



Technická univerzita v Liberci

FAKULTA PŘÍRODOVĚDNĚ-HUMANITNÍ A PEDAGOGICKÁ

Katedra: Fyziky

Studijní program: Specializace v pedagogice

Studijní obor Fyzika se zaměřením na vzdělávání,
(kombinace): Matematika se zaměřením na vzdělávání

SOLÁRNÍ ČLÁNKY
SOLAR CELLS

Bakalářská práce: 09-FP-KFY-001

Autor:

Petr DESENSKÝ

Podpis:

.....

Adresa:

Grégrova 582

289 11, Pečky

Vedoucí práce: Mgr. Milan Čmelík

Počet

stran	grafů	obrázků	tabulek	pramenů	příloh
67	4	29	5	25	0

V Liberci dne: 23.4.2010



Gj: KFY/182/09

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA PŘÍRODOVĚDNĚ-HUMANITNÍ A PEDAGOGICKÁ

Katedra fyziky

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(pro bakalářský studijní program)

pro (kandidát): Petr Desenský
adresa: Grégrova 582, Pečky 289 11
studijní obor (kombinace): Specializace v pedagogice - MA-FY se zaměřím na vzdělávání
Název BP: **Solární články**
Název BP v angličtině: **Solar cells**
Vedoucí práce: Mgr. Milan Čmelík
Konzultant:
Termín odevzdání: květen 2010

Poznámka: Podmínky pro zadání práce jsou k nahlédnutí na katedrách. Katedry rovněž formulují podrobnosti zadání. Zásady pro zpracování BP jsou k dispozici ve dvou verzích (stručné, resp. metodické pokyny) na katedrách a na Děkanátě Fakulty přírodovědně-humanitní a pedagogické TU v Liberci.

V Liberci dne - 7 -05- 2009

Mr. Kraus
děkan

W. Kral
vedoucí katedry

Převzal (kandidát): DESENSKÝ PETR
Datum: 26.5.2009

Podpis: Daj



Název BP: SOLÁRNÍ ČLÁNKY

Vedoucí práce: Mgr. Milan Čmelík

Cíl: Přeměna sluneční energie v energii elektrickou i tepelnou. Historie a současnost solárních článků. Využití energie Slunce.

Požadavky: Teoretické a praktické znalosti z oblasti termodynamiky a elektřiny. Zpracování fyzikálních měření s využitím výpočetní techniky.

Metody: Rešerše literatury, experimentální část. Zpracování naměřených hodnot s využitím výpočetní techniky.

Literatura: BROŽ, K. Alternativní zdroje energie. 1. vyd. Praha: ČVUT, 2003. ISBN 80-01-02802-X.
TOUŠEK, J. Elektřina ze slunce, Fotovoltaické systémy a jejich ekonomika, Vesmír 79, prosinec 2000, str. 672
VANĚČEK, M. Přeměna sluneční energie v energii elektrickou, československý časopis pro fyziku 52 r.2002, str. 92
HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. Fyzika část 3. 1. vyd. Brno VUTIUM, 2000. ISBN 80-214-1868-0



Solární články

Resumé

Tato bakalářská práce se zabývá solárními články, slunečním zářením a jeho energií, způsoby využívání této sluneční energie, hlavně její přeměnou solárními články na energii elektrickou pomocí fotovoltaického jevu. Dozvíme se o základních fyzikálních principech, na kterých pracuje tato fotovoltaická přeměna. Seznámíme se s jednotlivými druhy solárních článků, jejich konstrukcí, výrobou a parametry, které ovlivňují jejich účinnost. Některé veličiny si ukážeme i experimentálně a porovnáme je u různých solárních článků.

Životadárná sluneční energie měla v minulosti obrovský podíl na vzniku života a i v dnešní době je nepostradatelná k chodu a zachování života na Zemi. S postupným vyčerpáváním neobnovitelných zdrojů energie její význam poroste ještě daleko více. V budoucnosti bude nemožné udržet moderní civilizace bez využití energie z obnovitelných zdrojů. Je tedy velice nezbytné naučit se využívat co nejefektivněji co možná největší množství ze sluneční energie, kterou naše nejbližší hvězda vyzáří. Je nezbytné pro naše budoucí přežití porozumět přeměně sluneční energie na energii elektrickou, ať už fotovoltaickou přeměnou a nebo možnými budoucími novými způsoby a technologiemi. Znalost dnešních solárních článků nám poslouží jako pevný základ pro budoucí využití sluneční energie.

Klíčová slova

Solární článek, sluneční energie, křemík, Volt-ampérová charakteristika, fotoelektrický jev



Solar cells

Resumé

This thesis deals with solar cells, solar radiation and ways of using the solar energy. The mostly it contains the transformation of solar energy into an electrical energy by solar cells using photovoltaic effect. We'll learn about the basic physical principles of this transformation operates photovoltaic. Meet the different types of solar cells, their design, production and parameters which influence their effectiveness. Some variables will be show experimentally and they will be compared over various solar cells.

Life-giving solar energy had a huge share of the origins of life in the past and even today is indispensable to keeping duration and maintenance of life on the Earth. The importance of solar energy will grow in the future because of gradual depletion of non renewable energy resources. It will be impossible to keep modern civilization working without using renewable energy. It is very necessary to learn how to use maximum possible amount of solar energy, from our nearest star, in the most efficient way. It is necessary for our future survival to understand principle of converting solar energy into electrical energy, by photovoltaic transformation or by some new future methods and technologies. Our today's knowledge of solar cells can be used as a solid foundation for the future use of solar energy.

Key words

Solar cell, solar energy, silicon, volt-ampere rating, photoelectric effect



Solarzellen

Resumé

Diese Bachelor-Arbeit beschäftigt sich mit Solarzellen, Sonnenstrahlung und ihre Energie, die energetische Nutzung von Solarenergie, besonders ihre Umwandlung durch Solarzellen auf elektrische Energie mittels Photovoltaik-Effekt. Wir erfahren mehr über die physikalischen Grundlagen, auf denen Photovoltaik funktioniert. Wir werden mit einzelne Arte der Solarzellen, ihre Konstruktion, Herstellung und Kenndaten bekannt, die ihre Wirkung beeinflussen. Einige Parametern können wir experimentel zeigen und vergleichen sie mit verschiedenen Solarzellen.

Leben spendende Solarenergie hatte in der Vergangenheit einen riesigen Anteil an der Entstehung des Lebens und auch heute ist unentbehrlich, zum Gang und eine Erhaltung des Lebens auf der Erde. Mit der allmählichen Erschöpfung der nicht erneuerbarer Energieträger, wird ihre Bedeutung wachsen viel mehr. In der Zukunft wird es unmöglich sein, die moderne Zivilisation zu erhalten, ohne einen Einsatz von erneuerbaren Energien. Es ist nun sehr notwendig zu lernen, die effizientesten mögliche Menge an Sonnenenergie ausnützen, die unsere nächste Stern ausstrahlt. Es ist notwendig, für unseres zukünftiges Überleben der Umwandlung von Sonnenenergie in elektrische Energie zu verstehen, egal ob durch photovoltaische Umwandlung oder mögliche künftige neue Methoden und Technologien. Wissen der heutigen Solarzellen kann uns als eine solide Grundlage für die künftige Nutzung der Solarenergie verwendet werden.

Schlüsselwörter

eine Solarzelle, eine Solarenergie, ein Silizium, eine Volt-Ampere Charakteristik, ein Photovoltaik-Effekt



Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

V Liberci dne: 23. 4. 2010

Petr Desenský



1	ÚVOD.....	7
2	SLUNCE A JEHO ENERGIE.....	9
2.1	Slunce.....	9
2.2	Historie využívání sluneční energie.....	9
2.3	Vznik sluneční energie.....	10
2.4	Vyzářování sluneční energie.....	10
2.5	Vliv atmosféry na sluneční záření.....	11
2.5.1	Odraz a pohlcení sluneční energie.....	13
2.6	Dopadající sluneční záření na zemský povrch.....	14
2.6.1	Solární konstanta.....	16
2.6.2	Složky záření.....	16
2.7	Využití sluneční energie.....	18
2.7.1	Pasivní systémy využívání sluneční energie.....	18
2.7.2	Aktivní systémy využití sluneční energie.....	19
2.7.2.1	Druhy kolektorů a jejich konstrukce.....	20
2.7.2.1.1	Ploché kolektory.....	21
2.7.2.1.2	Soustředné kolektory.....	22
2.7.2.1.3	Vakuové kolektory.....	22
3	VÝROBA ELEKTRICKÉHO PROUDU ZE SLUNEČNÍ ENERGIE FOTOVOLTAICKÝM DĚJEM POMOCÍ SOLÁRNÍCH ČLÁNKŮ.....	24
3.1	Vývoj fotovoltaiky.....	24
3.2	Fotoelektrický jev.....	26
3.2.1	Fotovoltaický jev.....	27
3.3	Solární články.....	32
3.3.1	Křemíkové solární články.....	32
3.3.1.1	Monokrystalické křemíkové články.....	33
3.3.1.2	Polykrystalické křemíkové články.....	35
3.3.1.3	Amorfní křemíkové články.....	37



3.3.2	Ostatní články druhé generace	38
3.4	Konstrukce křemíkových solárních článků.....	41
3.5	Nástin nových technologií.....	44
4	VLASTNÍ MĚŘENÍ.....	47
4.1	Křemíkový školní článek	49
4.2	Příprava selenového článku na měření VA charakteristiky.....	54
4.2.1	Vlastní měření VA charakteristiky selenového článku.....	58
5	ZÁVĚR.....	63
6	POUŽITÁ LITERATURA.....	65



1 Úvod

Běžný lidský život si dnes bez elektrické energie nejde snad asi představit. Od dob, co v energetické úloze elektrická energie vystřídala v rozsáhlém měřítku oheň, je pro nás nepostradatelná. Díky ní si můžeme ohřívat jídlo, zahřát se v zimě, svítit a komunikovat mezi sebou. Je důležitá i v dopravě a nepostradatelná ve veškerém průmyslu. Elektrická energie nás obklopuje neustále a každý den. Pohání většinu domácích spotřebičů, průmyslových strojů, dnes nepostradatelné počítače a mobilní telefony by bez ní nebyly k ničemu, dokonce i když posloucháme při cestě vlakem nějaký příruční přehrávač, používáme elektrickou energii, aniž si to většina z nás uvědomuje. Kdyby najednou nebyla, přestali by všechny elektronické přístroje pracovat a to je katastrofický scénář, kterým se zabývají převážně autoři sci-fi ve svých apokalyptických dílech.

Jak jsou na tom místa, kde není přístup do veřejné distribuční sítě elektrické energie? Jsou to například informační ukazatele na okraji obcí, nouzové telefony na dálnicích vedoucí pouštěmi v jižních státech Spojených států amerických, vysokohorské chaty, vzdálené farmy v australských savanách, ropné plošiny na volném moři apod. Tato místa a přístroje by se bez elektrické energie neobešla a tak se problém s její dodávkou řešil nejprve u nich. V rozvojových zemích je dokonce většina území bez dodávky elektrické energie. Obyvatelé těchto oblastí využívají primárně primitivní zdroje energie (oheň), až na velká hlavní města. Dokonce i v nehostinných oblastech, které nejsou osídleny, je potřeba elektrické energie pro výzkumné vědecké stanice. Všude v těchto místech, kde není možné zavést elektrický proud z elektráren a nebo to není ekonomicky výhodné, si přijdou na své solární články, které jsou nejlepším alternativním řešením při nedostatku elektrické energie. Využití solárních článků se rozšířilo i za hranice naší planety Země do kosmu, neboť bez elektrické energie, kterou produkují solární články, by se neobešel žádný kosmický program.

Hlavně díky rozvoji kosmického programu došlo k rozvoji a praktické aplikaci solárních článků, které byly prvně použity pro dodávku elektrické energie ruské družici Sputnik 3 už v roce 1957. Zpočátku byly solární články používány pouze pro vesmírné výzkumy, kde



byly i přes svou vysokou cenu nenahraditelným zdrojem elektrické energie. S dalším výzkumem a zdokonalování technologií solárních článků a jejich výroby našly solární články uplatnění i na zemském povrchu na oněch již zmiňovaných nedostupných a odlehlých místech, kde převýšila potřeba elektrické energie vysokou pořizovací cenu solárních článků a celého ostrovního systému. V posledních desetiletích se již díky dalšímu rozvoji technologií, zlevnění materiálů a různým dotacím začaly solární články hojně rozvíjet jako primární zdroje elektrické energie i v oblastech s přístupem do veřejné distribuční sítě.

Zájem o solární články je prokazatelný i u státních představitelů, jelikož i ti nemohli nadále přehlížet skeptické predikce o světových zásobách energií. Drtivá většina výroby elektrické energie je závislá na neobnovitelných energetických zdrojích, převážně na fosilních palivech, jejichž zásoby jednou dojdou. Stejně tak i jaderná energie se neobejde bez neobnovitelných a vyčerpateľných zdrojů energie. Za několik málo desítek let, až dojde fosilní palivo, by se mohlo lidstvo ocitnout před problémem s nedostatkem zdrojů energie. Abychom na tuto dobu byli řádně připraveni, je třeba věnovat se již dnes náhradním, alternativním řešením, jako je získávání elektrické energie ze solárních článků. Sluneční energie je sice také vyčerpateľný zdroj, ale vzhledem k tomu, že termonukleární fúze v jeho jádře budou probíhat ještě několik miliard let, ji oficiálně považujeme za zdroj obnovitelný. Ostatní obnovitelné zdroje na Zemi existují rovněž díky sluneční energii, protože díky ní například proudí na Zemi větry a vypařuje se voda, čímž je zajištěn koloběh vody v přírodě a tok řek. Elektrárny využívající energii biomasy jsou také nepřímo závislé na životodárné sluneční energii, díky které rostou rostliny (Mimo jiné i rostliny, ze kterých vznikaly fosilní paliva, vyrostly kdysi díky sluneční energii).

Tyto technologie získávání elektrické energie z obnovitelných zdrojů se musíme snažit osvojovat stále lépe a lépe, abychom dostupné obnovitelné zdroje energie dokázali využívat co nejefektivněji. V této práci se budeme věnovat využívání sluneční energie a její přeměny v teplo a převážně v elektrickou energii pomocí solárních článků, pracujících na principu fotovoltaického jevu.



2 Slunce a jeho energie

2.1 Slunce

Slunce je naše nejbližší hvězda a díky němu vznikl na naší planetě život. Jeho hmotnost je $1,98 \cdot 10^{30} \text{ kg}$ a jeho průměr $1,39 \cdot 10^9 \text{ m}$ je 109krát větší než je průměr Země. Je tvořeno převážně z atomárního vodíku, helia a nepatrného množství ostatních prvků periodické soustavy. Vodík je zastoupen zhruba 70%, helium 28% a zbylá 2% připadnou na ostatní prvky (kyslík, dusík, neon, železo, křemík, hořčík a síra). V hmotě Slunce jsou všechny tyto prvky obsaženy ve skupenství plasmu (kvazineutrální¹ plyn nabitých částic, s vyšším stupněm ionizace, který vykazuje kolektivní chování².) [6]

2.2 Historie využívání sluneční energie

To, že lidé využívali sluneční energii ve svůj prospěch se dá datovat k prvním počátkům lidské civilizace. Dokonce i pračlověk věděl, že „když zmokne, tak na slunci zase uschne“. Lidé využívali od pradávna sluneční energii k sušení mokrých kožešin i sebe samotných. Později s rozvojem nástrojů, nářadí a různých pomůcek ulehčujících lidem práci, nechávali lidé stát na slunci vědra s vodou, aby se voda v nich ohřála. Sluneční svit byl využíván dokonce i k určování času. Jako první se sluneční hodiny naučili používat Řekové. Egypťané zase používali odraz slunečních paprsků v zrcadle k osvětlení tmavých místností. Později si lidé začali všimnout, že v tmavých vědrech se voda ohřeje rychleji, než ve světlých. Začínali tak získávat první vědomosti potřebné k lepšímu využívání sluneční energie. V 19. století se v důsledku velkého rozvoje vědy začaly uplatňovat získané vědomosti o využití solární energie v praxi a začaly vznikat stále dokonalejší systémy na ohřev vody, vytápění budov a nakonec i pro vedení elektrického proudu a výrobu elektrické energie.

¹ Přibližná rovnost koncentrací kladně nabitých iontů a záporně nabitých elektronů

² Schopnost plasmu jako celku svými projevy generovat globální elektrická a magnetická pole a na takováto globální pole reagovat.



2.3 Vznik sluneční energie

Slunce je žhavá koule. Na jeho povrchu bychom naměřili teplotu 5773,15 K. Avšak teplota v jeho jádru je mnohonásobně vyšší. Odhaduje se až na $15,4 \cdot 10^6$ K. Při takovéto obrovské teplotě a obrovském tlaku ($2 \cdot 10^{10}$ MPa) jsou všechny atomy ionizovány a probíhá termonukleární reakce, která je zdrojem sluneční energie. Atom vodíku ztrácí svůj záporně nabitý obal. Dochází k přeměně vodíku na helium. Tato přeměna probíhá ve třech fázích. V prvních dvou fázích se nejprve tři jádra vodíku spojí a vytvoří izotop helia, uvolní se energie v podobě záření. V poslední fázi se spojí dva izotopy helia za vzniku jádra helia, dvou jader vodíku a energie. Podle množství helia, které až dosud vznikalo, lze stáří Sluce odhadnout na 5 miliard let a předpokládá se, že termonukleární reakce budou pokračovat ještě dalších 5 až 10 miliard let. To je dlouhá doba oproti době existence lidí a proto je energie ze Slunce považovaná za obnovitelný zdroj. [1]

2.4 Vyzářování sluneční energie

Při termonukleárních fúzích v jádru Slunce se uvolní obrovské množství energie ($33 \cdot 10^{12}$ kW/s), která je následovně vyzařována do vesmírného prostoru jako záření o vlnových délkách 10^{-10} m až 10^3 m (od rentgenových paprsků a ultrafialového záření až po rádiového záření). Z této škály záření jsou pro přenos energie nejdůležitější paprsky o vlnových délkách 0,2 μ m až 3 μ m (viditelné světlo a infračervené záření), na které připadá přenos největší části energie vyzařované Sluncem. Celkový tok vyzařované sluneční energie je $3,85 \cdot 10^{26}$ W a její měrný tok nebo-li intenzita záření je na slunečním povrchu $6 \cdot 10^7$ W.m². [7]

Ze slunečního jádra musí urazit sluneční záření pouze 700 tisíc km na sluneční povrch, odkud je vyzařováno do vesmíru. To mu zabere 20 tisíc let. Je to neúměrně dlouhá doba v porovnání s 8 minut trvajícím a 150 milionů km dlouhou cestou k hranici naší atmosféry. Je to tím, že ve vesmíru je vzduchoprázdno a nedochází ke srážkám slunečního záření



s žádnými částicemi. K naší atmosféře dorazí záření ve stejné formě, v jaké bylo vyzářeno Sluncem, avšak se značně menší intenzitou. S rostoucí vzdáleností se výkon záření rozptýlí na větší plochu. Na hranici atmosféry Země je intenzita slunečního záření v rozmezí hodnot 1340 až 1 390 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ (v průměru 1 360 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$). Tato hodnota se nazývá *solární konstanta*. Z celkového výkonu Slunce (tok sluneční energie = $3,85 \cdot 10^{26}$ W) dopadá na naši Zemi pouhých $1,8 \cdot 10^{17}$ W, což jsou zhruba dvě miliardy toku sluneční energie. I takto malá část výkonu Slunce stačí k tomu, aby byl na Zemi zajištěn veškerý život. Zbývající tok záření je zachycen ostatními planetami přibližně stejnou měrou, jakou ji zachycuje naše planeta. Zbytek sluneční energie uniká do mezihvězdného prostoru.

