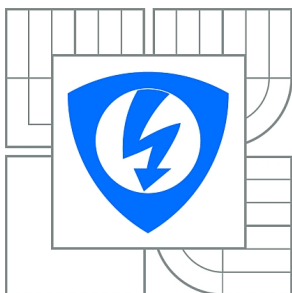




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

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

ANALÝZA FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ POMOCÍ FOTOLUMINISCENCE

ANALYSE OF PHOTOVOLTAIC SOLAR CELLS BY THE PHOTOLUMINESCENCE METHOD

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. VLADIMÍR RICHTER

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. JIŘÍ VANĚK, Ph.D.

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektrotechnologie

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektrotechnická výroba a management

Student: Bc. Vladimír Richter

ID: 125300

Ročník: 2

Akademický rok: 2013/2014

NÁZEV TÉMATU:

Analýza fotovoltaických článků pomocí fotoluminiscence

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s principy činnosti solárních článků a s metodami detekce defektů ovlivňujících jejich kvalitu. Seznamte se s možnostmi metod využívajících luminiscenci materiálu. Inovujte zařízení pro detekci fotoluminiscenčního záření z fotovoltaického článku generovaného řízenými světelnými zdroji. Výstupy z tohoto zařízení porovnejte s výsledky metody elektroluminiscence a vyhodnoťte vhodnost metody pro použití k detekci materiálových vad fotovoltaických článků.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 10.2.2014

Termín odevzdání: 29.5.2014

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

Konzultanti diplomové práce:

doc. Ing. Petr Bača, Ph.D.

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 práce se zabývá problematikou fotovoltaických článků. Hlavním cílem je seznámit čtenáře s principy činnosti solárních článků a s metodami detekce defektů ovlivňujících jejich kvalitu. První část práce se věnuje především funkčním vlastnostem křemíkových článků a zkoumá možnosti, jak na těchto strukturách detekovat vady. Také jsou tu popsány nejčastěji používané moderní diagnostické metody. V další části jsou provedeny praktické testy fotovoltaických článků pomocí metody elektroluminiscence a fotoluminiscence. Tyto metody jsou založeny na vybuzení luminiscenčního záření v křemíku pomocí vnějšího světelného zdroje.

Abstract

This diploma thesis deals with the issues of photovoltaic cells. The main aim of this thesis is to introduce the principles of operation of solar cells and methods of detection of defects affecting their quality. The first part is about the functional properties of silicon cells and it also examines the possibilities of detecting the defects of these structures. It also describes the most commonly used modern diagnostic methods. In the next part, practical tests of photovoltaic cells using the methods electroluminescence and photoluminescence are performed. These methods are based on the excitation of luminescence radiation of the silicon material by the external light source.

Klíčová slova

Fotovoltaika, fotovoltaický článek, solární článek, křemík, polovodič, CCD kamera, elektroluminiscence, fotoluminiscence, luminiscence mikroplazmy, solární simulátor.

Keywords

Photovoltaics, photovoltaic cell, solar cell, silicon, semiconductor, CCD camera, electroluminescence, photoluminescence, micro-plasma luminescence, solar simulator.

Bibliografická citace díla

RICHTER, V. *Analýza fotovoltaických článků pomocí fotoluminiscence*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 63 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Vaněk, Ph.D..

Prohlášení autora o původnosti díla

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

V Brně dne 29. 5. 2014

.....

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Jiřímu Vaňkovi, Ph.D. za metodické a cíleně orientované vedení při plnění úkolů realizovaných v souvislosti s diplomovou prací.

Dále děkuji panu Františku Chudáčkovi za včasnou realizaci několika součástí měřicího pracoviště podle dodané výkresové dokumentace, panu Františku Putnovi ze společnosti Delong Instruments za povrchovou úpravu vyrobené rotační clony a Ing. Zbyňku Streckerovi, Ph.D. z Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně za vyvážení rotační clony.

Obsah

Obsah.....	6
Seznam obrázků	7
Seznam tabulek	10
Úvod.....	11
1. Fotovoltaické články.....	12
1.1. Historie fotovoltaiky.....	12
1.2. Fotoelektrický jev.....	14
1.3. Výhody a nevýhody fotovoltaiky	15
1.4. Výroba a princip fotovoltaických článků	16
1.5. Typy křemíkových článků.....	18
1.6. Elektrické parametry PV článků.....	19
1.7. Defekty fotovoltaických článků.....	21
1.8. Detekce defektů fotovoltaických článků	23
1.9. Vysvětlení luminiscence.....	26
2. Měření metodou elektroluminiscence.....	27
3. Měření metodou fotoluminiscence.....	30
3.1. Použití clony 1	33
3.2. Použití clony 2	38
3.3. Použití clony 3	40
3.4. Návrh posuvného nosníku kamery	45
3.5. Analýza vybraných výsledků.....	46
4. Závěr	49
Seznam literatury.....	50
Seznam symbolů	52
Seznam zkratek	53
Přílohy	54

Seznam obrázků

Obr. 1: A. C. Becquerel, W. Smith, W. G. Adams, A. Einstein [2].....	13
Obr. 2: PN přechod	16
Obr. 3: Řez fotovoltaickým článkem	16
Obr. 4: Skládání článků do panelů a systémů	17
Obr. 5: Monokrystalický a polykrystalický křemíkový článek [7]	18
Obr. 6: Amorfni křemíkový článek [8]	18
Obr. 7: Voltampérová charakteristika fotovoltaického článku	19
Obr. 8: Materiálové defekty – vírový defekt [9]	21
Obr. 9: Materiálové defekty – vnitřní pnutí v křemíku [9]	21
Obr. 10: Procesní defekty – nehomogenita difuzní vrstvy [9]	22
Obr. 11: Materiálové pnutí solárního článku, obraz metodou LBIC [12].....	23
Obr. 12: Materiálové pnutí solárního článku, obraz metodou elektroluminiscence [12].....	24
Obr. 13: Plně rozvinutá emise světla z mikroplazmy [12].....	24
Obr. 14: Snímání fotovoltaického článku metodou fotoluminiscence [13]	25
Obr. 15: Princip luminiscence	26
Obr. 16: Laboratorní box pro měření metodou elektroluminiscence	27
Obr. 17: Kontaktování čl. 1 (vlevo) a čl. 2 (vpravo) pro metodu elektroluminiscence	27
Obr. 18: Článek 1 – fotografie	28
Obr. 19: Článek 1 – elektroluminiscence ($U = 4 \text{ V}$, $t = 300 \text{ s}$)	28
Obr. 20: Článek 2 – fotografie	29
Obr. 21: Článek 2 – elektroluminiscence ($U = 4 \text{ V}$, $t = 300 \text{ s}$)	29
Obr. 22: Napájecí zdroj Diametral M130R50D	30
Obr. 23: Pracoviště pro měření metodou fotoluminiscence	31
Obr. 24: CCD kamera s nasazeným objektivem	31
Obr. 25: Vnitřní elektronika CCD kamery G2-3200 [16].....	32
Obr. 26: Technický náčrt clony 1	33
Obr. 27: Vyrobená a ověřovaná clona 1	33
Obr. 28: Závislost rychlosti otáčení clony na napájecím proudu [13]	34

Obr. 29: Článek 3 měřený pomocí fotoluminiscence ($\nu = 8000 \text{ ot.min}^{-1}$, $t = 300 \text{ s}$)	34
Obr. 30: Článek 4 měřený pomocí fotoluminiscence ($\nu = 8000 \text{ ot.min}^{-1}$, $t = 300 \text{ s}$)	35
Obr. 31: Článek 5 měřený pomocí fotoluminiscence ($\nu = 8000 \text{ ot.min}^{-1}$, $t = 300 \text{ s}$)	35
Obr. 32: Článek 6 měřený pomocí fotoluminiscence ($\nu = 8000 \text{ ot.min}^{-1}$, $t = 300 \text{ s}$)	35
Obr. 33: Měřené části článků A, B, C pomocí metody fotoluminiscence	36
Obr. 34: Článek A měřený pomocí fotoluminiscence ($\nu = 8000 \text{ ot.min}^{-1}$, $t = 600 \text{ s}$).....	36
Obr. 35: Článek B měřený pomocí fotoluminiscence ($\nu = 8000 \text{ ot.min}^{-1}$, $t = 600 \text{ s}$).....	36
Obr. 36: Článek C měřený pomocí fotoluminiscence ($\nu = 8000 \text{ ot.min}^{-1}$, $t = 600 \text{ s}$).....	37
Obr. 37: Technický náčrt clony 2	38
Obr. 38: Vyrobená a testovaná clona 2	38
Obr. 39: Test: $\nu = 3800 \text{ ot.min}^{-1}$, $t = 60 \text{ s}$ (a), $t = 180 \text{ s}$ (b); $\nu = 3000 \text{ ot.min}^{-1}$, $t = 180 \text{ s}$ (c)..	39
Obr. 40: Clona 2 bez osvětlení (a), s otočenou podložkou (b), při opačném otáčení (c).....	39
Obr. 41: Snímání měřicího pracoviště infračervenou termokamerou FLIR i7	39
Obr. 42: Technický náčrt clony 3	40
Obr. 43: Vyrobená a testovaná clona 3	40
Obr. 44: Testovaný článek C při $\nu = 200 \text{ ot.min}^{-1}$ a $\nu = 2000 \text{ ot.min}^{-1}$	41
Obr. 45: Testovaný článek C při $\nu = 3000 \text{ ot.min}^{-1}$ a $\nu = 3800 \text{ ot.min}^{-1}$	41
Obr. 46: Testovaný článek C při $\nu = 4500 \text{ ot.min}^{-1}$, $\nu = 5100 \text{ ot.min}^{-1}$, a $\nu = 5750 \text{ ot.min}^{-1}$...	42
Obr. 47: Závislost sytosti výsledných snímků na změně rychlosti otáčení clony.....	42
Obr. 48: Testovaný článek C po dobu $t = 10 \text{ s}$ a $t = 50 \text{ s}$	43
Obr. 49: Testovaný článek C po dobu $t = 100 \text{ s}$ a $t = 200 \text{ s}$	43
Obr. 50: Testovaný článek C po dobu $t = 300 \text{ s}$, $t = 600 \text{ s}$ a $t = 1200 \text{ s}$	44
Obr. 51: Závislost sytosti výsledných snímků na změně doby snímání	44
Obr. 52: Náčrt dvou dílů posuvného nosníku kamery	45
Obr. 53: Vyrobený posuvný nosník kamery	45
Obr. 54: Článek A testovaný po dobu $t = 3600 \text{ s}$ při rychlosti $\nu = 3800 \text{ ot.min}^{-1}$	46
Obr. 55: Defekt difuze materiálu podložky metodou elektroluminiscence	47
Obr. 56: Článek B testovaný po dobu $t = 3600 \text{ s}$ při rychlosti $\nu = 3800 \text{ ot.min}^{-1}$	47
Obr. 57: Článek C testovaný po dobu $t = 3600 \text{ s}$ při rychlosti $\nu = 3800 \text{ ot.min}^{-1}$	48
Obr. 58: Blokové schéma měřicího pracoviště metody fotoluminiscence.....	55

Obr. 59: Ochranné UV prvky na 100 Kč bankovce ($v = 4000 \text{ ot.min}^{-1}$, $t = 300 \text{ s}$).....	56
Obr. 60: Ochranné UV prvky na 200 Kč bankovce ($v = 4000 \text{ ot.min}^{-1}$, $t = 300 \text{ s}$).....	56
Obr. 61: Ochranné UV prvky na 500 Kč bankovce ($v = 4000 \text{ ot.min}^{-1}$, $t = 300 \text{ s}$).....	56
Obr. 62: Ochranné UV prvky na 1000 Kč bankovce ($v = 4000 \text{ ot.min}^{-1}$, $t = 300 \text{ s}$).....	56
Obr. 63: Návrh posuvného nosníku kamery	57
Obr. 64: Návrh posuvného nosníku kamery – pohled s kamerou a úchyty nosníku.....	57
Obr. 65: Návrh posuvného nosníku kamery – boční pohled (změna posunutí objektivu).....	57
Obr. 66: Simulace měřicího pracoviště – přední pohled.....	62
Obr. 67: Simulace měřicího pracoviště – zadní pohled	62
Obr. 68: Pohled na obě části měřicího pracoviště.....	63
Obr. 69: Nosníky motoru a kamery.....	63

Seznam tabulek

Tab. 1: Výhody a nevýhody fotovoltaiky.....	15
Tab. 2: Parametry DC motoru Transmotec 775 – 8013F [13]	30

Úvod

V posledních několika letech se v celém světě stále více rozšiřují malé fotovoltaické elektrárny, které se instalují nejčastěji na střechy budov nebo zastavují část území v okolí měst. Tento jev je způsoben v neposlední řadě poklesem cen fotovoltaických systémů díky neustálému vývoji v této oblasti. Základním stavebním kamenem takové elektrárny je fotovoltaický (PV) článek.

Nejrozšířenější jsou PV články křemíkové. Články na jiných bázích je možné rozdělit do dvou skupin. První skupinu tvoří levnější články s nízkou účinností, např. na bázi organických polymerních vrstev. Druhou skupinou jsou články s vyšší účinností a vyšší cenou, např. články na bázi GaAs používané v kosmonautice.

Některá literatura rozděluje PV články do tzv. generací. První generací jsou deskové křemíkové články s vysokou účinností přeměny, která se blíží 20%. Tyto články jsou náročné na výrobu a tedy i drahé. Tato skutečnost vedla k vývoji levnějších řešení založených na tenkých vrstvách amorfního nebo mikrokystalického křemíku. Takové články se označují za druhou generaci a kromě nižší ceny je u nich i podstatně nižší účinnost – většinou pod 10%. Současná generace článků je třetí. U těchto článků je snahou dosáhnout vysoké účinnosti při snižování výrobních nákladů. Mimo jiné se zde uplatňují i organické články, do kterých se vkládají velké naděje do budoucna. Nejmodernější články dosahují účinnosti přesahující 40% [1].

Tato práce se zabývá pouze křemíkovými fotovoltaickými články, na kterých jsou detekovány defekty pomocí metod využívajících luminiscenci křemíku. V práci se uplatňuje především metoda elektroluminiscence a fotoluminiscence.

1. Fotovoltaické články

Fotovoltaika se zabývá procesem přímé přeměny světelného záření na elektrickou energii. Celý proces se odehrává díky vlastnostem PN přechodu polovodiče a fotoelektrického jevu. Název fotovoltaiky je odvozen ze dvou slov, řeckého φως [phos], což je v překladu světlo a jména italského fyzika Alessandra Volty.

1.1. Historie fotovoltaiky

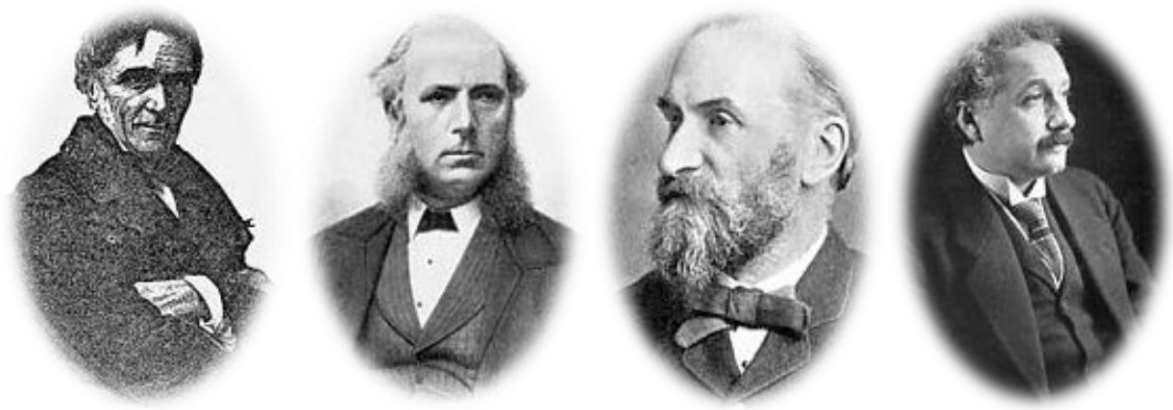
Za objevitele fotovoltaiky je často označován francouzský fyzik Alexandre Edmond Becquerel (1820 – 1891). Pravděpodobněji ale je, že základy této problematiky položil již jeho otec Antoine César Becquerel (1788 – 1878). Roku 1839 byl těmito fyziky popsán pokus, při kterém docházelo ke změně napětí na kovových elektrodách ponořených do elektrolytu při změně okolního osvětlení [2].

Další z významných osobností na poli fotovoltaiky byl elektroinženýr Willoughby Smith (1828 – 1891), který vyvíjel zařízení pro testování podmořských kabelů. Pro tyto účely využíval polovodivé vlastnosti selenu. Při pokusech zaznamenal, že vodivost selenové tyčinky klesá v závislosti na jejím osvětlení. Tento jev byl popsán a otisknut 20. února 1873 v časopise Nature [2].

Důležitým objevem na poli fotovoltaiky bylo v roce 1879 pozorování produkce elektrického proudu na přechodu tvořeném selenem a platinou při osvětlení, přičemž nedocházelo ke změně materiálu a to bez použití tepla a pohyblivých částí. Tyto pokusy učinil profesor William Gryll Adams (1836 – 1915) a jeho student Richard Evans Day. Pokus byl ale publikován až v manuskriptech profesora, které byly vydány v letech 1896 a 1901 [2].

První funkční fotovoltaický článek vyrobil roku 1883 americký vědec a vynálezce Charles Edgar Fritts (1850 – 1903). Kovový substrát potáhl velmi tenkou vrstvou selenu, na kterou nalisoval kontakty ze zlata. Tak vytvořil článek s plochou přibližně 30 cm². Výsledná účinnost byla přibližně 1%.

Velmi důležitou osobností pro další rozvoj fotovoltaiky byl Albert Einstein (1879 – 1955), který dne 17. března 1905 popsal na základě kvantové fyziky fotoelektrický jev, za což v roce 1921 dostal Nobelovu cenu za fyziku. Tento jev může být vnější či vnitřní. Vnitřní se využívá při výrobě elektrické energie fotovoltaickými články, kdy se vlivem dopadajícího záření uvolňují elektrony, které dále tvoří elektrický proud. Vnější fotoelektrický jev se uplatňuje při luminiscenčních metodách detekce vad na strukturách fotovoltaických článků.



Obr. 1: A. C. Becquerel, W. Smith, W. G. Adams, A. Einstein [2]

Největší vývoj pro praktické využití nastartoval s rozvojem kosmonautiky v 50. letech 20. století. První v praxi využitelný solární článek byl vyvinut v roce 1954 v Bellových laboratořích a měl účinnost 6% [2]. Účinnost přeměny 10% fotovoltaického článku byla překonána o pět let později americkou společností Hoffman Electronics.

