

Energimyndighetens titel på projektet – svenska Ångström Thin Film Solar Cells - nya koncept för hög verkningsgrad	
Energimyndighetens titel på projektet – engelska Ångström Thin Film Solar Cells - novel concepts for high efficiency	
Universitet/högskola/företag Uppsala universitet	Avdelning/institution Avdelningen för Fasta Tillståndets Elektronik, institutionen för Teknikvetenskaper
Adress Ångströmlaboratoriet, box 534, Uppsala universitet, 751 21 Uppsala	
Namn på projektledare Marika Edoff	
Namn på ev övriga projektdeltagare Tobias Törndahl, Jan Keller, Fredrik Larsson, Olivier Donzel Gargand	
Nyckelord: 5-7 st CIGS, toppcell, högt bandgap, 1.0 V Voc, tandem	

Förord

Projektet ”Nya koncept för hög verkningsgrad” har finansierats främst av Energimyndigheten genom detta projekt, men med medfinansiering av det strategiska forskningsområdet STandUP. Företaget Solibro Research AB har bidragit med CIGS-material för buffertskiktutveckling och även tagit del av resultaten. Utvecklingen med inblandning av silver i CIGS för högre verkningsgrad bedrivs parallellt i ett ramprojekt finansierat av SSF, men fokus i detta projekt har varit kombinationen av högt Ga-innehåll med silverinblandning. Projektet har inte haft en referensgrupp. I denna rapport refererar vi både till publikationer från projektet och till referenser. Dessa listas i slutet.

Innehållsförteckning

Sammanfattning	2
Summary	2
Inledning/Bakgrund	3
Genomförande.....	4
Resultat	8
Diskussion.....	9
Publikationslista.....	9
Referenser, källor	12
Bilagor.....	12

Sammanfattning

I detta projekt har vi fokuserat på solceller som optimeras för att fungera som toppceller i en tandemstruktur. Tandemsolceller har väckt stort intresse både nationellt och internationellt, eftersom tekniken ger möjlighet till ökad teoretisk verkningsgrad. I projektet har vi gjort ett genombrott på hög öppenspanning för en kalkopyritsolcell med 1.0 V för ett bandgap på 1.7 eV, som del i utvecklingen mot en kalkopyrit-baserad toppcell. Detta är världsrekord i öppenspanning och har fått stort internationellt genomslag.

En ytterligare viktig egenskap för en toppcell är att den är transparent för de våglängder som ska absorberas i en bottencell. Molybden, som är den metall som vanligen används, är metallisk och inte transparent. Därför är den i detta arbete utbytt mot transparent ledande oxid. I projektet har hydrerad indiumoxid testats som bakkontakt. Hydrerad indiumoxid tål de höga temperaturer som används vid tillverkning av CGS och CIGS-skikt. Däremot har det visat sig att en parasitisk process vid bakkontakten lett till att gallium gått från CIGS till galliumoxid och att indium från indiumoxiden gått in i CIGS-skiktet. Detta är en oönskad reaktion, som delvis kan förhindras om man lägger ett tunt skikt av aluminiumoxid mellan bakkontakt och CIGS-skikt.

Förutom att arbeta med bakkontakt ställer högbandgapssolceller både baserade på CIGS och CZTS speciella krav på buffertskikt, där ledningsbandet måste anpassas. Ett flexibelt materialsystem för buffertskikt är ZnSnO, som kunnat anpassas för alla olika bandgap i projektet, både CIGS, CGS och CZTS. För CZTS har rekordet 9.7 % uppnåtts för en CZTS-solcell utan selen och med 1.5 eV i bandgap [Larsen *et al* P7]. Detta utgjorde världsrekord vid publicerandet.

Legering med silver, där en viss del koppar ersätts av silver i CIGS (ACIGS) är ett annat sätt att arbeta med gränsskikt mellan (A)CIGS och buffertskikt, men där anpassningen sker från (A)CIGS-sidan. Silver leder till att ledningsbandsnivån sänks, vilket ger en bättre övergång till buffertskiktet, även när CdS används. Här har 17 % verkningsgrad uppnåtts för 1.4 eV bandgap [Edoff *et al* P3], vilket är ett bra resultat, men inte riktigt i paritet med målet 17 % för ett bandgap på 1.5 eV eller mer.

Resultaten från detta projekt lägger grunden för ytterligare förbättringar av högbandgapssolceller för tandemintegrering. En viktig uppgift för vidare forskning är att utveckla en bottencellsstruktur som tål hög temperatur.

Summary

In this project, the focus has been on solar cell optimized to function as top cells in a tandem device. Tandems have been subject to large interest nationally and internationally since the technology allows for increased theoretical maximum efficiency. In this project, a break-through in high open circuit voltage for a chalcopyrite solar cell of 1.0 V for a bandgap of 1.7 eV has been made. This is a world record open circuit voltage for any chalcopyrite based solar cell and allows for further development towards a chalcopyrite top cell for tandem.