2.5 Vliv atmosféry na sluneční záření

Ve výšce tisíc km nad povrchem Země vstupuje sluneční záření do naší atmosféry, která se skládá převážně z dusíku a kyslíku. Ve výškách nad 60 km nad zemským povrchem pohlcují tyto atmosférické plyny sluneční ultrafialové a rentgenové záření a ionizují se. Ve výškách 20 km až 30 km nad zemským povrchem, se nachází vrstva, která obsahuje velké množství ozonu, ozonoféra. V této ozonoféře se pohlcuje zbytek nebezpečného ultrafialového záření, které má karcinogenní účinky na živé buňky pokožky a poškozuje zrak. V troposféře, nejnižší části atmosféry, se pohlí část zbývajícího slunečního záření vodní parou, prachem a kapkami vody v mracích. [1]

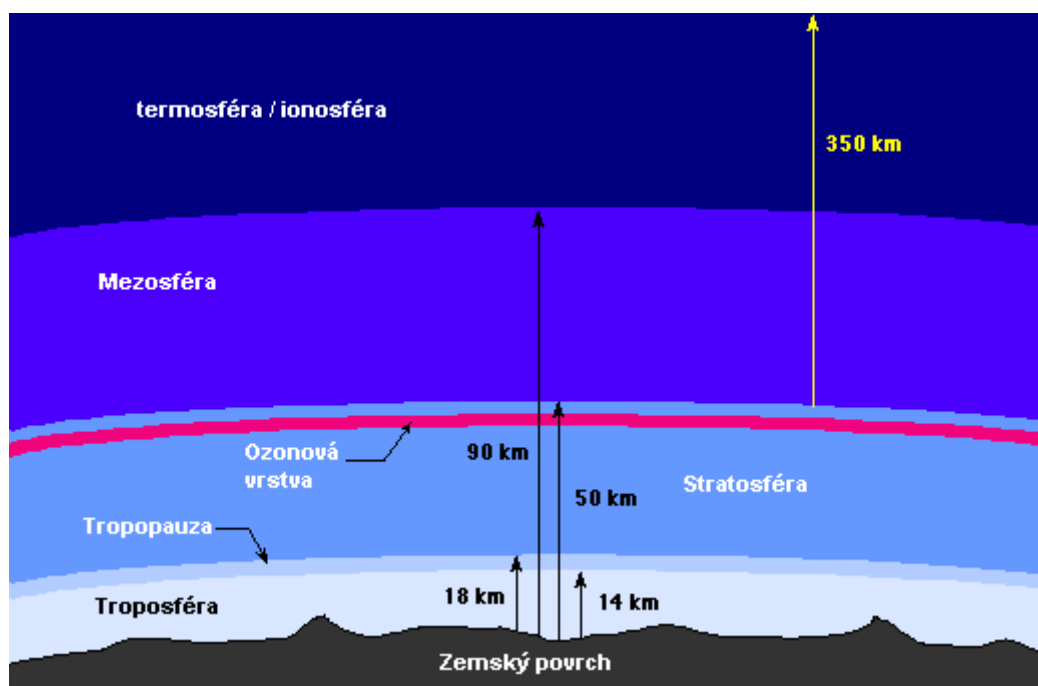
Průchodem atmosférou dochází ke zmenšení intenzity slunečního záření. Paprsky se jednak rozptylují odrazem o molekuly plynů a částice prachu ve vzduchu a jednak dochází k pohlcení záření víceatomovými plyny (vodní párou H_2O , oxidem uhličitým CO_2 a ozónem O_3), které se nacházejí v atmosféře. [1]

Výsledný vliv atmosféry na sluneční záření je ovlivněn více faktory, mezi které patří:

Výška slunce nad obzorem a nadmořská výška - oba dva faktory souvisí s tloušťkou vrstvy vzduchu, kterou musí záření projít.

Oblaka – ve velké míře pohlcují a odrážejí sluneční záření.

Míra znečištění atmosféry – vyšší obsah tuhých částic a aerosolů v atmosféře zmenšuje intenzitu slunečního záření.



Obr. 1 Jednotlivé vrstvy atmosféry [13]

Pro určení míry, kterou se znečištění atmosféry podílí na zmenšení intenzity slunečního záření, je zaveden *součinitel znečištění* Z . Ten závisí na atmosférickém tlaku (který je ovlivňován hlavně nadmořskou výškou) a na obsahu příměsí ve vzduchu. Součinitel znečištění Z je definován vztahem:

$$Z = \frac{\ln I_0 - \ln I_n}{\ln I_0 - \ln I_\zeta} \quad (1)$$

Kde I_0 je solární konstanta [W/m²]

I_n - intenzita záření na plochu kolmou ke slunečním paprskům
při daném znečištění ovzduší [W/m²]



I_n - intenzita záření na plochu, kolmou ke slunečním paprskům
při dokonale čistém ovzduší [W/m²] [7]

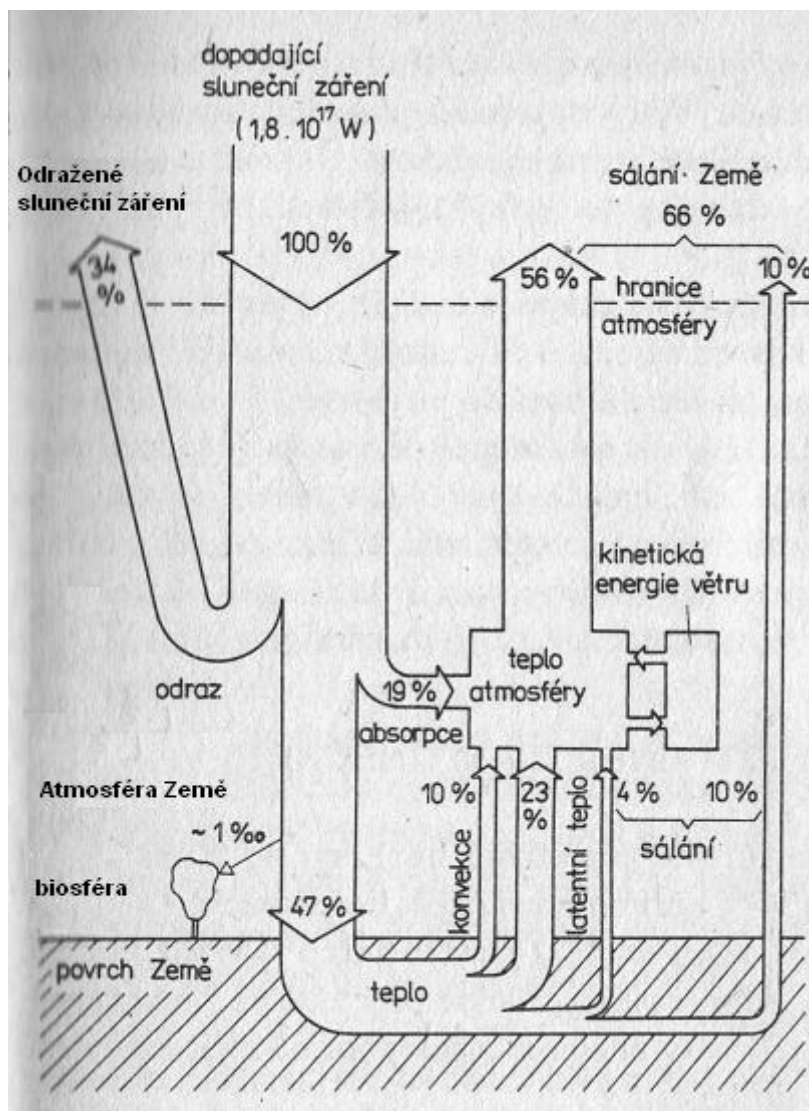
Místa s čistším ovzduším (venkov) mají menší součinitel znečištění oproti průmyslovým městům, kde je značná koncentrace exhalací. *Součinitel znečištění* se zmenšuje s nadmořskou výškou. V tabulce 1 je uveden přehled hodnot součinitele znečištění pro různé oblasti.

Z	místo
3	venkov bez průmyslových exhalací
4	město s průmyslovými exhalacemi
2,5	místo nad 1000 m n. m.
2	místo nad 2000 m n. m.

Tab. 1 Součinitel znečištění v různých lokalitách

2.5.1 Odraz a pohlcení sluneční energie

Z celkového toku energie ($1,8 \cdot 10^{17}$ W) dopadající na Zemský povrch se 34% odrazí zpět do vesmíru od již zmiňovaných mraků, částic prachu a zemského povrchu. Další část záření, asi 19% je pohlcena atmosférou a zbylých 47% sluneční energie pohltí zemský povrch. Tato pohlcená energie se mění na teplo, které je vyzařováno zemským povrchem jako infračervené záření. To je asi 14% z celkových 47%. Toto infračervené záření je opět pohlcováno v atmosféře víceatomovými plyny, což vede k zvýšení teploty zemského povrchu (skleníkový efekt). Velké množství záření dopadajícího na zemský povrch (23%) se spotřebuje na ohřev vody oceánů a dojde k jejímu vypařování. Vodní pára je pak unášena proudy vzduchu, je vynášena vzhůru do chladnějších vrstev atmosféry, kde kondenzuje a předává své skupenské teplo kondenzační okolnímu vzduchu. Zbylých 14% z dopadajícího záření je spotřebováno na konvekci, neboli vedení tepla. Od povrchu Země se ohřeje vzduch a ten potom vstoupá vzhůru, jelikož má menší hustotu než studený vzduch ve vyšších polohách a tím vznikají větry. Pouze nepatrné množství sluneční energie, asi 0,1 %, připadá na biologické reakce probíhající v biosféře, jako například na fotosyntézu (Přeměna sluneční energie na energii chemických vazeb. Probíhá v rostlinách.). [1]

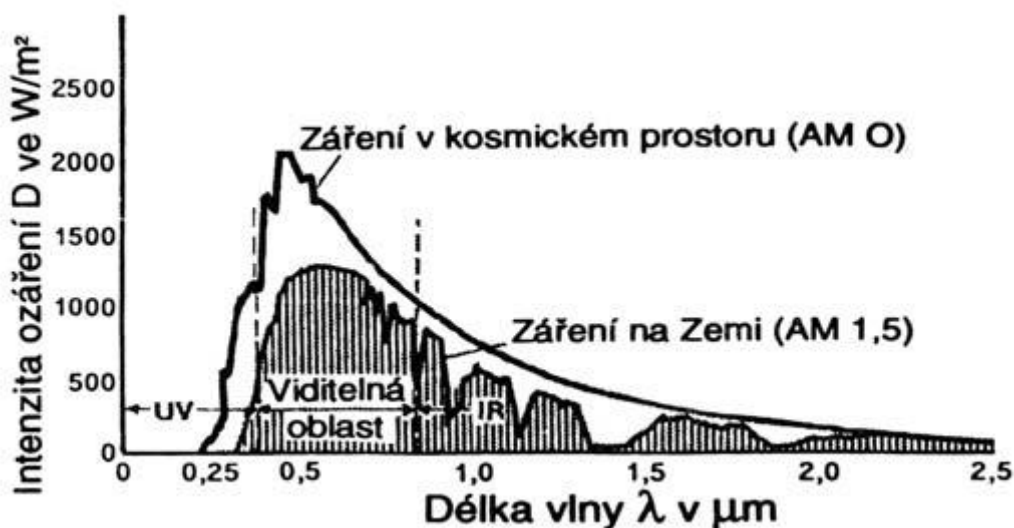


Obr. 2 Absorpce a odraz slunečního záření při průchodu atmosférou [7]

2.6 Dopadající sluneční záření na zemský povrch

Sluneční záření dopadající na povrch Země, tj. na plochu pod vrstvou atmosféry, se rozptýlí a částečně pohltí při průchodu atmosférou, takže na povrchu je intenzita slunečního záření menší, než hodnota solární konstanty. Zmenšení intenzity slunečního záření závisí jak na součiniteli znečištění atmosféry, tak na tloušťce vrstvy vzduchu, kterou sluneční záření proniká. Na naše území dopadá sluneční záření o průměrné intenzitě $620 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ a jen málokdy dosáhne hodnoty $1000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, která se obecně v literatuře udává jako průměrná intenzita slunečního záření dopadající na povrch planety Země. [9]

Na obrázku 3 je znázorněna intenzita záření dopadajícího na zemský povrch při jasné obloze v závislosti na vlnové délce záření na Zemi. Vyšrafovaná plocha pod křivkou ukazuje celkový teoretický využitelný výkon slunečního záření.



Obr. 3 Rozdělení energie slunečního záření dopadajícího na zemský povrch při jasné obloze [8]

Spektrum AM 1,5 (air mass – množství vzduchu) ukazuje hodnotu intenzity slunečního záření na zemském povrchu při zcela jasné obloze, které odpovídají výšce Slunce přibližně 45° nad obzorem. Sluneční záření prochází jeden a půl násobně širší vrstvou vzduchu (proto 1,5), než by procházelo, kdyby slunce bylo v zenitu (90° nad obzorem). AM 0 udává energetické rozložení slunečního záření na vnější hranici atmosféry¹. [14]

¹ Pokud je slunce přímo v zenitu, ve výšce devadesáti stupňů, prochází sluneční záření nejtenčí možnou vrstvou vzduchu. Takové spektrum se označuje jako AM1. AM0 je spektrum slunečního záření v kosmickém prostoru ve vzdálenosti 150 miliónů kilometru od slunce bez ovlivnění atmosférou. [14]



2.6.1 Solární konstanta

O solární konstantě jsme se již zmínili v kapitole 2.4. Záření sluneční energie, kde jsme uvedli, že na hranici atmosféry Země je intenzita slunečního záření průměrně rovna $1\,360\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ a že této hodnotě intenzity říkáme solární konstanta. Kde se však tato hodnota intenzity slunečního záření vzala a jaká je její přesná velikost? Na tuto otázku se teď pokusíme co nejsrozumitelněji opovědět.

Solární konstanta I_0 je energie od Slunce, dopadající na jednotku plochy kolmou ke směru šíření záření za jednotku času při průměrné vzdálenosti Slunce od Země mimo zemskou atmosféru. Před vesmírným programem se solární konstanta stanovovala z pozemních měření slunečního záření. Sluneční záření prošlo atmosférou a bylo rozptýleno částicemi v ní. Atmosféra také nepropouští sluneční záření v celém rozsahu spektra. Tím byla ovlivněna přesnost výzkumu. Na základě těchto měření a odhadů průchodu záření atmosférou stanovili později astronomové hodnotu solární konstanty na $1322\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. S rozvojem kosmických programů a následných měření v kosmu přijala WMO (světová meteorologická organizace) v roce 1981 hodnotu solární konstanty $I_0 = 1367\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ s přesností na 1%.

2.6.2 Složky záření

Sluneční záření dopadající na ozářenou plochu je dvojího druhu - přímé a difúzní. Přímé záření dopadá přímo na ozářenou plochu a jeho intenzita na plochu kolmou ke směru paprsků se dá vypočítat podle vztahu:

$$I_{pn} = I_0 \exp\left(-\frac{Z}{\varepsilon}\right) \quad (\text{W}\cdot\text{m}^{-2}) \quad (2)$$

Kde Z je součinitel znečištění [-]

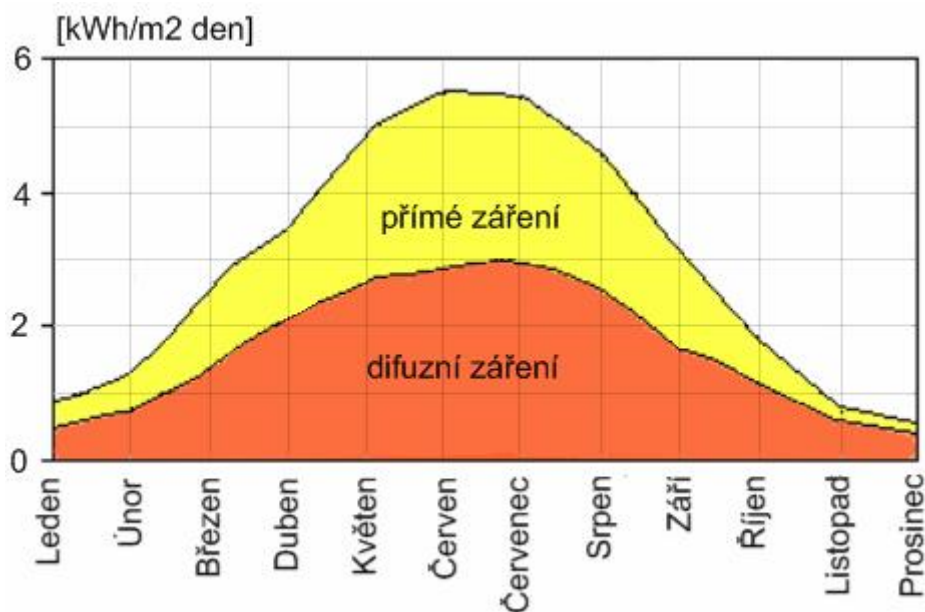
I_0 solární konstanta [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]

ε součinitel výšky Slunce nad obzorem a nadmořské výšky daného místa [-] [7]

Záření, které se v atmosféře rozptýlí odrazem o molekuly plynů ve vzduchu, o částice prachu a o mraky, proniká k povrchu Země jako difúzní záření. Při tomto rozptýlu se vlnová délka λ paprsků nemění. Difúzní záření má tedy stejnou vlnovou délku jako záření přímé. Na ozářenou plochu také dopadá část přímého záření, které se odrazí od okolních ploch. Toto odražené přímé záření se také považuje za difúzní záření. [7]

Difúzní záření dopadá na zemský povrch i v době, kdy je obloha zatažená mraky a Slunce přímo nesvítí. Zmenšuje se podíl odražených paprsků od okolních ploch a zvětšuje se podíl rozptýlených paprsků v atmosféře. Výpočet intenzity difúzního záření překračuje rámec této bakalářské práce a proto jej vynecháme.¹

Výsledná intenzita slunečního záření je jednoduchým součtem intenzity přímého a difúzního záření. Obě složky záření nazýváme dohromady globální sluneční záření.

