

Univerzita Palackého v Olomouci

Přírodovědecká fakulta

Katedra experimentální fyziky

# DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Solární energie v učivu fyziky na středních a vysokých  
školách**



Autor:

Studijní program:

Studijní obor:

Forma studia:

Vedoucí práce:

Termín odevzdání práce:

Bc. Magdaléna Techetová

N1701

7504T055 Učitelství fyziky pro střední školy

Prezenční

doc. RNDr. Roman Kubínek, CSc.

8.8.2017

Prohlašuji, že jsem předloženou diplomovou prací vypracovala samostatně pod vedením doc. RNDr. Romana Kubínka, CSc. a za asistence konzultanta Mgr. Michala Dudky, PhD. a že jsem použila zdrojů, které cituji a uvádím v seznamu použitých pramenů.

V

Olomouci.....

.....

## **Bibliografická identifikace:**

Jméno a příjmení autora  
Název práce

Magdaléna Techetová  
Solární energie v učivu fyziky středních a  
vysokých škol

Typ práce  
Pracoviště  
Vedoucí práce  
Rok obhajoby práce  
Abstrakt

diplomová  
Katedra experimentální fyziky  
doc. RNDr. Roman Kubínek, CSc.  
2017

Práce je zaměřena na téma solární energetiky a solárních systémů. V rámci práce byly sestaveny experimenty k demonstraci vlastností solárních článků a jejich praktického využití, které lze využít ve výuce na SŠ, popř. VŠ.

Klíčová slova  
Počet stran  
Počet příloh  
Jazyk

solární energie, fotovoltaický článek  
74  
1  
český

## **Bibliographical identification:**

Author's first name and surname	Magdaléna Techetová
Title	Solar energy in school education
Type of thesis	Master's
Department	Department of Experimental Physics
Supervisor	doc. RNDr. Roman Kubínek, CSc.
The year of presentation	2017
Abstract	This thesis is focused on the topic of solar energy and solar systems. In this thesis the experiments were designed to represent the properties and application of solar cells. These experiments can be realized in school education.
Keywords	solar energy
Number of pages	74
Number of appendices	1
Language	Czech

## Obsah

Úvod.....	7
<b>1. Historický vývoj solární energetiky.....</b>	<b>8</b>
<b>2. Fyzika polovodičů.....</b>	<b>12</b>
2.1 Polovodiče a jejich vlastnosti.....	12
2.2 Přechod PN.....	13
2.3 Diody.....	14
2.3.1 Voltampérová charakteristika diody.....	15
2.3.2 Druhy diod.....	16
<b>3. Solární energie.....</b>	<b>18</b>
3.1 Fotovoltaický jev.....	18
3.2 Fotoelektrický jev.....	18
3.3 Využití energie solárním článkem.....	18
3.4 Energetické ztráty.....	21
<b>4. Solární článek.....</b>	<b>24</b>
4.1. Typy článků.....	25
4.1.1 Monokrystalické.....	25
4.1.2 Polykrystalické.....	26
4.1.3 Články z amorfního křemíku.....	27
4.1.4 Tenkovrstvé články z amorfního křemíku.....	28
4.1.5 Články CIS (Copper-Indium di-Selenide).....	30
4.1.6 Články z telluridu kadmia.....	31
4.1.7 Perovskitové články.....	32
4.2 Materiály článků.....	34
4.2.1 Prvky.....	34
4.2.1.1 Křemík.....	34
4.2.1.2 Germanium.....	35
4.2.1.3 Selen.....	35
4.2.2 Sloučeniny.....	35
4.2.2.1 Arsenid gallitý (galliumarsenid) (GaAs).....	35
4.2.2.2 Tellurid kademnatý (CdTe).....	36

4.2.2.3 Sulfid kademnatý (CdS).....	36
4.2.2.4 Oxidy.....	36
<b>5. Solární energetika.....</b>	<b>37</b>
5.1 návratnost investice do solárních elektráren.....	38
<b>6. Solární energie z ekologického hlediska.....</b>	<b>39</b>
<b>7. Solární energie v kosmických aplikacích.....</b>	<b>41</b>
<b>8. Začlenění solární energie do výuky na školách.....</b>	<b>42</b>
<b>PRAKTICKÁ ČÁST – Experimenty se solárními články.....</b>	<b>45</b>
1. Měření voltampérové charakteristiky solárního článku při konstantním osvětlení.....	45
2. Měření proudu v solárním článku v závislosti na úhlu osvětlení.....	50
3. Solární článek jako zdroj elektrické energie.....	53
<b>Závěr.....</b>	<b>57</b>
Příloha – Dotazníkový průzkum.....	64

## **Úvod**

Obnovitelné zdroje energie jsou v současné době velkým tématem a hojně probíranou oblastí. Protože zásoby uhlí, ropy, zemního plynu či jaderného paliva nejsou nevyčerpatelné, budeme dříve či později muset vyřešit otázku, jak získávat potřebnou energii z jiných zdrojů. Vedle energie získávané z větru, vody či tepla Země je možné využít jako zdroj i Slunce, jehož záření dovedeme přeměnit na energii elektrickou prostřednictvím fotovoltaických systémů. V práci je používán i pojem „solární“, který vyjadřuje původ energie. Pojem „fotovoltaický“ vyznačuje přeměnu energie světla na energii elektrickou.

Toto téma mě zaujalo zejména proto, že je společensky velmi aktuální, ale také z toho důvodu, že spojuje mezipředmětovými vazbami obory, jež jsem na Přírodovědecké fakultě studovala (tj.fyziku a chemii), a také geografii (souvinnost s lokalitami vhodnými pro umístění fotovoltaických panelů), ochranu životního prostředí a další. Téma umožňuje integrovat poznatky v rámci fyziky, především fyziky polovodičů, problematiku energie a jejích přeměn a vlastnosti elektromagnetického záření.

Tato diplomová práce je zaměřena na solární systémy a začlenění jejich problematiky do výuky na středních a vysokých školách.

## 1. Historický vývoj solární energetiky

Získávat elektrickou energii prostřednictvím světla je možné díky tzv. fotovoltaickému jevu, který jako první objevil francouzský fyzik Alexandre Edmond Becquerel v roce 1839, když ve svých tehdejších devatenácti letech vyráběl elektřinu v laboratoři svého otce. Sestavil přitom elektrolytickou celu ze dvou kovových elektrod ponořených do elektricky vodivého roztoku. Elektrody ozařoval různými typy záření včetně viditelného světla a zjistil, že záření ovlivňuje množství nabitých částic v obvodu. Nejlepších výsledků dosáhl při použití ultrafialového záření, přičemž elektrody byly potaženy vrstvou látek citlivých na světlo, jako je AgCl nebo AgBr. Ke svým experimentům používal obvykle platinové elektrody, poměrně úspěšný však byl také s elektrodami ze stříbra. Využití pro fotovoltaický jev našel také například v určování teploty zahřátých těles na základě intenzity jimi emitovaného záření. Alexandre Edmond Becquerel tak položil základy celé solární energetice.

Další poznatky související s fotovoltaickým jevem pocházely z Anglie. V roce 1873 Willoughby Smith zjistil, že při změně osvětlení dochází ke změně vodivosti u pevného selenu. Na něj o tři roky později navázali profesor William Grylls Adams a jeho student Richard Evans Day, kteří připojili k vrstvě selenu dvě elektrody a zkoumali elektrický proud procházející selenovou vrstvou při jejím osvětlení. Z těchto experimentů vyplynulo, že solární energii lze získávat i bez zahřívání systému, a to mnohem jednodušším způsobem než u jiných zdrojů energie.

První solární článek pak vyrobil Američan Charles Fritts ze selenu, který pokryl vrstvičkou zlata. Tento článek měl účinnost kolem 1-2%.

Velmi významným pro solární energetiku se stal fotoelektrický jev, který objevil německý fyzik Heinrich Hertz roku 1887. Jev později vysvětlil Albert Einstein, který za toto vysvětlení obdržel v roce 1921 Nobelovu cenu. Moderní solární články jsou založeny právě na fotoelektrickém jevu.

V roce 1918 se podařilo polskému vědci Janu Czochralskému připravit monokrystalický křemík, který se stal nejpoužívanějším materiálem pro výrobu solárních článků.



První fotovoltaický článek vyrobili roku 1954 David Chapin, Calvin Fuller a Gerald Pearson z Bellovy laboratoře. Jako první sestrojili zařízení, které skutečně přeměňovalo sluneční energii na energii elektrickou. V průběhu své práce v této oblasti dokázali zvýšit účinnost článku ze 4% na 11%.

Po letech snahy vědců zvýšit účinnost solárních článků a snížit jejich náklady byla solární energie využita v kosmickém výzkumu, kde má své využití dodnes. První družicí, jež byla poháněna solární energií, byla družice Vanguard 1. Ta byla vypuštěna na oběžnou dráhu 17.března roku 1958 a od té doby se stala jedním z nejstarších umělých těles nacházejících se na oběžné dráze Země. Její solární technologie poskytla základ i pro další americké družice, které byly vypuštěny po ní, protože na rozdíl od běžně užívaných baterií, jež vydržely zhruba 20 dní, měly solární články životnost okolo sedmi let.

Mezi družice využívající solární energii patřila také družice Telstar, která byla vypuštěna na oběžnou dráhu 12.července roku 1962. Ta byla první družicí sloužící k přenosu informací a ke komunikaci. Funkční byla do listopadu téhož roku, než byla její elektronika poškozena vlivem radiace.

Během sedmdesátých let vzrostla poptávka po solárních člancích, mimo jiné také kvůli zvýšení cen nafty. Společnost Exxon tehdy finančně podpořila výzkum, na jehož základě se začaly vyrábět solární články z méně kvalitního křemíku a levnějších materiálů, díky čemuž jejich cena klesla ze 100 dolarů za watt až na 20-40 dolarů za watt. Federální vláda na podporu dalšího rozvoje založila Národní laboratoř pro obnovitelné energie (NREL).

V osmdesátých letech dosáhla solární energie velkého rozmachu. Tenkovrstvé články umožňovaly jejich výhodná umístění na budovy, vozidla nebo předměty osobní potřeby jako např.kalkulačky. V tomto období byla také postavena dnes již největší elektrárna s koncentračními slunečními kolektory SEGS (Solar Energy Generating Systems) ve světě, a to v Kramer Junction v Kalifornii. Tato elektrárna využívá k výrobě elektřiny přeměnu energie slunečního záření na teplo. Nejedná se přitom o zařízení složené ze solárních článků, využívá však jako zdroj slunečního záření a v tomto smyslu tedy také spadá do oblasti solární energetiky. Je složena z parabolických zrcadel, která se automaticky natáčejí směrem ke Slunci, a tak využívají maximum jeho záření. Sluneční

paprsky se odrážejí od zrcadel a jsou nasměrovány do trubice vedoucí centrálně podél zrcadel. Trubice je naplněna syntetickým olejem, který se zahřívá až nad 400°C, a toto teplo je pak využito k přeměně vody na vodní páru, jež pohání turbínu. Nejedná se tedy přímo o generaci elektrického proudu prostřednictvím fotovoltaického jevu, ale o jeho výrobu na základě přeměny získaného tepla, které má také zdroj ve Slunci a jeho záření. Lokalita Kramer Junction je pro tyto účely výhodná, protože dokáže využít v průměru asi 340 dní slunečního svitu. V roce 1989 byly sluneční kolektory poprvé použity společně se solárními články.

Solární panely začaly být stále více využívány i na budovách. V roce 1990 byly nainstalovány i na střechu katedrály v Magdeburgu, což byla první instalace tohoto zařízení na kostele ve východním Německu.

V roce 1991 se podařilo Michaelovi Graetzelovi, profesorovi fyzikální chemie na Federální polytechnické škole ve švýcarském Lausanne, vyrobit barvivem senzitivovaný solární článek, jenž byl založen na fotoelektrochemickém procesu. O pět let později se profesoru Graetzelovi podařilo dosáhnout u těchto článků účinnosti 11%. Jejich velkou výhodou byly nízké náklady na výrobu, protože se skládaly z levných materiálů.

Dalšího úspěchu v solární energetice dosáhla Národní laboratoř pro obnovitelnou energii v roce 1994 vyvinutím nového solárního článku vyrobeného z fosfidu gallito-inditého (GaInP) a arsenidu gallia, který překročil hranici 30% účinnosti. Ke konci devadesátých let pak tato laboratoř vytvořila tenkovrstvé solární články, které dokázaly přeměnit ve využitelnou energii až 32% slunečního záření. V rámci NREL bylo v roce 1996 založeno Národní centrum pro fotovoltaiku. Celkový výkon získaný na základě fotovoltaiky dosáhl v roce 1999 hodnoty 1000 MW.

Od té doby nastal velký rozmach v aplikaci fotovoltaických zařízení. Do jejich instalace a výstavby bylo hojně investováno a vznikaly také nejrůznější projekty na podporu a další rozvoj solární energetiky. V roce 2006 již bylo využito polykrytalického křemíku ve fotovoltaice vyšší než v jiných oblastech.

V dnešní době je věnována fotovoltaice a jejímu rozvoji velká pozornost zejména kvůli snaze zabránit nežádoucím klimatickým změnám, jako je například globální

oteplování, a rovněž kvůli obnovitelnosti tohoto zdroje energie.

## **2. Fyzika polovodičů**

### **2.1 Polovodiče a jejich vlastnosti**

Materiál, z něhož jsou solární články vyráběny, se řadí mezi polovodiče - látky, jejichž hodnota elektrického odporu se nachází mezi vodiči a dielektriky. Elektrický odpor u polovodičů klesá s rostoucím osvětlením, popř. s rostoucí teplotou, kdy elektrony nacházející se ve vazbách mezi atomy polovodiče přijímají energii ve formě tepla nebo záření a následně se z vazeb uvolňují. Elektron, který se takto uvolní, se stává volným nositelem elektrického náboje.

V místě, odkud se elektron uvolnil, vzniká kladně nabitá oblast, kterou pro jednoduchost považujeme za částici a nazýváme ji díra. Volné elektrony a díry, které vznikají při osvětlení (popř. jiném druhu dodání energie), následně zvyšují vodivost polovodiče, neboť navyšují počet pohyblivých nabitých částic. Tuto vlastnost nazýváme **vlastní vodivost polovodiče**. Připojíme-li polovodič ke zdroji stejnosměrného elektrického napětí, uvedeme volné elektrony a díry do usměrněného pohybu - vzniká elektrický proud, jehož směr je v tomto případě dán zdánlivým pohybem děr považovaných za kladné částice. Pokud se některý z elektronů vrátí na místo, kde vznikla díra, dochází k zániku této dvojice nabitých částic, tzv. **rekombinaci**. Elektrony vázané ve vazbě se na vzniku elektrického proudu nepodílejí.

Pro výrobu solárních článků se nejčastěji užívá křemík. Aby byl článek co nejúčinnější, tj. aby z něj bylo možno odebírat co nejvíce elektrické energie, nahrazují se některé atomy v křemíkové mřížce **příměšovými atomy**, jejichž prostřednictvím vzniká tzv. **nevlastní vodivost polovodiče**.

Křemík má ve svém atomovém obalu čtyři valenční elektrony (v rámci periodické soustavy prvků se proto řadí do IV.A skupiny). V krystalové mřížce křemíku pak tvoří každý jeho atom čtyři vazby se sousedními atomy. Při dodání energie osvětlením nebo zahřátím se elektrony z těchto vazeb mohou uvolňovat (viz. výše). Vzniká přitom stejný počet volných elektronů a děr.

Příměšové atomy, jimiž nahrazujeme atomy křemíku v původní mřížce, mají buď o jeden elektron více (prvky V.A skupiny periodické soustavy) a nebo méně (prvky III.A skupiny). Je-li v mřížce čtyřvazného prvku přítomen prvek pětivazný, zůstává po vytvoření čtyř vazeb jeden elektron volný. Křemík obohacený o příměs pětivazného prvku tak

získává nadbytečné volné elektrony, kterou jsou v něm majoritním (většinovým) nositelem elektrického náboje. Takový polovodič označujeme jako **polovodič typu N**, který vykazuje **elektronovou vodivost**.

Naopak, je-li příměsí v mřížce křemíku prvek trojvazný, chybí mu elektron k vytvoření čtvrté vazby a na daném místě vzniká díra s kladným nábojem. V mřížce dotované trojvaznými atomy je nadbytek děr a vzniká tak **polovodič typu P** vykazující **děrovou vodivost**.

Polovodiče, které lze dotovat příměsovými prvky obojího typu, nazýváme **amfoterními polovodiči**.

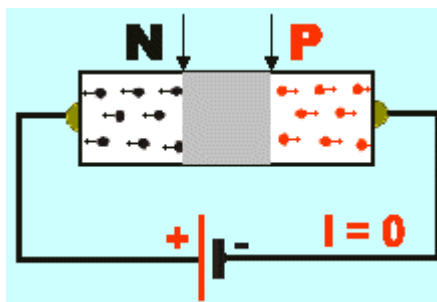
## 2.2 Přejchod PN

Spojíme-li polovodič typu N s polovodičem typu P, pak v místě jejich kontaktu vzniká potenciálová bariéra zvaná **hradlová vrstva**, což je prostor, v němž volné elektrony a díry rekombinují a vytvářejí tak vrstvu bez nabitých částic, skrze kterou žádné další nabitě částice neprojdou. Tloušťka hradlové vrstvy však může být ovlivněna tím, jakým směrem zapojíme přechod PN do obvodu vzhledem k polaritě napětí zdroje. Minimální napětí, které je potřebné k průchodu proudu, a tedy k překonání potenciálové bariéry, se nazývá **difúzní napětí**.

Zapojení lze provést dvojím způsobem:

### *a) v závěrném směru*

Polovodič typu P je připojen k zápornému pólu zdroje, polovodič typu N ke kladnému. Protože díry v polovodiči typu P jsou přitahovány k zápornému pólu zdroje a volné elektrony v polovodiči typu N ke kladnému pólu zdroje, dochází tak k rozšíření hradlové vrstvy, a tím i k zesílení její nepropustnosti. Elektrický proud nemůže s takto zapojeným přechodem PN obvodem procházet.

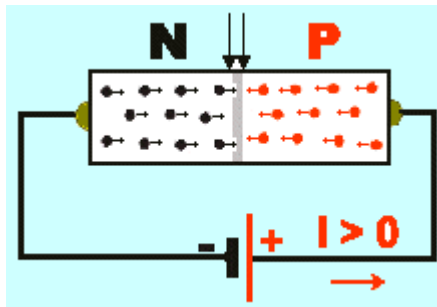


Obr.1: PN přechod zapojený v závěrném směru

(<https://www.cez.cz/edee/content/microsites/elektrina/f/z2-3.gif>)

b) v propustném směru

Polovodič typu P je připojen ke kladnému pólu zdroje, polovodič typu N k zápornému. Volné elektrony z polovodiče typu N jsou nyní přitahovány k dírákům v polovodiči typu P a naopak. Dochází k zúžení hradlové vrstvy vlivem protichůdného pohybu částic, čímž se usnadní jejich průchod touto vrstvou, a tím tedy i průchod elektrického proudu.



Obr.2: PN přechod zapojený v propustném směru

(<https://www.cez.cz/edee/content/microsites/elektrina/f/z2-2.gif>)

### 2.3 Diody

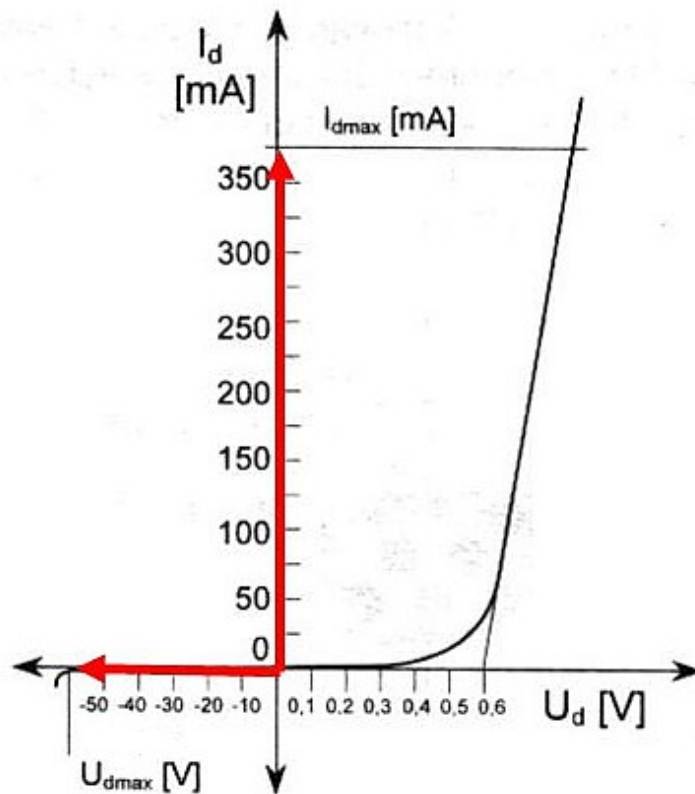
Polovodičová součástka, která obsahuje jeden PN přechod, se nazývá dioda. Použitím diody tedy můžeme dosáhnout toho, že elektrický proud bude v dané části obvodu procházet pouze jedním směrem, opačným už však nikoli. Diody se využívají k usměrňování střídavého proudu na proud stejnosměrný. Schematicky diodu zakreslujeme podle obr.3. Vývod polovodiče typu P se nazývá anoda, vývod polovodiče typu N katoda. Šipka obsažená ve značce slouží také jako mnemotechnická pomůcka pro určení orientace proudu při zapojení v propustném směru.