An additional important property for a top cell is transparency for the wavelengths that should be absorbed in the bottom cell. Molybdenum is the most common material, but it is metallic and thereby not transparent. That is the reason for exchanging molybdenum to a transparent hydrogenated indium oxide in this project. Hydrogenated indium oxide is resistant to the high temperatures that are needed for fabrication of CGS and CIGS layers. The results show that a parasitic reaction at the back contact leads to formation of gallium oxide, with gallium from the CIGS layer which leads to in-diffusion of indium from the indium oxide to the CIGS layer. This is a non-wanted reaction, that can be reduced by the use of a thin aluminum oxide between the back contact and the CIGS layer as a barrier.

In addition to the development of transparent back contacts, there are special requirements for high bandgap absorber materials on the buffer layer, where the conduction band needs to be adapted. A flexible material system for buffer layer is ZnSnO, where we have adapted the band edge for all band gaps in the project for CIGS, CGS as well as CZTS. For CZTS, the record efficiency of 9.7 % has been obtained for a pure CZTS solar cell (with no selenium) and with 1.5 eV bandgap[Larsen *et al* P7]. This was a world record at the time of the publication.

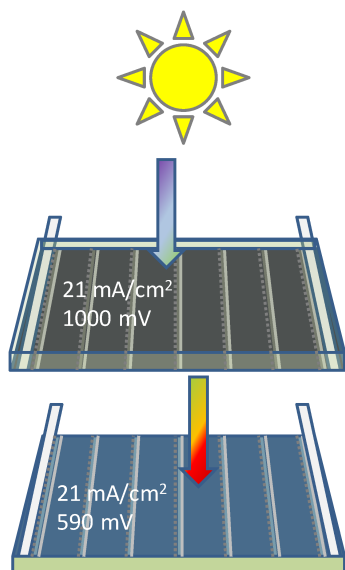
Alloying CIGS with silver to form ACIGS is another way of changing and optimizing the interface between ACIGS and buffer layer, but where the adaptation is from the side of the ACIGS absorber layer. Silver leads to a lowering of the conduction band edge energy, which, in turn, leads to an improved junction to the buffer layer, even when CdS is used. A 17% efficiency ACIGS solar cell was obtained for 1.4 eV of bandgap[Edoff *et al* P3], which is a very good result. However, it is not reaching the project target of 17% for above 1.5 eV bandgap.

These results pave the way for additional improvements of high band gap solar cells for tandem integration, which was also the main objective of the project. Next step would be to target the bottom cell, where an important requirement will be tolerance to high post process temperatures.

Inledning/Bakgrund

Tandemkoncept för tunnfilmssolceller var utgångspunkten för detta projekt. Idag prövas flera olika metoder för att göra tandemsolceller för att ta nästa steg i verkningsgradsutvecklingen. De allra bästa solcellerna med en tandemstruktur som bygger på CIGS och perovskit med två terminaler har 23.3 % verkningsgrad [Green *et al* R1]. Det är samma verkningsgrad som det regerande rekordet för en single junction CIGS, och lägre än det regerande rekordet för single junction perovskit, som är 25.2% [Green *et al* R1]. Dock får man ha i åtanke att den teoretiska verkningsgraden är högre och att denna utveckling ännu är i en genombrottsfas. I detta projekt ser vi på möjligheterna att göra CIGS/CIGS tandem, genom att adressera forskning kring en C(I)GS-toppcell med hög spänning och verkningsgrad. Detta ses som en chans för CIGS att kunna konkurrera med konventionell kiselteknik (en bra och stabil toppcell, kan också vara ett alternativ för tunnfilms-CIGS-kisel-tandem). För att tandemsolceller helt baserade på materialsystemet CIS/CGS ska fungera krävs en toppcell med högt bandgap och hög verkningsgrad

som dessutom är transparent för det ljus som ska absorberas av bottencellen. Den höga verkningsgraden är nödvändig, eftersom cirka 2/3 av effekten i en två-terminal-tandemsolcell kommer från toppcellen. För tandemsolceller med fyra terminaler (två oberoende solceller) finns fler frihetsgrader, men fortfarande gäller att ljuset som absorberas av toppcellen måste nyttiggöras på bästa möjliga sätt, se figur 1.