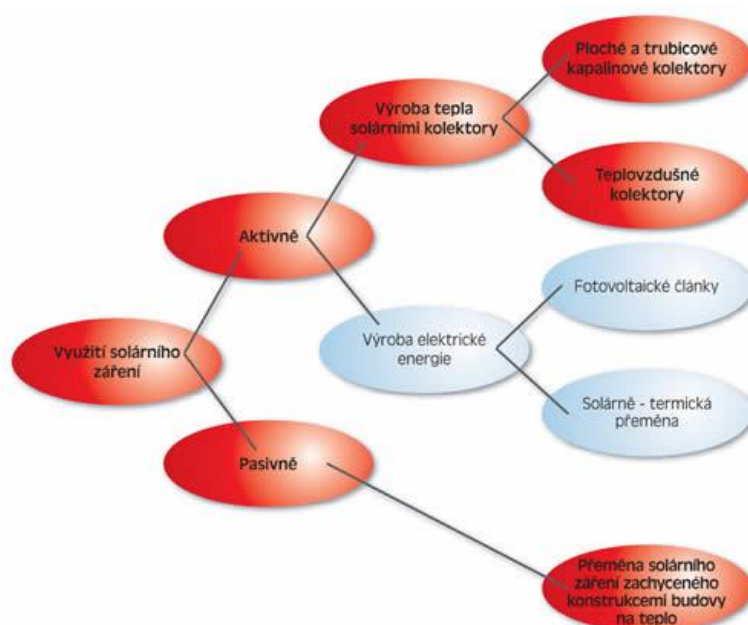


Obr. 4 Složky globálního slunečního záření [16]

¹ Podrobněji je výpočet intenzity difúzního záření popsán např. Kittler, R., Mikler, J.: *Základy využívania slnečného žiarenia*. Bratislava, Veda – SAV 1986

2.7 Využití sluneční energie

Přeměna solárního záření na teplo (fototermální přeměna) je jedna z možností, jak využívat sluneční záření. Absorbací slunečního záření na povrchu tuhých látek a kapalin se energie fotonů mění v teplo. Foton při dopadu rozkmitá molekulu vody a přemění tak svou energii na pohybovou energii molekuly. Sluneční záření se tak přeměňuje na teplo. Fototermální přeměna probíhá pasivně nebo aktivně. Pasivně pomocí pasivních solárních prvků budov - prosklené fasády, zimní zahrady, skleníky pro pěstování rostlin apod.. Aktivní přeměna se realizuje pomocí přídavných technických zařízení - slunečních sběračů (kolektorů), instalovaných např. na střechách budov a sloužících převážně k ohřevu užitkové vody.. Podrobné rozdělení využití slunečního záření si můžeme prohlédnout na obrázku 5.



Obr. 5 Způsoby využití solárních zařízení [10]

2.7.1 Pasivní systémy využívání sluneční energie

Tepelná energie je využívána přímo v místě, kde vzniká a není nijak aktivně transportovaná. Výhodou pasivních systémů je, že nepotřebují žádné další přídavné zařízení. Celý proces využívání sluneční energie spočívá v propustnosti tepelného záření do



systemu. Dodatečně pro transport tepla v systému pomáhá i cirkulace teplého vzduchu z osluněných místností do ostatních místností v objektu. Například skleníky fungují tak, že skleněné tabule propustí sluneční záření o vlnových délkách viditelného světla dovnitř i ven, ale už nepropustí teplo stoupající od země (obr. 2) a tím udržují teplo uvnitř skleníku. Pasivní systém využití sluneční energie se uplatní např. u lodžii, prosklených verand a podobně. [10]

2.7.2 Aktivní systémy využití sluneční energie

U aktivních systémů se energie dopadajícího slunečního záření zachycuje kolektory a přeměňuje se na teplo. Tepelná energie je transportována teplotonosnou látkou (vodou či vzduchem) přímo k spotřebiči (boiler, vytápěcí nebo k sušicí zařízení) a nebo do zásobníku tepla (nádoba s teplou vodou), kde se skladuje pro dobu, kdy je sluneční energie nedostatek (např. ve dnech s velkou oblačností a nebo v noci). Aktivní sluneční systémy rozdělujeme podle druhu teplotonosné látky v kolektorech, neboli sběračích tepla, na kapalinové a teplo-vzdušné. Teplovzdušné systémy se vyznačují velkými průřezy rozváděcích kanálů, kapalinové naopak malými průměry potrubního rozvodu v okruhu kolektorů. [7]

Ohřátou vodu v kapalinových kolektorech lze použít ihned, jako teplou užitkovou vodu a nebo ji použít pro transport tepla v systému k výměníkům. Teplo-vzdušné kolektory mohou být také součástí systémů bez akumulace tepla, (např. pro sušení obilovin v zemědělství přímo ohřátým vzduchem z kolektorů) a nebo se dá jejich teplo akumulovat mimo jiné i v tuhé hmotě, kterou je např. náplň z říčních oblázků.¹ [7]

Mezi okruhy kolektorů, které sbírají teplo, a okruhy spotřebičů, které využívají nasbírané teplo, fungují jako spojovací články zásobníky tepla. K okruhu kolektorů, což je hlavní okruh celého zařízení, patří kromě kolektorů i již zmiňovaný zásobník tepla a rozvodné potrubí mezi zásobníkem a kolektory. K rozvodnému zařízení je většinou zapojeno i oběhové čerpadlo, které slouží k udržování oběhu teplotonosné kapaliny, a další armatura

¹ Ohřátý vzduch předá teplo náplni v zásobníku (např. říčním oblázkům), a teplo je tak akumulováno.



sloužící k regulaci a zabezpečení celého procesu. Jedná se většinou o expanzní nádoby, pojistné a odvzdušňovací ventily apod. [7]

Cirkulující kapalina předává teplo vodě v zásobníku pomocí povrchového výměníku tepla. Nedochozí tedy k míšení teplotné kapaliny a vody v zásobníku tepla. Takto fungující okruh nazýváme *uzavřený*. Jestliže však teplotnou kapalinou bude voda, může zařízení postrádat výměník tepla a voda z kolektorů se může rovnou mísit s vodou v zásobníku tepla. Takovýto okruh se potom nazývá *otevřený*. Otevřený okruh se užívá jen v jednoduchých zařízeních pro ohřev užitkové vody. Častým příkladem užití otevřeného okruhu je přímý ohřev vody v bazénech, kde samotný bazén slouží jako zásobník tepla. [1]

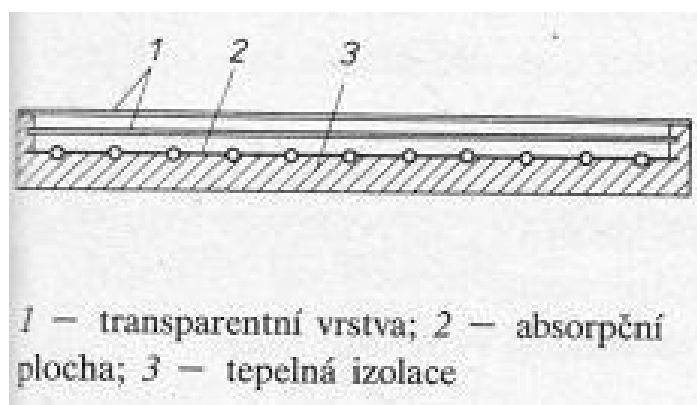
2.7.2.1 Druhy kolektorů a jejich konstrukce

Hlavními součástmi solárního kolektoru jsou: zasklení absorpční plochy, absorpční plocha, zadní tepelná izolace a rám kolektoru. Zasklení absorpční plochy plní ochrannou funkci a chrání absorber před nepříznivými povětrnostními vlivy. Nejčastěji se používá tabulové bezpečnostní sklo. Sluneční záření projde krycím sklem beze změny a vstřebává se v absorberu. Vlastní absorber je kovová deska s dutinami různých tvarů, kterými protéká teplotná látka (kapalina). Tyto dutiny mohou být například kovové trubice připevněné nebo přivařené k desce ze stejného kovového materiálu jako trubice a nebo je celý kolektor s dutinami svařený ze dvou výlisků. Absorber je tepelně izolován, aby se zabránilo tepelným ztrátám. Jako vhodná tepelná izolace pro kolektory je pěnový polyuretan nebo vláknité izolační materiály, jako jsou například skleněná vlna, vlna z minerálních vláken apod. Izolační materiál musí odolávat vysokým teplotám až 200°C. [7]

Sluneční kolektory je možno dělit do různých skupin podle různých kritérií. Dělení podle teplotné látky jsme již zmiňovali. Dále lze kolektory obecně dělit podle typu jejich konstrukce od které se i odvíjí velikost absorpční plochy. Teplo-vzdušné kolektory se konstrukcí velice podobají kapalinovým a proto zde uvedeme obecné rozdělení a konstrukci kapalinových teplotných kolektorů slunečního záření podle jejich konstrukčního řešení. Toto rozdělení se v různých literaturách liší. Podrobně jsou

jednotlivé typy kolektorů definovány v normě ČSN EN ISO 9488. Neobecněji se tyto kolektory dělí na ploché, koncentrující (soustředné) a vakuované. [1]

2.7.2.1.1 Ploché kolektory



Obr. 6 – Plochý kolektor

Ploché kolektory patří k nízkoteplotním slunečním systémům¹. Nijak nesoustředují sluneční záření – to dopadá na absorpční plochu stejně velkou, jako je čelní plocha krycího skla, které chrání kolektor.

Ploché kolektory :

- a) ploché kolektory pro celoroční využití
- b) ploché kolektory bez transparentního krytu – absorbéry

ad a) Tyto kolektory představují nejrozšířenější typ v dnešní době. Sice oproti vakuovaným kolektorům mají větší tepelné ztráty a hrozí také nebezpečí kondenzace páry uvnitř kolektoru, což snižuje celkovou účinnost, ale na druhou stranu jsou levnější. Jejich využití je v celku široké. Uplatní se při ohřívání užitkové vody, celoročnímu ohřevu vody v bazénu či na přitápění v domácnosti.

¹ Teplota teplotnosné kapaliny nepřesahuje 80°C.

ad b) Najdeme je v systémech, které se využívají pouze sezónně. To, že absorber není zakrytý, zvyšuje tepelné ztráty kvůli ochlazení absorberu okolním vzduchem. Jsou však nejlevnějším řešením ze všech a tak se uplatní v malé míře pro ohřev vody ve venkovních bazénech, venkovní sprchy, ohřev vody na zalévání na zahrádkách apod. [1]

2.7.2.1.2 Soustředné kolektory



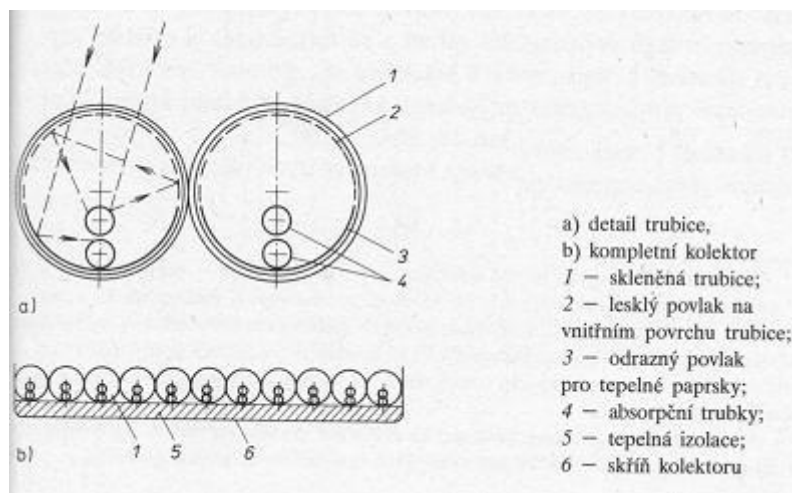
Obr. 7 – soustředný kolektor s odraznou plochou

Soustředné kolektory mají oproti plochým kolektorům drobné vylepšení. Největším rozdílem vůči plochým kolektorům je odrazná plocha, která odráží sluneční záření na absorpční plochu kolektoru. Sice se kvůli montáži odrazných ploch zmenší povrch ploch absorpčních, ale na druhou stranu se díky koncentraci paprsků do jednoho místa¹ dosáhne vyšších teplot teplotnosné tekutiny.

2.7.2.1.3 Vakuové kolektory

Vakuové kolektory mají nejvyšší účinnost a pracovní teplota jejich teplotnosné kapaliny přesahuje 100°C. Je to díky tomu, že absorpční plocha se nachází uvnitř skleněné trubice a je ve vakuu.

¹ Paprsky se odrážejí od odrazné plochy na absorpční plochu kolektoru.



Obr. 8 – vakuový kolektor

Vakuované kolektory mají absorpční plochu umístěnou v trubici s vakuem. Vakuum slouží jako tepelný izolant a odstraňuje skoro všechny tepelné ztráty tepla z teplonosné kapaliny do okolí. Vakuové kolektory jsou schopny zachycovat i sluneční záření o slabých intenzitách a díky eliminaci tepelných ztrát jsou schopny pracovat i za nízkých teplot. Jsou tedy perfektním řešením pro celoroční provoz a jejich účinnost je poměrně vysoká. Ale kvůli složitější konstrukci je jejich cena vysoká a tudíž nejsou tak rozšířené jako ploché kolektory. [7]

Kolektory slunečního záření byly uvedeny pouze jako příklad dalšího využití sluneční energie. Existuje samozřejmě celé řada různých druhů konstrukcí jednotlivých typů slunečních kolektorů. Ty však nejsou další podstatnou částí této bakalářské práce a proto je dále již nebudeme rozebírat.¹

¹ Podrobně se těmito kolektory zabývá CIHELKA, J. Solární tepelná technika. 1. vyd. Praha 1994. T.Malina. ISBN 80-900759-5-9



3 Výroba elektrického proudu ze sluneční energie fotovoltaickým dějem pomocí solárních článků

Dalším způsobem, jak se dá využívat sluneční energie, je výroba elektrického proudu. Toto téma přímo souvisí s tématem této práce a proto jej uvádíme v samostatné kapitole, na rozdíl od ostatních druhů využívání sluneční energie.

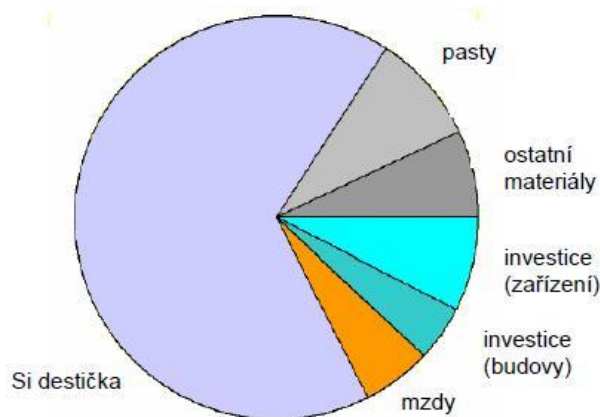
3.1 Vývoj fotovoltaiky

V roce 1839 pozoroval francouzský badatel Alexandr E. Becquerel (dědeček více známého Henriho A. Becquerela, který objevil radioaktivní záření a je podle něj pojmenovaná jednotka radioaktivity) při svých pokusech zjistil, že dvě desky z kovu ponořené do zředěné kyseliny vyrábí více elektrické energie, dopadá-li na ně sluneční záření. Tento pokus však na tehdejší dobu neměl příliš velký význam. První solární článek ze selenu sestrojili W. G. Adams a R. E. Day v roce 1877. Na tomto článku byl patrný fotovoltaický jev. Další významný krok na poli fotovoltaiky zaznamenal americký vynálezce Charles Fritts, který selen potáhl velmi tenkou vrstvou zlata a jeho články začali dosahovat účinnosti kolem 1%. Bylo tomu tak v roce 1883. Ke komerční výrobě nedošlo, protože materiál byl příliš drahý.

Dalšímu vývoji fotovoltaiky stál v cestě fakt, že vědci neznali princip, jakým fotovoltaické články vyrábějí proud a co tento proces dokáže ovlivnit. V roce 1905 se podařilo Albertu Einsteinovi popsat fotoelektrický jev, za což dostal v roce 1921 Nobelovu cenu za fyziku.[1] Popsal však pouze jev, kterému dnes říkáme vnější fotoefekt. Vnitřní fotoefekt zatím popsán nebyl. V roce 1918 přišel další důležitý mezník ve vývoji fotovoltaiky, když polský inženýr Jan Czochralski publikoval článek o výrobě monokrystalického křemíku tažením z roztaveného polykrystalického křemíku. Opravdový rozmach výzkumu fotovoltaiky přišel až s nástupem kosmických programů v 50. letech 20. století. Bylo třeba vyřešit problém energetického zásobování umělých družic ve vesmíru. V souvislosti s hledáním nových zdrojů energie se v roce 1954 podařilo Bellovým laboratořím v USA sestrojít solární článek z křemíku, dopovaný jiným prvkem, tedy článek s p-n přechodem,

který dosahoval účinnosti okolo 6%. Tehdy se zrodila současná podoba dnešních solárních článků. V roce 1958 byly prvně použity solární baterie na americké družici Vanguard a nedlouho poté i na ruské družici Sputnik 3. Dalším důležitým podnětem pro rozvoj fotovoltaiky se vedle vesmírného programu stala i světová ropná krize v 70. letech. Velmoci hledaly nové způsoby, aby se zbavily závislosti na ropě a investovaly do vývoje nových technologií pro výrobu energie včetně solárních článků. Od té doby pomohly další objevy se zvýšením účinnosti a zlevněním nákladů na výrobu solárních článků. Postupně se zdokonalovalo pouzdření do modulů, metody kontaktování, technologické operace, příprava výchozího materiálu a další vylepšení, které vedli k podobě solárních článků, jak je známe dnes. Konkrétně se jedná např. zdokonalení antireflexní vrstvy pomocí strukturalizace povrchu (1994 struktura PEARL s minimální odrazovostí), nahrazení napařovaných kontaktů sítotiskem, v 70. letech výroba bloků multikrystalického křemíku apod. [5] [1] [8]

Zdokonalení technologie výroby a hromadná výroba vedly k výraznému snížení cen solárních článků. Začátkem 90. let začaly být solární články hromadně a komerčně využívány pro fotovoltaické systémy připojené do rozvodné sítě. Dnes jsou fotovoltaické panely na střechách rodinných domů zcela běžnou záležitostí a zájem o ně roste. Přestože jsou vynakládány nemalé prostředky na výzkum tenkovrstvé technologie solárních článků, ve výrobě fotovoltaických článků stále roste podíl krystalického křemíku. Přitom výroba křemíkových destiček tvoří největší část ceny fotovoltaických panelů (viz obr. 9).



Obr. 9 Procentuální podíl jednotlivých složek na celkové ceně fotovoltaických článků z krystalického křemíku. [8]



3.2 Fotoelektrický jev

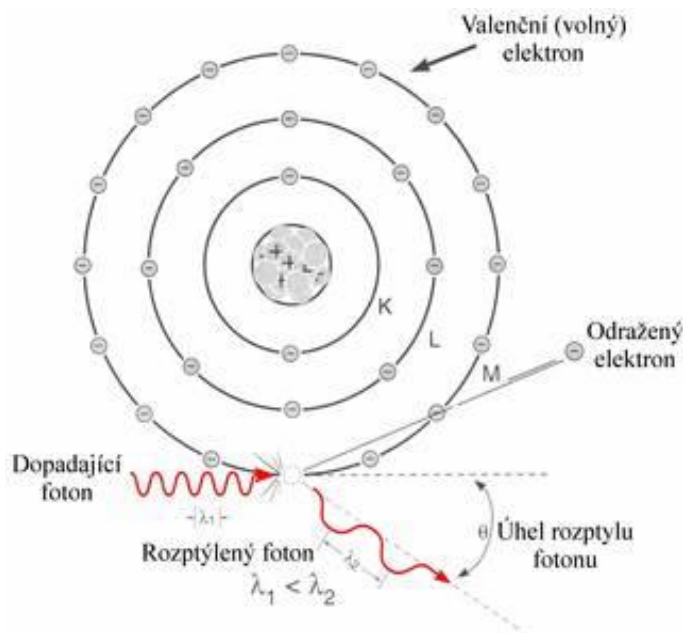
V roce 1801 britský mnohostraný učenec Thomas Young experimentálně prokázal vlnové vlastnosti světla. Začátkem 20.století byla provedena řada experimentů, které dokazovaly, že světlo se chová i jako částice. Můžeme proto říci, že světlo má duální charakter – skládá se z fotonů (elementární částice), ale má zároveň vlnové vlastnosti. Fotony, což jsou kvanta slunečního záření, nesou energii, která je definována vztahem:

$$E = h \cdot f = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (3)$$

Kde h je Planckova konstanta $6,626 \cdot 10^{-34}$ J.s ; f je frekvence elektromagnetického záření; λ [m] je vlnová délka elektromagnetického záření. [1]

V roce 1887 H. Hertz pozoroval, pro tehdejší fyziku, nevysvětlitelné chování elektromagnetického záření při dopadu na kovový povrch.

