

UNIVERZA V LJUBLJANI
FAKULTETA ZA MATEMATIKO IN FIZIKO
ODDELEK ZA FIZIKO

Izbrana poglavja iz uporabne fizike
Amorfni polprevodniki

Gregor Plohl
Mentor: doc. dr. Primož Ziherl
Ljubljana, maj 2007

1 Uvod

V seminarski nalogi bomo obravnavali amorfne polprevodnike, ki zaradi nizke cene in enostavnejše izdelave predstavljajo resno konkurenco kristalnim polprevodnikom. Pogledali si bomo nekaj splošnih lastnosti amorfnih polprevodnikov in načinov njihove uporabe. Zanimalo nas bo tudi, kakšne so razlike med kristalnimi in amorfnimi polprevodniki ter zakaj so kateri boljši na nekem področju.

Čeprav amorfni polprevodniki niso čisto novo področje v fiziki in tehniki, so šele pred kratkim prodrli v ospredje.

2 Polprevodniki

Polprevodnik je monokristalna snov, ki ima brez dovedene energije lastnosti električnega izolatorja, pri dovolj veliki dovedeni energiji pa ima lastnosti električnega prevodnika. Od tod tudi njegovo ime. Uporabljajo se za izdelavo nelinearnih elektronskih elementov.

V osnovnem stanju pri nizki temperaturi je v polprevodniku valenčni pas popolnoma zaseden in prevodni pas popolnoma nezaseden. Med pasovoma je energijska špranja s širino W_g .

Polprevodnik pri nizki temperaturi ne prevaja elektrike. Nosilci naboja, ki sodelujejo pri prevajanju, se pojavijo, če preidejo elektroni iz valenčnega pasu preko energijske špranje v prevodni pas. Potrebno energijo za ta prehod lahko dobijo z absorpcijo svetlobe ali pri sobni temperaturi od nihajočih gradnikov v kristalni mreži.

V polprevodniku moramo upoštevati dve vrsti nosilcev naboja: prevodniške elektrone z nabojem $-e_0$ in vrzeli z nabojem e_0 . Za oba nosilca nabojev velja Fermijeva porazdelitev [1].

Če čistemu polprevodniku dodamo primesi v obliki atomov elementov tretje ali pete skupine periodnega sistema, se lahko njegove električne lastnosti spremenijo že pri majhnih koncentracijah dodanih primesi.

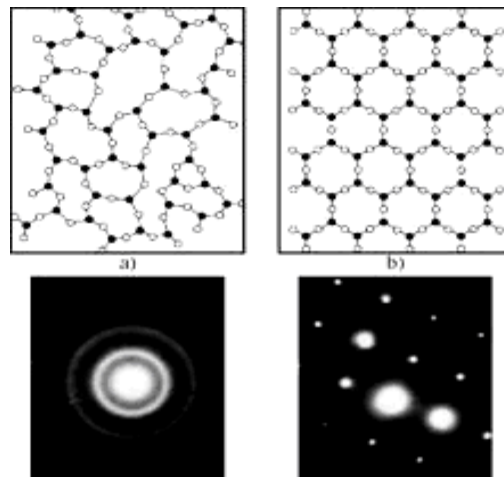
Če se v kristalni strukturi pojavi atom iz pete skupine (npr. fosfor, arzen, antimon itd.), se štirje njegovi zunanji elektroni spojijo v valenčne vezi s sosednjimi silicijevimi atomi, za preostali peti elektron pa zadostuje že zelo majhna dovedena energija (precej manjša od energijske špranje), da preide med proste elektrone v prevodnem pasu. Takšne primesi, ki povečajo koncentracijo prostih elektronov, se tako imenujejo donorji, polprevodniki s takšnimi primesmi so tipa n.

Ob dodatku primesi z atomi iz tretje skupine (npr. bor, aluminij, galij, indij itd.) se vsi trije njihovi zunanji elektroni vežejo v valenčne vezi s sosednjimi silicijevimi atomi, ostane pa četrta valenčna vez, zadostuje pa zelo majhna dovedena energija, da se tja poveže elektron iz okolice, ki tako pusti za seboj gibljivo vrzel. Takšne primesi torej povečajo koncentracjo vrzeli, zato jim pravimo akceptorji, takšnemu tipu polprevodnika pa pravimo polprevodnik tipa p. V polprevodniku tipa n so večinski naboji elektroni, manjšinski naboji pa vrzeli. V polprevodniku tipa p pa je ravno obratno [1].