Obr.3: Schematická značka diody

### 2.3.1 Voltampérová charakteristika diody

Diody jsou charakterizovány pomocí tzv. **voltampérové charakteristiky** diody, což je graf závislosti proudu procházejícího diodou na přiloženém napětí. Tato závislost se měří v obvodu s diodou a reostatem, a to v propustném i závěrném směru. Její průběh je znázorněn na obr. 4.



Obr. 4: Voltampérová charakteristika diody

(<http://slideplayer.cz/slide/2512216/9/images/6/VA+CHARAKTERISTIKA+DIODY.jpg>)

Z grafu je vidět, že proud začne diodou procházet až při určité minimální hodnotě napětí  $U_d$ , v tomto případě asi 0,35 V. Tato hodnota se nazývá **prahové napětí** a závisí na teplotě a na materiálu, z něhož je dioda vyrobena. Při menším napětí proud diodou prakticky neprochází. Po dosažení další specifické hodnoty napětí proud prudce vzrůstá a při velkém nárůstu může dojít k poškození diody. V obvodu musí být tedy společně s diodou zapojen vždy také rezistor. Hodnota  $I_{dmax}$  představuje **maximální dovolený proud v propustném směru**, který může diodou procházet bez jejího zničení. V závěrném směru

hodnota  $U_{dmax}$  označuje **maximální závěrné (průrazné) napětí**, což je napětí, které je dioda v závěrném směru schopna udržet, aniž by došlo k průrazu, tj. ke zničení přechodu PN. Nepatrný proud, který diodou prochází při zapojení v závěrném směru, se nazývá **zbytkový proud** a je závislý na teplotě a materiálu diody.

### 2.3.2 Druhy diod

Podle materiálu, konstrukce a použití rozlišujeme různé druhy diod:

#### Podle materiálu:

- a) *křemíkové* – příměsové prvky jsou přidány do krystalové mřížky křemíku
- b) *germaniové* – příměsové prvky jsou přidány do krystalové mřížky germania

#### Podle konstrukce:

a) *hrotové* – přechod PN v nich vzniká v místě kontaktu hrotu vyrobeného z wolframu nebo zlata a polovodiče typu N. Hrotem prochází krátké intenzivní impulzy elektrického proudu, kterými se povrchová vrstva polovodiče ohřívá, v důsledku čehož nastává difúze iontů z hrotu do povrchové vrstvy polovodiče. Vodivost polovodiče na povrchové vrstvě v blízkosti hrotu se přitom mění na typ P. Vzniká tak přechod PN v jednom bodě. Právě na základě uspořádání hrotové diody byla vytvořena obecná schematická značka pro diody.

b) *plošné* – PN přechod vzniká kontaktem vrstev polovodiče typu P a polovodiče typu N v celé ploše kontaktu.

#### Podle použití:

- a) *usměrňovací* – k usměrnění střídavého proudu na proud stejnosměrný
- b) *stabilizační* – ke stabilizaci napětí v obvodu
- c) *kapacitní diody (varikapy)* – slouží jako napětím řízené kondenzátory – využívá se toho, že šířka přechodu PN diody zapojené v závěrném směru závisí na velikosti připojeného napětí
- d) *fotodiody* – přeměňují energii záření na energii elektrickou
- e) *LED diody* – přeměňují energii elektrickou na energii záření



Solární články se z hlediska druhu přeměny energie a použití řadí mezi **fotodiody** a z hlediska své konstrukce mezi **plošné diody**, v nichž má přechod PN plošný obsah v řádech desítek až stovek  $\text{cm}^2$ . Fotodiody se schematicky značí dle obr. 5. Šipky směřující k diodě symbolizují paprsky dopadajícího světla.



*Obr.5: Schematická značka fotodiody*

### **3. Solární energie**

Energie, kterou ve fotovoltaických zařízeních přijímá materiál polovodiče, je energie záření. Záření je charakterizováno svou vlnovou délkou a energií. Záření, které vychází ze Slunce a které využíváme k získávání energie elektrické, spadá do oblasti viditelného světla, ultrafialového záření a také infračerveného záření. Polovodiče záření absorbují za vzniku volných elektronů a děr, má-li záření potřebnou energii k jejich generaci. Přitom mohou nastat dva významné fyzikální jevy.

#### **3.1 Fotovoltaický jev**

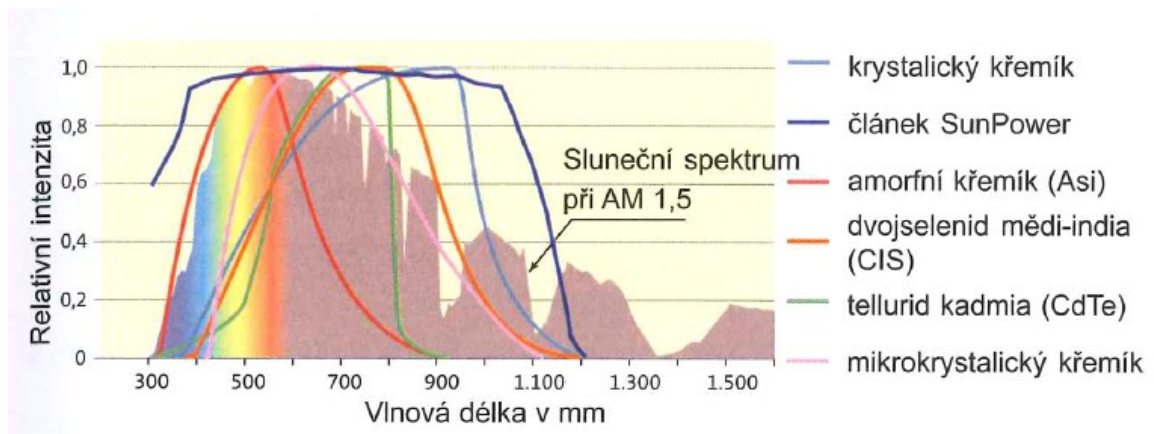
Fotovoltaickým jevem nazýváme děj, při němž látka pohltí kvantum energie záření za uvolnění elektronu, který nadále setrvává uvnitř látky. Tento jev je někdy také nazýván *vnitřním fotoelektrickým jevem* a v jeho důsledku dochází ke zvyšování vodivosti materiálu. Právě tento jev je podstatou funkce solárních článků.

#### **3.2 Fotoelektrický jev**

K fotoelektrickému jevu dochází, pohltí-li látka kvantum energie záření za uvolnění elektronu, který však opouští látku. Energie pohlcená látkou přitom musí být větší nebo alespoň rovna výstupní práci, jež je charakteristická pro daný materiál a kterou elektron vykoná při výstupu z látky. Tento jev se také nazývá *vnější fotoelektrický jev*. Albert Einstein poskytl jeho vysvětlení roku 1905 a v roce 1922 pak za svou teorii obdržel Nobelovu cenu za fyziku.

#### **3.3 Využití energie solárním článkem**

Sluneční záření je složeno z více složek o různých vlnových délkách, a tedy i o odlišné energii. Spadá sem oblast ultrafialového záření o nejkratších vlnových délkách, oblast viditelného světla, které je energeticky středně bohaté, a oblast infračerveného záření o dlouhých vlnových délkách. Solární články nevyužijí veškerou energii záření, které na ně dopadá. Má-li energie záření vyšší hodnotu, než jaká je potřebná ke vzniku páru elektron-díra, mění se přebytečná energie na teplo. Kolik energie z celkového dopadajícího záření dovedou články přeměnit v elektrickou energii udává jejich **spektrální citlivost**. Ta závisí na materiálu, z něhož je článek vyroben.



Obr. 6: Sluneční spektrum a spektrální citlivost solárních článků (Haselhuhn, 2010)

V solární energetice hraje roli zářivý výkon a **intenzita záření Slunce** a **roční ozáření** (energie = výkon x čas). Oba údaje jsou vztaženy na ozářenou plochu a jsou normovány na jeden čtvereční metr. Intenzita slunečního záření, které dopadá svisle na atmosféru Země, má průměrnou hodnotu  $1367 \text{ W/m}^2$ , která je nazývána **solární konstantou**. Skutečná intenzita záření Slunce je menší v důsledku odrazu, absorpce nebo rozptylu záření na molekulách vzduchu a kapkách vody v atmosféře. Za jasného dne je intenzita záření Slunce na povrchu Země okolo poledne asi  $1000 \text{ W/m}^2$  bez ohledu na lokalitu. Je to špičková hodnota, která slouží jako referenční při určování výkonu solárních modulů. Z  $1 \text{ kW}$  instalovaného výkonu lze za rok získat 800 až  $1100 \text{ kWh}$  elektrické energie. (Haselhuhn, 2010)

Sluneční záření, které dopadá na povrch Země, je složeno ze **záření přímého**, které přichází od Slunce bez vychylování svého směru a vrhá ostré stíny, a **záření difuzního**, které je při zatažené obloze filtrováno a vychylováno v mracích nebo také v ozonové či prachové vrstvě, a nemá tedy předem určený směr. Intenzita záření v důsledku těchto jevů klesá pod hodnotu  $1000 \text{ W/m}^2$ . Hodnota intenzity záření přitom závisí na počasí, ročním období, denní době a na zeměpisné šířce. Solární články využívají jak přímého, tak i difuzního slunečního záření.

Součet energií získaných přímým a difuzním slunečním zářením během všech slunečných hodin v roce udává **roční ozáření Sluncem**, tj. celkové ozáření udávané v kilowatt hodinách a vztažené na jeden metr čtvereční za rok. Jeho hodnota se regionálně velmi liší. V některých pouštích může roční ozáření dosahovat hodnoty až  $2500 \text{ kWh/m}^2$  za rok, zatímco v České republice je to 900 až  $1200 \text{ kWh/m}^2$  za rok. Více než tři čtvrtiny

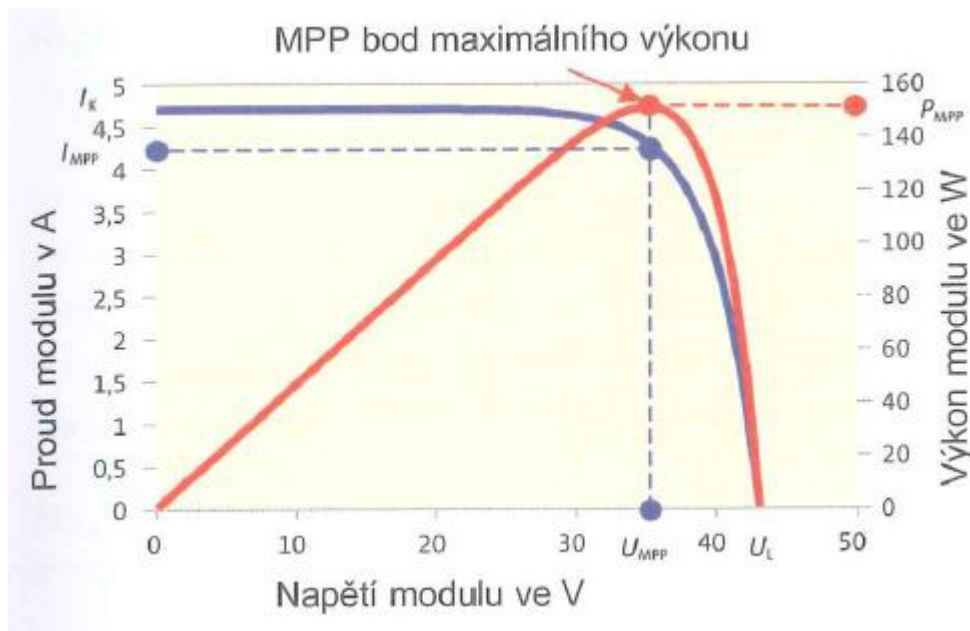
dopadajícího slunečního záření u nás připadají na období od dubna do září.

Účinnost solárního článku  $\eta$  je dána poměrem výkonu dodávaného solárním článkem a výkonu ozáření Sluncem podle vztahu (1)

$$\eta = \frac{P_{MPP}}{S \cdot E} \quad (1)$$

kde  $P_{MPP}$  je bod maximálního výkonu,  $S$  je velikost ozářené plochy a  $E$  je sluneční ozáření ve  $W/m^2$ . U solárního panelu se za  $S$  dosazuje plocha panelu.

Účinnost solárního článku nebo modulu udává maximální elektrický výkon vyrobený danou plochou článku nebo modulu. Posuzována je podle již zmíněné referenční hodnoty  $1000 W/m^2$ . Účinnost modulu je přitom vždy menší než účinnost článku, neboť v modulech jsou články zakryty sklem, které nepropouští sluneční světlo úplně, a také nelze články pokrýt celou plochu modulů. U modulů se tedy uvádí **maximální výkon  $P_{MPP}$**  za příslušného napětí  $U_{MPP}$  a proudu  $I_{MPP}$  v bodě maximálního výkonu MPP (z angličtiny „Maximum Power Point“). Vynásobením proudu a napětí získáme hodnotu výkonu článku modulu. Z grafické charakteristiky pak můžeme určit bod maximálního výkonu MPP, a tedy i za jakých hodnot proudu a napětí má solární modul nejvyšší výkon.



Obr.7: Charakteristiky standardního modulu se 72 články (Haselhuhn, 2010)

Hodnoty proudu, napětí i výkonu se během dne neustále mění v závislosti na

intenzitě ozáření a také na teplotě. Intenzita ozáření se přímo projevuje na proudu, který vzniká v modulu – pokud se intenzita ozáření sníží na polovinu, je poloviční také odebíraný proud. Teplota ovlivňuje především napětí modulu, které při nízkých teplotách stoupá, přičemž během zimního období může nabýt až o 20% vyšší hodnoty ve srovnání s hodnotou jmenovitou. Za vyšších teplot dochází k poklesu napětí, a tedy i k poklesu výkonu a účinnosti. V létě za jasného dne se může solární modul zahřát až na 50°C. Při zvýšení teploty o 1°C klesá výkon krystalických modulů průměrně o 0,4 až 0,5%. Protože je však v létě vysoká intenzita ozáření, pak i přes tento pokles výkonu dodávají solární moduly v letním období téměř o 80% energie více než v období zimním.

Výkon fotovoltaické elektrárny či panelu se vyjadřuje v **jednotkách kWp** (z angličtiny „kilowatt-peak“), které udávají výkon při standardních testovacích podmínkách (STC – Standard Test Conditions). Tyto podmínky zahrnují referenční hodnotu sluneční energie, která kolmo dopadá na solární panel, tj. 1 kW/m<sup>2</sup>. Dále zde vystupuje teplota článků 25°C a průzračnost atmosféry AM = 1,5. Průzračnost atmosféry se značí AM podle anglického výrazu „air mass“, tedy vzduchová hmota. Je-li Slunce orientováno kolmo k zemskému povrchu, pak prochází světlo atmosférou po nejkratší dráze. V tom případě jsou také minimální ztráty a koeficient AM je roven jedné. Pokud je naproti tomu Slunce na obloze nízko nad horizontem, je dráha, kterou světlo urazí, prodloužena o faktor AM. Důsledkem tohoto prodloužení je pak menší intenzita záření a také změna barevného složení slunečního světla. Hodnota AM = 1,5 udává roční střední hodnotu. V prostorách mimo atmosféru platí AM = 0.

### 3.4 Energetické ztráty

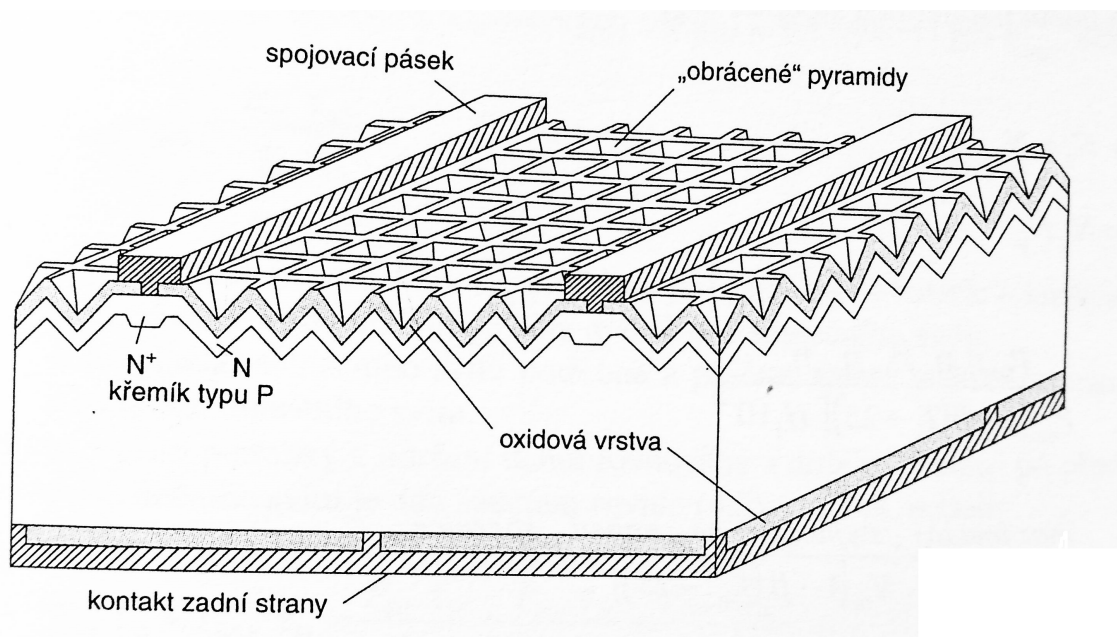
Množství energie, které získáme ze slunečního záření prostřednictvím solárních článků, popř. panelů, závisí na mnoha faktorech. Jak již bylo zmíněno výše, z celkového množství energie, kterou Slunce vyzáří, získáváme pouhý zlomek, a to zejména z důvodu mnohých ztrát, k nimž dochází při cestě slunečního záření ze Slunce až k solárním panelům. Zde se na tyto ztráty zaměříme podrobněji.

První ztráta energie, ke které dochází po jejím vyzáření ze Slunce, se odehrává v atmosféře Země. Určité množství energie se po vstupu záření do atmosféry odrazí zpět do vesmíru. Další část energie se ztrácí, když je většina ultrafialového záření vstřebána ozonovou vrstvou v horní části atmosféry. Z tohoto důvodu se na zemský povrch dostane

asi jen 1-3% původní energie ultrafialového záření. Z oblasti viditelného světla se v atmosféře absorbuje jen velmi málo energie. Infračervené záření je atmosférou absorbováno zejména kvůli přítomnosti molekul vody a oxidu uhličitého. Rozptyl viditelného záření o kratších vlnových délkách způsobuje modré zbarvení oblohy a barvu slunce vnímáme žlutě až oranžově. Tento rozptyl světla se nazývá **difúzní (rozptýlené) záření**, které při oblačném počasí představuje veškerou dostupnou a využitelnou solární energii. Obvykle se však většina viditelného světla dostane skrze atmosféru až na zemský povrch a toto záření se nazývá **přímé sluneční záření**.

Energie, kterou přijímáme na zemském povrchu, je označována jako **insolace** slunečního záření. Představuje množství slunečního záření, které dopadá za jednotku času na jednotku plochy zemského povrchu. Toto záření se přitom skládá jak z difúzního, tak i z přímého slunečního záření. Množství insolace je závislé na zeměpisné šířce, ročním období, hodině, oblačnosti, stínění překážek, nadmořské výšce a na orientaci zemského povrchu. Insolace na jednotku plochy zemského povrchu je určena aktuálním rozptylem záření v atmosféře a úhlem, pod kterým záření na povrch dopadá. Maximální insolace nastává na daném místě v pravé poledne.

Při dopadu záření na solární panel může dojít ke ztrátě 2-10% energie záření vlivem jeho odrazu od povrchu panelu. Tomu se předchází využíváním antireflexních vrstev a různými úpravami povrchů. Jednou z takových úprav je vytvoření struktury „obrácených pyramid“, ve kterých se pohlcují i odražené paprsky světla.