Figur 1. En tandemsolcellsmodul består av en solcellsmodul med material som har högt bandgap (toppcell) och en solcellsmodul med lågt bandgap (bottencell). Toppcellen absorberar synligt ljus och är genomskinlig för infrarött ljus. Infrarött ljus absorberas i bottencellen. Materialen i toppcellen måste vara transparenta för det infraröda ljus som ska absorberas i bottencellen. Bilden visar ett exempel på en modul med fyra terminaler, dvs separata kontakter för topp och bottencell

Tidigare har CGS med högt bandgap inte lyckats komma upp i spänning över 1 V. Begränsningen har visats vara dels bulk-defekter [Siebentritt *et al* R2] och dels dålig övergång mellan CGS och buffertsikt[Larsson *et al* P2]. I projektet har flera koncept för att uppnå högt bandgap och hög verkningsgrad prövats experimentellt, vilka beskrivs mer i detalj under rubriken ”utförande” Utgångspunkten har varit egen och omvärldens utveckling på området högt bandgap för CIGS, transparenta ledande oxider, ytbehandling med alkalimetaller och legering med silver.

Genom detta projekt har vi kommit ett betydande steg närmare att kunna använda kalkopyritmaterial som toppceller i tandemsolceller. Projektet har varit treårigt, dvs ganska kort just därför att det haft en mer undersökande karaktär. Är toppceller av kalkopyrit en realistisk möjlighet? Baserat från resultaten tycker vi att det finns skäl att arbeta vidare med detta koncept. Idag sker stora framsteg inom tandemtekniken, och det finns anledning att titta på alternativ till de toppceller av perovskit, som beforskas av många grupper. Det faktum att dessa solceller innehåller bly och att det finns stora frågetecken kring långtidsstabilitet stöder denna utgångspunkt.

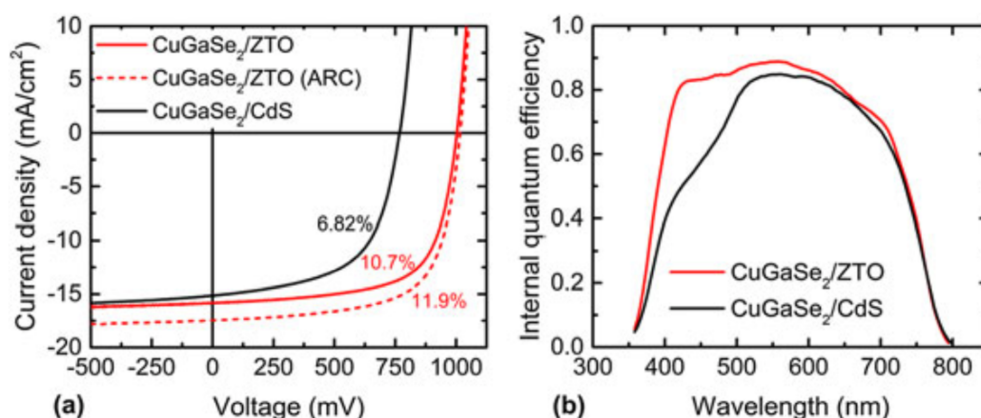
Genomförande

Projektet har drivits av forskargruppen för tunnfilmssolceller på avdelningen för Fasta Tillståndets Elektronik och institutionen för Teknikvetenskaper. Marika Edoff och Tobias Törndahl har varit projektledare. I projektet har flera av gruppens medarbetare deltagit: Jan Keller, forskare, Olivier Donzel Gargand, doktorand och senare forskare, Fredrik Larsson, doktorand. Samarbete med Solibro har skett, främst genom att Solibro Research AB (kontaktperson på Solibro: Olle Lundberg)

bidragit med större skivor med CIGS-material för större experimentserier för buffert-tester. Solibro Research AB har också tagit del av resultaten. Projektet har dragit nytta av input från SSF-ramprojektet Bandgap Grading in Thin Film Solar Cells och även bidragit till det projektet. Till viss del har forskningsmedel från STandUP använts som medfinansiering i projektet. Det experimentella arbetet har utförts i Ångströmlaboratoriets renrum, som är del av konsortiet my-fab, vilket finansieras av de deltagande universiteten, samt Vetenskapsrådet. I Uppsala medfinansieras även renrummet av Knut och Alice Wallenberg, via Materialstiftelsen vid Uppsala universitet.