2.2 Amorfnе snovi

Zgradba trdnih snovi ni nikoli povsem neurejena. Neurejeni so le plini, kjer so atomi in molekule naključno razporejene po prostoru. Trdne snovi so lahko amorfne ali kristalne. V amorfni snovi je pozicijski red kratkega dosega, ki je omejen le na najbližje sosede. Najbolj znana amorfna snov je navadno okensko steklo, ki je prosojno in dober električni izolator.

Red kratkega ponazarja slika 1 na primeru spojine A_3B_2 . Vsak atom vrste B (temni krožci) je obdan s tremi atomi vrste A (svetli krožci). Vsak istovrstni atom ima podobno okolico, ne pa enake, kajti razdalje in koti med vezmi se razlikujejo in zato ni reda dolgega dosega.

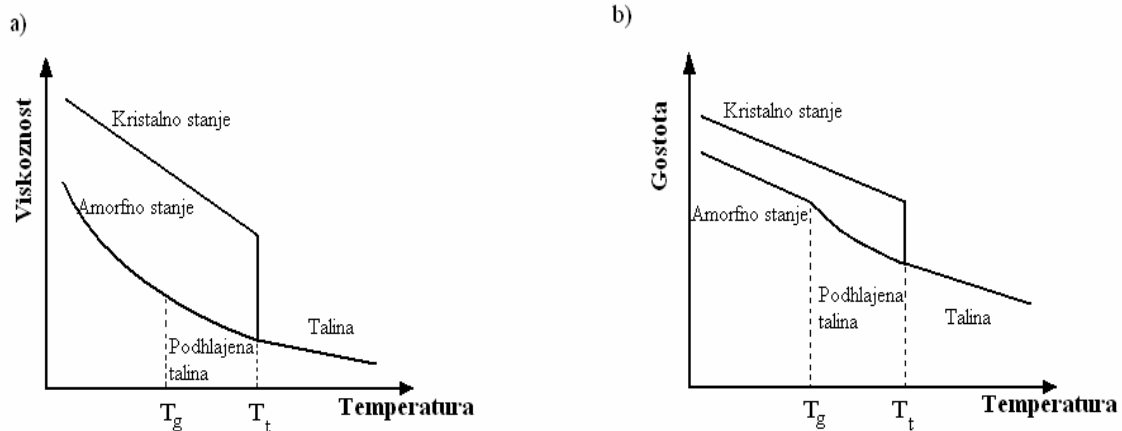


Slika 1: Shematični prikaz (a) amorfne snovi in (b) kristala ter njunih uklonskih slik (spodaj), ki jih dobimo pri presevanju tankih folij z elektroni v transmisijskem elektronskem mikroskopu [2].

Amorfne snovi nimajo urejene zgradbe, vendar je ta v povprečju enako neurejena v vseh smereh. Zato so njihove lastnosti v vseh smereh enake – *izotropne*. Nasprotno pa so lastnosti kristalov *anizotropne* – neenake v različnih smereh. Neenake so zato, ker se razdalje med atomi v različnih smereh razlikujejo, ponavljajo pa se zato, ker ima vsak kristal določene simetrijske elemente [2].

Kristale ločimo od amorfne snovi po več značilnostih. Ena izmed njih je uklonski vzorec, ki ga dobimo pri presevanju vzorca z rentgenskimi žarki ali pa pri presevanju tankih folij vzorca z elektroni v transmisijem (presevnem) elektronskem mikroskopu (TEM). Za amorfne snovi so značilni zelo široki koncentrični kolobarji, ki kažejo, da razdalje med atomi niso povsem enake, temveč bolj ali manj razpršene okoli neke srednje razdalje. Pri presevanju posameznega kristala nastane pravilna in periodična dvodimenzionalna mreža uklonskih lis.

