

Sólarhlöð: Grunnhugtök og uppbygging

Jón Tómas Guðmundsson^{a,b}

^aRafmagns- og tölvuverkfræðideild, Háskóli Íslands, ^bRaunvísindastofnun Háskólans

Vefútgáfa: 03. nóvember 2008

Ágrip – Með sólarhlaði (e. solar cell) má framkalla rafstraum úr sólarljósi. Sólarhlöð eru framleidd úr hálfleiðandi efnum. Hálfleiðarinn er íbættur þannig að samskeyti eru mynduð á milli holu- (p-leiðandi) og rafeindaleiðandi (n-leiðandi) hálfleiðara. Hér er farið er yfir grunnuppbyggingu sólarhlaða, hönnun og rafeiginleika. Helstu kennistærðir sólarhlaða eru skilgreindar og þær bornar saman fyrir nokkrar gerðir sólarhlaða. Algengast er að sólarhlöð séu framleidd úr einkristalla, fjölkristalla eða myndlausum kísli (Si). Sólarhlöð úr samsettum III-V hálfleiðurum eru í stöðugri þróun og fjölskeytasólarhlöð (með nokkrum samskeytum) hafa sýnt háa nýtni, en eru dýr í framleiðslu. Sólarhlöð úr hálfleiðandi fjölliðum gefa vonir um að hægt sé að framleiða ódýr sólarhlöð með hefðbundinni prenttækni, en ennþá er nýtni þeirra þó fremur lítil.

1. Inngangur

Raforkuframleiðsla með sólarhlöðum hefur vaxið stöðugt undanfarna fimm áratugi. Sólarhlöð hafa náð verulegri útbreiðslu sem afgangur á afskekktum stöðum t.d. til að knýja fjarskipta- og veðurstöðvar og gervitungl. Þá eru sólarhlöð mikið notuð í smáum raftækjum eins og úrum og reiknivélum. En stærstur hluti sólarhlaða-framleiðslu fer í stórsæa raforkuframleiðslu í orkuverum eða utan á byggingum, eins og sjá má á mynd 1. Sólarhlöð eru framleidd úr hálfleiðurum, einkum kísli, sem getur verið einkristalla, fjölkristalla eða myndlaus. Sólarhlöð eru einnig framleidd úr þunnum kísilhúðum, eða húðum úr CdTe eða CuInSe₂ (CIGS). Til að bæta nýtni hafa samsettir III-V hálfleiðarar verið notaðir í sólarhlöð og til þess að lækka framleiðslukostnað er verið að rannsaka hálfleiðandi fjölliður. Þó mikill vöxtur hafi verið í notkun einkristalla kísils hefur mestur vöxtur verið í notkun fjölkristalla kísils undanfarin ár. Yfir 90 % sólarhlaða eru úr kísli, 38 % allra sólarhlaða eru úr einkristalla kísli, 49 % úr fjölkristalla kísli og 4 % úr myndlausum kísilhúðum (Miles et al., 2007). Til að raforkuframleiðsla úr sólargæslun verði samkeppnisfær við aðra raforkuframleiðslu, þarf að lækka framleiðslukostnað niður í 1 US \$ /Watt ef miðað er við uppsett afl og 20 ára afskriftatíma. Enn er kostnaður við framleiðslu á einkristalla og fjölkristalla kísli



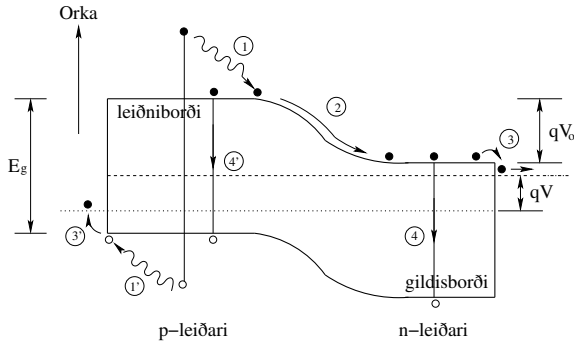
Mynd 1. Stærstur hluti framleiðslu á sólarhlöðum fer í raforkuframleiðslu í orkuverum eða utan á byggingum. Hér hefur sólarhlöðum verið komið fyrir á þaki íbúðarhúss í útverfi Dresden í Þýskalandi.

ríflega fjórföld þessi upphæð. Líklegt er að þessu marki verði náð með þunnhúðartækni á stórum skala.

Hér verður lýst hvernig sólarhlöð breyta sólarljósi í rafstraum. Fyrst verður grunnuppbygging, hönnun og virkni sólarhlaða skoðuð. Þá verður fjallað um nokkrar mismunandi gerðir sólarhlaða, efni sem sólarhlöð hafa verið byggð úr og framleiðsluaðferðir.

2. Samskeyti p- og n-hálfleiðara

Hálfleiðarar eru sagðir n-leiðandi þegar rafstraumur um þá er borinn af rafeindum, sem þá eru ríkjandi



Mynd 2. Orkuborðar og orkutap á skeytum sólarhlaðs. Orkutap fyrir rafeinda-holu þar er samsætt úr (1) varmatapi sem kemur fram sem titringur grindar, (2) tapi á samskeytum, (3) tapi við snertu, og (4) samrunatapi. Orkuna E_g þarf til að brúa orkugeilina. Fermiorkustig rafeinda í n-leiðandi hálfleiðaranum er táknað með brotinni línu og Fermiorkustig hola í p-leiðandi hálfleiðaranum er táknað með punktalínu.

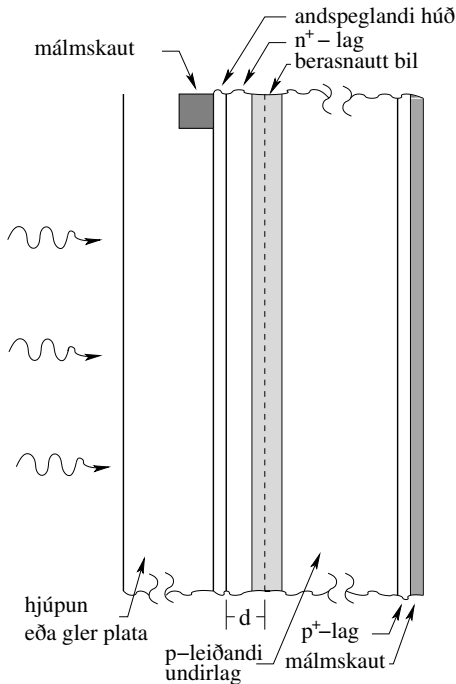
berar og holur víkjandi berar. Í p-leiðandi hálfleiðara er rafstraumur borinn af holum, sem eru ríkjandi berar og rafeindir eru víkjandi berar. Í hálfleiðara er orkugeil á milli gildisborða og leiðniborða. Orkan sem þarf til að brúa orkugeilina er táknað með E_g . Fyrir kísil við stofuhita er orkugeilin 1.12 eV.