Arbetspaket 1. CIGS och ACIGS med högt galliuminnehåll och ren CGS utan indium

En begränsning med CIGS-solceller med högt galliuminnehåll och därmed högt bandgap har varit i) Dålig uppsamling av elektroner på grund av många defekter i materialet: elektroner som exciterats har rekombinerat innan de tagit sig fram till pn-övergången. Vi har tacklat detta problem genom att använda ett alternativt glassubstrat för CGS, som tillåtit högre substrattemperatur under samförångningen, vilket ökat kristallstorlek och materialkvalitet i CGS-skiktet, ii) Ett icke-optimalt gränsskikt mellan CIGS och CdS, som används som buffertskikt i CIGS-solceller. Detta problem har vi löst genom att anpassa Cd-fria buffertskikt av ZnSnO till CIGS med högt bandgap. Dessa skikt har gjorts med deponeringsmetoden atomic layer deposition (ALD). Med dessa åtgärder har 1.0 V för en solcell uppnåtts, vilket är rekord i öppenspanning för kalkopyritbaserade solceller. Verkningsgraden för denna solcell var 11,9 % [Larsson *et al* P2], vilket också är världsrekord i verkningsgrad för kalkopyrit med detta höga bandgap. Med detta resultat uppfylldes ett av målen i projektet, men vidare utveckling behövs för att höja verkningsgraden ytterligare och för att visa långtidsstabilitet. Figur 2 visar rekordcellen med 1.0 V öppenspanning, tillsammans med referensen med ett CdS-buffertskikt och samma cell innan antireflexbehandling.

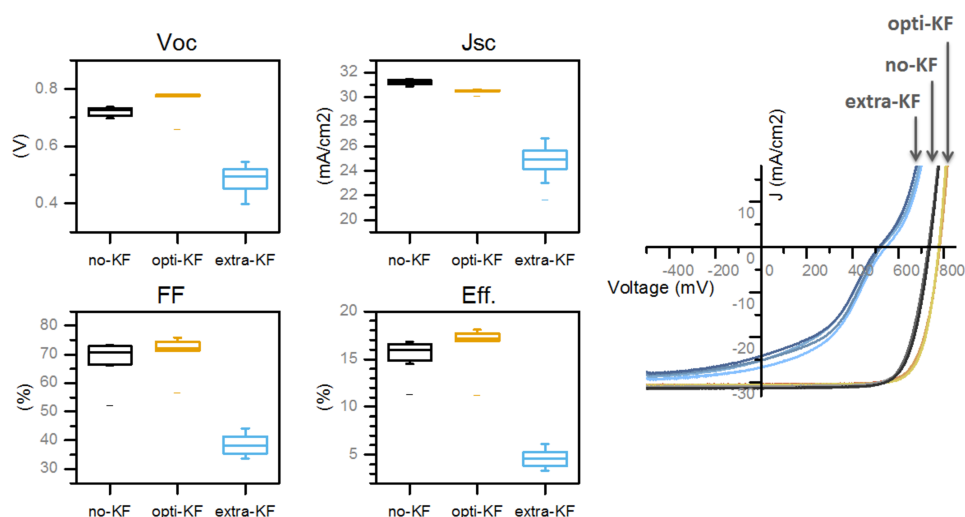


Figur 2. CuGaSe₂-solceller tillverkade på ett högttemperaturglas med två olika buffertskikt, CdS och ZnSnO (ZTO). Den streckade linjen visar rekordcellen med antireflexbehandling [Larsson *et al* P2]

Legering med silver, $(Ag,Cu)(In,Ga)Se_2$

Gallium i CIGS höjer bandgapet genom att ledningsbandsnivån höjs. Detta har nackdelen att det blir svårare att anpassa konventionella buffertsikt till CIGS-materialet. Silverlegering, dvs att byta ut en del av kopparmängden i CIGS mot silver, ger inga stora effekter på bandgapet (för små mängder silver) [Boyle *et al* R3]. Det leder dock till att både ledningsband och valensbandsnivåerna blir lägre än för motsvarande CIGS-material utan silver. Därför går det att få en bra övergång till buffertsikt av CdS även för höga bandgap. Vi har provat konceptet för flera olika gallium och silverinnehåll och fått över 15 % verkningsgrad för 1.45 eV i bandgap[Keller *et al* P10].

Det har visat sig att ACIGS inte har samma beteende som CIGS när det gäller ytbehandlingar (pdt) med alkalimetaller, såsom kalium och rubidium. Detta har undersökts i projektet[Edoff *et al* P3]. Med samma dos av kalium och rubidium som optimerats för CIGS blev ACIGS-solcellerna sämre än referenser utan denna ytbehandling. Optimering med mindre mängd alkalimetaller gav bättre resultat, se figur 3 och referens [Donzel-Gargand *et al* P6]



Figur 3. Exempel på inverkan av ytbehandling med kalium på ACIGS. För mycket kalium ger en tydlig försämring av solcellerna (ref olivier progress).

Arbetspaket 2. Solceller baserade på $Cu(In,Ga)(S,Se)_2$.