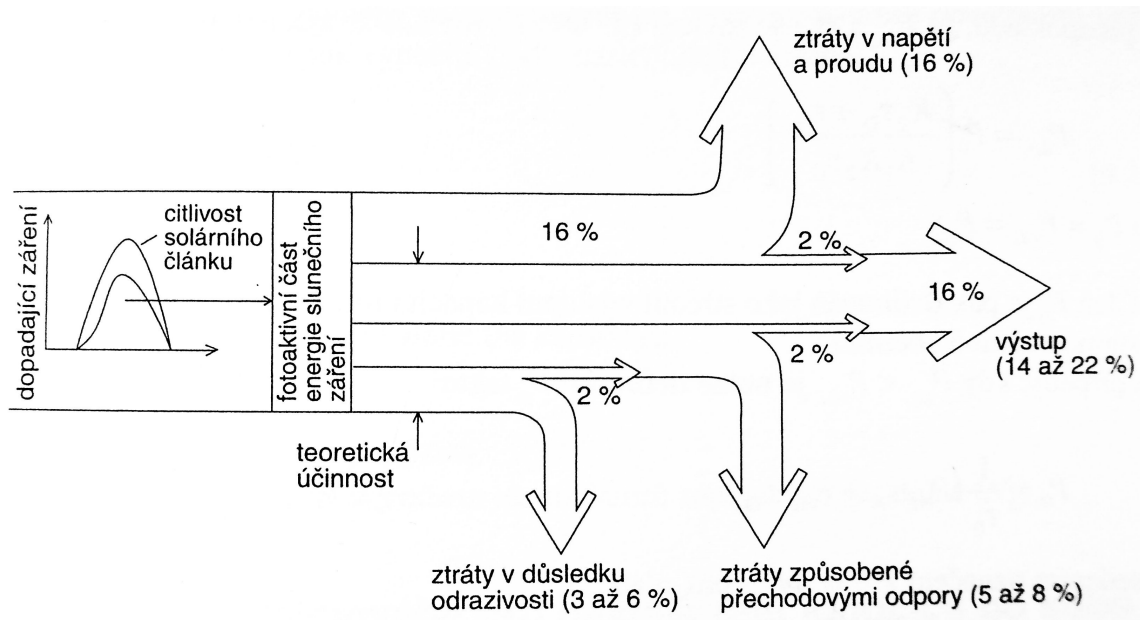


Obr.8: Schéma texturovaného solárního článku (Beranovský, 2001)

Obdobný efekt má také úprava rýhované struktury.

Velký potenciál má rovněž vytváření nanostruktur na povrchu křemíku, neboť je to postup poměrně jednoduchý a finančně nenáročný. Některé nanomateriály mohou navíc zamezit ulpívání nečistot na povrchu článku, které by mohly přispívat ke stínění, a tím i ke ztrátám.

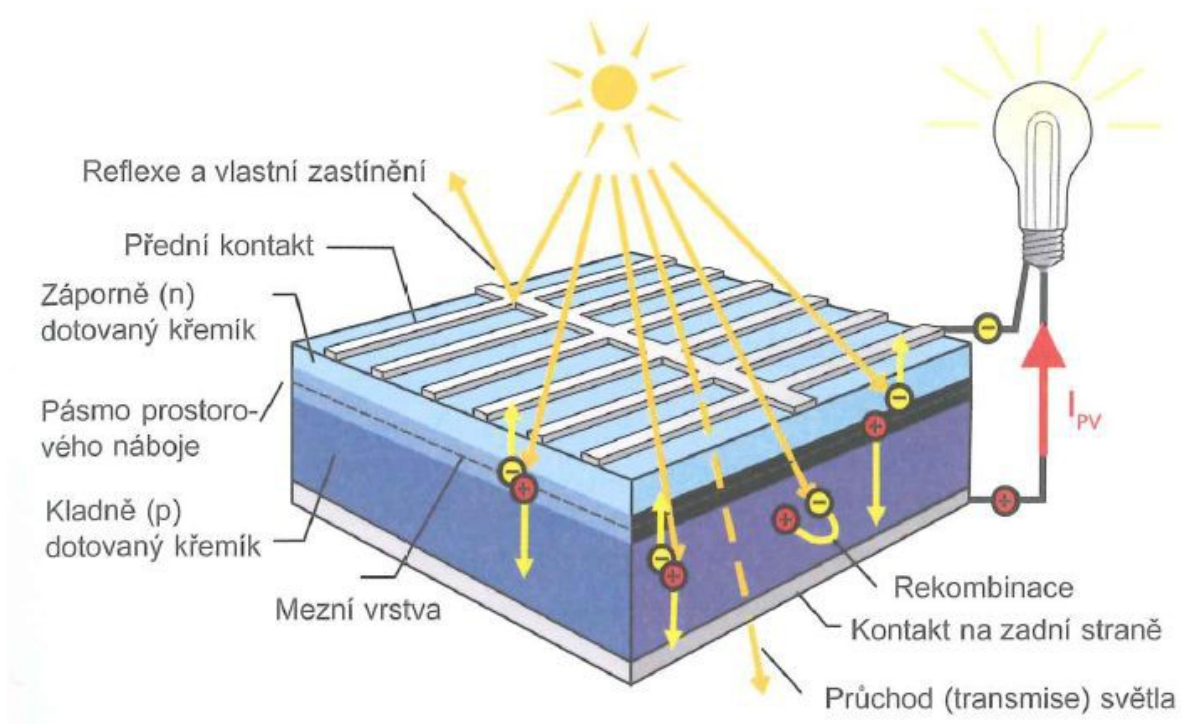
Z celkového záření dopadajícího na solární panel je absorbováno a zužitkováno pouze množství, které odpovídá spektrální citlivosti materiálu, z něhož je solární panel vyroben.



Obr.9: Vliv ztrát na celkovou účinnost solárního článku (Beranovský, 2001)

#### **4. Solární článek**

Klasický solární článek je složen ze dvou vrstev křemíku, z nichž každá je dotovaná jinou příměsí. Vrstva vystavená slunečnímu záření je záporně dotovaná fosforem, zatímco druhá vrstva pod ní je kladně dotovaná borem. Na přední i zadní straně jsou pak umístěny kovové elektrody, aby bylo možné odebrat z článku elektrický proud. Zadní strana bývá přitom sama jednou plošnou elektrodou. U vrstvy vystavené slunečnímu záření je nutné zajistit její propustnost, proto mají kontakty v této vrstvě podobu tenké kovové mřížky, která zakrývá pouze velmi malou část plochy. Aby se co nejvíce světla dostalo do článku, je důležité omezit jeho odraz od povrchu pomocí antireflexní vrstvy. Ta je příčinou černého zabarvení článků vyrobených z monokrystalického křemíku a nebo modrého zabarvení článků polykrystalických. Pro větší absorpci světla a minimalizování jeho ztrát v důsledku odrazu se povrch článku různými způsoby upravuje.



*Obr.10: Konstrukce solárního článku z krystalického křemíku (Haselhuhn, 2010)*



## 4.1 Typy solárních článků

Solární články mohou být vyrobeny z různých materiálů a upraveny do různých tvarů. Jednotlivé druhy článků se liší svými vlastnostmi i výkonnými parametry. Užívá se mimo jiné i proto, že je hned po kyslíku druhým nejrozšířenějším prvkem na Zemi, a je tedy snadno dostupný. Získává se z roztaveného křemenného písku při vysokých teplotách. Následně je chemicky čištěn, přičemž čistota může dosáhnout až 100%. Základním materiálem pro výrobu solárních článků jsou odpady z elektronického průmyslu obsahující křemík. Velmi čistý křemík lze využít k výrobě monokrystalických a polykrystalických článků. (Haselhuhn, 2010)

### 4.1.1 Monokrystalické články

Monokrystalické články jsou vyrobeny z jediného krystalu, jenž mívá velké rozměry. Obvykle mají tvar čtverce nebo čtverce se zaoblenými rohy. Hrany čtvercových článků měří 10, 12,5 a 15 cm. Novější články se zaoblenými rohy mají délku hrany 15,2 cm. Na nich jsou připevněny tři vodivé pásy, tzv. sběrnice. Protože je článek vyroben z jediného krystalu, má homogenně tmavomodré až černé zbarvení. Monokrystalické články mají velmi vysokou elektrickou kvalitu a jejich účinnost dosahuje až 21%, přičemž průměrná hodnota účinnosti činí kolem 15-17%.

Monokrystalický křemík se získává tzv. Czochralskiho procesem, kdy se do vysoce čisté křemíkové taveniny ponoří zárodek krystalu a při pomalém otáčení se pak vytahuje kulatá monokrystalická tyč, jejíž průměr je až 30 cm a délka dosahuje několika metrů. Její hmotnost může dosahovat až desítek kilogramů. Kulatá tyč je pak upravena na čtvercový průřez a je nařezána na jednotlivé destičky o tloušťce 0,3 mm. Při těchto úpravách vzniká poměrně hodně křemíkového odpadu. Články mohou být dle úpravy tyče buď kruhové, poločtvercové nebo čtvercové. Na destičky, které jsou již dotovány příměsí typu P, se následně napařuje tenká vrstva obsahující fosfor a obě vrstvy jsou připojeny k zadní kontaktní vrstvě. Nakonec se na horní vrstvu nanáší vrstva antireflexního materiálu, aby se od povrchu článku odráželo co nejméně světla a mohlo tak být využito maximum energie dopadajícího záření. V případě solárních panelů se užívají také antireflexní skla. Povrchy článků jsou rovněž upravovány do mikroskopicky malých struktur, kdy se pomocí laseru nebo mechanického popř. chemického zpracování vytvářejí malé pyramidální či rýhované struktury, které napomáhají pohlcovat světlo a ještě více tak napomáhají snížit odrazivost

světla.

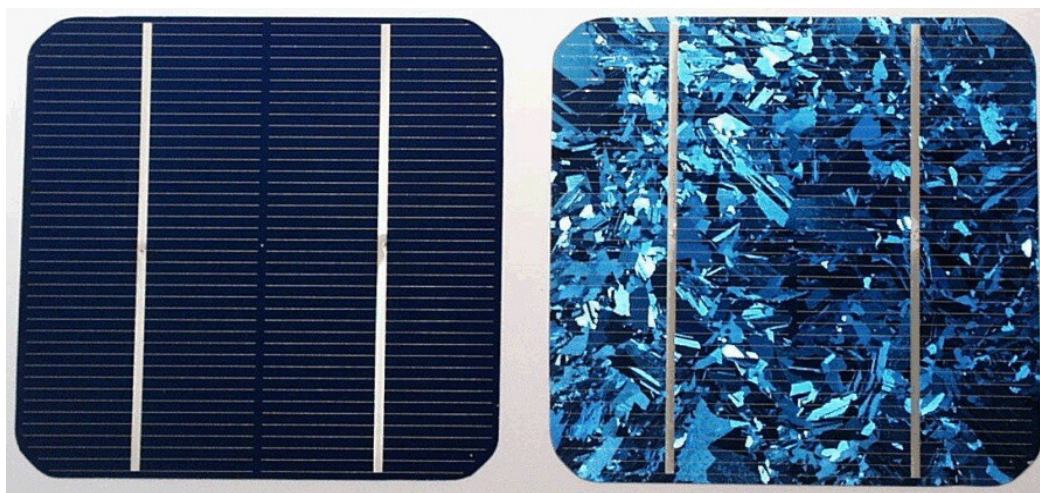


*Obr. 11: Monokrystal křemíku vyráběný pro polovodičovou elektroniku  
([https://www.frm2.tum.de/fileadmin/\\_processed\\_/csm\\_SiltronicSiliciumeinkristall\\_ba41669f4d.jpg](https://www.frm2.tum.de/fileadmin/_processed_/csm_SiltronicSiliciumeinkristall_ba41669f4d.jpg))*

#### **4.1.2 Polykrystalické články**

Tyto články lze již od pohledu rozeznat od článků monokrystalických. Jejich struktura se modře třpytí a lze v ní vidět jednotlivé krystaly. Vyrábějí se ve tvaru čtverce o délce hrany 10, 12,5, 15, 15,6 nebo 21 cm. Jejich účinnost se nachází v rozmezí 13-16%.

Výroba polykrystalického křemíku je snazší a levnější než u monokrystalického. Nejčastěji se užívá metoda blokového lití, kdy se křemík ve vakuu zahřívá na 1500°C a v kelímku z grafitu se kontrolovaně ochlazuje až k blízkosti bodu tání. Vznikají tak bloky 40 x 40 cm o výšce 30 cm. Tyto bloky se rozřezávají na tyče, z nichž se následně nařezávají jednotlivé destičky. V tomto případě je množství odpadu mnohem menší než při výrobě monokrystalů. Po nařezání destiček následují stejné úpravy jako u monokrystalických článků.



Obr.12: Články z monokrystalického (vlevo) a polykrystalického (vpravo) křemíku  
([http://www.czrea.org/files/images/OZE/FV\\_obr1\\_3.jpg](http://www.czrea.org/files/images/OZE/FV_obr1_3.jpg))

#### 4.1.3 Články z amorfního křemíku

Amorfní křemík netvoří krystalickou strukturu, ale spíše nepravidelně uspořádanou síť. První funkční solární články z tohoto druhu křemíku byly vyvinuty již v roce 1974. (Haselhuhn, 2010) Své využití našly zejména coby zdroje energie pro kapesní počítače, hodinky, kalkulačky, nebo kapesní svítilny. Jejich nevýhodou je poměrně malá účinnost, která během prvního roku expozice postupně klesá v důsledku tzv. **Staeblerova-Wronského jevu**.

Čistý amorfní křemík vykazuje vysokou hustotu defektů (poměr počtu defektů v materiálu ku jeho velikosti), které snižují jeho vodivost a komplikují zakomponování příměsí. Proto se amorfní křemík sytí atomy vodíku, které zvyšují jeho vodivost a usnadňují jeho dotaci příměsovými prvky. Amorfní křemík sycený atomy vodíku neboli **hydrogenizovaný amorfní křemík** se označuje jako a-Si:H. Dopadá-li na článek z hydrogenizovaného amorfního křemíku světlo, dochází v něm v průběhu prvních šesti až dvanácti měsíců osvětlení ke vzniku párů elektronů a děr, které však následně rekombinují se sousedními atomy křemíku, jejichž vzájemné vazby jsou slabší. Tím se snižuje účinnost článku. Po určité době se však účinnost ustálí na asi o 15% nižší hodnotě, která nadále zůstává stabilní. Tato hodnota se nazývá **jmenovitý výkon**, který je u amorfních křemíkových článků uváděn výrobcí přednostně. Mezi výhody hydrogenizovaného

amorfního křemíku patří nejen nízká cena, ale i schopnost absorbovat světlo již ve vrstvě tenčí než 1  $\mu\text{m}$  ve srovnání s dvěstěkrát tlustší vrstvou křemíku v jiném uspořádání. Tyto tenké vrstvy se dají nanášet na levné podkladové plochy ze skla, oceli nebo z plastu. Nevýhodou článků z amorfního křemíku je jejich malá účinnost, která se pohybuje mezi 5-10%. Využívají se tedy spíše v takových elektrických zařízeních, jež mají pouze malou spotřebu energie.



Obr.13: Solární článek z amorfního křemíku  
(<http://solarmat.es/img/cms/silicio%20amorfo.jpg>)

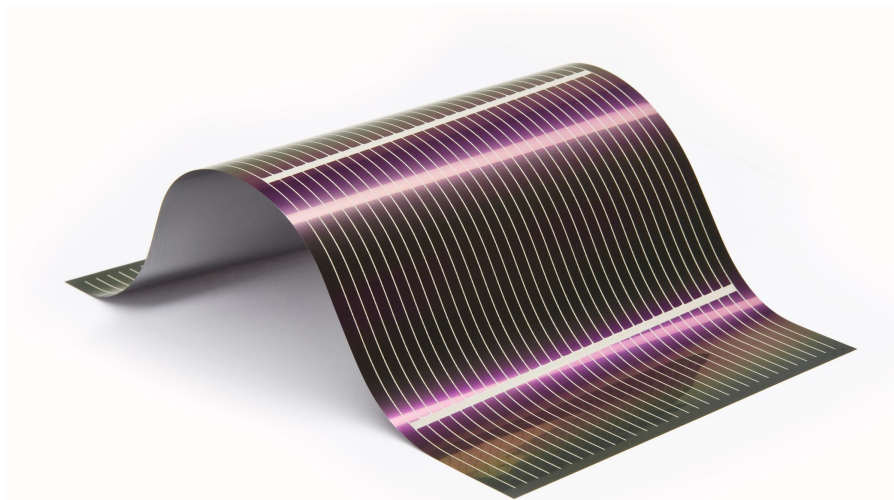
#### 4.1.4 Tenkovrstvé články z amorfního křemíku

Tenkovrstvé články z amorfního křemíku jsou výhodné díky nižší citlivosti na teplotu a zastínění, flexibilitě, absorpci širší oblasti ze slunečního spektra, homogennímu vzhledu, eventuálně také průhlednosti materiálu, která umožňuje umístění modulů na budovy včetně oken, a tak efektivně využít jejich plochu, případně i pozitivně přispět k jejich estetice. Při pohledu z větší vzdálenosti mají tyto články homogenní vzhled a nepůsobí příliš nápadně. Je tedy možné je přizpůsobit architektuře dané stavby. Rovněž se

dají umístit na vozovky, pouliční osvětlení a na jiné venkovní plochy. Další výhodou tenkovrstvých článků je možnost automatizace jejich výroby, která je u klasických křemíkových destiček složitější, a také nižší cena článků a spotřeba materiálu k jejich výrobě ve srovnání s krystalickými. Tenkovrstvé články se navíc nemusejí vodivě spojit pájením, neboť jsou vodivě propojovány již během procesu výroby.

Jejich tloušťka dosahuje 1-6  $\mu\text{m}$ . Princip získávání elektrického proudu je ve své podstatě stejný jako u krystalických článků, tedy na generaci volných elektronů a děr vlivem slunečního záření. Podkladem pro nanášení jednotlivých vrstev bývá sklo, kov, popř. plastová fólie. Na tu se nanáší vysoce průhledná a vodivá vrstva z oxidu kovu (oxid zinečnatý, oxid cínčitý nebo oxid indium-cínčitý). Antireflexní vrstvu tvoří materiál anorganický (oxidy křemíku, hliníku či titanu, sulfid zinečnatý, aj.) nebo organický na bázi polyamidů (Kapton, Mylar, Aclar). Článek se nakonec zakryje ochrannou vrstvou ze skla a zapouzdří se kompozitním materiálem.

Nevýhodou tenkovrstvých článků je téměř poloviční účinnost ve srovnání s články z krystalického křemíku. To je však možné vykompenzovat využitím větší plochy.



*Obr. 14: Tenkovrstvý článek z amorfního křemíku*

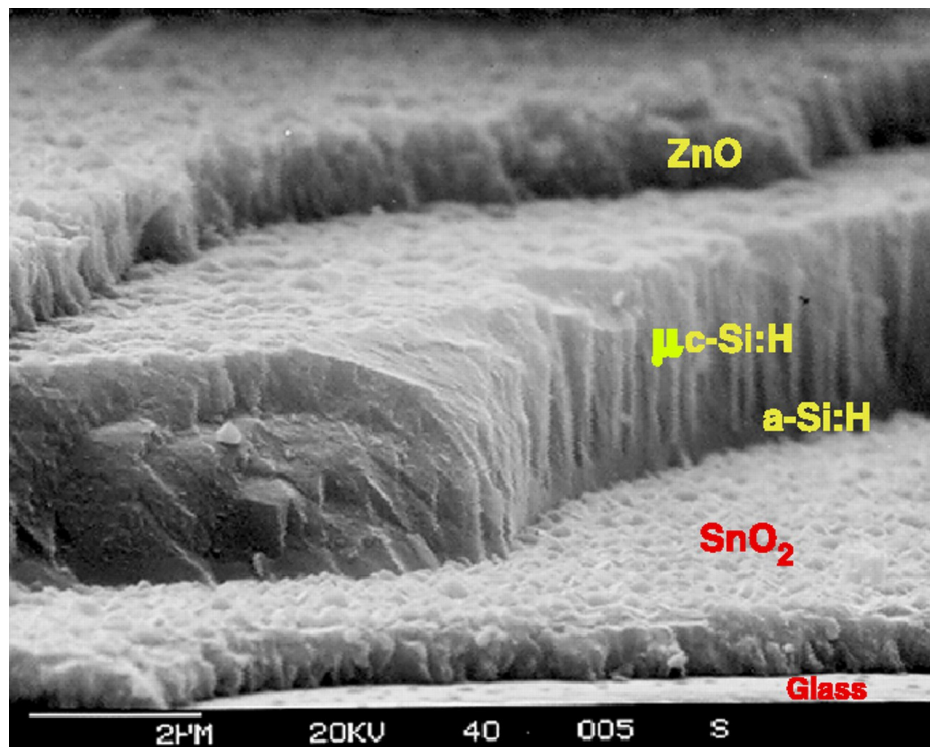
*([https://staticseekingalpha.a.ssl.fastly.net/uploads/2016/8/27/6692461-14723025884176414\\_origin.jpg](https://staticseekingalpha.a.ssl.fastly.net/uploads/2016/8/27/6692461-14723025884176414_origin.jpg))*

Kombinací křemíku krystalického a amorfního v tzv. tandemovém uspořádání lze získat **mikromorfni solární články**. Mikrokrystalický křemík je alotropická modifikace



křemíku, která obsahuje zrnka krystalického křemíku o rozměrech mikrometrů až nanometrů uvnitř amorfni fáze. Tento křemík se pak kombinuje s klasickým amorfním křemíkem.