Leiðni hálfleiðara má breyta með íbætingu. Með íbætingu má stilla nákvæmlega af fjölda rafeinda í leiðniborða og/eða fjölda hola í gildisborða. Rafgjafaíbót getur gefið frá sér rafeind í leiðniborðann og hálfleiðarinn verður þá n-leiðari. Rafþegaíbót þiggur rafeind úr gildisborðanum og skilur eftir sig holu þar og er þá p-leiðari. Kísill er í lotu IV í lotukerfinu. Íbót úr lotu III (bór, gallín eða indín) eru rafþegar í kísli og íbót úr lotu V (fosfór, arsen, eða antímon) eru rafgjafar í kísli. Þegar p- og n-leiðandi hálfleiðurum er skeytt saman sveima holur frá p-hliðinni yfir til n-hliðarinnar og rafeindir sveima frá n-leiðara til p-leiðara. Holur skilja eftir sig jónaða rafþega og rafeindir jónaða rafgjafa. Á samskeytum p- og n-leiðandi hálfleiðara myndast því svæði með jónuðum rafgjöfum og rafþegum en sneytt frjálsum hleðsluberum, berasnaða bilið. Þessar föstu hleðslur mynda rafsvið á skeytunum, sem aftur veldur rekstraumum frá n-hálfleiðara til p-hálfleiðara. Rafsviðið á berasnaða bilinu skilgreinir snertimættið. Rafsviðið kemur í veg fyrir frekara flæði rafeinda frá n-leiðaranum og hola frá p-leiðaranum. Án ytra mættis rennur enginn straumur.

Mynd 2 sýnir orkuborða á p-n-skeytum hálfleiðara. Gildis- og leiðniborðar eru orkuríkari sem nemur snertimættinu, qV_0 , á p-hlið skeytanna en á n-hliðinni. Ljóseindir sem falla á p-n-skeyti raska jafnvægi þess með því að losa víkjandi hleðslubera – það er rafeindir í p-leiðaranum og holur í n-leiðaranum – sem streyma yfir samskeytin og lækka mættisþröskuldinn. Gerum ráð fyrir að ljós komi inn á p-leiðandi hliðinni (frá vinstri). Ljóseindin myndar par rafeindar og holu í p-leiðandi hálfleiðaranum. Rafeindin berst yfir í n-leiðandi hálfleiðaranum eftir ferli 2 á myndinni og þaðan til ytri málmsnertu eftir ferli 3. Á sama hátt berst holan til snertu á p-leiðandi hálfleiðaranum. Á n-leiðandi hlið tólsins (hægra megin á mynd 2) eru svæði þar sem rafeindir í leiðniborða ná að ytri snertum en holur í gildisborða komast ekkert. Á p-leiðandi svæðinu geta holur í gildisborða komist að ytri snertum. Þetta þýðir að þegar ljóseind örvar rafeind úr gildisborða upp í leiðniborða, myndast par rafeindar og holu sem ferðast í andstæðar stefnur. Myndin sýnir einnig helstu tölur sem verða þegar lýst er á samskeytin. Sá hluti orku ljóseindarinnar sem er umfram vídd orkugeilarinnar tapast sem varmi eða titringur grindar hálfleiðarans, merkt 1 og 1' á mynd 2, spennufall verður til ytra skauts, merkt 3 og 3' og sameining rafeindar og holu getur orðið á hlutlausu svæði hálfleiðarans, merkt 4 og 4'. Rafeindir eiga greiða leið um n-leiðandi hálfleiðaranum og einnig yfir í tilsvarendi málmsnertu. Þetta krefst þess að samfella sé í Fermiorkustigi rafeinda hálfleiðarans og Fermiorku málmsnertunnar. Hið sama gildir um Fermiorkustig hola í p-leiðandi hálfleiðara. Fermiorkustigin eru því fastar yfir tólið fyrir hvorn hleðslubera fyrir sig. Þau eru aðskilin með orku sem nemur mun á Fermiorku snertanna, sýnt sem qV á mynd 2 (Green, 1984, 2003).

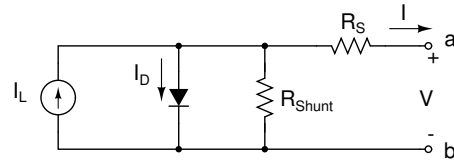
3. Grunnuppbyggingu sólarhlaða

Í sinni einföldustu mynd er sólarhlað tvístur (e. diode), samskeyti p- og n-leiðandi hálfleiðara, sem sólarljós skín á og hefur raftengi við ytri rás. Mynd 3 sýnir uppbyggingu sólarhlaðs. Ljóseindir sólarljóssins koma inn á hlaðið um framhliðina, sem oftast er þakin andspeglandi lagi og stundum hjúpuð eða undir glerplötu. Ljóseind með orku sem er meiri en sem nemur orkugeil hálfleiðarans myndar rafeinda-holu þar. Víkjandi berarnir sveima að berasnaða bili p-n-skeytanna og er sópað yfir það af snertimætti skeytanna. Í sólarhlaðinu á mynd 3 dragast rafeindir,



Mynd 3. Uppbygging sólarhlaðs úr einkristalla kísli. Byrjað er með skífu úr bór-íþættum p-leiðandi kísli. Fosfór er sveimað inn í skífuna til að fá fram n-leiðandi lag og mynda p-n-skeyti. Málmsnertur úr silfri eru gerðar á n-leiðandi yfirborðið og ál snertur eru tengdar í p-leiðandi undirlagið. Andspeglandi húð (oftast úr TiO_2 eða kísilnítíð) er lögð á yfirborðið.

sem myndast í p-leiðandi undirlaginu, inn í n-leiðandi svæðið handan skeytanna. Á sama hátt dragast holur, sem myndast í n-leiðandi laginu, inn í p-leiðandi undirlagið. Þetta leiðir til framspennu í hlaðinu og afl flyst til ytra álags sem er tengt því. Við hönnun þarf að gæta þess að fjarlægð frá yfirborði skeyta, d , sé styttri en sveimlengd hola í n-leiðandi laginu, þannig að holur sem myndast nærri yfirborðinu náí að sveima að skeytunum áður en þær sameinast rafeindum. Þannig verður sveimlengd víkjandi bera í n-leiðandi hálfleiðara að vera nægileg til holan náí yfir samskeytin. Á sama hátt verður þykkt p-leiðandi undirlagsins að vera þannig að rafeindir náí að skeytunum áður en þær sameinast holum. Samstillta þarf sveimlengdir víkjandi bera og þykkt p- og n-leiðandi svæðanna við andhverfu ísogsstuðuls ljóssins. Heppilegt er að hafa sem hæsta snertispennu skeytanna. Há snertispenna fæst með mikilli íþætingu hálfleiðarans, sem aftur á móti styttrir sveimlengd víkjandi bera.