Med detta hoppades vi kunna dra nytta av ramprojektet Bandgap Grading in Thin Film Solar Cells, vilket är finansierat av SSF. Att byta ut en del av seleninnehållet mot svavel, företrädesvis mot ytan av CIGS-skiktet ökar bandgapet vid ytan med mindre inverkan på ledningsbandet och kan därigenom leda till ett bättre gränsskikt till buffertsikt, även för celler med högt bandgap. Vi har dock funnit i SSF-projektet att inblandning av svavel och gallium tillsammans leder till fassparation och därmed dålig verkningsgrad och svavelanrikning i korngränser[Aboulfadl *et al* P8]. Bland annat har studier i sulfurering av $CuInSe_2$ utan gallium och $CuGaSe_2$

utan indium gjorts. En slutsats är att sulfurisering kan fungera för solceller med ett mycket gallium-fattigt ytskikt, vilket gör metoden mer lämplig för bottencellen i en tandem. Därför har detta tillvägagångssätt inte använts vidare i det här projektet.

Arbetspaket 3. Buffertskikt för solceller med högt bandgap (CZTS och CIGS)

För CuZnSn(S,Se)_4 (CZTS) med högt bandgap uppstår samma problem som för CIGS, dvs gränsskiktet mellan CZTS och buffertskikt av CdS, kommer att vara långt ifrån optimalt och leda till hög rekombinationshastighet för elektroner. Samma metodik som används för CIGS, dvs att anpassa buffertskiktet kan användas även för CZTS. Vi testade olika buffertskikt av ZnSnO och fick betydligt högre verkningsgrad än för CdS. Som bäst uppnåddes 9,7 % verkningsgrad för en Cd-fri solcell med 746 mV öppenspanning och 809 mV för ett buffertskikt av CdS med en verkningsgrad på 8,4 % [Larsen *et al* P7]. Vid tiden för publicerandet utgjorde 9,7 % världsrekord för CZTS utan selen. Resultaten har vidareutvecklats i ett annat projekt finansierat av Energimyndigheten (dnr 2017-004796)

För CIGS gjordes systematiska undersökningar av framför allt ZnSnO för solceller med högt bandgap. Detta material har unika möjligheter för optimering av gränsskikt både för CIGS, ACIGS och CZTS. För ACIGS går det även att justera bandkanten genom att legera med olika mängd silver, som beskrivits i arbetspaket 1.

Arbetspaket 4. Transparenta bakkontakter

Det översta skiktet i en bottencell kommer att vara del av bakkontakten för toppcellen i en två-terminal-tandemsolcell och egenskaperna är också viktiga för en fyr-terminal-tandem. Det är därför logiskt att vi undersöker alternativ till den konventionella bakkontakten av molybden. Vid projektets början fanns två transparenta ledande oxider (TCO) att välja mellan, ZnO:Al och InO:H. Eftersom ZnO hade rapporterats vara mindre termodynamiskt stabil under CIGS-processen fokuserade vi på InO:H i detta projekt. Detta skikt har tillverkats med sputtering, men jämförande studier har gjorts även med ALD. 16 % verkningsgrad uppnåddes med en solcell, som hade InO:H som bakkontakt (en referens med konventionell bakkontakt av molybden hade 18 % verkningsgrad) [Keller *et al* P4]. Här finns stort utrymme för ytterligare förbättringar. I ett annat experiment tillverkades dubbelsidiga (bifacial) solceller, som kan belysas från båda sidor [Keller *et al* P5]. Vi använde ett mycket tunt CIGS-skikt med avsikt att undersöka egenskaperna hos bakkontakten, vilket gav förluster i absorption, men samtidigt gav oss möjligheter till bra karakterisering från båda hållen. Vid belysning från framsidan uppnåddes 11 % verkningsgrad, medan belysning från baksidan, där elektronerna har längre avstånd till pn-övergången ledde till 6 % verkningsgrad. Noteras bör att CIGS-skiktet i denna dubbelsidiga solcell var mycket tunt, endast 250 nm. Reaktion med gallium observerades även med InO:H, men kunde till viss del begränsas med ett tunt skikt av aluminiumoxid mellan InO:H och CIGS-skiktet. En förutsättning för dessa goda resultat vara att InO:H-skiktet behöll sin transparens under processning av CIGS-skiktet, vilket vi kunde visa att det gjorde.

Arbetspaket 5. Integration och stabilitet.

I detta arbete har vi studerat hur bottencellen i en tandemsolcell presterar i ljus som filtrerats i en toppcell. En viktig fråga har varit om avsaknad av blått ljus ger en minskad verkningsgrad. Detta har visat sig inte vara fallet. För att testa stabilitet i fullt ljus för toppcellen har light-soaking, eller ljusexponering under 72 timmar i cirka 60 graders torr luft har använts. Solceller utan alkali-ytbehandling är stabila, medan solceller med alkali-ytbehandling förändras något av ljusbehandlingen. Denna leder till en ökning av spänning och fyllnadsfaktor för de ytbehandlade solcellerna, medan strömmen minskar något och sammanlagt ökar verkningsgraden. Resultaten tyder på en något ökad dopning efter ljusexponering.