Při výrobě těchto článků se zároveň upravuje jejich struktura, aby se co nejvíce využila sluneční energie. Na povrchu článku se vytvoří malé pyramidy, jež mají v porovnání s hladkou úpravou lepší optické i elektrické vlastnosti. Mikromorfni články tak vykazují mnohem větší využití slunečního spektra a oproti klasickým amorfním článkům mají dvojnásobnou účinnost, která dosahuje okolo 11%.



Obr.15: Struktura mikromorfniho článku ve skenovacím elektronovém mikroskopu

(<https://d2ufo47lrtsv5s.cloudfront.net/content/sci/285/5428/692/F5.large.jpg>)

#### 4.1.6. Články CIS (Copper-Indium di-Selenide) – z diselenidu mědi a india

Mezi články s nejvyšší účinností patří také tzv. CIS články (z angličtiny „copper-

indium di-selenide“), tedy články vyrobené z diselenidu mědi a india. Vrstva této látky se při teplotě kolem 500°C nanese ve vakuové komoře na nosné sklo a vytvoří se tak kontaktní vrstva s vodivostí typu P. Druhou vrstvu tvoří sulfid kademnatý vykazující vodivost typu N. Tato vrstva napomáhá snižovat ztráty na účinnosti způsobené poruchami v krystalové mřížce. Na rozdíl od článků z amorfního křemíku nepodléhají CIS články procesu stárnutí vlivem působení světla. Nejsou však příliš stabilní v horkém a vlhkém prostředí, proto je důležité je dobře zapouzdřit a chránit je proti vlhkosti. Solární moduly CIS mají tmavě šedé až černé zbarvení.

Obdobou článků CIS jsou články CIGS (z angličtiny „copper-indium-gallium di-selenide“), které obsahují diselenid mědi, india a gallia.



*Obr.16: CIS články*

[http://img.nauticexpo.com/images\\_ne/photo-g/49072-3256695.jpg](http://img.nauticexpo.com/images_ne/photo-g/49072-3256695.jpg)

#### **4.1.7.Články z telluridu kadmia**

Články, jejichž základem je tellurid kadmia, také patří mezi tenkovrstvé, neboť k jejich účinnému využití stačí vrstva v řádku několika mikrometrů. Nejvíce světla přitom absorbuje již první mikrometr celé vrstvy. Články z telluridu kadmia jsou výhodné svou nízkou cenou a také poměrně krátkou dobou potřebnou k jejich výrobě, která trvá jen

několik hodin.



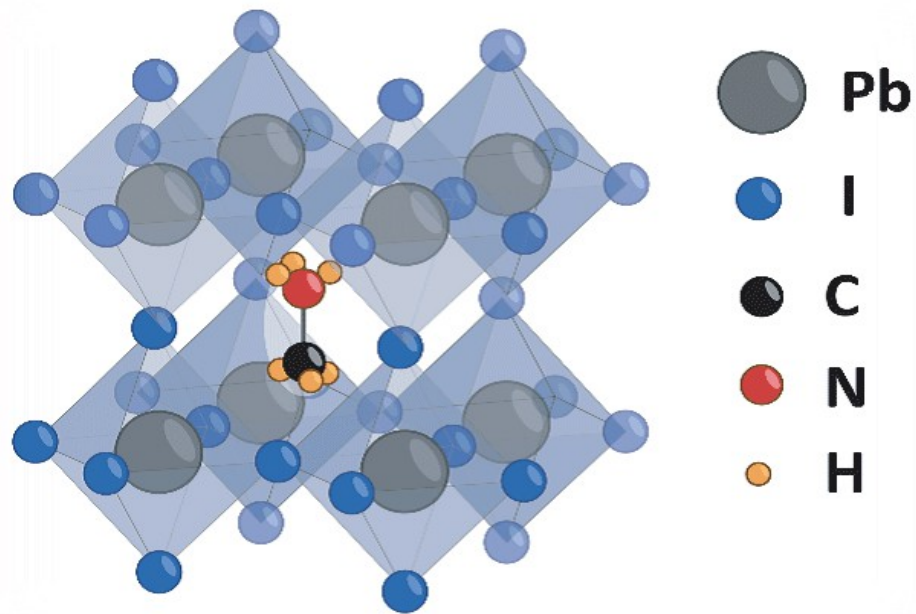
*Obr.17: Solární panely z telluridu kadmia*

*(<http://ep.yimg.com/ay/yhst-21796510175022/micromorph-tandem-thin-film-solar-module-130w-3.gif>)*

#### **4.1.8 Perovskitové články**

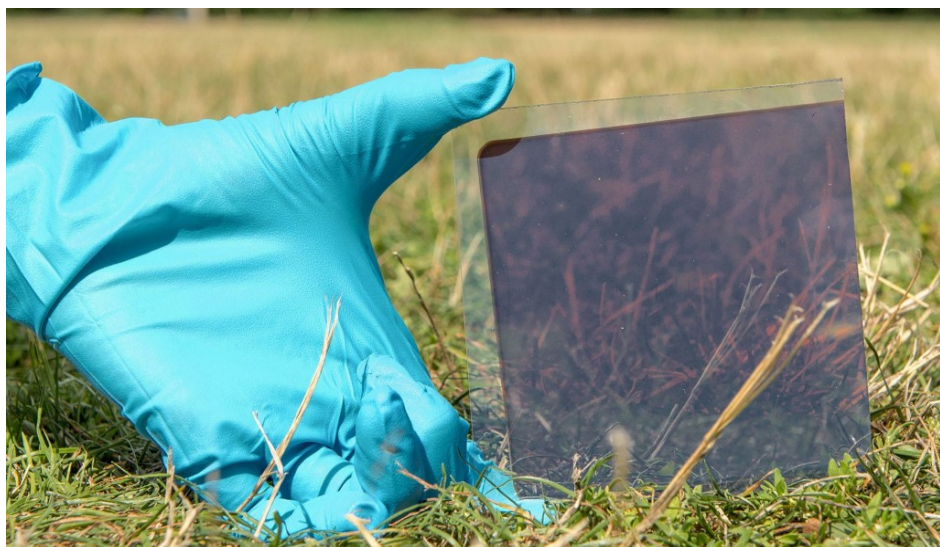
Velmi nadějnými jsou články vyrobené z perovskitových materiálů, což jsou látky mající obdobnou krystalovou strukturu jako oxid titaničito-vápenatý – perovskit. Mezi výhody těchto článků patří jejich nízká hmotnost v porovnání s křemíkovými, dále možnost jejich nanášení v tenkých vrstvách na povrch jakéhokoli tvaru a jejich barevné variace. Jejich výroba navíc nebude tolik nákladná jako u krystalických křemíkových článků, v nichž musí být křemík náročným způsobem čištěn.





Obr.18: Struktura perovskitové látky, zde methylammoniumtrijodid olova

(<https://www.nrel.gov/pv/assets/images/perovskite-1-model.gif>)



Obr.19: Perovskitový solární článek

(<http://www-tc.pbs.org/wgbh/nova/next/wp-content/uploads/2014/02/perovskite-cell-sunlight-1024x575.jpg>)

## 4.2 Materiály

Solární články jsou vyrobeny ze čtyřvazného prvku jako je křemík nebo germanium, popř. selen nebo tellur. Významné jsou však také sloučeniny, které vznikly spojením trojvazného a pětivazného prvku, tzv. sloučeniny typu III-V. Mezi takové sloučeniny patří například arsenid gallia (GaAs) tvořený pětivazným atomem arsenem a trojvazným atomem gallia. Pětivazný prvek má ve své valenční vrstvě 5 elektronů, trojvazný 3 elektrony. Po sloučení těchto prvků zaplní přebytečný pátý elektron pětivazného atomu díru, která vznikne v důsledku chybějícího elektronu k vytvoření čtvrté vazby u trojvazného atomu. Dohromady tedy vytvářejí systém se čtyřmi vazbami tak jako křemík nebo germanium. Tyto sloučeniny krystalují obdobně jako sfalerit, jehož krystalová mřížka odpovídá diamantu, ovšem s tím rozdílem, že se v ní střídají trojvazné a pětivazné atomy.

Vedle kombinací III-V mohou existovat i další kombinace jako např.: II-IV, IV-IV (SiC a slitina Ge-Si), II-VI, IV-VI. Mezi amfoterní polovodiče vhodné k výrobě PN přechodů patří sloučeniny PbSe, PbTe, CdTe, Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>, Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>.

### 4.2.1 Prvky

#### 4.2.1.1 Křemík (Si)

Pro solární články je nejvýznamnější křemík, zejména krystalický, jehož struktura odpovídá plošně centrované kubické mřížce typu diamantu. Koncentrace nositelů náboje při pokojové teplotě v křemíku činí asi  $1,5 \cdot 10^{16} \text{ m}^{-3}$ . Hodnota jeho relativní permitivity je 11,8. Křemík je nejrozšířenějším prvkem zemské kůry, je tedy velmi snadno dostupný. Získává se převážně z přírodního křemene, tedy z oxidu křemičitého (SiO<sub>2</sub>), a to o čistotě asi 99%. V elektronice se začal ve větší míře využívat až během šedesátých let, a to především kvůli složitým metodám jeho čištění. Z hlediska vlastností příměsového polovodiče je křemík amfoterní, což znamená, že může vykazovat příměsovou vodivost elektronovou i děrovou. Vystupuje-li jako polovodič typu N, bývá dotován antimonem, fosforem nebo arsenem, jako polovodič typu P pak atomy boru, hliníku, gallia nebo india.

#### **4.2.1.2 Germanium (Ge)**

Dříve než se začal používat křemík, bylo hlavním materiálem pro polovodičovou elektroniku germanium. Germanium je však poměrně vzácné a součástky z něj vyrobené bývaly zničeny již při zahřátí na teploty v rozmezí 70-100°C, a tak se od jeho užívání postupně upustilo.

#### **4.2.1.3 Selen (Se)**

Selen je nejstarším známým polovodičem. Existuje ve dvou modifikacích, z nichž jedna je amorfní. Druhá, krystalická forma, je tzv. šedý selen, který krystalizuje v hexagonálním uspořádání. Selen je polovodičem typu P. Nejvíce je však využíván v xerografii, a to v podobě polykrystalických vrstev.

### **4.2.2 Sloučeniny**

Kromě samotných prvků se v solárních článcích využívají také sloučeniny, zejména vzájemné sloučeniny prvků třetí a páté podskupiny periodické soustavy. Hojně využití v této oblasti však našly mnohé binární sloučeniny jako např. sulfidy nebo oxidy kovů.

#### **4.2.2.1 Arsenid gallitý (galliumarsenid) (GaAs)**

Arsenid gallitý je po křemíku druhým nejpoužívanějším materiálem pro výrobu solárních článků. Přestože jejich účinnost dosahuje v průměru 17,5%, která je vyšší než u křemíkových článků, hraje zde roli také jejich cena, neboť arsenid gallitý je podstatně dražší. Tím stoupá také cena jejich výkonu. Dalším faktorem, který znevýhodňuje články na bázi GaAs, je obtížná a nákladná technologie výroby a čištění jeho monokrystalů. Přesto však zůstává jedním z nejperspektivnějších polovodičových materiálů v solární energetice.

Jednou z výhod článků z GaAs je již zmíněná větší účinnost ve srovnání s křemíkovými články. Ta se u GaAs příliš nemění ani za vyšších teplot (okolo 100°C), zatímco u křemíkových je pokles účinnosti znatelný. Články z GaAs jsou tedy vhodné pro práci za vysokých teplot. Je-li GaAs využit v tenkovrstvé technologii, postačí k výrobě efektivního článku tloušťka 60 μm, zatímco u křemíku je třeba nejméně 150 μm. Důvodem je větší hustota GaAs. V rámci vesmírných aplikací je GaAs výhodnější i z toho důvodu,

že vykazuje mnohem větší odolnost vůči kosmickému záření.

#### **4.2.2.2. Tellurid kademnatý (CdTe)**

Tellurid kademnatý je velmi nadějným materiálem pro využití ve fotovoltaice, neboť je schopen sluneční záření dobře absorbovat a měnit ho na elektrickou energii. Prakticky je aplikován při napájení přístrojů k navigaci a telekomunikaci nebo ve výrobě spotřebního zboží, např. kalkulaček. Vysloužilé solární moduly z CdTe jsou považovány za speciální odpad, přestože kadmium v těchto sloučeninách není toxické. Přímé nebezpečí hrozí pouze při vzniku toxických plynů, dojde-li k požáru těchto modulů.

#### **4.2.2.3 Sulfid kademnatý (CdS)**

Sulfid kademnatý se v solárních článcích uplatnil zejména ve formě tenkých vrstev v kombinaci se sulfidem měďným ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ), které byly původně vyvinuty pro kosmické aplikace. Články s tímto přechodem však nejsou příliš stabilní. Z toho hlediska jsou výhodnější články s kombinací CdS a CdTe, a to jak ve formě tenkých vrstev, tak i ve formě monokrystalické. Samotný CdS našel využití ve výrobě fotoelektrických součástek, především fotorezistorů.

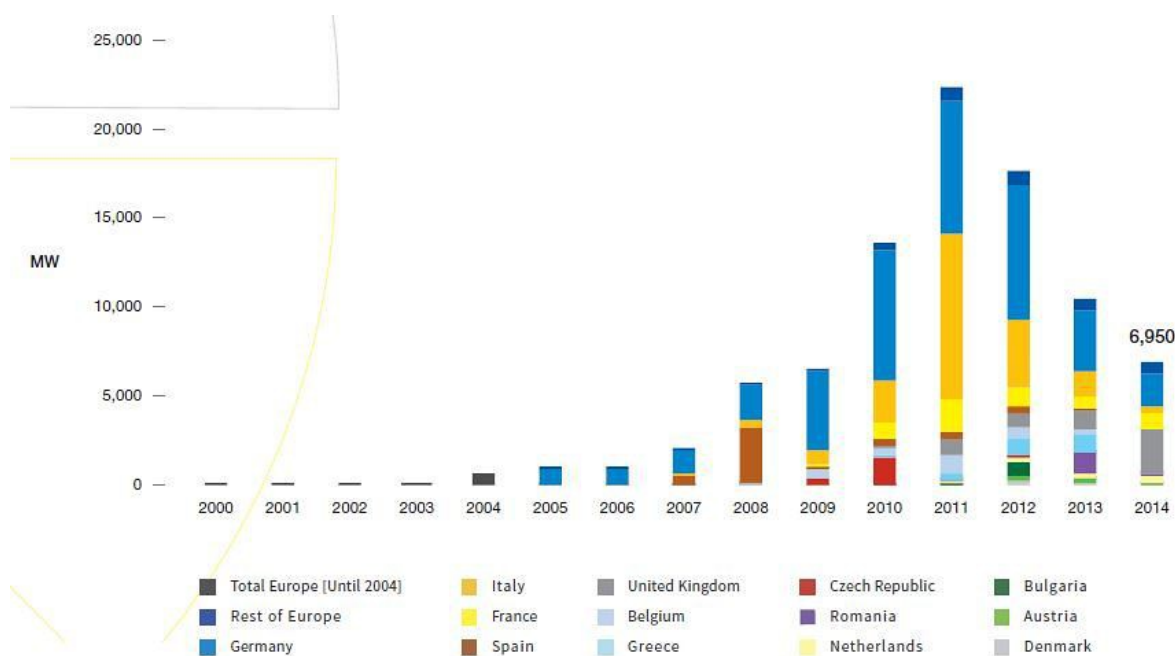
#### **4.2.2.4 Oxidy**

V solárních článcích se používá mnoho různých oxidů. Jedním z nich je například oxid zinečnatý ( $\text{ZnO}$ ), který je vodivý a lze ho tedy využít k vytvoření vodivé vrstvy článku. Mezi další oxidy patří oxid titaničitý ( $\text{TiO}_2$ ), oxid křemičitý ( $\text{SiO}_2$ ) a oxid hlinitý ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), které slouží jako antireflexní anorganický materiál na povrchu článku.

## 5. Solární energetika

Během roku 2014 vzrostlo světové množství energie vyrobené fotovoltaickými zařízeními o celých 25% na rekordních 227 GW. V roce 2015 bylo toto množství vyrobené za rok téměř desetinásobně vyšší v porovnání s předchozím desetiletím. Většina této energie byla vyrobena v Číně, Japonsku a Spojených Státech. Rozvoj obnovitelných zdrojů energie je v současné době (2017) ve světě hojně podporován.

V rámci Evropy dosáhl roční instalovaný výkon fotovoltaických elektráren maxima v roce 2011. Na následujícím grafu lze vidět do té doby stoupající roční instalovaný výkon podpořený mnoha dotacemi, ale i pokles v důsledku rušení těchto dotací mezi lety 2012 a 2014.



Obr.20: Vývoj nové instalované kapacity FVE v Evropě

(<http://oenergetice.cz/obnovitelne-zdroje/evropska-solarni-energetika-zakladni-statistiky-a-ocekavany-vyvoj/>)

V České republice prošla solární energetika velkým rozmachem na přelomu let 2009 a 2010, kdy se instalovaný objem solárních elektráren zvýšil až na čtyřnásobek. Od roku 2012 však solární energetika víceméně stagnuje, a to především z důvodu pozastavení státní podpory novým zdrojům od roku 2014. Prodej elektrické energie vyrobené solárními zařízeními představoval pro mnoho lidí možnost snadného výdělku, a to nejen prodejem

energie, ale také obdržením dotací pro instalaci zařízení. Tato výhoda však v roce 2014 zanikla. Rovněž došlo ke snížení výkupní ceny. Ještě v roce 2009 byla výkupní cena vyrobené elektrické energie okolo 13 Kč/kWh. V roce 2013 však tato cena klesla až na 3 Kč/kWh. V porovnání s obdobím na přelomu desetiletí se tedy dnes prodej elektrické energie ze solárních zařízení tolik nevyplatí.

### **5.1 Návratnost investice do solární elektrárny**

Pro běžného majitele rodinného domu, který zvažuje pořízení fotovoltaického zařízení na svůj dům, je třeba posoudit, nakolik se mu jeho investice bude vyplácet. To přitom závisí na mnoha faktorech, jako jsou aktuální cena materiálu, náklady na výrobu a instalaci, a tedy celková pořizovací cena solárního systému. Rovněž záleží na tom, kolik peněz může majitel solárního systému obdržet od energetické společnosti, která by od něj elektřinu odkupovala v případě, že by vyráběnou elektrickou energii dodával do sítě. Pokud spotřebitel vlastní solární systém čistě pro svou soukromou potřebu, tj. aby ušetřil peníze za elektřinu, kterou by jinak odebíral od energetické společnosti, budou se mu tímto způsobem nejprve několik let „splácet“ pořizovací náklady. Dále pak může získávanou elektrickou energii využívat pro vlastní spotřebu, aniž za ni musel platit. Pro jednotlivé spotřebitele je tedy pořízení solárních systémů výhodné.

Co se týká soukromých podniků, které chtějí elektrickou energii prodávat energetickým společnostem za účelem většího zisku, není už v současné době tato cesta příliš lukrativní vzhledem ke změně dotační politiky a poklesu výkupních cen (viz. výše).

## **6. Solární energetika z ekologického hlediska**

Mezi kladné stránky solárních zařízení patří skutečnost, že jsou velmi šetrné k životnímu prostředí. Při výrobě elektrické energie jejich prostřednictvím nevzniká odpad a v okolí nezpůsobují žádný hluk. Chod solární elektrárny nepřispívá ke znečištění okolního prostředí ani ke vzniku skleníkových plynů. energii ze Slunce bude navíc možné využívat neustále, zatímco u ostatních zdrojů je možnost jejich využívání časově omezena.

Na druhou stranu je zde i řada negativních stránek. Přestože samotný provoz solárních elektráren nijak nezatěžuje životní prostředí, při výrobě solárních modulů se používají toxické a žíravé látky jako hydroxid sodný nebo kyselina fluorovodíková a zároveň také vzniká určité množství skleníkových plynů při jejich zpracování.