Celkový instalovaný výkon PV elektráren byl v roce 2002 přibližně 2000 MW, což v současnosti odpovídá výkonu jaderné elektrárny Temelín. Výkon PV panelů je ovšem dán mimo jiné postavením Slunce, a tak se instalovaný výkon od toho produkovaného velmi výrazně liší. Koncem roku 2012 se celkový instalovaný výkon solárních elektráren odhaduje již na více než 100 GW, tedy padesátkrát více než před 10 lety [3].

1.2. Fotoelektrický jev

Fotoelektrický jev byl poprvé popsán v roce 1887 německým fyzikem Heinrichem Hertzem při pokusu, ve kterém docházelo k ozařování izolovaného vodiče ultrafialovým světlem. Budícím zářením se vodič začal kladně nabíjet a uvolňovat tedy elektrony. Z představ klasické fyziky by se zdálo, že energie uvolněných elektronů bude vyšší s rostoucí intenzitou dopadajícího záření. Pokusy ale bylo zjištěno, že intenzita použitého záření neovlivní energii elektronů, ale pouze množství uvolněných elektronů. Energie je dána frekvencí použitého záření. Později bylo zjištěno, že pro každý kov existuje minimální frekvence, při které se začíná objevovat fotoelektrický jev [4].

Klasická fyzika předpovídá uvolnění elektronů dopadajícím zářením, nedokáže ale vysvětlit např. existenci minimální frekvence nebo nezávislost energie elektronů na intenzitě dopadajícího záření. Toto vysvětlil až v roce 1905 Albert Einstein na základě kvantové fyziky, kdy vycházel z hypotéz Maxe Plancka. Předpokládal, že záření je vyzařováno po nedělitelných kvantech, a že každé kvantum předá svoji energii pouze jednomu elektronu. Elektron tuto energii přijme a část z ní se spotřebuje na uvolnění elektronu z kovu. Zbytek se přemění na pohybovou energii elektronu. Minimální frekvence dopadajícího záření, při které se začíná objevovat fotoelektrický jev, odpovídá podle této teorie uvolnění elektronu z kovu s nulovou pohybovou energií. Nižší frekvence není dostatečná ani pro pouhé uvolnění elektronu [4].

Einsteinova rovnice fotoelektrického jevu je

$$E_f = h \cdot f = W_V + \frac{1}{2} m \cdot v_e^2, \quad (1)$$

kde E_f je energie fotonu [J], h Planckova konstanta [J.s], f frekvence záření [s^{-1}], W_V výstupní práce materiálu (nutná k uvolnění elektronu) [J], m hmotnost elektronu [kg] a v_e rychlost elektronu [$m \cdot s^{-1}$].

Světelná emise poté nastane, když

$$h \cdot f > W_V \cdot f > f_m, \quad (2)$$

kde f_m je minimální frekvence dopadajícího záření [s^{-1}].

Touto teorií byly tedy vlastnosti zjištěné jednotlivými pokusy vysvětleny. Jak již bylo zmíněno, za popis fotoelektrického jevu dostal Albert Einstein v roce 1921 Nobelovu cenu za fyziku.

1.3. Výhody a nevýhody fotovoltaiky

Fotovoltaika slouží k výrobě elektrické energie a patří mezi tzv. ekologické zdroje energie. To s sebou přináší několik výhod – fotovoltaika kromě slunečního svitu nespotřebovává žádné palivo nebo suroviny, samotný provoz fotovoltaických elektráren neprodukuje žádný odpad, elektrárny nezatěžují své okolí škodlivým zářením, hlukem nebo zápachem. Největší potenciál pro využití je v slunečných oblastech jako Asie nebo subsaharská Afrika, kde jsou jiná řešení výroby elektrické energie velice problematická. Vhodné využití je také ve speciálních aplikacích, např. vesmírný program. Při dlouhodobém pohledu je solární energie jediným zdrojem, který je schopen pokrýt očekávaný nárůst lidské spotřeby elektrické energie.

Tento typ elektráren s sebou přináší ale i značné nevýhody. Velmi podstatnou je nízká účinnost fotovoltaických článků, která se však neustálým vývojem stále zvyšuje. Dalšími nevýhodami jsou např. stále vysoká cena výroby článků, značně omezená životnost článků a rovněž nestálost slunečního záření.

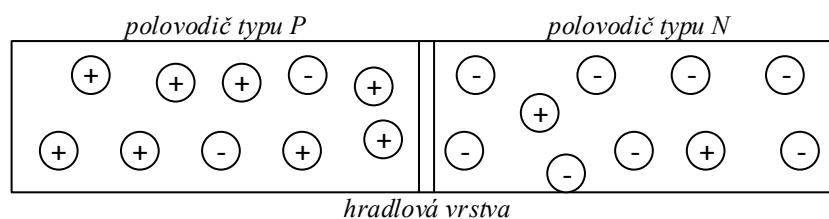
Tab. 1: Výhody a nevýhody fotovoltaiky

Výhody	Nevýhody
Nespotebovává žádné palivo	Nízká účinnost solárních článků
Nevytváří odpad	Relativně vysoká cena výroby
Nezatěžuje okolí hlukem, zápachem, zářením	Omezená životnost článků
Vhodné využití ve slunečných oblastech	Nestálost slunečního záření
Využití při problematickém jiném řešení	Potřeba záložního zdroje elektřiny
Využití ve speciálních aplikacích	Intenzita slunečního záření závislá na oblasti
Nejdůležitější zdroj budoucí spotřeby	

1.4. Výroba a princip fotovoltaických článků

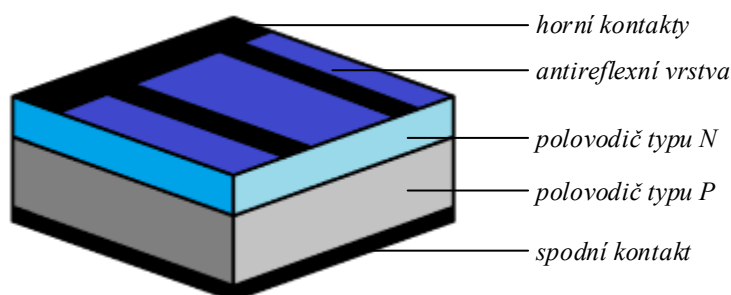
Nejrozšířenější PV články jsou křemíkové (monokrystalické, polykrystalické nebo amorfní) z důvodu několika výhod křemíku. Tento prvek je v přírodě hojně zastoupen ve formě oxidu křemičitého (SiO_2) neboli křemene. Je relativně levný, dostupný a netoxický. Jde o jeden z nejlépe prozkoumaných polovodičových materiálů s vyhovující šířkou zakázaného pásu $\Delta E_G \approx 1,1 \text{ eV}$, čímž u něho lze dosáhnout vysoké účinnosti generace volných nosičů náboje.

Polovodiče obecně dělíme podle typu nosiče náboje na polovodiče vlastní a příměsové. Příměsové se získávají přidáním prvku do čistého čtyřmocného křemíku. Přidáním prvku s pěti valenčními elektrony (např. fosfor, arsen, antimon) je získán polovodič typu N. Majoritními nosiči náboje v tomto materiálu jsou elektrony. Přidáním prvku se třemi valenčními elektrony (např. bór, hliník, galium) je získán polovodič typu P, kde majoritními nosiči náboje jsou díry. Spojením polovodiče typu P a polovodiče typu N vzniká přechod široký cca $1 \mu\text{m}$ s elektrickým polem, jehož intenzita směřuje z oblasti polovodiče typu N do oblasti polovodiče typu P [5]. Takové spojení se nazývá PN přechod. Mezi polovodičem typu P a polovodičem typu N je hradlová vrstva.



Obr. 2: PN přechod

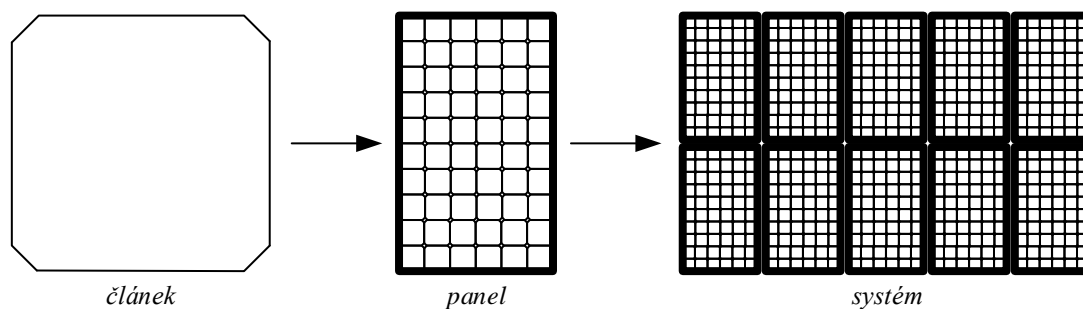
Fotovoltaický článek je v podstatě velkoplošnou polovodičovou diodou s přechodem PN orientovaným kolmo k čelní ploše. Dopadají-li na jeho povrch fotony s vyšší energií, než je šířka zakázaného pásu, dochází ke generaci párů elektron-díra. Elektrony se poté pohybují proti směru elektrického pole, díry po směru. Na solárním článku se tedy generuje napětí. Fotony po předání energie zanikají a nespotebovaná energie se přeměňuje na teplo a zahřívá plochu PV panelu. Toho se využívá u termo-fotovoltaických článků.



Obr. 3: Řez fotovoltaickým článkem

Pro výrobu PV článků se používá vysoce čistý křemík s čistotou 99,9999999%. Řezáním a následným leptáním je získán křemíkový plátek pro výrobu článku. Po difuzi donorů a akceptorů proběhne na přední straně článku vytvoření antireflexní úpravy povrchu pro redukci odrazu světla. Kontakty se na články nanášejí z obou stran vakuovými metodami nebo sítotiskem a jsou nejčastěji ze stříbra.

Fotovoltaické články se skládají do fotovoltaických panelů, které poté společně vytvářejí fotovoltaický systém. Do panelů se články skládají v sérioparalelní kombinaci pro získání žádaného napětí a výkonu [6].

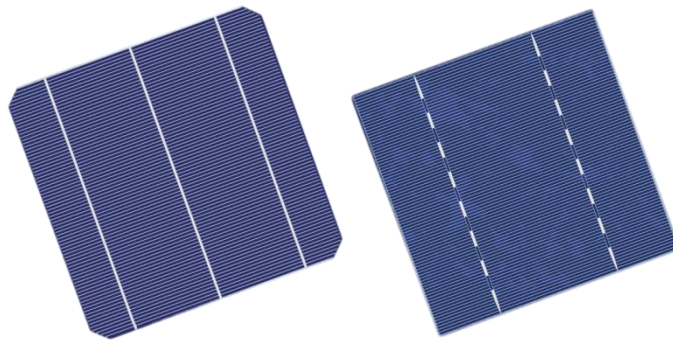


Obr. 4: Skládání článků do panelů a systémů

1.5. Typy křemíkových článků

Fotovoltaické články můžeme jednoduše rozdělit podle struktury použitého materiálu (křemíku) při výrobě do tří skupin:

- **monokrystalické** – využívají monokrystalického křemíku. Jde o nejčastěji používané články. Obvykle mají tvar osmiúhelníku. Mají nejvyšší účinnost mezi křemíkovými články a to přibližně 12 – 16%. Výroba probíhá pomocí Czochralského metody, u které je výsledný ingot tažen z taveniny velmi čistého křemíku a následně rozřezán na tenké destičky, které se dále upravují,
- **polykrystalické** – využívají polykrystalického křemíku. U těchto článků je možné používat křemík s nižší čistotou než u monokrystalických. Jejich tvar je obvykle čtvercový. Účinnost je asi 12 – 14%. Výroba probíhá odléváním čistého křemíku do čtvercových, příp. obdélníkových forem, poté se ingot rozřeže na tenké destičky,



Obr. 5: Monokrystalický a polykrystalický křemíkový článek [7]

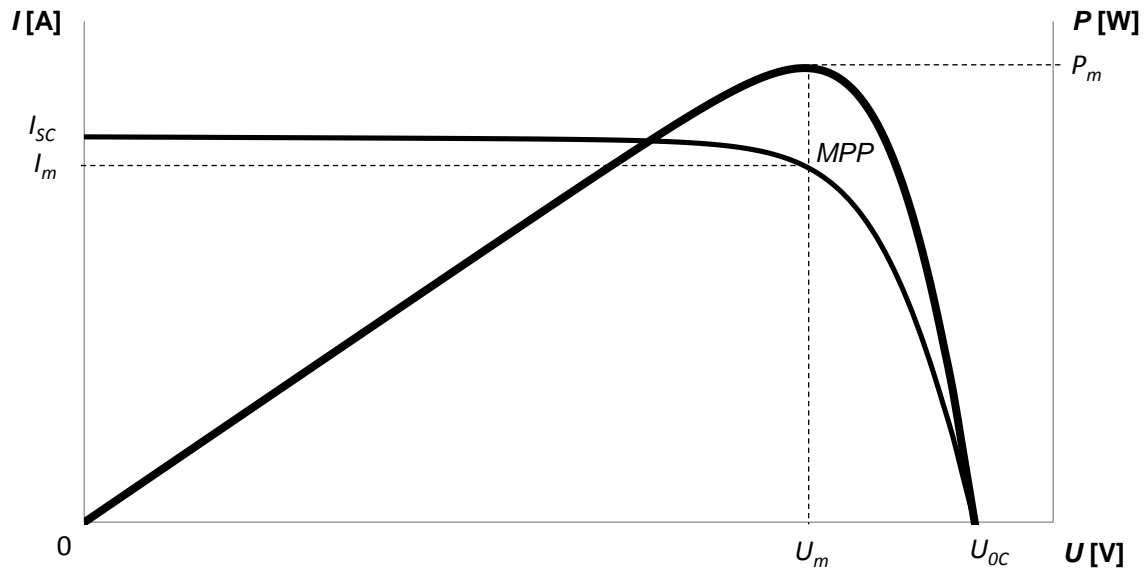
- **amorfní** – využívají amorfního křemíku, který má náhodně uspořádané atomy. Jsou ohebné a plní funkci i při sníženém osvětlení. Účinnost těchto článků je přibližně 2 - 6%. Výroba probíhá napařováním tenkých vrstev na plastový nebo kovový substrát a je jednodušší než výroba článků monokrystalických a polykrystalických.



Obr. 6: Amorfní křemíkový článek [8]

1.6. Elektrické parametry PV článků

Nejdůležitější elektrické vlastnosti fotovoltaických článků jsou popsány pomocí voltampérové charakteristiky.



Obr. 7: Voltampérová charakteristika fotovoltaického článku

Z této závislosti proudu na napětí (obr. 7) lze vyčíst několik parametrů [10]:

- I_{sc} [A] – proud nakrátko (při napětí $U = 0$ V). Tento proud je roven proudu generovanému dopadajícím světlem, pokud je nulová velikost sériového odporu R_s . Nenulová velikost odporu R_s proud nakrátko snižuje,
- U_{oc} [V] – napětí naprázdno (při proudu $I = 0$ A),
- **MPP** (maximum power point) – bod na voltampérové charakteristice, ve kterém je maximální výkon článku,
- P_m [W] – maximální výkon článku, který je schopen článek dodávat,
- U_m [V] – napětí na článku, při kterém je dodáván maximální výkon,
- I_m [A] – proud článkem, při kterém je dodáván maximální výkon,
- R_m [Ω] – vnitřní odpor článku, při kterém je dodáván maximální výkon. Jeho velikost je dána podle Ohmova zákona

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

- **FF** [-] – činitel plnění. Jde o poměr maximálního výkonu článku a výkonu při napětí naprázdno a proudu nakrátko. Specifikuje kvalitu článků. Je dán vzorcem

$$FF = \frac{U_m \cdot I_m}{U_{OC} \cdot I_{SC}}, \quad (4)$$

- **η** [%] – účinnost fotovoltaického článku

$$\eta = \frac{U_m \cdot I_m}{P_{in}} = \frac{U_m \cdot I_m}{E \cdot A_c}, \quad (5)$$

kde P_{in} je výkon dopadajícího záření [W], E intenzita osvětlení [Wm^{-1}] a A_c plocha fotovoltaického článku [m^2].

Dalším důležitým parametrem je velikost sériového odporu R_{SO} [Ω], který představuje odpory na kontaktech a paralelního odporu R_{SH} [Ω], který je dán především defekty krystalické mřížky. Ideální fotovoltaický článek by měl mít $R_{SO} = 0 \Omega$ a $R_{SH} = \infty \Omega$ [10].

Voltampérová charakteristika ideálního PV článku je definována vztahem

$$I = I_S \left[\exp\left(\frac{eU}{kT} - 1\right) \right] - eg(L_n - L_p) \cdot S, \quad (6)$$

kde I je proud tekoucí článkem [A], I_S proud procházející přechodem PN [A], e hodnota elementárního náboje [C], U napětí na článku [V], k Boltzmannova konstanta [J.K^{-1}], T teplota PN přechodu [K], g rychlost generace nosičů náboje [$\text{m}^{-3}\text{s}^{-1}$], L_n difuzní délka elektronu [m], L_p difuzní délka díry [m], S plocha článku [m^2].

Mezi nejdůležitější faktory, které ovlivňují elektrické parametry, tím i účinnost a životnost PV článků, patří především:

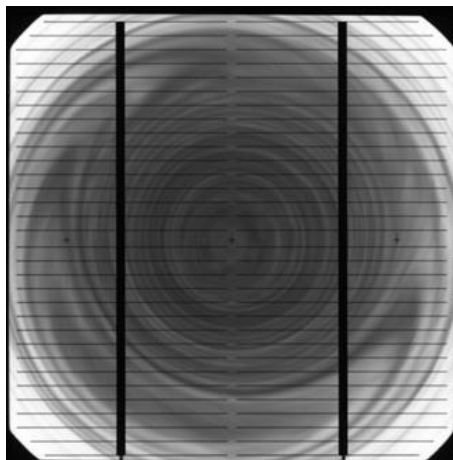
- v [$^{\circ}\text{C}$] – teplota, která při zvyšování snižuje napětí naprázdno, čímž klesá maximální výkon článku a tedy i jeho účinnost,
- ϕ [%] – relativní vlhkost vzduchu, kterou dochází k oxidaci článků,
- E [lx] – intenzita osvětlení, která při zvyšování zvyšuje proud nakrátko, napětí naprázdno a maximální výkon. Také tím roste účinnost a činitel plnění.

Dalšími faktory jsou také stáří článku, vyčízení článku nebo různá mechanická namáhání.