Mynd 4. Jafngildisrás sólarhlaðs. I_L er straumurinn sem sólarljósið örvar og I_D er straumur um kjörtvist.

3.1. Jafngildisrás sólarhlaðs

Rafeiginleikum sólarhlaðs má lýsa með einfaldri jafngildisrás eins og sýnd er á mynd 4 (Stone, 1993; Schwartz, 1993). Kjörsólarhlað jafngildir hliðtengdum kjörtvisti og straumlind. Styrkur straumlindarinnar ræðst af myndun rafeinda-holu para vegna áfallandi sólarljóss. Viðnámstapi er lýst með hlið- og radtengdum viðnámum. Sambandi straums og spennu við póla a og b, er lýst með straum-spennu kennilínu fyrir sólarhlað

$$I = I_L - I_D - \frac{V + IR_S}{R_{\text{Shunt}}} \quad (1)$$

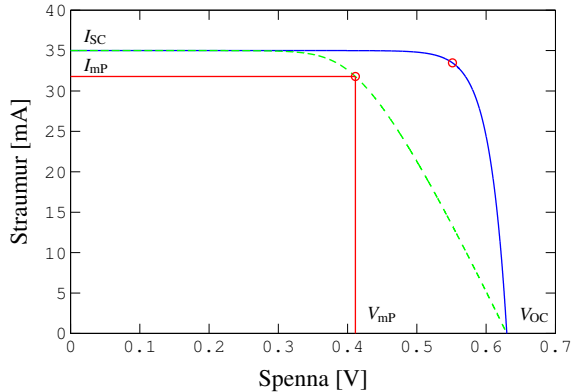
eða

$$I = I_L - I_0 \left[\exp \left\{ \frac{q(V + IR_S)}{nkT} \right\} - 1 \right] - \frac{V + IR_S}{R_{\text{Shunt}}} \quad (2)$$

þar sem I_L er straumur sem sólarljósið örvar, I_D straumur um kjörtvist, I_0 mettnarstraumur tvists, T hitastig, k fasti Boltzmann og n er gæðastuðull tvists. Straum-spennu kennilína sólarhlaðs er sýnd á mynd 5. Í kjörtilfellinu sem sýnt er með heilli línu á mynd 5 er $R_S = 0$, $n = 1$ og $R_{\text{Shunt}} = \infty$. Straum-spennu-kennilína sólarhlaðs með $R_S = 5 \Omega$, $n = 1$ og $R_{\text{Shunt}} = 1 \text{ M}\Omega$ er sýnd með brotinni línu á myndinni. Þegar rásin er opin rennur enginn straumur út af skautum sólarhlaðsins og spennan á milli skautanna a og b er íspenna rásarinnar, V_{OC} . Það þýðir að öll rafeinda-holu pör, sem mynduð eru, verða að sameinast í sólarhlaðinu. Jafna (2) sýnir að fyrir kjörsólarhlöð er íspennan

$$V_{\text{OC}} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_L}{I_0} + 1 \right) \quad (3)$$

þ.a. til að hækka íspennuna V_{OC} þarf að auka strauminn sem sólarljósið örvar, I_L , eða draga úr mettnarstraumnum, I_0 . Spennan sem myndast takmarkast af snertispennu skeytanna, sem er lægri en sem nemur orkugeil hálfleiðarans. Almennt má auka I_0 með því að lengja líftíma víkjandi bera í bolnum, með því að draga úr samrunahraða við yfirborð,



Mynd 5. Ströum-spennu kennilína sólarhlaðs. Heila línan sýnir kennilínu kjörtóls. Brotna línan sýnir kennilínu tóls með $R_S = 5 \Omega$ og $R_{Shunt} = 1 M\Omega$. Ferhyrningurinn markar mesta afl sem ná má út úr sólarhlaðinu og er merkt með \circ .

eða með því að koma í veg fyrir að víkjandi berar nái að virkum samrunasvæðum eins og snertum. Þegar skammhleyp er milli póla a og b rennur skammhlaupsstraumurinn, I_{SC} , út af pólum a. Þar sem skammhlaupsstraumurinn I_{SC} er í réttu hlutfalli við styrk sólarljóssins og íspennan $V_{OC} \propto \ln(I_L)$ vex margfeldið $I_{SC}V_{OC}$ hratt með styrk ljóssins. Skammhlaupsstraumurinn ræðst af stærð svæðisins sem lýst er á, með algeng gildi á bilinu 10 – 100 mA á flataréininguna 1 cm^2 . Með því að tengja saman mörg slík hlöð fæst umtalsvert afl.

3.2. Afl og nýtni

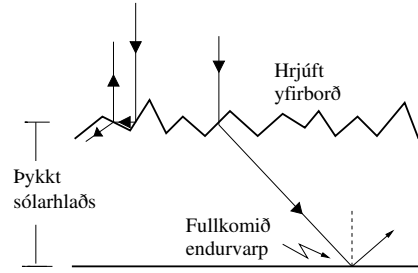
Á mynd 5 sýnir táknið \circ á ferlunum mesta fánlegt afl til álags. Þar er spennan V_{MP} og straumurinn I_{MP} , sem afmarkar ferhyrning undir $I - V$ -ferlinum. Hlutfall flatarmáls ferhyrningsins og margfeldi íspennu V_{OC} og skammhlaupsstraums rásarinnar I_{SC} , er skilgreind sem fyllistuðull

$$FF = \frac{V_{MP}I_{MP}}{V_{OC}I_{SC}} \quad (4)$$

og er mælikvarði á gæði sólarhlaða. Aflnýtni er

$$\eta = \frac{V_{OC}I_{SC}FF}{P_{inc}} \quad (5)$$

þar sem P_{inc} er ljósaflíð sem fellur á hlaðið. Til að hámarka nýtni sólarhlaðs þarf að hámarka margfeldið $V_{OC}I_{SC}FF$. Fyllistuðullinn FF fellur hratt með stækkanði útgangsviðnámi R_S . Þetta má sjá á mynd 5 með samanburði kjörkennilínu með $R_S = 0$ og kennilínu



Mynd 6. Hremming ljóss í sólarhlaði. Framhlið sólarhlaðsins er gerð hrjúf til að valda ljósbroti áfallandi ljóss. Það speglast síðan inn á við af öðrum flötum.

fyrir hlað með $R_S = 5 \Omega$. Þessu viðnámi ætti því að halda í lágmarki. Fyllistuðullinn ræðst einnig af samrunaferli víkjandi bera. Þannig er fyllistuðullinn lægri ef samruninn á sér stað á berasnauda bili skeytanna fremur en í hlutlausum bol hálfleiðarans, vegna þess að gæðastuðullinn n er þá nær 2 en 1. Útgangsaflíð stækkar með því að minnka R_S , auka R_{Shunt} eða minnka gæðastuðul tvistsins niður í sem næst 1.0. Í kjörtílfellinu er $I_L \approx I_{SC}$, sem er nánast tilfellið í nútíma sólarhlöðum úr einkristalla kísli.

