

FOTOVOLTAIKA

Příručka pro současné i budoucí majitele

Roman Vaverka



 GRADA®

Upozornění pro čtenáře a uživatele této knihy

Všechna práva vyhrazena. Žádná část této tištěné či elektronické knihy nesmí být reprodukována a šířena v papírové, elektronické či jiné podobě bez předchozího písemného souhlasu nakladatele. Neoprávněné užití této knihy bude **trestně stíháno**.

Ing. Roman Vaverka

FOTOVOLTAIKA

Příručka pro současné i budoucí majitele

Vydala Grada Publishing, a.s.
U Průhonu 22, Praha 7
obchod@grada.cz, www.grada.cz
tel.: +420 234 264 401
jako svou 10 601. publikaci

Odpovědná redaktorka Eva Škrabalová
Sazba a grafická úprava Martina Mojzesová
Jazyková korektura Martina Mojzesová
Fotografie na obálce Depositphotos
Fotografie v textu archiv autora, pokud není uvedeno jinak
Počet stran 312
První vydání, Praha 2026
Vytiskly Tiskárny Havlíčkův Brod

© Grada Publishing, a.s., 2026
Cover Design © Grada Publishing, a.s., 2026

Názvy produktů, firem apod. použité v knize mohou být ochrannými známkami nebo registrovanými ochrannými známkami příslušných vlastníků.

ISBN 978–80–271–5763–1 (ePub)
ISBN 978–80–271–5403–6 (pdf)
ISBN 978–80–271–6263–5 (print)

Ing. Roman Vaverka

FOTOVOLTAIKA

Příručka pro současné
i budoucí majitele

*Věnováno Honzovi Kaděrovi, Tomáši Václavíkovi a Jirkovi
Vaculíkovi, mým učitelům, kteří mi na začátku mé existence
v oboru fotovoltaických elektráren věnovali svůj čas
a pomohli mi stát se tím, kým jsem dnes. Hoši, díky za vše.*

PŘEDMLUVA

Jako technický specialista a vedoucí servisu jsem pro naše klienty napsal řadu návodů, v nichž vysvětluji různé technické, fyzikální i legislativní limity, které nepoučený laický uživatel běžně nezná, nechápe nebo nevnímá. Tato knížka je tedy pokračováním této mé práce, tentokrát pro širší veřejnost a v poněkud větším rozsahu. Dozvíte se v ní nejen, jak fotovoltaická elektrárna (FVE) funguje, co od ní nečekat a co je naopak jejím přirozeným chováním, ale také řadu praktických rad, jak se ke své FVE chovat, jak řešit bezpečnost, krizové situace a podobně. Kromě čistě vysvětlujících a praktických kapitol zařadím na závěr pro rozšíření obzorů i kapitolu o jiných druzích fotovoltaiik, zahraniční praxi a všelijakých zajímavostech ze světa fotovoltaiiky.

Nebudu ovšem psát o různých novinkách a objevech, o nichž se každý týden objevují zprávy a články na internetu. Většina z nich se totiž nedomnívá praktického uplatnění, protože dříve či později narazí na překážky ekonomiky, životnosti nebo škálovatelnosti – co v malém funguje v laboratoři nebo pilotním projektu, nemusí fungovat ve velkém měřítku. Například dnes již docela dobře funguje nanogenerátor schopný získávat energii z dopadu vodní kapky. Ovšem k získávání energie z deště jsme ještě velmi daleko, protože to je technický problém o několik řádů složitější. Nanogenerátory zapojené společně do jednoho obvodu se vzájemně ovlivňují, kapky deště dopadají nahodile s různými časovými odstupy, při každém dešti pod trochu jiným úhlem a efektivita celého sběrného pole aktuálně dosahuje jen zlomku prostého součtu potenciálního výkonu všech generátorů. Většina oněch článků na internetu ostatně obsahuje ono úžasné sdělení, že „objev ABC může znamenat revoluci v oboru XY“. Ale stejně tak lze prohlásit o libovolném miminu, že se může stát prezidentem či prezidentkou. Může. Proč by nemohlo? V realu se to však poštěstí sotva jednomu z milionu. I ve fotovoltaiice máme příklady desítek nadějných objevů i celých technologií, které se přes řadu nesporných výhod neprosadily třeba jen kvůli takové drobnosti, že upravit stávající výrobní linky by bylo o 10 % nákladnější než v případě jiné, o něco horší technologie. Výrobce si totiž spočítal, že na obou dokáže vydělat zhruba stejné peníze a ona lepší technologie by mu nepřinesla adekvátně větší zisk, pouze vyšší vstupní náklady. A tak ji po zralé úvaze uložil do složky „nerealizované projekty“.

Čili vše v této knize bude ryze praktické a vysvětlené pokud možno tak, aby tomu bylo rozumět i bez znalosti fyziky.

Ing. Roman Vaverka
vaverka.fm@gmail.com

OBSAH

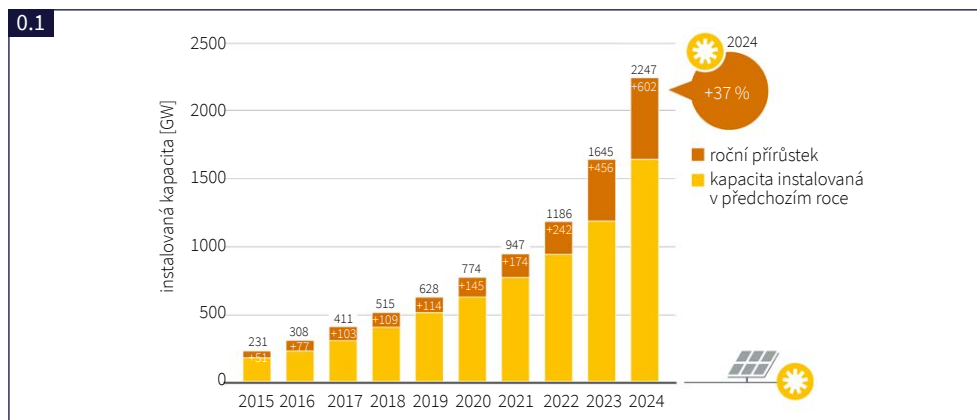
Předmluva	5	3. Baterie	94
Úvodem	8	Baterie používané ve fotovoltaických elektrárnách	94
Slovníček základních pojmů, veličin a zkratk	13	Anatomie LFP baterií a princip jejich fungování	95
1. Fotovoltaika	16	Skládání bateriových úložišť	98
Úvod	16	Nízkonapěťová úložiště	99
Princip fungování solárních panelů	16	Vysokonapěťová úložiště	100
Výroba fotovoltaických článků a sestavování panelů	19	Příklady složení baterií pro FVE	101
Srovnání technologií fotovoltaických článků	32	Zapojení baterií do FVE	106
Charakteristiky fotovoltaických panelů	33	Charakteristiky LFP baterií	109
Vliv znečištění	35	Vliv teploty a umístění baterií	118
Vliv osvětlení	36	Přidání baterií	120
Vliv teploty	43	Poruchy baterií	121
Vliv stárnutí	47	Výrobci	124
Degradace PID	50	Standardy a certifikace	126
Vliv zastínění	51	Likvidace a recyklace baterií	128
Bypassové diody	52	4. Distribuční síť, připojení a rozvaděč	130
Poruchy fotovoltaiky	54	Úvod	130
Standardy a certifikace	56	Distribuční síť	130
Výrobci	57	Elektroměr	133
Likvidace a recyklace FV panelů	60	Elektroměrový rozvaděč	136
2. Instalace fotovoltaiky	63	První připojení nové FVE k distribuční síti	139
Úvod	63	Kooperace FVE a distribuční sítě	139
Instalace panelů	63	Měření po fázích	140
Zapojení fotovoltaiky	70	Domovní rozvody	143
Dodatečné přidání panelů	71	Chrániče a jističe	144
Pojistky a odpojovače	72	Značení	146
Přepětové ochrany	72	Chyby a vady v zapojení	147
Stanovení vnějších vlivů, rizik a ochrany před bleskem	75	5. Střídače	149
Hromosvody, uzemnění a použití ochrany	77	Úvod	149
Hlavní ochranná přípojnice	85	Typy střídačů	150
Optimizéry	85	Složení střídače	155
Odpojovače a tlačítko STOP	88	MPP tracker	160
Funkce AFCI	93	Účinnost	163

Backup	165	11. Bezpečnost, prevence	
Střídač a baterie	166	a řešení krizových situací	235
Měření	167	Prevence, kontrola, bezpečnost	235
Reakce střídače na zátěž	172	Revize a bezpečnost instalace	236
Vlastní spotřeba	173	Pojištění	239
Charakteristiky střídačů	173	Opatření pro případ požáru	239
Hlučnost	175	Jak se zachovat, když ucítíte spáleninu	240
Monitoring a obslužné aplikace	175	Jak se zachovat při požáru	240
Provozní teplota a chlazení	178	Jak se zachovat při vyplavení	240
Provozní režimy	179	Jak se zachovat při zatečení do střechy	241
Přetoky do sítě	180	Jak se zachovat při povodni	241
Ostrovní režim	181	Shrnutí	241
Funkce dálkového ovládání výkonu	182	12. Konektivita a kyberbezpečnost	242
Funkce Q(U), P(U), P(f)	183	Připojení FVE k internetu	242
Poruchy střídačů	185	Kyberbezpečnost	245
Výrobci	186	Propojení FVE s řízenými periferiemi	
Standardy a certifikace	187	a chytristikou	247
6. AC rozvaděče	190	Bezdrátová datová propojení mezi	
7. Jak funguje Fotovoltaická		rozvaděči	248
elektrárna	196	13. Různé	250
8. Chytristika	205	Komerční fotovoltaické elektrárny	250
Chytré řízení	205	Pohyblivé fotovoltaické konstrukce	254
Řízení přetoků	206	Solární technologie CSP	256
Chytrý kontakt	209	Malé fotovoltaické systémy	262
Bojler	209	Solární teplovzdušné systémy	267
Klimatizace	211	Fotovoltaika na dopravních prostředcích	269
Tepelné čerpadlo	212	Carporty	271
Chytrá domácnost	214	Fotovoltaika na obytných vozech,	
Dobíjecí stanice	215	karavanech, lodích apod.	272
Chytré zásuvky	219	Zavlažovací systémy	275
Služby výkonové rovnováhy	220	Lokální FV instalace	275
Flikr	222	Fotovoltaika a větrná elektrárna	276
9. Prodej a sdílení energie	224	Fotovoltaika a generátor	278
Prodej elektřiny	224	Bifaciální panely	279
Spot	225	Solární tašky	282
Sdílení elektřiny	227	Solární moduly instalované do střechy	285
10. Solární ohřev vody	229	Transparentní solární moduly	290
Úvod	229	Tenkovrstvé moduly	293
Termický způsob ohřevu vody	229	Fotovoltaika na historických objektech	
Fotovoltaický způsob ohřevu vody	232	a v chráněných územích	295
		Specifikum „české cesty“	298
		Literatura	302
		Rejstřík	304

