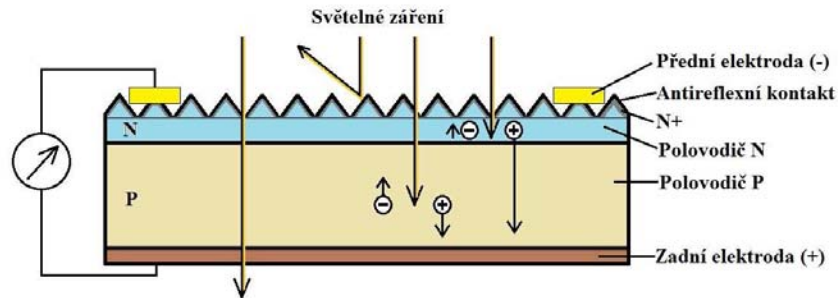


11.11 Vady fotovoltaického modulu

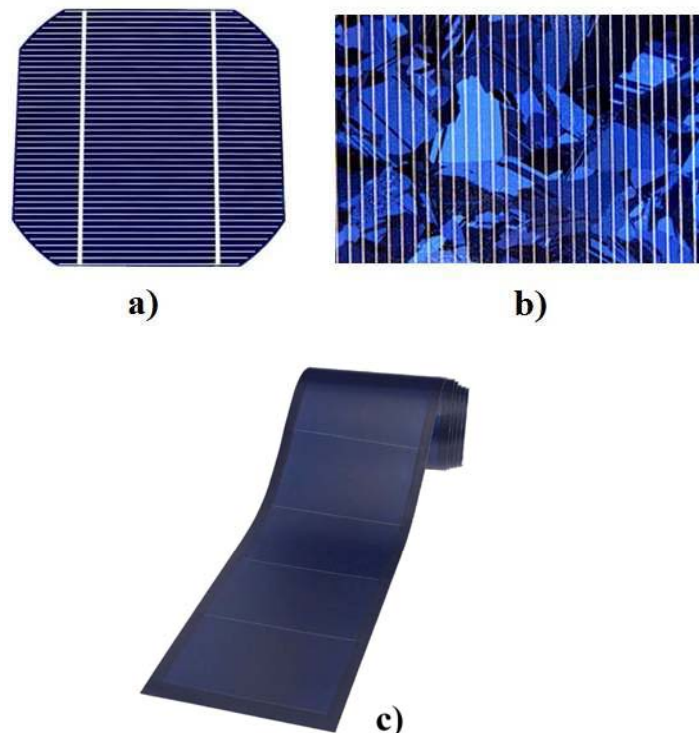
Teorie:

Základem solárních elektrických celků je fotovoltaický článek, což je vlastně velkoplošná fotodioda, jejíž podstatu tvoří polovodičový přechod P-N (viz obr. 1).



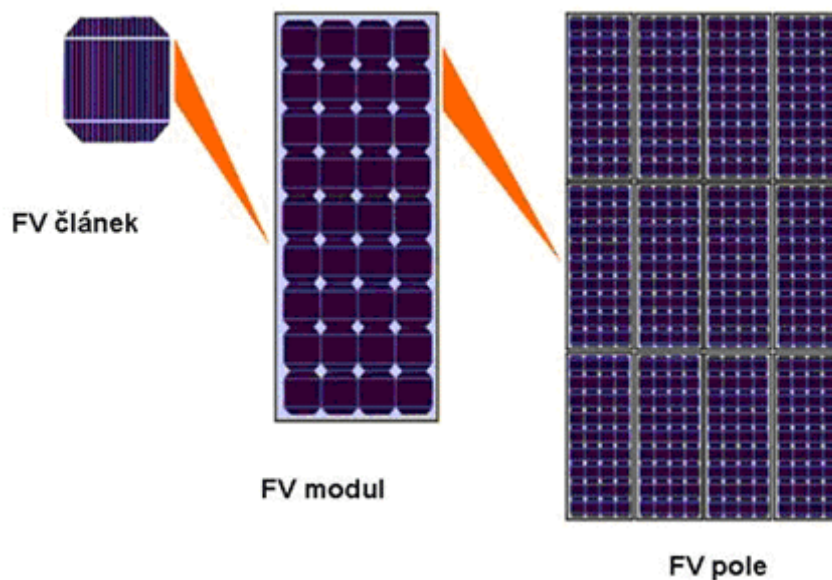
Obr. 1 Schéma velkoplošného přechodu P-N buzeného světelným zářením (náčrt dle [1]).