V CdTe článcích je obsaženo kadmium, které je jako samotný prvek velmi toxické, avšak v článcích vystupuje ve formě sloučenin, jež toxické nejsou. Při zkoumání lomů modulů a jejich vymývání deštěm bylo zjištěno, že koncentrace kadmia se nachází pod mezní hodnotou pro pitnou vodu. Jediné riziko tvoří zplodiny, které by vznikly při případném požáru těchto článků. Vysloužilé moduly CdTe jsou však přesto považovány za speciální odpad.

U článků CIS se používají tenké vrstvy sulfidu kademnatého, jsou však pokládány za ještě méně znepokojivé než články CdTe.

Technická životnost solárních modulů činí kolem 30 až 35 let. Vyřazené nebo vadné solární moduly z krystalického křemíku se však dají recyklovat, ať už se jedná o recyklaci surovin, křemíkových destiček nebo hotových solárních článků. Ve speciální peci se moduly rozkládají při teplotě 500°C na jednotlivé složky. Přitom se spálí zalévací materiál a zadní fólie, a tak se jednotlivé články uvolní a mohou být znovu zpracovány a použity. Recyklované solární články mají o něco nižší účinnost, recyklací je však možné ušetřit až 80% energie, která by jinak byla potřebná k výrobě nových článků. U modulů z amorfního křemíku je recyklace možná také, lze z nich však zpětně získat pouze sklo a kov.

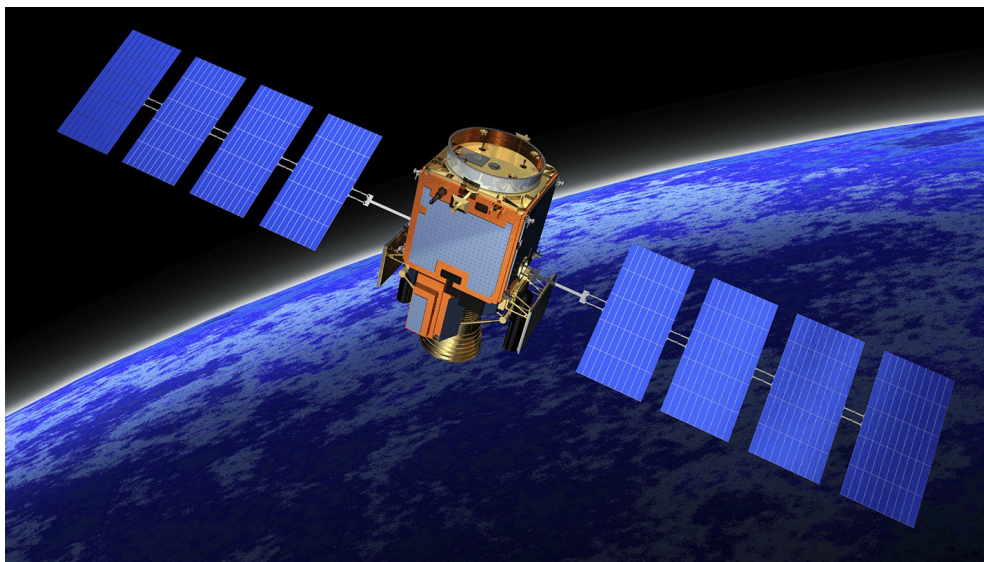
Problémem je také zastavování úrodných pozemků solárními elektrárnami, ke kterému se majitelé pozemků rozhodují kvůli většímu zisku, než jaký mají z prodeje zemědělských plodin. Při zastavění větší plochy může být vážně narušen daný ekosystém,

což může mít neblahý dopad nejen na pěstování plodin, ale také na živočichy, které v tomto ekosystému žijí.



## **7. Solární energetika v kosmických aplikacích**

Energii vyzařovanou Sluncem mohou mnohem efektivněji než na Zemi využít solární zařízení nacházející se ve vesmíru. Je tomu tak zejména proto, že na Zemi dochází ke střídání dne a noci a také se určitá část energie ztrácí v důsledku rozptylu světla v atmosféře a dalších jevů (viz.kapitola 3.4). Prakticky veškerá zařízení ve vesmíru, která potřebují ke svému fungování elektrickou energii, využívají solární panely. Celkově jsou přitom tato zařízení konstruována tak, že se solární panely mohou volně otáčet směrem ke Slunci, i když se samotná zařízení pohybují. Mohou tak neustále získávat ze Slunce maximum energie. Obdobně je možné nastavit otáčení panelů tak, aby se v případě, že jsou baterie zcela nabity nebo že je množství vyráběné elektrické energie vyšší než množství potřebné k fungování, otočily panely naopak od Slunce.



*Obr.21: Družice poháněná elektřinou ze solárních panelů*

*([https://technology.nasa.gov/t2media/tops/img/LEW-TOPS-](https://technology.nasa.gov/t2media/tops/img/LEW-TOPS-50/iStock_000003661806_LEW-18762-1_orange-satellite_1425x780-300DPI.jpg)*

*50/iStock\_000003661806\_LEW-18762-1\_orange-satellite\_1425x780-300DPI.jpg)*

## **8. Začlenění solární energie do výuky na školách**

Téma solární energie v sobě spojuje záležitosti týkající se vlastností a využití polovodičů, problematiku energie a jejích vzájemných přeměn a také vlastnosti elektromagnetického záření a jevy s ním spojené. Protože jsou solární zařízení využívána ve vesmíru, může být toto téma zmíněno také v souvislosti s astrofyzikou. Nabízí se tedy několik fyzikálních kapitol, do nichž je vhodné solární energetiku v menší či větší míře zařadit, a to jak na základních školách, tak i na středních.

Solární energetika má také návaznost na některá témata v chemii. Je možné ji alespoň okrajově zařadit do kapitoly o prvcích druhé vedlejší podskupiny periodické soustavy (zinek, kadmium, rtuť), do kapitoly o prvcích čtvrté hlavní podskupiny (zejména u křemíku) nebo také do problematiky chemických vazeb, neboť sloučeniny typu CdTe jsou velmi zajímavé z hlediska valence. Valence těchto sloučenin však spadá spíše do nadstandardního učiva a je vhodné ho zařadit spíše do zájmového semináře či kroužku než do klasických hodin.

Solární energetiku lze zmínit v rámci výchovy k ekologii, a to jak z pozitivního, tak i z negativního hlediska, zejména proto, že se tato zařízení využívají ve stále větší míře a bude to tedy důležité téma i v budoucích letech.

Energetika jednotlivých zemí spadá rovněž do předmětu geografie.

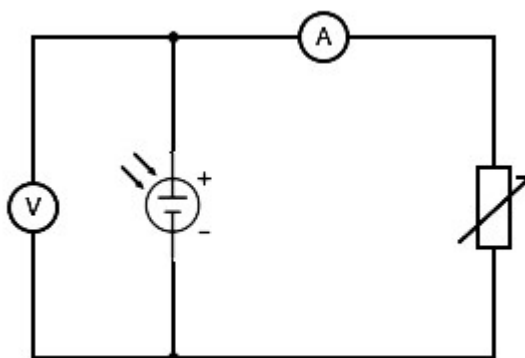
V rámci solární energetiky je rovněž možné studenty vést k ekonomickým úvahám a přimět je k rozvoji myšlení v oblasti financí a ekonomiky.

## PRAKTICKÁ ČÁST – Experimenty se solárními články

### 1. Měření voltampérové charakteristiky solárního článku při konstantním osvětlení

**Pomůcky:** solární článek, zdroj osvětlení, vodiče, dva multimetry, reostaty o různých rozsazích

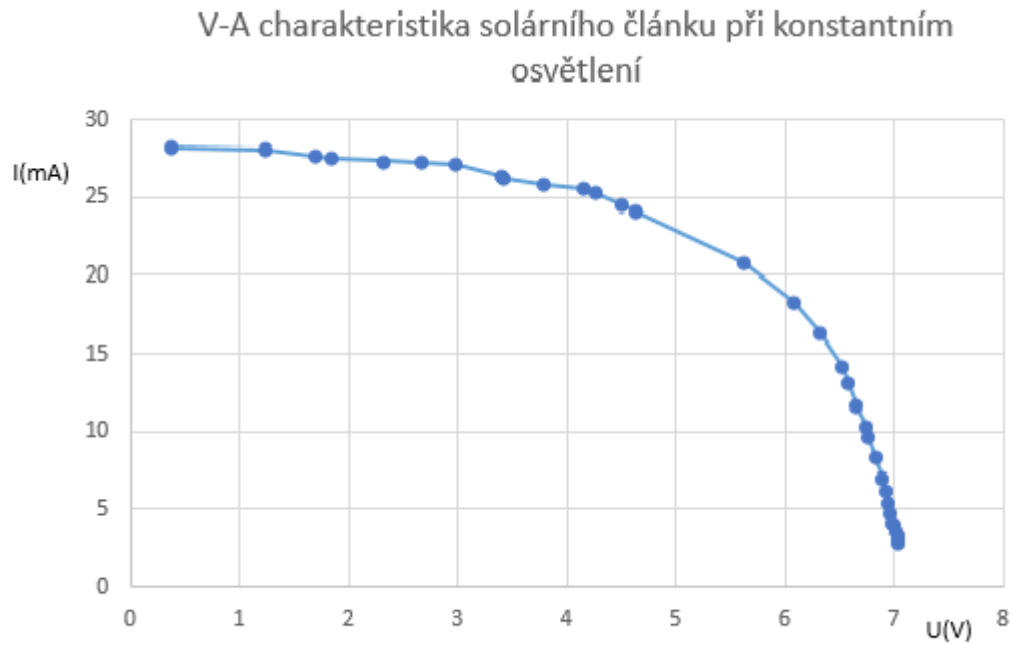
**Postup:** Sestavíme obvod dle schématu:



*Schéma 1: Obvod pro měření V-A charakteristik solárního článku*

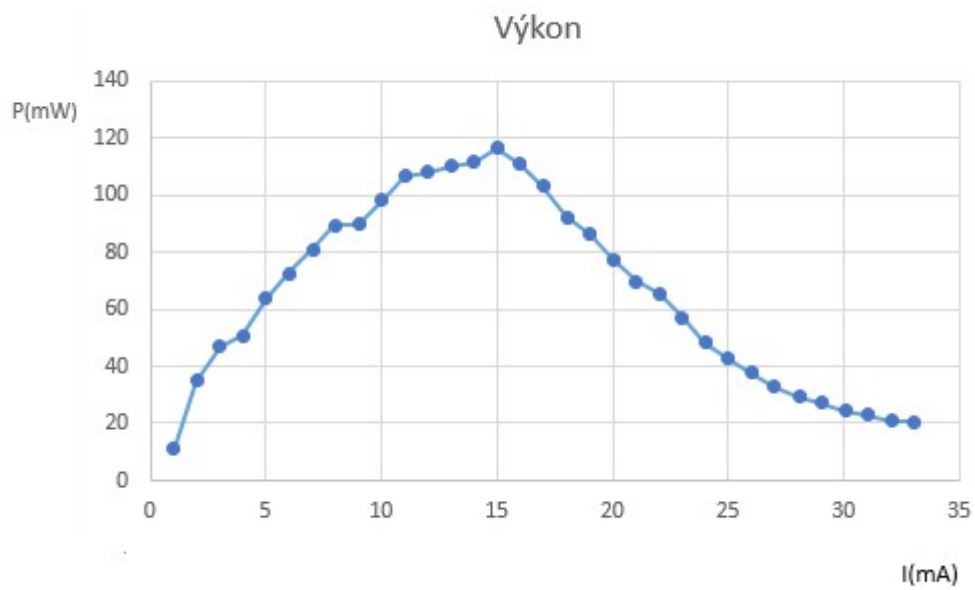
#### A) Měření V-A charakteristiky článku za vyššího konstantního osvětlení

Jeden z multimetrů nastavíme na měření proudu (ampérmetr) a zapojíme ho k solárnímu článku sériově, druhý nastavíme na měření napětí (voltmetr) a zapojíme ho paralelně. Do obvodu dále zapojíme reostat. Článek vystavíme zdroji světla a zaznamenáme hodnoty proudu a napětí. Pomocí reostatu pak průběžně měníme hodnotu elektrického odporu. Při každé změně hodnoty odporu zaznamenáme hodnoty proudu a napětí. Po proměření těchto hodnot s reostatem o daném rozsahu zapojíme do obvodu jiný reostat o odlišném rozsahu a celý postup opakujeme. Ze zaznamenaných hodnot proudu a napětí pak vyneseme graf, který představuje voltampérovou charakteristiku solárního článku.



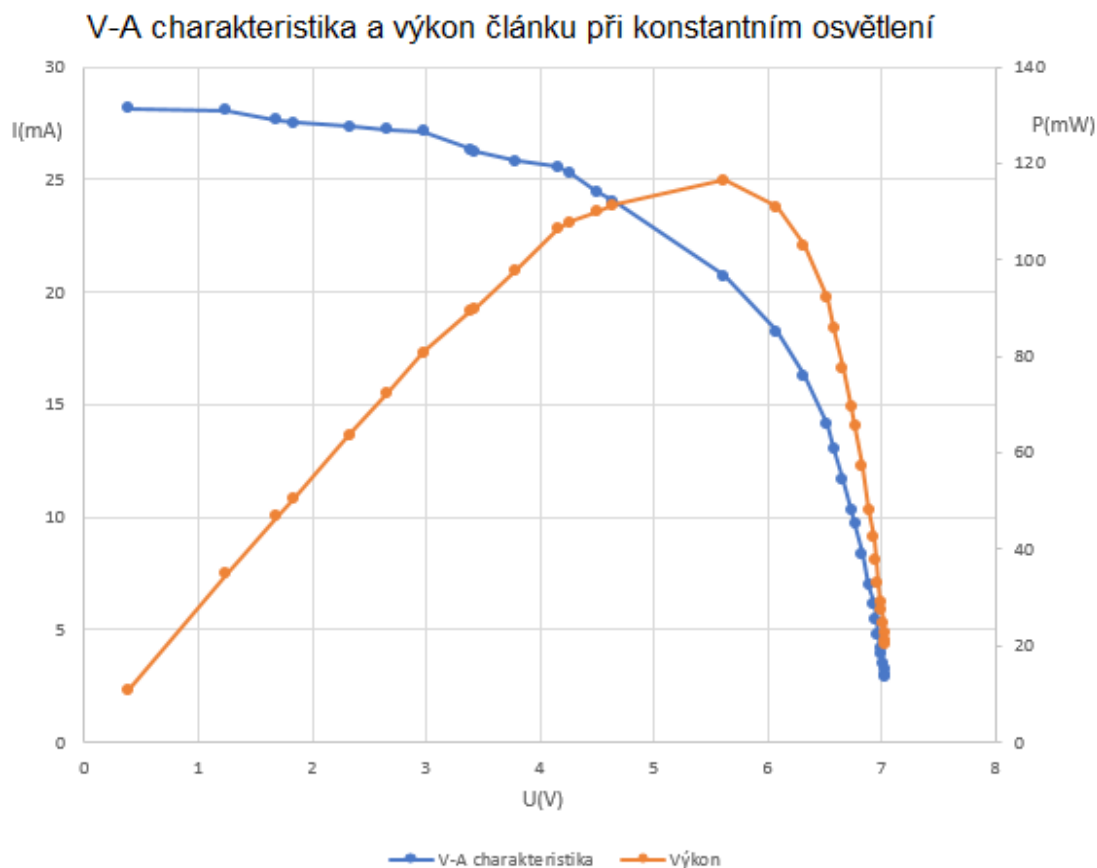
*Graf 1: Voltampérová charakteristika solárního článku při konstantním osvětlení*

Dále vypočítáme výkon pro každou hodnotu odporu a vyneseme graf jeho závislosti na hodnotách proudu v obvodu.



*Graf 2: Výkon solárního článku při konstantním osvětlení*

Voltampérovou charakteristiku i výkon můžeme společně znázornit i v jednom grafu:



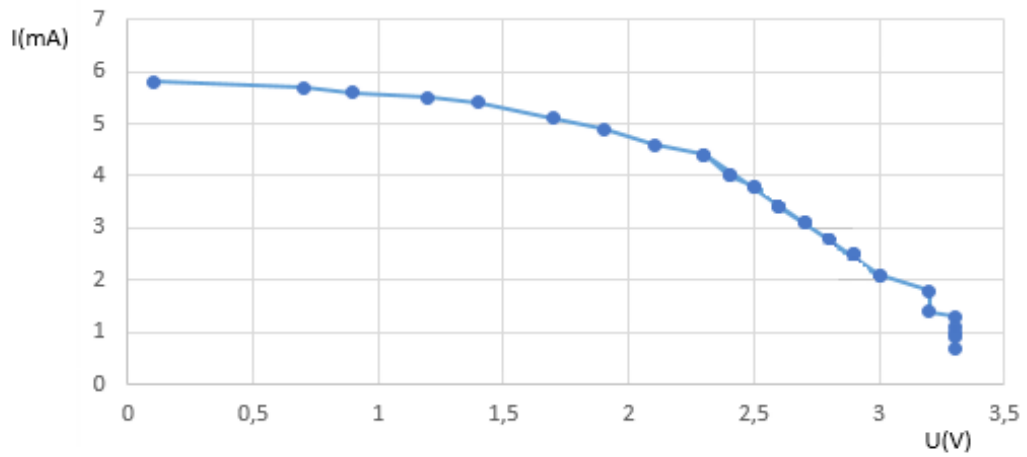
*Graf 3: Voltampérová charakteristika a výkon solárního článku za konstantního osvětlení*

Graf výkonu ukazuje, že existuje určitá hodnota proudu či napětí, při níž je výkon článku největší, tedy bod maximálního výkonu. Oba grafy lze porovnat s teoretickým příkladem na Obrázku 7, kde si můžeme ověřit jejich vzájemnou podobnost.

*B) Měření V-A charakteristiky článku za nižšího konstantního osvětlení*

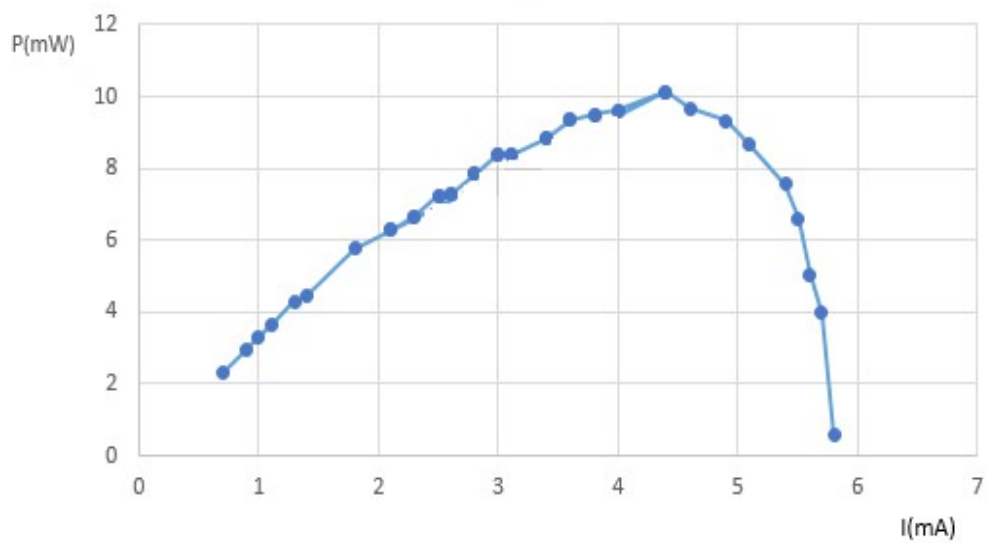
Nyní provedeme tentýž experiment podle stejného postupu, avšak s tím rozdílem, že **snížíme osvětlení článku**. To můžeme zajistit několika způsoby: zvětšením vzdálenosti mezi zdrojem světla a článkem, rozptylem světla v dýmu či aerosolu, volbou slabší intenzity osvětlení zdroje, aj. Voltampérovou charakteristiku a výkon opět znázorníme graficky.