ÚVODEM

Fotovoltaika je jednoduchý a elegantní proces přeměny slunečního záření přímo na elektrickou energii bez hluku, odpadů, emisí a dalších negativních projevů. Dnes je to stále důležitější alternativa konvenční výroby elektřiny z fosilních paliv, ale ve srovnání s jinými technologiemi výroby je to pořád relativní novinka. Jako v mnoha jiných technických oborech i zde se s výzkumem začalo v 19. století, ale první praktická fotovoltaická zařízení byla demonstrována až v 50. letech 20. století. V 60. letech pak získaly vývoj a výzkum větší podporu ze strany kosmického průmyslu, který pro satelitní aplikace potřeboval napájení nevyžadující těžkou baterii nebo jiný vnitřní zdroj. Tyto solární články byly tisíckrát dražší než dnes, ale ropná krize v 70. letech podnítila další vývoj ve snaze získat vhodný alternativní zdroj energie i pro pozemní užití. Prvním ekonomicky použitelným výsledkem bylo solární napájení přenosných přístrojů, jako jsou kalkulačky nebo hodinky. V 80. letech postoupil vývoj solárních článků již tak daleko, že bylo možno zahájit výstavbu prvních prakticky využitelných fotovoltaických elektráren (FVE). Od té doby jde o trvale rostoucí obor, který dnes zaměstnává miliony lidí¹ a v němž se ročně točí stovky miliard dolarů.

Tento trend v posledních letech eskaloval a celková instalovaná fotovoltaická kapacita znamená celosvětově trvalý růst. V době dokončení knihy nebyly ještě známy kompletní výsledky za rok 2025, ale předpokládá se, že bude pokořena hranice 3000 GWp.²

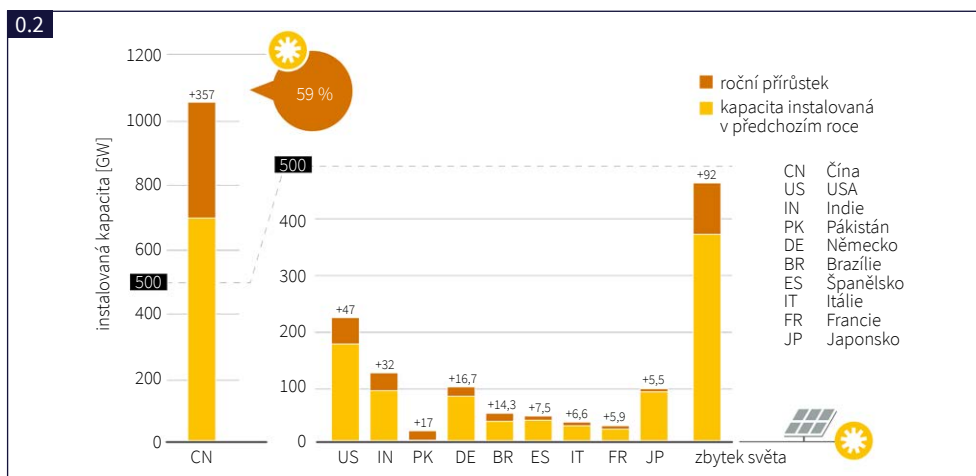


Zdroj: www.ren21.net

1 Jen v Číně je to asi 4,6 milionu, z nichž zhruba polovina pracuje ve výrobě. V EU to bylo 720 000 v roce 2023.

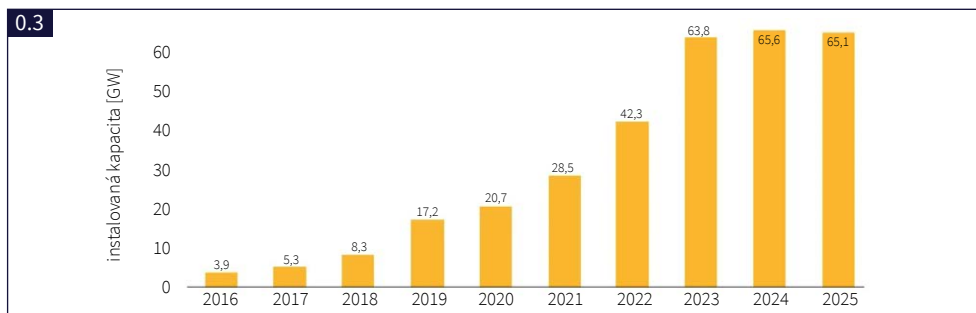
2 Wp (watt-peak) je jednotka maximálního výkonu instalované fotovoltaiky za ideálních podmínek.

Světovým lídrem je Čína, která se na ročním přírůstku 602 GWp podílela 59 % (357 GWp). Následují USA (8 %), Indie (5 %), Pákistán (3 %), Německo (2,8 %), Brazílie (2,4 %), Španělsko (1,2 %), Itálie (1,1 %), Francie (1 %) a Japonsko (0,9 %). Podíl všech ostatních zemí světa činil 15,6 %. Instalovaná fotovoltaická kapacita Číny dosáhla 1050 GWp, což je 47 % celkového celosvětového objemu. V Evropské unii s celkovou instalovanou kapacitou 338 GWp bylo premiantem Německo se 100 GWp. Fotovoltaické systémy zde za rok 2024 vyprodukovaly 72,2 TWh elektřiny,³ což odpovídá přibližně 14% podílu na celkové výrobě elektrické energie.



Zdroj: www.ren21.net

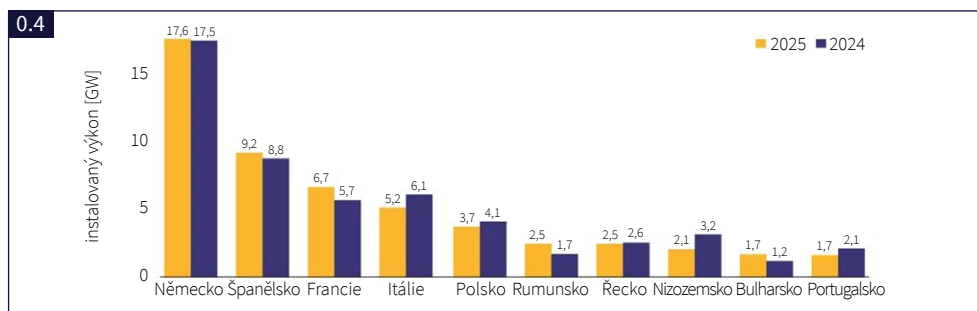
Graf 0.3 ukazuje počty nově instalovaných FVE v Evropě. Zřetelně je vidět skok mezi lety 2018–2019, poté co v září 2018 došlo ke zrušení celních bariér na dovoz FV panelů z Číny, což mělo za následek jejich zvýšenou dostupnost i pokles cen. Mezi červnem 2021 a květnem 2022 pak prudce vzrostly ceny energií (až o 79 % pro domácnosti a 131 % pro firmy), což dále akcelerovalo poptávku po nových instalacích. Mezi červnem 2023 a červnem 2024 se ceny zase stabilizovaly a poptávka citelně ochladla.



Zdroj: www.solarpowereurope.org

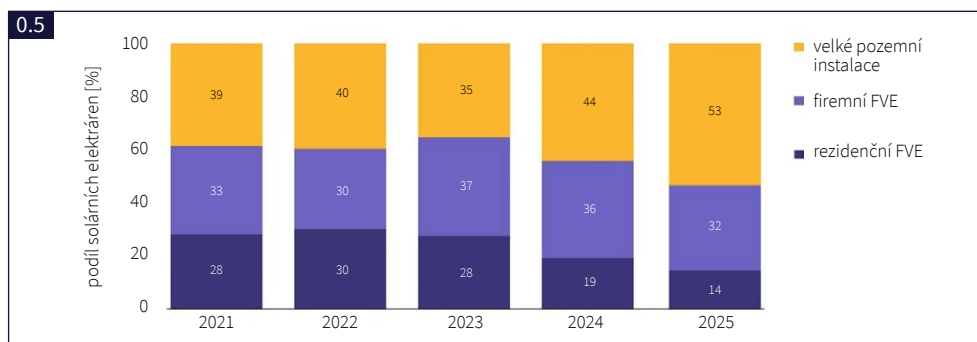
³ Wh (watthodina) je jednotkou energie dodané za jednotku času. Pro srovnání měřítek – jaderná elektrárna Temelín má výkon 2,72 GW, roční výrobu přes 16 TWh a za 20 let provozu dodala do sítě 254 TWh energie.

Tento vývoj ohrožuje splnění cíle EU mít do konce roku 2030 instalováno 600 GWp, což předpokládá instalovat každoročně 68,7 GWp. Například pro Německo to znamená dosáhnout instalovaného výkonu 215 GWp, pro Českou republiku 12,5 GWp podle tzv. zeleného (tj. nejoptimističtějšího) scénáře. Na druhou stranu je zde rostoucí trend výstavby firemních FVE a velkých solárních parků, klesající cena komponent a v západní Evropě také zvýšený zájem o instalaci malých balkonových solárních systémů. Těch bylo na konci roku 2025 jen v Německu přihlášeno do provozu přes jeden milion. Ochlazení poptávky je ovšem způsobeno i dalšími faktory. Významný vliv má zejména snížení dotací a omezení možnosti dodávat přebytky energie do distribuční sítě (např. v ČR nebo Nizozemsku). V některých regionech došlo k zákazu stavět na zemědělské půdě (např. v Itálii) nebo se potýkají s nedostatkem kapacit instalačních firem. Nejstrmější pokles zaznamenává opakovaně Nizozemsko, kde bylo oproti předchozímu roku nainstalováno méně o 1,8 GWp (2024), resp. o 1,1 GWp (2025). Naopak největší nárůst zaznamenává Francie, kde v roce 2024 přibýlo o 1,5 GWp více než v roce předchozím. V roce 2025 to bylo více o 1 GWp, čímž se Francie dostala na 3. příčku před Itálií. Graf 0.4 ukazuje výkon instalovaný v předních evropských zemích v letech 2024 a 2025.



Zdroj: www.solarpowereurope.org

Graf 0.5 ukazuje, jak se v Evropě v posledních letech měnil podíl různých typů solárních elektráren. Zřetelné je vidět výrazný pokles podílu rezidenčních⁴ FVE a rostoucí dominanci



Zdroj: www.solarpowereurope.org

⁴ Na rodinných, ale také na bytových domech, chatách, penzionech, hotelech, restauracích apod.

velkých solárních parků dodávajících energii přímo do distribuční sítě. Tento trend platí celosvětově. V Číně činí podíl rezidenčních FVE sotva 10 %.