Fotoelektrický jev je emise elektronů z povrchu ozářené látky (především kovů) po dopadu elektromagnetického záření. Elektrony se uvolní z krystalické mřížky poté, co jim dodána určitá mezní energie potřebná k tomu, aby byly schopny vymanit se z valenčních vazeb svých mateřských atomů. Aby k tomuto jevu došlo, je potřeba určité množství energie, které je závislé na vlnové délce záření a na materiálu ozářené látky. Tuto potřebnou energii jim dodají fotony elektromagnetického slunečního záření. Hodnoty minimálních energií potřebných pro uvolnění elektronů z krystalických mřížek kovů jsou tabelovány. Tyto energie nepřímo závisí na vlnové délce záření, jak je vidět ze vztahu (3).



Obr. 10 Fotoelektrický jev [20]

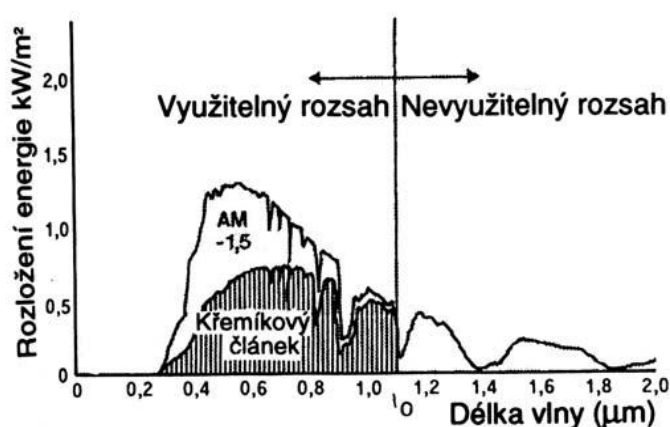
Fotoefekt je dvojího druhu – vnitřní a vnější. Při vnějším fotoelektrickém jevu (fotoefektu) dochází k absorpci elektromagnetického záření. Foton dodá energii valenčnímu elektronu a ten má pak dostatečnou energii, aby se odtrhl od mateřského atomu. Říkáme, že elektron je emitován (fotoemise) a opouští kov (viz obr.10). K vnitřnímu fotoelektrickému jevu dochází v polovodičích. Elektrony v atomech polovodičového prvku absorbují energii fotonu a přeskakují mezi energetickými hladinami a zvyšují tak vodivost daného prvku.

3.2.1 Fotovoltaický jev

K fotovoltaické přeměně sluneční energie v energii elektrickou dochází v solárních článcích. Samotný solární článek je velkoplošný polovodičový konstrukční prvek. Nejčastěji se k výrobě solárních článků používá různých druhů křemíku a proto si fotovoltaický jev ukážeme právě na něm. U jiných polovodičových materiálu bude fotovoltaická přeměna probíhat velice podobně. [4]

Aby nastala fotovoltaická přeměna, musí mít dopadající foton dostatečnou energii. Pro články z krystalického křemíku je potřeba minimálně energie 1,12 eV (šířka zakázaného

páso). Této energii odpovídá *mezní vlnová délka*, odvozená ze vztahu (3), $\lambda_m = 1105 \text{ nm}$ (infračervené světlo). Když dopadne foton s energií 1,12 eV na solární článek, je pohlcen křemíkem a dojde ke vzniku páru záporný elektron a kladná „díra“. Má-li ovšem menší energii, projde křemíkem a není pohlcen. Má-li energii větší, je z ní spotřebována energie 1,12 eV na uvolnění elektronu a zbytek energie je přeměněn na teplo. Tato přeměna na teplo není příliš vítaným jevem, jelikož s rostoucí teplotou se účinnost fotovoltaického článku snižuje. (To je jeden z důvodů, proč nejsou fotovoltaické elektrárny stavěny v hojných počtech na pouštích.)



Obr. 11 – Mezní vlnová délka slunečního záření. Absorpční hrana krystalického křemíku[8]

Polovodiče lze rozdělit podle nosiče náboje na vlastní a příměsové. Příměsové polovodiče, jak je patrné z názvu, jsou znečištěny atomy příměsí. Příměsový prvek mění elektrické vlastnosti polovodiče. Říkáme, že příměs dotuje polovodič. Dotování rozlišujeme dvojího typu: typu N (negativní – majoritními nosiči el. náboje jsou elektrony) a typu P (pozitivní – majoritními nosiči elektrického náboje jsou díry). Dotuje se trojmocnými a nebo pětímocnými prvky a atomem příměsí je nahrazen zhruba každý milióntý atom křemíku. Atom křemíku (Si) obsahuje 14 elektronů, z toho 4 valenční, kteří vytvářejí v krystalické mřížce kovalentní vazby se sousedními atomy. Jestliže je atom příměsí pětímocný prvek (např. antimon Sb), je každý milióntý atom křemíku nahrazen právě atomem Sb, který má 5 valenčních elektronů. K vazbě v krystalické mřížce Si jsou potřeba pouze 4 valenční elektrony a pátý elektron krouží okolo atomu Sb a je k němu vázán pouze slabou vazbou. Stačí tedy pouze malá energie k odtržení tohoto atomu. Takto dotovaný křemík nazýváme typ N. Tyto pětímocné atomy se nazývají donory, protože dodávají volné elektrony.



Energie tohoto volného elektronu, který nepodléhá působení sil v krystalické mřížce, může nabývat libovolných hodnot . [1], [4]

Avšak energie elektronu v krystalu Si nabývá pouze určitých hodnot kvůli pohybu v poli periodického potenciálu. Tyto energie elektronů jsou rozděleny do energetických pásů. Tyto pásy nazýváme pásy dovolených energií. Ty jsou od sebe odděleny pásy zakázaných energií. Důležité jsou pásy: valenční, poslední zakázaný vodivostní pás. Valenční pás je poslední obsazený energetický pás v elektronovém obalu. Sestává se z energetických stavů valenčních elektronů. Protože těchto stavů je stejný počet jako valenčních elektronů v celém krystalu, budou za velmi nízkých teplot všechny obsazené. Po valenčním pásu následuje pás zakázaných energií. V tomto pásu žádný elektron nemůže mít energii odpovídající stavu v tomto pásu. Dále následuje pás vodivostní, jehož stavy za velmi nízkých teplot nejsou obsazené. Uvnitř pásů dovolených energií jsou rozdíly mezi jednotlivými energetickými hladinami, tak malé, že nejsou vůbec neměřitelné.[4]

Nejvyšší energetickou hladinu valenčního pásu značíme zpravidla E_V , nejnižší hladinu vodivostního pásu zpravidla značíme E_C . Šířka zakázaného pásu je rozdíl těchto energetických hladin $\Delta E_G = E_C - E_V$. Důležitou energetickou hladinou je tzv. Fermiho energie E_F . U vlastního polovodiče (např. čistého křemíku) leží Fermiho energie (energie nejvyššího obsazeného elektronového stavu) uprostřed zakázaného pásu. V nejnižším energetickém stavu valenční elektrony úplně obsazují všechny hladiny ve valenčním pásu, nemohou zprostředkovat vedení elektrického proudu. Dodáním energie, např. světelné (foton), přejdou některé elektrony do vodivostního pásu. Valenční i vodivostní pásy se stanou pásy částečně obsazenými a elektrony v nich tak mohou zprostředkovat vedení elektrického proudu. U některých atomů křemíku tak vznikla prázdná místa ve valenční vrstvě elektronového obalu. Buď zde mohou opět uvíznout volné elektrony (přejdou zpět z vodivostního pásu do valenčního), nebo sem mohou přeskakovat elektrony od sousedních atomů. Tím se ale prázdná místa posunou k sousedním atomům a stejným způsobem se mohou dále posunovat. V elektrickém poli se volné i přeskakující valenční elektrony posunují proti směru intenzity elektrického pole, neboť mají záporný elektrický náboj. To znamená, že prázdná místa se posunují ve směru pole. Prázdné místo se tedy chová jako

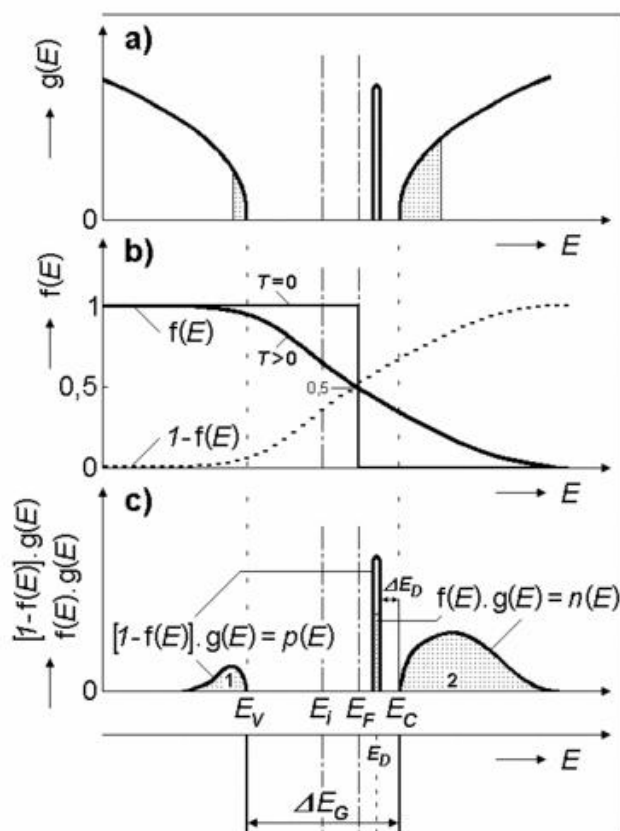


částice s kladným nábojem a jinou hmotností, než jakou má volný elektron. Tato částice se označuje „díra“. [4]

Ve vlastním polovodiči uvolnění jednoho elektronu z valenčního pásu znamená vznik jedné díry, počet volných elektronů a děr je tedy stejný. Krystal křemíku s příměsí zůstává navenek elektricky neutrální. Je-li generace páru elektron-díra vyvolaná dopadajícím fotonem, energie fotonu musí být větší nebo rovna šířce zakázaného pásu, což je u křemíku hodnota 1,12 eV. [4]

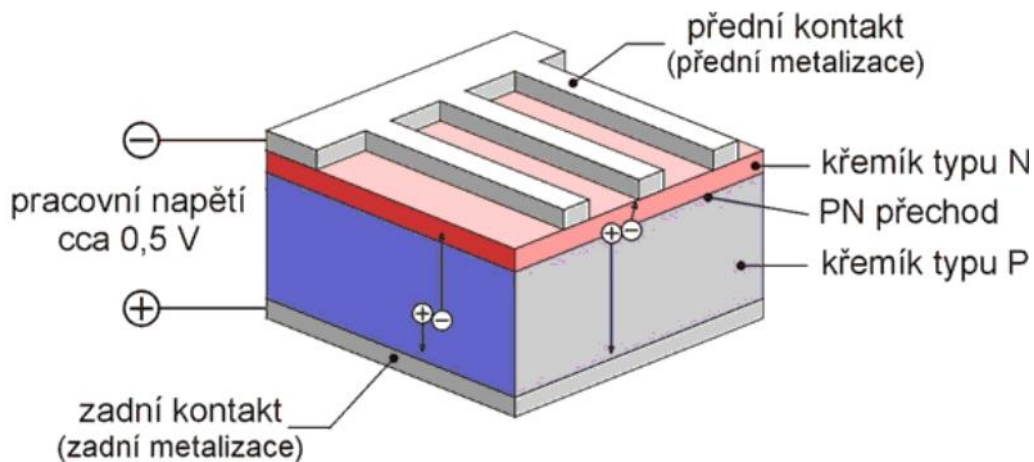
Jestliže je křemík dotován trojmocným prvkem, např. Indiem (In), sdílí se sousedním atomem třemi vazby, na které potřebuje všechny své valenční elektrony. Čtvrtý elektron chybí. Ten může být dodán ze sousední křemíkové vazby. Tím ale bude chybět jeden elektron ve valenčním pásu křemíku. Vytvoří se díra, která se může volně pohybovat krystalem a způsobuje vodivost materiálu. Protože v tomto případě jsou díry nosiči majoritními a elektrony pouze minoritními, má tato vodivost charakter vodivosti děrové. Takto dotovaný křemík nazýváme typ P. Tyto trojmocné atomy se nazývají akceptory, protože přijímají (akceptují) elektrony.[1]

Pokud dáme do těsného kontaktu polovodiče typu P a N tak, že jejich krystalické mřížky na sebe budou navazovat, vznikne mezi nimi hraniční vrstva. Volné nosiče v obou oblastech mohou materiálem volně difundovat. Podle principu difúze difundují elektrony převážně z polovodiče typu N do P a díry právě naopak, protože mají tendenci vyrovnat koncentraci jednotlivých druhů nosičů. V hraniční oblasti mohou elektrony z P rekombinovat s dírami, které se tam nachází a naopak. Hraniční oblast bude tedy ochuzena o volné nosiče proudu a bude mít větší měrný odpor. Přechodová vrstva je vrstva s velkým měrným odporem, říká se jí vrstva hradlová. V této vrstvě se mění potenciál, jehož spád působí proti další difúzi.[1]



Obr. 12 Energetické schéma polovodiče typu N. E_D - donorová energie. ΔE_D energie potřebná pro přechod elektronu do vodivostního pásu ($\approx 0,01\text{eV}$). Elektron může snadno přejít do vodivostního pásu. Donorové atomy jsou ionizovány (tvoří kladný prostorový náboj) a koncentrace elektronů ve vodivostním pásu je mnohem vyšší než koncentrace děr ve valenčním pásu vzniklých též tepelnou excitací ale přes celý zakázaný pás [4]

Podstata fotovoltaického jevu se dá shrnout takto: Pokud na solární článek dopadají fotony s větší energií, než je jaké odpovídá šířka zakázaného pásu, jsou generovány elektricky nabitě částice, páry elektron – díra. V dotovaném polovodiči typu N jsou majoritní elektrony a v typu P zase díry. Ty mají tendenci se mezi sebou difundovat, ale v tom jim brání hradlová vrstva PN přechodu, na které vzniká elektrické pole s vyšší intenzitou. Díky tomuto elektrickému poli na PN přechodu jsou díry urychlovány ve směru pole a elektrony proti směru elektrického pole. Rozdělení náboje má za následek napěťový rozdíl mezi kontakty článku. Po zapojení do elektrického obvodu teče obvodem stejnosměrný elektrický proud a solární článek se stává zdrojem elektrické energie. Tento stejnosměrný proud je přímo úměrný ploše solárního článku a intenzitě dopadajícího slunečního záření. [1], [4], [21], [22]



Obr. 13 Pohyb volných nosičů náboje v jednoduchém solárním článku [21]

3.3 Solární články

O účinnosti a tedy i výkonu solárního panelu rozhodují vlastnosti solárních fotovoltaických článků. Tyto články jsou vyrobeny z polovodičových materiálů. O vhodnosti polovodičového materiálu pro použití v solárních článcích, rozhoduje šířka zakázaného pásu energií pro daný materiál. Tato hodnota by měla ležet v rozmezí od 1,1 eV do 1,7 eV. Vyžaduje se také, aby se použité materiály vyznačovaly vysokou pohyblivostí a dlouhou dobou života minoritních nosičů náboje. Existuje mnoho polovodičových materiálů, které splňují uvedené požadavky. Jsou to zejména Si, GaAs, CdTe, InP, AlSb a další. Z uvedených prvků se v drtivé většině (téměř 98%) používá křemík (Si), ať už v monokrystalické, polykrystalický či amorfni podobě (a-Si). [8]

3.3.1 Křemíkové solární články

První solární články byly vyrobeny z křemíku, který zůstal i v současnosti nejvýznamnějším materiálem pro jejich výrobu a toto své postavení si udrží i v budoucnosti. Má nejdelší fotovoltaickou historii a nejrozsáhlejší technologickou základnu, přičemž stále dominuje na trhu s fotovoltaickými materiály. Křemík



je polokovový prvek (polovodič), s modrošedým kovovým leskem a s velkou tvrdostí. Křemík je ze všech polovodičových materiálů v přírodě nejvíce zastoupen (je druhým nejhojnějším prvkem na Zemi se zastoupením 26%), ale v přírodě se v čisté formě nevyskytuje. Má všechny vlastnosti prvku vhodného pro hromadnou výrobu: Chemické (není jedovatý a nepůsobí negativně na životní prostředí), metalurgické (snadno se taví, rychle krystalizuje a má dostatečnou pevnost), technologické (dobře se zpracovává a tvoří hustou, kompaktní vrstvu). A také jeho elektrické vlastnosti, které umožňují použití křemíkových prvků v oblasti vysokých výkonů, při všech teplotách okolí vyskytujících se na Zemi a do kmitočtu 3 GHz. [1], [8]

Surový křemík se vyrábí z písku redukcí uhlíkem v obloukové peci. Zjednodušeně se dá tento proces vyjádřit rovnicí:



Křemíkové solární články nejsou tvořeny čistým křemíkem. Do základního materiálu jsou ve zcela nepatrném množství přimíšeny cizí atomy, kterým k zabudování do krystalové mřížky chybí jeden valenční elektron (Al, Bo), dotování typu P. Do tenké vrstvy na lící straně jsou difúzním principem zavedeny cizí atomy, které mají o jeden valenční elektron více (Ph, As) – dotování typu N. Na rozhraní těchto dvou vrstev vzniká elektrické pole vyšší intenzity. Tyto vnitřní pole uvádí do pohybu volné nosiče náboje vznikající absorpcí světla a vyrábí tak elektrický proud, který je možno využít k napájení spotřebiče. [1], [22]

3.3.1.1 Monokrystalické křemíkové články

Hovoříme o nich jako o první generaci solárních článků. Jsou vyráběny z destiček monokrystalického křemíku, v nichž je vytvořen velkoplošný p-n přechod. Tento typ se vyznačuje dobrou účinností a dlouhodobou stabilitou výkonu. U monokrystalického článku lze dosáhnout vysoké účinnosti, které se v praxi u komerčně vyráběných článků pohybuje od 12 do 18%. Nevýhodou je velká spotřeba velmi čistého křemíku. Monokrystalické

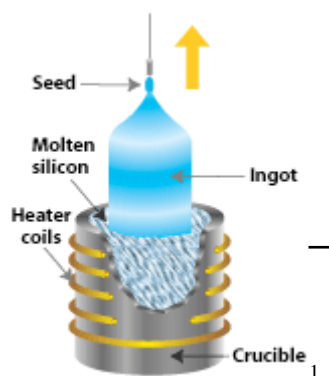


články mají z důvodu stability tloušťku 0,2 mm – 0,3 mm. Při výrobě křemíkových článků z monokrystalického křemíku se spotřebuje velké množství čistého křemíku, který se náročně vyrábí. Tyto dva hlavní faktory (náročná výroba a velká spotřeba materiálu) mají hlavní podíl na vysoké ceně solárních článků z monokrystalického křemíku. [1], [5]

Monokrystalický křemík se vyrábí metodou Czochralského (obr. 14). Polykrystalický křemík je vložen do kelímku z nejčistšího křemenného skla. To celé je vloženo do opěrného grafitového kelímku. Elektrickým odporovým zahříváním je polykrystalický křemík zahřát na teplotu vyšší než je 1420°C (teplota tání křemíku). Do taveniny polykrystalického křemíku se vloží monokrystalický zárodek, upevněný ve svisle se pohybujícím otočném držáku. Zárodek se otáčí a postupně vytahuje z taveniny. Díky správnému sledování a změně parametrů procesu (rychlosti vytahování, rotace zárodka a teploty taveniny) atomy křemíku zaujmou svoji polohu v krystalické mřížce a vytvoří tak monokrystal. To vše se děje v ochranné inertní atmosféře argonu. Takto vypěstovaný monokrystal může dosahovat v průměru až 300 mm a váhy 70 kg. [5]

Získaný ingot monokrystalického křemíku se rozřeže na plátky silné 0,25 až 0,35mm (v poslední době lze vyrábět i články o tloušťce pouze 0,1mm). S poklesem tloušťky destiček se podařilo zmenšit i odpad řezání. Plátky se zarovnávají na rovnoměrnou tloušťku, vyleští a na povrchu odleptají, aby se odstranily nepravidelnosti a nečistoty. Polovodičový p-n přechod se na destičkách vytvoří přidávkem fosforu, který na povrchu utvoří vrstvu s vodivostí typu n.