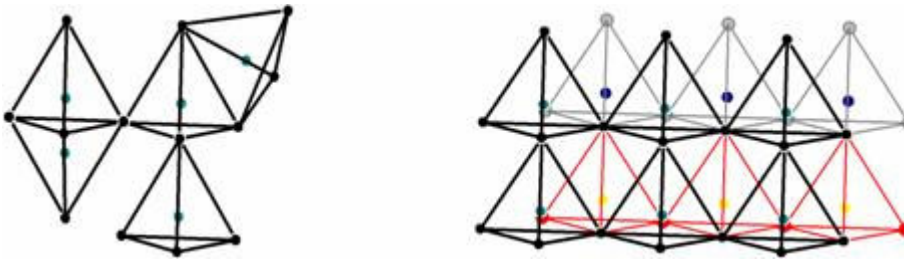
Druga bistvena razlika je v spreminjanju viskoznosti in gostote s temperaturo (slika 2). Čista snov kristalizira pri določeni temperaturi – *tališču* T_t , pri tem iz reda kratkega dosega nastane red dolgega dosega. Viskoznost se nenadoma močno poveča. Talino, ki ne more prenašati strižnih obremenitev, zamenja toga trdna snov. V nasprotju s tem se pri amorfni snovi viskoznost zvezno povečuje ob zniževanju temperature. Talina pod tališčem T_t se imenuje *podhlajena talina*. Pri steklišču T_g (bolj pogosta izraza sta *temperatura steklastega prehoda* ali *temperatura vitrifikacije*) se viskoznost toliko poveča, da se atomi v talini ne morejo več premikati drug glede na drugega in snov lahko prenaša strižne obremenitve. Iz podhlajene taline dobimo amorfno stanje, za katero je prav tako kot za talino značilen red kratkega dosega [2].



Slika 2: Spreminjanje a) viskoznosti in b) gostote amorfne in kristalne snovi s temperaturo. T_g je temperatura steklastega prehoda, T_t pa temperatura tališča [2].

Tukaj si lahko zastavimo vprašanje, kako sploh lahko nastane amorfno stanje, če je kristalno bolj [2] stabilno in bi glede na to pričakovali, da bo tudi vselej nastalo? Razlog za to je v tem, da se morajo atomi pri prehodu iz tekočega v kristalno stanje preurediti, saj se red kratkega zamenja z redom dolgega dosega.

Za to pa je potreben čas. Če ohlajamo dovolj hitro, lahko preprečimo kristalizacijo. Za čiste kovine je potrebna ohlajevalna hitrost, da preprečimo kristalizacijo, okoli 10^9 K/s, za večino zlitin okoli 10^6 K/s, za sodobne amorfne zlitine nekaj K/s, še bolj počasno ohlajanje pa zadostuje za steklasto strjevanje termoplastov in SiO_2 (slika 3), kjer so večji in bolj zapleteno grajeni gradniki težje gibljivi in je za preurejanje potrebno več časa [2].



Slika 3 : Prehod iz stanja z redom kratkega dosega v stanje z redom dolgega dosega v SiO_2 . V SiO_2 je osnovni gradnik tetraeder SiO_4^{4-} (modri krogi predstavljajo silicijeve atome, črni pa kisikove). Ti so lahko med seboj povezani tako, da imajo skupno oglišče, skupen rob ali pa skupno ploskev. V tekočem stanju (levo) so možne vse tri variante. Pri prehodu iz tekočega v kristalno stanje (desno) so tetraedri povezani samo v ogliščih (različne barve tetraedrov smo uporabili zaradi nazornejše globinske predstave) [2].