V České republice dosáhla na konci roku 2025 celková instalovaná kapacita hodnoty 5,5 GW (přírůstek 696 MW), což znamená přesně 2,5násobek oproti roku 2021. V absolutních číslech bylo v ČR k 31. 12. 2025 evidováno 230 375 FVE, z nichž je asi 205 tisíc instalováno na budovách.⁵ Největším provozovatelem FVE je skupina ČEZ s celkovým instalovaným výkonem přes 200 MWp. Provozuje rovněž aktuálně největší českou FVE (instalovaný výkon 56 MWp) na místě zaniklé obce Jabloneček v bývalém vojenském újezdu Ralsko. Do provozu byla uvedena v roce 2010 a byla tehdy 12. největší fotovoltaickou elektrárnou na světě.

Podle dat ČSRES⁶ bylo v roce 2023 zprovozněno 88 699 nových FVE o výkonu 970 MWp. V roce 2024 pak dalších 44 593 FVE o výkonu 967 MWp. Tento nepoměr byl dán skutečností, že se po 14 letech od nepovedeného solárního boomu z let 2009–2010 začaly znovu ve větším měřítku stavět velké pozemní FVE a současně došlo k nasycení trhu s instalacemi na rodinné domy. Průměrná velikost FVE vzrostla z 11,7 kWp (2023) na 21,7 kWp (2024), u domácích fotovoltaik pak ze 7,35 kWp na 10,5 kWp. 95 % domácností volilo variantu s bateriovým úložištěm s průměrnou kapacitou 11,7 kWh. Průměrná velikost firemní FVE činila 101,7 kWp. Za rok 2024 bylo v rámci FVE nainstalováno 36 246 bateriových úložišť o celkové kapacitě 506 MWh, čímž se celkový počet úložišť v ČR zvedl na 157 507 o souhrnné kapacitě téměř 2 GWh. V roce 2025 přibýlo dalších 27 298 nových FVE o výkonu 696 MWp, z čehož na rodinných domech jich bylo instalováno 23 534. V roce 2024 to bylo 40 925. Jedná se tedy o 42,5% pokles. Na druhou stranu na 122 kWp vzrostla průměrná velikost firemní FVE a bylo připojeno o 8 % více bateriových úložišť (546 MWh).

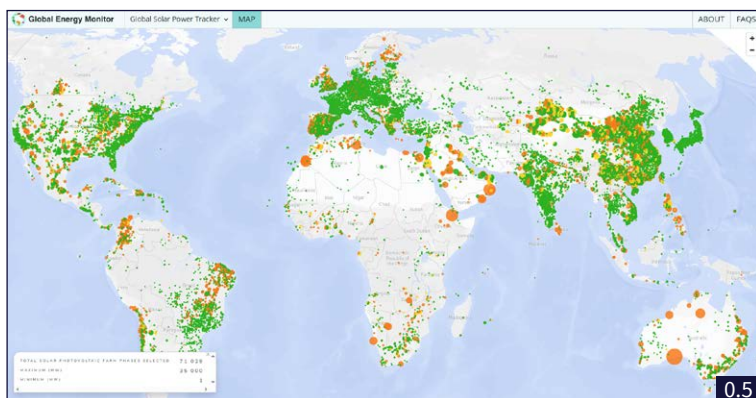
Mimo oficiální statistiky se odehrává trh předělávek starších FVE z let 2008–2010 (tzv. retrofit), které není povinnost hlásit úřadům. V roce 2025 zaměstnal instalační firmy odhadovaným objemem prací na 110–160 MWp.

Těžiště dalšího rozvoje sektoru obnovitelných zdrojů energie (OZE) se tedy přesouvá ke stavbě větších firemních a komerčních elektráren a nově i velkých bateriových úložišť. Je to dáno zejména rostoucím zájmem investorů v reakci na změny v legislativě. V březnu 2025 byla schválena novela energetického zákona známá jako LEX OZE 3, která je označována za revoluci v české energetice. Zavádí klíčové tržní mechanismy, které umožní využít potenciál decentralizované energetiky. Zjednodušuje povolování obnovitelných zdrojů a definuje nová pravidla v oblastech akumulace elektřiny (umožňuje připojovat i samostatné bateriové systémy bez vlastní fotovoltaiky), flexibility (možnost za úplatu upravovat spotřebu/výrobu podle potřeb distribuční sítě) a agregace (spojování menších zdrojů do jednoho obchodního celku). Pro další rozvoj OZE a s nimi spojených funkcionalit, jako např. komunitního sdílení elektřiny, je kromě právního rámce ovšem klíčově důležitá také adekvátně robustní a správně navržená distribuční síť.

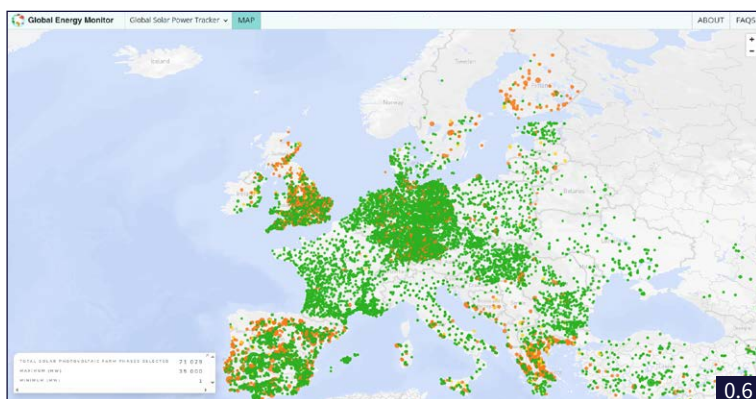
5 Zdroj: Ministerstvo průmyslu a obchodu (mpo.gov.cz).

6 České sdružení regulovaných elektroenergetických společností (www.csres.cz).

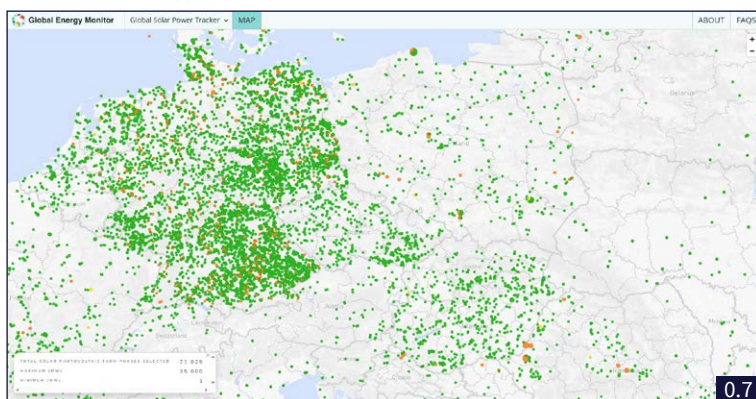
Rozložení FVE nad 1 MW výkonu podle webu Global Energy Monitor,⁷ stav k 1. 1. 2026.
Zeleně – FVE v provozu, oranžově – v přípravě, žlutě – ve stavbě.
Ve světě:



Detail Evropy:



Detail střední Evropy:



⁷ Dostupné z: globalenergymonitor.org/projects/global-solar-power-tracker/tracker-map/

SLOVNÍČEK ZÁKLADNÍCH POJMŮ, VELIČIN A ZKRATEK

Slovníček pojmů

OZE	obnovitelné zdroje energie
FVE	fotovoltaická elektrárna
FV	fotovoltaika, fotovoltaické panely
Grid	rozvody pro napájení domu a připojení k distribuční síti
Backup	rozvody, které jsou při „výpadku proudu“ napájeny z baterií, též záloha, záložní okruhy
AC	střídavý proud a napětí
DC	stejnoseměrný proud a napětí
DC strana FVE	část FVE pracující se stejnosměrným proudem a napětím – fotovoltaika a baterie
DS	distribuční soustava, resp. distribuční síť
PDS	provozovatel distribuční soustavy
PPDS	pravidla pro provozování distribuční soustavy
PPP	první paralelní připojení, okamžik, kdy je FVE poprvé připojena k distribuční síti, totéž co UTP (umožnění trvalého provozu)
SOP	smlouva o připojení odběrného elektrického zařízení k distribuční soustavě uzavíraná mezi majitelem odběrného místa (a současně žadatelem o připojení nové FVE) a distributorem
ČSN	česká státní norma
HDR	hlavní domovní rozvaděč
HDO	hromadné dálkové ovládání
LPS	hromosvodná soustava
SPD	svodiče bleskového proudu, přepětové ochrany
BMS	řídící jednotka bateriového úložiště
SOC	stupeň nabití baterií
SOH	stav zdraví baterií

DOD	hloubka vybití baterií
TUV	teplá užitková voda
TČ	tepelné čerpadlo
HW	hardware
SW	software
ON/OFF	zapnuto/vypnuto
DI/DO	vstup/výstup

Jednotky

mA	miliampér, tisícina ampéru = 0,001 A
kW	kilowatt, tisíc wattů = 1000 W
MW	megawatt, milion wattů = 1000 kW
μm	mikrometr, tisícina milimetru = 0,001 mm
nm	nanometr, miliontina milimetru = 0,0001 μm

Fyzikální veličiny, které budou používány v textu

Elektrický proud (I) – Elektrický proud je usměrněný pohyb elektronů v materiálu zvaném vodič. Jednotkou je ampér (A). Laicky si lze proud představit jako mohutnost proudu vody v trubce.

Napětí (U) – Napětí je zjednodušeně řečeno síla, která vyvolává tok elektronů. Jednotkou je volt (V). Lze si je představit jako tlak vody v trubce. Napětí je v rozvodech přítomno vždy, podobně jako je ve vodovodních trubkách tlak. Proud teče až po „otočení kohoutu“. Napětí ve střídavých obvodech kmitá a 50× za vteřinu projde maximem a 50× nulou. Stejnoseměrné napětí nekmitá, ale neustále „tlačí“ plnou silou. Proto je stejnosměrné napětí silnější než střídavé o stejné velikosti. Střídavé se ovšem mnohem lépe přenáší na větší vzdálenosti a to je důvod, proč máme rozvodnou soustavu AC.

Odpor (R) – Odpor vyjadřuje, jakou překážku představuje materiál vodiče pro průchod elektrického proudu. Fyzikální jednotkou je ohm (Ω). Kromě materiálu je odpor závislý také na teplotě, kvalitě vzájemného pospojování vodičů aj.