Měření V-A charakteristiky solárního článku při menším konstantním osvětlení



Graf 4: Voltampérová charakteristika solárního článku při menším konstantním osvětlení

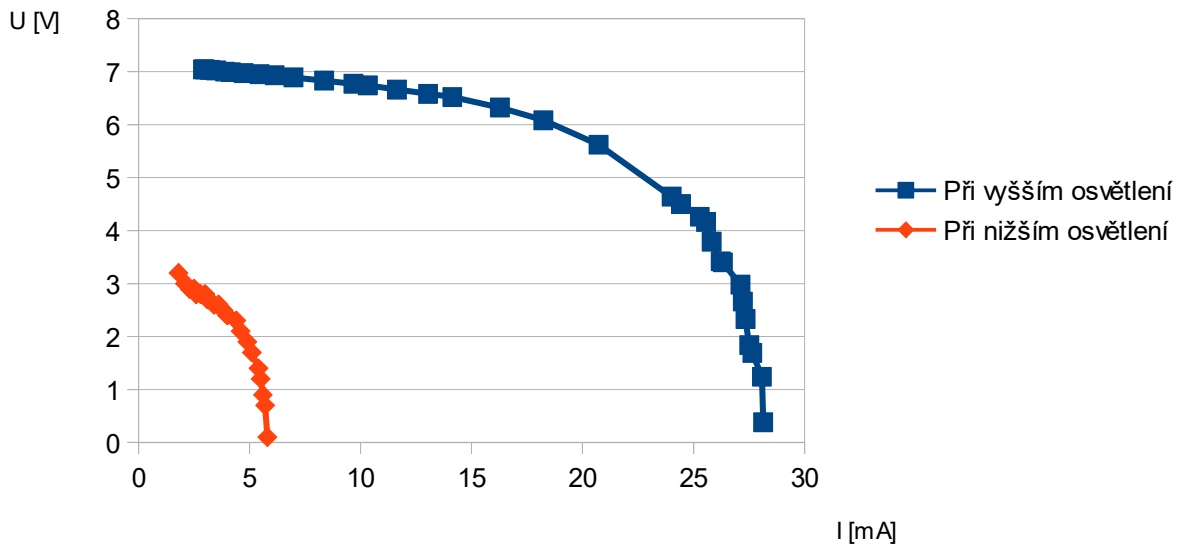
Výkon



Graf 5: Výkon solárního článku při menším konstantním osvětlení

Obě voltampérové charakteristiky můžeme následně srovnat:

### Srovnání V-A charakteristiky solárního článku při konstantním vyšším a nižším osvětlení



Graf 6: Srovnání V-A charakteristiky solárního článku při konstantním vyšším a nižším osvětlení

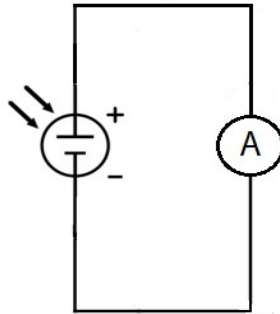
**Závěr:** Při menším osvětlení znatelně klesá hodnota napětí, proudu i výkonu solárního článku v důsledku generace menšího počtu nositelů elektrického náboje.



## 2. Měření proudu v solárním článku v závislosti na úhlu osvětlení

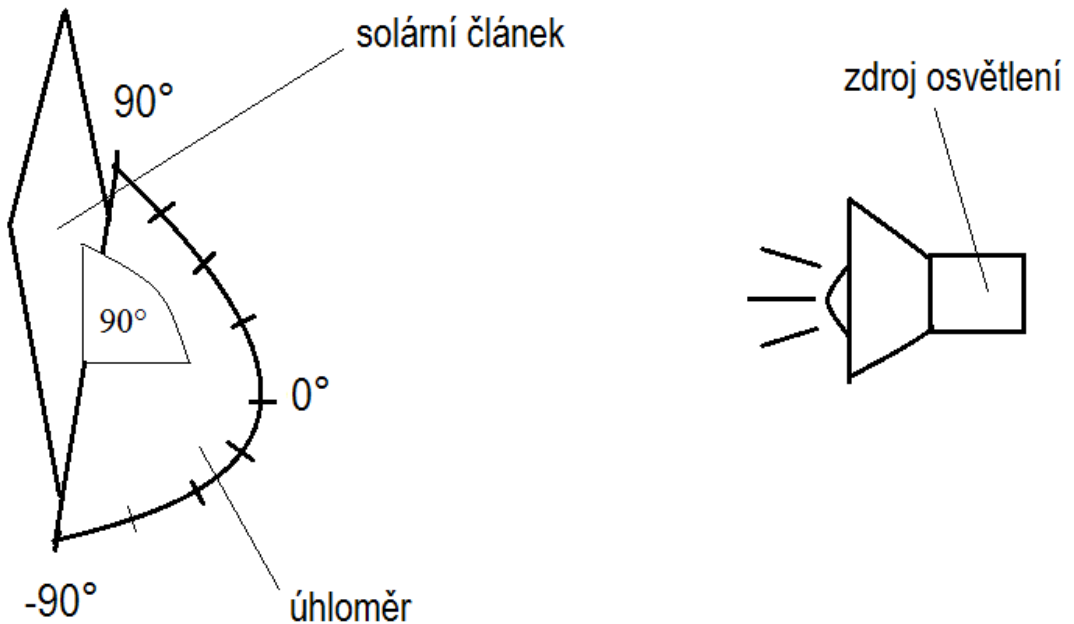
**Pomůcky:** solární článek, zdroj osvětlení, vodiče, multimetr, úhломěr

**Schéma:**



*Schéma 2: Obvod pro měření proudu generovaného solárním článkem*

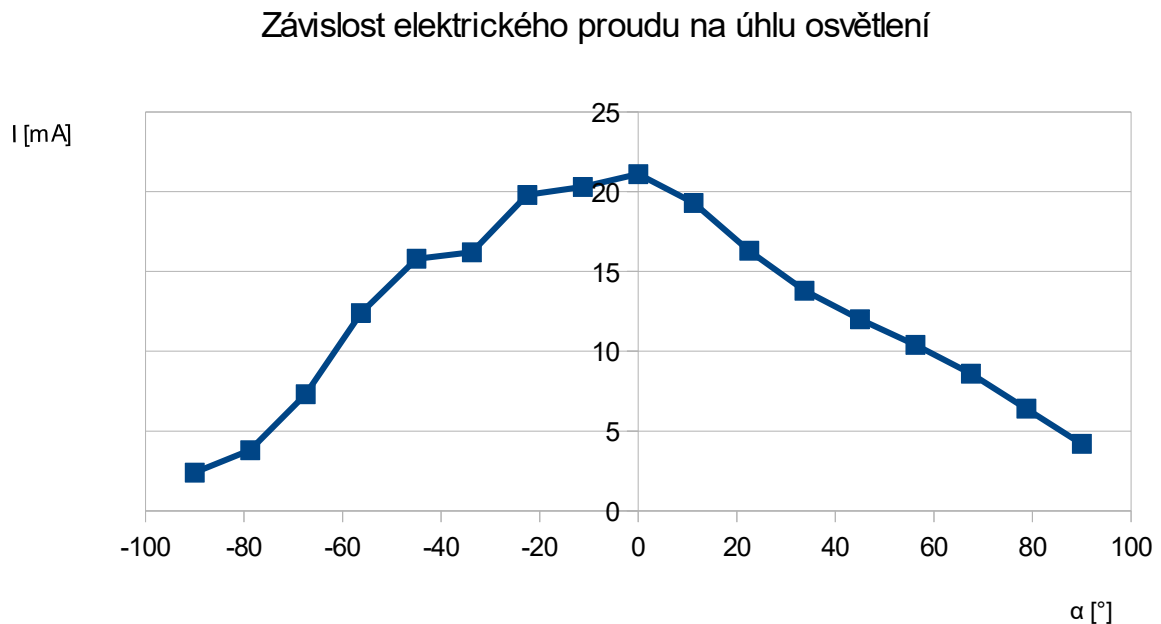
**Postup:** Na plochu pod solární článek umístíme úhломěr tak, aby s článkem svíral úhel  $90^\circ$ . Zdroj osvětlení pak nastavíme tak, aby paprsky světla dopadaly kolmo na solární článek (viz. obr. 22):



*Obr.22: Rozmístění a orientace pomůcek pro měření závislosti elektrického proudu v solárním článku na úhlu jeho ozáření*

(Pro jednoduchost uvažujeme, že paprsky světla dopadající na článek jsou rovnoběžné s rovinou plochy, na níž je umístěn úhloměr.) Solární článek následně natáčíme vůči paprskům světla pod různými úhly v rozmezí od  $-90^\circ$  po  $90^\circ$ , přičemž kolmý úhel mezi rovinou článku a úhloměrem zůstává po celou dobu měření zachován. Pomocí multimetru proměříme elektrický proud, který článek vyrábí, a hodnoty zaznamenáváme.

Závislost elektrického proudu na úhlu osvětlení vyjádříme graficky.



*Graf 7: Závislost elektrického proudu v solárním článku na úhlu osvětlení*

**Závěr:** Graf zřetelně znázorňuje závislost vznikajícího elektrického proudu na množství světla dopadajícího na článek, které je největší při kolmém dopadu světelných paprsků, zatímco minimální je při natočení článku vůči zdroji pod úhly  $-90^\circ$  a  $90^\circ$ . Drobné výchyly mohou být způsobeny nerovnoměrným osvětlením zdroje, není-li bodový.

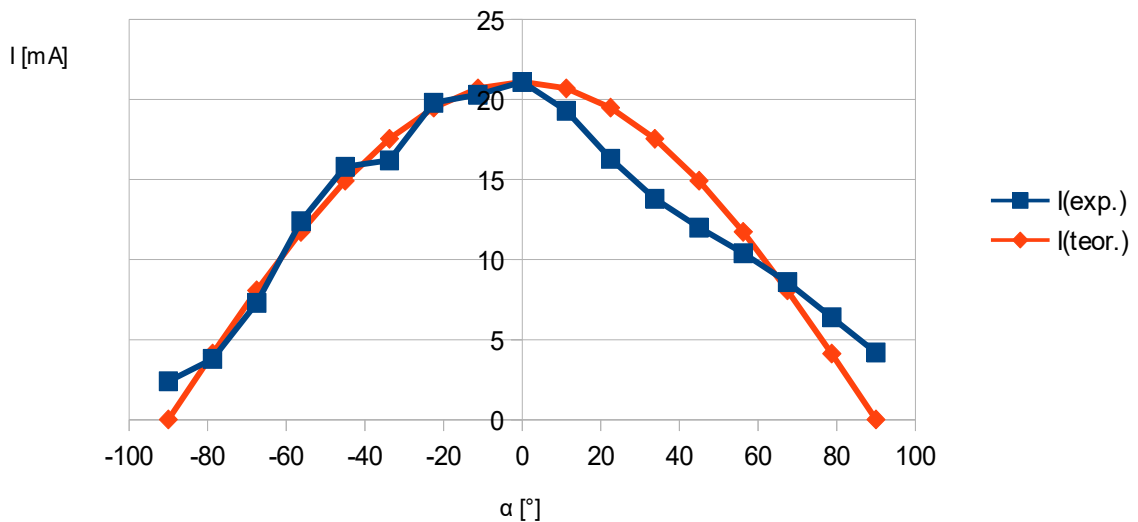
Podle vztahu (2)

$$E = \frac{I}{r^2} \cos \alpha \quad (2)$$

závisí hodnota intenzity osvětlení  $E$  přímo úměrně na svítivosti  $I$  zdroje a kosinu úhlu  $\alpha$ , pod nímž je článek natočen vůči paprskům světla zdroje, a nepřímo úměrně druhé mocnině vzdálenosti  $r$  zdroje osvětlení od článku. Uvážíme-li, že se článek nachází ve stále stejné vzdálenosti od zdroje světla a že svítivost zdroje je rovněž stále stejná, vyplývá z této

úvahy, že maximální hodnoty dosahuje intenzita osvětlení při  $\cos \alpha = 1$ , tj. při úhlu natočení článku vůči paprskům zdroje  $\alpha = 0^\circ$ . Při této hodnotě by tedy měl článek generovat maximální elektrický proud. Předpokládanou teoretickou závislost s experimentálně naměřenou můžeme vzájemně snadno srovnat (viz. graf 8).

### Srovnání experimentální a teoretické závislosti proudu na úhlu osvětlení článku

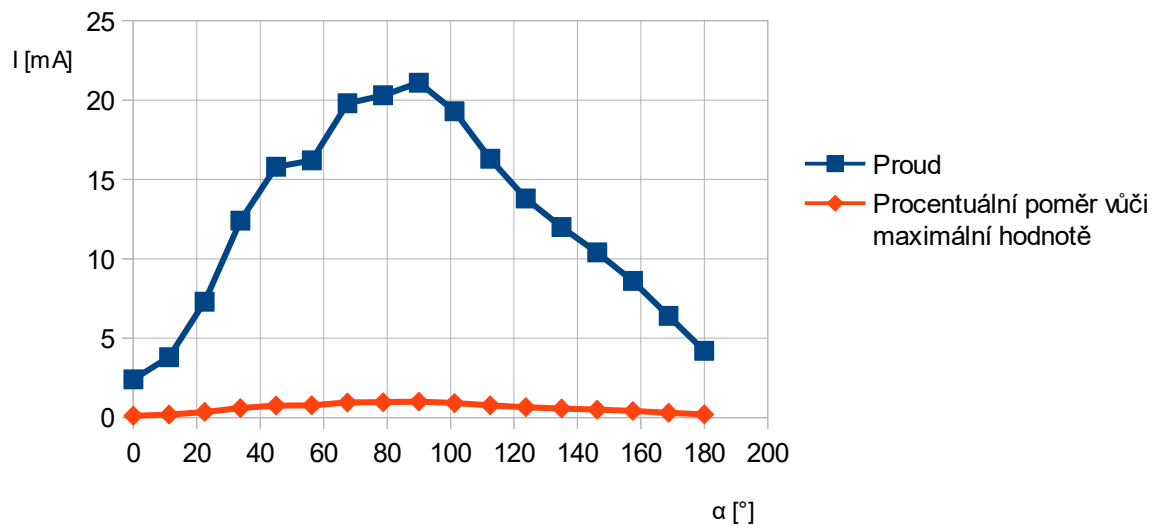


Graf 8: Srovnání experimentální a teoretické závislosti proudu na úhlu osvětlení článku

V grafickém znázornění závislosti elektrického proudu na úhlu osvětlení je kosinový průběh zřetelný. Menší odchylky mohou vznikat z důvodu použití zdroje světla, jenž nebyl bodový.

Pokud budeme považovat maximální hodnotu proudu za 100% a přepočítáme odpovídající procentuální podíl ostatních naměřených hodnot vůči této hodnotě, můžeme tento procentuální poměr rovněž graficky znázornit. Graf bude mít opět podobu křivky kosinové funkce.

Srovnání závislosti proudu na úhlu osvětlení  
s procentuálním poměrem vůči největšímu jasu

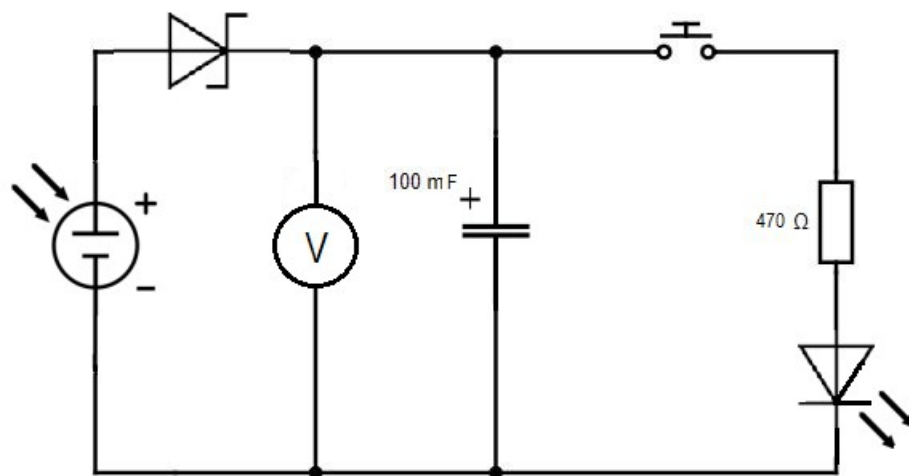


Graf 9: Kosinový průběh závislosti elektrického proudu v článku na úhlu osvětlení ve srovnání s procentuálním poměrem vůči maximální hodnotě

### 3. Solární článek jako zdroj elektrické energie

Fotovoltaický článek lze využít jako zdroj elektrické energie, která v něm vzniká přeměnou energie záření. Připojíme-li k článku spotřebič, který svítí, popř. vykazuje nějaký jiný smyslově vnímatelný efekt, lze poměrně jednoduchým způsobem demonstrovat praktické využití článku a jeho fungování. Vedle vlastností článku je také možné v tomto experimentu ukázat aplikaci dalších elektronických součástek: kondenzátoru, který slouží k akumulaci náboje, a diody, která usměrňuje elektrický proud.

**Schéma:**



*Schéma 3: Obvod pro demonstraci funkce solárního článku jako zdroje elektrického proudu a napětí*

**Princip:**

Fotovoltaický článek při ozáření generuje elektrický proud (a napětí). Tímto proudem se nabíjí kondenzátor na maximální napětí, které určuje napětí článku. To lze názorně ukázat prostřednictvím voltmetru, nejlépe ručičkového. Pokud bychom zamezili přístupu světla k solárnímu článku, mohlo by docházet k vybíjení kondenzátoru, protože solární článek se bez osvětlení stává spotřebičem. Tomuto jevu zabráňujeme zapojením Schottkyho diody mezi solární článek a kondenzátor (v závěrném směru od kondenzátoru k článku), která znemožňuje zpětný průchod proudu z kondenzátoru do článku.

Je-li v obvodu nabitý kondenzátor, může spotřebič fungovat, i když je solární článek zakrytý. Zamezíme-li tedy přístupu světla k článku, např. zakrytím článku papírem, spotřebič bude i přesto fungovat. Po vybití kondenzátoru mu však dojde potřebná

elektrická energie, je tedy funkční jen po určitou dobu. V případě LED diody je postupné vybíjení kondenzátoru patrné na jejím zhasínání.

Pokud opět umožníme přístup světla k fotovoltaickému článku, začne se kondenzátor znovu nabíjet a spotřebič bude opět fungovat. Elektrický proud přitom může přijímat jak z fotovoltaického článku, tak i z kondenzátoru.

**Pomůcky:** solární článek, osvětlení, papír (případně jiná neprůhledná látka), vodiče, krokosvorky, voltmetr, elektrolytický kondenzátor ELRA-A (10000  $\mu$ F/16 V nebo na nižší napětí), spínač, Schottkyho dioda, rezistor (470  $\Omega$ ), LED dioda (červená, bílá)

**Postup:** Sestavíme obvod podle schématu uvedeného výše. Máme-li k dispozici solární článek generující napětí do 3 V včetně, použijeme k demonstraci červenou LED diodu, která svítí při nižších hodnotách napětí. Pro článek s napětím vyšším než 4 V použijeme bílou LED diodu, která se vyznačuje vysokou svítivostí.

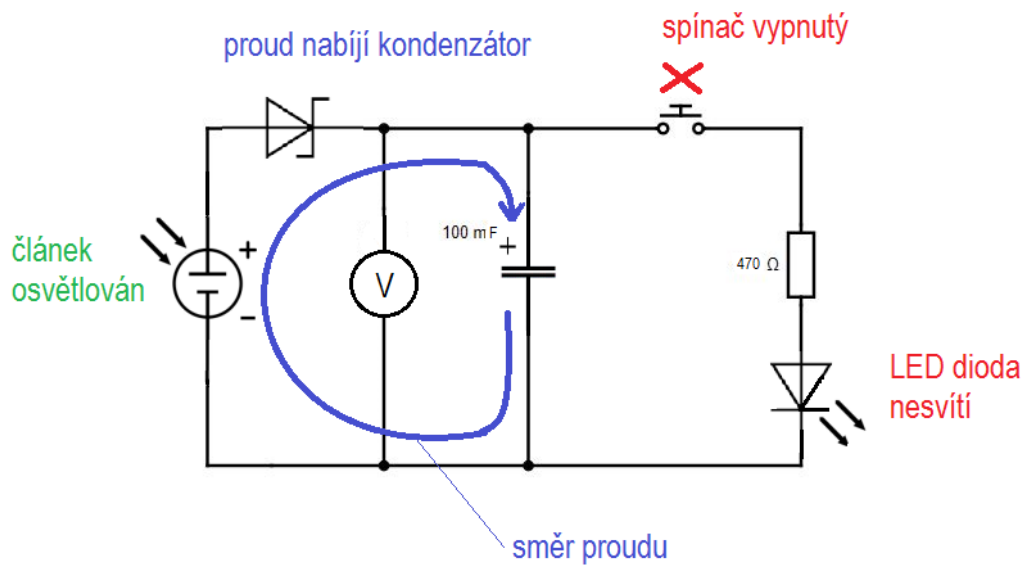
Nejprve pomocí voltmetru ukážeme nabíjení kondenzátoru pomocí solárního článku. Hodnota napětí stoupá, až se nakonec ustálí na určité maximální hodnotě. Spínač zapojený v obvodu ponecháme v této fázi vypnutý.