3.3. Hremming ljóss

Skammhlaupsstraumur er í réttu hlutfalli við fjölda ljóseinda sem hálfleiðarinn gleypir, $I_{SC} \propto I_L$. Til að hámarka skammhlaupsstrauminn I_{SC} þarf að lágmarka speglun frá yfirborði hlaðsins, lágmarka skugga vegna málmtengja á yfirborðinu, hámarka fjölda rafeinda-holu para, sem myndast vegna ísogs ljóseinda og hámarka líkur þess að rafeinda-holu par nái að p-n-skeytunum. Sólarljósið hefur samfellt róf en við yfirborð jarðar hafa lengri bylgjulengdir dofnad vegna ísogs sameinda andrúmsloftsins. Ljóseindir með orku sem er lægri en orkugeil hálfleiðarans fara um hann án þess að mynda rafeinda-holu par. Ljóseindir með orku rétt ofan við orkugeil hálfleiðarans nýtast best við umbreytingu í raforku þegar þær mynda rafeinda-holu pör. Orkuríkari ljóseindir tapa þeirri orku sem er umfram orkugeil hálfleiðarans til grindar hálfleiðarans sem varma.

Með efnafræðilegum aðferðum má gera framhlið sólarhlaðs hrjúfa og valda ljósbroti, eins og mynd 6 sýnir. Þannig má lengja geislaleiðina án þess að lengja leiðina sem víkjandi berar sveima áður en þeim er safnað. Aðrir fletir sólarhlaðsins eru meðhöndlaðir til

að spegla ljóseindum. Þannig má hremma ljósið innan hlaðsins og framleiða þynnri sólarhlöð.

4. Gerðir sólarhlaða

Þróun sólarhlaða úr kísli hófst á rannsóknarstofu Bell símafyrirtækisins (Chapin et al., 1954) og þá einkum til notkunar sem aflagjafar fyrir gervitungl. Hlöðin voru framan af nær eingöngu framleidd úr einkristalla kísli, en aðrar gerðir hafa verið þróaðar til að lækka framleiðslukostnað (fjölkrystalla kísill, myndlaus kísill, CdTe) eða til að auka nýtni (III-V hálfleiðarar) (Schwartz, 1993; Miles et al., 2007). Allir þessir hálfleiðarar hafa orkugeil á bilinu 1.1 – 1.7 eV, sem er heppileg orkugeil fyrir umbreytingu sólarorku í raforku með einskeyta tvisti. Æskilegasta orkugeilin er nálægt 1.5 eV og hæsta fræðileg nýtni einskeyta sólarhlaða er um 29 % (Stone, 1993). Kísill hefur marga kosti umfram samsetta hálfleiðara eins og GaAs, sér í lagi hvað varðar framleiðslutækni. Hann er umtalsvert ódýrari, hægt er að rækta stórar skífur, hægt er að nota SiO₂ sem einangrara og hreyfanleiki hola er hár. En III-V hálfleiðarar hafa eftir sem áður yfirburða eðliseiginleika eins og beina orkugeil og háan ísogsstuðul. Hæsta mæld nýtni helstu gerða sólarhlaða er sýnd í töflu 1. Róf sólar mótast með lengd geislaleiðar í lofthjúp jarðar. Lengdin er tilgreind með loftmassagildinu (AM) $1/\cos z$, þar sem z er horn milli lóðlínú og stefnu geislanna. Geislunarþéttleiki sólar ofan lofthjúps jarðar er 1367 W/m^2 , tilgreindur sem AM0. Við jörð hefur dregið úr geisluninni vegna ísogs í lofthjúpunum og er dæmigert gildi 1000 W/m^2 fyrir skýlausan himinn og sól í hvirfilpunkti. Slíkt róf kallast AM1. Oftast er AM1.5 notað til að meta sólarhlöð til notkunar á jörðu niðri. Þá er sólin 48.19° frá hvirfilpunkti, en $1/\cos 48.19 = 1.5$. Nýtni sólarhlaða úr einkristalla kísli hefur mælst allt að 24.7 %, en sólarhlöð úr myndlausum kísli, sem eru mun ódýrari í framleiðslu, hafa umtalsvert minni nýtni, < 10 %. Nýtni fjölskeytahlaða úr III-V hálfleiðurum, sem samanstanda af þremur p- og n-samskeytum, hefur mælst allt að 32 %, en þau eru dýr í framleiðslu. Sólarhlöð úr hálfleiðandi fjölliðum hafa ennþá umtalsvert lægri nýtni eða um 5 %.

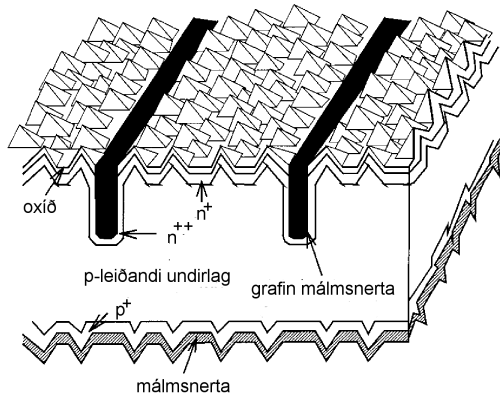
4.1. Sólarhlöð úr kísli

Eins og að ofan greinir eru kísilsólarhlöð lang algengust. Kísillinn getur verið einkristalla, fjölkristalla eða þunn myndlaus húð. Til að framleiða sólarhlað

Tafla 1. Hæsta mæld nýtni, íspenna, skammhlaupsstraumur og fyllistudull fyrir ýmsar gerðir sólarhlaða undir AM1.5 rófi. Frá Green et al. (2008).