Výkon (P) – Vyjadřuje množství energie dodané za jednotku času. Spočítá se jako napětí $\times$ proud. Jednotkou je watt (W). Například proud 10 A při napětí 230 V dá výkon 2300 W. V podobnosti s trubkou je to množství vody, které jí proteče za konstantní čas. Tenkou hadicí může pod velkým tlakem protéct za minutu stejné množství vody jako tlustou trubkou, ve které teče voda jen samospádem. Množství energie spotřebované za jednotku času se označuje jako příkon. Zdroj energii dodává, spotřebič ji spotřebovává. Poměr mezi energií na vstupu a výstupu se nazývá účinnost. Pokud má FVE na vstupu (tzn. získává z panelů) 1000 W a na výstupu dává 900 W, je její účinnost jakožto zdroje 90 %. 100 W jsou tepelné

ztráty, vlastní spotřeba apod. Obdobně žárovka, která spotřebovává 100 W a svítí výkonem 8 W, má účinnost 8 %. Většina energie se v ní mění na teplo a jen malá část na světlo.

Frekvence (f) – Frekvence udává počet kmitů střídavého proudu nebo napětí za 1 sekundu. Jednotkou je hertz (Hz). Česká distribuční síť pracuje s frekvencí 50 Hz, tj. s 50 kmity za sekundu.

Účinník ($\cos\varphi$) – Účinník vyjadřuje, jak efektivně je elektrická energie využívána k vykonávání užitečné práce. Fyzikálně je to fázový posuv mezi střídavým proudem a napětím, tj. zda se proud za napětím opožďuje nebo ho přebíhá.

Kapacita – Rozlišujeme dvě kapacity. Výrobní kapacita je totéž, co instalovaný výkon, tj. kolik energie je zdroj schopen vyrobit za optimálních podmínek. U solárních instalací se uvádí v jednotkách watt-peak (Wp), což je jednotka maximálního (špičkového) výkonu fotovoltaiky za ideálních podmínek. Kapacita úložiště udává, kolik energie lze uložit do baterií a následně použít pro napájení. Jednotkou je watthodina (Wh) čili množství energie uložené/vydané za hodinu. Má-li baterie kapacitu 2000 Wh, znamená to, že může dávat 2000 W po dobu jedné hodiny nebo také 200 W deset hodin.

Teplota – Teplota okolního prostředí má výrazný vliv na chování, účinnost a životnost všech komponent FVE. S rostoucí teplotou stoupá vnitřní odpor součástek a klesá účinnost. Teploty pod bodem mrazu škodí bateriím, zato FV panely při nich budou naopak fungovat lépe. Jednotkou je stupeň Celsia ($^{\circ}\text{C}$).

Poznámka: 1000 V = tisíc voltů, 1000V = tisícivoltový, 4 W = čtyři watty, 4W = čtyřwattový, 20 % = dvacet procent, 20% = dvacetiprocentní.

Kapitola 1

FOTOVOLTAIKA

Úvod

Jak vlastně funguje fotovoltaika? Nebo baterie? V zásadě to nemusíte znát, stejně jako můžete spokojeně jezdit autem a nevědět, jak funguje motor. Nicméně kdo alespoň trochu rozumí základním principům a specifikům použité technologie, bude se k ní chovat lépe a nebude ji trápit nevhodným používáním. Mnoho lidí například z neznalosti ubližuje baterii ve svém mobilním telefonu a snižuje její kapacitu. Netuší, že mobil by se neměl nabíjet při teplotách vyšších než 35 °C, a když už, tak jej vždy vyndat z obalu. Nevidí nic problematického, když ho dají na celou noc do nabíječky. Nevědí, že kapacitu baterie by měli udržovat mezi 20 a 80 %, protože opakované vybíjení pod nebo nabíjení nad vede k rychlejší degradaci. Domácí FVE je zařízení mnohem komplikovanější a dražší a je třeba o ně pečovat, nevystavovat ho situacím, které mohou zkrátit jeho životnost, a nechtít po něm nemožné.

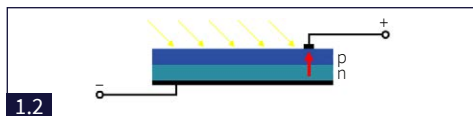
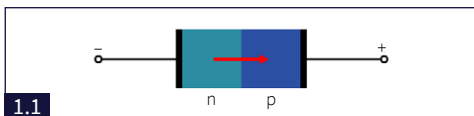
Princip konstrukce a fungování fotovoltaiky se pokusím vysvětlit co nejjednodušeji a jediný kus fyziky, který budete potřebovat, je vzorec „výkon = napětí × proud“.

Princip fungování solárních panelů

Základním stavebním prvkem je fotovoltaický neboli solární článek. První pozorování fotovoltaického jevu se datuje do roku 1876, kdy William Grylls Adams a Richard Evans Day zjistili, že selen je schopen působením dopadajícího slunečního záření produkovat slabé elektrické pole. Za teoretické vysvětlení tohoto fenoménu vdčíme Albertu Einsteinovi (1905), který za ně obdržel Nobelovu cenu a dal počáteční impuls novému vědnímu oboru a následně i celému průmyslovému odvětví. První funkční fotovoltaický článek sestrojil Charles Fritts již v roce 1883, ale až v 70. letech 20. století se monokrystalické články staly prakticky využitelnými pro výrobu elektřiny ve větším měřítku.

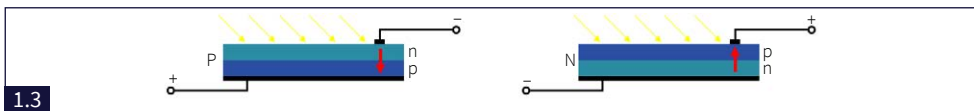
Fotovoltaický článek je vlastně velká polovodičová dioda, ve které se světlo přeměňuje na elektrickou energii pomocí fotovoltaického jevu. Skládá se jako každý polovodič z materiálu majícího přebytek elektronů (n) a z materiálu, který má elektronů nedostatek (p). V obou

případech se jedná o křemík, ale pokaždé jinak upravený. Proud je usměrněný pohyb volných elektronů z míst, kde je jich nadbytek, do míst, kde jich je málo. Může tedy téct jen jedním směrem, a to od záporného pólu ke kladnému: $n \rightarrow p$.



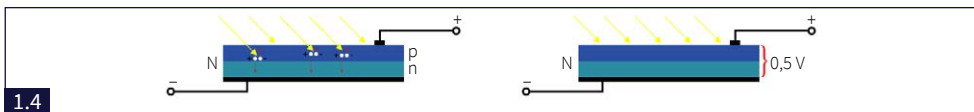
Fotovoltaický článek je sestaven tak, aby na jeho horní plochu mohlo dopadat co nejvíce světla. Proto jsou horní kontakty vedeny jako úzké proužky, zatímco vespod může jako protilehlý kontakt sloužit celá zadní strana – tzv. technologie BSF (*Back Surface Field*) – obr. 1.2.

Architektura článků se obecně dělí na dva základní typy: **N-type** a **P-type**. Články typu N (obr. 1.3 vpravo) mají křemíkový základ obohacený prvkem, který má přebytek valenčních elektronů (fosfor nebo arzen). Fosfor má o jeden elektron více než křemík, což vytváří celkový negativní náboj článku (proto typ N – *negative*). Články typu P (obr. 1.3 vlevo) mají křemíkový základ obohacený atomy s menším počtem elektronů (bor nebo galium), což vytváří celkový kladný náboj (proto typ P – *positive*).

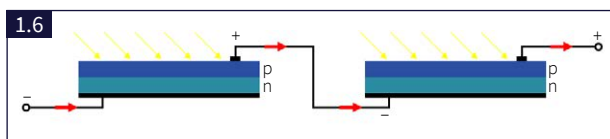
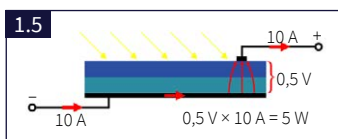


Články *N-type* se jeví jako perspektivnější. Jsou sice výrobně mírně dražší, ale pomaleji degradují, lze je vyrábět tenčí a ve vyšší čistotě bez nežádoucích příměsí. Mají lepší účinnost i teplotní odolnost. Články většiny výrobců jsou proto právě tohoto typu (HJT, TOPCon, IBC atd.). Technologii *P-type* jsou zhotovovány pouze články PERC a jediný velký výrobce, který se snaží tuto technologii dále vyvíjet, je Longi s články HJT dotovanými galiem. Další funkční popisy tak budou pro jednoduchost věnovány výhradně článkům typu N.

Podívejme se tedy podrobněji na základní principy fungování FV článku, potažmo panelu. Článek typu N pracuje zhruba takto: jakmile na fotovoltaický článek dopadá záření dostatečné intenzity (nemusí jít jen o přímý sluneční svit, ale stačí i rozptýlené světlo při zatažené obloze), elektrony v článku putují z míst, kde jich je přebytek, do míst, kde jich je nedostatek, a tím vzniká napětí (tzv. napětí naprázdno) mezi jeho přední (+) a zadní (–) stranou. Velikost tohoto napětí závisí zejména na množství dopadajícího záření a teplotě panelu, protože vyšší teplota zvyšuje odpor materiálu, což snižuje výstupní napětí.



Abychom se vyhnuli hlubší fyzice, představte si FV článek jako bombičku do sodobaru. Napětí je tlak uvnitř bombičky, a když z ní pustíme proud vody a kyslíčnicku, bude se tlak postupně snižovat, až po čase klesne na nulu a proud ustane. Obdobně se chová i baterie.

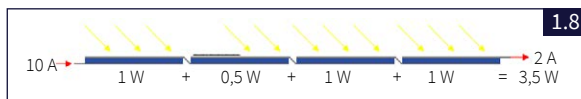
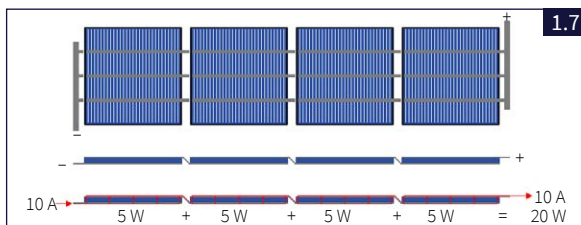


V případě FV článku však dopadající záření „bombičku“ průběžně dotlakovává a tím umožňuje nepřetržitý tok proudu po mnoho hodin.

Když na solární články dopadá záření, generuje to napětí, ale nikoli automaticky proud. Fotovoltaika vždy dodává jen tolik proudu (resp. výkonu, protože výkon = napětí × proud), kolik určí střídač, který „mačká spoušť sodobaru“. Nemá-li střídač pro všechnu vyrobenou energii využití, omezí výrobu FV tím, že sníží odebíraný proud.

