

Energimyndighetens titel på projektet – svenska Kontakter och gränsskikt för solceller med hög verkningsgrad	
Energimyndighetens titel på projektet – engelska Contacts and interfaces for high efficiency solar cells	
Universitet/högskola/företag Uppsala universitet	Avdelning/institution Solcellsteknik/Materialvetenskap
Adress Box 534, 75121 Uppsala	
Namn på projektledare Tobias Törndahl	
Namn på ev övriga projektdeltagare Marika Edoff, Charlotte Platzer-Björkman, Natalia Martin, Fredrik Larsson, Adam Hultqvist	
Nyckelord: 5-7 st CIGS, CZTS, ALD, gränsskikt, buffert lager, in-situ	

Förord.

Projektet ”Kontakter och gränsskikt för solceller med hög verkningsgrad” har främst finansierats via detta anslag från Energimyndigheten. Övrig medfinansiering är från det strategiska forskningsområdet STandUP, och från företaget Solibro Research AB som bidragit med CIGS material med olika ytbehandlingar av alkalimetaller. Ingen referensgrupp finns för projektet.

Innehållsförteckning

Sammanfattning	1
Summary	2
Inledning/Bakgrund	2
Genomförande	5
Diskussion.....	9
Publikationslista.....	9
Referenser, källor.....	12
Bilagor	12

Sammanfattning

I detta projekt inom programmet El från solen har vi studerat tunnfilmssolceller med ljusabsorberande skikt av (Ag,Cu)(In,Ga)Se₂ (CIGS) och Cu₂ZnSnS₄ (CZTS) där målen var att signifikant förbättra verkningsgraden och minska produktionskostnaderna för dessa solceller. Fokus låg på att studera det viktiga gränsskiktet, pn-övergången, mellan CIGS/CZTS och buffertskikt genom att utveckla nya förbättrade kadmiumfria buffertmaterial med den vakuumbaserade tekniken Atomlagerdeponering (ALD).

Inom projektet har en avhandling “Window layer structures for chalcopyrite thin-film solar cells” av Fredrik Larsson publicerats, där nya ternära ALD processer utvecklats, och tillämpats tillsammans med tidigare buffertmaterial på alkalibehandlade CIGS ytor. Två nya ALD-processer var Sn-Ga-O och Sn-Ge-O där bandgapet kunde ändras i ett intervall (och elektronaffiniteten) som översteg 1,0 eV med bibehållen hög transparens. Sn-Ga-O processen är väl karakteriserad och resultaten publicerade i flera tidskrifter. I en publicerad studie för KF-CIGS erhöles 18,0% för ALD Zn-O-S och 17,8% för CdS (utan AR). För HCl etsad RbF-ACIGS erhöles 18,6% för ALD Zn-Sn-O jämfört med 18,5% för CdS. (utan AR). Den bästa verkningsgraden tillsammans med Solibro Research AB blev 20,6% för ett dubbellager av ALD Zn-O-S/Zn-Mg-O på RbF-ACIGS (AR och litografgrid).

Olika passiveringslager har utvärderats på CIGS där GaO_x visat på bättre resultat i PL-mätningar än för CdS. Genom att belägga ett tunt lager med 10 ALD cykler GaO_x innan beläggning av ALD Sn-Ga-O ökade V_{oc} i medel med 31 mV för solcellerna och totalt minskades V_{oc} skillnaden till CdS till under 20 mV, vilket är ett bra resultat.

Gränsskiktet CZTS/buffert har studerats där forskningsgruppen börjat använda synkrotron-baserade analysmetoder. Främst har inverkan av oxidation av CZTS-ytan innan buffertbeläggning undersökts. I projektet har en verkningsgrad på 9,7% för CZTS/Zn-Sn-O erhållits jämfört med 8,4% för CZTS/CdS, vilket var världsrekord för kadmiumfria material vid publikationstillfället.

Från projektet finns ytterligare metodutveckling med ALD, där ny kunskap och nya material från projektet kan användas för andra typer av solcellstrukturer som perovskiter. För framtida utveckling av CIGS/CZTS solceller är olika passiveringsskikt med area selektiv tillväxt ett intressant område med stor utvecklingspotential. Nya metoder för alkalibehandlad CIGS behöver också utvecklas för att vakuumbaserade buffertmetoder ska kunna användas effektivt inom solcellsindustrin.

