

Solarne tehnologije i komponente

Lekcija 1: UVOD U FOTONAPONSKE TEHNOLOGIJE

S1 (slajd 1.)

Tehnologije koje se koriste za proizvodnju solarnih ćelija i fotonaponskih modula neprekidno napreduju, pre svega kada se radi o proizvodnji visoko efikasnih i fleksibilnih solarnih panela. U okviru ovog kursa ćemo se upoznati sa PV tehnologijama koje su trenutno aktuelne. Stećićete detaljna znanja o kristalnim solarnim ćelijama na bazi silicijuma (koje čine 90% tržišta), kao i o ostalim tehnologijama, poput CdTe, CIGS i Perovskites.

Ovaj kurs, SOLARNE TEHNOLOGIJE I KOMPONENTE daje odgovore na pitanja:

Kako se prave solarne ćelije?

Koje su to tehnologije koje imaju potencijal da budu vodeće u budućnosti?

Ovaj kurs je deo programa Master akademskih studija na studijskom programu Elektronika i mikrosistemi na Elektronskom fakultetu u Nišu, i osmišljen je da pokrije sve fizičke i inženjerske aspekte fotonaponskih sistema, počev od fotonaponske konverzije, pa preko tehnologija do fotonaponskih sistema. Nastavak ovog kursa je kurs PROJEKTOVANJE FOTONAPONSKIH SISTEMA, koji je u II semestru i koji se konkretno bavi PV sistemima, njihovom projektovanjem i pravilnim izborom komponenata sistema.

S2

Ovaj kurs započinjemo kratkim uvodom. Pre nego što započnemo sa konkretnim tehnologijama proizvodnje i projektovanjem kristalnih silicijumskih solarnih ćelija, prvo je neophodno dobiti predstavu o različitim dostupnim tehnologijama, koji se materijali koriste za ove tehnologije i koliko efikasno i kako solarne ćelije rade?

Takođe, predstavitićemo dizajn konvencionalne solarne ćelije i objasniti mehanizme gubitaka koji se javljaju u svim vrstama solarnih ćelija. Ovo je od velike važnosti za razumevanje razmatranja dizajna svake od PV tehnologija o kojima će kasnije biti reči u ovom kursu.

Počinjemo, zaronite i uživajte u fotonaponskim tehnologijama! Dobrodošli na prvo predavanje kursa Solarne tehnologije i komponente - STK.

Na ovom kursu ćete mnogo naučiti o dizajnu, karakteristikama, realizaciji i karakterizaciji različitih PV tehnologija.

S3

Periodni sistem elemenata

S4

Kao što je već objašnjeno kursu Osnove fotonaponske konverzije, fotonaponska konverzija, tj pretvaranje solarne energije u električnu, se javlja pri stvaranju razlike potencijala na spoju dva različita

poluprovodnička materijala (n- i p-tip). Poluprovodnik je materijal čiji je spoljni elektronski omotač, koji se naziva valentna zona, polu-pun, na primeru silicijuma: ima 4 valentna elektrona.

S5

Provodni materijali imaju samo jedan ili dva valentna elektrona u spoljašnjem omotaču. Na primer, materijali grupe 1, bakar, srebro i zlato, su provodnici.

S6

S druge strane, izolatori, poput helijuma i argona, koji pripadaju grupi 8, imaju potpuno ispunjen spoljašnji omotač, sa svim valentnim elektronima koji su čvrsto povezani.

S7

Između provodnika i izolatora se nalaze poluprovodnici. Različite PV tehnologije o kojima ćemo razgovarati na ovom kursu realizovane su na poluprovodničkom materijalu koji se u solarnoj ćeliji koristi kao apsorpcioni sloj. Tačno u sredini se nalazi 4. grupa elemenata u kojoj se nalazi silicijum. Prva uspešna solarna ćelija napravljena je od kristalnog silicijuma, koji je i dalje najčešće korišćen PV materijal.

S8

U tehnologijama koje se baziraju na kristalnom silicijumu, bor i fosfor se koriste za dopranje poluprovodnika, azot i kiseonik se koriste za slojeve hemijske pasivizacije, dok se aluminijum uglavnom koristi za formiranje kontakata (elektrode).

S9

Pa zašto je ovo važno? Materijali koji se koriste u proizvodnji solarnih ćelija bi trebalo da budu netoksični, jeftini i da ih ima u izobilju. Pogledajmo zato koliko ima pojedinih elemenata u prirodi. Na ovom grafikonu, y-osa pokazuje broj atoma nekih elemenata na milion atoma silicijuma u zemljinoj kori. Osa x prikazuje atomski broj, koji je u stvari broj protona u jezgri atoma.