Klasický křemíkový článek dává napětí $\pm 0,5 \text{ V}$,⁸ což není mnoho. Proto je panel složen z mnoha článků zapojených za sebou do série (modul) a jejich celkový počet závisí na tom, jaké má být celkové výstupní napětí panelu. Například 60 článků po $0,5 \text{ V}$ dá v součtu 30 V . Proud je v sériovém obvodu všude stejný bez ohledu na počet článků a jeho maximální hodnota, kterou jsou články schopny propustit, udává maximální výkon panelu. Bude-li pracovní proud max. 10 A , bude panel označen jako 300 Wp ($30 \text{ V} \times 10 \text{ A}$). Wp (watt-peak) je jednotka špičkového výkonu, tedy nejvyššího výkonu, který bude panel dávat při optimálních podmínkách. Jak si ukážeme dále, tento výkon bude v reálu obvykle nedosažitelný, ale mohou nastat také situace, kdy panel může vyrábět i víc, než je deklarováno. Pro domovní instalace se nejčastěji používají panely složené ze 60 nebo 72 článků, v technologii *Half-cut* (viz následující kapitolu) pak ze 120 nebo 144 článků.

V předchozích schématech byl pro přehlednost zobrazen jen jeden horní konektor. Reálné články ale mají celou řadu konektorů (*Fingers*, bílé pruhy svisle) vzájemně propojených sběrnicemi (*Busbars*, šedé pruhy vodorovně). Ty rovněž propojují FV články mezi sebou tak, že kladný konec jednoho článku je zapojen na záporný konec následujícího článku. Tok proudu v celém řetězci naznačují červené šipky. Počet a tvar sběrnic se liší podle know-how výrobce, případně podle zvolené technologie článků, jak si ukážeme dále.



Obrázek 1.8 ukazuje situaci, kdy je druhý článek zastíněn např. listem. Tím pádem na něm záření dokáže vybudit pouze malé napětí (třeba $0,25 \text{ V}$) a článek bude schopen propustit jen malý proud, např. 2 A místo 10 A při plném osvětlení. Ve fyzice platí pravidlo, že obvodem

⁸ Tato hodnota se může u jednotlivých technologií lišit. Tenkovrstvé články například dosahují až jednotek voltů.

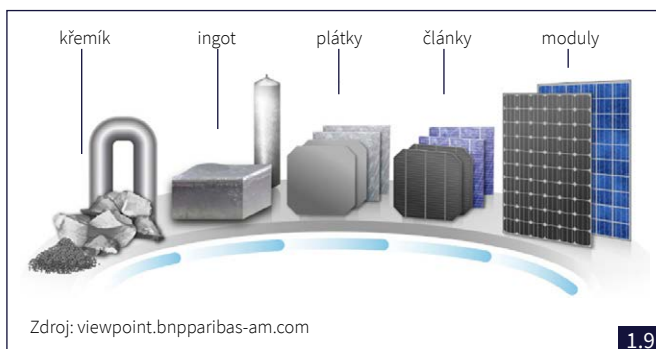
protéká jen takový proud, jaký protéká „nejužším místem“. Zastíněný článek představuje právě toto nejužší místo, a proto sérií článků budou moci protékat jen 2 A, byť zastíněn bude jen jeden jediný článek. Proto i nezastíněné články sníží výrobu ($0,5 \text{ V} \times 2 \text{ A} = 1 \text{ W}$). Aby jeden jediný zastíněný nebo vadný článek neovlivňoval chod celého panelu, bývají články zřetězeny obvykle do 2–4 modulů, vzájemně oddělených tzv. bypassovými diodami. Těm se budeme věnovat později (v kapitole 1.13).

Druhotným efektem lokálního zastínění je vznik místa s výrazně vyšší teplotou (tzv. *Hot Spot*). Zastíněné místo klade protékajícímu proudu, který jím tlačí ostatní články, vyšší odpor, čímž se část energie (až 15 W) mění na teplo, které dále ohřívá postižené místo, kterému tím dále roste vnitřní odpor.

Výroba fotovoltaických článků a sestavování panelů

Proces výroby FV článků si popíšeme na příkladu výroby monokrystalických článků, z nich se dále vyvíjely novější technologické postupy. Některé typy článků – zejména články tenkovrstvé nebo průhledné – mají proces výroby zcela odlišný.

Monokrystalické články se zhotovují tzv. Czochralského procesem, vyvinutým do současné podoby již v roce 1985. Z křemíkové taveniny o čistotě 97–99 % se pomalým otáčením při teplotě 1420 °C vytahuje ingot nebo válec o průměru 20, 30 nebo 45 cm, dvou metrech délky a hmotnosti až 400 kg. Hotový vychladlý válec tvoří jeden jediný krystal křemíku (monokrystal), který se dále řeže na plátky (*Wafers*) o tloušťce 0,3 mm. Ty se posléze napaňují za účelem obohacení o zdroj volných částic. Záporně dotovaná vrstva se obvykle obohacuje fosforem, kladně dotovaná borem nebo galiem. Z plátku se dále zkompletuje solární článek (*Solar Cell*). Zadní strana se potáhne vodivou fólií, zatímco na přední stranu se umístí vodivé pásy a antireflexní vrstva, která snižuje odrazivost povrchu a zajistí, že více záření pronikne dovnitř článku. Ve finále se ještě zdrsní povrch do podoby miniaturních pyramidek, které fungují jako pohlcovače světla a dále snižují odrazivost povrchu článku. Následně se z článků sestaví FV modul (panel).

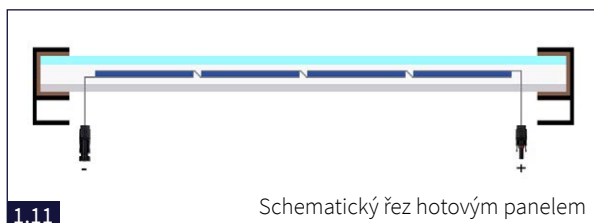


Pospojované články se oboustranně zapouzdří do fólie, která současně slouží i jako pojidlo se svrchním krycím sklem a spodní krycí vrstvou. U starších panelů je materiálem etylenvinylacetát (EVA), u novějších polymer polyetylenu nebo polypropylenu (POE), případně

kombinace EVA a POE označovaná jako EPE. Spodní stranu panelu tvoří nejčastěji polymer PVF (polyvinylfluorid – Tedlar®) nebo PVDF (polyvinylidenfluorid – Kynar®), případně plasty, KPX, THV, ETFE, ECTFE, TPE, PTFE (teflon), u nekvalitních panelů PET, u dražších pak opět sklo. Oboustranné panely mají sklo vždy z obou stran. Panely sklo-sklo jsou sice těžší, zato pevnější, odolnější a prakticky nehořlavé. Výsledný sendvič je pak vsazen do hliníkového rámu a zatěsněn silikonem, aby zejména do zapouzdření nemohla vnikat vlhkost a nedocházelo k jeho degradaci. Kontakty jsou přivedeny na zadní stranu do tzv. *junction boxu*, kde jsou propojeny obtokovými diodami a vyvedeny na konektory.



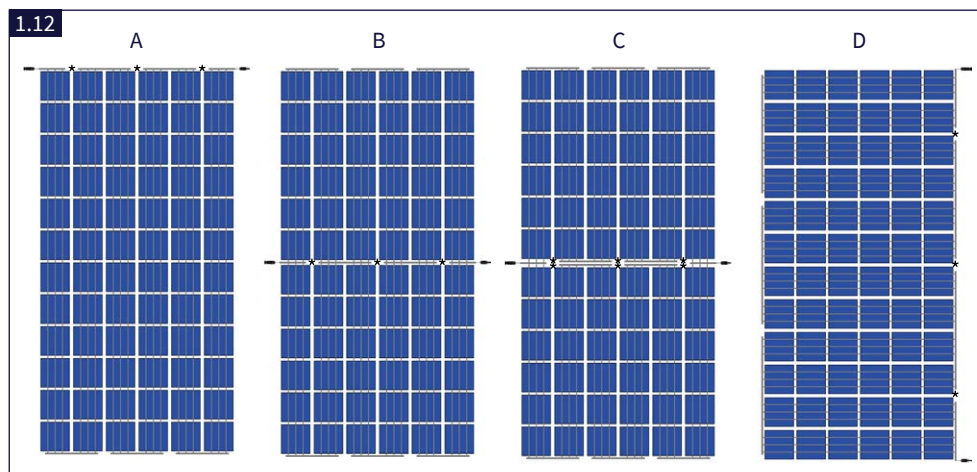
1.10



1.11

Klasický FV panel váží asi 20–30 kg podle velikosti, z čehož je 70–75 % sklo, 7–8 % plasty, 7–8 % hliník, okolo 5 % mědi, 2–3 % křemíku a 3–4 % připadají na konektory, diody a těsnění. Na výrobu vodivé pasty pro přilepení sběrnic se používá stříbro, kterého může být v panelu až 20 gramů a jehož cena může tvořit až 10 % ceny celého panelu.

Články se v modulu zapojují do série za sebe. Na obr. 1.12 jsou čtyři základní způsoby, jak sestavit modul ze 72 článků. Do míst označených * se posléze umístí bypassevé diody (viz část



1.12

Vliv zastínění na str. 51). Konkrétní zapojení vždy závisí na počtu článků a na použité technologii.

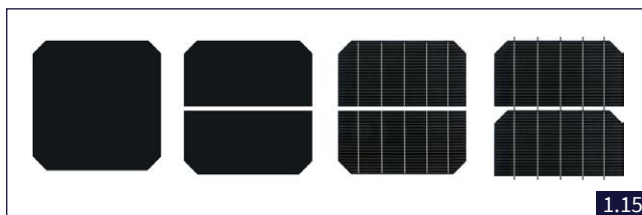
Mimo toto klasické schéma existuje řada typů panelů složených jiným způsobem. Bezrámové panely mají například celou konstrukci skrytou pod povrchem, a nemají tedy vnější rám, o který by se zachytávaly nečistoty. Další velkou skupinou jsou tenkovrstvé ohebné flexi panely, které nepotřebují ochranné sklo a na tloušťku měří jen několik milimetrů. Také nepotřebují žádné zpevnění, protože se celou svou plochou lepí k podkladu. Solární moduly lze vkládat i do oken, fasádních panelů nebo střešních tašek, jak si ukážeme dále.



Technologie **MBB** (*Multi-Busbar*) je variantní způsob kompletace solárního článku, který využívá většího počtu sběrnic kulatého průřezu (označovaných jako 9BB–15BB) namísto menšího počtu plochých pásků (4BB a 5BB). Kruhové vodiče zastiňují menší plochu a současně odrážejí část světla do stran (pásky jej odrážejí kolmo zpět), čímž zvyšují pravděpodobnost jeho využití v článku. Technologie SMBB (*Super Multi-Busbar*) využívá 16 nebo více sběrnic, zatímco technologie označovaná jako 0BB (*Zero Busbar*) nemá na čelní ploše sběrnice žádné – viz dále technologii *Back Contact*.