Byggingarefni	nýtni %	V _{OC} [V]	J _{SC} [mA/cm ²]	FF
Kísill				
Si (einkrist.)	24.7 ± 0.5	0.706	42.2	82.8
Si (fjölkryst.)	20.3 ± 0.5	0.664	37.7	80.9
Si (þunn húð)	16.6 ± 0.4	0.645	32.8	78.2
Si (myndlaus)	9.5 ± 0.3	0.859	17.5	63.0
III-V				
GaAs (einkrist.)	25.1 ± 0.8	1.022	28.2	87.1
GaAs (fjölkryst.)	18.2 ± 0.5	0.994	23.0	79.7
GaAs (þunn húð)	24.5 ± 0.5	1.029	28.8	82.5
InP (einkrist.)	21.9 ± 0.7	0.878	29.3	85.4
Fjölskeyta				
GaInP/GaAs/Ge	32.0 ± 1.5	2.622	14.37	85.0
Þunnar húðir				
CIGS	18.8 ± 0.6	0.703	34.0	78.7
CdTe	16.5 ± 0.5	0.845	25.9	75.5
Fjölliður				
Hálfleiðandi fjölliður	5.15 ± 0.3	0.876	9.40	62.5

úr einkristalla kísli er hleifur af (oftast bór-íþættum) kísli ræktaður með Czochralski aðferðinni (Pearce, 1988; Green, 2000). Hleifurinn er dreginn upp úr kísilbráð á meðan bráðinni er snúið hægt. Við framleiðslu á fjölkristalla kísli er hleifur steypur úr bráð. Í hleifnum eru stór staflaga korn (sem eru u.þ.b. 300 μm í þvermál). Þetta er nú ráðandi aðferð við framleiðslu sólarhlaða úr kísli. Kostir við fjölkristalla kísil eru margir; ódýrari framleiðsla, meiri framleiðni, framleiðslan er ónæmari fyrir gæðum kísilsins og þakka má hlöðunum þéttar þar sem þau eru ferköntuð. En fjölkristalla kísill er lélegra efni en einkristalla. Rafeinda-holu pörin geta sameinast á kornamörkum án þess að ná að ytri rás sem straumur. Bestu hlöðin úr fjölkristalla kísli hafa nýtni sem er 4 – 5 prósentustigum lægri en fyrir sólarhlöð úr einkristalla kísli. Hleifurinn, einkristalla eða fjölkristalla, er síðan sagður í skífur. Kísill hefur óbeina orkugeil sem leiðir til lágs ísogsstuðuls og því þurfa skífurnar að vera í það minnsta 200 μm þykkar til að ná ásættanlegu ljósisogi. Einnig má draga fjölkristalla kísilborða upp úr bráð. Þá þarf ekki að saga niður skífur, en nýtni sólarhlaða úr slíkum borðum er lakari en í steypum kísli.

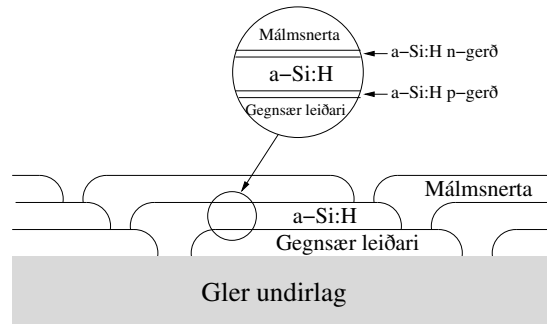


Mynd 7. Sólarhlað með djúpar málmstertur. Snertan er mynduð með því að rækta fyrst Ni og Cu og að lokum silfur í rauf sem er grafín í sólarhlaðið. Hrjúfleiði yfirborðsins hefur verið aukinn með efnaeðhöndlun. Eftir Green (2000).

Yfirborð skífunnar er gert hrjúft með því að dýfa henni í lausn af NaOH og isopropyl alkóhól til að draga úr endurkasti ljóss frá yfirborðinu og til að framkalla ljósbrot og lengja geislaleiðir í kíslinum. Samskeyti n- og p-leiðandi hálfleiðara eru mynduð með því að sveima fosfór nokkra tugi μm inn í skífuna. Háibæting með fosfór gerir efsta lag skífunnar n-leiðandi og lagið sem myndast er gjarnan sagt n⁺-leiðandi. Neðri hluti skífunnar er áfram p-leiðandi og þess vegna myndast samskeyti n- og p-leiðandi hálfleiðara. Málmstertur úr silfurhlaupi eru síðan skrifaðar ofan á hlaðið á n-leiðandi yfirborðið. Málmstertur (gjarnan úr áli) eru tengdar í p-leiðandi undirlagið. Andspeglandi húð (oftast úr TiO₂ eða kísilnitríði) er ræktað á yfirborðið til að fullkomna hlaðið. Dæmigerð uppbygging sólarhlaðs úr einkristalla kísli er sýnd á mynd 3. Vegna þess að silfurnetið, sem skrifað er á yfirborð sólarhlaðsins, veldur skuggum og hefur hærra viðnám en hreint silfur, hefur verið farin sú leið að grafa djúpar silfurnertur í yfirborð hlaðsins með rásaprentunartækni eins og sýnt er á mynd 7 (Green, 2000). Þetta lækkar einnig snertivíðnám málmstertunnar og kísilsins. Snertan er mynduð með því að rækta fyrst Ni og Cu og að lokum silfur í rauf sem er mynduð í sólarhlaðið.

4.2. Sólarhlöð úr þunnum húðum

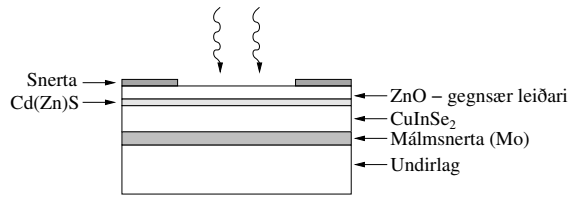
Augljós leið til að skera niður kostnað er að draga úr notkun á dýrasta þættinum í framleiðslunni, sem er yfirleitt hálfleiðarinn. Með því að rækta þunnar húð-



Mynd 8. Dæmigerð uppbygging sólarhlaðs úr þunni myndlausri húð kísils. Myndlaus kísill er lélegur leiðari svo lag af leiðandi gegnsæu tin-oxíði er lagt á milli gler undirlagsins og kísilhúðarinnar.

ir hálfleiðara með háan ísogsstuðul má skerða þykkt hálfleiðarans úr 300 – 500 μm í um 0.2 – 5.0 μm . Þunnar húðir eru þá gjarnan ræktaðar með aðferðum sem leyfa ræktun yfir stóran flöt með tiltölulega ódýrum hætti. Algengustu þunnhúðar sólarhlöðin eru úr vetnisíbættum myndlausum kísli (a-Si:H) og er þau gjarna að finna í smáum raftækjum eins og úrum og reiknivélum. Myndlausar kísilhúðir má rækta við lágt hitastig og nota ódýrt undirlag eins gler eins og sjá má á mynd 8. Um 5 – 20 % atóma í húðinni er vetni, sem bætir rafeiginleika hennar. Vetnisatómin hlutleysa laus tengi á kísilatómum, sem stafa af tilviljanakenndri röðun þeirra í myndlausri húð. Vetnisíbættur myndlaus kísill hefur orkugeil 1.7 eV og ísogsstuðul 10^5 cm^{-1} fyrir ljóseindir með orku sem er hærri en orkugeilin. Þetta þýðir að aðeins nokkrir μm nægja til að gleypa ljósið, sem dregur úr efnisþörf og þar með framleiðslukostnaði (Miles et al., 2007). Þar sem myndlaus kísill er fremur lélegur leiðari þarf að rækta lag af leiðandi gegnsæu tin-oxíði á milli gler undirlagsins og kísilhúðarinnar. Þunnar húðir af miklum gæðum hafa einnig verið ræktaðar úr vökvafasa á tiltölulega óhrein kísil undirlög (Hötzel et al., 2000; Majumdar et al., 2003).