1.7. Defekty fotovoltaických článků

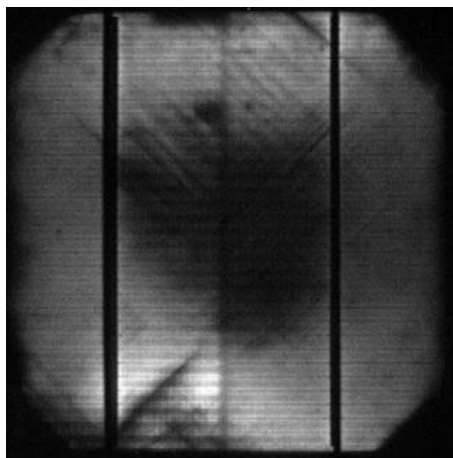
Kvůli vysoké náročnosti celé výroby fotovoltaického článku je nutné diagnostikovat strukturu materiálu již během samotné výroby. Tímto postupem lze určit poruchy, které mohou snižovat kvalitu různých parametrů článku. Tyto poruchy můžeme rozdělit do dvou základních skupin:

- **materiálové defekty (Grow Defects)** – typy poruch vznikající při samotné výrobě křemíku. Mezi tyto poruchy se řadí *vírové defekty* (Swirl Defects) a *defekty pnutí v křemíku* (Solar Stress). Vírové defekty vznikají z důvodu injekce příměsí do křemíku při výrobě Czochralského metodou. Projevují se jako soustředné kružnice v materiálu. Tyto poruchy mohou např. zvyšovat závěrný proud PN přechodu.



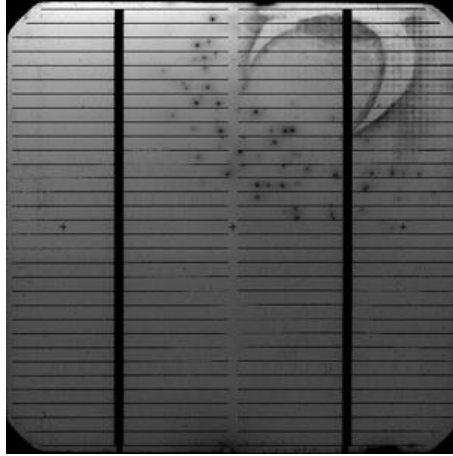
Obr. 8: Materiálové defekty – vírový defekt [9]

Defekty pnutí v křemíku jsou dány porušenou strukturou křemíku kvůli rychlému růstu ingotu. Nejčastěji vznikají při výrobě monokrystalického křemíku,



Obr. 9: Materiálové defekty – vnitřní pnutí v křemíku [9]

- **procesní defekty (Processing Induced Defects)** – typy poruch vznikající při následné výrobě křemíkových fotovoltaických článků. Do této skupiny poruch se řadí různá *mechanická poškození* článku (poškrábání, odštípnutí apod.) a *nehomogenita difuzní vrstvy* [11].

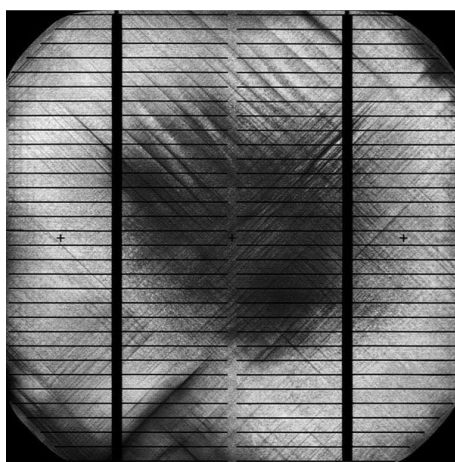


Obr. 10: Procesní defekty – nehomogenita difuzní vrstvy [9]

1.8. Detekce defektů fotovoltaických článků

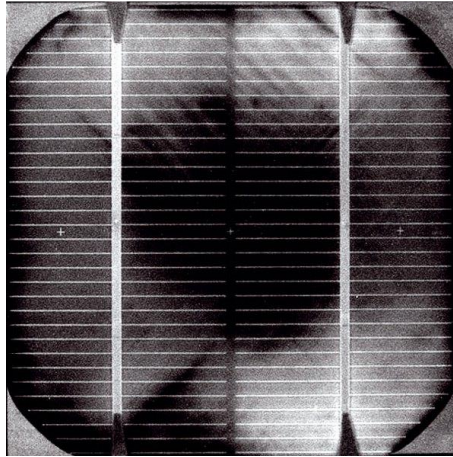
Pro detekci poruch v PV článcích se využívá několika metod:

- **spojitý solární simulátor** – metoda využívající se ke kontrole funkčnosti článků. Fotovoltaický článek je osvětlován světlem o podobném spektru jako sluneční záření. Při tomto testování se měří voltampérová charakteristika PV článku, ze které se vyhodnocují jednotlivé elektrické parametry. Voltampérová charakteristika je změřena nejprve bez osvětlení PV článku, poté při jeho osvětlení,
- **flash tester** – metoda, která využívá solární simulátor. V tomto případě je ale článek krátce osvětlen zářením o velmi vysoké intenzitě. Prakticky se zdroj podobá blesku na fotoaparátu. Flash tester je složen ze čtyř částí: flasher (zdroj záblesku), elektronická zátěž (snímá odezvu článku), monitorovací článek (zajišťuje korekci osvětlení) a počítač. Výhodou je velmi krátká doba testování,
- **LBIC (Light Beam Inducted Current)** – jde o nejběžněji používanou metodu k detekci materiálových, elektrických a optických poruch PV článků. Princip metody spočívá v zaostření laserového paprsku na zkoumaný vzorek a sledování proudové odezvy článku. Tato odezva je přenášena do počítače, čímž je získána bodová plošná charakteristika rozložení proudu. Přesnost závisí hlavně na druhu laseru a kroku detekce. Pro zvýšení přesnosti je možné použít více druhů laserů. Výhodou metody je velice přesná analýza defektů článku. Nevýhodou je dlouhé (až několikahodinové) skenování každého článku. Další podoby této metody jsou LBIV (Light Beam Inducted Voltage) a LBIP (Light Beam Inducted Power). U metody LBIV se sleduje napětí naprázdno, u LBIP je snahou nastavit bod měřených veličin pro dosažení maximálního výkonu článku,



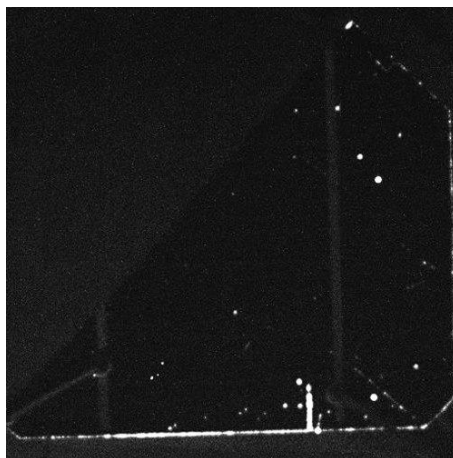
Obr. 11: Materiálové pnutí solárního článku, obraz metodou LBIC [12]

- **elektroluminiscence** – při této metodě je PV článek napájen konstantním proudem, přičemž ho v úplné tmě snímá speciální CCD kamera. Je zde využita reciproční funkce PV článku, kdy po připojení napětí dochází k zářivé rekombinaci párů elektron-díra. Místa poruchy září slabě nebo vůbec. Výsledek této metody je podobný výsledkům metody LBIC nebo LBIV. Výhodou je doba detekce řádově několik sekund, rychlá opakovatelnost měření a využití i pro měření celých fotovoltaických panelů. Nevýhodou je nutnost napájení článku zdrojem napětí (proudu). Tato metoda je používána poměrně krátce a nadále je součástí výzkumu,



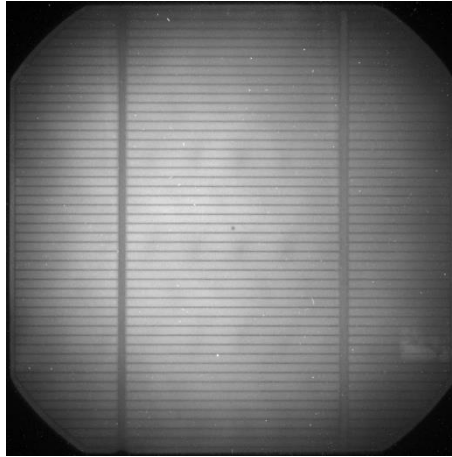
Obr. 12: Materiálové prnutí solárního článku, obraz metodou elektroluminiscence [12]

- **luminiscence mikroplazmy** – jde o obdobu metody elektroluminiscence. Rozdílem je zapojení článku v závěrném směru. Kvůli nedokonalostem v krystalické mřížce PN přechodu poté dochází v článku ke vzniku luminiscence mikroplazmy. Poškozená místa článku díky vyšší teplotě jasně svítí. Tato místa opět snímá speciální CCD kamera,



Obr. 13: Plně rozvinutá emise světla z mikroplazmy [12]

- **fotoluminiscence** – tato metoda je založena na principu buzení luminiscenčního záření nikoli elektrickým proudem jako v případě elektroluminiscence, ale vnějším světelným zdrojem. Jako zdroj budícího záření se nejčastěji používá laser (bodové buzení) nebo LED diody (celoplošné buzení). Vyvolané záření je následně detekováno. K detekci bývá nejčastěji využívána speciální CCD kamera (celoplošná detekce) nebo fotodiody (bodová detekce).



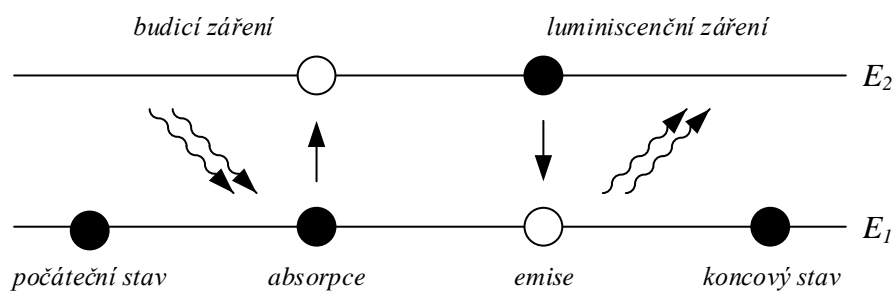
Obr. 14: Snímání fotovoltaického článku metodou fotoluminiscence [13]

Při laboratorních testech v rámci této diplomové práce bylo luminiscenční záření snímáno speciální CCD kamerou s podchlazeným snímacím čipem, před kterou byl umístěn infračervený filtr. Obraz byl dále přenášen do počítače, kde došlo k vytvoření výsledné fotografie. Ta je stejně jako v případě elektroluminiscence monochromatická. Vyvolání luminiscence je závislé především na vlnové délce budícího záření, na energii fotonů dopadajícího záření, na době života nosičů náboje v článku a v neposlední řadě na okolní teplotě. Výhodou této metody je rychlá a přesná detekce, nevýhodou poměrně složitá realizace měřicího pracoviště.

Největším problémem samotného měření pomocí metody fotoluminiscence je odfiltrování budícího záření tak, aby nedošlo k jeho zachycení CCD kamerou a neovlivnilo tak výslednou fotografii. To je možné řešit např. správným načasováním zdroje světelného záření a detekce CCD kamery. Nejlepším možným řešením se jeví odfiltrování tohoto záření pomocí kotoučové rotační clony s optickou závorou. Při otáčení clony dochází k sepnutí zdroje budícího záření, když clona zakrývá objektiv a vypnutí zdroje budícího záření, když clona odkrývá objektiv. Z důvodu krátké doby života nosičů náboje musí ovšem taková clona dosahovat velmi vysokých otáček, řádově v tisících otáčkách za minutu [13].

1.9. Vysvětlení luminiscence

Luminiscence je jev, při kterém dojde k vyzáření fotonu z elektronových excitovaných stavů. Současně s tím přejde soustava do stavu s nižší energií. Uplatňuje se tu spontánní emise. Na rozdíl od emise stimulované při ní přechází soustava do stavu s nižší energií samovolně bez působení vnějšího elektromagnetického pole. Do excitovaných stavů se elektrony nejprve musí uvést dodáním energie (absorpce). Při přechodu do nižšího stavu nemusí vždy k luminiscenci dojít a uvolněná energie je poté přeměněna na energii tepelnou. Podle fyzika Sergeje Ivanoviče Vavilova je luminiscence definována jako přebytek záření tělesa nad úroveň jeho teplotního záření v dané spektrální oblasti při dané teplotě, jestliže při tom toto záření má určitou dobu doznívání, tj. trvá i po skončení budicího účinku [14].



Obr. 15: Princip luminiscence

Luminiscence se dělí na fluorescenci a fosforescenci (normální a zpožděnou). O fluorescenci jde tehdy, když emise nastane jedním či více energetickými přechody. Fosforescence je typ, kde se uplatňuje metastabilní hladina. Doba pohasínání u fluorescence jsou řádově nanosekundy, u fosforescence milisekundy.

Podle druhu budicí energie je možné luminiscenci dělit na elektroluminiscenci, fotoluminiscenci, radioluminiscenci, bioluminiscenci apod. U fotoluminiscence se uplatňuje Stokesův zákon, ze kterého plyne, že vlnová délka luminiscenčního záření je větší nebo rovna vlnové délce budicího záření [15].

Největší výhodou použití fotoluminiscence pro metody detekce defektů fotovoltaických článků je, že tato metoda je neinvazivní a nedestruktivní. Měření je možné opakovat bez negativního vlivu na měřený článek.

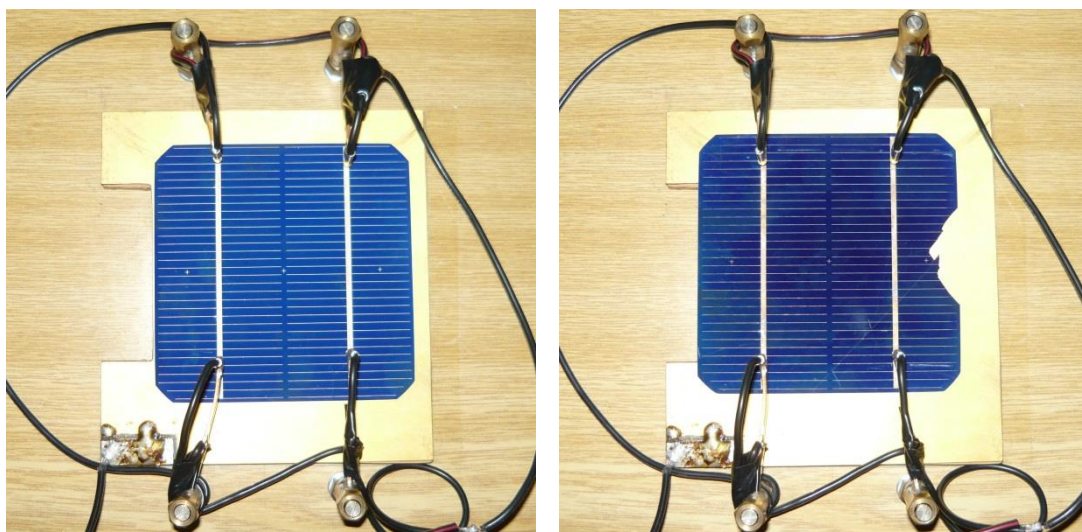
2. Měření metodou elektroluminiscence

Tato část práce se zabývá samotným měřením článků za pomoci metody elektroluminiscence. Snímání článků probíhalo v temné komoře (obr. 16) bez jakéhokoli vnějšího světelného zdroje na Ústavu elektrotechnologie VUT v Brně.



Obr. 16: Laboratorní box pro měření metodou elektroluminiscence

Články byly pro vyvolání luminiscence napájeny konstantním stejnosměrným napětím o velikosti $U = 4$ V. Každý článek byl kontaktován celkem na čtyřech bodech (obr. 17). Měřeny byly dva různé náhodně vybrané starší články od firmy Solartec o velikosti 4".

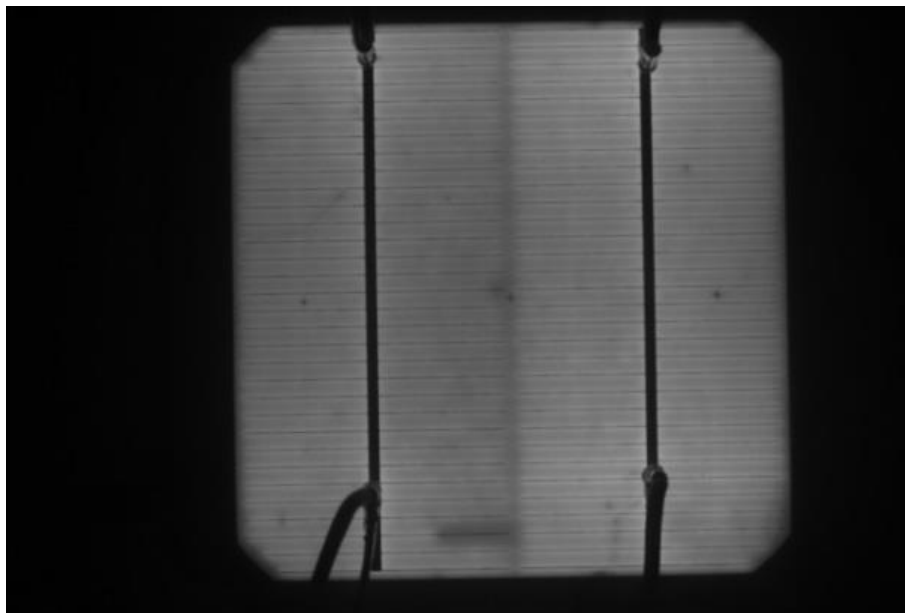


Obr. 17: Kontaktování čl. 1 (vlevo) a čl. 2 (vpravo) pro metodu elektroluminiscence

Snímání článků probíhalo CCD kamerou G2-3200 s nasazeným infračerveným (propustným) filtrem na objektivu. Délka jednotlivých sekvencí snímání byla $t = 300$ s. Článek 1 vykazoval pouze drobné bodové materiálové poruchy, které mohou vzniknout nečistotami při jeho výrobě.