Výrobním materiálem pro solární články je křemík (Si). Podle struktury a dopování použitého křemíku se vyrábí tři základní druhy článků: monokrystalický (nejúčinnější, ale nejdražší), polykrystalický (méně účinné, ale levnější) a amorfní články (nejméně účinné, ale na rozdíl od ostatních jsou mechanicky ohebné). Ilustrace všech tří druhů článků je vidět na následujícím obrázku 2.



Obr. 2 Fotovoltaické články: a) monokrystalický; b) polykrystalický; c) amorfni (původní ilustrace z [2], citováno v [1]).

Protože jeden fotovoltaický článek dosahuje maximálně 0,5 Voltu a kolem 1.2 Wattu, články se spojují do série, např. po čtyřiceti, čímž se dosáhne 12 Voltů nebo i po osmačtyřiceti, čímž se dosahuje 24 Voltů. Články mohou být kombinovány sérioparalelně, aby se dosáhlo nejen požadovaného napětí, ale také větších elektrických proudů. Takto kombinované články vytvářejí tzv. moduly, které bývají spojovány do polí (panelů) -viz obr. 3.



Obr. 3 Fotovoltaická skladba: článek, modul, pole/panel ((původní ilustrace z [3], citováno v [1])).

Kvalita fotovoltaických zařízení se testuje podle jejich elektrických parametrů a podle materiálového a výrobního provedení (materiálové a výrobní defekty). Elektrické parametry se získávají především z naměřené volt-ampérové charakteristiky a výkonové charakteristiky. Tato měření jsou předmětem jiné laboratorní práce, a proto se o tomto tématu nebudeme více šířit. Zaměříme se na materiálové a výrobní defekty.

Existuje více metod pro posouzení defektů. Jednou z nich je metoda **LBIC** (Light Beam Induced Current). Používá laserový paprsek, který se posouvá po modulu, měří se vyvolaný proud, a tak vznikají XY proudové mapy, ze kterých lze vyvodit problematická místa modulu. Metoda je časově náročná. Další z používaných metod je **elektroluminiscenční metoda**, při které se modul napájí v propustném směru a infračervenou kamerou se snímá infračervený obraz modulu. Na něm jsou viditelné defekty podle zbarvení a různých odstínů. Další metodou je metoda založená na **fotoluminiscenci**. Při ní se modul nebudí elektricky, ale světelně a snímací kamera má filtr, který propouští pouze infračervené záření. Opět vzniká infračervený obraz modulu, ze kterého se dedukují defekty. Další metoda je založena na **mikroplazmatické luminiscenci**, která vyžaduje elektrické buzení modulu v závěrném směru. Se zvyšujícím se napětím vznikají plazmatické mikrovýboje (analogie k částečným výbojům v izolačních systémech) doprovázené světelnými záblesky, které lze opět snímat digitální kamerou. Komerční testy se provádí pomocí tzv. **solárních simulátorů** (kontinuální, zábleskové a impulsní). Solární simulátory nahrazují sluneční záření při laboratorních testech.

Je třeba připomenout, že výsledné obrazy defektů se liší podle toho, o jaký typ modulu se jedná. Defekty u monokrystalických modulů bývají často ve tvaru soustředných kružnic (vírový defekt), což je známkou výrobní vady. Další výrobní vadou je pnutí v krystalové mřížce křemíkového článku apod.