U takového článku lze dosáhnout vysokých hodnot účinnosti, které se v praxi pohybují kolem 12 až 18%. V laboratorních podmínkách však lze dosáhnout účinnosti až přes 30% a to díky různým povrchovým úpravám, antireflexním vrstvám zabraňující odrazu slunečního záření apod.[1]



Obr. 14 Czochralského proces výroby ingotu monokrystalického křemíku [23]

3.3.1.2 Polykrystalické křemíkové články

Polykrystalické články patří spolu s monokrystalickými k první generaci solárních článků. Rozdíl mezi nimi je v tom, že polykrystalický solární články užívají polykrystalický materiál, který je mnohem lacinější a jeho výroba není tak náročná. Tato výhoda je však vykompenzována menší účinností, která se pohybuje okolo 11 až 13%. Účinnost je menší, protože hranice jednotlivých krystalických zrn (jejich rozměry jsou řádově v milimetrech) v polykrystalickém křemíku zhoršují transportní vlastnosti polovodiče a mají větší odpor.[4]

Polykrystalické články se vyrábějí odléváním čistého křemíku do vhodných forem a řezáním vzniklých ingotů na tenké plátky. Odlévání je podstatně jednodušší metoda než tažení monokrystalu a lze také připravit bloky se čtvercovým nebo obdélníkovým průřezem. Zásadní výhodou je, že výchozí surovina je levnější a lze ji vyrábět ve větších rozměrech a s obdélníkovým nebo čtvercovým tvarem. Tento typ článků má zajímavý

¹ Crucible – nádoba s roztaveným křemíkem

Heater coils – ohřívací cívky

Molten silicon – roztavený křemík

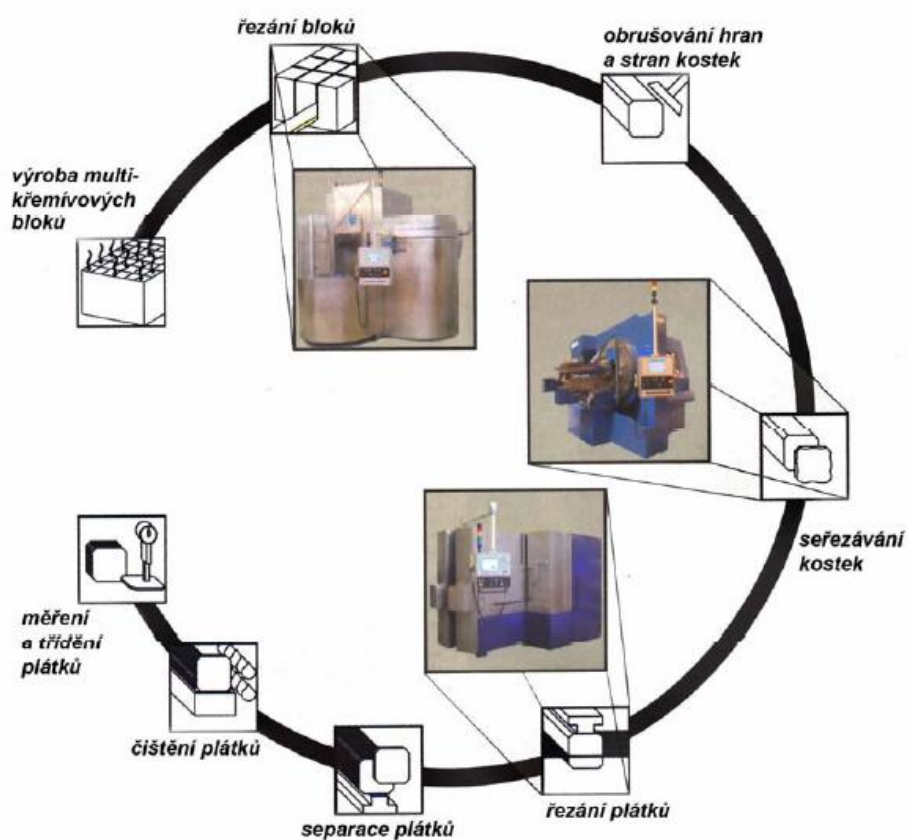
Ingot – ingot

Seed – monokrystalický zárodek

vzhled. Viditelné hranice krystalů připomínají leštěný kámen, či namrzlé okno, jak můžeme vidět na obr. 15. [5]



Obr. 15 Vlevo je destička monokrystalického křemíku a vpravo polykrystalického křemíku [21]



Obr. 16 Výrobní postup při výrobě polykrystalického křemíku [8]



3.3.1.3 Amorfni křemíkové články

Solární články z amorfniho křemíku řadíme do druhé generace solárních článků, jejíž hlavním poznávacím znakem je tenkovrstvost. Hlavním důvodem vzniku článků druhé generace byla snaha snížení výrobních nákladů. Tenkovrstvé články nebývají tlustší než několik μm a spotřebují tedy podstatně méně materiálu. Mohou také lépe využít dopadající kvanta slunečního záření, protože tyto solární články mají kratší dráhu přechodu p-n. Nejběžnější tenkovrstvé sluneční články jsou vyrobeny z amorfniho křemíku. Díky daleko tenčí absorpční vrstvě křemíku se spotřebuje daleko méně materiálu a solární články z amorfniho křemíku jsou při sériové výrobě zřetelně levnější.[1][21]

Proces výroby amorfniho solárních článků je založen na rozkladu vhodných sloučenin křemíku ve vodíkové atmosféře. Tímto způsobem se dají připravit velmi tenké vrstvy křemíku na skleněné, nerezové nebo plastové podložce. Takto nanášená vrstva křemíku je amorfni, tj. nemá pravidelnou krystalickou strukturu. Díky větší absorpci slunečního záření může být podstatně tenčí (už vrstva o tloušťce $1\mu\text{m}$ pohltí 90% slunečního záření). Takto lze připravovat velmi tenké a ohebné solární články a moduly, které se dají požívat jako krycí fólie na střechy nebo našít na oblečení. Amorfni křemík se vyrábí převážně při teplotě $200\text{ }^{\circ}\text{C}$, což znamená další snižování nákladů na výrobu. [1]

Amorfni křemík má ovšem oproti krystalickému křemíku daleko méně pravidelnou strukturu s větším množstvím poruch. Některé atomy křemíku nemají kolem sebe potřebné sousedy, se kterými by mohly vytvořit vazbu. Vznikají tak nenasycené vazby. Tyto vazby pak snižují účinnost, protože na nich dochází k rekombinaci párů elektron – díra. Snížení hustoty nenasycených vazeb je možno docílit jejich pasivací. Přidáním 5 až 10 % vodíku se sníží výskyt nenasycených vazeb a lze je již používat pro výrobu solárních článků.[1]

Do solárních článků z amorfniho křemíku jsou vkládány velké naděje, protože má oproti monokrystalickým a polykrystalickým solárním článkům řadu předností. Nejdůležitější jsou: vysoká absorpce světla, velké napětí naprázdno, malá spotřeba materiálu, malá spotřeba energie při výrobě a velké množství automatizace procesů výroby. Velkou



nevýhodou jsou však lokální poruchy v uspořádání struktury. Dosahovaná účinnost se pohybuje kolem 5 až 7%. [1]

3.3.2 Ostatní články druhé generace

V poslední době se projevuje ve vývoji solárních článků snaha co nejvíce zlevnit náklady na jejich výrobu. Dochází k přechodu ze článků první generace na levnější články druhé generace (na bázi tenkých vrstev – např. slitiny na bázi CuInSe_2 , CdTe) a k novým konstrukcím solárních článků (tandemové vícepřechodové solární články jako InGaP/GaAs/InGaAs). [1]

V oblasti vývoje solárních článků na bázi tenkých filmů (kromě článků z amorfního křemíku) existuje několik typů těchto článků:

1. na bázi měď indium galium diselenid (CIGD)
2. na bázi kadmium telurid (CdTe)
3. na bázi galium arsen (GaAs)
4. barevně citlivé TiO_2
5. Sulfid kademnatý (CdS)

Měď-indium-diselen (CuInSe_2) a měď-indium-galium-selen (CuInGaSe) jsou polykrystalické polovodičové materiály s přímým přechodem a s velmi vysokou hodnotou optického absorpčního koeficientu. CuInSe_2 a CuInGaSe jsou polovodiče typu P a jsou vždy využívány ve heteropřechodové¹ konstrukci. Často se jako typ N využívá tenká vrstva kadmium síry (CdS). V současné době se hlavní pozornost ve fotovoltaickém výzkumu obrací právě na tyto materiály na bázi měď indium galium diselenid a začínají se objevovat první pilotní výzkumné solární články z těchto materiálů. [1], [8]

¹ Heteropřechod je rozhraní polovodičových materiálů s různými šířkami zakázaného pásu, přičemž je nutné, aby jednotlivé materiály na sebe plynule navazovaly na úrovni krystalové mříže



Telurid kademnatý (CdTe) je vzhledem k velikosti šířky zakázaného pásu (1,5 eV při pokojové teplotě) a velkému činiteli absorpce, související s přímými mezipásmovými přechody, považován za velmi nadějný materiál pro přeměnu sluneční energie v energii elektrickou. Protože CdTe je binární slitina, výroba solárních článků na jeho bázi je mnohem jednodušší než výroba CuInSe/CuInGaSe článků. Typická struktura solárních článků s CdTe se skládá z n-CdS a p-CdTe heteropřechodů nanesených na skleněném substrátu. Právě nános tak tenké vrstvy CdS (aby se minimalizovaly ztráty modré složky spektra) při co největší účinnosti článku je nejkritičtější bodem pro vytváření velkoplošných struktur. Nejvíce nosičů elektrického náboje je generováno ve spodní p vrstvě (zde je to v CdTe p-polovodičové vrstvě velice blízko PN přechodu), která leží pod vrstvou CdS v heteropřechodu a to může způsobit nemalé ztráty účinnosti a stability, pokud není nanášecí technologie velice dobře zvládnutá. Přes tyto přednosti nelze však s teluridem kademnatým počítat pro tzv. velkou energetiku, tedy ve velkých slunečních elektrárnách a to především pro jeho nedostatečné množství v zemské kůře. Může se však uplatnit ve výrobě různých druhů spotřebního zboží (např. kalkulátorů) a v takových aplikacích, jako je napájení telekomunikačních a navigačních zařízení. V těchto případech hraje důležitou roli otázka ekonomická. Vzhledem k přímému zakázanému pásu CdTe pro fotovoltaické aplikace stačí tloušťky vrstev 1,2 μm až 1,5 μm . Zvolíme-li pro přípravu těchto vrstev nenáročnou metodu, bude telurid kademnatý ekonomickým požadavkům dobře vyhovovat. [1], [8]

Solární články na bázi vrstev CdTe zhotovených elektrochemickou metodou v USA dosáhly již účinnosti okolo 10 %. Jedná se o heterogenní systémy, jejichž základem je přechod CdS-CdTe. Metoda elektrochemické depozice¹ je ovšem vhodná i pro přípravu jiných vrstev, např. CdS, CdSe, ZnTe, CuInSe₂, Hg_xCd_{1-x}Te, z nichž většina může být rovněž součástí solárních článků. [8]

Arsenid galia (GaAs) - Hlavní výhodou je vyšší účinnost 20%, větší odolnost oproti kosmickému (tvrdému) záření a schopnost pracovat bez snížení efektivity i při teplotách nad 100°C. Mezi nevýhody patří mnohem vyšší cena a větší hustota GaAs oproti

¹ Elektrochemická povrchová úprava na principu elektrolýzy.



krystalickému křemíku. Nyní se vyvíjejí kombinace obou článků, protože oba materiály mají odlišnou spektrální citlivost – křemíkové články využívají hlavně oblast viditelného světla směrem k modré barvě a články GaAs oblast spektra směrem k červené barvě. Výhodnou kombinací obou typů lze dosáhnout účinnost 30% a ve spojení s koncentrátory se očekává dosažení ještě vyšší účinnosti. [1]

Sulfid kademnatý (CdS) – články tvořené přechodem Cu_2S a CdS dosahují účinnosti 10%. Jejich výhodou je malá hmotnost, díky čemuž se používaly při kosmických aplikacích. Nevýhodou je malá stabilita těchto článků a dnes se již nepoužívají. Pokročilejší variantou tohoto historicky nejstaršího typu článku je kombinace sulfidu kademnatého s teluridem kademnatým (systém $\text{CdS} - \text{CdTe}$). Tyto články vyhovují jen při napájení zařízení s malým příkonem a v energetice nemají využití. [1], [8]

Oxid titaničitý (TiO_2) - Tento typ článku pracuje na velmi zajímavém a populárním konceptu obarvení TiO_2 vhodným barvivem a principu podobném procesu fotosyntézy v přírodě. Barvivo funguje jako houba, která sluneční světlo nasává, a tím pádem zajišťuje mnohonásobné zvýšení účinnosti konverze sluneční energie na energii elektrickou. Hlavním parametrem je velikost povrchu TiO_2 , která ovlivňuje množství barviva. Proto je zásadní využít TiO_2 ve formě nanomateriálu. [24]

Jedinečný koncept spočívá v nahrazení nanočástic nanovlákný s cílem vylepšit účinnost přeměny sluneční energie na energii elektrickou, přičemž hlavním důvodem tohoto zlepšení je lepší propustnost dopadajícího světla při zachování obrovského měrného povrchu materiálu a snížení ztrát při přenosu elektronů skrz unikátní strukturu nanovláken. Takový solární článek má sice o něco menší účinnost (kolem 10 %) než klasické křemíkové solární články, ale jeho masová výroba je o mnoho levnější, (až o 60 % oproti křemíkovým článkům) protože odpadá velmi náročná výroba čistého křemíku (koncový uživatel při pořízení křemíkových solárních článků platí najednou obrovské množství elektřiny, která byla vynaložena na výrobu křemíkového článku). [24]

Mezi další výhody solárních panelů využívajících této technologie patří lepší účinnost fotovoltaické přeměny (oproti křemíkovým solárním článkům) při nižších intenzitách



slunečního osvětlení, umělém osvětlení nebo při ozáření pouze difuzním zářením. Výhodou je, že účinnost nanovlákných článků je mnohem méně citlivá na úhel dopadu slunečních paprsků. Solární články z TiO_2 jsou navíc flexibilní, což otevírá dveře mnoha způsobům využití. [24]

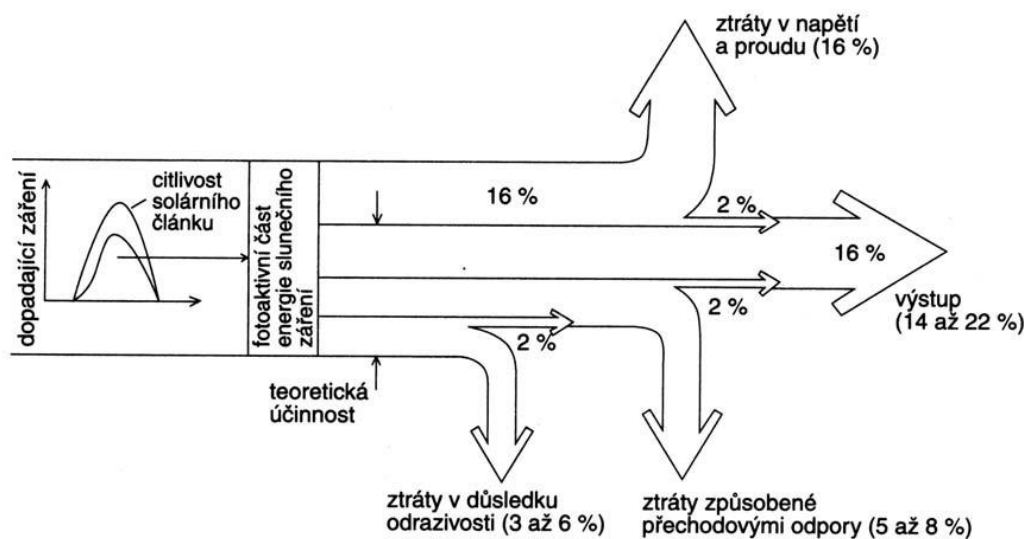
3.4 Konstrukce křemíkových solárních článků

Při konstrukci solárních článků nám jde především o co největší snížení ztrát, ať už optických, nebo elektrických a také o úsporu materiálu. O úspoře materiálu jsem si řekl v kapitole o jednotlivých solárních článcích (na výroby tenkovrstvých solárních článků se spotřebuje méně křemíku) Nyní se dozvíme o eliminaci ostatních ztrát.

K optickým ztrátám dochází kvůli odrazu a neúplné absorpci slunečního záření na solárním článku. U křemíkových článků se pohybuje odrazovost dopadajícího záření okolo 30 %. Jde však snížit použitím antireflexní vrstvy až pod hranici 10%. Antireflexní materiály mohou být buď anorganické (např. SiO_2 , Al_2O_3 , SiO , Si_3N_4 , TiO_2 , ZnS) nebo organické - na bázi polyamidů (obchodní názvy Kapton, Mylar, Aclar) [1].