3 Amorfní polprevodniki

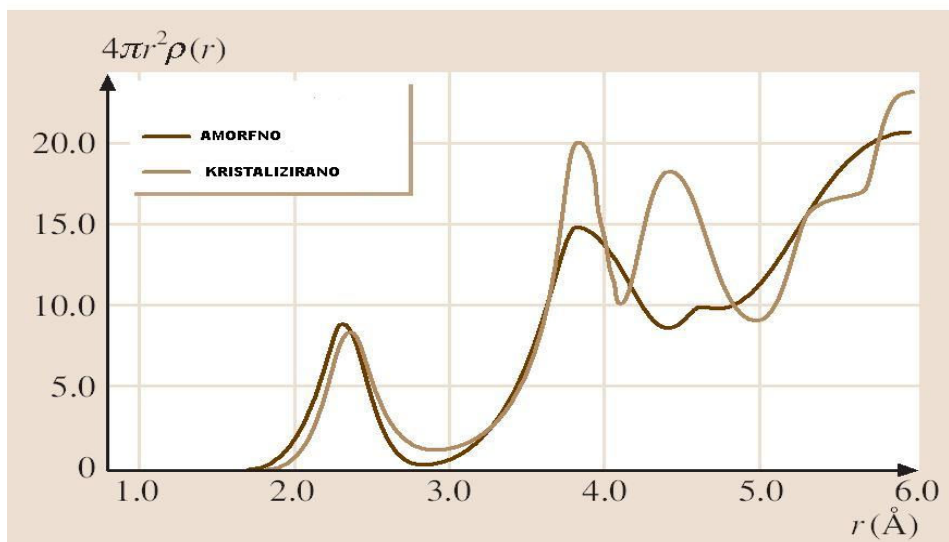
V popolnem monokristalu lahko določimo koordinate vseh gradnikov, če poznamo položaj vsaj enega atoma, kar je posledica urejenosti dolgega dosega. Nasprotno je pri amorfnih polprevodnikih. Zaradi odsotnosti urejenosti dolgega dosega ne moremo električnih in fotoelektričnih lastnosti amorfnih polprevodnikov opisati s standardno teorijo polprevodnikov.

Poznamo več vrst amorfnih polprevodnikov, med njimi je najbolj znan in raziskan amorfní silicij (a-Si) in njegove kombinacije (a-Si:H,...). Večinoma jih ne moremo pripraviti iz taline kristalnega polprevodnika, zato jih naredimo v obliki tankih filmov.

Drugi pomemben predstavnik amorfnih polprevodnikov so halkogena stekla, to so stekla, ki vsebujejo halkogene elemente (elementi 6. skupine periodnega sistema: kisik, žveplo, selen, telur, polonij). Lahko jih naredimo iz taline kristalnega polprevodnika, če talino dovolj hitro ohladimo pod temperaturo steklastega prehoda. Halkogena stekla so zanimiva zato, ker lahko s pomočjo temperature 'preklapljamó' med amorfnim in kristaliziranim stanjem, kar izkoriščajo novejši spominski mediji [3].

3.1 Fizikalne lastnosti

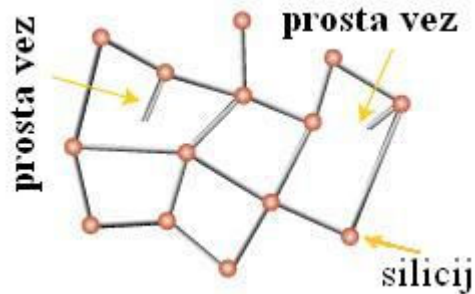
Amorfni snovi ne moremo opisati s kristalno strukturo in z mrežnimi konstantami. Zato raje podamo radialno porazdelitveno funkcijo (slika 4), ki se uporablja za splošen opis vseh snovi [3].



Slika 4: Radialna porazdelitvena funkcija za amorfni in kristalni silicij. Vrhovi pri kristalnem siliciju so dokaj ostri in nakazujejo pravilno kristalno strukturo. Pri amorfem siliciju sta izrazita samo prva dva vrhova, kar nakazuje red kratkega dosega [3].

Pomembna lastnost vseh polprevodnikov je energijska špranja. Pri amorfni polprevodnikih je le-ta presenetljivo podobna energijski špranji v navadnih polprevodnikih, vendar je zelo odvisna od priprave polprevodnika. V amorfem siliciju (a-Si) ima energijska špranja vrednosti med 1.2 eV in 1.8 eV, za kristalni silicij pa znaša 1.12 eV [4].