Summary

In this project within the program “El från solen”, we have studied thin-film solar cells with light-absorbing layers of $(\text{Ag,Cu})(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ (CIGS) and $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ (CZTS), where the goals were to significantly improve the efficiency and to reduce production costs. The focus was on studying the important interface, the pn-junction, between CIGS/CZTS and the buffer layers by developing new improved cadmium-free buffer materials with the vacuum-based technology Atomic Layer Deposition (ALD).

Within the project, a PhD thesis “Window layer structures for chalcopyrite thin-film solar cells” by Fredrik Larsson has been published, where new ternary ALD processes were developed, and applied together with previous buffer materials on alkali-treated CIGS surfaces. Two new ALD processes were developed, Sn-Ga-O and Sn-Ge-O, where the bandgap could be changed in a range (and electron affinity) that exceeded 1.0 eV while maintaining high transparency. The Sn-Ga-O

process was well characterized and the results published in scientific journals. In a published study for KF-CIGS, 18.0% conversion efficiency was obtained for ALD Zn-O-S and 17.8% for CdS (without AR). For HCl etched RbF-ACIGS, 18.6% was obtained for ALD Zn-Sn-O compared to 18.5% for CdS (without AR). The best efficiency together with Solibro Research AB was 20.6% for a double layer of ALD Zn-O-S/Zn-Mg-O on RbF-ACIGS (AR and lithography grid).

Different passivation layers were evaluated for CIGS, where GaO_x showed better results in PL measurements than for CdS. By coating a thin layer of 10 ALD cycles of GaO_x before coating ALD Sn-Ga-O, V_{oc} increased on average by 31 mV for the solar cells and in total the V_{oc} difference to CdS was reduced to below 20 mV, which is a good result.

The CZTS/buffer interface was studied, where the research group has started to use synchrotron-based analysis methods. Mainly the effect of oxidation of the CZTS surface before buffer synthesis was investigated. In the project, an efficiency of 9.7% for CZTS/Zn-Sn-O has been obtained compared to 8.4% for CZTS/CdS, which was a world record for cadmium-free materials at the time of publication.

From the project there is further method development with ALD, where new knowledge and new materials from the project can be used for other types of solar cell structures such as perovskites. For future development of CIGS/CZTS solar cells, different passivation layers with area selective growth is an interesting area with great potential. New methods for alkali-treated CIGS is also needed in order for vacuum-based buffer methods to be used effectively in the photovoltaic industry.

Inledning/Bakgrund

CIGS och CZTS är solceller av tunnfilmstyp där verkningsgrader på 23,4 respektive 12,6 % uppnåtts [1]. Den totala tjockleken hos solcellerna uppgår endast till ett fåtal mikrometer och strukturen innehåller flera olika lager. Därför är det viktigt att olika gränsskikt är av hög kvalitet hos tunnfilmssolceller för att verkningsgraden ska bli hög. Det viktigaste gränsskiktet är det mellan CIGS/CZTS och ett så kallat buffertlager vilka tillsammans bildar solcellens pn-övergång. Enligt teorin utvecklad av Shockley and Queisser [2] har dagens bästa CIGS solceller fortfarande relativa förluster i öppenspanning runt 15 % och fyllnadsfaktor runt 9 % jämfört med en ”perfekt solcell” utan förluster. Det mesta av dessa förluster kan härledas till kvaliteten på pn-övergången och bulkegenskaper hos CIGS-materialet. Enligt samma beräkningar förlorar de bästa solcellerna även 15 % i kortslutningsström. Dessa förluster beror nästan uteslutande på absorptions- och reflektionsförluster i solcellernas fönsterlagerstruktur. En fönsterlagerstruktur för CIGS/CZTS består vanligtvis av tre lager, CdS/ZnO/ZnO:Al, där CdS är ett buffertlager och ZnO:Al är en transparent ledande oxid som fungerar som framkontakt. Det vanligaste buffertmaterialet av idag för CIGS/CZTS är våtkemisk (CBD) deponering av CdS även om ett nyare världsrekord har ett CBD Zn-O-S buffertlager. Kadmium är klassificerat som giftigt av bland annat EU och processerna för tillväxt av CdS

genererar stora mängder restprodukter. För CdS buffertlager gäller oftast att öppenspanningen för CIGS/CdS fortfarande är 20-30 mV högre än för alternativa buffertlager men att fotoströmmen blir lägre på grund av en del absorption av blått ljus i CdS-skiktet (bandgap $\sim 2,4$ eV). Olika ytbehandlingar (PDT) har nyligen visat sig påverka CIGS solcellers verkningsgrad stort där speciellt behandling av CIGS-ytan med alkalisalter [3] lett till runt 2 procentenheter högre verkningsgrad. Genom att finna ett ersättningsmaterial till CdS som har lika hög kvalitet på gränsskiktet absorberator/buffert som för CdS kan därför verkningsgraden höjas markant ($\sim 1\%$ absolut). Buffertlagret är den enda process i solcellstrukturen som inte beläggs under vakuum och med tillgång till en vakuumbaserad process kan produktionsfördelar erhållas.