Jakmile je kondenzátor nabitý, zakryjeme solární článek papírem a sepne spínač. Uvidíme, že LED dioda se rozsvítí, a to i přesto, že solární článek negeneruje elektrický proud. Proud, díky němuž LED dioda svítí, vychází z kondenzátoru, který se postupně vybíjí. To lze pozorovat na postupně zhasínající LED diodě. Aby byla ukázka dodávání proudu LED diodě kondenzátorem dostatečně dlouhá, je třeba zvolit kondenzátor s kapacitou 100 mF nebo vyšší.

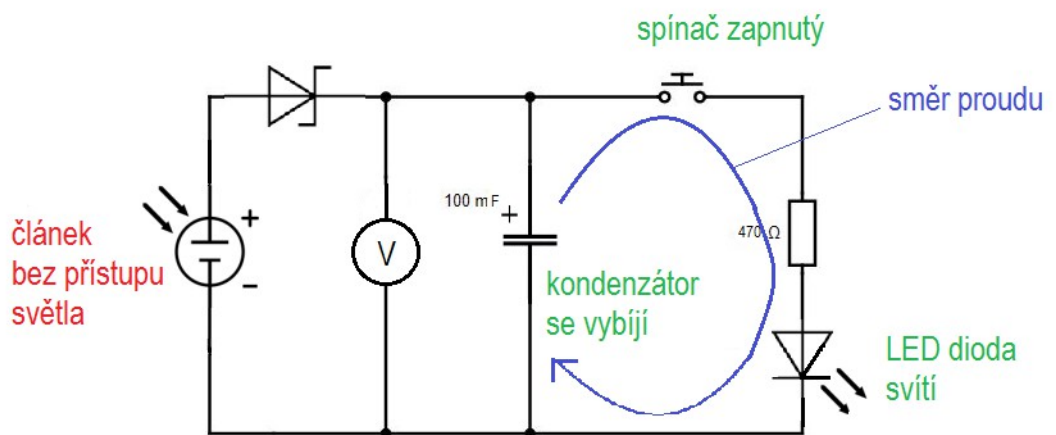
Odstraníme-li ze solárního článku papír, kondenzátor se začne opět nabíjet a zároveň, je-li sepnutý spínač, se také opět rozsvítí LED dioda. Kondenzátor se přitom může současně jak nabíjet, tak i vybíjet, pokud dodává proud LED diodě společně se solárním článkem.

## Nákresy:

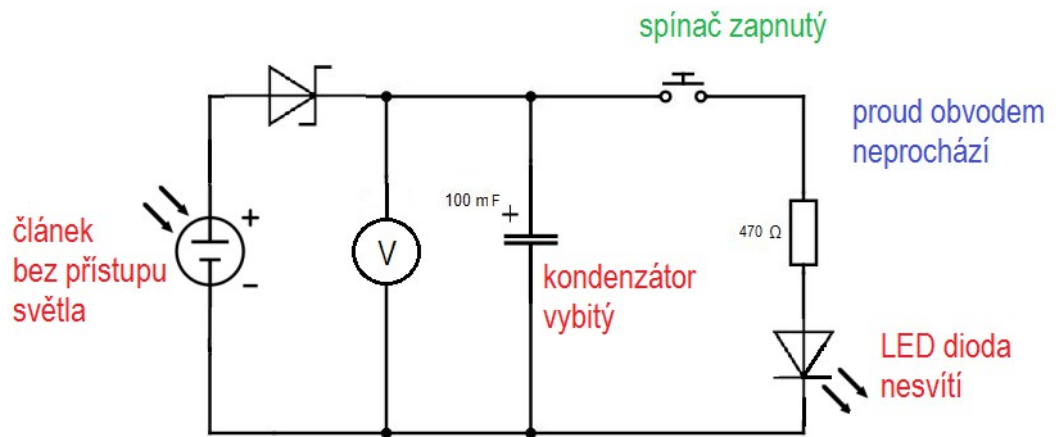
### 1.fáze



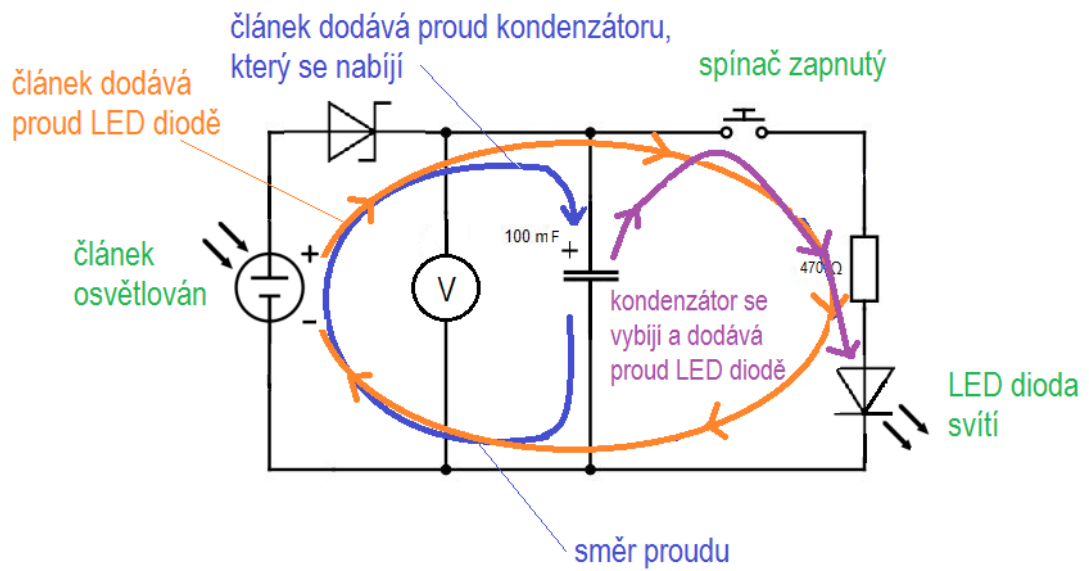
### 2.fáze



### 3. fáze



### 4. fáze





## Závěr

Téma solární energie je velmi atraktivní především kvůli současné snaze o rozvoj obnovitelných zdrojů. Využití solárních systémů je výhodné pro potřeby jednotlivců, kteří díky nim ušetří finance v rámci výdajů za elektrickou energii. Už však není tolik lukrativní pro větší firmy, které by z prodeje elektrické energie získané solárními systémy očekávaly větší zisk. Při srovnání nákladů na pořízení a instalaci fotovoltaických panelů na střechy rodinných domů a dalších budov s návratnosti této investice jsou solární systémy pro běžné spotřebitele poměrně levným zdrojem elektrické energie.

V našich oblastech s menší mírou slunečního osvětlení ve srovnání s jinými lokalitami ve světě je účinnost fotovoltaických panelů uspokojivá, zejména v případě moderních tenkovrstvých technologií.

V rámci mezipředmětových vazeb mezi chemií a fyzikou diplomová práce ukazuje souvislost vlastností polovodičů a charakterem i valencí jednotlivých atomů, z nichž jsou materiály složeny. Toto téma je možné pro zajímavost zmínit v rámci učiva chemie při probírání vlastností prvků a jejich sloučenin u konkrétních podskupin periodické soustavy, zejména jejich praktických aplikací.

Z fyzikálního hlediska byly v experimentální části diplomové práce v úloze 1 ověřeny voltampérové charakteristiky solárního článku v souladu s teoretickými předpoklady. Rovněž byly proměřeny závislosti výkonu dodávaného článkem na proudu, který byl článkem generován.

Z pohledu fotometrie byla proměřena závislost proudu na úhlu natočení článku vůči zdroji světla. Úlohu 2 můžeme zařadit do učiva o elektromagnetickém záření nebo fotometrie.

V rámci úlohy 3 demonstrujeme přeměny energie záření prostřednictvím fotovoltaického článku na energii elektrického pole nabitého kondenzátoru, kterou můžeme následně využít k opětovné přeměně na zářivou energii LED diody. Tato úloha je názorná nejen z hlediska praktického využití článku jako zdroje, ale i pro pochopení funkce některých elektronických součástek v praxi. V případě kondenzátoru se jedná o ukázkou kumulace elektrického náboje, v případě Schottkyho diody o usměrnění proudu v obvodu.

Experimentální úlohy je na středních školách možno využít v rámci fyzikálního semináře.

Orientačně byl proveden průzkum znalostí žáků v oblasti solární energetiky, fyziky

polovodičů, využívání solární energie a obnovitelnosti zdrojů, ale také názorů žáků na téma solárních systémů. Průzkum mimo jiné potvrdil všeobecně přijímaný názor, že solární elektrárny nejsou estetické v přírodní krajině a že zabírají úrodnou půdu. Dotázaní si však byli vědomi také pozitivních aspektů solárních systémů, jejichž provoz je ekologický a nezatěžuje životní prostředí.

Je patrné, že další bouřlivý rozvoj solární energetiky prostřednictvím soukromých firem se již neočekává z důvodu změny dotační politiky. Zájem o tyto systémy nadále trvá u běžných spotřebitelů, kteří usilují o nízkonákladové bydlení.

Diplomová práce neměla za cíl zabývat se finančními aspekty, které jsou založeny na mnoha proměnných jako např. na ceně solárních panelů, na ceně elektřiny, na dotační politice státu.

## Zdroje

1. HASENHUHN, Ralf. *Fotovoltaika: Budovy jako zdroj proudu*. Ostrava-Plesná: HEL, 2010. ISBN 978-80-86167-33-6.
2. BERANOVSKÝ, Jiří a kol. *Obnovitelné zdroje energie*. 2. doplněné a upravené vydání. Praha: FCC PUBLIC, 2001. ISBN 80-901985-8-9.
3. RAUNER, Karel. *Elektronika: (fyzikální a analogová část)*. 2., upr. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2001. ISBN 80-708-2775-0.
4. ZÁHEJSKÝ, Jiří. *Elektrina a magnetismus*. Olomouc: Univerzita Palackého, 2002. ISBN 80-244-0482-6.
5. SMITH, Zachary A. a Katrina D. TAYLOR. *Renewable and alternative energy resources: a reference handbook*. 2. Santa Barbara, Calif.: ABC-CLIO, 2008. ISBN 978-1-59884-089-6.
6. KESL, Jan. *Elektronika*. Praha: BEN - technická literatura, 2003. Učebnice - základní studijní materiál pro střední školy. ISBN 80-730-0074-1.
7. KOPŘIVA, Miroslav. *Materiály pro jemnou mechaniku a elektroniku*. Olomouc: Univerzita Palackého, 1990.
8. MARKVART, T. a Luis. CASTAÑER. *Practical handbook of photovoltaics: fundamentals and applications*. New York: Elsevier Advanced Technology, c2003. ISBN 18-561-7390-9.
9. PLANTE, Russell H. *Solar energy, photovoltaics, and domestic hot water: a technical and economic guide for project planners, builders, and property owners*. ISBN 978-0-12-420155-2.
10. SCHOMMERS, Adrian. *Elektronika tajemství zbavená: Kniha 4: Pokusy s optoelektronikou*. Ostrava-Plesná: HEL, 2002. ISBN 80-86167-04-6.
11. BERGER, Lev I. *Semiconductor materials*. Boca Raton: CRC Press, c1997. ISBN 978-084-9389-122.
12. SCHMALENSEE, Richard: at al. *The Future of Solar Energy: An Interdisciplinary MIT Study* [online]. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 2015 [cit. 2017-02-10]. ISBN 978-0-928008-9-8. Dostupné z: <http://energy.mit.edu/wp-content/uploads/2015/05/MITEI-The-Future-of-Solar-Energy.pdf>
13. CÁRABE, Julio. Thin-film-silicon solar cells. In: *Wojskowa Akademia Techniczna* [online]. Varšava: Centralny Ośrodek Szkolenia i Wydawnictw, 2004 [cit. 2017-07-13]. Dostupné z: [http://www.wat.edu.pl/review/optor/12\(1\)1.pdf](http://www.wat.edu.pl/review/optor/12(1)1.pdf)
14. REN21. *Renewables 2016 Global Status Report* [online]. Paříž: REN21 Secretariat,

2016 [cit. 2017-05-15]. ISBN 978-3-9818107-0-7. Dostupné z: [http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2016/06/GSR\\_2016\\_Full\\_Report.pdf](http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2016/06/GSR_2016_Full_Report.pdf)

15. FEJFAR, Antonín. Fotovoltaické využití energie světla ze Slunce. In: *Olomoucký fyzikální kaleidoskop* [online]. Olomouc: Fyzikální ústav Akademie věd České republiky, 2016 [cit. 2017-06-04]. Dostupné z: [http://kaleidoskop.upol.cz/old/kal2016/fejfar\\_fotovoltaika\\_olomouc\\_2016-01-22.pdf](http://kaleidoskop.upol.cz/old/kal2016/fejfar_fotovoltaika_olomouc_2016-01-22.pdf)

16. LARSEN, Pernille Broen. Nanostructured solar cells. In: *DTU Nanotech* [online]. 2016 [cit. 2017-06-04]. Dostupné z: <http://www.nanotech.dtu.dk/english/Samples-newsletter/Jun-16/Solar-cells>

17. Technology Roadmap: Solar Photovoltaic Energy. In: *International Energy Agency* [online]. Paříž: IEA Publications, 2014 [cit. 2017-06-04]. Dostupné z: [https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TechnologyRoadmapSolarPhotovoltaicEnergy\\_2014edition.pdf](https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TechnologyRoadmapSolarPhotovoltaicEnergy_2014edition.pdf)

18. GRAETZEL, Michael. Les nouvelles cellules solaires nanocristallines. In: *CEA: De la recherche à l'industrie* [online]. CEA Saclay, 2009 [cit. 2017-06-04]. Dostupné z: <http://www-centre-saclay.cea.fr/en/Les-nouvelles-cellules-solaires-nanocristallines-conference-par-le-Professeur-Michael-GRAETZEL-Ecole-Polytechnique-Federale-de-Lausanne.-CEA-Saclay-19-octobre-2009>

19. Fotovoltaické solární systémy. In: *Základní škola Jihlava* [online]. Jihlava: ZŠ Jihlava, 2015 [cit. 2017-06-04]. Dostupné z: <http://www.zsseifertova.ji.cz/sites/default/files/html/slundos/fv.pdf>

20. BECHNÍK, Bronislav. Nejpoužívanější pojmy ve fotovoltaice. In: *Obnovitelná energie a úspory energie - TZB-info* [online]. 2014 [cit. 2017-06-04]. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/11772-nejpouzivanejsi-pojmy-ve-fotovoltaice>

21. SHAHAN, Zachary. Advantages & Disadvantages Of Solar Power. In: *CleanTechnica* [online]. 2016 [cit. 2017-06-04]. Dostupné z: <https://cleantechnica.com/2013/10/08/advantages-disadvantages-solar-power/>

22. DUS, Ondřej. *Vliv zastínění na parametry solárních modulů* [online]. Brno, 2008 [cit. 2017-06-04]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=8691](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=8691). Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Jiří Vaněk.

23. HARAŠTA, Tomáš. *Pracoviště pro testování solárních článků metodou LBIC* [online]. Brno, 2008 [cit. 2017-06-04]. Dostupné z: <http://www.sunfin.cz/www/upload/images/pdf-soubory/Diplomov%C3%A1%20pr%C3%A1ce-LBIC-testovani-solarnich-clanku.pdf>

24. NREL Collaboration Breaks 1-Volt Barrier in CdTe Solar Technology. In: *National Renewable Energy Laboratory* [online]. Denver, 2016 [cit. 2017-06-04]. Dostupné z: <http://www.nrel.gov/docs/fy16osti/66434.pdf>

25. Cadmium Telluride Solar Cells. In: *National Renewable Energy Laboratory* [online]. Denver, 2014 [cit. 2017-06-04]. Dostupné z: <https://www.nrel.gov/pv/cadmium-telluride-solar-cells.html>
26. MARTINEAU, David. Dye Solar Cells for Real: The Assembly Guide for Making Your Own Solar Cells. In: *Solaronix - Innovative Solutions for Solar Professionals* [online]. Aubonne: Solaronix, 2012 [cit. 2017-06-04]. Dostupné z: [http://www.solaronix.com/documents/dye\\_solar\\_cells\\_for\\_real.pdf](http://www.solaronix.com/documents/dye_solar_cells_for_real.pdf)
27. Staebler Wronski Effect. In: *Electrical Engineering and Technology* [online]. c2011-2017 [cit. 2017-06-04]. Dostupné z: <https://www.electrical4u.com/staebler-wronski-effect/>
28. Cadmium Telluride. In: *Department of Energy* [online]. Washington, 2013 [cit. 2017-06-04]. Dostupné z: <https://www.energy.gov/eere/sunshot/cadmium-telluride>
29. MAGILL, Bobby. Study Sees Ecological Risks as Solar Expands. In: *Climate Central: A Science & News Organization* [online]. Princeton, 2015 [cit. 2017-06-04]. Dostupné z: <http://www.climatecentral.org/news/solar-study-sees-ecological-risks-19568>
30. Solar Energy Generating Systems (Mojave Desert, California, USA). In: *Solaripedia* [online]. c2008-2017 [cit. 2017-06-04]. Dostupné z: [http://www.solaripedia.com/13/32/solar\\_energy\\_generating\\_systems\\_\(mojave\\_desert,\\_california,\\_usa\).html](http://www.solaripedia.com/13/32/solar_energy_generating_systems_(mojave_desert,_california,_usa).html)
31. Solar Energy and the Environment. In: *Environment and Ecology* [online]. 2015 [cit. 2017-06-04]. Dostupné z: <http://environment-ecology.com/energy-and-environment/99-solar-energy-and-the-environment.html>
32. LOFF, Sarah, ed. Vanguard Satellite, 1958. In: *NASA* [online]. 2015 [cit. 2017-06-04]. Dostupné z: <https://www.nasa.gov/content/vanguard-satellite-1958>
33. HSU, Jeremy. First Solar-Powered Satellite Still Flying at 50. In: *Space.com: NASA, Space Exploration and Astronomy News* [online]. 2008 [cit. 2017-06-04]. Dostupné z: <http://www.space.com/5137-solar-powered-satellite-flying-50.html>
34. Solar history: Alexandre Edmond Becquerel. In: *SolarEnergyWorld* [online]. Elkridge, 2011 [cit. 2017-06-05]. Dostupné z: <https://www.solarenergyworld.com/2011/06/17/solar-history-alexandre-edmond-becquerel/>
35. First photovoltaic Devices. In: *PVEducation* [online]. 2014 [cit. 2017-06-05]. Dostupné z: <http://pveducation.org/pvcdrom/manufacturing/first-photovoltaic-devices>
36. BAKER, Alyssa. A History of Solar Cells: How Technology Has Evolved. In: *Solar Power Authority* [online]. 2016 [cit. 2017-06-05]. Dostupné z: <https://www.solarpowerauthority.com/a-history-of-solar-cells/>
37. NUNEZ, Christina. How Green Are Those Solar Panels, Really? In: *National Geographic* [online]. 2014 [cit. 2017-06-05]. Dostupné z:

- <http://news.nationalgeographic.com/news/energy/2014/11/141111-solar-panel-manufacturing-sustainability-ranking/>
38. KOSMÁK, František. Princip fotovoltaického článku. In: *Elektrika.cz* [online]. 2009 [cit. 2017-06-05]. Dostupné z: <http://elektrika.cz/data/clanky/princip-fotovoltaickeho-clanku>
39. July 12, 1962: The Day Information Went Global. In: *NASA* [online]. 2012 [cit. 2017-08-05]. Dostupné z: <https://www.nasa.gov/topics/technology/features/telstar.html>
40. Solární (fotovoltaické) články. In: *Skupina ČEZ* [online]. 2007 [cit. 2017-06-05]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/solarni/k32.htm>
41. BELLIS, Mary. History: Photovoltaics Timeline. In: *ThoughtCo.com* [online]. 2017 [cit. 2017-06-05]. Dostupné z: <https://www.thoughtco.com/photovoltaics-timeline-1992481>
42. ARENA supports another solar world record. In: *Australian Renewable Energy Agency* [online]. 2016 [cit. 2017-06-05]. Dostupné z: <https://arena.gov.au/news/arena-supports-another-solar-world-record/>
43. MARTIN, Richard. First Solar's Cells Break Efficiency Record. In: *MIT Technology Review* [online]. 2016 [cit. 2017-06-05]. Dostupné z: <https://www.technologyreview.com/s/600922/first-solars-cells-break-efficiency-record/>
44. ČTK. Instalovaný výkon solárních elektráren v ČR od roku 2012 stagnuje. In: *OEnergetice.cz* [online]. 2016 [cit. 2017-06-05]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/elektrina/instalovany-vykon-solarnich-elektraren-v-cr-od-roku-2012-stagnuje/>
45. Fotovoltaika v podmínkách České republiky. In: *Isofen Energy* [online]. 2008 [cit. 2017-06-05]. Dostupné z: <http://www.isofenenergy.cz/slunecni-zareni-v-cr.aspx>
46. Životodárné Slunce. In: *Skupina ČEZ* [online]. 2007 [cit. 2017-06-05]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/solarni/k12.htm>
47. Thin Film Solar Cell. In: *Circuits Today* [online]. 2011 [cit. 2017-06-05]. Dostupné z: <http://www.circuitstoday.com/thin-film-solar-cell>
48. STREET, R.A. *Hydrogenated amorphous silicon*. New York: Cambridge University Press, 1991. ISBN 978-0-521-37156-8.
49. VOBOŘIL, David. Perovskitové FV články zaznamenávají rychlý pokrok ve zvyšování účinnosti. In: *OEnergetice.cz* [online]. 2016 [cit. 2017-08-05]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/technologie/obnovitelne-zdroje-energie/perovskitove-fv-clanky-zaznamenavaji-rychly-pokrok-ve-zvysovani-ucinnosti/>
50. Mono- v. poly-crystalline cells. In: *Silicon Solar* [online]. 2015 [cit. 2017-06-05]. Dostupné z: <http://www.siliconsolar.com/wp-content/uploads/mono-v-poly-crystalline->

cells.jpg

51. Siliziumdotierung. In: *Technical University of Munich* [online]. 2007 [cit. 2017-06-05]. Dostupné z:

[https://www.frm2.tum.de/fileadmin/\\_processed\\_/csm\\_SiltronicSiliciumeinkristall\\_ba41669f4d.jpg](https://www.frm2.tum.de/fileadmin/_processed_/csm_SiltronicSiliciumeinkristall_ba41669f4d.jpg)

