

## A1M13EZF

### POROVNÁNÍ V-A CHARAKTERISTIK RŮZNÝCH TYPŮ FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ

---

#### Zadání:

1. Změřte voltampérové charakteristiky přiložených fotovoltaických článků a určete jejich typ.
2. Pro každý článek určete parametry  $I_{SC}$ ,  $U_{OC}$ ,  $MPP$ ,  $R_P$ ,  $R_S$  a  $FF$  a proveďte jejich vzájemné porovnání.
3. Do společného grafu vynesete závislosti  $I = f(U)$ ,  $P = f(U)$  všech testovaných článků a průběhy porovnejte.

#### Teoretický rozbor

Fotovoltaické články můžeme podle technologie rozdělit do několika skupin:

- Krystalické
  - Křemíkové
    - Multikrystalické
    - Monokrystalické
    - Páskové
  - GaAs
- Tenkovrstvé
  - Křemíkové
    - Amorfnní
    - Mikrokrystalické
  - CI(G)S
  - CdTe
  - GaAs
  - Organické
  - DSSC
  - Vícepřechodové
- Hybridní (HIT)

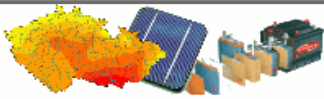
Nejrozšířenějšími články jsou články na bázi křemíku, které jsou levné a mají relativně vysokou účinnost. V laboratoři jsou k dispozici 3 křemíkové PV články – monokrystalický článek, multikrystalický článek a amorfnní minimodul.

#### Monokrystalický Si PV článek

Výroba mono-Si článků je relativně náročná, ale díky rozsáhlému použití mono-Si v elektrotechnice dobře zvládnutá. Výroba začíná přípravou monokrystalického Si ingotu. Nejčastějším způsobem výroby je tažení monokrystalu z taveniny (tzv. Czochralskiho metoda) pomocí zárodečného krystalu. Hotový ingot je poté pomocí diamantové pily rozřezán na destičky. Následuje odleptání zhmožděné vrstvy, texturace povrchu, difuzní procesy, nanesení antireflexní vrstvy a sítotisk kontaktů. Vzhledem ke kruhovému průřezu ingotu mají monokrystalické články tzv. pseudočtvercový tvar, tzn. mají oblé rohy. (Viz Obrázek 1, vlevo)