V roce 2014 přišla společnost REC Solar s technologií **Half-cut** (rozříznutý napůl) a dnes se takto vyrábí valná většina FV panelů. Starší typy panelů jsou složeny z 60 nebo 72 čtvercových článků, zatímco novější panely jsou složeny ze 120 nebo 144 obdélných článků poloviční velikosti. Díky snížení odporových ztrát je takto dosahováno přibližně o 1 % vyšší produkce energie a poloviční články jsou také odolnější na ohyb, čímž se snižuje riziko jejich prasknutí. Mezi více článků se také snáze rozprostře teplo produkované jedním poškozeným článkem. Negativem je větší počet spojů mezi články a z toho plynoucí vyšší riziko jejich poškození.



Poznámka: Na internetu je rozšířen mýtus, že Half-cut panely jsou rozděleny na horní a dolní polovinu, a jsou proto odolnější vůči zastínění. Byť to tak skutečně vypadá, není tomu vždy tak. Nejsou-li panely osazeny potřebnými šesti bypassovými diodami, ale pouze třemi, jsou pořád rozděleny jen na tři svislé elektrické okruhy jako u klasických panelů.

V omezené míře se lze na trhu setkat také s panely zhotovenými technikou **Triple-cut**, která dělí články na tři části. Panely mají díky tomu ještě o něco lepší vlastnosti (obr. 1.16).

Tenké spoje mezi články jsou nejchoulostivější částí panelu, neboť jsou náchylné k prasknutí. Jednou z vývojových cest je snaha o jejich zkrácení (např. *Back Contact*), jinou snaha o jejich úplné odstranění.

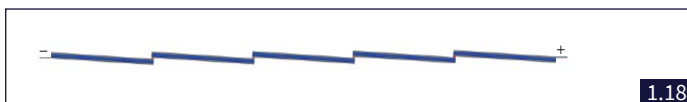
Podstatou technologie **Shingle** (šindel, obr. 1.17, 1.18), která se někdy aplikuje na panely PERC, TOPCon a HJT, je rozřezání článku na 5 nebo 6 pásků, které se následně seskládají tak, aby se částečně překrývaly jako šindele na střeše. Pásky se spojují pomocí elektricky vodivého lepidla ECA na bázi stříbra a tímto způsobem lze na panel umístit přibližně o 5 % více aktivní plochy. Panely mají vyšší odolnost i efektivitu, ale jsou výrazně dražší.



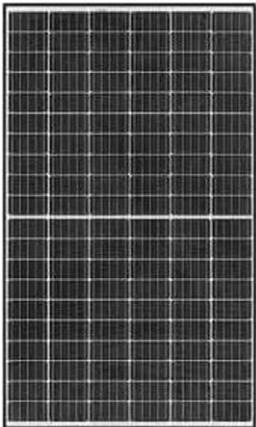
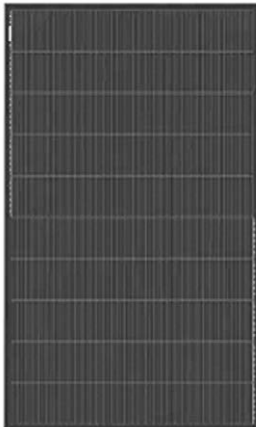
1.16



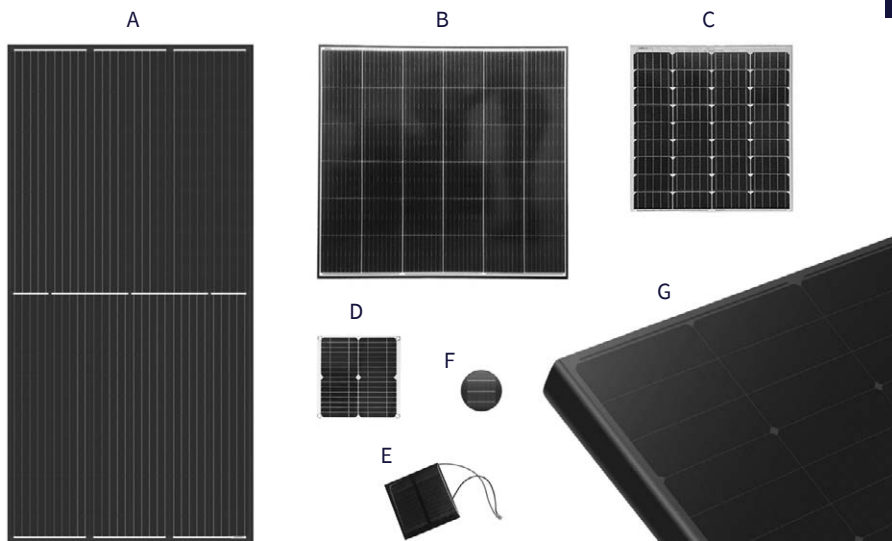
1.17



1.18

A	B	C
		
Tři panely složené z článků technologie PERC A Zhotoven klasickou technologií (60 článků), účinnost 17–19 % B <i>Half-cut</i> (120 článků), účinnost 18–20 % C <i>Shingled</i>, tzn. sestaven technologií <i>Shingle</i> (320 článků), účinnost až 22 %		

1.19



- A** Na panelu Amerisolar 410Wp AS-6M-HC BLACK jsou dobře vidět sběrnice (5BB) a tím i způsob, jakým jsou články zapojeny do série
- B** Čtvercový panel Voltech SP200MSB 200W, vhodný pro karavany, vozidla nebo menší statické instalace, 36 článků, zapojení 9BB, rozměry asi 1×1 m, 12,5 kg
- C** Panel Coulee CLM-070M-36 o výkonu 70 W složený ze 36 článků poloviční velikosti, zapojení 5BB, 66×65 cm, 5,2 kg
- D** Nimomo 93c5s2x6 40 W, 4 články vložené mezi dvě vrstvy skla, 28×28 cm, 577 g
- E** Minipanel pro kutilské aplikace (5 V, 100 mAh), 16×16 cm, 50 g
- F** Kulatý minipanel (6 V, 80 mAh), průměr 8 cm, 50 g
- G** Detail bezrámového panelu DAH SOLAR DHM-T56X10/FS(BB) zhotoveného technikou *Triple-cut*

Technologie fotovoltaických článků

Technologie FV článků se neustále vyvíjejí jak s ohledem na zlepšování vlastností, tak zejména s cílem ušetřit materiál nebo vyrábět panely rychleji či efektivněji. Mírné zlepšení parametrů nové generace je obvykle marketingově halasně prezentováno, zatímco o schopnosti továren chrlít větší množství panelů při nižších nákladech se obvykle taktně mlčí. Obojí však má pro uživatele pozitivní efekt v podobě vyšší efektivity panelů i poklesu jejich cen.

Pro představu: výrobní linky pro články vyráběné technologií HJT stojí dvojnásobnou částku co linky pro PERC nebo TOPCon, navíc musejí být postaveny jako zcela nové, protože je nelze přestavět z původních linek vyrábějících starší technologie. Investice se však přesto bohatě vyplácí, protože oproti 10–12 výrobním krokům u technologií PERC a TOPCon klesl u technologie HJT počet kroků na 4–7, což umožňuje za stejný čas produkci bezmála zdvojnásobit.

Technologie PERC se zase rozšířila zejména proto, že výrobní proces zlepšující parametry původních polykrystalických článků bylo možno snadno a levně zabudovat do stávajících výrobních linek. Jiné, a třeba i o trochu lepší technologie, jejichž implementace vycházela drahé, se komerčního nasazení nedočkaly a upadly v zapomnění.

Aktuálně lze rozlišit již pět generací technologií solárních článků.

Jako **první generace** jsou označovány konvenční články z krystalického křemíku.

Monokrystalické články

Monokrystalické články jsou základním typem solárních článků. Laboratorně byly zhotovovány již v 19. století, ale komerčně se začaly využívat zhruba od poloviny 70. let 20. století. Postup jejich výroby byl popsán výše. Mají černou barvu a tloušťku okolo 0,3 mm.



Polykrystalické články

Při výrobě monokrystalických článků vzniká velké množství odpadního křemíku, které lze později výhodně použít k výrobě polykrystalických článků tvořených ne jedním, ale spoustou malých krystalů s různou prostorovou orientací. Proces výroby je jednodušší, energeticky méně náročný, a tudíž levnější. Spočívá v odlévání bloků křemíku o rozměrech 40 × 40 × 30 cm a jejich následném rozřezání na destičky, při němž vzniká jen malé množství odpadu. Polykrystalické solární panely jsou sice méně výkonné než monokrystalické, zato jsou levnější. Články jsou charakteristické mozaikovitým povrchem a modrou barvou.



Druhou generací jsou tenkovrstvé technologie solárních článků využívajících polovodičové materiály, které dokážou na 100× tenčí vrstvě než v konvenčních solárních článcích absorbovat až 90 % dopadajícího záření. Vrstva silná 0,003–0,008 mm pohltí stejné množství slunečního záření jako 0,3mm vrstva krystalického křemíku. Vyrábějí se nanášením jedné nebo více tenkých vrstev fotovoltaického materiálu na základ tvořený sklem, plastem nebo kovem, což vyžaduje méně energie než tavení velkého množství materiálu pro konvenční články. Na bázi plastu vznikají ohebné FV fólie, umístěním mezi dvě vrstvy skla pak pevné FV panely. Oproti křemíkovým mají tenkovrstvé články zcela jinou strukturu. Mají tvar centimetr širokých proužků, pracují s vyšším napětím a menším proudem a nemají přední kovové kontakty. Jejich úlohu plní průsvitná vodivá vrstva TCO (*Transparent Conductive Oxide*) z oxidu zinečnatého, cíníčitého nebo indiumcíníčitého. Technologie CdTe a CIS však vykazují kratší provozní životnost (15–20 let oproti běžným 25–30 roků), vyšší rychlost degradace a obecně nižší účinnost než křemíkové články první generace, což spolu s dalšími problémy s použitím kadmia a india nedovolilo ani přes některé ideální vlastnosti větší rozšíření těchto technologií. Vítěznou technologií se stal amorfnní křemík, jehož kombinace s monokrystalickým křemíkem dala následně vzniknout třetí generaci FV článků. Celosvětově zůstává

tržní podíl tenkovrstvých článků okolo 5 % (údaj z roku 2023), pouze ve Spojených státech si technologie CdTe získala větší oblibu – v roce 2022 téměř 30 %. V ČR se s nimi setkáme jen zřídka ve speciálních aplikacích, jako jsou velkoplošná designová prosklení s vloženými FV články, FV fólie, nebo v přístrojích na solární pohon.