S10

Vidi se da su silicijum i kiseonik najzastupljeniji elementi, dok je iridijum najređi element. Na grafikonu su označene različite grupe elemenata. Elementa koji formiraju kamen, stene, ima najviše (zelena boja). Sa povećanjem atomskog broja, elementi postaju sve teži, i ima ih sve manje. Najređi metali su označeni žutom površinom. Glavni industrijski metali su zaokruženi crvenom bojom. Proizvodnja ovih elemenata je na nivou od najmanje 30 miliona kilograma godišnje. Plemeniti metali su zaokruženi ljubičastom bojom. Ovi elementi su retki i veoma skupi. Konačno, tu su retke zemlje, zaokružene plavom bojom.

S11

Pa pogledajmo kakva je situacija sa elementima koji se koriste u proizvodnji solarnih ćelija koje se baziraju na kristalnom silicijumu? Samo da bismo dobili predstvu o relativnom izobilju elemenata koji se koriste u ovoj tehnologiji, možemo povući proizvoljnu crvenu liniju na 1 atom na 1 milion atoma silicijuma.

Vidimo da su svi elementi koji se koriste za ovim tehnologijama znatno iznad ove linije i da nijedan od njih nije toksičan, redak ili dragocen. To je jedan od glavnih razloga zašto je trenutno kristalni silicijum dominantna tehnologija na tržištu.

Istraživanje i razvoj tehnologije koja se bazira na kristalnom silicijumu (c-Si) traje decenijama.

S12

Ovo je čuvena tabela Nacionalne laboratorije za obnovljivu energiju SAD-a (National Renewable Energy Laboratory of the US), koja prikazuje evoluciju najboljih ostvarenih efikasnosti solarnih ćelija u laboratorijskim uslovima. Rekordna efikasnost solarne ćelije koja se bazira na monokristalnom silicijumu porasla je sa oko 14% 1975. godine, na trenutni rekord od 26,6% Kaneke, za naprednu kristalnu silicijumsku solarnu ćeliju bez koncentratora.

Uprkos neverovatnom napretku ove tehnologije, potraga za jeftinijim tehnologijama za proizvodnju solarnih ćelija navela je istraživače da istražuju alternativne tehnologije. Diskusiju o različitim PV tehnologijama ćemo nastaviti na sledećem slajdu, gde ćemo analizirati tankoslojne tehnologije za proizvodnju solarnih ćelija.

S13

U prethodnim slajdovima smo započeli diskusiju o različitim PV tehnologijama. Razgovarali smo o elementima koji se koriste za proizvodnju solarnih ćelija koje baziraju na kristalnom silicijumu, a razmatrali smo i efikasnosti tako dobijenih solarnih ćelija.

Sada nastavljamo sa tankoslojnim tehnologijama (tehnologijama tankog filma). Tankoslojne solarne ćelije su napravljene od slojeva (filmova) koji su mnogo tanji od slojeva koje čine osnovu za prvu generaciju PV ćelija i zato se za njihovu proizvodnju koristi mnogo manje materijala. Tehnike obrade (proces) koje se za proizvodnju tankoslojnih solarnih ćelija se veoma se razlikuju od procesa koji se koriste za proizvodnju c-Si solarnih ćelija. Očekivalo se da će tankoslojne solarne ćelije postati mnogo jeftinije od solarnih ćelija prve generacije. Međutim, zbog trenutnog pada cena solarnih ćelija na c-Si, većina tankoslojnih tehnologija i solarnih ćelija još uvek nije postala ekonomski održiva.

S14

O svim konceptima i tehnologijama koje ovde navodimo ćemo detaljno razgovarati kasnije tokom kursa. Počinjemo sa tankoslojnim silicijumom. Važno je napomenuti da umesto kristalne silicijumske structure, prve generacije PV tehnologije, tankoslojni silicijum ima amorfnu strukturu.

S15

Ove amorfne silicijumske solarne ćelije koriste mnoge iste materijale kao i c-Si solarne ćelije. Pored toga, vodonik se koristi za pasivizaciju amorfne strukture, a cink za prozirni provodljivi sloj oksida ili TCO sloj.

S16

Druga klasa tankoslojnih solarnih ćelija su halkogenidne solarne ćelije. Termin halkogenidi se odnosi na sva hemijska jedinjenja koja se sastoje od najmanje jednog halkogena iz grupe VI i najmanje jednog ili

više elektropozitivnih elemenata. Halkogenidi su veoma velika grupa jedinjenja, ali u ovom kursu ćemo se fokusirati na dve najvažnije tehnologije.

S17

Prvo, je kadmijum-telurid tehnologija, koji je trenutno tehnologija tankog filma sa najnižom dokazanom cenom po $\text{Watt}_{\text{peak}}$. Ova klasa halkogenida koristi materijale iz grupe 2 i grupe 6, a takođe i elemente poput aluminijuma, cinka i kiseonika za TCO sloj.

S18

Druga grupa halkogenidnih solarnih ćelija su halkopiritne solarne ćelije, koju čine elementi iz grupe I-III i VI. Među njima su najvažnije solarne ćelije bakar-indijum-galijum-di-selenid ili skraćeno CIGS.