Jinou možností, jak zmenšit odrazovost je vytvoření texturovaného povrchu. Použitím selektivního leptadla se na povrchu vzorku vytvoří malé pyramidy. Světlo se po dopadu na takovýto povrch z části odrazí i směrem dolů, kde může proniknout do článků, jak je vidět na obr.18b. [1], [8]

Další ztráty účinnosti solárních článků jsou způsobené odporem povrchové vrstvy a je nezbytné ji tedy opatřit kovovou mřížkou (plnicí funkci kontaktu) nebo dostatečně vodivou průhlednou elektrodou. Mřížková elektroda je navržena tak, aby ztráty způsobené stíněním mřížky a současně její elektrický odpor byl co nejmenší.[1]



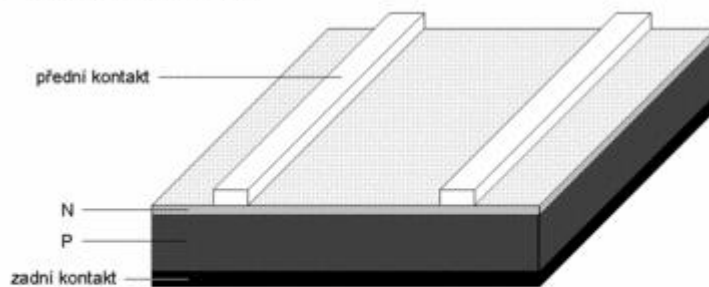
Obr. 17 Vliv ztrát na celkovou účinnost solárního článku [8]

Další možností snížení ztrát účinnosti solárních článků je použití tzv. pasivovaného emitoru (PESC). Přitom je využívána technika laserového žlábkování¹ a uložených kontaktů. Ukázalo se, že postupy laserové texturizace je možné úspěšně uplatnit jak pro maloplošné, tak velkoplošné monokrystalické křemíkové články. U článků o ploše 12 cm² bylo dosaženo účinnosti přeměny energie 19,7 až 20,4 % a při ploše 49 cm² byla tato účinnost 19,6 %.[1],[8]

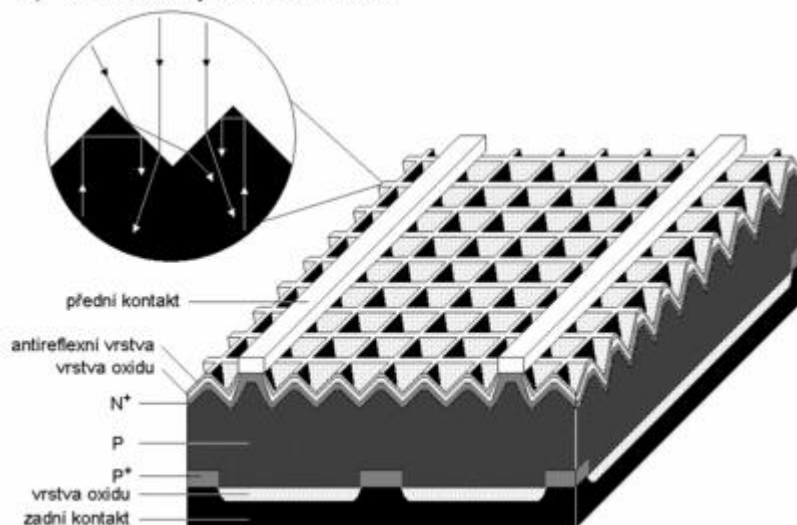
Další fotovoltaická struktura pro křemíkové solární články s vysokou účinností je tzv. struktura PERC (passivated emitter and rear cell). Je poměrně novým prvkem v konstrukci křemíkových solárních článků. Díky této struktuře lze dosáhnout podstatného zvýšení účinnosti přeměny sluneční energie v energii elektrickou. Hlavní myšlenka této struktury spočívá v zabudování lokální defektní vrstvy na přechod PN mezi dopované vrstvy P⁺ a N⁺ (viz obr. 19). [1], [8]

¹ Metoda jemného tváření povrchu solárních článků za pomoci laseru.

a) jednoduchý model

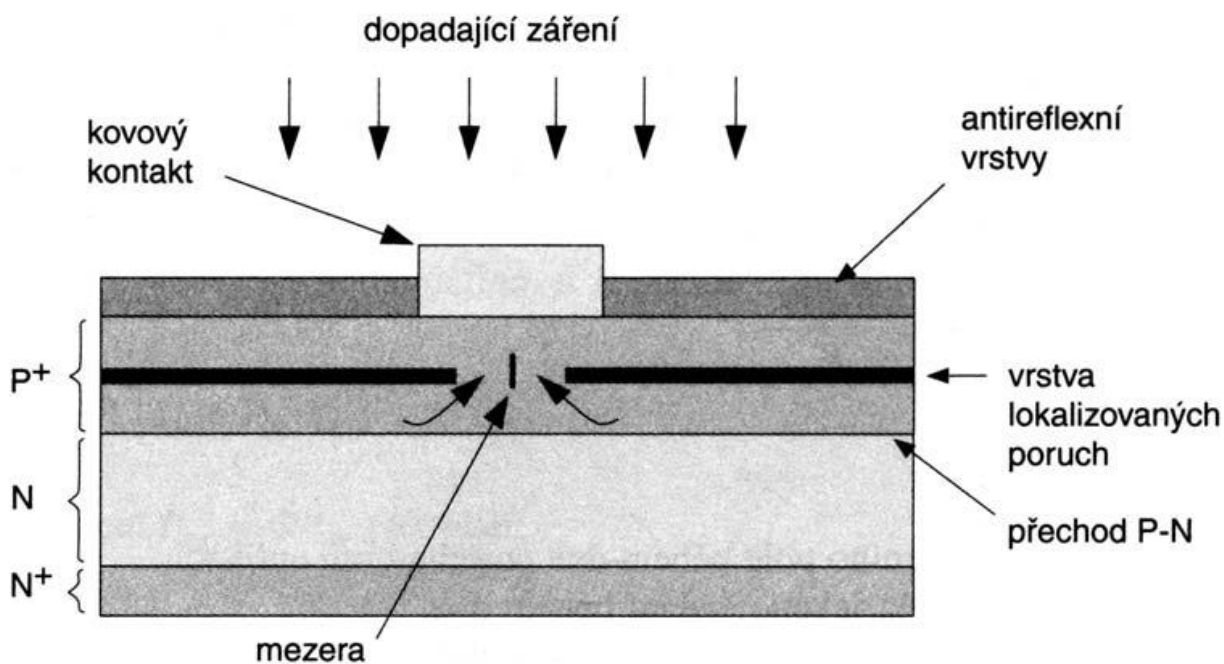


b) článek s vysokou účinností



Obr. 18 a) jednoduchý model funkčního křemíkového solární článku s nízkou účinností b) vylepšený křemíkový solární článek s antireflexní vrstvou na přední straně, která minimalizuje odraz. Vrstvy nevodivého oxidu (SiO_2 - křemen) chemicky pasivují¹ povrch a jen v určitých místech je vrstva proleptána a jen zde se odvádí elektrický náboj. Vyleptaná struktura malých jehlanů na přední straně způsobuje, že fotony snadno vstupují do solárního článku. Pokud ale projdou, aniž vyvolají fotovoltaickou přeměnu a odrazí se od zadní elektrody, nemohou na přední straně vystoupit ven z článku a jsou totálním odrazem vráceny zpět (viz detail na obr. 18b) Znovu procházejí PN přechodem a pravděpodobnost fotovoltaické přeměny energie se tak zvyšuje [8]

¹ Řízená tvorba ochranné vrstvy oxidu nebo nitridu křemíku na povrchu solárního článku.



Obr. 19 Solární článek s lokální defektní vrstvou [1]

Na zvýšení účinnosti fotovoltaické přeměny se podílejí dva vlivy:

- vlastní přítomnost lokální defektní vrstvy
- díry v této vrstvě jsou pod vrchním kontaktem.

Protože neporušený křemíkový materiál v díře má menší odpor než materiál v oblasti mimo defektní díru, nosiče náboje preferují pohyb přes přechod PN právě touto dírou. Tím se snižují ztráty způsobené rekombinací a následně se zvyšuje účinnost, která může dosáhnout až 35 %.[1], [8]

3.5 Nástin nových technologií

V současné době je rozpracovávána celá řada projektů, které slibují do budoucna výrazné zvýšení účinnosti. Většina z nich je pouze ve fázi teoretického odhadu dosažitelné účinnosti, a není zatím známo, jak je realizovat v praxi. V kapitolách 3.3.1.1 až 3.3.1.3 jsme mluvili již o dvou generacích solárních článků. Je však nutno se zmínit o třetí generaci solárních článků. Bohužel žádný z třetí generace slunečních článků není prakticky



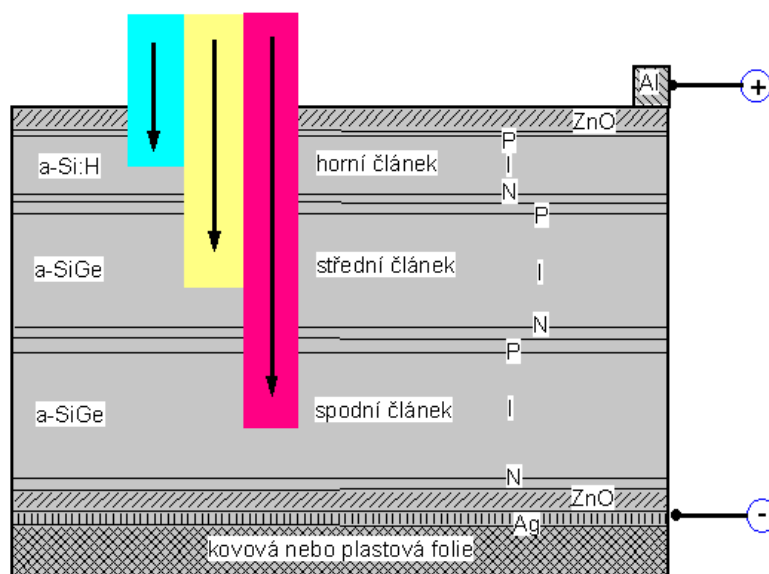
využíván. Spíše je třeba tento pojem považovat za plán dalšího výzkumu směřujícího k překročení hranice omezující účinnost fotovoltaické přeměny. Podstatou omezení je předpoklad, že 1 foton vytváří 1 využitelný exciton (pár elektron - díra v polovodičích) o energii rovné zakázanému pásu a přebytečná energie se mění na teplo. [8], [25]

Existuje řada směrů, kterým je ve výzkumu věnována pozornost:

- vícevrstvé solárních články (z tenkých vrstev)
- články s vícenásobnými pásy
- články, které by využívaly „horké“ nosiče náboje pro generaci více párů elektronů a děr
- termofotovoltaická přeměna, kde absorbér je současně i radiátorem vyzařujícím selektivně - na jedné energii
- termofotonická přeměna, kde absorbér je nahrazen elektroluminiscencí
- články využívají kvantových jevů v kvantových tečkách nebo kvantových jamách
- prostorově strukturované články vznikající samoorganizací při růstu aktivní vrstvy
- organické články (např. na bázi objemových heteropřechodů)

Jediným příkladem fungujících článků třetí generace, který přímo navazuje na solární články druhé generace, jsou vícevrstvé struktury (dvojvrstvé – tzv. tandemy), z nichž každá sub-struktura (p-i-n) absorbuje určitou část spektra a maximalizuje se tak energetická využitelnost fotonů. Vícevrstvé solární články se bohužel v praxi neosvědčily. Příkladem tandemového solárního článku je struktura skládající se z p-i-n přechodu amorfního (hydrogenovaného) křemíku (a-Si:H) a p-i-n přechodu mikrokrytalického (hydrogenovaného) křemíku (μ c-Si:H). Amorfní křemík má vysokou absorpci v oblasti žluté, zelené a modré části spektra, mikrokrytalický křemík zase dobře absorbuje v oblasti červené a infračervené. Základní podmínkou pro dobrou funkci vícevrstevných článků je, aby každý z článků generoval stejný proud. V opačném případě, horší z článků limituje dosažitelnou účinnost. Výsledné napětí je pak dané součtem všech článků. Ostatně i návrhy nových článků s polovodičovými nanokrystaly využívají tandemové architektury. Pokusy o experimentální realizaci článků s vícenásobnými pásy byly zklamáním a možné zvýšení účinnosti díky “horkým” nosičům v křemíku je zřejmě malé. [8], [21]

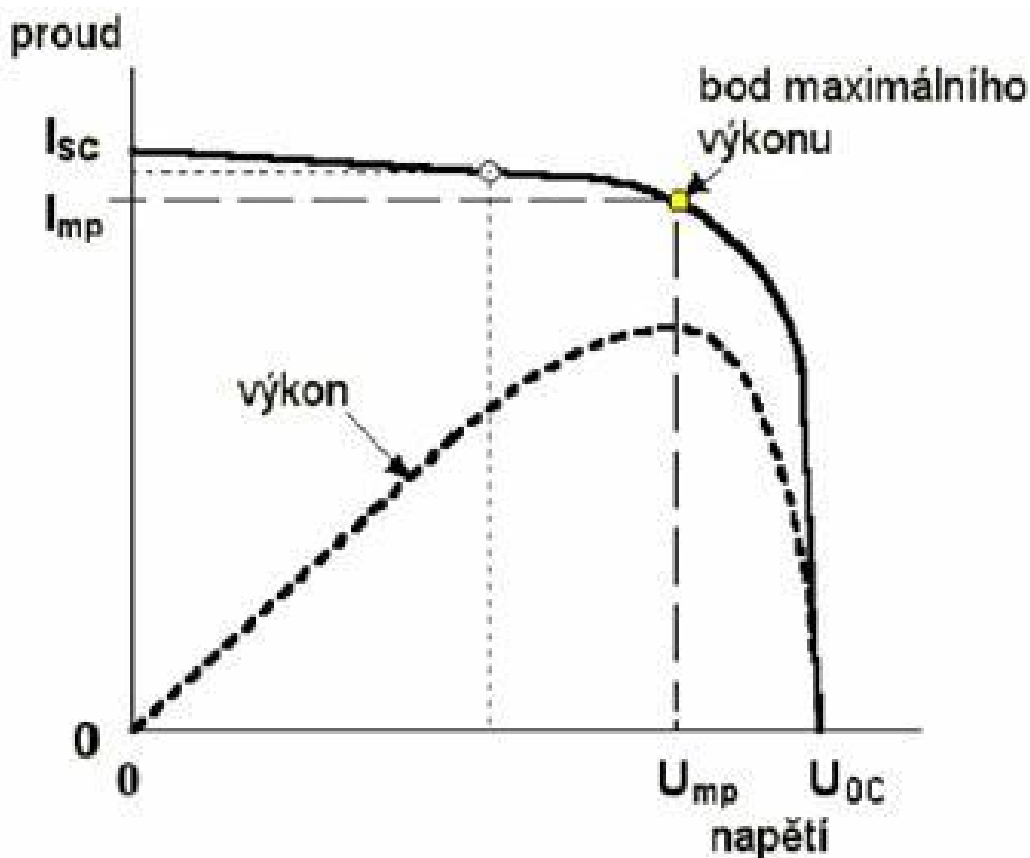
Naděje se vkládají do organických článků, pro které je hlavní motivací možnost levné výroby a ne vysoká účinnost. Organické solární panely pracují na principu fotosyntézy. V rakouském Linzi sídlí institut pro výzkum těchto organických článků. Tato technologie výroby je levnější než klasické křemíkové solární panely, díky levným materiálům, ze kterých jsou organické solární panely vyráběny. Organické solární panely jsou tvořeny z bílkoviny Protein Structure Initiative.[8]



Obr. 20 Schematické znázornění struktury třívrstvého slunečního článku na bázi amorfního hydrogenovaného křemíku ($a\text{-Si:H}$) a slitin amorfního křemíku a germania ($a\text{-Si}_x\text{Ge}_{1-x}\text{H}$). V horním článku s největší šířkou zakázaného pásu je absorbována krátkovlnná část slunečního spektra (UV, modrá, část zelené), v nejspodnějším s malou šířkou zakázaného pásu pak červená a především infračervená část spektra. [25]

4 Vlastní měření

Vlastnosti solárních článků se nejlépe vyjadřují voltampérovou charakteristikou, ze které lze snadno odečíst body potřebné pro stanovení parametrů solárního článku.



Obr. 21 voltampérová charakteristika solárního článku [11]

Z obrázku V_{Ach} (zkráceně voltampérová charakteristika) lze odečíst hned několik důležitých hodnot.

Proud nakrátko I_{SC} - je maximální proud, který během voltampérové charakteristiky naměříme. Je závislý na intenzitě osvětlení, ploše solárního článku, spektrální citlivosti článku a na teplotě, protože všechny tyto parametry ovlivňují počet excitonů v solárním článku.



Napětí naprázdno U_{OC} - je maximální napětí při teplotě a intenzitě slunečního záření, které provázely měření. Jedná se o napětí na svorkách solární článku v obvodu bez zátěže.

Bod maximálního výkonu MPP (maximum power point) - je velice důležitý, neboť právě v něm má článek největší výkon a tudíž i největší účinnost, což je pro spotřebitele v praxi ta nejdůležitější informace. Jeho proudová a napěťová souřadnice se značí I_{mp} U_{mp} . Jejich součinem dostaneme hodnotu maximálního výkonu P_{mp} , jaký může článek dodávat.

$$P_{mp} = U_{mp} \cdot I_{mp}; [P] = W \quad (5)$$

Pracovní bod – je jakýkoliv bod ve voltampérové charakteristice ve kterém právě solární článek pracuje. V praxi se snažíme, aby pracovní bod našeho fotovoltaického modulu byl pokud možno totožný s bodem maximálního výkonu.

Hodnoty některých důležitých parametrů, jako např. P_{mp} , nelze vyčíst z voltampérové charakteristiky, ale dají se z jejich hodnot spočítat.

Účinnost solárního článku η – Jedná se o účinnost přeměny sluneční energie dopadající na solární článek v elektrickou energii, kterou lze ze článku získat. Z fyzikálního hlediska je všeobecná účinnost poměr mezi vstupní hodnotou dodané energie a výstupní hodnotou vykonané práce. V našem případě se jedná o intenzitu slunečního záření, které dopadá na plochu solárního článku a o hodnotu maximálního výkonu solárního článku. Účinnost solárních článků je definována vztahem:

$$\eta = \frac{P_{mp}}{E \cdot A_c} \quad (6)$$

Kde E je intenzita slunečního záření [$W \cdot m^{-2}$]

A_c je plocha solárního článku v m^2



Parametr FF (fill factor) – některá literatura jej nazývá počestěným výrazem „činitel naplnění“. Udává poměr mezi maximálním napětím a napětím daným součinem I_{SC} a U_{OC} . Je definován vztahem:

$$FF = \frac{U_{mp} \cdot I_{mp}}{U_{OC} \cdot I_{SC}} \quad (7)$$

Parametr FF je bezrozměrná veličina, jejíž velikost může dosahovat maximálně 1 a to pouze v ideálním případě, když je bod maximálního výkonu určen součinem I_{mp} a U_{mp} (největší možná hodnota výkonu ve voltampérové charakteristice). Čím je jeho hodnota vyšší, tím větší výkon je schopen dodat do zátěže a lze podle ní poznat, jak kvalitní daný solární článek je. [12]

4.1 Křemíkový školní článek

Toto měření průběhu voltampérové charakteristiky křemíkového solárního panelu jsme provedli v rámci laboratorního cvičení pod vedením Mgr. Milana Čmelíka. Měřili jsme solární panel pověšený na venkovní zdi pod oknem fyzikální laboratoře na budově C v ulici Studentská, kde sídlí katedra fyziky TU v Liberci. Měření bylo prováděno za relativně stálého osvětlení dne 11.11.2009 v 11 hodin dopoledne. Podle literatury [7] je průměrná hodnota sluneční energie dopadající na osluněnou plochu orientovanou na jih v této části roku $I_{str} = 418 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (při azimutovém úhlu 15° a v 50° severní šířky).