Projektet strävade därför efter att göra CIGS/CZTS-baserade solceller mer miljövänliga genom att ersätta de kadmiumbaserade lager som oftast används i dagens strukturer med alternativa material av mindre giftighetsgrad. En i projektet använd CIGS struktur visas i figur 1 där buffertlagren i belagts med den vakuumbaserade metoden Atomlagerdeponering (ALD).



Figur 1: CIGS solcellsstruktur med ternära ALD buffertmaterial för god kontroll av optiska och elektroniska egenskaper. Genom att använda ALD buffertlager gavs möjligheten att ta bort det intrinsiska ZnO lagret från solcellstrukturen.

Det övergripande målet för projektet var att höja solcellernas verkningsgrad genom att studera hur kvalitén på gränsskiktet för pn-övergången mellan CIGS/buffert och CZTS/buffert kunde förbättras. Speciellt undersöktes hur gränsskiktet påverkades av olika ytbehandlingar och processparametrar för beläggning av buffertlager, där det fanns mängder med obesvarade frågor, speciellt för alternativa vakuumbaserade buffertmaterial. Effekten av kalium eller andra alkalimetaller för alternativa buffertlager och processer utforskades i projektet då det var känt att vakuumbaserade metoder som ALD har haft svårt att nå samma verkningsgrad som för CBD-CdS. För CZTS studerades speciellt materialets stabilitet mot alternativa buffertprocesser. Eftersom CZTS relativt lätt sönderfaller utfördes försök som stabiliserade dess yta. Inom projektet användes beläggningsmetoden ALD vilket var den vakuumbaserade teknik som uppvisat högst verkningsgrad för CIGS solceller. För att öka förståelsen om ALD processer

studerades filmtillväxten under tillväxt med hjälp av en metod som byggde på vibrationer hos en kvartkristall (QCM). Massupplösningen för QCM försöken var på ng/cm^2 -nivå vilket motsvarade delar av ett monolager av material på en yta. Genom att utföra studier på QCM-kristaller belagda med CIGS och CZTS kunde den viktiga processen för skapandet av solcellernas pn-övergång studeras tillsammans med olika ytkänsliga analysmetoder.

Genomförande

Projektet har utförts på Avdelningen för solcellsteknik vid Uppsala universitet under tre år från 2017 till 2020, där en stor del av forskningsgruppen varit involverad i olika delar av projektet. Tobias Törndahl har varit projektledare och delvis finansierats inom projektet tillsammans med Fredrik Larsson som doktorand samt två forskare, Natalia Martin och Adam Hultqvist. För att studera gränsskikt och bulkegenskaper för olika solcellsstrukturer har Natalia Martin rekryterats till forskargruppen genom detta projekt. Natalia är expert på synkrotronljusbaserade analysmetoder vilka är väldigt kraftfulla för att mäta flertalet intressanta materialegenskaper. Totalt har forskningsgruppen fått flera stråltidsansökningar beviljade och dess medlemmar besökt ett antal anläggningar för att utföra mätningar på olika solcellsstrukturer som CZTS, CIGS och perovskiter. Flera grupper/företag utanför forskningsgruppen har bidragit till projektets utveckling genom sampublicationer och gemensamt utvecklingsarbete. Främst har forskningsgruppen samarbetat med Solibro Research AB som tillhandahållit alkalibehandlat CIGS material av hög kvalitet för projektets buffertstudier. Edgar Mijangos, anställd på Solibro Research AB, har jobbat deltid i forskningsgruppens lokaler i Ångströmlaboratoriets renrum. Samarbete med andra universitetsgrupper har framför allt skett inom området för gränsskiktsskarakterisering med olika synkrotronljusmetoder. Till viss del har forskningsmedel från STandUP använts som medfinansiering i projektet och projektet har även använt resultat från SSF-ramprojektet "Bandgap Grading in Thin Film Solar Cells".