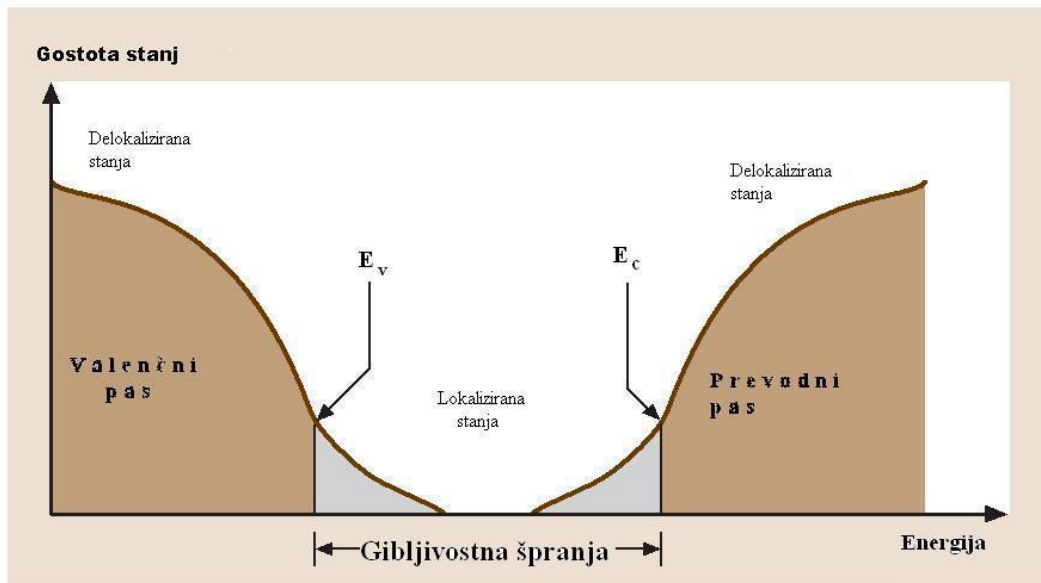
Čeprav lahko pri amorfni polprevodnikih govorimo o valenčnem in prevodnem pasu, bi bilo zmotno mišljenje, da je prepovedani pas popolnoma prazen, kot v idealnem kristalu. Vendar tudi pri kristalnih polprevodnikih lahko opazimo stanja v prepovedanem pasu, ki so posledica nečistoč in napak v kristalni mreži. Podobno velja za amorfne polprevodnike, vendar glavni doprinos k 'defektnim stanjem' predstavljajo proste vezi ('*dangling bonds*'), ki pomenijo defekt v mreži (slika 5). Mehanizmi delovanja prostih vezi še niso povsem jasni, vendar jih pri amorfem siliciju že znajo obvladovati [3].



Slika 5: Shematičen prikaz prostih vezi v tetraedičnem amorfnem polprevodniku [3].

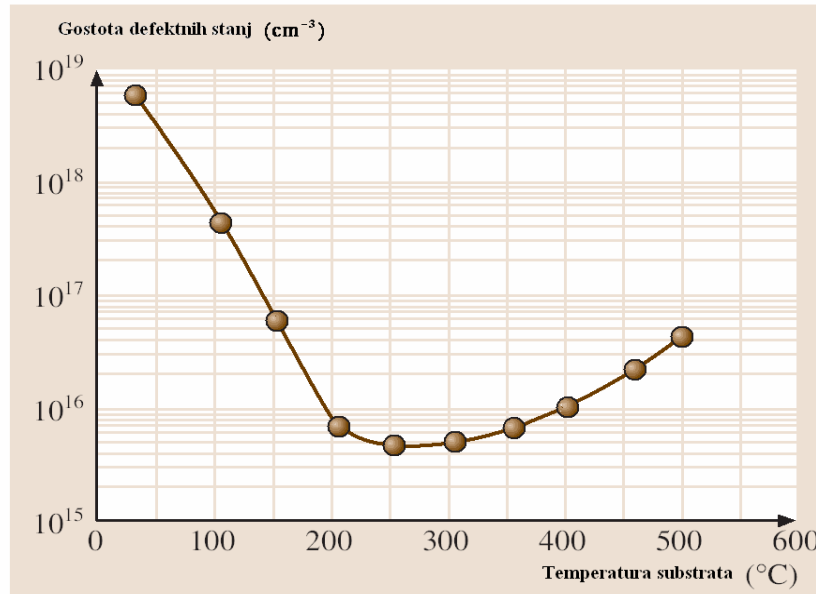
Proste vezi v amorfnem polprevodniku delujejo kot '*pasti*' tako za proste elektrone kot za vrzeli. Prosti elektroni (vrzeli), ki se ujamejo na proste vezi, postanejo lokalizirani in zasedejo *defektna stanja* v *gibljivostni špranji* (*mobility gap*) (slika 6), kar nam pomakne Fermijev nivo v sredino *gibljivostne špranje* in bistveno zmanjša število prostih nosilcev naboja in s tem tudi prevodnost. Vendar sta elektron (vrzel) in prosta vez šibko vezana, zato lokalizirani elektroni in vrzeli pomembno vplivajo na prevodnost pri sobni in nižji temperaturi [3].