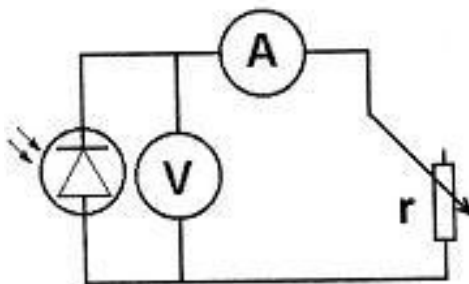
Měřený panel je složen z 72 kusů solárních článků z monokrystalického křemíku, a jeho účinnost se podle výrobce, kterým je firma Solartec se sídlem v Rožnově pod Radhoštěm, se pohybuje od 16% do 17%. Jedná se o typ SOLARTEC SG-180-5Z a plocha tohoto panelu je přibližně $1,4 \text{ m}^2$.



Obr. 22 – solární článek na jižní zdi budovy C v ulici Studentská

Zjišťovali jsme voltampérovou charakteristiku článku a stanovovali jsme početní i grafickou metodou bod maximálního výkonu. Nejprve jsme článek proměřili naprázdno bez zatížení a poté jsme ho zapojili do obvodu (viz obr. 23) s proměnným zatížením od 0Ω do 800Ω a postupnou regulací odporu s přibližně stejným krokem jsme zvyšovali odpor v obvodu a proměřili jsme zatěžovací charakteristiku solárního článku. Měření jsme několikrát opakovali a z naměřených hodnot jsme sestrojili graf spočítali výkon panelu podle vztahu:

$$P = (U \cdot I), [P] = W \quad (8)$$



Obr. 23 – schéma zapojení měřeného obvodu [22]

Před prvním měřením ukazoval display voltmetru hodnotu napětí článku v obvodu bez zatížení $U_{oc} = 11,44V$.



Po změření této hodnoty jsme připojili do obvodu reostat, aby bylo možné měnit zatížení obvodu a naměřili jsme průběh hodnot napětí a proudu při měnícím se odporu v obvodu. Naměřené hodnoty jsou zaznamenány v následující tabulce.

1. naprázdno $U_{OC} = 11,44V$		
I [mA]	U [V]	P [mW]
9,189	7,681	70,58071
9,542	7,483	71,40279
9,971	7,234	72,13021
10,434	6,998	73,01713
11,038	6,678	73,71176
11,64	6,365	74,0886
12,154	6,142	74,64987
13,408	5,279	70,78083
14,64	4,634	67,84176
15,334	4,44	68,08296
15,99	4,031	64,45569
17,233	3,254	56,07618
18,12	2,015	36,5118
18,66	1,25	23,325
19,197	0,219	4,204143

Tab. 2 – Naměřené hodnoty proudu a napětí v průběhu voltampérové charakteristiky - první měření. A vypočítaná hodnota výkonu solárního panelu v každém bodě voltampérové charakteristiky

Odpor se při měření zvětšoval postupně posouváním jezdce reostatu. Největší hodnotu výkonu $P = 74,65mW$ dosáhl článek při hodnotách napětí a proudu $U_{mp} = 6,142V, I_{mp} = 12,154mA$. Tento bod je bodem maximálního výkonu měřeného solárního článku.

Jak je vidět z grafu na obr.24 a z porovnání hodnot U_{OC} napětí naprázdno jednotlivých měření, jsou hodnoty této charakteristiky nejmenší, jelikož intenzita slunečního záření poklesla v daný okamžik kvůli zvětšení součinitele znečištění atmosféry, které bylo zapříčiněno zvětšenou koncentrací oblaků na obloze. Nedošlo k výraznému kolísání intenzity a proto měření proběhlo bez obtíží.

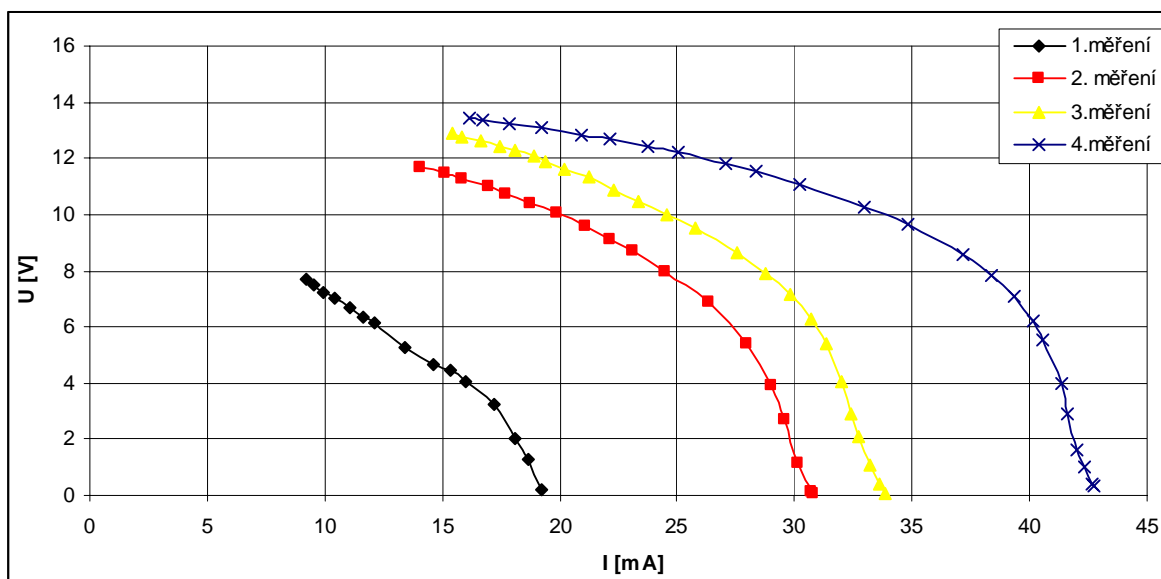
Měřený panel se svou plochou $1,4 m^2$ zachytí $585,2 W$ světelné energie, kterou přemění na elektrickou energii a do zatíženého obvodu dodá $74,65mW$.

Po tomto měření došlo ke zvýšení intenzity slunečního záření a solární články při chodu naprázdno generoval větší napětí, než v předchozím případě. Bohužel v průběhu ostatních měření nebyla intenzita slunečního záření vždy stálá, což zapříčinilo kolísání hodnot a znehodnocení měření. Proto uvedu pouze ta měření, během jejichž průběhu byla intenzita slunečního záření neměnná. Hodnoty U_{OC} napětí nakrátko jsou si velice blízké a proto jsou si i voltampérové charakteristiky jednotlivých měření velice podobné, jak je patrné z grafu VA charakteristik na obr. 24.

2. naprázdno $U=13,502$ V			3. naprázdno $U=13,523$ V			4. naprázdno $U=13,523$ V		
I [mA]	U [V]	P [mW]	I [mA]	U [V]	P [mW]	I [mA]	U [V]	P [mW]
14,09	11,664	164,3458	15,46	12,861	198,8311	16,15	13,417	216,6846
15,08	11,45	172,666	15,82	12,778	202,148	16,72	13,4	224,048
15,83	11,273	178,4516	16,64	12,61	209,8304	17,88	13,246	236,8385
16,95	10,973	185,9924	17,42	12,444	216,7745	19,22	13,073	251,2631
17,71	10,75	190,3825	18,09	12,284	222,2176	20,89	12,811	267,6218
18,77	10,42	195,5834	18,89	12,075	228,0968	22,14	12,67	280,5138
19,91	10,027	199,6376	19,35	11,874	229,7619	23,79	12,411	295,2577
21,09	9,571	201,8524	20,16	11,607	233,9971	25,05	12,204	305,7102
22,11	9,134	201,9527	21,28	11,327	241,0386	27,09	11,794	319,4995
23,09	8,678	200,375	22,28	10,855	241,8494	28,33	11,514	326,1916
24,47	7,933	194,1205	23,34	10,459	244,1131	30,2	11,061	334,0422
26,35	6,875	181,1563	24,52	10,002	245,249	32,93	10,285	338,6851
27,99	5,418	151,6498	25,75	9,486	244,2645	34,81	9,632	335,2899
29,04	3,928	114,0691	27,56	8,614	237,4018	37,14	8,597	319,2926
29,6	2,723	80,6008	28,77	7,902	227,3405	38,41	7,832	300,8271
30,17	1,172	35,35924	29,84	7,123	212,5503	39,34	7,105	279,5107
30,72	0,106	3,25632	30,67	6,287	192,8223	40,17	6,186	248,4916
30,75	0,045	1,38375	31,32	5,406	169,3159	40,55	5,51	223,4305
			32	4,073	130,336	41,37	3,958	163,7425
			32,41	2,916	94,50756	41,58	2,902	120,6652
			32,73	2,08	68,0784	42,01	1,647	69,19047
			33,19	1,054	34,98226	42,36	0,996	42,19056
			33,58	0,422	14,17076	42,67	0,4	17,068
			33,86	0,052	1,76072	42,74	0,36	15,3864

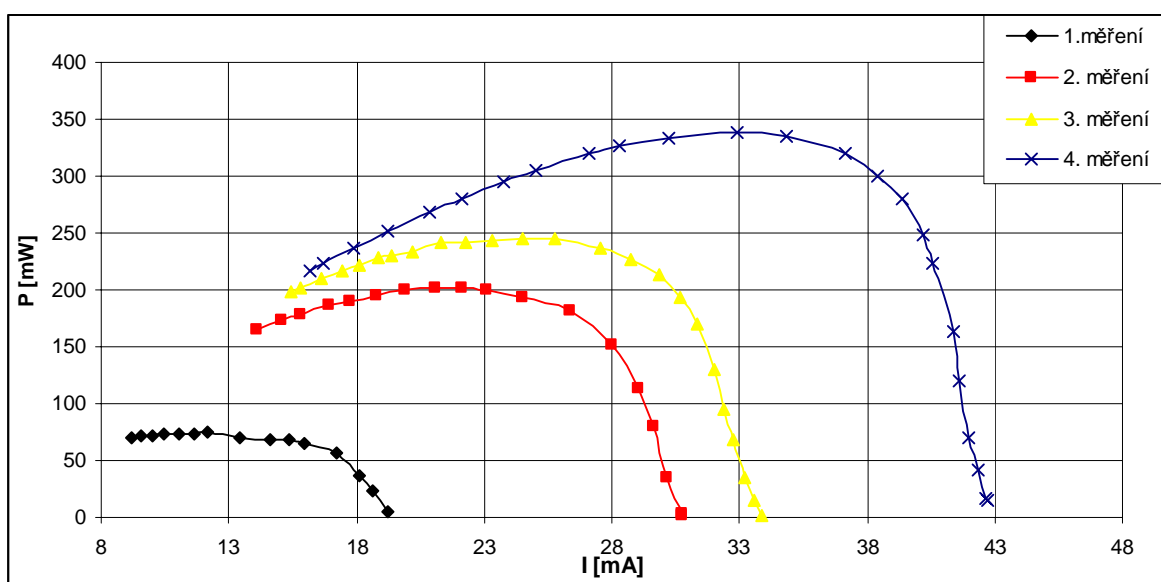
Tab. 3 – Závislost proudu na napětí. VA-charakteristice křemíkového solárního článku - zbylá 3 měření.

V tabulce jsou zvýrazněny body maximálního výkonu solárního článku při jednotlivých měření, které jsme početně zjišťovali.



Obr.24 – Graf průběhů voltampérových charakteristik jednotlivých měření křemíkového solárního článku.

Na dalším grafu si ukážeme průběh velikosti výkonu solárního článku během jednotlivých měření. Největší hodnota výkonu je samozřejmě v bodu maximálního výkonu. Při porovnání obou grafů je vidět, že hodnoty proudu v bodech maximálního výkonu jsou stejné pro každé měření jak v grafu voltampérové charakteristiky, tak v grafu závislosti výkonu na proudu křemíkového solárního článku.

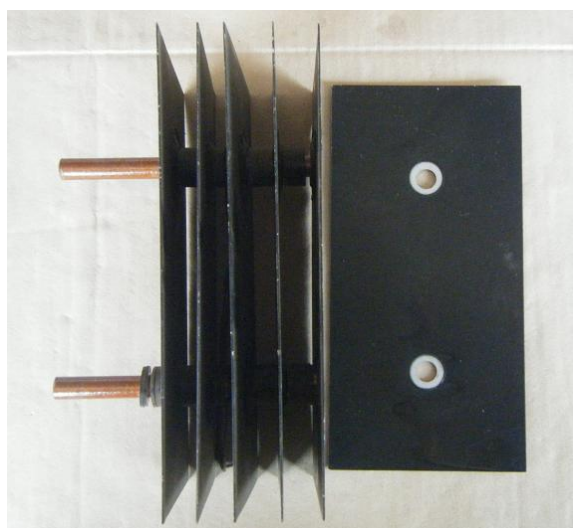


Obr. 24 – Zátěžová charakteristika jednotlivých měření křemíkového solárního článku.

4.2 Příprava selenového článku na měření VA charakteristiky

Selenové články mají mnohem menší účinnost a proto se dnes již jako solární články nevyrábějí. Proto bylo třeba hledat selen jinde. Selen je, stejně jako křemík, polovodič a stejně jako křemík má rozsáhlejší uplatnění, tj. nejenom na výrobu solárních článků. Selen se používal v různých elektronických zařízeních, kde se uplatňovaly jeho polovodičové vlastnosti. Jeden z příkladů použití selenu v praxi jsou selenové usměrňovače ve starých nabíječkách na autobaterie. Zde však byla citlivost selenu na světlo nežádoucí vlastností a proto byl selen překryt vrstvou cínu, aby byl izolován od případného slunečního záření. Selenový usměrňovač byl ještě z estetických důvodů natřen černou barvou.

Podařilo se nám sehnat ze staré nabíječky několik plechových destiček, na kterých byla vrstva selenu bezpečně ukryta pod cínem a vrstvou neznámého černého nátěru. Abychom mohli změřit voltampérovou charakteristiku selenového článku, určit jeho bod maximálního výkonu, bylo nejprve třeba zbavit se nátěru a posléze i cínu.



Obr. 25 – selenový usměrňovač

Zvolenou metodou pro zbavení se vrstvy nátěru byla užitá lázeň v chemickém rozpouštědle. Jako rozpouštědlo jsme použili nitro-ředidlo C 6000. Toto ředidlo rozpouští většinu akrylátových i syntetických barev.

Nejprve jsme do lázně ponořili jednu destičku, začali jsem měřit čas a pozorovali jsme, co se s nátěrem stane. Po 10 minutách byly již patrné známky narušení nátěru, které se projevily odchlípnutím nátěru na některých místech. Rozpouštěcí látky na neznámý druh černého nátěru působila a tak jsme do lázně vložili i zbývající destičky. Po hodině jsme je vyňali z lázně a štětcem jsme bez námahy setřeli zbytky nátěru z té strany destičky, kde byl cínový povlak. Z druhé strany destičky, kde byl čistý plech, šel nátěr hůře dolů a museli jsme plech drhnout hadrem, namočeným v ředidle C 6000, abychom nátěr odstranili.



Obr. 26 – očištěné destičky

Posledním krokem k obnažení selenové vrstvy bylo odstranění ochranné vrstvy cínu. Vrstvu cínu bylo potřeba rovnoměrně zahřát na teplotu tání a poté odstranit. K rovnoměrnému zahřátí v domácích podmínkách jsme použili plotýnkový přenosný vaříč.



Obr. 27 – Tavení cínové vrstvy nad plotýnkovým vaříčem

První destičku s vrstvou selenu a cínu jsme nahřívali při největším výkonu standardního plotýnkového vaříče po dobu deseti minut ve výšce 5 cm nad plotýnkou. Po uplynutí doby jsme uchopili destičku do kombinačních kleští a rychle jsme připraveným smetáčkem smetli vrstvu cínu. Nebyli jsem ale dostatečně rychlý a než se podařilo obnažit vrstvu selenu, cín ztuhl. Opakovali jsme tedy předchozí postup, ale se zkráceným časovým intervalem z 10 minut na 2 minuty. Nyní se již po setření cínu podařilo obnažit tmavě žlutozelenou vrstvu selenu. Na místě jsme měli připravený i multimetr, kterým jsme si ověřili, že ona žlutozelená vrstva skutečně generuje napětí elektrického proudu a to dokonce na celé své ploše $185,25 \text{ cm}^2$.

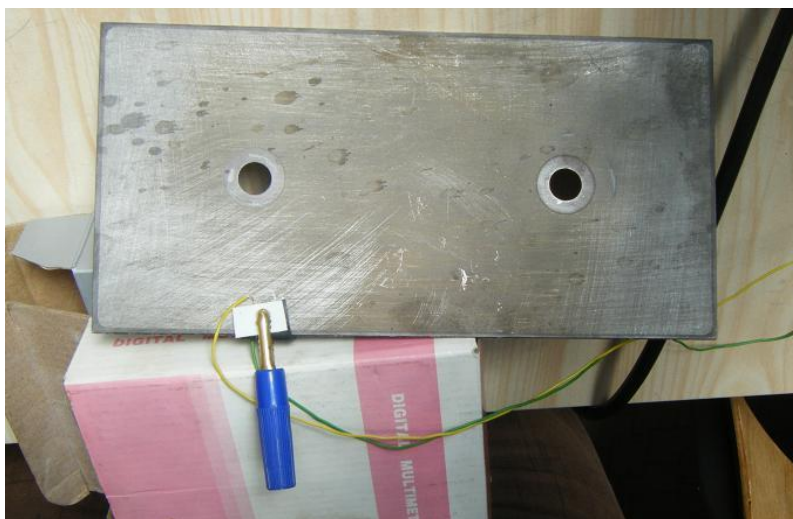


Obr. 28 – destička se selenou vrstvou

Stejný postup, který byl použit při odtavování cínu z první destičky, jsme opakovali pro zbylých pět destiček. Přestože napoprvé jsme byli úspěšní, nepodařilo se nám již obnažit selenovou vrstvu na žádné jiné destičce. Patrně z toho důvodu, že při prvním odtavování cínové vrstvy nebyla plotýnka vaříče dostatečně rozežhřátá a teplota při smetávání byla právě ta obtížně získatelná teplota. Obtížně získatelná je ta teplota z toho důvodu, že rozdíl teplot tání selenu a cínové pájky, použité pro zakrytí selenu, je pouze 2°C až 3°C . V domácích podmínkách, kde není k dispozici pec s nastavitelnou teplotou ohřevu, se jednalo více méně o štěstí v metodě pokus-omyl.

Nicméně jedna selenová destička stačila pro změření voltampérové charakteristiky selenového článku a určení jeho pracovního bodu.

Zapojili jsme obvod, stejně jako u prvního měření, podle schématu na obr. 23. a selenový článek jsme podložili, aby na jeho plochu dopadalo sluneční záření kolmo. Jelikož je plocha selenového článku v porovnání se školním křemíkovým panelem mnohonásobně menší a i jeho účinnost je obecně velice malá, generuje článek napětí naprázdno pouze 350 mV. Z toho důvodu musel být rozsah měřících přístrojů co v μA a mV.