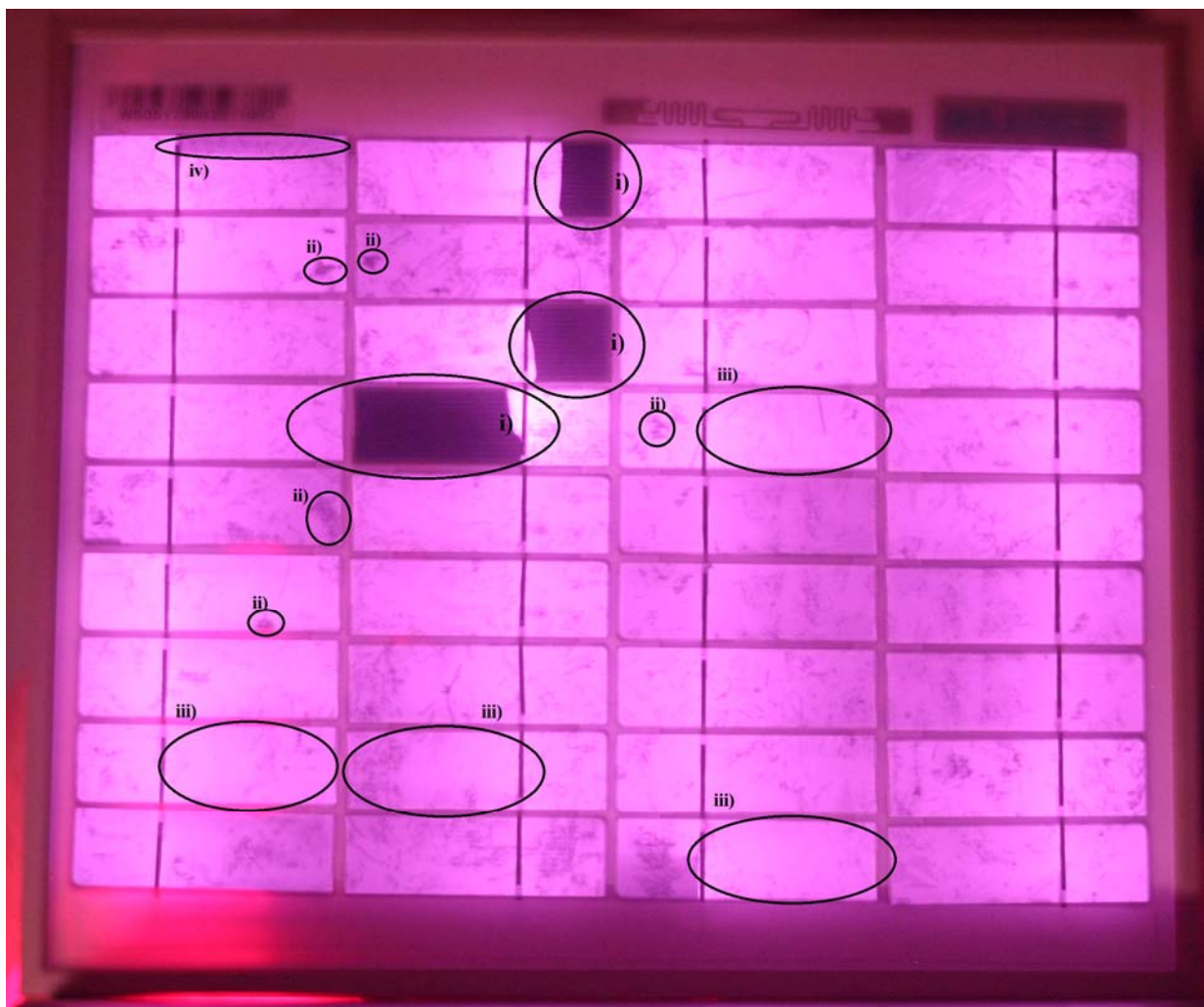
V této laboratorní práci ***budeme testovat polykrystalický modul***, takže se soustředíme na některé možné druhy defektů, které lze pozorovat u polykrystalických modulů. Jsou to především následující anomálie (viz obr. 4):

(i) Zcela černé plošky - neaktivní, mrtvé oblasti (přerušené kontakty). Např. tři černé plošky na následujícím obr. 4). *Tato vada snižuje výkon i životnost.*

(ii) Nakupení růžových bodů - zviditelněné hranice Si zrn (jen u polykrystalických modulů). Jsou viditelné na obr. 4). *Tato vada významně nesnižuje výkon ani životnost.*

(iii) Oblasti rozdílných kontrastů (růžové oblasti přecházející ve zcela bílé oblasti) - zobrazení rozdílných proudových hustot. Jde o nedokonalý difúzní výrobní proces – viz obr. 4). *Tato vada snižuje výkon i životnost.*

(iv) Spojitý růžový pruh vlevo nahoře (druhý článek zleva v první řadě) u fotovoltaického modulu – viz obr. 4). Jde o výrobní vadu. *Tato vada snižuje výkon i životnost.*



Obr. 4 Elektroluminiscenční snímek fotovoltaického modulu.

Cíle laboratorní práce:

- a) Pořídíte elektroluminiscenční metodou dva záložní snímky solárního modulu WS-10/12V indického výrobce Waaree [4] a zjistíte všechny materiálové vady, které se na modulu vyskytují.
- b) U každého typu materiálové vady zjistíte jaký je její **procentuální plošný podíl** vzhledem k celkové ploše modulu.