Proste vezi nam tudi onemogočajo uspešno dopiranje amorfnega polprevodnika. V amorfnem siliciju je dopiranje pri sobni temperaturi uspešno le 0.01 % (na vsakih 10^4 atomov primesi dobimo en prosti nosilec naboja), medtem ko je za kristalni silicij uspešnost dopiranja skoraj 100 % [4].



Slika 6: Diagram gostote stanj, gibljivostna špranja ima podobno vlogo kot energijska špranja v kristalnih polprevodnikih. E_v je zgornja meja valenčnega pasu, E_c pa spodnja meja prevodnega pasu [3].

V a:Si nevtraliziramo proste vezi z dodajanjem vodika med pripravo amorfnega polprevodnika. Dobimo a-Si:H. S tem smo zmanjšali število lokaliziranih nosilcev naboja in povečali prevodnost ter omogočili učinkovitejšo dopiranje. Gostota defektnih stanj, ki jih povzročajo proste vezi, je odvisna od temperature, pri kateri smo polprevodnik pripravljali (slika 7) [3].



Slika 7: Število defektnih stanj v odvisnosti od temperature substrata med pripravo a-Si:H filma. Idealna temperatura za pripravo a-Si:H filma je med 200°C in 300°C [3].

Pri amorfni polprevodnikih ločimo tri režime prevajanja. Pri sobni temperaturi (300 K) imamo prevajanje, ki ga povzročijo prosti nosilci naboja kot pri kristalnih polprevodnikih.

Pri nižji temperaturi (250 K) je prevladujoče prevajanje znano kot '*termično preskakovanje*' (*thermally assisted hopping*), ki nastane zaradi preskakovanja nosilcev naboja iz lokaliziranih stanj. Ta preskakovanja povzročajo fononi.

Pri temperaturah okrog 100 K pa nastopi '*naključno preskakovanje*' (*variable range hopping*), za katerega velja podoben mehanizem kot pri termičnem preskakovanju, vendar je temperaturna odvisnost bistveno šibkejša [4].

Za veliko število amorfni polprevodnikov velja, da pri sobni temperaturi prevladuje prevajanje zaradi preskakovanja nosilcev naboja iz lokaliziranih stanj, kar nam pojasni dobro prevodnost ob majhni gostoti nosilcev naboja. Vendar pri višji temperaturi (nad 300 K) postane dominantno standardno prevajanje, kot smo vajeni pri navadnih polprevodnikih.

Gibljivost elektronov v amorfni polprevodniku z energijami nad E_c znaša okrog $10^{-3} \text{ m}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$, kar je dva reda velikosti manj kot pri kristalnih polprevodnikih. Ustrezna prevodnost pa znaša okrog $600 (\Omega \text{ m})^{-1}$ [4].

3.2 Uporaba

Amorfni polprevodniki lahko uspešno nadomestijo kristalne polprevodnike na skoraj vseh področjih. Prednosti amorfnih polprevodnikov so predvsem cenejša in enostavnejša izdelava, zato so primerni za serijsko proizvodnjo.