52. Solar panel - CIS - Merlin M/Power. In: *NauticExpo* [online]. 2017 [cit. 2017-06-05].

Dostupné z: [http://img.nauticexpo.com/images\\_ne/photo-g/49072-3256695.jpg](http://img.nauticexpo.com/images_ne/photo-g/49072-3256695.jpg)

53. Hrotová elektroda. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA):

Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-06-05]. Dostupné z:

[https://cs.wikipedia.org/wiki/Hrotov%C3%A1\\_elektroda](https://cs.wikipedia.org/wiki/Hrotov%C3%A1_elektroda)

54. Circuit Diagram: A user-friendly program for making electronic circuit diagrams. In:

*Circuit Diagram* [online]. 2017 [cit. 2017-06-05]. Dostupné z: <http://www.circuit-diagram.org/downloads>

## **Příloha**

### **Dotazníkový průzkum**

Tento dotazník sloužil pouze k orientačnímu účelu a byl zodpovězen poměrně malým množstvím respondentů, nelze ho tedy považovat za spolehlivý. Tento dotazník byl předložen na nižším a vyšším stupni gymnázia a také na některých základních a středních školách. Vzhledem k počtu respondentů lze usoudit, že o téma solární energie není mezi studenty příliš velký zájem. Ti, kdo dotazník vyplnili, byli pravděpodobně s tímto tématem seznámeni, ať už prostřednictvím výuky ve škole a nebo na základě osobního zájmu. Někteří z respondentů se nevyjádřili ve slovních odpovědích.

#### SEZNAM OTÁZEK:

##### OSOBNÍ ÚDAJE

1. Kolik je vám let?
2. Jakého jste pohlaví?
3. Na jakém typu školy studujete (popř. na kterém stupni)?

##### ZNALOSTNÍ OTÁZKY

4. Které z těchto látek nevedou elektrický proud?
5. Který zdroj energie nepatří mezi obnovitelné?
6. Kolik procent energie, která dopadá ze Slunce na Zemi, je Zemí pohlceno?
7. Jaký podíl z celkové získávané energie mají solární elektrárny?
8. Které z těchto částic přispívají ke vzniku elektrického proudu v polovodičích?
9. Která elektronická součástka mění světelnou energii na elektrickou?
10. Kterým způsobem nelze vyvolat vodivost v polovodiči?
11. Využíváte v domácnosti nějaké solární zařízení?

##### NÁZORY

12. Myslíte si, že jsou solární zařízení užitečná? Odpověď slovně zdůvodněte.
13. Myslíte si, že je výroba elektrické energie solárními články ekologická? Odpověď slovně zdůvodněte.



## OTÁZKY A ODPOVĚDI

1. Kolik je vám let?

- 11
- 12
- 13
- 14
- 15
- 16
- 17
- 18
- 19

2. Jakého jste pohlaví?

- Muž
- Žena

3. Na jakém typu školy studujete (popř.na kterém stupni)?

- ZŠ 2.stupeň
- Gymnázium - nižší stupeň
- Gymnázium - vyšší stupeň
- Jiná SŠ

4. Které z těchto látek nevedou elektrický proud?

- Elektrolyty
- Kovy
- Nekovy
- **Dielektrika**

5. Který zdroj energie nepatří mezi obnovitelné?

- Voda
- Geotermální prameny
- **Radioaktivní prvky**
- Sluneční záření

6. Kolik procent energie, která dopadá ze Slunce na Zemi, je Zemí pohlceno?

- 90%
- **67%**
- 20%
- 0,8%

7. Jaký podíl z celkové získávané energie mají solární elektrárny?

- 40%
- 36%
- 5%
- **3%**

8. Které z těchto částic přispívají ke vzniku elektrického proudu v polovodičích?

- Kationty
- Neutrony
- **Volné elektrony**
- Anionty

9. Která elektronická součástka mění světelnou energii na elektrickou?

- Termistor
- Tranzistor
- LED dioda
- **Fotodioda**

10. Kterým způsobem nelze vyvolat vodivost v polovodiči?

- **Stlačením**
- Ozářením
- Příměsovými prvky
- Zahřátím

11. Využíváte v domácnosti nějaké solární zařízení?

- Ano
- Ne

12. Myslíte si, že jsou solární zařízení užitečná? Odpověď slovně zdůvodněte.

- Ano
- Ne

+ slovní odpověď

13. Myslíte si, že je výroba elektrické energie solárními články ekologická? Odpověď slovně zdůvodněte.

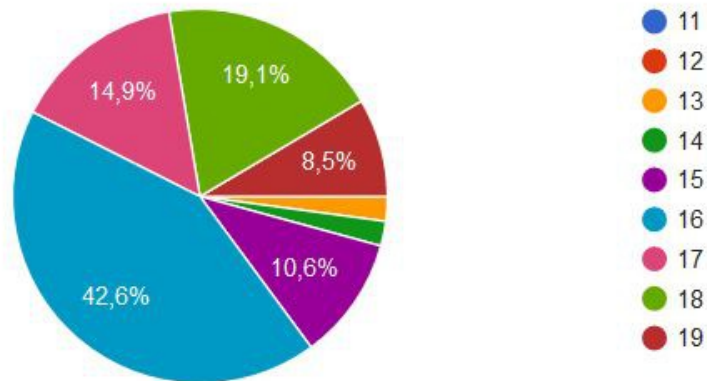
- Ano
- Ne

+ slovní odpověď

## STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ

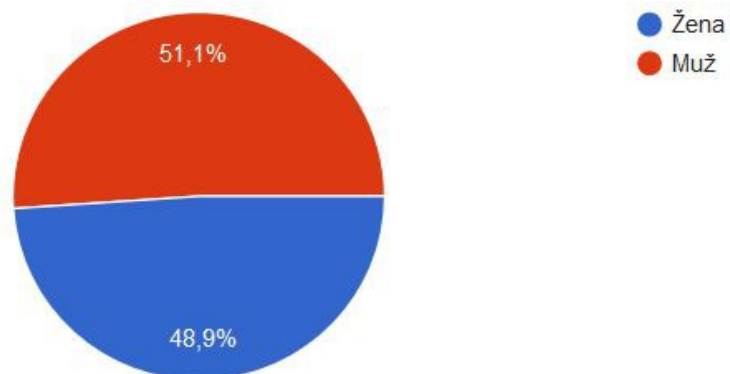
### 1. Kolik je vám let?

47 odpovědí



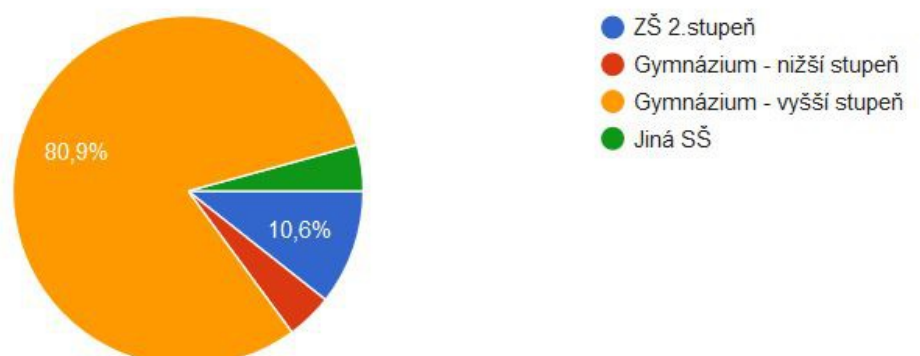
### 2. Jakého jste pohlaví?

47 odpovědí



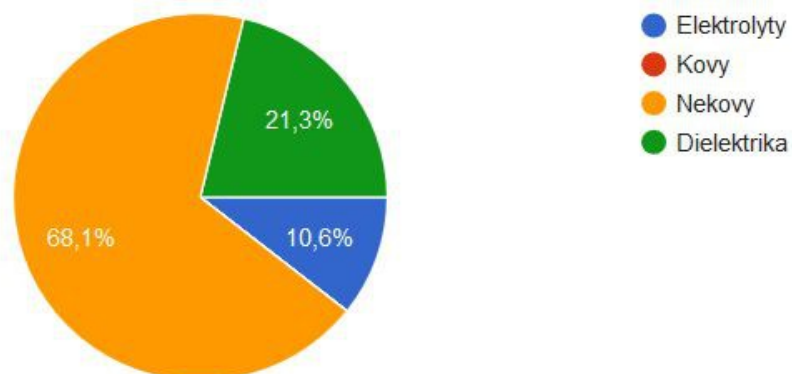
### 3. Na jakém typu školy studujete (popř. na kterém stupni)?

47 odpovědí



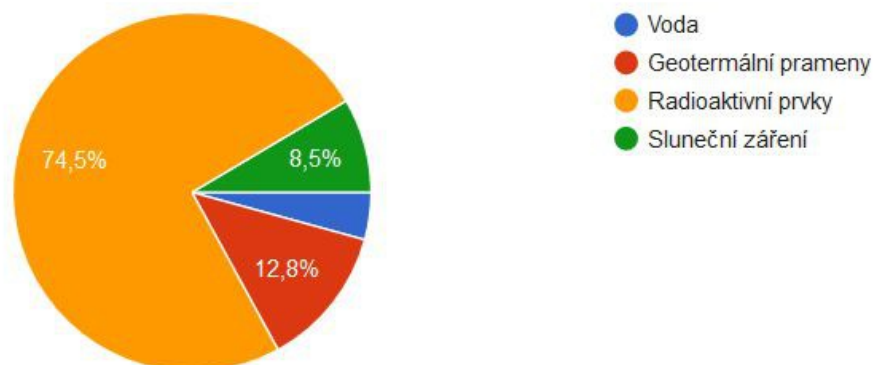
#### 4. Které z těchto látek nevedou elektrický proud?

47 odpovědí



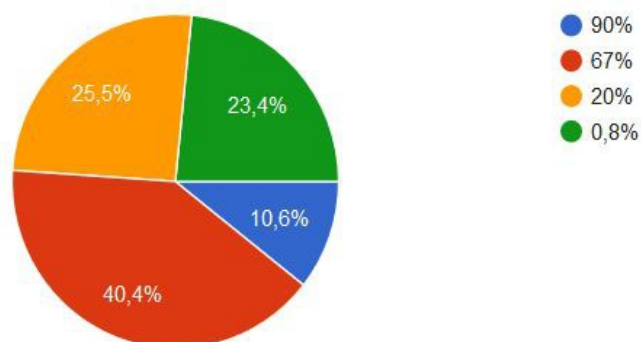
#### 5. Který zdroj energie nepatří mezi obnovitelné?

47 odpovědí



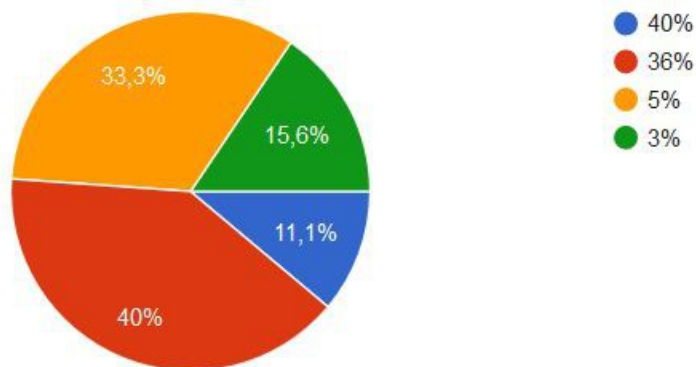
#### 6. Kolik procent energie, která dopadá ze Slunce na Zemi, je Zemí pohlceno?

47 odpovědí



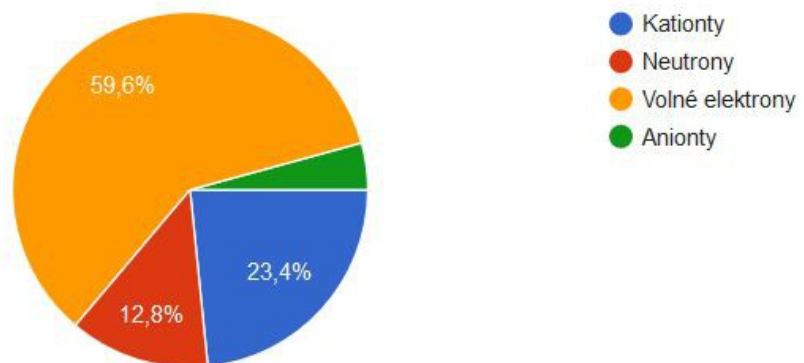
## 7. Jaký podíl z celkové získávané energie mají solární elektrárny?

45 odpovědí



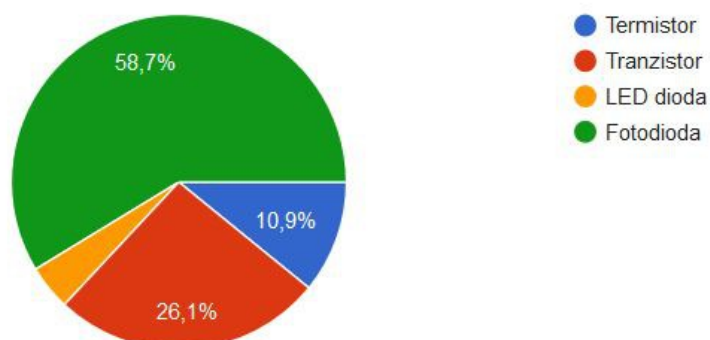
## 8. Které z těchto částic přispívají ke vzniku elektrického proudu v polovodičích?

47 odpovědí



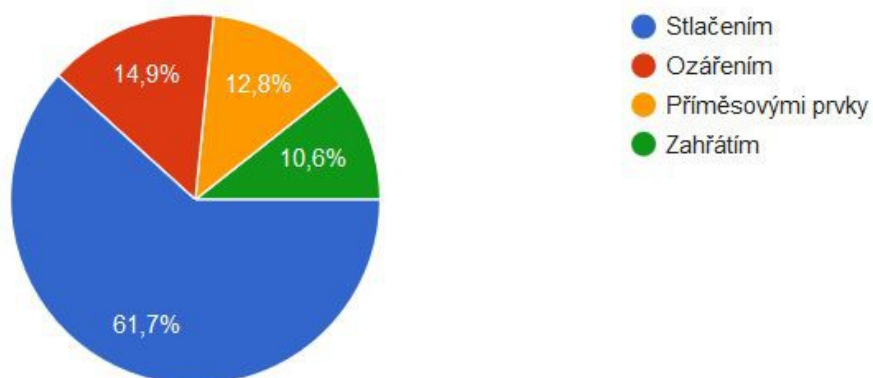
## 9. Která elektronická součástka mění světelnou energii na elektrickou?

46 odpovědí



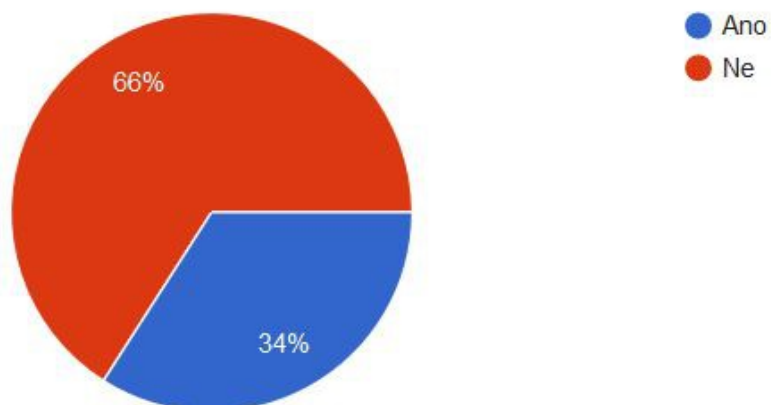
## 10. Kterým způsobem nelze vyvolat vodivost v polovodiči?

47 odpovědí



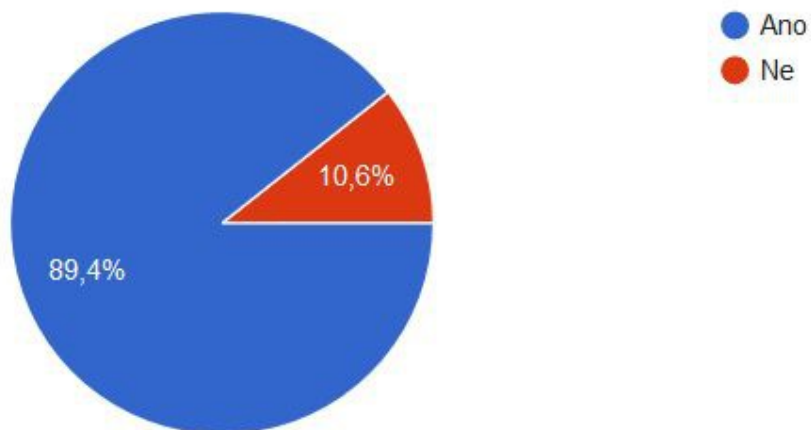
## 11. Využíváte v domácnosti nějaké solární zařízení?

47 odpovědí



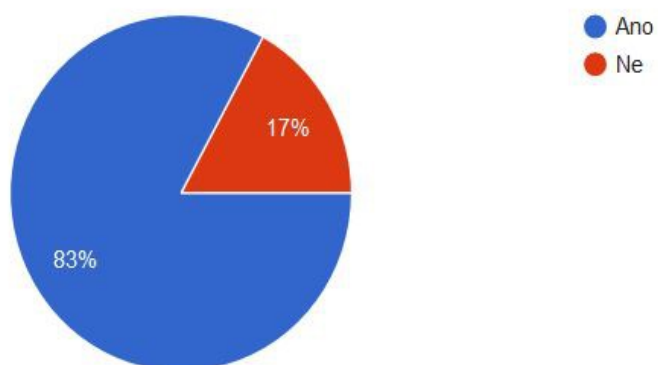
## 12. Myslíte si, že jsou solární zařízení užitečná?

47 odpovědí



## 13. Myslíte si, že je výroba elektrické energie solárními články ekologická?

47 odpovědí





## VYHODNOCENÍ SLOVNÍCH ODPOVĚDÍ

12. Myslíte si, že jsou solární zařízení užitečná? Odpověď slovně zdůvodněte.

### **ANO**

- Obnovitelný zdroj
- Šetrnost k přírodě
- Energie zdarma
- Dlouhodobá možnost čerpání energie ze Slunce
- Bezodpadová produkce elektrické energie
- Využití jinak nevyužívaných ploch
- Úspora energie z jiných zdrojů
- Možnost jejich využití k nabíjení

### **NE**

- Zabírání ploch využitelných k jiným účelům, např. zemědělství
- Zabírání velkých ploch
- Nedostatečné množství vyráběné energie pro dnešní potřebu
- Omezené možnosti využití při větší energetické zátěži

13. Myslíte si, že je výroba elektrické energie solárními články ekologická? Odpověď slovně zdůvodněte.

**ANO**

Bezodpadová výroba elektrické energie

Nezatěžuje životní prostředí

Pochází ze Slunce – přírodního zdroje

**NE**

Zabírání úrodné půdy při jejich výstavbě

Složitá a pracná výroba

Potřeba velkého množství materiálu k výrobě fotovoltaických článků