Tyngdpunkten för projektet var på forskning och utveckling av nya kadmiumfria buffertmaterial för solceller med hög verkningsgrad, samt förståelse hur tillväxt av dessa påverkar gränssytan av främst två materialfamiljer, CIGS och CZTS. Projektet delades in i tre huvudområden:

Arbetspaket 1: Syntes och karakterisering av nya kontaktmaterial

Arbetspaket 2: Buffertlager och gränsskikt för CIGS solceller

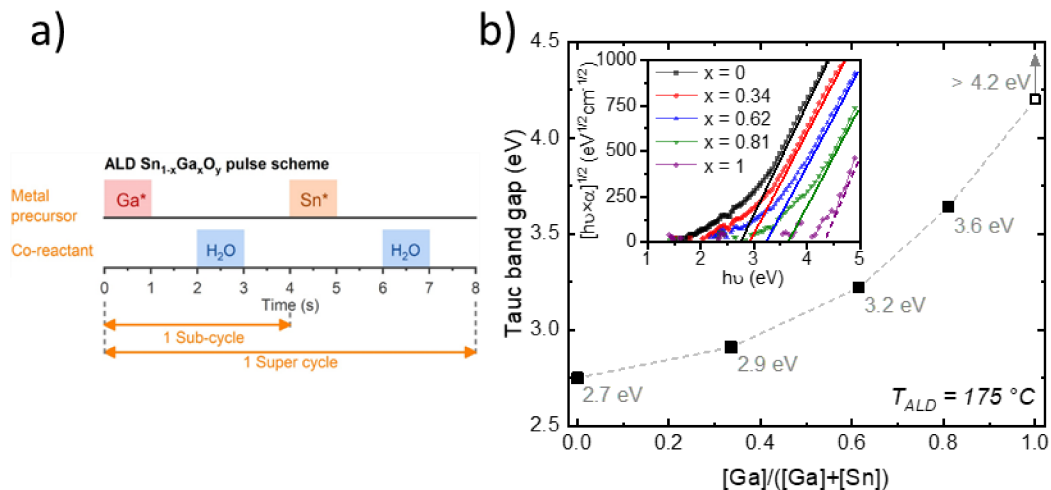
Arbetspaket 3: Buffertlager och gränsskikt för CZTS solceller

Resultat

Arbetspaket 1: Syntes och karakterisering av nya kontaktmaterial

För att realisera kadmiumfria solceller med hög verkningsgrad behövs buffertmaterial med optimerade materialegenskaper. I projektet utvecklades därför

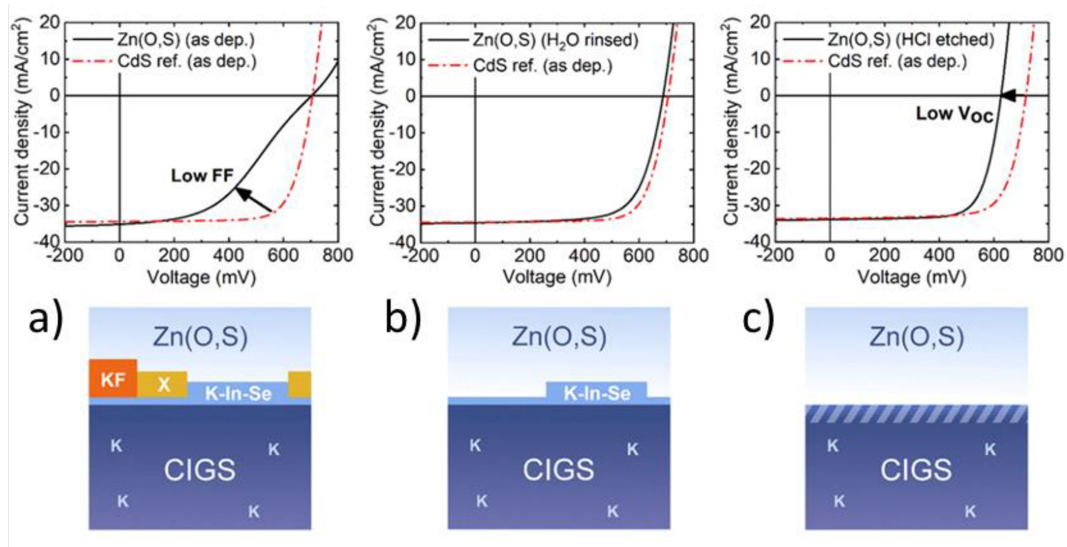
nya material med väl bestämda optiska och elektroniska egenskaper. Speciellt hög transparens i det synliga området och anpassningsbar elektronaffinitet för matchning till CIGS/CZTS bandstruktur i solcellerna var viktiga egenskaper att kontrollera. För att optimera dessa egenskaper användes ternära oxidfaser med högt bandgap, syntetiserade med ALD. Tidigare studier har visat att inhomogenitet i kontaktmaterialet kan påverka solcellernas verkningsgrad negativt och minska möjligheten att optimera bandstrukturen för att passa solcellsmaterial av CIGS- och CZTS-typ med högt bandgap. För att minska dessa inhomogeniteter utvecklades för första gången helt amorfa oxider som kontaktmaterial, vilka avsaknade korngränser. Två nya material, Sn-Ga-O [A2] och Sn-Ge-O [opubl.], syntetiserades och karakteriserades i projektet med hjälp av en ALD super-cykel ansats, där precis kontroll av metallkationsammansättning och/eller beläggningsstemperatur gav upphov till ett väl kontrollerbart optiskt bandgap (från 2,7 eV för SnO_x till > 4,2 eV för GaO_x) och hög transparens (> 90%). I figur 2 visas en super-cykel för ALD Sn-Ga-O tillsammans med variationen i optiskt bandgap som funktion av metallkationsammansättning för Sn-Ga-O.