Složení aparatury:

Modul je umístěn u dna světlotěsné dřevěné skříňky a je napájen externím zdrojem, který budí u modulu elektroluminiscenční záření. V horní části skříňky je připevněn fotoaparát zn. Canon, u kterého byl odstraněn ***vnitřní*** infračervený (IR) filtr, aby nebylo potlačováno infračervené záření modulu. Navíc je na objektivu fotoaparátu nasazen ***vnější*** filtr, který naopak propouští pouze infračervené záření a potlačuje viditelné záření. Fotoaparát se tak změnil na infračervený detektor. Experiment probíhá ve tmě utěsněné skříňky, aby se co nejvíce eliminovalo rušivé viditelné záření.

Postup:

Na fotoaparátu jsou nastavené doporučené hodnoty, expozice probíhá v rozmezí osmi až třinácti sekund.

- 1) Zapněte počítač a zůstaňte na základní pracovní ploše.
- 2) Zapněte napájení modulu (velká plechová skříňka).
- 3) Fotoaparát Canon EOS 40D (nebo EOS 1300D) připojte k napájecímu zdroji.
- 4) Po zapnutí napájení fotoaparátu se na obrazovce počítače automaticky otevře okno ovládacího programu EOS Utility. V nabídce poklepejte na možnost "Remote Shooting" (resp. "Remote control" podle odlišné verze softwaru).
- 5) Otevře se nové okno (EOS 1300D resp. EOS 40D podle typu fotoaparátu), ve kterém jsou zobrazeny nastavené parametry (čas, clona, citlivost ISO ap.). Nic neměňte, vše je nastavené správně. V tomto okně levým knoflíkem myši stisknete velký kulatý knoflík v horním pravém rohu okna, čímž zahájíte expozici. Nasnímejte dva záložní obrázky.
- 6) Obrázky se automaticky uloží do počítače do adresáře "Obrázky" buď přímo nebo do jeho podadresáře, který bude nazván "aktuálním" kalendářním datem. Současně s expozicí se otevře automaticky editační program "Digital Photo Professional....", který uzavřete, není potřeba.
- 7) Exponované snímky si přepošlete e-mailem do své schránky a vzniklý podadresář s exponovanými snímky z počítače vymažte.
- 8) Po ukončení práce vypněte hlavní napájecí zdroj modulu (plechová skříňka), dále vypněte napájení fotoaparátu a nakonec vypněte počítač.

Vypracování protokolu:

- 1) V protokolu budou 4 kopie pořízeného snímku a u každé kopie bude podrobný rozpis procentuálního plošného zastoupení daného typu materiálové vady, a to v podobě excelovské matice. Snímek modulu má 36 malých čtverců, které se nachází ve 4 sloupcích a 9 řádcích. Modul snímku má rovněž 36 velkých obdélníků, které se nachází také ve 4 sloupcích a 9 řádcích, takže excelovská matice bude mít 9 řádků a 8 sloupců, aby kopírovala formát pořízeného snímku. Předpokládáme, že ploška malého čtverce S_M je rovna polovině plošky většího obdélníku S_V

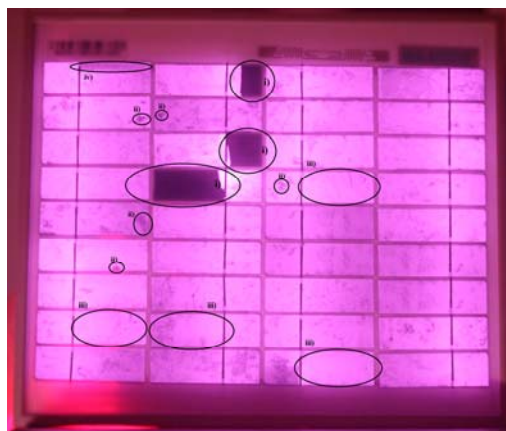
$$S_M = \frac{1}{2} S_V \quad (1)$$

Excelovská matice bude mít tedy stejný počet buněk rozmístěných ve stejném formátu, jako čtverečky a obdélníky na pořízeném snímku. Do buněk této excelovské matice zapisujete svůj procentuální **odhad** plochy, kterou zabírá daný typ vady v daném čtverečku nebo obdélníku. Celkový **procentuální podíl plošného rozsahu dané vady vzhledem k celkové ploše modulu** je možno v rámci excelu naprogramovat podle následujícího vzorce:

$$R = \frac{1}{54} \left[\frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^{36} p_{M_i} + \sum_{i=1}^{36} p_{V_i} \right] \% \quad (2)$$

kde p_{M_i} a p_{V_i} jsou procentuální podíly dané vady v daném i -tém malém čtverečku (p_{M_i}) a ve velkém obdélníku (p_{V_i}).