Resultat

Projektet hade högt ställda mål relaterade till solceller med högt bandgap. Många av dessa mål har uppnåtts i projektet. I den administrativa bilagan finns en mer detaljerad beskrivning av mål och måluppfyllnad medan de huvudsakliga resultaten diskuteras här.

I projektet har vi utvecklat transparenta bakkontakter som fungerar för CIGS-solceller. Transparensen har varit över 90 % i det våglängdsområde som är intressant för tandemsolceller, dvs även i de infraröda våglängderna. Vi har jämfört de elektriska egenskaperna med konventionella bakkontakter av molybden. Den viktigaste skillnaden har varit att vid användandet av en molybdenkontakt bildas ett tunt lager av molybdenselenid vid bakkontakten, vilket bidrar till en bra ohmsk kontakt, men när vi använder indiumoxid reagerar syre från bakkontakten med gallium i CIGS-skiktet, varvid ett lager galliumoxid bildas vid bakkontakten. Detta skikt är kanske inte ett så stort problem, men samtidigt sker en utbytesreaktion, som leder till en minskad galliumkoncentration i själva CIGS-skiktet nära bakkontakten, vilket ger en ökad rekombination. Till viss del kan detta problem avhjälpas med att man använder ett skikt av aluminiumoxid vid bakkontakten. En bra struktur för transparenta bakkontakter är därför $\text{In}_2\text{O}_3:\text{H} - \text{Al}_2\text{O}_3$. För att tillsätta natrium, som är nödvändigt för högeffektiva CIGS-solceller har vi använt NaF som belagts ovanpå Al_2O_3 -skiktet. Med användande av transparenta bakkontakter begränsas det ljus som träffar bottencellen i en tunnfilmmodul av tandemtyp av front-glas, EVA, framkontakt, buffertskikt för toppcellen, CGS-skiktet i toppcellen och CGS-cellens transparenta bakkontakt av In_2O_3 . Med hög transparens på framkontakt och bakkontakt minimeras dessa förluster.

Genom att legera CIGS med högt bandgap med silver har vi uppnått höga verkningsgrader med flera typer av buffertskikt, både ZnSnO och CdS . Vi har inte uppnått målet på 17 % verkningsgrad med ett bandgap på mer än 1.5 eV, men vi har kommit långt, främst genom arbetet med silverlegering (ACIGS). Utan antireflexskikt har vi uppnått 15 % för ett bandgap på 1.45 eV och 17 % för 1.4 eV.

Ett mål med projektet var att uppnå 1.0 V eller mer för en kalkogenid-solcell. Detta var ett mycket högt ställt mål, eftersom det skulle utgöra världsrekord. 1.0 V uppnåddes också och detta resultat är fortfarande regerande världsrekord i spänning (och världsrekord i verkningsgrad för CGS) och har väckt stor uppmärksamhet internationellt.

En viktig del för modellering av tandemsolceller är hur bottencellen fungerar i filtrerat ljus. Bottencellen kommer inte att få mer ljus än det som släpps igenom av den struktur som beskrivs ovan. Vi har inte sett att detta varit ett stort problem. Bottencellen har, som väntat, levererat den effekt som förväntas av en solcell med halverad ljusintensitet.

Diskussion

Två resultat från projektet har lett till hög uppmärksamhet internationellt. Det första var rekordet i öppenspanning för en kalkopyrit (CuGaSe_2)-solcell. Detta rekord visade för första gången att CGS är en tänkbar toppcell även för andra typer av tandemsolceller än i kombination med en CIS-bottencell, som tidigare föreslagits. Alternativa bottenceller skulle därför kunna vara kiselbaserade, vilket öppnar nya möjligheter framåt. Att höja verkningsgrad för solceller, genom att implementera tandemkoncept är ett sätt att höja det årliga energiutbytet för solceller, vilket kan vara extra viktigt där ytan är begränsad, till exempel för byggnadsintegrering. Ju högre verkningsgrad, desto större antal kWh per år för en takyta, som upplåtits för solceller.

Det arbete med legering med silver för att tillverka $(\text{Ag,Cu})(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ (ACIGS) är det andra resultat som uppmärksammas internationellt och också öppnat nya möjligheter att nå högre verkningsgrader med höga bandgap. Att blanda in silver ger bra inverkan på verkningsgrad för höga galliuminnehåll, trots att den totala silvermängden i materialet är liten. Främst verkar silver genom att det går att få bra övergångar mellan ACIGS med högt galliuminnehåll och buffertskikt av ZnSnO eller CdS , vilket leder till öppenspanningar på upp till 860 mV och verkningsgrader på 17 % utan antireflexskikt.

Publikationslista

Nedanför presenteras de artiklar som direkt bygger på resultat i projektet. Artiklarnas innehåll beskrivs kortfattat, liksom vilket samarbete som ligger bakom artiklarna. I texten ovan refereras artiklarna med namn på förstaförfattaren följt av P och publikationsnummer.