Figur 2. a) ALD pulsschema för en supercykel av Sn-Ga-O med pulssammansättningen 1:1. b) Optiskt bandgap för Sn-Ga-O som funktion av uppmätt metallkationsammansättning vid en beläggningsstemperatur på 175 °C.

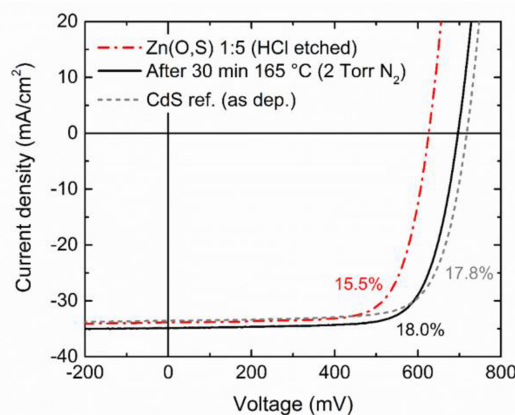
Arbetspaket 2: Buffertlager och gränsskikt för CIGS solceller

För att studera varför vakuumbaserade buffertprocesser, till exempel buffertskikt belagda med ALD, ger lägre verkningsgrad på olika alkalibehandlade CIGS ytor än för våtkemiska metoder har tillväxten av dessa lager studerats. Under projektet har nya buffertmaterial från arbetspaket 1 använts tillsammans med tidigare utvecklade ALD processer inom forskningsgruppen som Zn-O-S, Zn-Mg-O och Zn-Sn-O. I ett första steg studerades tillväxten av ALD Zn-O-S på KF-CIGS [A1], där resultat från ytanalys med XPS och IV-data kan ses i figur 3.



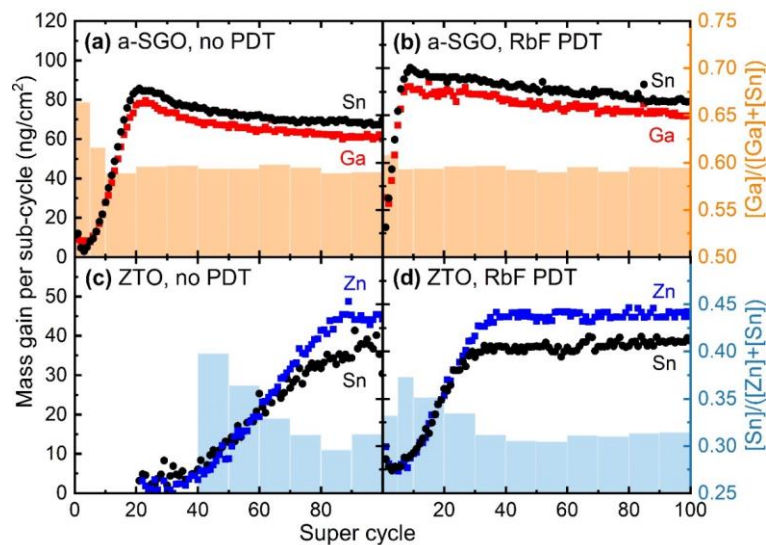
Figur 3. a) ALD Zn-O-S direktbelagd på KF-CIGS, KF och salter innehållande Ga (X) fanns kvar i gränsskiktet, b) KF-CIGS behandlad i vatten innan ALD Zn-O-S och c) KF-CIGS etsad i 2 M HCl innan ALD Zn-O-S. IV-data för ALD Zn-O-S är jämförd med CdS referenser.

