmíněny metody pracující na principu měření voltampérových charakteristik a odečítáním důležitých dat z těchto charakteristik. V další části této práce je popsána konstrukce přípravku pro měření solárních článků přístrojem PASAN SunSim 3C. Na tomto přístroji jsem následně proměřil několik článků a tyto výsledky jsem pak použil jako etalon pro kalibraci staršího polského měřícího systému od firmy Systemy PV i Pomiarowe. Pro toto měření jsem sestavil pracoviště a provedl kalibraci, odchylka od přístroje PASAN nepřesáhla 0,2%. Dále jsem provedl měření kontinuální metodou pod sluncem za pomoci přístroje Prowa a také jsem dané články změřil za pomoci metody elektroluminiscence.



## Literatura

- [1.] Historie fotovoltaiky. [online]. [cit. 2013-12-17]. Dostupné z: <http://www.solarenavi.cz/slunecni-elektrarny/technicke-informace/historie-fotovoltaiky/>
- [2.] Fotovoltaický článek. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. [cit. 2013-12-17]. Dostupné z: [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/90/Solar\\_cell.png](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/90/Solar_cell.png)
- [3.] HANÁK, K. *Pracoviště pro dynamické testování solárních článků*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 56 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jaroslav Boušek, CSc
- [4.] Czrea. *Solární panel* [online]. [cit. 2013-12-17]. Dostupné z: [http://www.czrea.org/files/images/OZE/FV\\_obr1\\_5.jpg](http://www.czrea.org/files/images/OZE/FV_obr1_5.jpg)
- [5.] Křemík. *Chemické prvky* [online]. [cit. 2013-12-17]. Dostupné z: <http://chemickeprvky.euweb.cz/obrazky/kremik1.jpg>
- [6.] MASTNÝ, Petr, Jiří DRÁPELA, Stanislav MIŠÁK, Jan MACHÁČEK, Michal PTÁČEK, Lukáš RADIL, Tomáš BARTOŠÍK a Tomáš PAVELKA. *Obnovitelné zdroje elektrické energie*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 254 s. ISBN 978-80-01-04937-2.
- [7.] Czech RE Agency: Fotovoltaika pro každého. Czrea. [online]. 2003-2009 © [cit. 2013-12-17]. Dostupné z: <http://www.czrea.org/cs/druhy-oze/fotovoltaika/>
- [8.] OTEPKA, J. *Inovace měřicího pracoviště pro analýzu fotovoltaických článků*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 46 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jiří Vaněk, Ph.D..
- [9.] PALLA, M. *Pracoviště pro měření solárních panelu v řízeném prostředí*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 41 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Aleš Veselý.
- [10.] Highlight LMT / SunSim 3c. [online]. [cit. 2013-12-17]. Dostupné z: <http://www.meyerburger.com/en/products-systems/industries/photovoltaic/process-control/module-inspection/highligh-lmt-sunsim-3c/>
- [11.] PASAN MEASUREMENT SYSTEMS. *Training manual: Basic operation*. 2011, 11 s.

## Seznam obrázků

Obrázek 1 Fotovoltaický článek [2] .....	9
Obrázek 2 Princip funkce PN přechodu [3] .....	10
Obrázek 3 Fotovoltaický panel [4] .....	11
Obrázek 4 Kus křemíku [5] .....	12
Obrázek 5 Monokrystalický křemíkový článek [7] .....	13
Obrázek 6 Polykrystalický křemíkový článek [7] .....	13
Obrázek 7 Amorfni křemíkový článek [8] .....	14
Obrázek 8 Virový defekt nalezený fotolumiscencí [8] .....	15
Obrázek 9 Zatěžovací výkonová charakteristika fotovoltaického článku [6] .....	16
Obrázek 10 Vliv teploty na výkon fotovoltaického článku [6] .....	18
Obrázek 11 Měřicí přístroj od firmy Systemy PV i Pomiarowe .....	19
Obrázek 12 Zábleskový generátor, elektronická zátěž a osvitová jednotka [12] .....	20
Obrázek 13 Monitorovací článek [12] .....	21
Obrázek 14 Nárýs držáku pro fotovoltaické články .....	22
Obrázek 15 Bokorys držáku pro fotovoltaické články .....	23
Obrázek 16 Držák připojený ke konstrukci přístroje PASAN SunSim 3C .....	23
Obrázek 17 V-A charakteristika fotovoltaického článku 710B1 .....	24
Obrázek 18 Fotka článku 2 .....	25
Obrázek 19 Článek 5 .....	26
Obrázek 20 Článek 5 po jeho mechanickém poškození .....	27
Obrázek 21 Záznam z displeje přístroje Prowa znázorňující výsledky měření článku vzorek 2 .....	28
Obrázek 22 V-A charakteristika článku 2 .....	28
Obrázek 23 Záznam z displeje přístroje Prowa znázorňující výsledky měření článku 5 před jeho poškozením .....	29
Obrázek 24 V-A charakteristika článku číslo 5 před jeho poškozením .....	29
Obrázek 25 Záznam z displeje přístroje Prowa po mechanickém poškození solárního článku 30 .....	30
Obrázek 26 V-A charakteristika článku číslo 5 po jeho poškození .....	30
Obrázek 27 V-A charakteristika solárního článku vzorek 2 .....	31
Obrázek 28 V-A charakteristika solárního článků vzorek 5 po jeho mechanickém poškození .....	32
Obrázek 29 Fotka měřicího pracoviště .....	33
Obrázek 30 Přípravek využitý jako bočník .....	34
Obrázek 31 Uchycení žárovek .....	35
Obrázek 32 Fotka posuvného ramena osvitu .....	35
Obrázek 33 Měření článku číslo 2 kontinuální metodou při $1000\text{W}/\text{m}^2$ .....	36
Obrázek 34 Měření článku číslo 5 po poškození kontinuální metodou při $1000\text{W}/\text{m}^2$ .....	37
Obrázek 35 V-A charakteristika článku číslo 2 .....	38
Obrázek 36 V-A charakteristika článku 5 .....	39

## Seznam Rovnic

Rovnice 1 Výkon solárního článku.....	16
Rovnice 2 Faktor plnění.....	16
Rovnice 3 Účinnost solárního článku.....	17

## Seznam tabulek

Tabulka 1 Typické hodnoty efektivity solárních článků [6] .....	12
---	----

## Seznam zkratk

- V-A charakteristika – Voltampérová charakteristika.
- CCD – Typ snímače kamery.
- STD – Standardní testovací podmínky