Obr. 29 Destička s vrstvou selenu připojená do obvodu odizolovanými kontakty.

Kontakty vodičů se selenovým článkem byly odizolovány měkkou gumou z cyklistické duše, aby se zamezilo nežádoucímu kontaktu kovové svorky, která oba dva kontakty stejnou silou přidržovala na stranách destičky.



Obr. 30 Multimetry, kterými byly měřeny hodnoty proudu a napětí, které generoval selenový článek. Multimetr DT – 830B vpravo je zapojený jako ampérmetr s rozsahem $2000\mu\text{A}$ a vlevo novější typ digitálního multimetru DT – 838, který je zapojený jako voltmetr s rozsahem stupnice 2000mV.



Obr. 31 – Reostat v obvodu se selenovým článkem

4.2.1 Vlastní měření VA charakteristiky selenového článku

Vlastní měření VA charakteristiky selenového solárního článku proběhlo dne 7.4. 2010 od 12:50 do 13:40 ve stejné laboratoři, v jaké byl v listopadu naměřen křemíkový solární panel, tj. laboratoř v 1. patře budovy C v ulici Studentská, okno orientované na jih. Intenzita slunečního záření se po celou dobu téměř nelišila, jak je vidět z naměřených údajů v tabulce. Provedl jsem celkem 5 měření závislosti proudu na napětí.

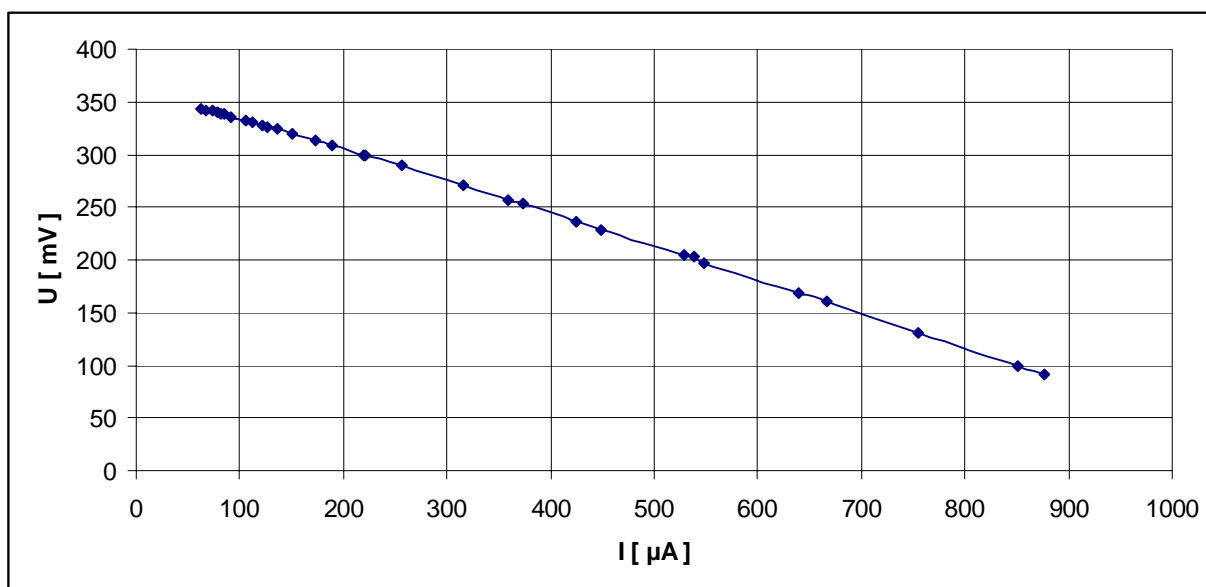
selen 1. měření			selen 2. měření			selen 3. měření		
I [μ A]	U [mV]	P [μ W]	I [μ A]	U [mV]	P [μ W]	I [μ A]	U [mV]	P [μ W]
62	340	21,08	62	343	21,266	63	346	21,798
69	338	23,322	67	342	22,914	68	344	23,392
75	337	25,275	73	341	24,893	77	341	26,257
83	335	27,805	79	340	26,86	85	339	28,815
93	332	30,876	81	339	27,459	89	338	30,082
101	330	33,33	85	338	28,73	95	336	31,92
112	327	36,624	92	336	30,912	100	335	33,5
121	323	39,083	105	332	34,86	107	333	35,631
140	319	44,66	112	330	36,96	119	329	39,151
159	314	49,926	121	328	39,688	129	326	42,054
179	308	55,132	127	326	41,402	144	322	46,368
197	303	59,691	136	324	44,064	164	316	51,824
202	301	60,802	151	319	48,169	187	309	57,783
212	299	63,388	173	313	54,149	203	304	61,712
234	292	68,328	189	309	58,401	218	299	65,182
274	280	76,72	219	300	65,7	239	293	70,027
332	263	87,316	221	299	66,079	276	282	77,832
341	260	88,66	256	289	73,984	286	279	79,794
371	252	93,492	315	271	85,365	291	275	80,025
425	235	99,875	359	257	92,263	334	264	88,176
517	207	107,019	373	253	94,369	341	261	89,001
542	199	107,858	424	237	100,488	387	247	95,589
583	185	107,855	448	229	102,592	401	242	97,042
633	169	106,977	529	204	107,916	447	227	101,469
659	161	106,099	539	203	109,417	500	211	105,5
744	134	99,696	548	197	107,956	548	196	107,408
844	102	86,088	640	169	108,16	661	160	105,76
855	98	83,79	666	160	106,56	687	151	103,737
874	91	79,534	755	131	98,905	735	135	99,225
			851	100	85,1	852	97	82,644
			876	92	80,592	871	91	79,261

Tab. 4 Hodnoty I , U a P při VA-charakteristice selenového solárního článku. První 3 měření

selen 4. měření			selen 5. měření		
I [μ A]	U [mV]	P [μ W]	I [μ A]	U [mV]	P [μ W]
63	346	21,798	63	345	21,735
68	345	23,46	68	343	23,324
73	344	25,112	74	341	25,234
76	343	26,068	77	340	26,18
80	342	27,36	82	339	27,798
85	340	28,9	86	338	29,068
88	339	29,832	92	336	30,912
91	338	30,758	98	334	32,732
98	336	32,928	102	333	33,966
102	335	34,17	113	329	37,177
107	333	35,631	120	327	39,24
115	331	38,065	130	324	42,12
125	328	41	138	321	44,298
139	324	45,036	148	318	47,064
146	322	47,012	159	314	49,926
153	320	48,96	167	312	52,104
164	316	51,824	174	310	53,94
179	312	55,848	182	307	55,874
205	304	62,32	192	304	58,368
239	293	70,027	205	299	61,295
276	282	77,832	218	296	64,528
308	272	83,776	233	291	67,803
356	257	91,492	247	286	70,642
428	234	100,152	259	282	73,038
434	231	100,254	271	279	75,609
477	218	103,986	290	273	79,17
506	209	105,754	329	260	85,54
541	197	106,577	370	247	91,39
567	189	107,163	396	238	94,248
635	166	105,41	465	216	100,44
708	160	113,28	389	241	93,749
725	142	102,95	414	232	96,048
653	136	88,808	462	217	100,254
817	105	85,785	486	208	101,088
843	95	80,085	519	198	102,762
859	90	77,31	546	189	103,194
			651	153	99,603
			660	150	99
			673	146	98,258
			751	119	89,369
			833	96	79,968
			855	89	76,095

Tab. 5 Hodnoty I , U a P při VA-charakteristice selenového solárního článku 4. a 5. měření.

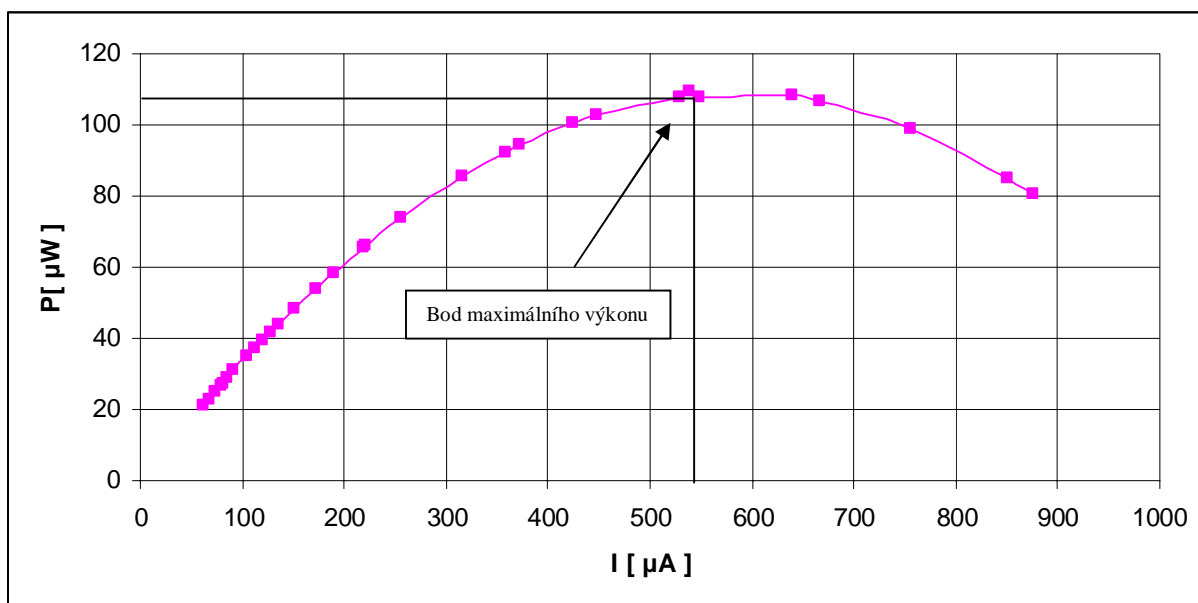
Hodnoty výkonu selenového článku pro jednotlivé body jsou spočítány v MS Excel podle vztahu (8), stejně jako hodnoty výkonu křemíkového solárního článku. Odchyly jednotlivých měření jsou téměř zanedbatelné a proto uvádíme graf VA charakteristiky pouze pro druhé měření z pěti a to z důvodu přehlednosti grafu.



Obr. 32 – Graf VA charakteristiky selenového článku pro 2. měření

Z grafu závislosti proudu na napětí selenového článku nelze kvůli průběhu výsledné křivky určit bod maximálního výkonu, jelikož je její průběh téměř lineární. Početně máme zjištěny hodnoty výkonu v jednotlivých bodech a největší z těchto hodnot je bod maximálního výkonu. Graficky jej můžeme určit ze zátěžové charakteristiky (obr. 33), což je závislost výkonu selenového článku na jeho proudu.

Ze zátěžové charakteristiky je již bod maximálního výkonu selenového článku dobře patrný.



Obr. 33 Zátěžová charakteristika selenového článku

Když porovnáme VA charakteristiku selenové solárního článku s VA charakteristikou křemíkového článku zjistíme, že selenová má nestandardní lineární průběh. Ten je způsoben malou schopností fotovoltaické přeměny.



5 Závěr

Tato bakalářská práce se zabývá využitím sluneční energie a její přeměnou na jiný druh energie, kterou lze uchovat či efektivně využít. Jde o energii tepelnou a energii elektrickou. Řekli jsme si, jak vzniká sluneční záření a jak se skrze atmosféru dostane až k nám na zemský povrch. Ukázali jsme si, jakými způsoby umíme zatím energii tohoto záření využít – přeměnit ji na tepelnou a nebo na elektrickou energii. Solární tepelné kolektory využíváme k fototermální přeměně, tj. k zachycení sluneční energie, která ohřeje teplotonosnou kapalinu a tím se přemění na teplo. Teplotonosná kapalina putuje do výměníku, kde teplo předává. Teplo se může uchovat v zásobníku tepla a nebo se vede rovnou ke spotřebičům. V kapitole 2.7.2 jsme se dočetli o základních typech tepelných kolektorů a dozvěděli jsme se o jejich výhodách, nevýhodách, využití a výskytu.

Dále jsme se dozvěděli o solárních článcích. Víme, jaké jsou jejich základní druhy, z čeho se skládají i jak je lze vyrobit. Vkládají do solárních panelů, ty potom do solárních modulů, které potom „vyrábějí“ elektrický proud.

Solární elektrárny jsou velice podstatným zdrojem elektrické energie, jelikož při její výrobě využívají sluneční energii, která se nemusí nijak těžit, je zdarma a je de facto dostupná všude. Solární elektrárny ve skutečnosti „nevyrábějí“ elektrický proud, ale přeměňují sluneční energii na energii elektrickou pomocí fotovoltaického jevu. V kapitole 3.2.1 jsme si řekli, co to fotovoltaický jev je a přiblížili jsme si jeho fyzikální podstatu. Fotony, které dopadají na povrch křemíku předávají svou energii valenčním elektronům dotovaného polovodiče, dojde k uvolnění valenčních elektronů z krystalické mřížky a v polovodiči vznikají páry elektron-díra, které jsou za určitých podmínek schopny vést elektrický proud. Dále jsme se v kapitole 3 dozvěděli o solárních článcích mnoho dalších informací. Víme, že jsou jedním z řešení energetické krize, která hrozí, až dojdou zásoby fosilních paliv. Jsou tudíž jednou z nejdůležitějších věcí, kterou se musíme snažit pochopit, porozumět jí a naučit se jí co nejlépe využívat. Bez obnovitelných zdrojů energie totiž v nedaleké budoucnosti dokáže moderní civilizace přežít velice obtížně.



Cílem práce bylo popsat přeměnu sluneční energie v energii elektrickou a nastínění nových metod pro budoucí fotovoltaický výzkum. Přiblížení nejběžnějších způsobů využívání sluneční energie i pro laickou veřejnost, neboť sluneční energie může být v budoucnosti jedním z našich mála zdrojů energie na Zemi. Proto musíme do povědomí lidí vštěpovat neustále vědomosti o způsobech využívání obnovitelných zdrojů energie, jakým energie Slunce nepochybně je. Seznámili jsme čtenáře s přeměnou této životadárné energie na elektrickou energii, která je pro lidstvo nepostradatelná. Na jednoduchých a názorných pokusech jsme si ukázali nejdůležitější vlastnosti jednotlivých článků jako jsou bod maximálního výkonu, napětí naprázdno, proud na krátko a jiné.

V práci se nám doufejme podařilo napsat vše co nejsrozumitelněji, aby práce byla přínosem i pro neodbornou veřejnost a seznámila ji tak s výhodami využívání sluneční energie.



6 Použitá literatura

[6] BALÁK, R. *Nové zdroje energie*. 2. vyd. Praha 1989

[1] BROŽ, K. *Alternativní zdroje energie*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 2003.

ISBN 80-01-02802-X.

[22] BURIANOVÁ, L., ČMELÍK, M., MACHONSKÝ, L. *Fyzikální laboratoře*. 2. vyd. Liberec

2007 ISBN 978-80-7372-176-3

[7] CIHELKA, J. *Solární tepelná technika*. 1. vyd. Praha 1994. T. Malina

ISBN 80-900759-5-9

[19] HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. *Fyzika část 3*. 1. vyd. Brno VUTIUM,

2000. ISBN 80-214-1868-0

[5] KRIEG, B. *Elektrina ze Slunce*. Český překlad. Nakladatelství HEL, Ostrava, 1993

[8] KŘIVÁK, P., NOVÁK, V., VANĚK, J. *Alternativní zdroje energie*, Brno, 2006

[4] LIBRA, M., POULEK, V. *Zdroje a využití energie*, 1. vyd. Praha ČZU, 2007

ISBN 978-80-213-1647-8

[2] TOUŠEK, Jiří. *Elektrina ze Slunce – fotovoltaické systémy a jejich ekonomika*. Vesmír,

2000, roč. 79, č.12, ISSN: 1214-4029, s. 672-675.

[3] VANĚČEK, M. Přeměna sluneční energie v energii elektrickou, československý

časopis pro fyziku 52 r.2002, str. 92



- [9] ČEZ, a.s. *Solární energie* [online] c2008, [cit.2010-03-02]. Dostupné z WWW:
<<http://www.cez.cz/edee/content/microsites/solarni/k12.htm>>
- [10] *Využití slunečního záření* [online]. c2008, [cit.2010-03-20]. Dostupné z WWW:
<<http://www.i-ekis.cz/?page=slunce-teplo>>
- [11] *Voltampérová charakteristika fotovoltaického článku*. [online] c2008,
[cit.2010-04 15]. Dostupný z WWW: <<http://www.slatinsky.eu/jak-elektrarna-funguje.html>>
- [12] *Praktika z fotovoltaiky* [online] c2008. [cit.2010-04-15]. Dostupný z WWW:
<http://www.vosvdf.cz/cmsb/userdata/487/ZE_ke_stazeni/praktika_z_fotovoltaiky.pdf>
- [13] SHORT, M., N., *Meteorology – weather and climate* [cit.2010-04-20]. Dostupný z WWW:
<http://www.fas.org/irp/imint/docs/rst/Sect14/Sect14_1a.html>
- [14] *Nejekologičtější zdroj energie*. [online] c2010. [cit.2010-04-01]. Dostupný z WWW:
<<http://www.solartec.cz/cs/fv-systemy/o-fotovoltaice/nejekologictejsi-zdroj-energie.html>>
- [16] *Globální záření* [online] c2009. [cit.2010-03-23]. Dostupný z WWW:
<<http://www.isofenenergy.cz/fotovoltaika.aspx>>
- [17] *Fotovoltaika*. [online] c2005. [cit.2010-03-10]. Dostupný z WWW:
<<http://www.quido.cz/objevy/fotovolt.htm>>
- [18] *Z historie fotovoltaiky*. [online] c2007. [cit.2010-04-13]. Dostupný z WWW:
<<http://www.czechsolar.cz/fotovoltaika/z-historie-fotovoltaiky/>>
- [20] *Fotoelektrický jev*. [online] c2008. [cit.2010-04-13]. Dostupný z WWW:
<<http://whs.wsd.wednet.edu/Faculty/Busse/MathHomePage/busseclasses/radiationphysics/lecturenotes/chapter12/chapter12.html>>



[21] *Fotovoltaika*. [online] c2009. [cit.2010-04-14]. Dostupný z WWW:

<<http://www.czrea.org/cs/druhy-oze/fotovoltaika#fv>>

[23] *The Encyclopedia of Alternative Energy and Sustainable Living : silicon (Si)* [online].

c2008 [cit. 2009-01-21]. Dostupný z WWW:

<http://www.daviddarling.info/encyclopedia/S/AE_silicon.html>.

[24] MACÁK,J., *Využití solárních článků z nanovláken v architektuře*. [online] c2008.

[cit.2010-04-20]. Dostupný z WWW:

<<http://www.imaterialy.cz/clanky/technologie/7853/vyuziti-solarnich-clanku-z-nanovlaken-v-architektuře/>>

[25] BECHNÍK,B., *Historie a perspektivy OZE – fotovoltaika, méně rozšířené*

technologie. [online] c2010. [cit.2010-04-20]. ISSN 1801-4399 Dostupný z WWW:

<<http://www.tzb-info.cz/t.py?t=2&i=5517>>