P1. Salome, PMP; Keller, J; **Törndahl, T**; Teixeira, JP; Nicoara, N; Andrade, RR; Stroppa, DG; Gonzalez, JC; **Edoff, M**; Leitao, JP; Sadewasser, S, CdS and $\text{Zn}_{1-x}\text{Sn}_x\text{O}_y$ buffer layers for CIGS solar cells, SOLAR ENERGY MATERIALS AND SOLAR CELLS Volume: 159 Pages: 272-281 Published: JAN 2017

I denna artikel analyseras resultat från jämförelser mellan olika buffertskikt, som gjorts i samarbete med kollegor på INL i Braga, Portugal. Huvudförfattaren, Pedro Salomé är en alumn från gruppen och är numera gruppleadare på INL.

P2. Larsson, F; Nilsson, NS; **Keller, J**; Frisk, C; Kosyak, V; **Edoff, M**; **Törndahl, T**, Record 1.0 V open-circuit voltage in wide band gap chalcopyrite solar cells, PROGRESS IN PHOTOVOLTAICS Volume: 25 Issue: 9 Pages: 755-763 Published: SEP 2017

I denna artikel presenteras för första gången en CGS-solcell med 1.0 eV öppenspanning, vilket är världsrekord. Artikeln har rönt stor uppmärksamhet och Fredrik Larsson, som är doktorand har fått diplom för högt nedladdad och citerad artikel. Fredrik Larsson disputerar i september 2020.

P3. Edoff, M; Jarmar, T; Nilsson, NS; Wallin, E; Hogstrom, D; Stolt, O; Lundberg, O; Shafarman, W; Stolt, L, High V-oc in (Cu,Ag)(In,Ga)Se-2 Solar Cells, IEEE JOURNAL OF PHOTOVOLTAICS Volume: 7 Issue: 6 Pages: 1789-1794 Published: NOV 2017

Denna artikel utgör ett pionjärbete när det gäller att visa positiva effekter av legering med silver i CIGS (ACIGS), framför allt att spänningen följer bandgapet, utan att mättas vid högre bandgap. Resultaten presenterades med en muntlig presentation vid konferensen IEEE PVSC, 2017 och en full artikel publicerades sedan. Arbetet med silverinblandning i CIGS har skett i samarbete med Solibro Research AB och med Institute of Energy Conversion i Delaware, USA.

P4. Keller, J; Nilsson, NS; Aijaz, A; Riekehr, L; Kubart, T; **Edoff, M; Törndahl, T**, Using hydrogen-doped In₂O₃ films as a transparent back contact in (Ag,Cu)(In,Ga)Se-2 solar cells, PROGRESS IN PHOTOVOLTAICS Volume: 26 Issue: 3 Pages: 159-170 Published: MAR 2018

Här presenteras arbete med In₂O₃:H, tillverkat med sputtering, som är en skalbar metod. Detta material användes som bakkontakt i ACIGS-solceller. Dessa skyddades med ett tunt lager av Al₂O₃, för att förhindra bildande av gallium-oxid vid bakkontakten. Jan Keller är forskare i gruppen och har arbetat i projektet.

P5. Keller J, Chen WC, Riekehr L., Kubart T., **Törndahl T., Edoff M.**, Bifacial Cu(In,Ga)Se-2 solar cells using hydrogen-doped In₂O₃ films as a transparent back contact, PROGRESS IN PHOTOVOLTAICS Volume: 26 Issue: 10 Pages: 846-858, Published: OCT 2018

I denna artikel undersöks egenskaperna hos bakkontakten genom att solcellerna belyses både från fram och från baksidorna. CIGS-skiktet har gjorts så tunt, för att detta ska vara möjligt och en genomskinlig bakkontakt av hydrerad indiumoxid har använts. Verkningsgraden vid belysning från baksidan är ungefär hälften av den som erhålls vid belysning från framsidan. Skillnaden beror på att bakkontakten ligger långt från pn-övergången och att bakkontakten inte är optimerad. Vi visade dock att dubbelsidiga solceller kan fås att fungera.

P6. Donzel-Gargand, O; Larsson, F; Torndahl, T; Stolt, L; **Edoff, M**, Secondary phase formation and surface modification from a high dose KF-post deposition treatment of (Ag,Cu)(In,Ga)Se-2 solar cell absorbers, PROGRESS IN PHOTOVOLTAICS, vol. 27, 3, pp 220-228: 2018

Denna artikel beskriver optimering av efterbehandlingar med alkalimetaller, specifikt för ACIGS. Ytan på ACIGS har studerats med transmissionselektronmikroskopi. Olivier Donzel Gargand har varit doktorand i gruppen med specialisering mot elektronmikroskopi och disputerade 2018.