Technologie CdTe

V technologii CdTe (*Cadmium Telluride*) se na vrstvičku molybdenu nanáší telurid kadmia, který je však jedovatý, což představuje hlavní slabinu technologie. Výhodou je velmi rychlá, energeticky nejméně náročná,⁹ a tudíž relativně levná výroba. Články mají tloušťku 0,008 mm (bez podkladu) a jsou černé nebo velmi tmavě zelené. Tržní podíl okolo 4 %.

Technologie CIS

Technologie CIS nebo CIGS (*Copper Indium Gallium Selenide*) používá místo křemíku diselenid mědi india a galia. Úskalím technologie je podstatně dražší výroba a omezené zásoby india, takže tržní podíl se pohybuje pouze okolo 1 % ve speciálních aplikacích. Články mají tloušťku 0,003 mm (bez podkladu) a jsou černé.



Technologie GaAs

Technologie GaAs (*Gallium Arsenide*), založená na arsenidu galia, má sice mnohé vynikající parametry, ale kvůli násobně vyšší ceně je využívána zejména v kosmonautice a v komerční praxi se s ní nesetkáme.

Technologie amorfního tenkovrstvého křemíku

Amorfní křemík (a-Si) je nekystalická forma křemíku, která má zejména ve variantě obohacené vodíkem (a-Si:H) několik velmi perspektivních vlastností – např. k jejímu nanášení stačí teplota pouhých 75 °C, zatímco krystalický křemík je nutno tavit při teplotách přes 1400 °C. Technologie byla poprvé použita již koncem 70. let 20. století v kalkulačkách na solární pohon. Ze všech tenkovrstvých technologií sice vykazuje nejmenší účinnost, takže se šířeji neprosadila, ale ve třetí generaci tzv. heterogenních článků došla značného uplatnění její schopnost nechat vyladit jednotlivé tenké vrstvy tak, aby každá fungovala co nejlépe při určité frekvenci záření.



Třetí generaci představují technologie pracující s dvojím průchodem záření skrze křemíkové vrstvy (tam a odrazem zpět) s cílem dále zvyšovat efektivitu využití dopadajícího záření.

⁹ Oproti výrobě monokrystalických článků vyžadují jen asi 23 % energie, zatímco CIS 40 % a polykrystalické 59 %.

Technologie PERC

Technologie PERC (*Passivated Emitter Rear Cell*) je založena na mono- nebo polykrystalických článcích typu P. Hlavním vylepšením je pasivační hliníková vrstva přidaná na zadní stranu článku. Ta jednak pomáhá zlepšit jeho fyzikální vlastnosti a zabraňuje úniku elektronů z křemíku do kovu zadního kontaktu, ale hlavně umožňuje, aby se záření, které článkem projde bez účinku, odrazilo zpět a dostalo druhou šanci. To vše zvyšuje celkovou účinnost. Technologie PERC vytlačila tradiční mono- a polykrystalické články, protože panely PERC dokážou vyrábět o 3–5 % více energie při stejné ceně, jelikož pro jejich výrobu je potřeba jen menší úprava stávajících výrobních procesů. Nevýhodou je trochu vyšší citlivost na zastínění.



Existuje řada dílčích vylepšení této technologie. Všechny se však přes nesporné kvality významněji nerozšířily a do výroby je zavedl třeba jen jediný výrobce. Například technologie PERT (*Passivated Emitter Rear Totally Diffused*) je pokusem, jak překonat limity účinnosti technologie PERC. Difuzní zadní strana je pasivována vrstvou oxidu hlinitého a přední povrch je chráněn antireflexní vrstvou nitridu křemíku. Tato architektura vede k vyšší účinnosti a lze ji přizpůsobit pro monofaciální i bifaciální¹⁰ aplikace. Technologie PERL (*Passivated Emitter, Rear Locally-Diffused*) je vylepšením předchozí. Využívá přesnou mikrotechniku k výrobě bifaciálních článků, kdy je zadní strana lokálně difuzována pouze u kovových kontaktů, aby se dále o trochu vylepšily fyzikální vlastnosti a zároveň zachoval dobrý elektrický kontakt. Dalšími variantami jsou např. technologie MS-PERC (*mechanically scribed PERC*), MINP (*metal-insulator n/p*) nebo PESC (*passivated emitter solar cell*).

Technologie TOPCon

TOPCon (*Tunnel Oxide Passivated Contact*) je technologie kombinující výhody PERC a HJT, ale založená na článcích typu N. Podobně jako PERC využívá tenkou vrstvu oxidu k pasivaci kontaktů na zadní straně článku mající za účel využitím tzv. tunelového efektu zvýšit účinnost minimalizací energetických ztrát způsobených vnitřním odporem. Články také díky dalším vrstvám zvládají vyšší pracovní napětí. Z technologie HJT přejala systém tenkých vrstev amorfního křemíku, což zlepšuje parametry zejména při slabém osvitu. Solární články TOPCon lze opět vyrábět na stejných strojích jako solární články typu P, ale je k tomu potřeba více materiálu, energie a výrobních kroků. Oproti článkům PERC mají články TOPCon vyšší účinnost, vyšší teplotní odolnost a pomalejší proces stárnutí. Nevýhodou technologie je značná citlivost na nečistoty v použitých materiálech, což může vést ke snížení účinnosti nebo i k poruchám a selháním. Články jsou vzhledově stejné jako články PERC.

¹⁰ Jednostranné a oboustranné.

Technologie HJT

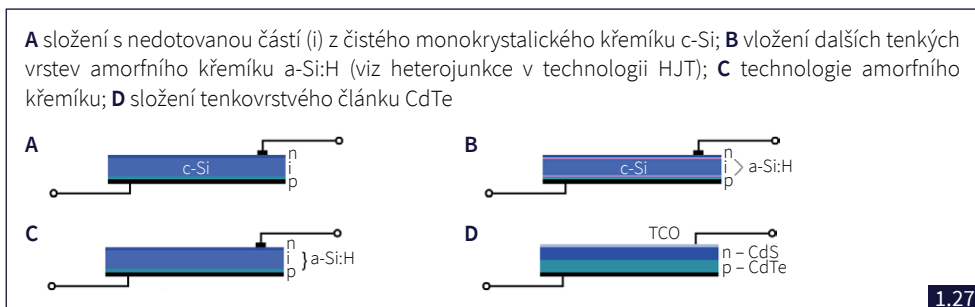
HJT¹¹ (*Heterojunction Technology*) představuje další krok vpřed. Jde opět o klasické monokrystalické články typu N, stejně jako u technologie TOPCon, zde ale vzniklé spojením dvou tenkých vrstev amorfního křemíku a jedné silné vrstvy krystalického křemíku. První vrstva amorfního křemíku zachycuje sluneční záření shora i odražené zdola. Střední vrstva z monokrystalického křemíku je zodpovědná za přeměnu většiny slunečního záření na elektřinu. Poslední vrstvou je opět tenká vrstva amorfního křemíku, která zachycuje zbývající fotony, které prošly předchozími dvěma vrstvami. Články HJT mají opět o něco vyšší účinnost a vyšší teplotní odolnost než předchozí typy a skvěle se hodí pro výrobu bifaciálních panelů. Nevýhodou je jistá citlivost na vlhkost a poměrná křehkost, což klade vyšší nároky na správný návrh nosné konstrukce. Přestože je technologie HJT vydávána za novinku roku 2023, první pokusy o komercializaci spadají do roku 2003, kdy její starší verzi, označovanou jako HIT, zkoušela na trhu prosadit firma Sanyo.



Poznámka: Pojmem *heterojunction* (spojení různého) se označuje spojení různých materiálů nebo stejných materiálů, ale s různou krystalickou strukturou. To je např. HJT článek, kombinující krystalický a amorfní křemík. *Homojunction* (spojení stejného) je spojení stejných materiálů se stejnou krystalickou strukturou, ale odlišnými vlastnostmi, což je např. klasický křemíkový článek složený ze dvou vrstev křemíku (p-vrstva a n-vrstva).

Poznámka: Koluje mýtus, že panely HJT jsou automaticky vždy bifaciální, což vzniklo špatným pochopením formulace „mají přirozenou bifacialitu“. Ano, články jsou vždy schopny zužít světlo letící oběma směry, ale záleží na tom, jak je panel zkonstruován. Pokud je panel vyroben klasicky s plnou zadní stěnou, horní amorfni vrstva může zužít světlo pouze záření odražené zpět od zadní vrstvy. Je-li vyroben s průsvitnou zadní stranou, chová se panel skutečně jako bifaciální a obě amorfni vrstvy zužít světlo přicházející zepředu i zezadu.

Jen pro dokreslení přidávám několik schémat složení FV článků uvedených výše.



11 Někdy je označována také jako SHJ (*Silicon Heterojunctions*) nebo HIT (*Heterojunction with Intrinsic Thin Layer*).

Technologie Back Contact

V roce 2023 se na trhu objevily panely **čtvrté generace**, konstruované technologií *Back Contact*, konkrétně technologie **ABC** (*All Back Contact*) od firmy Aiko, **IBC** (*Interdigitated Back Contact*) od Sunpower nebo **HPBC** (*Hybrid Passivated Back Contact*) od LONGi Solar, byť první pokus uvést tuto technologii na trh byl učiněn již v roce 2004 firmou SunPower. Trvalo ovšem skoro 20 let, než se povedlo technologii výroby zvládnout natolik, aby byla ekonomicky konkurenceschopná. Zatímco PERC, TOPcon a HJT jsou vylepšeními původních mono- a polykrystalických článků, technologie *Back Contact* představuje zcela novou architekturu přinášející nejen další zlepšení parametrů (vyšší účinnost, nižší vliv teploty aj.), ale také zcela nové efekty. Umístění všech kontaktů na zadní straně má oproti starším typům s kontakty na obou stranách řadu předností:

- přední strana není stíněna kontakty a panel může využít více dopadajícího záření;
- panel má mírně lepší odolnost vůči přehřívání;
- panel má výrazně lepší schopnost pracovat i při zastínění některých článků, aniž by docházelo k výraznému ovlivňování výkonu článků sousedních.

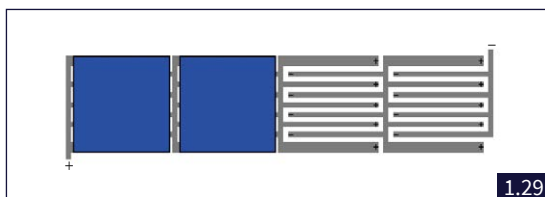
Články jsou v panelu spojeny do série opět principem + na –, ovšem v jedné ploše (obr. 1.29).