Obr. 18: Článek 1 – fotografie



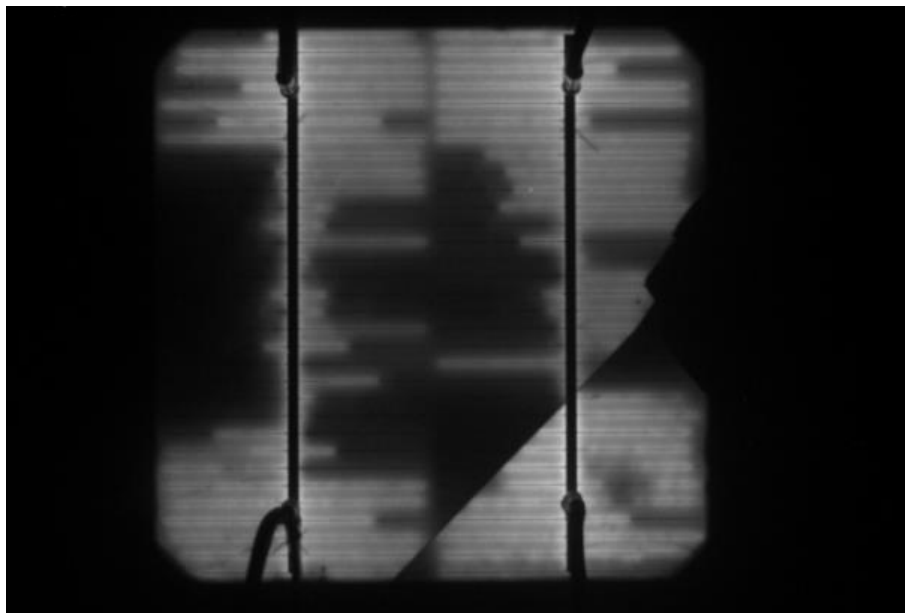
Obr. 19: Článek 1 – elektroluminiscence ($U = 4$ V, $t = 300$ s)

Na druhém testovaném článku byl výsledek velmi odlišný. Na článku 2 je viditelné různé rozložení proudů mezi dvěma částmi rozlomeného článku. Dále článek vykazuje velkoplošnou poruchu, kdy značná část článku vyzařuje luminiscenční záření pouze

minimálně. Je zde zřetelně viditelná nerovnoměrnost rozložení proudu směrem od kontaktů, což může být vadou samotných kontaktů. Tento defekt je tedy způsoben nejspíše špatnou manipulací s článkem během jeho používání.



Obr. 20: Článek 2 – fotografie



Obr. 21: Článek 2 – elektroluminiscence ($U = 4 \text{ V}$, $t = 300 \text{ s}$)

Měření metodou elektroluminiscence probíhalo z důvodu ověření teoretických poznatků k této metodě popsaných výše. Postupně byly detekovány vady na dvou zkoumaných článcích, kdy článek 1 obsahoval minimum poruch a článek 2 byl již zcela zničen.

3. Měření metodou fotoluminiscence

Hlavní používanou metodou byla metoda fotoluminiscence. Měření probíhalo v zatemněné místnosti bez vniku jiného světelného zdroje než zdroje budicího záření. Měřicí pracoviště vychází z návrhu měřicího pracoviště v diplomové práci Ing. Tomáše Baury, ve které je clona poháněna DC motorem Transmotec 775 – 8013F. Největší výhodou tohoto motoru je vysoká rychlost a snadné řízení otáček.

Tab. 2: Parametry DC motoru Transmotec 775 – 8013F [13]

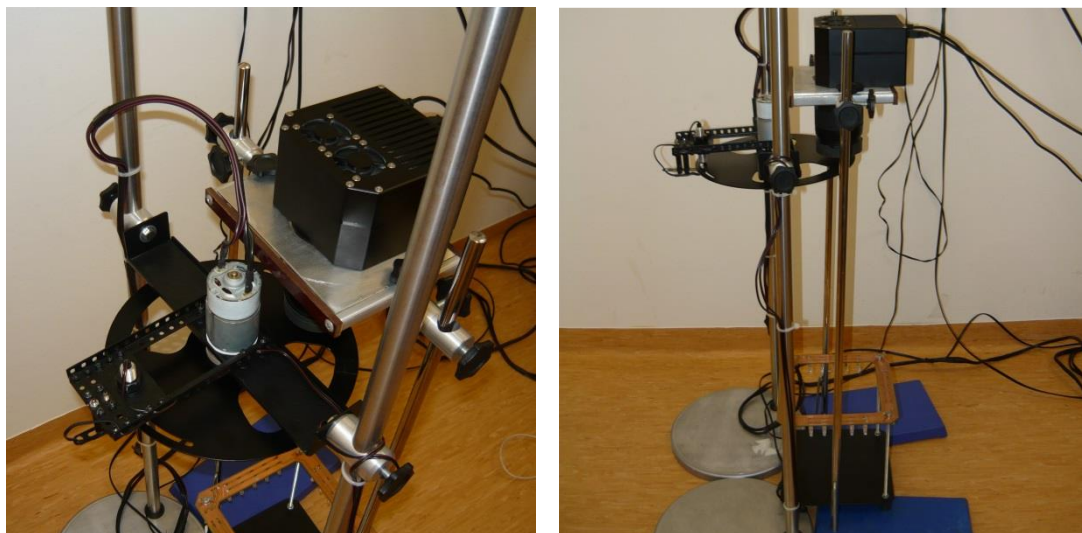
Popis	Parametr	Hodnota
Maximální napětí	U [V]	12,00
Maximální proud	I [A]	15,75
Maximální rychlost	v [ot.min ⁻¹]	18762
Účinnost	η [%]	70

Z důvodu velkého proudového odběru motoru je jeho napájení řešeno laboratorním zdrojem Diametral M130R50D s výkonem 1200 W. Napájení pole LED diod budících luminiscenci v článku bylo řešeno laboratorním zdrojem Diametral P230R51D. Pro snímání napětí na svorkách motoru byl využit digitální multimetr Agilent 34401A.



Obr. 22: Napájecí zdroj Diametral M130R50D

Buzení luminiscenčního záření probíhá pomocí pole LED diod a je vypínáno optickou závorou. Pro měření otáček je možné připojit k optické závoře i osciloskop. Emitované luminiscenční záření je snímáno CCD kamerou G2-3200, která má na svém objektivu nasazen infračervený filtr a je přenášeno přes rozhraní USB do počítače. Tam je výsledná fotografie zpracována programem SIMS, resp. SIPS.



Obr. 23: Pracoviště pro měření metodou fotoluminiscence

Snímání emitovaného luminiscenčního záření je prováděno speciální CCD kamerou G2-3200 s nasazeným infračerveným filtrem na objektivu a s nasazenou 5 mm clonkou na objektivu. Touto clonkou bylo dosaženo zmenšení plochy čočky objektivu, a tím zajištění včasného zakrytí objektivu při sepnutí zdroje budícího záření.



Obr. 24: CCD kamera s nasazeným objektivem

Speciální CCD kamera G2-3200 je původně navržena k astronomickým účelům. Obsahuje vysoce citlivý snímací čip Kodak KAF Full Frame CCD, který je podchlazen pomocí Peltierových článků pro minimalizaci tepelného šumu. Hlava kamery obsahuje 5 vlastních filtrů, které je možné při snímání použít. Výsledné fotografie jsou v rozlišení 2184 x 1472 obrazových bodů [16].



Obr. 25: Vnitřní elektronika CCD kamery G2-3200 [16]

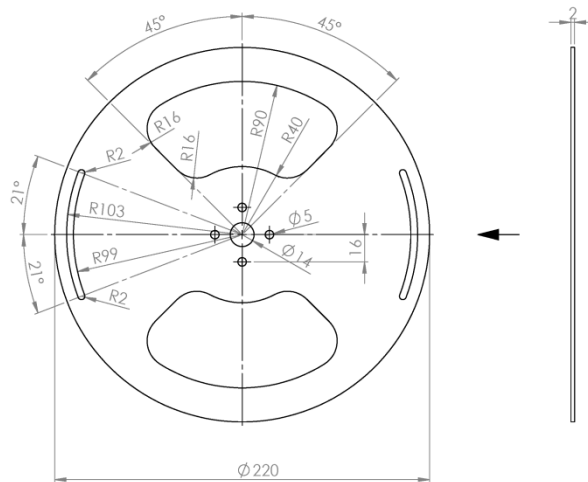
K ovládání kamery byl využit programový balík SIMS (Scientific Image Manipulation System), resp. od verze 2.0 se jmenující SIPS (Scientific Image Processing System) od společnosti Moravské přístroje.

Expozice byla vždy nastavena na mód nízkého šumu. Snímací čip byl podchlazován na teplotu $v = -20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Při každém měření byl na objektivu nasazený infračervený propustný filtr pro minimalizaci ovlivnění výsledků budicím zářením. Ve většině měření byl použitý ještě dodatečný infračervený filtr umístěný uvnitř CCD kamery. Doba snímání byla pro každé měření měněna.

Všechny nasnímané fotografie byly následně pro lepší interpretaci výsledků převedeny pomocí balíku Adobe Photoshop CS6 do barevného modelu RGB. Následně byl na fotografie využitý digitální filtr typu medián pro odstranění šumu. Tento filtr pracuje na principu výpočtu mediánu pro určitou oblast kolem každého bodu obrazu. U vybraných fotografií byl také měněn jas a kontrast pozadí.

3.1. Použití clony 1

Pro uzavírání objektivu CCD kamery a přerušování optické závory k spínání pole LED diod byly vyrobeny celkem tři clony. Nejjednodušším případem je clona 1 (obr. 26, obr. 27). Během jednoho otočení clony dojde k dvojitmu snímání zkoumaného vzorku.



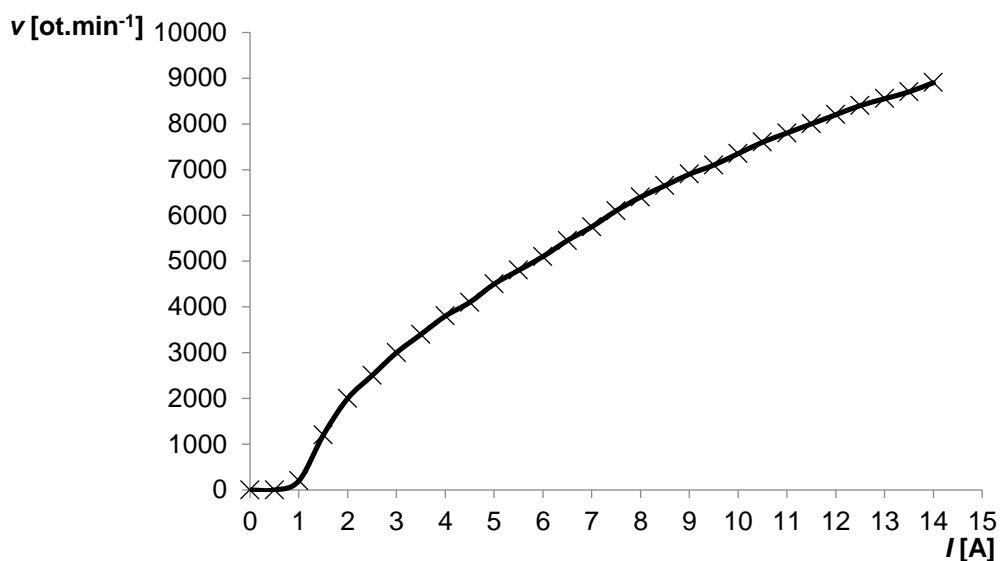
Obr. 26: Technický náčres clony 1

Podle technického výkresu byla clona vyrobena na půdě Fakulty elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně. Clona byla v této práci pouze ověřována, její výrobou a testováním se již zabývala jiná diplomová práce.



Obr. 27: Vyrobená a ověřovaná clona 1

Pro jednodušší orientaci bude dále udáván počet otáček rotační kotoučové clony namísto velikosti napájecího proudu. Pro tento převod poslouží charakteristika měřená v diplomové práci Ing. Tomáše Baurý (obr. 28).



Obr. 28: Závislost rychlosti otáčení clony na napájecím proudu [13]

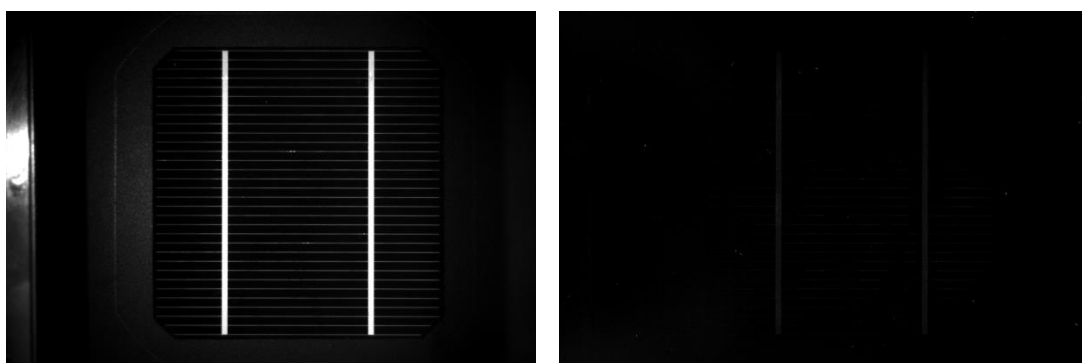
Samotné testování clony 1 probíhalo na několika fotovoltaických článcích od firmy Solartec o velikostech 4" a 5". U testovaných článků starších konstrukčních typů se při rychlosti $v = 8000 \text{ ot.min}^{-1}$ (16000 snímků za minutu) luminiscence neprojevila (obr. 29 vpravo, obr. 30 vpravo, obr. 31 vpravo, obr. 32 vpravo). Tato rychlost již způsobovala poměrně velký hluk. U vyšších rychlostí by se mohly projevit i vibrace a měření by nebylo dostatečně bezpečné.



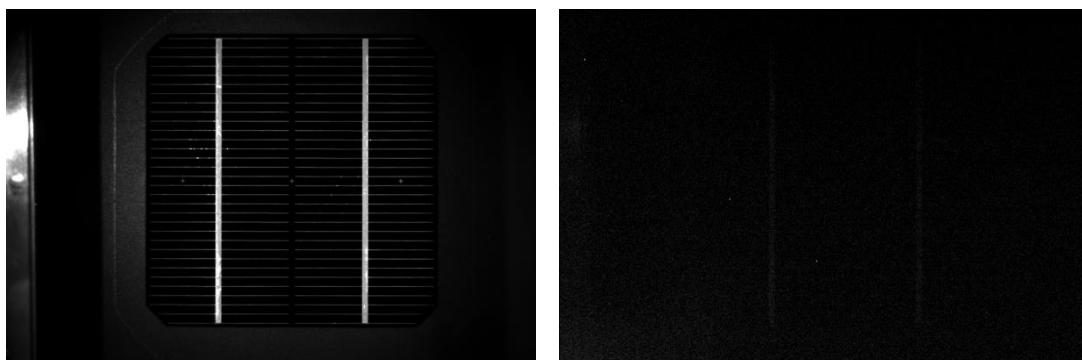
Obr. 29: Článek 3 měřený pomocí fotoluminiscence ($v = 8000 \text{ ot.min}^{-1}$, $t = 300 \text{ s}$)



Obr. 30: Článek 4 měřený pomocí fotoluminiscence ($\nu = 8000 \text{ ot.min}^{-1}$, $t = 300 \text{ s}$)

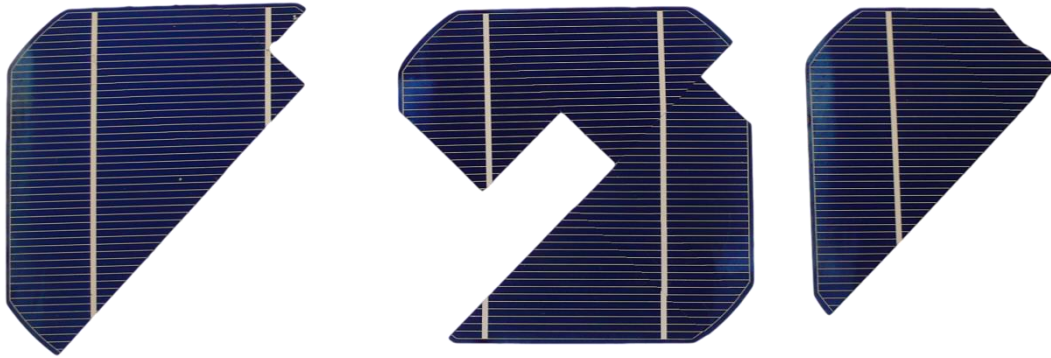


Obr. 31: Článek 5 měřený pomocí fotoluminiscence ($\nu = 8000 \text{ ot.min}^{-1}$, $t = 300 \text{ s}$)



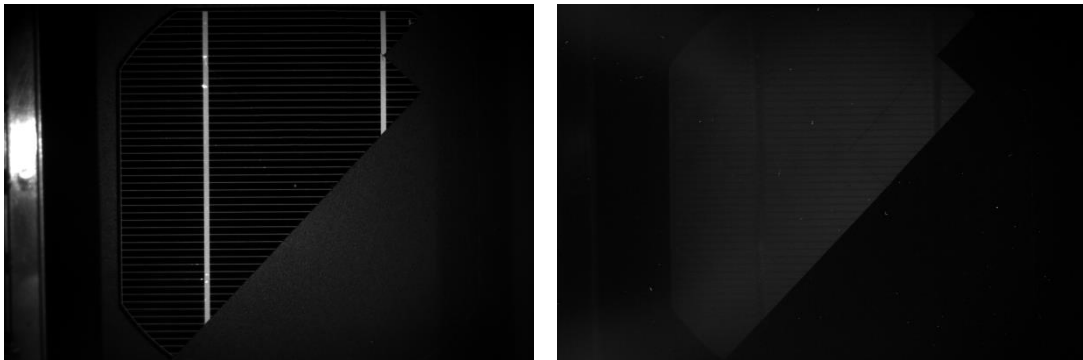
Obr. 32: Článek 6 měřený pomocí fotoluminiscence ($\nu = 8000 \text{ ot.min}^{-1}$, $t = 300 \text{ s}$)

Lepších výsledků bylo dosaženo při pokusech s několika rozlomenými novějšími články. Zde se již luminiscence vlivem osvětlení projevila pravděpodobně díky delší době života nosičů náboje v křemíku.



Obr. 33: Měřené části článků A, B, C pomocí metody fotoluminiscence

Měření bylo provedeno vždy po dobu $t = 600$ s při rychlosti $v = 8000$ ot.min⁻¹. Prodloužením této doby se výsledky prakticky nezměnily.



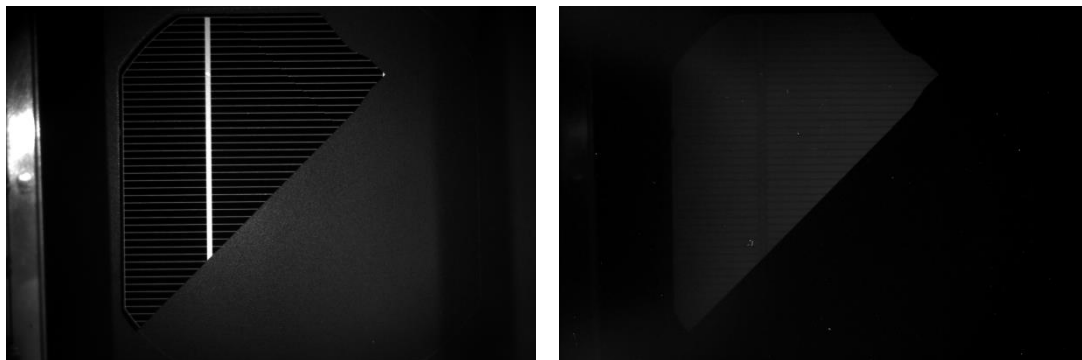
Obr. 34: Článek A měřený pomocí fotoluminiscence ($v = 8000$ ot.min⁻¹, $t = 600$ s)

Při nižších otáčkách se luminiscence neprojevila. Lepších výsledků při nižších otáčkách bylo později dosaženo s testovanou clonou 3.