I figur 3a ses förklaringen till att vakuumbaserade buffertprocesser inte fungerar för alkalibehandlad CIGS, på grund av salter i gränsskiktet CIGS/buffert, vilket ledde till kraftigt reducerad FF. Dessa salter var vattenlösliga varvid en våtkemisk behandling innan process av buffert, precis som för CdS, endast lämnar ett K-In-Se lager på CIGS ytan efter PDT (figur 3b). Detta gav högre verkningsgrad i form av ökad V_{oc} jämfört med CIGS utan PDT. Om K-In-Se skiktet etsas bort i saltsyra försvinner effekten av PDT hos solcellerna, figur 3c. Liknande verkningsgrad för ALD Zn-O-S som för CdS erhöles genom att värmebehandla en etsad CIGS yta efter beläggning av buffert, vilket visade att ökningen av verkningsgrad inte bara beror på K-In-Se lagret som formats under PDT processen, se figur 4.



Figur 4. IV-kurvor för HCl etsad och senare värmebehandlad KF-CIGS för ALD Zn-O-S jämfört med CdS referens.

Det bästa resultat för det nya buffertmaterialet Sn-Ga-O blev 17,0% för RBF-ACIGS [A6]. I studien observerades även en höjning av V_{oc} med 30 mV genom att använda ett nanometertjockt passiveringslager av ALD GaO_x . Inom projektet har även en metodutveckling av ALD tillväxt på CIGS ytor studerats in-situ genom att belägga QCM-kristaller med CIGS. Detta gör att massändringen på CIGS ytan kan följas i realtid när ALD processen startas. Resultat från en tillväxtstudie för det nya buffertmaterialet Sn-Ga-O tillsammans med Zn-Sn-O på ACIGS med och utan RbF PDT visas i figur 5 [A5]. Resultatet visade att skillnader i ytkemi för ALD processerna gav ett Ga-rikt gränsskikt för Sn-Ga-O (SGO) och ett Sn-rikt gränsskikt för Zn-Sn-O (ZTO), vilket kan påverka solcellernas elektriska egenskaper.

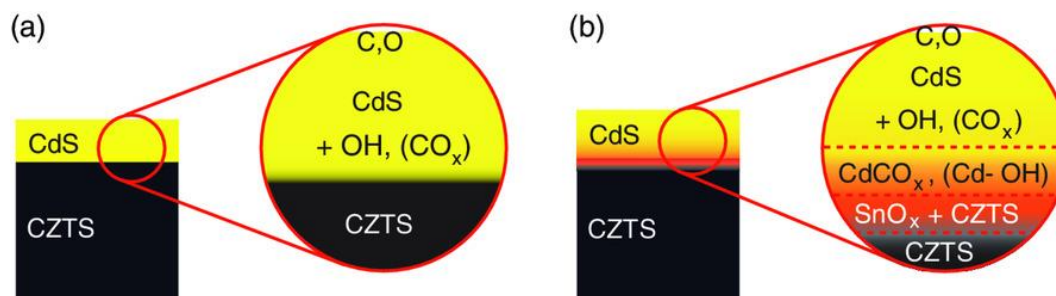


Figur 5. Massändring med QCM för GaO_x , SnO_x och ZnO cykler i en supercykel ansats för tillväxt av ALD Sn-Ga-O och Zn-Sn-O. Pulskvot $GaO_x/ZnO:SnO_x$ 1:1.

Arbetspaket 3: Buffertlager och gränsskikt för CZTS solceller

Eftersom CZTS är ett mindre stabilt material än CIGS finns en större drivkraft att skapa sekundära faser vid gränsskiktet CZTS/buffert. Det är därför viktigt att förstå hur detta gränsskikt uppstår och hur det kan förbättras för att öka verkningsgraden hos CZTS solceller. Till CZTS solceller i detta arbetspaket användes främst ALD Zn-Sn-O som tidigare visat sig ge hög verkningsgrad för CZTS innehållande svavel med ett bandgap runt 1,5 eV.