S19

Pogledajmo sada šta je sa elementima koji se koriste u ovim tehnologijama? Tehnologija tankih filoma koja se bazira na silicijumu koristi sve iste elemente kao i c-Si tehnologija, uz dodatak cinka, koji je jedan od osnovnih industrijskih elemenata, i vodonika, koji je najzastupljeniji element u svemiru. Kao što vidimo ova tehnologija ne koristi retke ili toksične elemente.

S20

Sledeća tehnologija je je kadmijum telurid. Pratećih materijala kao što su sumpor, aluminijum i cink ima u izobilju, ali sa kadmijumom i teluridom to nije slučaj. Telurid spada među najređe stabilne čvrste elemente. Njegova prisutnost je od oko 1 atom na milijardu atoma silicijuma, što je uporedivo sa npr. platinom. Pored toga, elementarni kadmijum je toksičan i veoma je važno sprečiti ulazak kadmijuma u ekosistem.

S21

CIGS tehnologija se suočava sa sličnim problemima. Bakar i galijum spadaju u glavne industrijske metale, ali indijuma, selenida i kadmijuma ima mnogo manje. Zbog oskudice i toksičnosti elemenata potrebnih za ovu tehnologiju, poboljšanje tehnologije halkogenidnih PV je usporeno i ograničeno.

S22

Efikasnost tankoslojnih tehnologija se kontinuirano povećavala tokom poslednjih nekoliko decenija. Karakteristike CIGS i CdTe solarnih ćelija su vrlo slične, sa rekordnom efikasnošću od 22.6% za CIGS solarnu ćeliju, koju je proizveo iz ZSW i 22.1% za CdTe solarnu ćeliju iz First Solar-a. Performanse tankoslojnih silicijumskih solarnih ćelija su nešto slabije i njihova efikasnost se kreće oko 14.0%.

S23

Pogledajmo sada III-V tehnologije. Kao što ćete kasnije saznati na ovom kursu, ova vrsta fotonaponske tehnologije se uglavnom koristi u konfiguracijama sa više p-n spojeva, pri čemu se koristi više poluprovodničkih legura tipa III-V. Legure III-V su zasnovane na elementima III grupe, koji imaju tri valentna elektrona, kao što su: aluminijum, galijum ili indijum, i elementima grupe V sa, pet valentnih elektrona, kao što su: fosfor i arsen. Neke III-V tehnologije koriste kristalnu substrat od germanijuma kao podlogu, pa se one neće smatrati pravim tankoslojnim PV tehnologijama. Međutim, slojevi apsorbera na bazi III-V, mogu se smatrati tankim u poređenju sa debljinom kristalnih silicijumskih pločica.

S24

Ako pogledamo elemente koji se koriste u III-V tehnologiji, videćemo da u izobilju ima samo aluminijuma i fosfora. Galijum, arsen i germanijum nisu retki ili plemeniti metali, ali ih ima mnogo manje od

silicijuma. Međutim, indijum je veoma redak element i za njim postoji velika potražnja. Zbog svega ovoga je GaAs veoma skup materijal. Pored toga, arsen je vrlo toksičan element, a postoje i upozorenja da je GaAs kancerogen. Pa zašto onda istraživači i dalje intenzivno rade na III-V tehnologijama?

S25

Pogledajmo efikasnosti solarnih ćelija koje su proizvedene III-V tehnologijama. Ova tehnologija ima najveću efikasnost konverzije od svih tankoslojnih tehnologija. Trenutni record je je tankoslojna GaAs solarna ćelija koju proizvodi Alta Devices, čija je efikasnost 29.1%.

S26

A kada se radi o strukturama sa više p-n spojeva rekord drži solarna ćelija koju proizvodi Fraunhofer ISE, i njena efikasnost konverzije je 47.1%. Sada je jasno zašto se ova tehnologija i dalje intenzivno razvija uprkos činjenici da se koriste veoma retki, skupi i toksični materijali. Ova PV-tehnologija visokih performansi se uglavnom koristi u svemirskim aplikacijama i u fotonaponskim sistemima sa koncentradorima.

S27

Na kraju ćemo razmotriti organske PV tehnologije. Za ove tehnologije se koriste provodljivi organski polimeri ili organski molekuli na bazi ugljenika. Koristi se širok spektar materijala različitih grupa.

S28

Iako se za proizvodnju same organske solarne ćelije koriste uglavnom jeftini materijali poput ugljenika, za neke procese, kontakte i zaštitu organskih materijala od vlage i vazduha se koriste materijali poput platine, rutenijuma i joda, koji su vrlo retki. Ovo, za sada, ograničava industrijsku primenu organskih PV tehnologija.

S29

Pogledajmo efikasnost ovih ćelija. Potrebno je imati u vidu da istraživanje organskih PV tehnologija traje samo poslednju deceniju i po. Za to vreme su organske solarne ćelije postigle rekordnu efikasnost od 17,5%, research team City University of Hong Kong. Sharp je postiglo rekordnu efikasnost od 11,9% za solarne ćelije osetljive na boje. Perovskite solarne ćelije pokazuju impresivnu efikasnost veću od 25%, ali još uvek ne postižu stabilnu efikasnost i karakteristike.