Obr. 35: Článek B měřený pomocí fotoluminiscence ($v = 8000$ ot.min⁻¹, $t = 600$ s)

Výsledné fotografie jsou zcela dostatečné pro ověření funkčnosti testovaného pracoviště pro měření defektů fotovoltaických článků metodou fotoluminiscence.

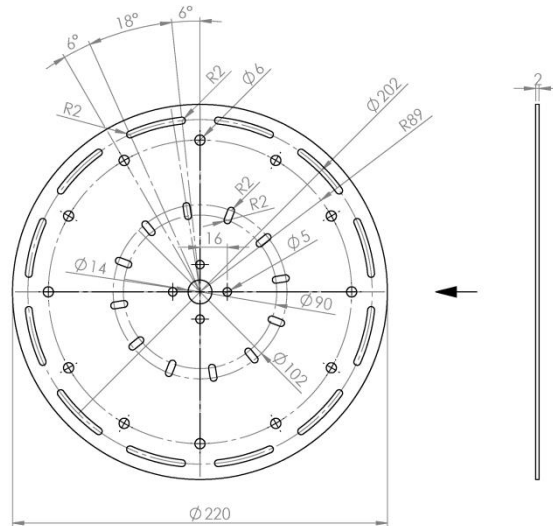


Obr. 36: Článek C měřený pomocí fotoluminiscence ($v = 8000 \text{ ot.min}^{-1}$, $t = 600 \text{ s}$)

Měření s clonou 1 na článcích A, B, C však nebyla dosti přesná pro stanovení poruch v materiálu článků. Jedním z důvodů je bezpochyby pro toto měření nevhodná clona 1, kdy při rychlosti $v = 8000 \text{ ot.min}^{-1}$ dojde k vytvoření 16000 snímků, tedy přibližně 267 snímků za sekundu. To znamená, že pro vytvoření jednoho snímku je potřeba doba přibližně $t = 3,7 \text{ ms}$. Tato doba je ale stále příliš dlouhá na to, aby bylo možné kamerou zachytit veškeré vyvolané luminiscenční záření. Z tohoto důvodu byla navržena a v této práci pouze testována clona 2, která měla za cíl dobu pro vytvoření jednoho snímku výrazně snížit.

3.2. Použití clony 2

Další clonou, která byla testována, byla clona 2 (obr. 37, obr. 38). Výrobou této clony se také zabývala již jiná diplomová práce. Při jednom otočení clony je nasnímáno dvanáct snímků. Teoreticky je tedy možné dosáhnout srovnatelné kvality výsledných snímků jako u clony 1 při použití nižších otáček.



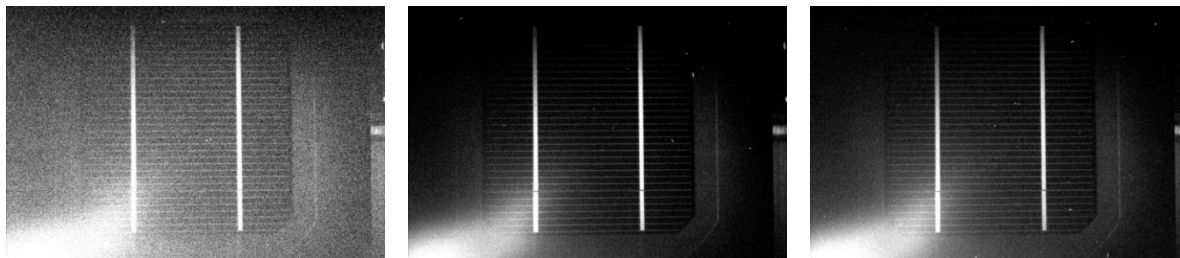
Obr. 37: Technický nákres clony 2

Na cloně 2 byly vyrobeny tři typy výřezů. Na okrajích pro přerušování optické závory, poté pro snímání kamerou a kolem středového úchyty pro ozařování článku laserem. Tato možnost ovšem nebyla testována a do budoucna se nepředpokládá její využití.



Obr. 38: Vyrobená a testovaná clona 2

Při testování fotovoltaických článků s nasazenou clonou 2 docházelo k nechtěným odleskům do objektivu snímací kamery. Po následných testech byla tato závada klasifikována jako chyba v samotném návrhu clony. Na snímcích je vidět odlesk v levém spodním rohu, který je nezávislý na době snímání i na rychlosti otáčení clony.



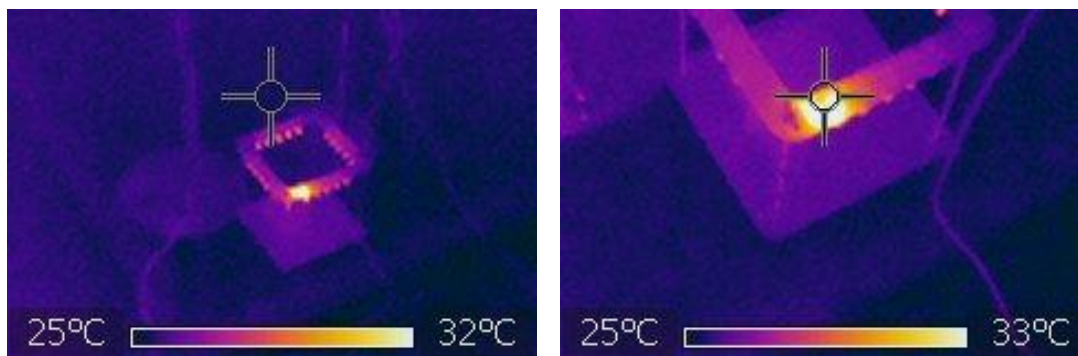
Obr. 39: Test: $v = 3800 \text{ ot.min}^{-1}$, $t = 60 \text{ s}$ (a), $t = 180 \text{ s}$ (b); $v = 3000 \text{ ot.min}^{-1}$, $t = 180 \text{ s}$ (c)

Pro vyloučení vnějšího vlivu dalšího světelného zdroje bylo provedeno měření s vypnutým osvětlením LED diod. Vyloučení vlivu podložky s osvětlující částí bylo provedeno otočením podložky o úhel 90° . Na výsledných fotografiích se ale nic zásadního nezměnilo. Poslední testování clony 2 proběhlo při zapojení opačného otáčení motoru. Výsledkem byla opět stejná chyba v levém spodním rohu fotografie.



Obr. 40: Clona 2 bez osvětlení (a), s otočenou podložkou (b), při opačném otáčení (c)

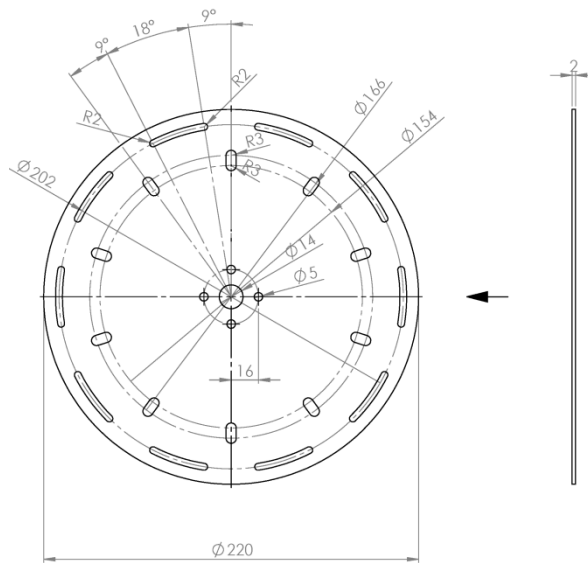
Vliv zahřívání odporů na zapojení LED diod a zahřívání motoru byl vyloučen snímáním těchto částí infračervenou termokamerou FLIR i7. Teplota odporů ani jiných součástí měřicího pracoviště během měření nepřekročila hodnotu $\nu = 40 \text{ }^\circ\text{C}$.



Obr. 41: Snímání měřicího pracoviště infračervenou termokamerou FLIR i7

3.3. Použití clony 3

Z výše popsaných důvodů byla navržena a poté vyrobena clona 3 (obr. 42, obr. 43). U této clony byl oproti předchozí snížen počet výřezů pro získání deseti snímků během jednoho otočení clony. Dále byly snímací výřezy posunuty blíže středové osy, aby nedocházelo k nechtěným odleskům od hran výřezů pro optickou závadu do objektivu snímací kamery. Snímací výřezy byly také prodlouženy pro možnost pohybu objektivu díky posuvnému nosníku kamery. Původně navrhované výřezy pro laser byly v tomto návrhu odstraněny.



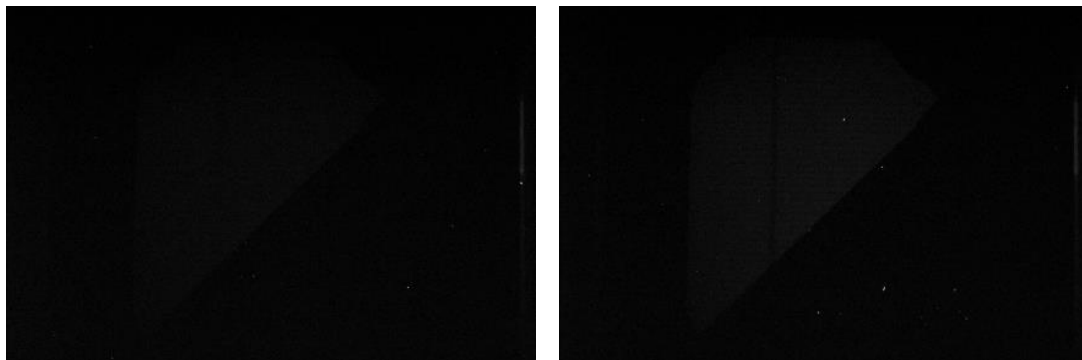
Obr. 42: Technický náčrtek clony 3

Clona byla vyrobena z hliníkového plechu o tloušťce 2 mm. Pro snížení její odrazivosti byla využita povrchová úprava černým eloxováním. Následně byla vyvážena využitím akcelerometru a zatěžováním požadovaných míst clony lepicí páskou.



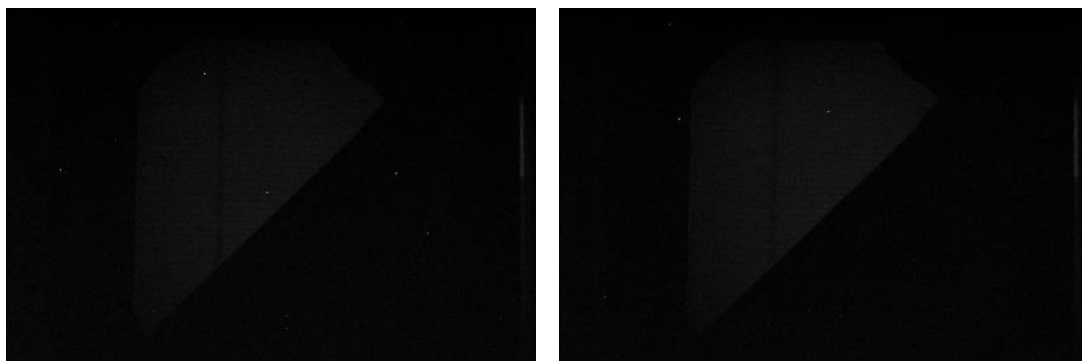
Obr. 43: Vyrobená a testovaná clona 3

Otáčky testované rotační clony byly řízeny dodaným proudem. Při jeho postupném zvyšování byly výsledné snímky lepší. Zlepšení bylo patrné po jistou hodnotu proudu. Poté už ke zlepšení docházelo pouze minimálně. Porovnání jednotlivých výsledků je vidět na následujících snímcích.



Obr. 44: Testovaný článek C při $\nu = 200 \text{ ot.min}^{-1}$ a $\nu = 2000 \text{ ot.min}^{-1}$

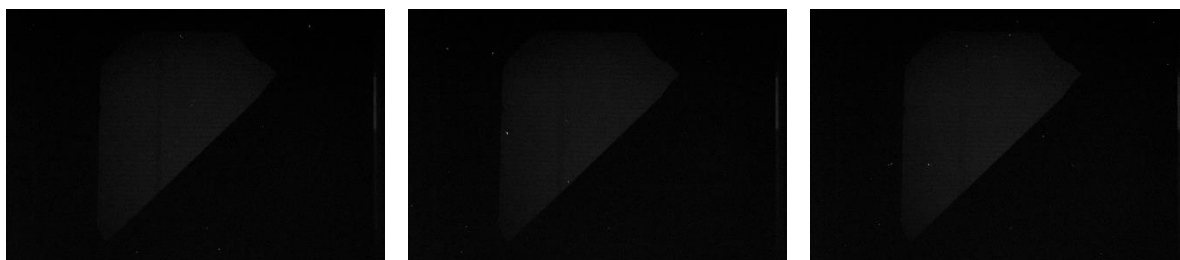
Do rychlosti $\nu = 2000 \text{ ot.min}^{-1}$ se výsledné snímky jeví jako zcela nedostatečné. Luminiscence je zde sice patrná, ale na výsledných fotografiích není lehce rozeznatelná ani hranice samotného článku. Pro určení defektů jsou výsledky nepoužitelné. Delší doba snímání článku může tento fakt zlepšit, avšak vhodnější se jeví zvýšení napájecího proudu.



Obr. 45: Testovaný článek C při $\nu = 3000 \text{ ot.min}^{-1}$ a $\nu = 3800 \text{ ot.min}^{-1}$

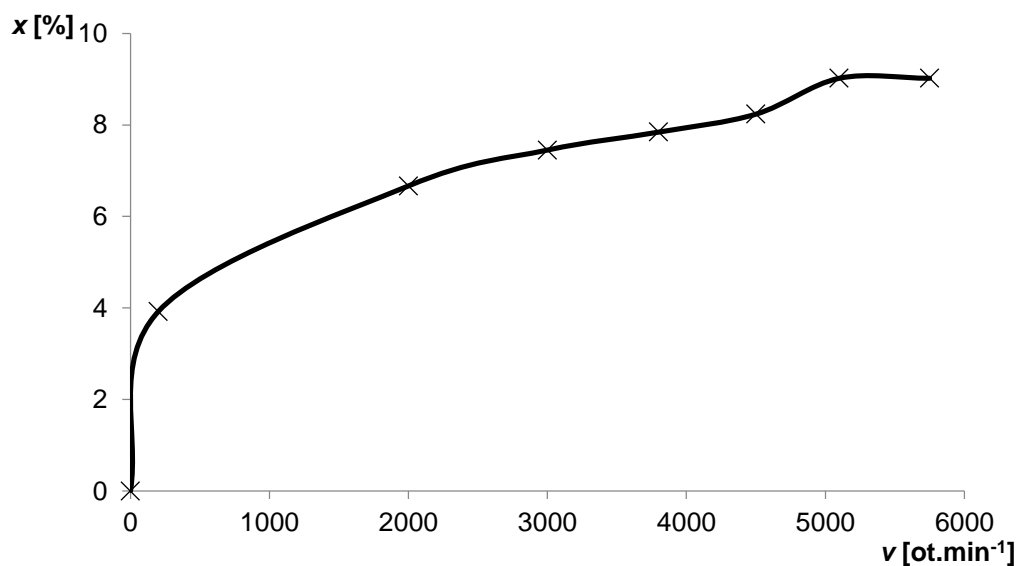
Dostatečná hodnota dodaného proudu, od které již nedocházelo k výraznému zlepšení, byla přibližně $I = 4,0 \text{ A}$. To odpovídá rychlosti $\nu = 3800 \text{ ot.min}^{-1}$. Tyto otáčky nezpůsobují žádné vibrace ani nadměrný hluk. Testování může tedy běžet nepřetržitě po delší dobu než s napájením vyšším proudem. Proto při většině testů byl volen právě tento napájecí proud a upravována spíše zmíněná doba snímání článku.

Další zvyšování otáček clony vedlo i přes dobré vyvážení samotné clony k drobným vibracím a zvukovým fenoménům. K výraznému zlepšení výsledků ale nedocházelo.



Obr. 46: Testovaný článek C při $v = 4500 \text{ ot.min}^{-1}$, $v = 5100 \text{ ot.min}^{-1}$, a $v = 5750 \text{ ot.min}^{-1}$

Po analýze snímků v balíku Adobe Photoshop CS6 metodou hrubého sjednocení odstínů černé pomocí filtru typu medián a následném zjišťování odstínu v nejsvětlejším místě obrázku byla zjištěna závislost sytosti výsledných snímků na změně rychlosti otáčení clony. Tato závislost je zobrazena na obr. 47 a odpovídá výše popsaným skutečnostem, tedy že přibližně od rychlosti $v = 3800 \text{ ot.min}^{-1}$ se již výsledná sytost mění pouze minimálně. Sytost fotografií byla odečtena jako hodnota černé barvy z rozsahu 0 – 255 a následně pro lepší přehlednost převedena na procenta, kdy hodnota 255 odpovídá 100% a hodnota 0 odpovídá 0%. Tato imaginární veličina byla označena symbolem x .



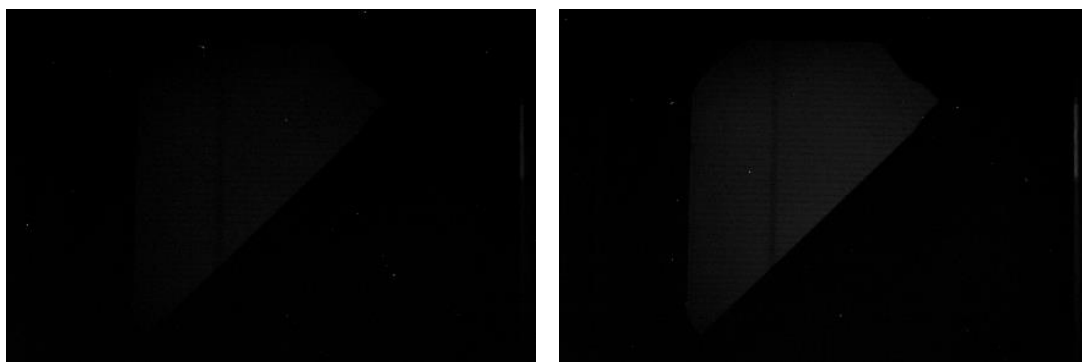
Obr. 47: Závislost sytosti výsledných snímků na změně rychlosti otáčení clony

Kvalita výsledných snímků je také závislá na době samotného snímání. Experimentálně bylo zjištěno, že minimální potřebná doba je v řádech stovek sekund. Porovnání jednotlivých dob snímání článku je vidět na následujících snímcích.