P7. Larsen, J.K., **Larsson, F., Törndahl, T.**, Saini, N., Riekehr, L., Ren, Y., Biswal, A., Hauschild, D., Weinhardt, L., Heske, C., Platzer-Björkmann, C., Cadmium Free Cu₂ZnSnS₄ Solar Cells with 9.7% Efficiency
ADVANCED ENERGY MATERIALS, Volume: 9 Issue: 21, Article Number: 1900439, Published: JUN 2019

Artikeln beskriver arbete med olika typer av buffertsikt, även ur ett grundläggande perspektiv där gränsskiktet mellan CZTS och buffertsikt studerades med hjälp av fotoelektron-spektroskopi. CZTS (utan selen) får ett icke optimalt gränsskikt med CdS som buffertsikt. Här har ZnSnO anpassats för att ge så hög spänning som möjligt, men den högsta verkningsgraden (världsrekord för CZTS vid publiceringen) uppnåddes med CdS.

P8. H Aboulfadl, **J Keller**, J Larsen, M Thuvander, L Riekehr, **M Edoff**, Microstructural Characterization of Sulfurization Effects in Cu(In,Ga)Se₂ Thin Film Solar Cells, Microscopy and Microanalysis 25 (2), 532-538, 2019

Artikeln behandlar hur inblandning med svavel påverkar ytan på CIGS-filmer. Arbetet är delvis utfört i SSF-ramprojektet och delvis i detta projekt. Mikrokaraktärisering med atomprobtomografi har använts för att påvisa effekter av sulfurerings.

P9. J Keller, OV Bilousov, E Wallin, O Lundberg, J Neerken, S Heise, **T Törndahl, M Edoff**, Effect of Cu Content on Post-Sulfurization of Cu(In,Ga)Se₂ Films and Corresponding Solar Cell Performance, Physica status solidi (a) 216 (20), 1900472, 2019

Även denna artikel baseras på resultat som delvis kommer från SSF-ramprojektet, men även resultat från detta projekt ingår och samarbete med Solibro Research AB. Det huvudsakliga arbetet är utfört av Jan Keller, men med CIGS från Solibro Research AB.

P10. Keller J, Sopiha, K.V., Stolt O., Stolt L., Persson C., Scragg J.J.S, **Törndahl, T., Edoff M.**, Wide-gap (Ag,Cu)(In,Ga)Se₂ solar cells with different buffer materials – A path to a better heterojunction. Progress in Photovoltaics, Early Access, 2020, DOI:10.1002/pip.3232

Projektledaren Marika Edoff har presenterat projektresultat vid följande tillfällen (nyaste först):

2019:

EU Photovoltaic Energy Conference, Marseille, **Keynote presentation** 2019-09-11 Marika Edoff

” Research and innovation in CIGS and its alloys – which are the next bottlenecks?”

International Union for Pure and Applied Chemistry, 100 year anniversary meeting, Paris, **invited talk**, 2019-07-09, Marika Edoff

“Thin Film Solar Cells at 23 % efficiency and above”

IEEE Photovoltaic Specialists conference, Chicago, **extended oral presentation**, 2019-06-20, Marika Edoff

“Post deposition treatments of (Ag, Cu)(In, Ga)Se₂ thin films for solar cells”

International Workshop for CIGS Technology, Paris, **Invited talk**, 2019-05-23, Marika Edoff

“High bandgap CIGS and ACIGS solar cells”

2018:

Solelmässan, Uppsala, Inbjuden talare, 2018-11-25, Marika Edoff

”Solceller av tunna filmer”

European Material Research Society, Strasbourg, **Invited talk**, 2018-06-20, Marika Edoff

“Silver diffusion and interface properties in high efficiency (Ag,Cu)(In,Ga)Se₂ solar cells”

Referenser, källor

I texten refereras dessa källor med förstaförfattaren följt av R och referensnummer.

R1. Green, M. A., Dunlop, E.D., Levi, D.H., Hohl-Ebinger, J., Yoshita, M., Ho-Baillie, A.W.Y. Solar cell efficiency tables (Version 55), Progress in Photovoltaics, vol. 28, Issue 1, pp 3-15, Jan 2020

R2. Siebentritt, S. *et al*, Heavy alkali treatment of Cu(In,Ga)Se₂ Solar Cells: Surface versus Bulk effects, Advanced Energy Materials, Article number 1903752, 2020, pp 1-15. DOI: 10.1002/aenm. 201903752

R3. H. Boyle, B. E. McCandless, W. N. Shafarman and R. W. Birkmire, Structural and optical properties of (Ag,Cu)(In,Ga)Se₂ polycrystalline thin film alloys, Journal of Applied Physics, 115, 223504 (2014)

Bilagor

Administrativ bilaga