Sólarhlöð hafa einnig verið þróuð úr þunnum húðum annarra hálfleiðara, sem ekki krefjast kísilskífu sem undirlags. Með því má skera framleiðslukostnað verulega niður. Talsverður árangur hefur náðst við að bæta nýtni þessara sólarhlaða. Þessi hlöð eru byggð á CdS/CdTe, Cu(In,Ga)Se₂ (CIGS) og a-Si/a-SiGe fjölsamskeytum (Shaheen et al., 2005). Þau eru framleidd með spætun, eða ræktun úr rafgasefnablöndum og þær má byggja á gler eða fjölkristalla áloxíð



Mynd 9. Dæmigerð uppbygging CuInSe₂/Cd(Zn)S sólarhlaðs. Hlaðið er byggt á fjölsamskeytum p-leiðandi fjölkristalla CuInSe₂ (CIGS) húðar og n-leiðandi CdZnS húðar. Undirlagið getur verið úr glieri eða fjölkristalla áloxíði.

undirlag (Mickelsen et al., 1984; Miles et al., 2007). CdTe hefur beina 1.5 eV orkugeil og háan ísogsstuðul, svo nokkrir μm nægja til að gleypa áfallandi ljós. CuInSe₂/CdZnS hlað er sýnt á mynd 9 og er byggt í kringum fjölsamskeyti 2 – 6 μm þykkar p-leiðandi fjölkristalla CuInSe₂ (CIGS) húðar og n-leiðandi CdZnS húðar (Mickelsen et al., 1984). Hæsta nýtni CuInSe₂/CdZnS hlaðs eru um 18.8 %. Algengast er að nýtni sé minni fyrir sólarhlöð úr þunnum húðum en hlöð úr einkristalla kísli eins og sjá má í töflu 1. Sólarhlöð úr þunnum húðum Si, CdTe og CIGS eru nú þegar fjöldaframleidd. Þess er vænst að með aukinni framleiðslu náist framleiðslukostnaður á einingu það mikið niður að sólarhlöð úr þunnum húðum verði samkeppnishæf við aðra raforkuframleiðslu.

4.3. Sólarhlöð úr samsettum hálfleiðurum

III-V hálfleiðarar eins og GaAs, InP og GaSb hafa beina orkugeil, háan ljósisogsstuðul og heppilegan líftíma og hreyfanleika víkjandi bera. Þetta eru þess vegna ákjósanleg efni í sólarhlöð með afbrigðs nýtni. Þeir III-V hálfleiðarar sem mest eru notaðir í einskeyta sólarhlöð eru GaAs og InP, sem báðir hafa heppilegustu orkugeilina eða 1.4 eV. Upphaflega voru sólarhlöðin framleidd með því að sveima íbót af n-gerð inn í einkristalla skífu. Hæsta nýtni sólarhlaða úr samsettum hálfleiðurum fæst hins vegar þegar skeyti eru mynduð með lagvexti. Þá er þunn einkristalla húð ræktuð á einkristalla undirlag. Það er hinsvegar afar kostnaðarsamt að framleiða hágæða undirlög og rækta III-V hálfleiðara með lagvexti. Vegna þess hve kristallaveilur skerða mjög nýtni þessara sólarhlaða er ekki hægt að beita ódýrum ræktunaraðferðum. Hár eðlismassi efnanna er líka ókostur nema hægt verði að nýta háan ísogsstuðul þeirra og framleiða mjög þunn hlöð. Vegna þessa hafa III-V hálfleiðarar ekki þótt

fýsilegir í einskeyta hlöð til notkunar á jörðu niðri. Rannsóknir á III-V hálfleiðurum í sólarhlöð hafa fyrst og fremst verið til notkunar í geimnum vegna hárrar nýtni og viðnámsþrótti gagnvart geislun. Þó er hugsanlegt að nota III-V hálfleiðara í söfnunarkerfum á jörðu niðri.

Einnig er mögulegt að raða saman mörgum samskeytum hálfleiðara með mismunandi orkugeil til að auka nýtni og mynda fjölsólarhlöð (Henry, 1980; King et al., 2007; Bosi and Pelosi, 2007). Hálfleiðari gleypir aðeins ljóseindir með orku sem er hærri en orkugeil hálfleiðarans. Einskeyta sólarhlöð geta ekki nýtt ljóseindir með orku lægri en orkugeilin og umframorka ljóseinda með orku umfram orkugeilina breytist í varma. Kjörtól, sem gefur hámarksnýtni úr rófi sólarljóssins, er óendanlegur fjöldi p-n-skeyta úr hálfleiðurum, sem hvert um sig hefur orkugeil E_g sem er minnkandi sem nemur ΔE_g frá þeirri sem næst liggur. Hæsta orkugeilin væri efst, þar sem sólarljósið kæmi inn, og sú lægsta neðst. Þannig væri hægt að breyta hverri ljóseind í par rafeindar og holu í viðeigandi hálfleiðara án varmatapa. Þetta kjörtól er hægt að nálga með því að raða saman 2 – 3 skeytum sem ræktuð eru hvert ofan á annað með lagvexti. Uppbygging fjölsólarhlaðs með 3 skeytum er sýnd á mynd 10. Öll skeytin þurfa að mynda sama fjölda hleðslubera og sami straumur fer um öll skeytin. Þetta verður að taka til greina við hönnun hlaðanna og þykkt og íbót einstakra laga verður að vera mjög nákvæmlega ákvörðuð. Orkugeilar skeytanna eru valdar þannig að nýtni verði háværkuð. Grindarfaster laganna þurfa að standast á. Þetta er mögulegt með samsettum III-V hálfleiðurum eins og AlGaAs, InGaAs og AlInGaP, sem ræktuð eru á Ge. Þannig hefur In_{1-x}Ga_xP sama grindarfasta og GaAs ef $x = 0.516$ og hefur þá orkugeil 1.9 eV. Með AlInGaP í mismunandi hlutföllum má fá fram orkugeil á bilinu 1.43 – 2.2 eV, en halda samhæfingu við grindarfasta GaAs. Þegar GaAs er ræktað á Ge þarf að rækta þunnt (tugir nm) AlGaAs eða InGaAs þófalag milli Ge undirlagsins og GaAs lags, þrátt fyrir að lítill munur sé á grindarföstum. Gjarnan er örlitlu In (um 1 % In) blandað í GaAs þófalagið til að grindarfaster standist á. Með því að nota Ge sem undirlag er hægt að fá fram þriðju skeytin, en Ge hefur orkugeil 0.7 eV og gleypir því innrauðar ljóseindir. Hin ólíku hlöð í fjölsólarhlöðum eru tengd með smugskeytum, sem eru þunn (um 10 nm), mikið íbætt p⁺-n⁺-skeyti, sem hafa afar lágt viðnám. Til að

	andspeglandi húð fram snerta
p–AlInP gluggi	
p–InGaP eimir	
p–InGaP beinir	InGaP (1.9 eV orkugeil) efstu skeyti
n–AlInP	
p ⁺ –AlGaAs/rf–InGaP	smugskeyti
n–InGaAs eimir	
p–InGaAs beinir	InGaAs (1.4 eV orkugeil) miðju skeyti
n–InGaP	
p ⁺ –GaAs/rf–GaAs	smugskeyti
InGaAs þófi	
n–leiðandi Ge	
p–leiðandi Ge undirlag	Ge (0.7 eV orkugeil) neðstu skeyti
	baksnerta