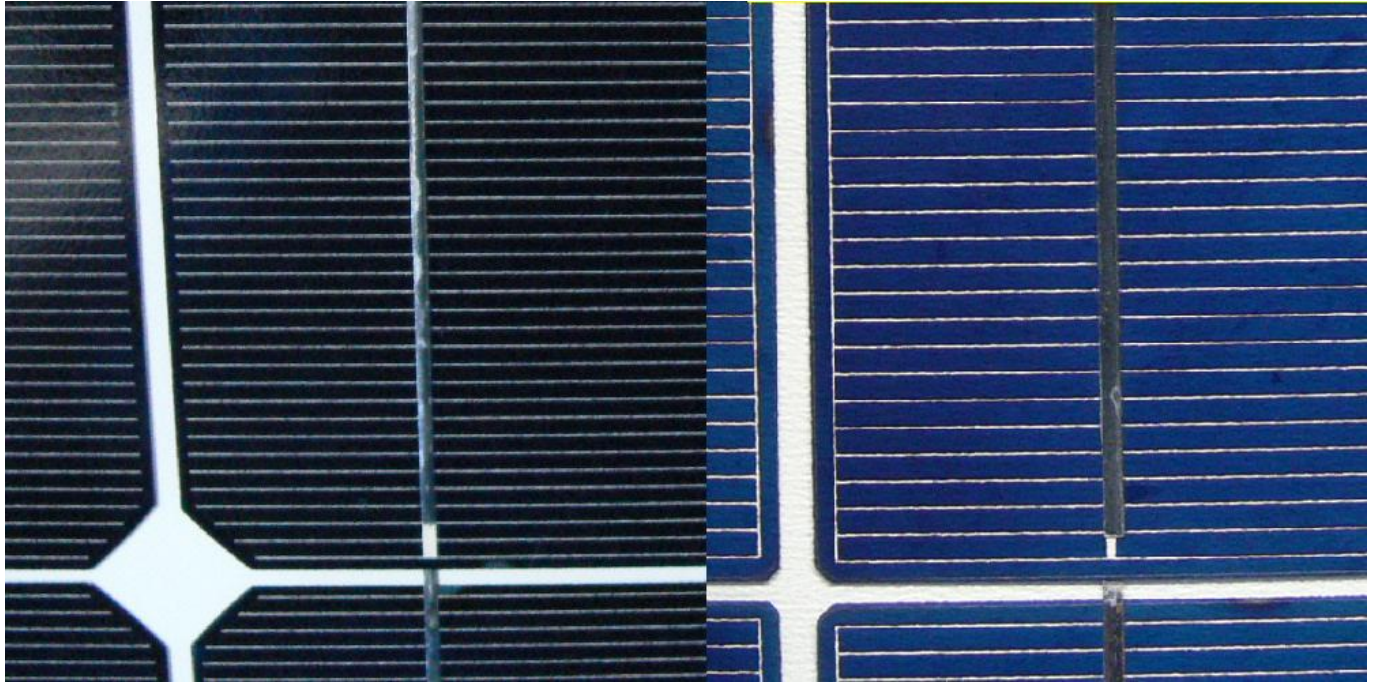
#### Multikrystalický Si PV článek

Výroba multikrystalických článků je levnější než výroba monokrystalických článků, nicméně



## A1M13EZF

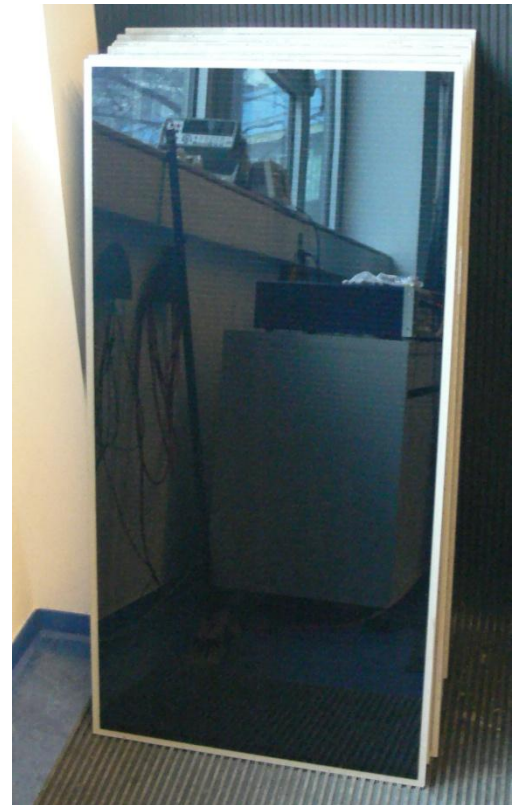
účinnost je vlivem vyšších rekombinačních ztrát nižší. Ingot je tažen v bloku z roztaveného křemíku. V případě potřeby je ingot rozřezán na menší ingoty a ty jsou následně rozřezány (obdobně jako u mono-Si) na destičky. K předchozím operacím je navíc realizována tzv. pasivace vodíkem, která snižuje rekombinační ztráty na hranicích zrn. Výsledné články jsou čtvercové. Příklad vzhledu multikrystalického článku je na následujícím obrázku vpravo.