Som bäst erhöles en verkningsgrad på 9,7% för Zn-Sn-O jämfört med 8,4% CdS för CZTS solceller [A3]. Inom studien observerades att värmebehandling av CZTS i med syrgas ledde till oxidering av CZTS ytan och ökad verkningsgrad för motsvarande solceller. Gränsskiktet CZTS/buffert studerades med HAXPES vid synkrotronen Soleil i Frankrike där en modell av gränsskiktet CZTS/CdS visas i figur 6. Den främsta produkten i gränsskiktet av oxidationen var bildandet av SnO_x .



Figur 6: En modell an gränsskiktet CZTS/CdS från HAXPES mätningar. a) Utan och b) med värmebehandling i syrerik atmosfär.

Diskussion

I ett bredare perspektiv har projektet avancerat utvecklingen av kontaktmaterial för CIGS och CZTS solceller. Förståelse för hur gränsskiktet absorberar/buffert uppstår och påverkar solcellernas elektriska egenskaper har ökat. Nya material och karakteriseringsmetodik från projektet kan användas för vidare utveckling av CIGS/CZTS solceller i framtiden, speciellt för högbandgapsmaterial där ALD skikt visat sig leda till verkningsgrader på världsrekordnivå. Projektets kontaktmaterial kan också användas i andra solcellstrukturer såsom perovskitmaterial.

Speciellt det påbörjade arbetet med passiveringslager är viktigt för fortsatt förbättring verkningsgraden i olika solcellstyper. Ett exempel där passiveringslager med ALD används i storskalig industriell produktion är Al_2O_3 för bakkontaktspassivering av kisel-solceller.

För att fortsätta förbättra verkningsgraden för alkalibehandlade CIGS solceller med vakuumbaserade buffertmaterial behövs nya sätt att tillsätta alkalimetaller i CIGS processen som inte leder till att en våtkemisk behandling behövs.

Publikationslista

Nedan följer en publikationslista innehållande en avhandling, sju artiklar och åtta presentationer som utförts med stöd av projektet. Till de publicerade artiklarna ges en kortare sammanfattning.

Avhandling:

“Window layer structures for chalcopyrite thin-film solar cells”

Fredrik Larsson

Digital Comprehensive Summaries of Uppsala Dissertations from the Faculty of Science and Technology 1951. Uppsala: Acta Universitatis Upsaliensis, 2020., s. 110. ISBN: 978-91-513-0984-2.

Publicerade artiklar inom projektet (nyast först):

A7. "SnO_x Atomic layer deposition on bare perovskite - An investigation of initial growth dynamics, interface chemistry, and solar cell performance"

A. Hultqvist, T. J. Jacobsson, S. Svanström, M. Edoff, U. B. Cappel, H. Rensmo, E.M. J. Johansson, G. Boschloo, and T. Törndahl, ACS Appl. Energy Mater., (2021), accepted.

Artikeln undersöker effekten av direktbeläggning av ALD SnO_x på perovskitmaterial. Gränsskikt studeras med in-situ metoder som QCM och genom karakterisering med synkrotronljus (SOXPES/HAXPES). Huvudresultatet visar att källmolekyler i ALD reagerar med perovskiten och bildar ofördelaktiga gränsskikt för solceller. Uppsatsen är ett samarbete mellan tre avdelningar vid Uppsala universitet.

A6. "Amorphous tin-gallium oxide buffer layers in (Ag,Cu)(In,Ga)Se₂ solar cells"

F. Larsson, J. Keller, J. Olsson, O. Donzel-Gargand, N. M. Martin, M. Edoff, and T. Törndahl, Sol. Energy Mater. Sol. Cells, 215 (2020) 110647.

Artikeln utvärderar ett nyutvecklat buffertmaterial, ALD Sn-Ga-O, för ACIGS solceller. Resultatet visar solceller på upp till 17,0% verkningsgrad med hjälp av GaO_x passiveringslager.

A5. "Atomic layer deposition of ternary compounds on Cu(In,Ga)Se₂: An in-situ quartz crystal microbalance study"

F. Larsson, L. Stolt, A. Hultqvist, M. Edoff, J. Keller, and T. Törndahl, ACS Appl. Energy Mater., 3 (2020) 7208.

Artikeln studerar tillväxt av ALD Zn-Sn-O och Sn-Ga-O på olika ACIGS ytor genom att förånga ACIGS på QCM kristaller. Uppsatsen är en metodutveckling av QCM tekniken för ternära föreningar med ALD och huvudresultatet visar att en variation i sammansättning i ALD bufferten närmast ACIGS ytan beroende på förändringar i ytkemi.