Mynd 10. Uppbygging fjölsólarhlaðs með þremur samskeytum. Efst eru skeyti úr InGaP með 1.9 eV orkugeil, þá skeyti InGaAs með 1.4 eV orkugeil og neðst skeyti úr Ge með 0.7 eV orkugeil.

koma í veg fyrir sníkjuljósísog er valinn í þau hálfleiðari með víða orkugeil oftast AlGaAs. Smugskeytin verða að vera veilufrí með nákvæmlega ákvarðaða þykkt og íbót og skeytin skörp.

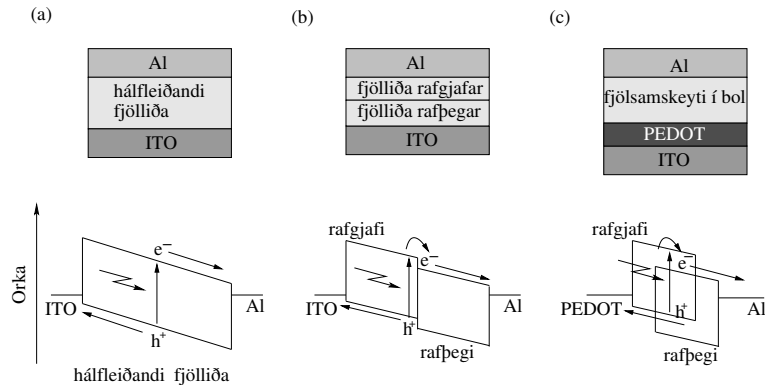
4.4. Sólarhlöð úr fjölliðum

Framleiðslukostnað við sólarhlöð má lækka með því að rækta þau í stórum húðurum, svipað og þegar dagblöð eru prentuð. Sér í lagi eru miklar væntingar til þess að hægt verði að framleiða sólarhlöð úr hálfleiðandi fjölliðum á þennan hátt (Hoppe and Sariciftci, 2004; Forrest, 2005; McGehee and Topinka, 2006). Við framleiðslu mætti þá leysa fjölliðurnar upp í leysi-efnum og mynda blek og prenta þær síðan á undirlag. Nýtni þessara sólarhlaða er enn fremur lítil eða hæst um 5 % eins og sjá má í töflu 1. Í sólarhlöðum úr fjölliðum eru nokkrir takmarkandi þættir. Hreyfanleiki hleðslubera í hálfleiðandi fjölliðum er verulega minni (getur munað nokkrum stærðarþrepum) en í kristölluðum hálfleiðurum, sem hefur áhrif á nýtni þessara sólarhlaða. Fjölliður hafa tiltölulega háan ísogsstuðul ljóss (venjulega $\geq 10^5 \text{ cm}^{-1}$), sem þýðir mikið ísog, jafnvel í tölum sem eru innan við 100 nm þykk (Hoppe and Sariciftci, 2004). Flestar hálfleiðandi fjölliður eru p-leiðandi með orkugeil um 2 eV.

Sólarhlað má framkalla úr fjölliðu með því að koma henni fyrir á milli tveggja málmleiðandi skauta eins og indín-tín-oxíð (ITO) og áls. Fyrir þessi tvö leiðandi skaut er hæsta orka rafeinda í setnum ástöndum mismunandi, svo þær streyma frá því skauti þar sem rafeindirnar hafa hærri orku til skautsins þar sem þær hafa lægri orku (þ.e. frá áli til ITO) þar til þau hafa sama efnamætti. Hleðslan sem byggist upp við þetta á milli skautanna veldur rafsviði yfir hálfleiðandi fjölliðuna. Þegar hálfleiðarinn gleypir ljóseind, dregur rafsviðið rafeindir að jákvæða skautinu og holur að neikvæða skautinu (eins og sjá má á mynd 11 (a)). Strauminn sem myndast má þá nota til að framkalla vinnu. Í reynd virka sólarhlöð úr einni hálfleiðandi fjölliðu ekki vel, því ljósórvaða rafeindin í leiðni-borðanum er bundin holu í gildisborðanum með rafstöðukrafti og saman mynda þær örveind. Örveindir hafa ekki hleðslu og reka ekki í rafsviði og ná þess vegna sjaldnast að skautunum. Oftast sameinast rafeindin holunni í stað þess að ná að skauti. Þetta má forðast með því að hafa annað lag af hálfleiðandi fjölliðu sem hefur leiðni-borða með lægri orku en hinn fyrri eins og sýnt er á mynd 11 (b). Þegar örveind er mynduð nærri samskeytum fjölliðanna tveggja getur rafeindin flust til þessarar rafþega fjölliðu. Holan getur flust í rafgjafa fjölliðunni til neikvæða skautsins og rafeindin getur ferðast í rafþega hálfleiðaranum til jákvæða skautsins. Þykkt fjölliðunnar verður að vera í það minnsta 100 nm til að gleypa nægilega mikið ljós. Þetta þýðir að örveindirnar, sem myndast, ná ekki að sveima um svo þykka húð, að samskeytum, þar sem þær hrörna venjulega innan 6 nm þegar þær sveima í fjölliðum (McGehee and Topinka, 2006). Til að leysa þetta er rafgjafa og rafþega fjölliðum blandað saman um húðina þannig að samskeyti verði sem víðast, og líkur aukast á að örveind myndist nærri samskeytum eins og sjá má á mynd 11 (c). Þetta er gert með því að leysa báðar fjölliðurnar upp í sama leysinum og steypa þær í mót. Samskeytin liggja þá á víð og dreif. Þessi aðferð er enn á rannsóknarstigi og mörgum spurningum er enn ósvarað um virkni og notagildi hennar (McGehee and Topinka, 2006).