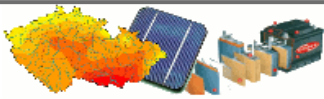
Obrázek 1: Detail FVČ - monokrystalický (vlevo), multikrystalický (vpravo)

### Amorfni Si PV článek

V současné době nastává boom tenkovrstvých technologií. Tenkovrstvé články mají sice horší parametry (především účinnost), ale jejich výroba je velmi levná a navíc umožňuje nanášení vrstvy na prakticky libovolný povrch a v libovolné ploše. Na substrát jsou postupně nanášeny vrstvy TCO (transparentní vodivý oxid), které fungují jako kontakty, aktivní vrstvy a kontaktní vrstvy. Jednotlivé články jsou odděleny laserem. Výhodou tenkovrstvých článků proti krystalickým je kromě nižší ceny vyšší teplotní stabilita parametrů. Po výrobě sice účinnost článku rychle klesne, ale poté již stárne obdobným způsobem jako krystalické moduly.



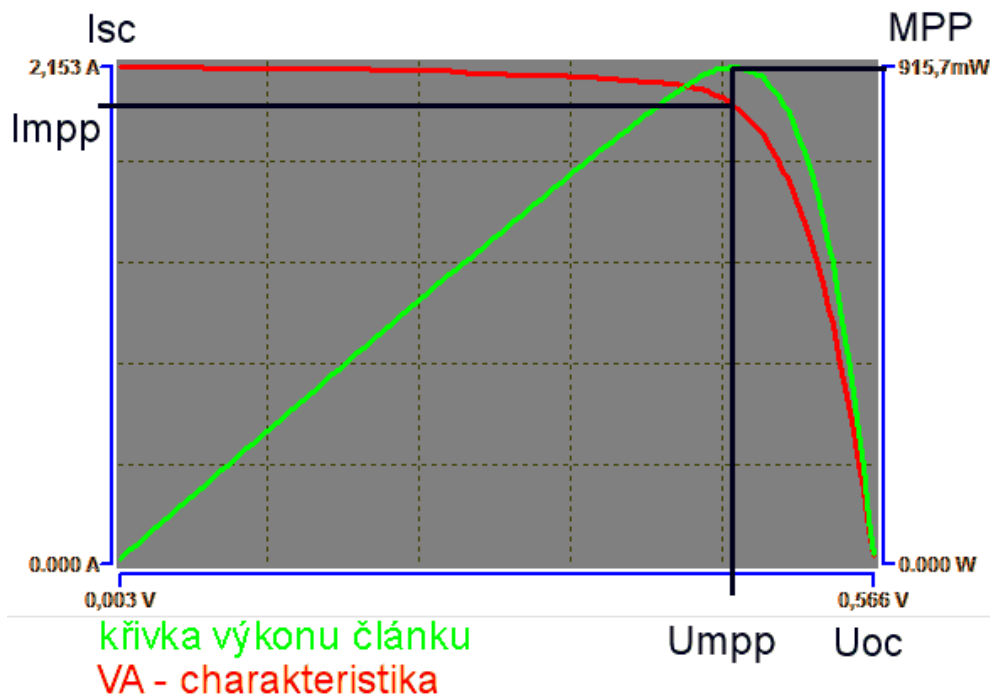
Obrázek 2: CdTe amorfni fotovoltaický panel.



## A1M13EZF

### Volt - ampérová charakteristika fotovoltaického článku.

Při vyhodnocování parametrů fotovoltaických článků hraje poměrně značnou roli voltampérová charakteristika testovaného článku. Příklad charakteristiky seřmuté zařízením PROVA 210 je na následujícím obrázku. Křivka byla zaznamenána při ozařování článku halogenovou žárovkou ze vzdálenosti cca 15 cm. O vlivu intenzity a spektra dopadlého záření na VA charakteristiku bude pojednáno v jiné laboratorní úloze, případně v [2]

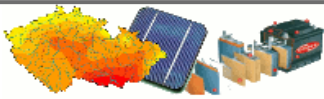


Obrázek 3: VA charakteristika fotovoltaického článku.