Obr. 48: Testovaný článek C po dobu $t = 10$ s a $t = 50$ s

Doby přibližně do jedné minuty se při napájecím proudu $I = 4,0$ A jeví jako zcela nedostatečné a luminiscence se na výsledných snímcích prakticky neprojeví. Nejsou vidět ani hranice samotného testovaného článku a výsledné fotografie jsou tedy pro další práci zcela nepoužitelné.



Obr. 49: Testovaný článek C po dobu $t = 100$ s a $t = 200$ s

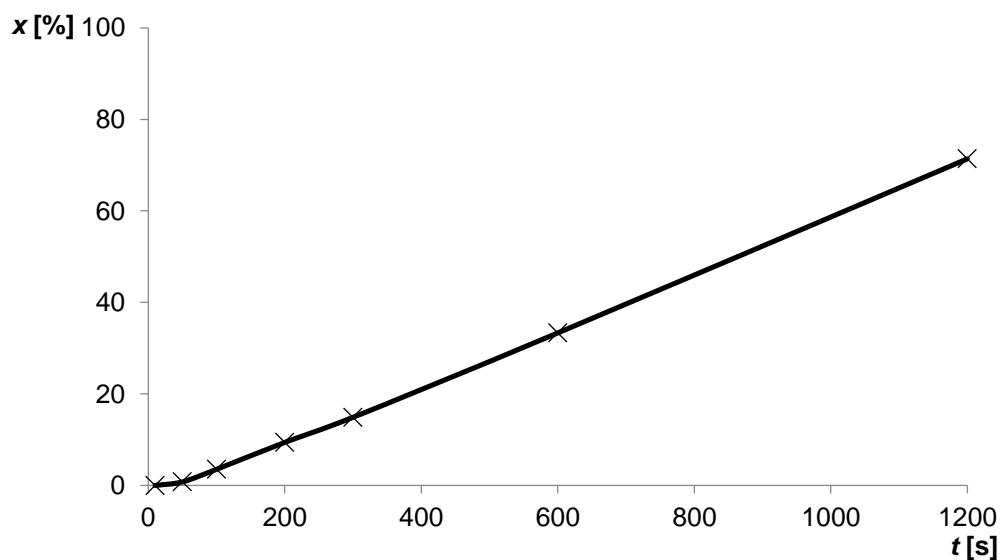
Pro doby $t = 100$ s a $t = 200$ s je již luminiscence zjevně patrná, avšak ani tyto výsledky nestačí pro přesnější určení defektů jednotlivých článků. Na těchto fotografiích je patrný pouze samotný článek, defekty u něho patrné nejsou.

Testováním se potvrdil původní předpoklad, že pro tento způsob měření defektů fotovoltaických článků je potřeba poměrně dlouhá doba snímání článků. Při neustálém prodlužování této doby bylo dosahováno stále lepších výsledků.



Obr. 50: Testovaný článek C po dobu $t = 300$ s, $t = 600$ s a $t = 1200$ s

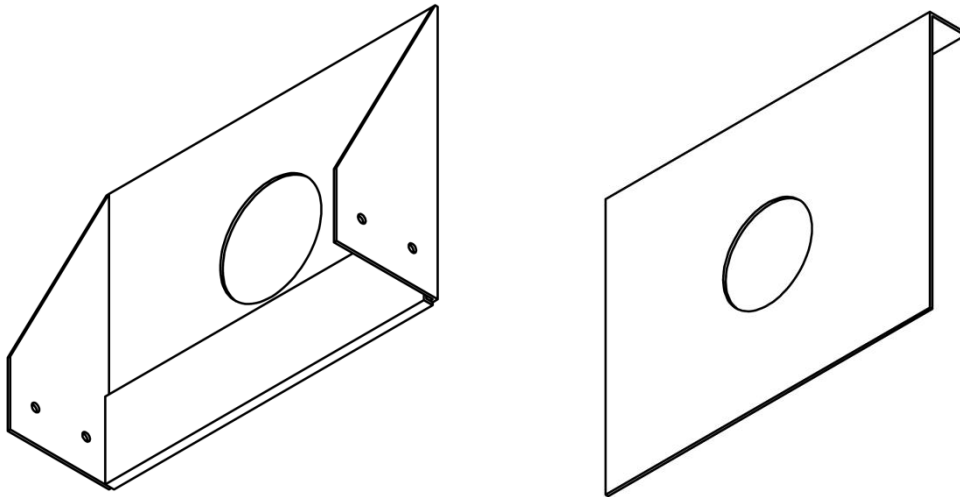
Výše popsané snímky byly opět analyzovány v balíku Adobe Photoshop CS6 metodou hrubého sjednocení odstínů černé pomocí filtru typu medián a následném zjišťování odstínu v nejsvětlejším místě. Tím byla zjištěna závislost sytosti výsledných snímků na změně doby snímání. Tato závislost je ve zjišťovaném úseku prakticky lineární a lze z ní tedy vyvodit vhodnost použití ještě delších dob snímání článku.



Obr. 51: Závislost sytosti výsledných snímků na změně doby snímání

3.4. Návrh posuvného nosníku kamery

Další inovací měřicího pracoviště byl návrh a výroba posuvného nosníku kamery. Tento nosník se skládá ze dvou nezávislých částí, které jsou navzájem spojeny šroubem. Šroub zajišťuje posouvání části držící kameru. Spodní část je pevně spojena s ostatními součástmi měřicího pracoviště.



Obr. 52: Nákresy dvou dílů posuvného nosníku kamery

Návrh nosníku probíhal v prostředí programového balíku SolidWorks 2014, ze kterého byly poté generovány výkresy. Nosník je vyroben z hliníkového plechu o tloušťce 2 mm. Jeho povrch nebyl nijak upravován.

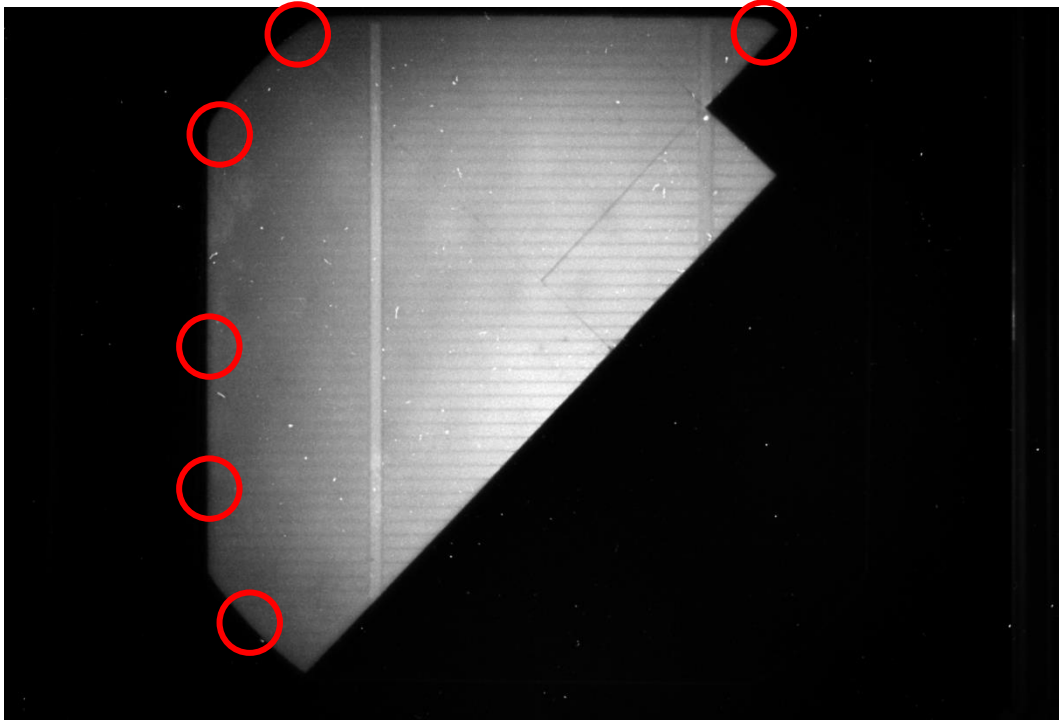


Obr. 53: Vyrobený posuvný nosník kamery

3.5. Analýza vybraných výsledků

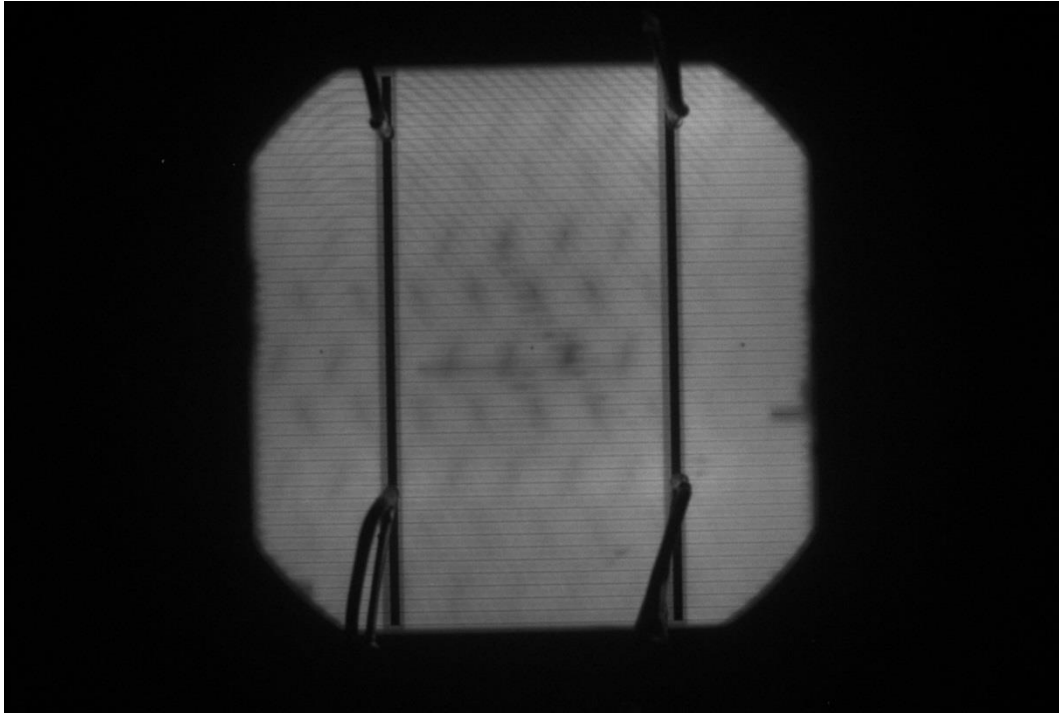
Na základě výše popsaných skutečností bylo další testování prováděno při napájecím proudu $I = 4,0 \text{ A}$ (odpovídá přibližně $v = 3800 \text{ ot.min}^{-1}$) a po dobu $t = 3600 \text{ s}$. Na výsledných snímcích tří testovaných článků již je možné detekovat jednotlivé defekty.

Na prvním testovaném článku (A) lze vidět síť tmavších míst, která pravděpodobně vznikla při samotné výrobě tohoto článku difuzí kovového materiálu z podložky, na které články postupují výrobou. U okrajů článku je vlivem nedokonalého broušení patrná zvýšená nezářivá rekombinace volných nosičů náboje. Nosiče náboje difundují k hranám, kde nezářivě rekombinují. To se projevuje tmavšími místy.



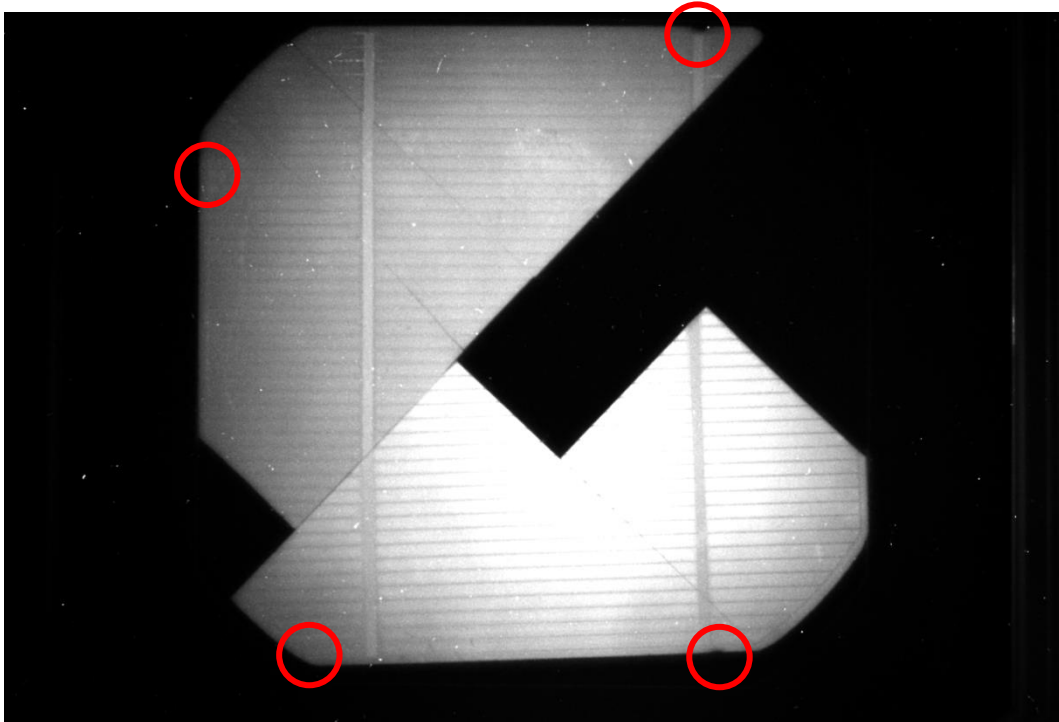
Obr. 54: Článek A testovaný po dobu $t = 3600 \text{ s}$ při rychlosti $v = 3800 \text{ ot.min}^{-1}$

Srovnání výsledků defektu difuze materiálu z podložky lze provést na obdobném článku (stejná série) testovaném metodou elektroluminiscence. Při tomto měření je síť tmavších míst více patrná. V době měření metodou fotoluminiscence byl tento článek již ale zcela zničen a nemohl tak být použitý pro přímé srovnání.



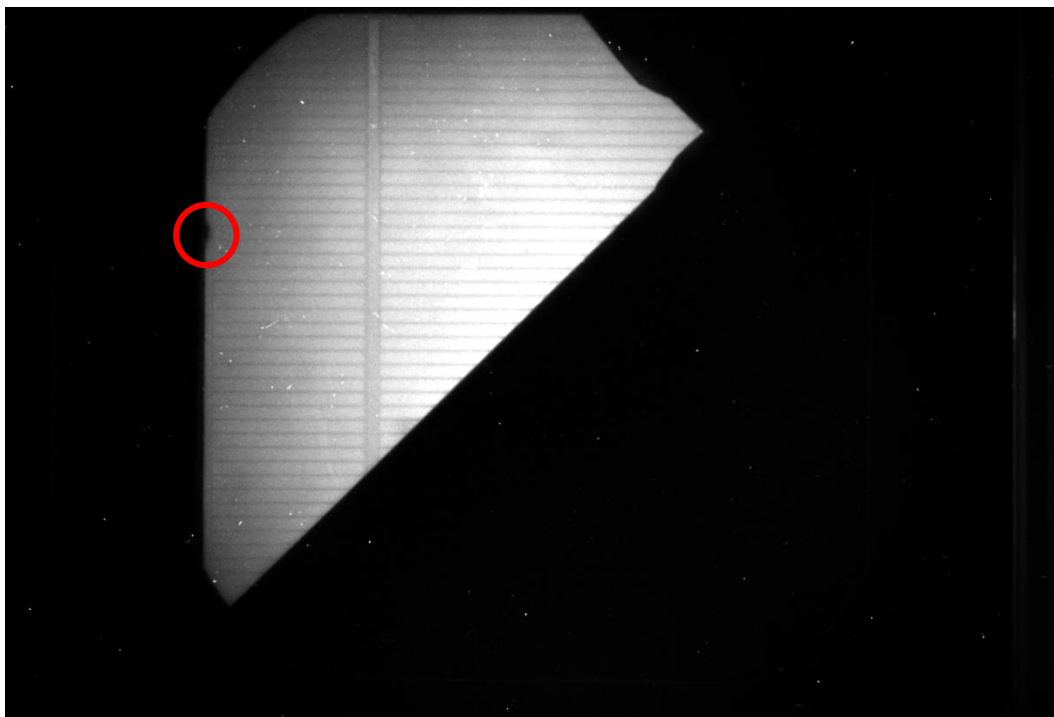
Obr. 55: Defekt difuze materiálu podložky metodou elektroluminiscence

Na dalším testovaném článku (B) jsou na hranách opět vidět chyby v broušení, čímž dochází ke zvýšené nezářivé rekombinaci volných nosičů náboje a ke vzniku tmavých míst.



Obr. 56: Článek B testovaný po dobu $t = 3600\text{s}$ při rychlosti $v = 3800\text{ ot.min}^{-1}$

Na posledním testovaném článku je vidět místo, kde pravděpodobně došlo k difuzi kovu z místa uchycení článku při výrobě. Současně je opět vidět i síť tmavších míst vzniklá difuzí kovového materiálu z podložky.



Obr. 57: Článek C testovaný po dobu $t = 3600\text{s}$ při rychlosti $v = 3800 \text{ ot. min}^{-1}$

U všech testovaných článků je vidět lepší prozáření středu článku a horší u okrajů. Tato skutečnost může být způsobena nerovnoměrným osvětlením nebo difuzí materiálu ze zadní strany fotovoltaického článku. Osvětlení článku je předpokládáno rovnoměrné.

4. Závěr

Tato diplomová práce poukazuje na možnosti detekce poruch fotovoltaických článků. Poukázal jsem v ní na nejednoduchost procesu výroby těchto článků. Z tohoto důvodu je nutné provádět diagnostiku poruch již během výroby, po výrobě i při samotném provozu článků. Jako perspektivní do budoucna se jeví možnosti, které využívají luminiscenci materiálu, především pak metoda elektroluminiscence a metoda fotoluminiscence. Hlavním rozdílem mezi těmito metodami je druh použitého buzení článku. Jednodušším případem je elektroluminiscence, při které je článek napájen zdrojem napětí (proudu). Složitější je fotoluminiscence, při které článek osvětlujeme specifickým zářením, které ovšem z výsledných snímků musíme odfiltrovat.

V případě této práce bylo k odfiltrování zmíněného záření použito dvojice infračervených filtrů umístěných na objektivu CCD kamery a v jejím těle a speciálně navržené clony s optickou závorou, která spínala osvětlení článku při zakrytém objektivu a vypínala je při odkrytém objektivu. Tento způsob byl praktickým měřením na křemíkových článcích otestován a jeví se jako funkční. Inovace současného měřicího pracoviště spočívala v návrhu nové funkční clony, která je schopna pracovat při nižších otáčkách a dosahovat tak lepších výsledků. Také byl navržen a vyroben posuvný nosník CCD kamery s uchycením na jeden stojan společný pro tento nosník a nosník motoru.