5. Lokaorð

Fjallað hefur verið um uppbyggingu og virkni sólarhlaða. Kennistærðir sólarhlaða skilgreindar og bornar saman fyrir ýmsar gerðir. Kísil sólarhlöð eru ráðandi og verða það enn um sinn. Nýtni sólarhlaða úr



Mynd 11. Sólarhlað úr (a) einu lagi af hálfleiðandi fjölliðu, (b) tveimur lögum af aðskildum hálfleiðandi fjölliðum þar sem önnur er með rafgjöfum og hin með rafþegum, og (c) fjölsamskeytum í bol, þar sem samskeytin milli rafgjafa- og rafþegafjölliðu liggja um alla húðina. Byggt á McGehee and Topinka (2006).

einkristalla kísli er um 25 % og fyrir sólarhlöð úr fjölkristalla kísli er hún um 20 %. Sólarhlöð úr samsettu III-V hálfleiðurum eru í stöðugri þróun og fjölskeyta sólarhlöð hafa sýnt yfir 30 % nýtni, en þau eru dýr í framleiðslu og krefjast flókinnar framleiðslutækni. Sólarhlöð úr hálfleiðandi fjölliðum gefa vonir um að hægt sé að framleiða ódýr sólarhlöð með prentatækni. Enn er nýtni þeirra þó fremur lítil. Það sem fyrst og fremst hindrar umfangsmikla notkun sólarhlaða til raforkuframleiðslu er mikill kostnaður. Nýtni sólarhlaða hefur aukist jafnt og þétt undanfarna fimm áratugi ásamt því að framleiðslukostnaður hefur farið lækkandi og má ætla að sú þróun haldi áfram. Líklegt má telja að til að ná niður kostnaði verði þunnar húðir ofan á í framleiðslu sólarhlaða. Þegar upp er staðið er kostnaður á hverja framleidda orkueiningu mikilvægari en nýtni.

Þakkir

Verkefnið var styrkt af Rannsóknasjóði Íslands.

Heimildir

- Matteo Bosi and Claudio Pelosi. The potential of III-V semiconductors as terrestrial photovoltaic devices. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 15(1):51–68, 2007.
- D. M. Chapin, C. S. Fuller, and G. L. Pearson. A new silicon p-n junction photocell for converting solar radiation into electrical power. *Journal of Applied Physics*, 25(5):676–677, 1954.
- S. R. Forrest. The limits to organic photovoltaic cell efficiency. *MRS Bulletin*, 30(1):28–32, 2005.

- M. A. Green. Limits on the open-circuit voltage and efficiency of silicon solar cells imposed by intrinsic Auger processes. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 31(5):671–678, 1984.
- Martin A. Green. Silicon solar cells: at the crossroads. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 8(5):443–450, 2000.
- Martin A. Green. *Third Generation Photovoltaics: Advanced Solar Energy Conversion*. Springer, Berlin, 2003.
- Martin A. Green, Keith Emery, Yoshihiro Hishikawa, and Wilhelm Warta. Solar cell efficiency tables (version 31). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 16(1):61–67, 2008.
- C. H. Henry. Limiting efficiencies of ideal single and multiple energy gap terrestrial solar cells. *Journal of Applied Physics*, 51(8):4494–4500, 1980.
- H. Hoppe and N. S. Sariciftci. Organic solar cells: An overview. *Journal of Materials Research*, 19(7):1924–1945, 2004.
- J. Hötzel, R. Kopecek, S. Volz, K. Peter, P. Fath, E. Bucher, C. Zahedi, and F. Ferrazza. Low cost thin film silicon cells on upgraded metallurgical grade (UMG) silicon substrates prepared by liquid phase epitaxy (LPE). In *Proceedings of the 16th European Solar Energy Conference and Exhibition*, Glasgow, Scotland, May 1–5, 2000.
- Richard R. King, Daniel C. Law, Kenneth M. Edmondson, Christopher M. Fetzer, Geoffrey S. Kinsey, Hojun Yoon, Dimitri D. Krut, James H. Ermer, Raed A. Sherif, and Nasser H. Karam. Advances in high-efficiency III-V multijunction solar cells. *Advances in Optoelectronics*, 2007:29523, 2007.
- D. Majumdar, S. Chatterjee, U. Gangopadhyay, and H. Saha. Modified technique of using conventional slider

- boat for liquid phase epitaxy of silicon for solar cell application. *Bulletin of Materials Science*, 26(6):643–654, 2003.
- Michael D. McGehee and Mark A. Topinka. Solar cells: Pictures from the blended zone. *Nature Materials*, 5(9): 675 – 676, 2006.
- R. A. Mickelsen, W. S. Chen, Y. R. Hsiao, and V. E. Lowe. Polycrystalline thin-film CuInSe₂/CdZnS solar cells. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 31(5): 542–546, 1984.
- Robert W. Miles, Guillaume Zoppia, and Ian Forbes. Inorganic photovoltaic cells. *Materials Today*, 10(11): 20–27, 2007.
- C. W. Pearce. Crystal growth and wafer preparation. In S. M. Sze, editor, *VLSI Technology*, pages 9–54. McGraw-Hill, New York, 1988.
- R. J. Schwartz. Photovoltaic power generation. *Proceedings of the IEEE*, 81(3):355–364, 1993.
- S. E. Shaheen, D. S. Ginley, and G. E. Jabbour. Organic-based photovoltaics. toward low-cost power generation. *MRS Bulletin*, 30(1):10–19, 2005.
- Jack L. Stone. Photovoltaics: Unlimited electrical energy from the sun. *Physics Today*, 46(9):22–29, 1993.

Um höfundinn: Jón Tómas Guðmundsson lauk prófi í rafmagnsverkfræði og M.S. prófi í eðlisfræði frá Háskóla Íslands og Ph.D. prófi í kjarnorkuverkfræði frá Kaliforníuháskóla í Berkeley. Hann er nú prófessor við rafmagns- og tölvuverkfræðideild Háskóla Íslands.

^aRafmagns- og tölvuverkfræðideild, Háskóli Íslands, Hjarðarhaga 2–6, IS-107 Reykjavík, ^bRaunvísindastofnun Háskólans, Dunhaga 3, IS-107 Reykjavík,

tumi@hi.is

Móttekin: 28. apríl 2008

Summary: A short tutorial on solar cells is followed by a discussion of the various types of solar cells that are presently used and investigated for future applications. The electrical properties of solar cells such as the equivalent circuit and the current-voltage characteristics are described. The parameters that define the solar cells properties, the filling factor FF, the open circuit voltage V_{OC} and the short circuit current I_{SC} and the cell efficiency are defined. These parameters are reviewed for the most common solar cells. The issues of efficiency improvements and cost reduction are discussed. Silicon solar cells have been under development for over five decades and are by far the most widely used cells. Silicon solar cells are made from crystalline, polycrystalline material or amorphous thin films. High efficiency III-V multijunction cells like GaInP/GaInAs/Ge three junction solar cells are being developed, but they are expensive to fabricate. Organic based solar cell research has developed over the past three decades. They have the perspective of cheap production, however their efficiency is very low.