A4. "Passivation of CdS/Cu₂ZnSnS₄ interface from surface treatments of Kesterite-based thin-film solar cells"

N. M. Martin, C. Platzer-Björkman, K. Simonov, H. Rensmo, and T. Törndahl, Phys. Status Solidi B, 257 (2020) 2000308.

Artikeln studerar verkningsgradsvinster hos CZTS solceller genom att oxidera dessa innan buffertbeläggning. Gränsskiktet studeras med synkrotronljus genom HAXPES. Vid oxidering av CZTS ytan bildas främst SnO_x vid gränsskiktet. Uppsatsen är ett samarbete mellan två avdelningar vid Uppsala universitet.

A3. "Cadmium free Cu₂ZnSnS₄ solar cells with 9.7% efficiency"

J. K. Larsen, F. Larsson, T. Törndahl, N. Saini, L. Riekehr, Y. Ren, A. Biswal, D. Hauschild, L. Weinhardt, C. Heske, and C. Platzer-Björkman, Adv. Energy Mater., 9 (2019) 1900439.

Artikeln visar hög verkningsgrad för ALD Zn-Sn-O på CZTS med högt bandgap, jämfört med 8,4% för en konventionell CdS buffert. Uppsatsen är ett samarbete med ett SSF ramprojekt inom forskningsgruppen, och även med internationella forskargrupper inom synkrotronljusmätningar.

A2. "Atomic layer deposition of amorphous tin-gallium oxide films"

F. Larsson, J. Keller, D. Primetzhofer, L. Riekehr, M. Edoff, and T. Törndahl, J. Vac. Sci. Technol. A, 37 (2019) 030906.

Artikeln beskriver processutvecklingen av ALD Sn-Ga-O med avseende på ALD processdynamik och omfattande materialkaraktärisering av bland annat sammansättning och optiska egenskaper.

A1. "Atomic layer deposition of Zn(O,S) buffer layers for Cu(In,Ga)Se₂ solar cells with KF post-deposition treatment"

F. Larsson, O. Donzel-Gargand, J. Keller, M. Edoff, and T. Törndahl, Sol. Energy Mater. Sol. Cells, 183 (2018) 8.

Artikeln studerar effekten av ALD tillväxt av ALD Zn-O-S på CIGS ytor behandlade med KF. Gränsskikt och solcellsegenskaper undersöks som funktion av olika etsningar och värmebehandlingar. Detta är ett komplext problem där framför allt bildandet av nya föreningar som K-In-Se och distribution av alkalimetaller påvisas. Solceller med 18,0% verkningsgrad erhålls.

Presentationer av personer anställda inom projektet (nyast först):

"ALD for photovoltaic applications"

Invited presentation, Tobias Törndahl, ALD for Industry, 2-3 December 2020, online conference.

"Investigating the reaction chemistry of Atomic layer deposited SnO_x on Perovskite using in-situ quartz crystal microbalance"

Oral presentation, Adam Hultqvist, ALD/ALE 2020 Virtual Meeting, 29 June - 1 July 2020, online conference.

"The effect of surface treatments on CZTS-based thin film solar cells studied by hard X-ray photoelectron spectroscopy"

Poster presentation, Natalia Martin, Virtual Chalcogenide PV Conference, 25-27 May 2020, online conference.

"Contacts and interfaces for thin film photovoltaics"

Invited presentation, Tobias Törndahl, Workshop on CVD/ALD, 5 December 2019, Linköping, Sweden.

"Contacts and interfaces for high efficiency solar cells"

Oral presentation, Tobias Törndahl, Solforum, 8-9 October 2019, Göteborg, Sweden.

"Contact materials for thin film chalcogenide solar cells"

Invited presentation, Tobias Törndahl, Global photovoltaic conference, 13-15 Mars 2019, Gwangju, South Korea.

”Atomic layer deposition of amorphous tin-gallium oxide for applications in thin film solar cells”

Oral presentation, Fredrik Larsson, Fall E-MRS, 17-20 September 2018, Warsaw, Poland.

“Influence of KF-PDT for CIGS devices with ALD grown Zn(O,S) buffer layers”

Oral presentation, Fredrik Larsson, Spring E-MRS, 18-22 June 2018, Strasbourg, France.

Referenser, källor

[1] M. A. Green, et al, Prog. Photovolt: Res. Appl., 29 (2021) 3.

[2] W. Shockley and H. J. Queisser, J. Appl. Phys., 32 (1961) 510.

[3] A. Chirilă, et al, Nature Materials, 12 (2013) 1107.

Bilagor

Administrativ bilaga.

Avhandling: Fredrik Larsson