Snaha odstranit z povrchu článků veškeré stínící prvky šla nejprve cestou provrtání článku laserem a stažením vrchní vodivé vrstvy na zadní stranu. Na přední straně tak zůstaly pouze tenké příčné sběrače (*Fingers*), zatímco široké spojnice (*Busbars*) běžely po zadní straně (obr. 1.30A). Dalším krokem bylo přivedení svrchní vrstvy skrz provrtání rovnou na zadní kontakty (obr. 1.30B, C). Posléze se přišlo na to, že při vhodném uspořádání si volné částice najdou cestu na kontakty i bez nutnosti článek provrtávat (obr. 1.30D). Aktuálně nejpokročilejší stadium zadních kontaktů – technologie ABC (obr. 1.30E).

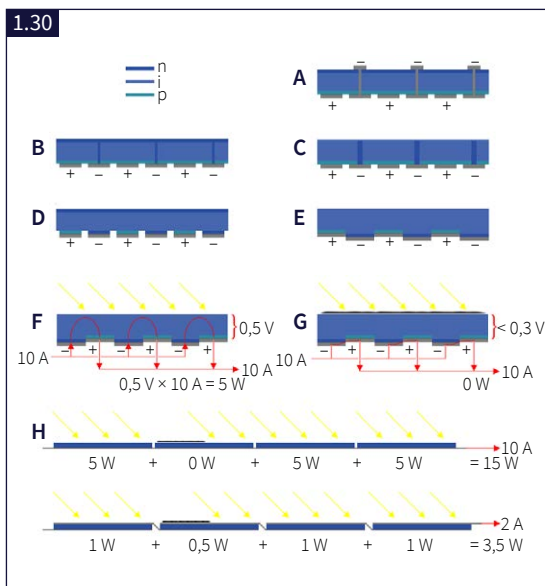
Princip fungování: Proud teče ve směru červených šipek a články generuje



1.28

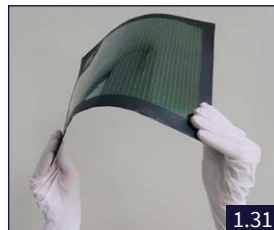


1.29



výkon tak, jak je uvedeno na obr. 1.30F. Když při zastínění článku klesne napětí pod 0,3 V, proud samovolně zvolí snazší cestu přímo z kontaktu – na kontakt + a článek se v tu chvíli přestane chovat jako generátor, ale jako pouhý vodič (obr. 1.30G). To má ten efekt, že i přes zastíněný článek může téct proud v nezmenšené míře. Tím neovlivňuje své sousedy, kteří mohou vyrábět nadále plným výkonem 5 W ($0,5 \text{ V} \times 10 \text{ A}$). Na obr. 1.30H je srovnání s klasickou technologií kontaktů na obou stranách (dole), kde zastíněný článek propustí pouze 2 A. Úměrně tomu dá výkon 0,5 W ($0,25 \text{ V} \times 2 \text{ A}$), což silně ovlivní výrobu jeho sousedů zapojených v sérii, kteří dají jen 1 W ($0,5 \text{ V} \times 2 \text{ A}$), protože platí fyzikální zákon, že obvodem protéká všude stejný proud a ten je dán „nejužším místem“.

Pátou generací budou pravděpodobně tenkovrstvé **perovskitové¹² solární články**, jejichž vývoj intenzivně probíhá s cílem dosáhnout vyšších účinností, než dovoluje klasická křemíková technologie. Články v laboratořích vykazují účinnost okolo 30 % a je možné je tisknout přímo na vhodný podklad. Fyzikálním limitem je 33,7 %, ale kladením aktivních vrstev na sebe lze dosáhnout účinností ještě vyšších – až 38,8 % u článků se čtyřmi vrstvami. Slibná je i vysoká schopnost produkovat energii za horších světelných podmínek.



Úskalím technologie je prozatím extrémní míra degradace a s ní spojeného poklesu výkonu (asi 200 dní oproti desítkám let u křemíku) a také olovo přítomné v nejnadějnějším typu perovskitu – methylamoniumtrihalogenidu olovnatém. Příčina rychlé degradace již byla odhalena a pracuje se také na nahrazení olova cínem, byť aktuálně za cenu nižší účinnosti.

Transparentní články

Od roku 2014 probíhal na Michigan State University a v Massachusetts Institute of Technology výzkum, jak vyrobit dokonale transparentní solární články, které by bylo možné instalovat přímo do okenních skel při zachování jejich plné průhlednosti, což by byla malá revoluce. Elektřinu by bylo možné generovat přímo z oken a skel – nejen v budovách, ale třeba i ze střešního okna automobilu, nebo dokonce i z displeje chytrého telefonu. V roce 2020 bylo dosaženo úspěchu a podařilo se sestavit články s účinností okolo 10 %. Jak to funguje?

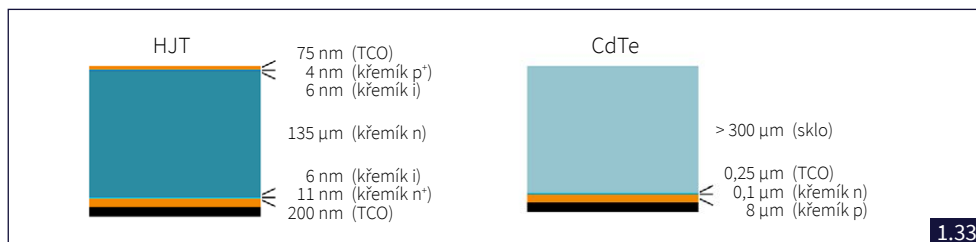
Článek obsahuje transparentní luminiscenční solární koncentrátor (TLSC) z organických solí, které absorbují jen určité vlnové délky ultrafialového a infračerveného světla, zatímco viditelné světlo propouští. Absorbovaná část spektra je sváděna k okrajům okenní tabule, kde ji tenké proužky solárních článků přeměňují na elektřinu. O převedení do komerční praxe se snaží kalifornská společnost Ubiquitous Energy, která ve spolupráci s předním výrobcem skla NSG Group vyvíjí technologii ClearView Power, což je průhledný solární povlak s účinností 9,8 %, který lze aplikovat přímo na sklo v průběhu výroby okna.



¹² Třída syntetických materiálů s krystalovou strukturou podobnou minerálu zvanému perovskit (CaTiO_3).

Z jednoho metru čtverečního tak lze v současnosti získávat asi 30 W elektřiny. To spolu s vysokými výrobními náklady a nedořešenou legislativou ohledně bezpečnosti a stavebních předpisů činí tuto slibnou technologii prozatím nepoužitelnou v běžné praxi.

Tloušťky solárních článků se liší podle typu. Monokrystalické články mají obvykle tloušťku 150–200 μm , polykrystalické 180–300 μm .¹³ S ohledem na účinnost je sice optimální tloušťka okolo 100 μm , ale z praktických důvodů (výroba, manipulace, odolnost) se běžně zhotovují silnější. V posledních letech ovšem sílí trend články spíše ztenčovat s cílem snížit náklady na materiál. Další technologie: PERC 150–180 μm , TOPCon 130–150 μm , HJT 110–150 μm , tenkovrstvé CdTe > 8 μm .

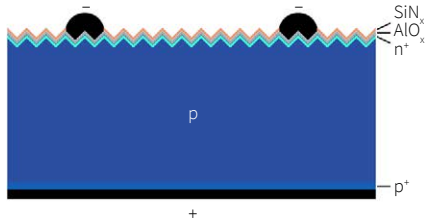


Poznámka: Povšimněte si, že všechny vrstvy nanášené na základní křemíkovou bázi mají tloušťku v nanometrech, tedy 1000× menší než mikrometr. Ve schématech proto nelze dodržet vzájemné poměry, které se navíc liší podle výrobců, použité technologie výroby, výrobní tolerance apod.

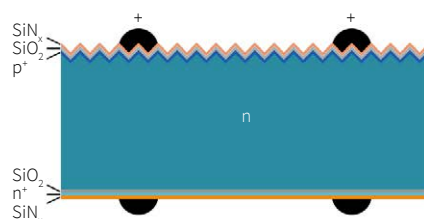
Na závěr kapitoly ještě z desítek různých variant vybírám sedm příkladů reálného složení FV článků (obr. 1.34). Osvitové strany jsou tvarovány tak, aby zachytávaly co nejvíce světla, a potaženy antireflexní vrstvou nitridu křemíku (SiN_x). Bifaciální článek má osvitové obě strany. Zadní strany jsou (s výjimkou základního BSF) pasivovány vrstvou oxidu hlinitého (Al_2O_3) nebo křemičitého (SiO_2). Vrstva TCO (*Transparent Conductive Oxide*) je průsvitný materiál, který propouští světlo a současně je elektricky vodivý. Tenký film TCO funguje jako elektroda odvádějící vygenerovanou elektřinu z článku. Nejčastějšími materiály používanými v solárních aplikacích jsou oxid india a cínu (ITO), oxid cínu dopovaný fluorem (FTO) a oxid zinečnatý dopovaný hliníkem (AZO).

13 Pro srovnání – tloušťka běžného lidského vlasu bývá 50 až 120 μm , nejčastěji kolem 100 μm .

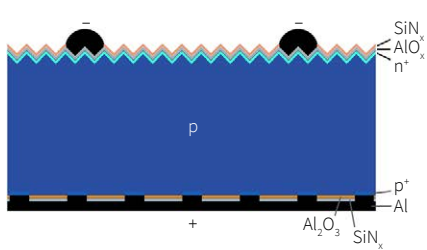
BSF



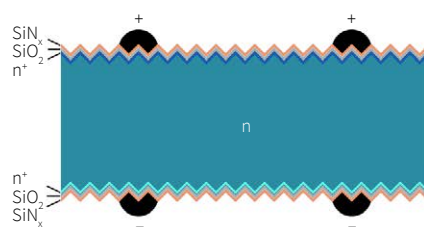
TOPCon



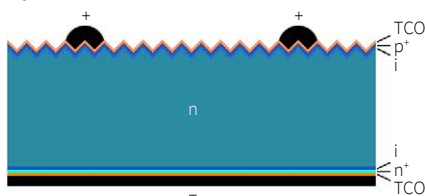
PERC



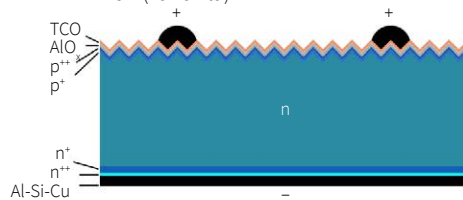
TOPCon bifaciální



HJT



HJT (varianta)



IBC