Všechna měření byla prováděna v zatemněné místnosti. Lepší řešení by bylo navrhnout a vyrobit pro všechny hlavní části pracoviště temnou komoru. Největším problémem námi testovaných článků byla velmi krátká doba života nosičů náboje. To je způsobeno především značným stářím článků. Na novějších článcích byly již výsledky interpretovatelné a byly na nich diagnostikovány jednotlivé defekty.

Metody elektroluminiscence i fotoluminiscence jsou moderní a poměrně nové metody a jsou tedy i nadále součástí výzkumu. Tyto metody jsou průmyslem velmi vítané, protože zajišťují rychlou a poměrně přesnou detekci velkého množství poruch fotovoltaických článků. V kombinaci s měřením elektrických parametrů vytváří celkovou diagnostiku fotovoltaických článků, příp. celých panelů.

Seznam literatury

- [1] Sharp vyvinul koncentrátorový solární článek s nejvyšší účinností konverze na světě: 43,5 procent. *Sharp* [online]. [cit. 2013-12-10]. Dostupné z: <http://www.sharp.cz/cps/rde/xchg/cz/hs.xsl/-/html/sharp-vyvinul-koncentratorovy-solarni-clanek-s-nejvyssi-ucinnosti-konverze-na-sv.htm>
- [2] Z historie fotovoltaiky. *Czechsolar, spol. s r.o.* [online]. [cit. 2013-10-20]. Dostupné z: <http://www.czechsolar.cz/fotovoltaika/z-historie-fotovoltaiky>
- [3] Global solar PV installed capacity crosses 100GW mark. *Renew India Campaign* [online]. [cit. 2014-03-18]. Dostupné z: <http://www.renewindians.com/2013/02/global-solar-pv-installed-capacity-crosses-100GW-Mark.html>
- [4] Fotoelektrický jev. Západočeská univerzita v Plzni: Fakulta pedagogická [online]. [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: <http://www.kof.zcu.cz/st/dp/horsky/html/2fotoel.html>
- [5] REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. Fyzikální podstata přechodu PN. *Encyklopedie fyziky* [online]. [cit. 2013-12-12]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/265-fyzikalni-podstata-prechodu-pn>
- [6] POULEK, Vladislav a Martin LIBRA. Konstrukce a výroba fotovoltaických článků a panelů. *Elektro: časopis pro elektrotechniku*. 2010, roč. 2010, č. 3, 6 - 9.
- [7] All JingAo Solar Co. products. *JA solar* [online]. [cit. 2013-10-23]. Dostupné z: <http://www.directindustry.com/prod/jingao-solar-co-54394.html>
- [8] PV Solar Modules – Laminates. *Alphatron* [online]. [cit. 2013-10-24]. Dostupné z: http://alphatrononline.com/PV_Laminates.cfm
- [9] JANDOVÁ, Kristýna. *Diagnostické metody plošného rozložení defektů solárních článků*. Brno, 2008. Doktorská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [10] VANĚK, Jiří, Petr KŘIVÍK a Vítězslav NOVÁK. *Alternativní zdroje energie*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2006.
- [11] VALA, Zbyněk. *Fotoluminiscenční metody detekce defektů solárních článků*. Brno, 2009. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce doc. Ing. Jiří Vaněk, Ph.D.
- [12] Diagnostické metody fotovoltaických článků. *ASB*. [online]. [cit. 2013-10-27]. Dostupné z: <http://www.asb-portal.cz/diagnosticke-metody-fotovoltaickych-clanku/galeria/2100/14349>

- [13] BAURA, Tomáš. *Analyza fotovoltaických článků pomocí fotoluminiscence*. Brno, 2012. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [14] BRADOVÁ, Barbora. *Luminiscence ve výtvarné výchově* [online]. České Budějovice, 2011 [cit. 2014-03-27]. Dostupné z: http://theses.cz/id/9pr8l8/Luminiscence_ve_VV-DP_s_plohami.pdf. Diplomová práce. Jihočeská univerzita.
- [15] Principy fluorescenční spektroskopie. *Univerzita Karlova* [online]. [cit. 2014-03-27]. Dostupné z: <http://psych.lf1.cuni.cz/fluorescence/soubory/principy.htm>
- [16] CCD kamery pro astronomii. *Moravské přístroje* [online]. [cit. 2014-05-16]. Dostupné z: <http://www.gxccd.com/art?id=321&lang=405>

Seznam symbolů

Symbol	Jednotka	Název veličiny
A_c	m^2	plocha fotovoltaického článku
e	C	elementární náboj
E	$W.m^{-1}$, lx	intenzita osvětlení
E_f	J	energie fotonu
f	s^{-1}	frekvence záření
f_m	s^{-1}	minimální frekvence dopadajícího záření
FF	-	činitel plnění
g	$m^{-3}s^{-1}$	rychlost generace nosičů náboje
h	J.s	Planckova konstanta
I	A	proud
I_m	A	proud článkem při maximálním výkonu
I_S	A	proud procházející přechodem PN
I_{SC}	A	proud nakrátko
K	$J.K^{-1}$	Boltzmanova konstanta
L_n	M	difuzní délka elektronu
L_p	m	difuzní délka díry
m	kg	hmotnost elektronu
P_{in}	W	výkon dopadajícího záření
P_m	W	maximální výkon článku
R_{SH}	Ω	paralelní odpor článku
R_{SO}	Ω	sériový odpor článku
R_m	Ω	vnitřní odpor článku při maximálním výkonu
S	m^2	plocha
t	s	čas
T	K	teplota
U	V	napětí
U_m	V	napětí na článku při maximálním výkonu
U_{OC}	V	napětí naprázdno
v	$ot.min^{-1}$	rychlost
v_e	$m.s^{-1}$	rychlost elektronu
W_V	J	výstupní práce materiálu (nutná k uvolnění elektronu)
x	%	sytost výsledných fotografií
η	%	účinnost
v	$^{\circ}C$	teplota
φ	%	relativní vlhkost vzduchu

Seznam zkratek

Zkratka	Popis
CCD	zařízení s vázanými náboji (Charge-Coupled Device)
DC	stejnoseměrný proud (Direct Current)
LBIC	indukovaný proud světelným paprskem (Light Beam Inducted Current)
LBIV	indukované napětí světelným paprskem (Light Beam Inducted Voltages)
LBIP	indukovaný výkon světelným paprskem (Light Beam Inducted Power)
LED	světlo emitující dioda (Light Emitting Diode)
MPP	bod na voltampérové charakteristice s maximálním výkonem
PC	osobní počítač (Personal Computer)
PN	přechod polovodiče typu P a polovodiče typu N
PV	fotovoltaický
USB	univerzální sériová sběrnice (Universal Serial Bus)
UV	ultrafialové (Ultra Violet)

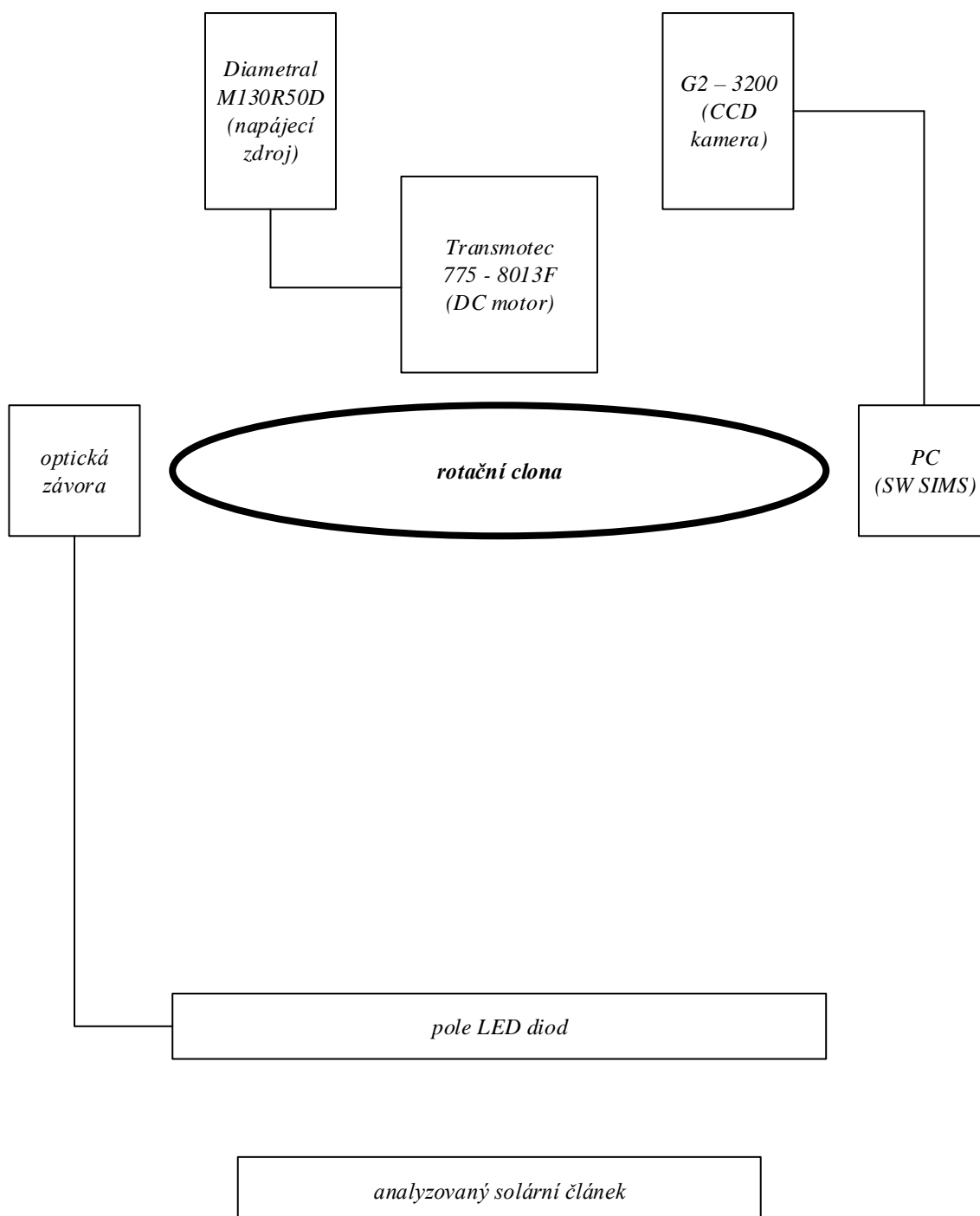
Přílohy

V této části jsou použity materiály a výsledky měření, u kterých nebyl důvod k použití v hlavních částech této práce.

Seznam příloh

- Příloha 1: Blokové schéma měřicího pracoviště metody fotoluminiscence
- Příloha 2: Testování měřicího pracoviště metody fotoluminiscence
- Příloha 3: Návrh posuvného nosníku kamery
- Příloha 4: Výkresová dokumentace pro výrobu posuvného nosníku kamery
- Příloha 5: Výkresová dokumentace pro výrobu clony 3
- Příloha 6: Výkresová dokumentace pro výrobu uchycení nosníků
- Příloha 7: Simulace měřicího pracoviště metody fotoluminiscence
- Příloha 8: Fotodokumentace měřicího pracoviště

Příloha 1: Blokové schéma měřicího pracoviště metody fotoluminiscence



Obr. 58: Blokové schéma měřicího pracoviště metody fotoluminiscence

Příloha 2: Testování měřicího pracoviště metody fotoluminiscence



Obr. 59: Ochranné UV prvky na 100 Kč bankovce ($v = 4000 \text{ ot.min}^{-1}$, $t = 300 \text{ s}$)



Obr. 60: Ochranné UV prvky na 200 Kč bankovce ($v = 4000 \text{ ot.min}^{-1}$, $t = 300 \text{ s}$)

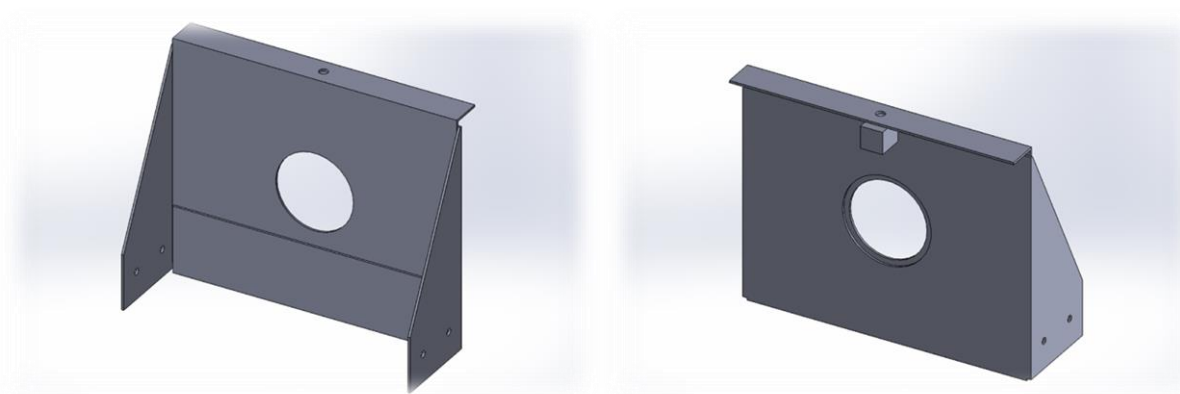


Obr. 61: Ochranné UV prvky na 500 Kč bankovce ($v = 4000 \text{ ot.min}^{-1}$, $t = 300 \text{ s}$)

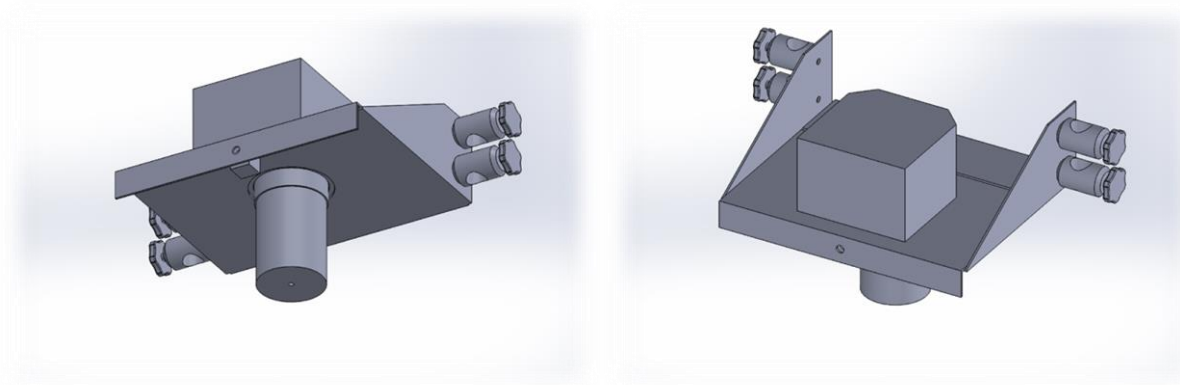


Obr. 62: Ochranné UV prvky na 1000 Kč bankovce ($v = 4000 \text{ ot.min}^{-1}$, $t = 300 \text{ s}$)

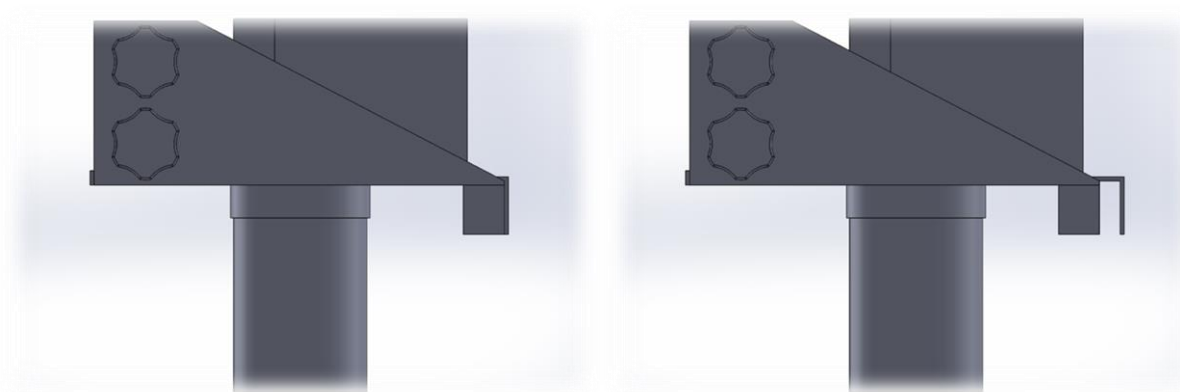
Příloha 3: Návrh posuvného nosníku kamery