Jako příklad uvádíme rozbor vady i) – černé plošky:



Malý	Velký	Velký	Malý	Malý	Velký	Velký	Malý
0	0	0	60	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	95	0	0	0	0
0	0	90	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
Součet 0	0	90	155	0	0	0	0

R=3,10%

- 2) Do protokolu uveďte odvození vzorce (2).
- 3) K výpočtu procentuálního plošného rozsahu **chyby i) – černé plošky** - přidejte navíc výpočet, jak ovlivní tato chyba výkon modulu. Lze postupovat takto: jestliže celkovou plochu všech černých (neaktivních) plošek označíme jako S_{\min} a plochu celého modulu S_{\max} , pak procentuální podíl činí $R = 100 \times S_{\min} / S_{\max}$ (%). Za předpokladu, že výkon modulu je přímo úměrný ploše modulu, tj. $P_{el} = k \cdot S_{\max}$, pak snížení aktivní plochy povede k procentnímu snížení účinnosti modulu na hodnotu η (%). Výrobce předpokládá ideální účinnost $\eta_{\max} = 9,52$ %. Účinnost je dána poměrem elektrického výkonu modulu P_{el} a příkonu od slunečního záření P_{sl} dopadajícího na modul, tj.

$$\eta = \frac{P_{el}}{P_{sl}} \cdot 100 \% :$$

$$\eta(\%) = \frac{k \cdot (S_{\max} - S_{\min})}{P_{sl}} \cdot 100 = \frac{k \cdot S_{\max}}{P_{sl}} \cdot \left(1 - \frac{S_{\min}}{S_{\max}}\right) \cdot 100 \% = 9,52 \cdot \left(1 - \frac{S_{\min}}{S_{\max}}\right) = 9,52 \cdot \left(1 - \frac{R}{100}\right)$$

$$\eta(\%) = 9,52 \cdot \left(1 - \frac{R}{100}\right) \quad (3)$$

Vzorec (3) použijte pro výpočet sníženého výkonu následkem černých (neaktivních) plošek. Hodnotu R získáte po zpracování excelovské matice.

- 4) **Plochu vad ii)** určujte jen u nakupení bodů s výrazným zarudnutím.
- 5) **Plochu vad iii)** určujte po celých čtvercích nebo celých obdélnících a opět jen případy velmi kontrastní (kontrastní přechod růžová versus bílá).
- 6) Pokud se zobrazí **vada iv)**, oceňujte ji podobně, jako tomu bylo u černých plošek (bez výpočtu η (%)).
- 7) V závěru protokolu uveďte přehled procentuálních podílů zjištěných vad, diskutujte jejich závažnost a vyjádřete se k celkové kvalitě použitého modulu.

Vhledem k tomu, že je vyhodnocování plošných podílů založeno na subjektivním posuzování, je nutno počítat s tím, že se výsledky v protokolech od různých autorů budou od sebe lišit. Přesto ale úloha takto postavená bude plnit svůj účel, neboť každý autor se bude nucen podrobně zabývat každým typem chyby, což by u pouhého odevzdání nafoceného a neanalyzovaného snímku chybělo.

Námět pro pokročilé programátory v oblasti grafiky:

Oceňování plošných podílů jednotlivých vad z elektroluminiscenčního snímku lze udělat daleko přesněji, použijeme-li místo subjektivního odhadu plošky, které nabízí přímo pixelový rastr snímku. Nejdříve je ovšem třeba identifikovat v rastru zasažené oblasti danou chybou, pak spočítat počet všech pixelů takto zasažených, podělit je počtem pixelů celé plochy modulu a vynásobit stem, čímž dostaneme hodnotu R (%). Pak by bylo možné **srovnat obě hodnoty R (%), tj. výsledky ze subjektivních odhadů, které jsou povinné, a z pixelové analýzy, která je dobrovolná.** Troufne si na to někdo, třeba i s využitím komerčního programu? Vyučující v laboratořích by to měli patřičně ocenit v bodovém hodnocení.