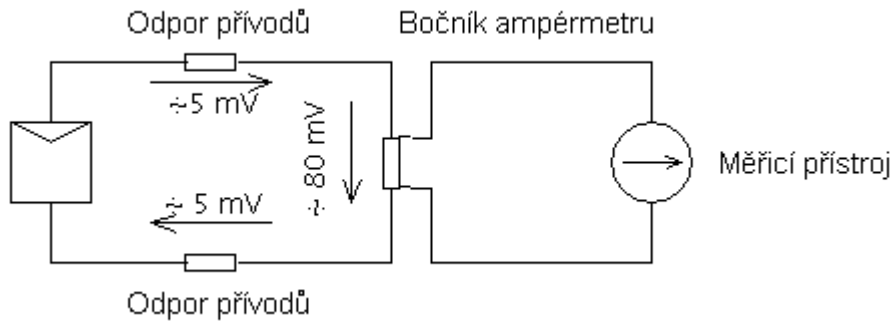
Mezi základní parametry fotovoltaických článků patří:

- proud nakrátko  $I_{SC}$ ,
- napětí naprázdno  $U_{OC}$ ,
- paralelní odpor  $R_p$  reprezentující poruchy v článku,
- sériový odpor  $R_s$ , který představuje elektrické ztráty,
- bod maximálního výkonu  $MPP$  nebo také  $P_{MAX}$ ,
- činitel plnění (fill factor)  $FF$ , který je dán poměrem  $MPP$  a ideálního výkonu dodávaného článkem,
- účinnost  $\eta$  daná poměrem  $MPP$  a osvětlení článku  $P_{IN}$ .

**Proud nakrátko** určíme pomocí ampérmetru; vzhledem k metodě měření proudu pomocí úbytku napětí na bočníku je tato hodnota pro teoretickou podmínku nulového napětí na svorkách článku obtížně určitelná. V reálném obvodu se započtením všech vnitřních odporů lze za nulové považovat napětí o velikosti okolo 100 mV. Lépe je tato skutečnost patrna na schématu viz Obrázek 4. V případě určování dalších parametrů je s touto podmínkou nutno počítat.



# A1M13EZF



Obrázek 4: Vliv odporu bočníku na měření  $I_{sc}$

**Napětí naprázdno** určíme změřením napětí na rozpojených svorkách osvětleného článku voltmetrem s dostatečným vnitřním odporem.

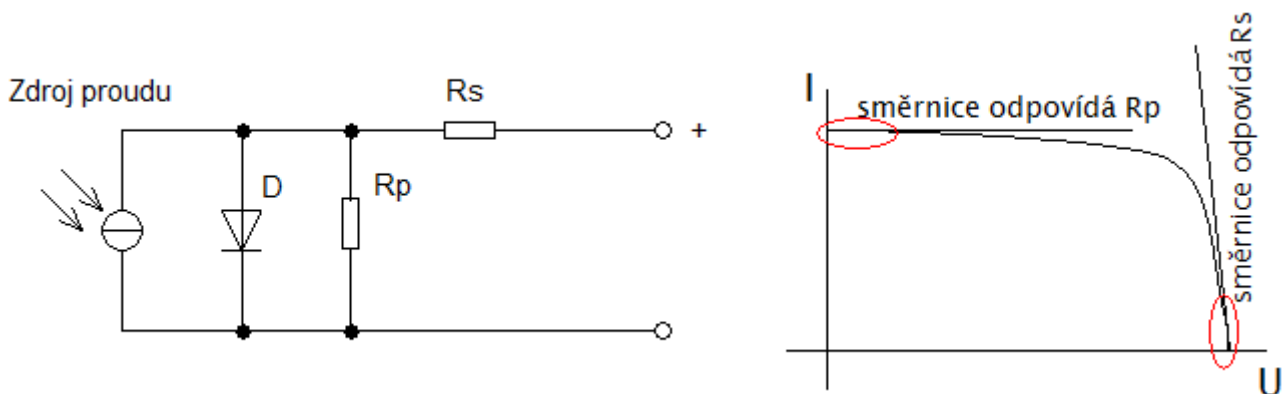
**Paralelní odpor** určíme z hodnot v blízkosti proudu nakrátko, tedy:

$$\frac{1}{R_p} = \frac{dI}{dU} \quad (1)$$

**Sériový odpor** pak určíme z hodnot naměřených v oblasti napětí naprázdno, tedy při malém zatížení testovaného článku. Postupujeme dle rovnice:

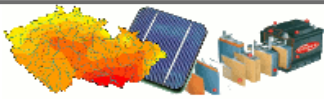
$$-R_s = \frac{dU}{dI} \quad (2)$$

Tato metoda určení parametrů náhradního obvodu článku, viz Obrázek 5, je metodou přibližnou, jejíž přesnost závisí na určení hodnot  $dU$  a  $dI$ . Tečnu se snažíme vždy umístit do bodu  $I_{sc}$  respektive  $U_{oc}$ .



Obrázek 5: Náhradní schéma FVČ a vyznačení oblasti VA charakteristiky pro výpočet  $R_s$  a  $R_p$ .

**Bod maximálního výkonu** je nejnázřejší určitelný z podmínky  $\frac{dP}{dU} = 0$ . Je tedy nutné nejprve vypočítat průběh křivky výkonu panelu, jako součin naměřeného napětí a proudu. Poté nalezneme nejvyšší dosaženou hodnotu, kterou můžeme považovat za hodnotu MPP. Při ručním měření je třeba zaznamenat dostatečné množství dat v oblasti předpokládaného bodu MPP (viz



## A1M13EZF

Obrázek 3).

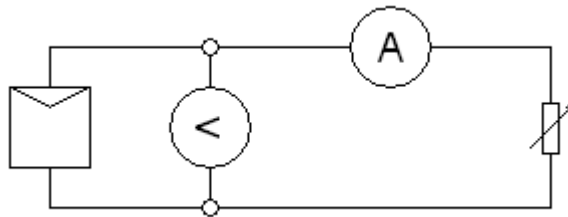
**Činitel plnění** je definován dle vztahu

$$FF = \frac{U_{MPP} I_{MPP}}{U_{OC} I_{SC}} \quad (3)$$

Pro určení **účinnosti** fotovoltaického článku je potřebné znát energii dopadající na článek. Měření této energie je v případě neznámého spektra světelného zdroje velmi nepřesné. Pro měření pod přirozeným sluncem je možno využít fotovoltaického expozimetru, který pracuje na principu měření proudu nakrátko referenčního FVČ.

### Postup měření:

Přístroje zapojíme dle schématu na následujícím obrázku.



Obrázek 6: Schéma zapojení úlohy.

Zátěž je realizována přepínatelnou odporovou kaskádou pro krystalické články a posuvným rezistorem v případě tenkovrstvého článku. S měřením začínáme v chodu naprázdno a poté postupně snižujeme odpor až do chodu nakrátko. Pro chod naprázdno rozpojíme svorky zátěže, pro chod nakrátko je zkratujeme. Odečítáme příslušné hodnoty napětí a proudu. Celé měření opakujeme pro všechny typy článků.

### Vyhodnocení měření

Pro všechny testované články vypočteme hodnoty dle druhého bodu zadání. Také sestrojíme grafy závislostí požadované v bodu číslo 3. V závěru měření se pokuste o srovnání hodnot jednotlivých článků. Při tomto srovnání berte v úvahu i osvětlenou plochu článku.

### Literatura:

- [1] Gray, Jeffery L. 2003. The Physics of the Solar Cell. [autor knihy] A. Luque a S. Hegedus. *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*. Chichester : John Wiley & Sons, Ltd., 2003, 3
- [2] *Pveducation.org*. [Online] <http://www.pveducation.org/pvedrom>.