Obr. 63: Návrh posuvného nosníku kamery

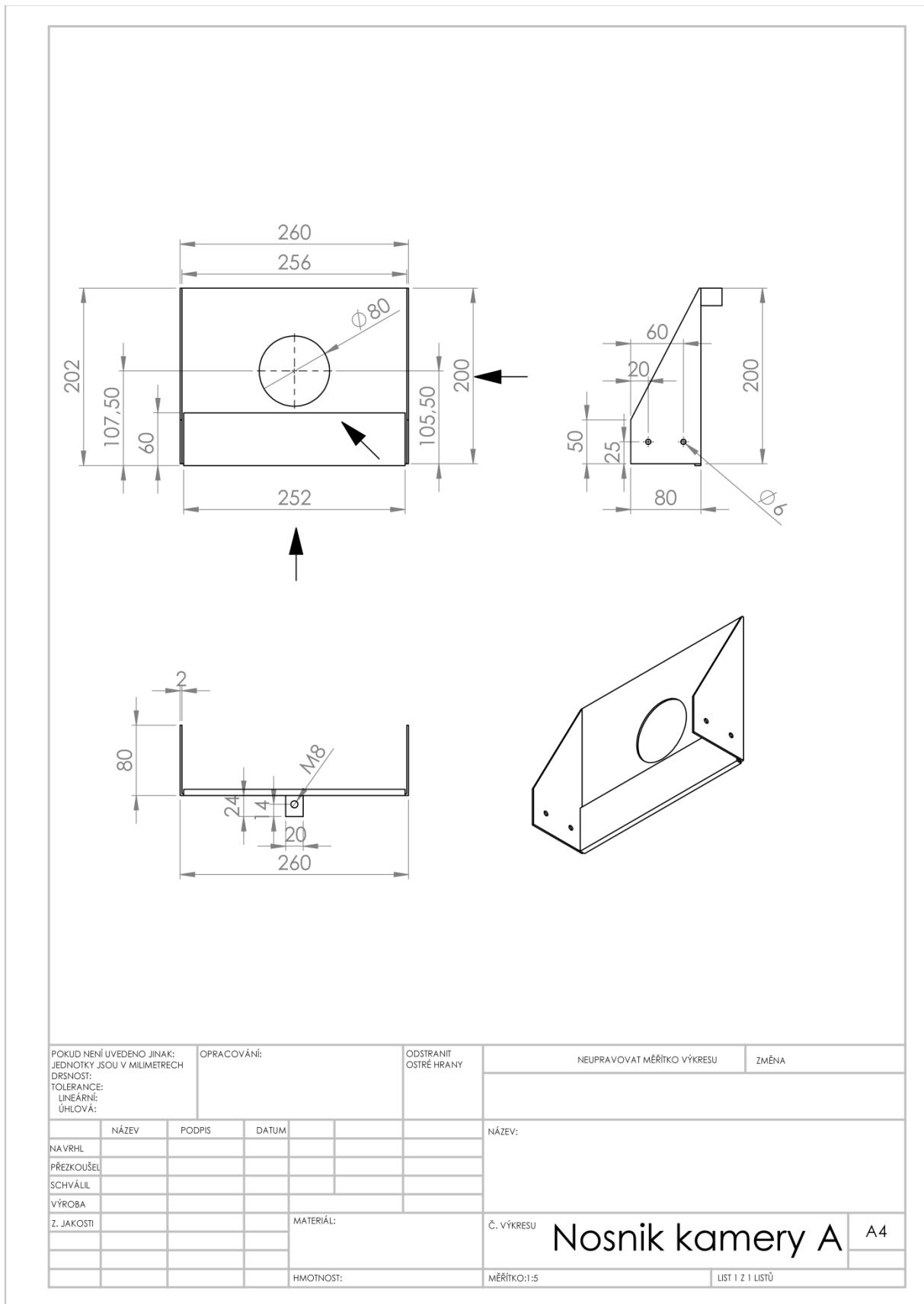


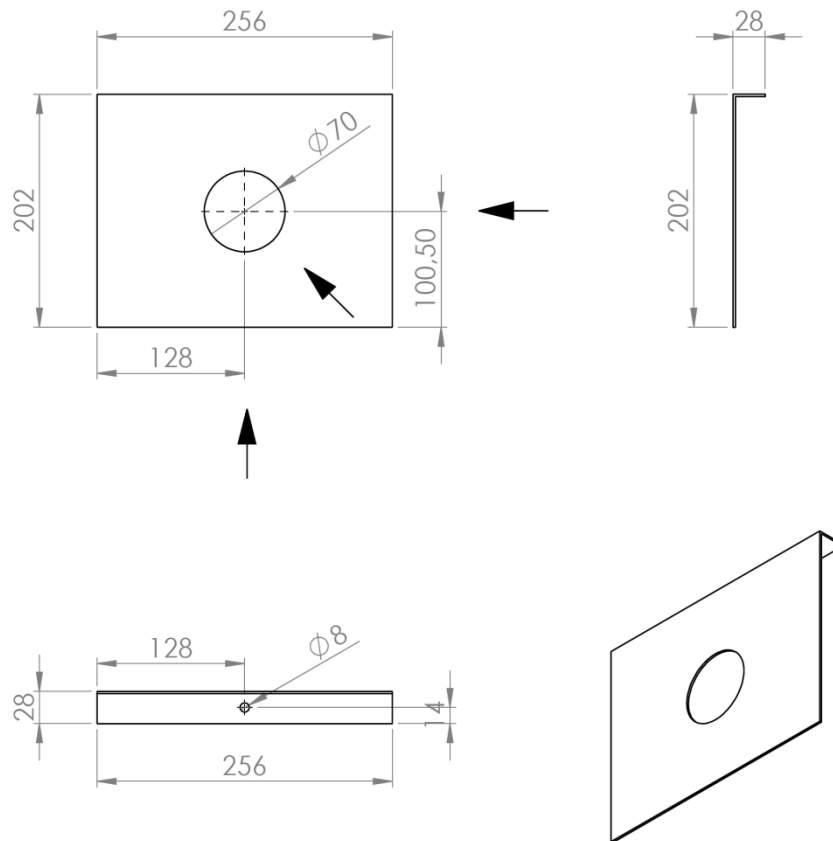
Obr. 64: Návrh posuvného nosníku kamery – pohled s kamerou a úchyty nosníku



Obr. 65: Návrh posuvného nosníku kamery – boční pohled (změna posunutí objektivu)

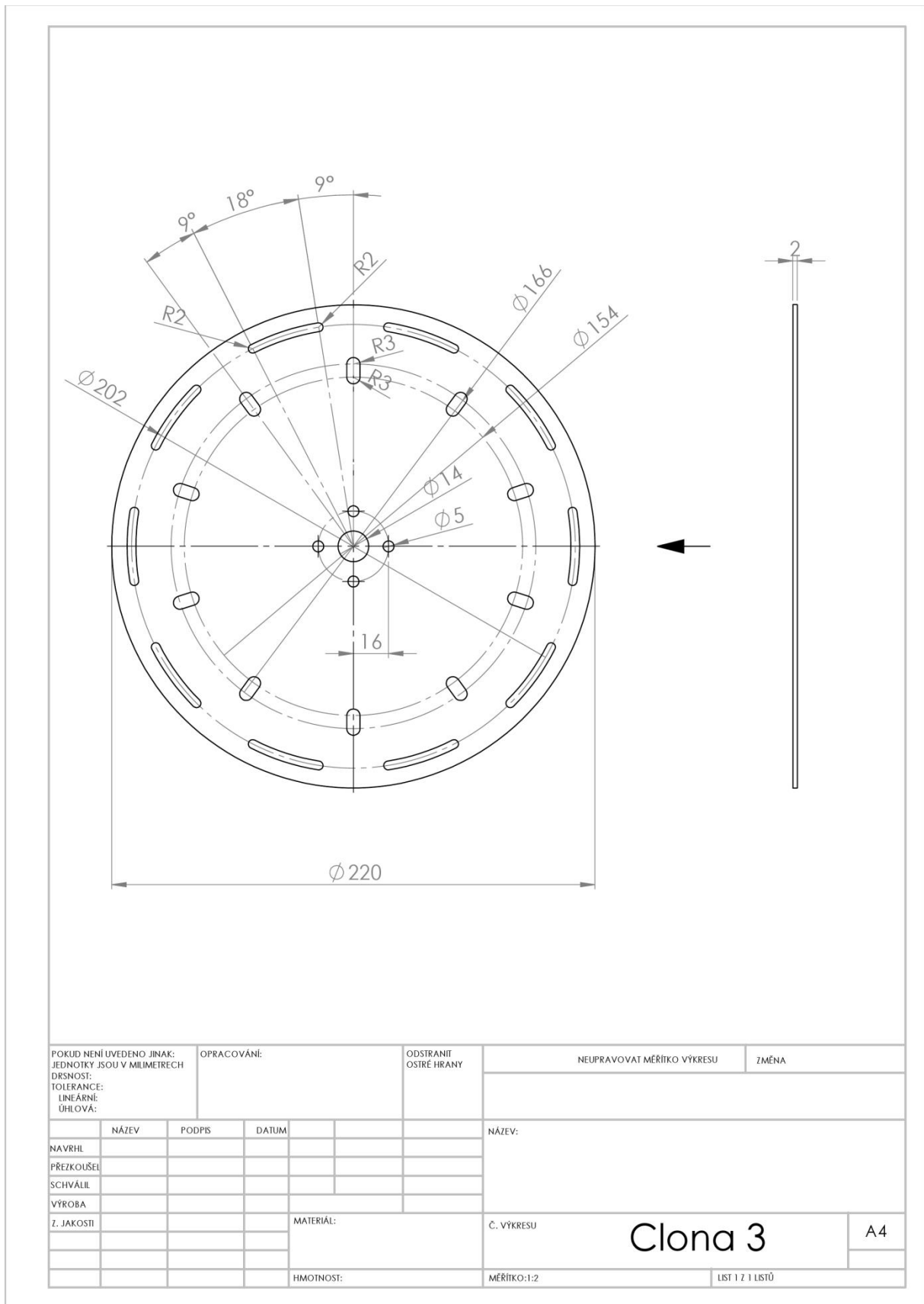
Příloha 4: Výkresová dokumentace pro výrobu posuvného nosníku kamery



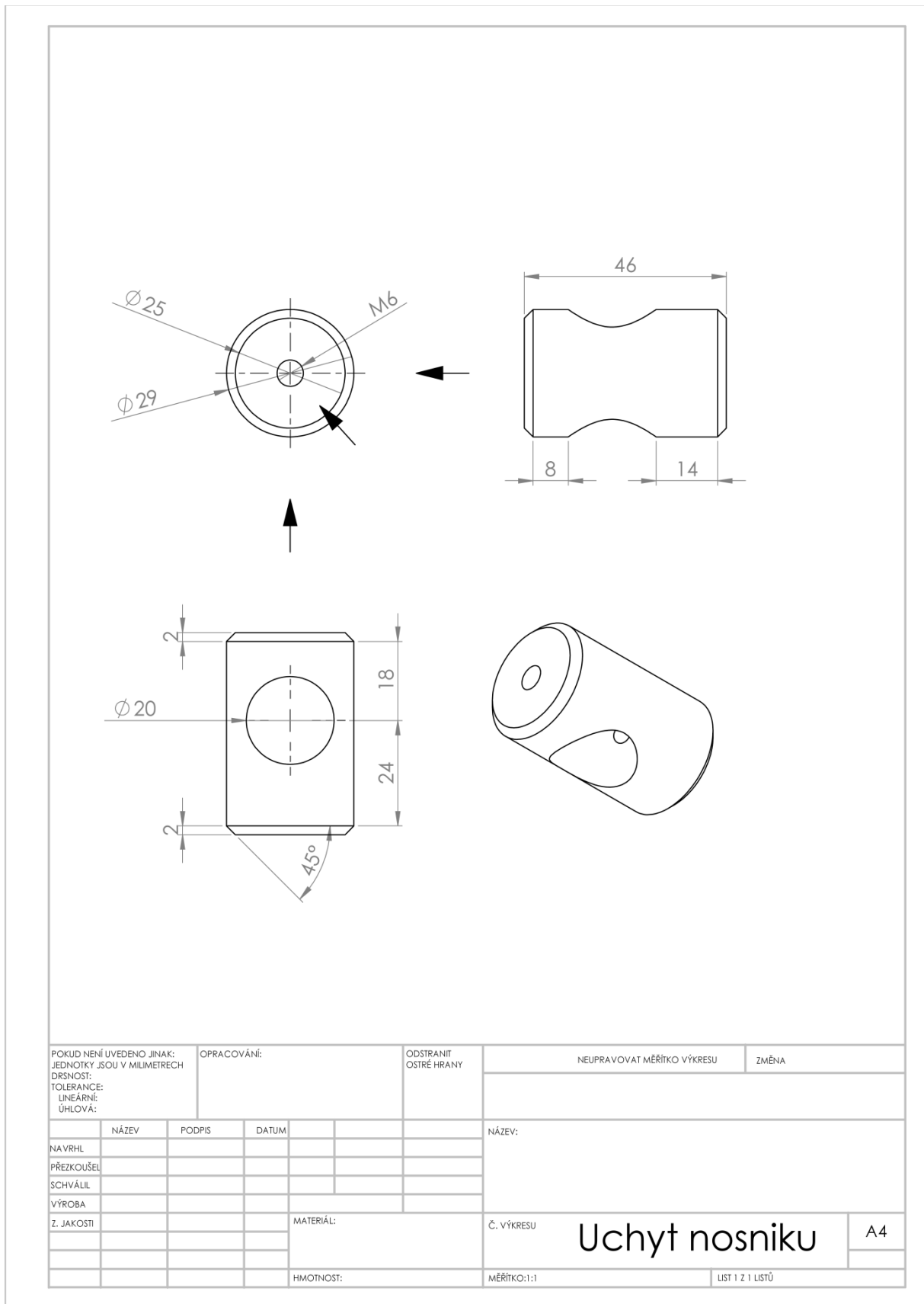


POKUD NEJÍ UVEDENO JINAK: JEDNOTKY JSOU V MILIMETRECH		OPRACOVÁNÍ:		ODSTRANIT OSTŘE HRANY		NEUPRAVOVAT MĚŘÍTKO VÝKRESU		ZMĚNA	
DRSNOST: TOLERANCE: LINEÁRNÍ: ÚHLOVÁ:									
	NÁZEV	PODPIS	DATUM			NÁZEV:			
NAVRHL									
PRŮZKOUŠEL									
SCHVÁLIL									
VÝROBA									
Z. JAKOSTI				MATERIÁL:		Č. VÝKRESU		Nosník kamery B	
						MĚŘÍTKO:1:5		A4	
				HMOTNOST:				LIST 1 Z 1 LISTŮ	

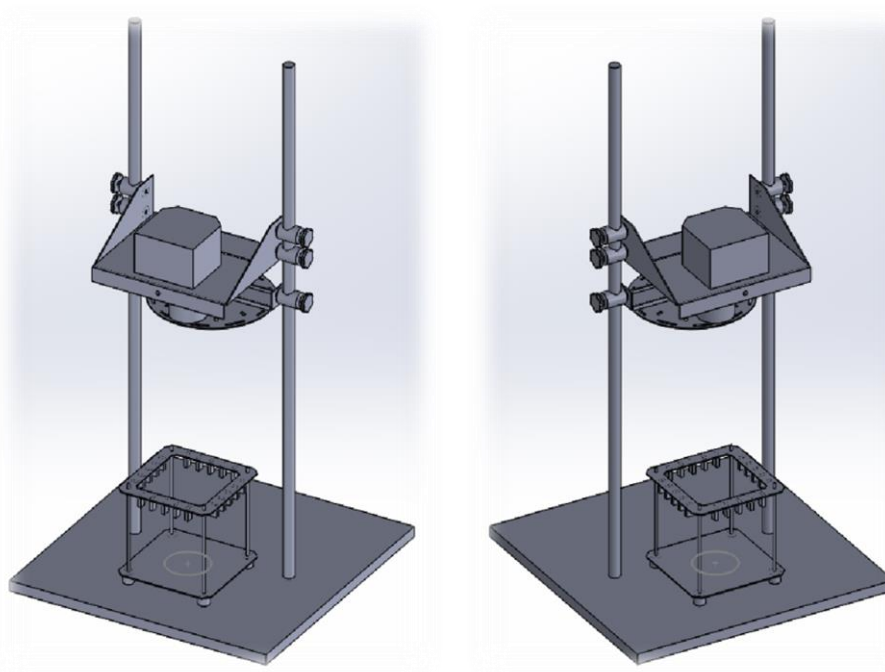
Příloha 5: Výkresová dokumentace pro výrobu clony 3



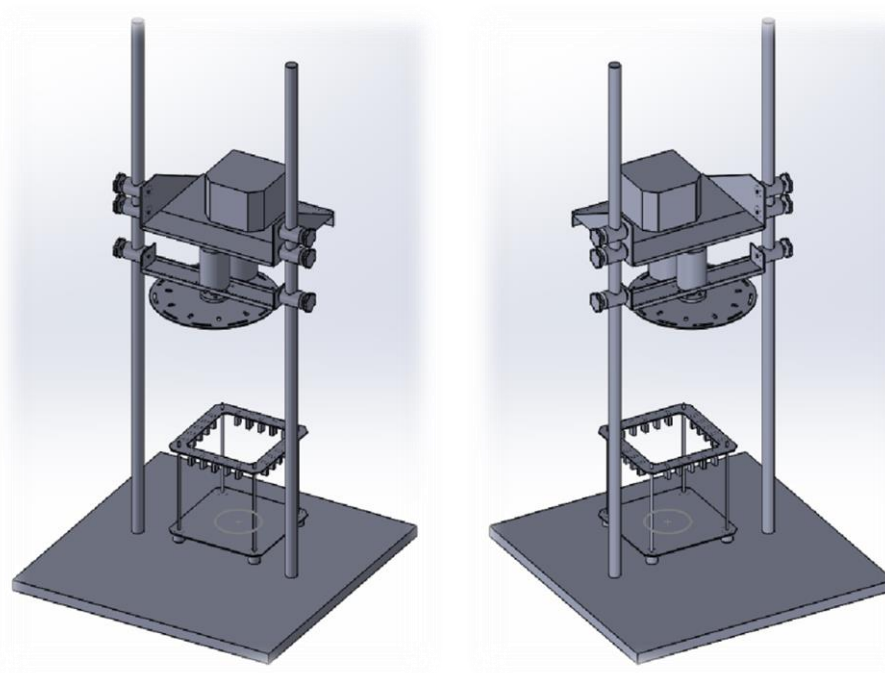
Příloha 6: Výkresová dokumentace pro výrobu uchycení nosníků



Příloha 7: Simulace měřicího pracoviště metody fotoluminiscence



Obr. 66: Simulace měřicího pracoviště – přední pohled

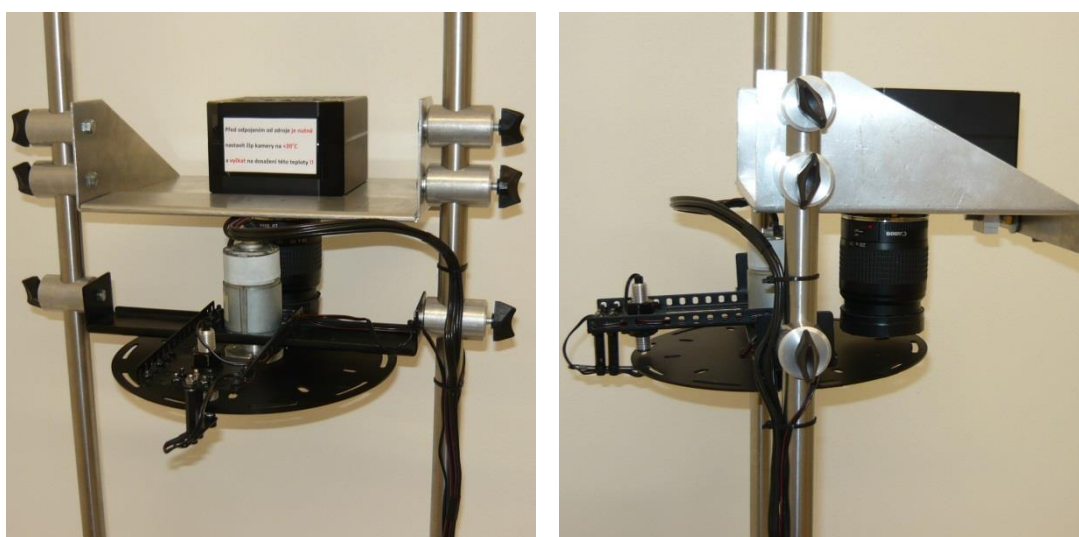


Obr. 67: Simulace měřicího pracoviště – zadní pohled

Příloha 8: Fotodokumentace měřicího pracoviště



Obr. 68: Pohled na obě části měřicího pracoviště



Obr. 69: Nosníky motoru a kamery