3.2.1 Sončne celice

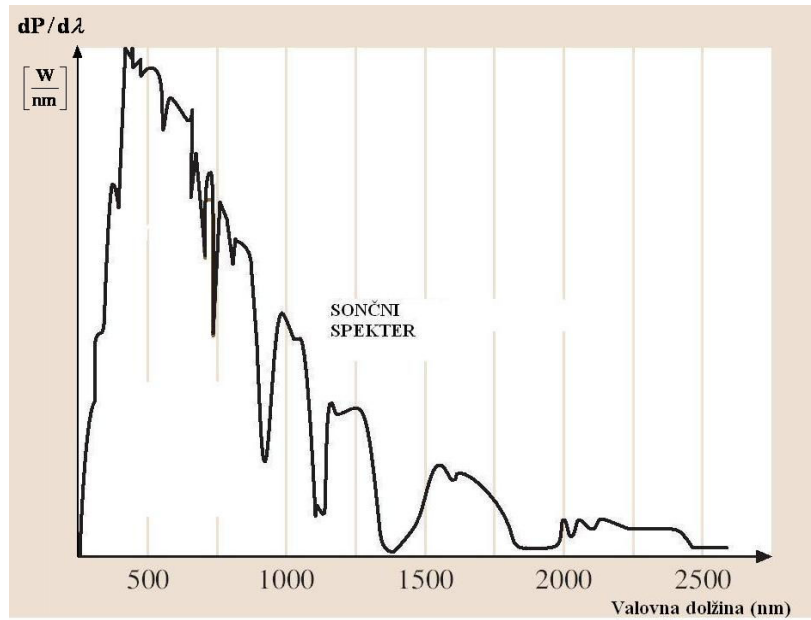
Poznamo več vrst sončnih celic na osnovi silicija, ki se razlikujejo po učinkovitosti, življenjski dobi in ceni (tabela 1). Prednosti amorfnega silicija so predvsem v večjem absorpcijskem koeficientu (potrebna manjša debelina) ter dokaj preprosti in bistveno krajši in cenejši izdelavi. Slabosti pa predstavlja slabši izkoristek, ki se med uporabo še dodatno zmanjša.

material	debelina	Izkoristek	Slabosti	razmerje moč/površina	prednosti in perspektive
monokristalne Si sončne celice	0.3 mm	15 - 18 %	Dolgotrajni proizvodni postopki, potrebno žaganje rezin, visoka cena	Visoko	Najbolj raziskan material. Tudi v prihodnjih letih bo prevladoval na tržišču.
polikristalne Si sončne celice	0.3 mm	13 - 15 %	Daljši proizvodni postopki, potrebno žaganje rezin, cena.	srednje	Najpomembnejši material vsaj v naslednjih nekaj letih.
amorfne Si sončne celice	0.0001 mm + 1 do 3 mm substrat	5 - 8 %	Manjša učinkovitost, krajša življenjska doba.	nizko	Možna proizvodnja v obliki traku, ni žaganja rezin. Ob izboljšanju dolgoročnih lastnosti najbolj perspektiven material.

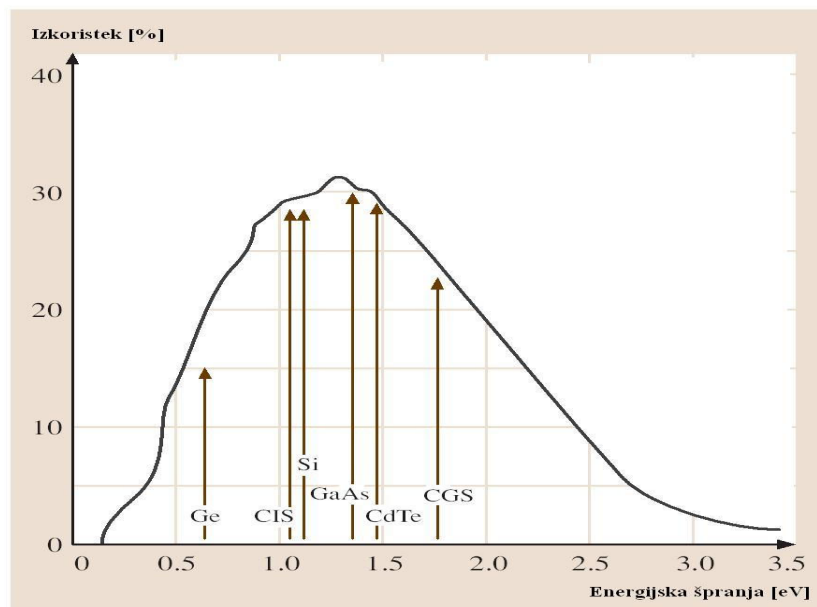
Tabela 1: Primerjava silicijevih sončnih celic. Amorfnе sončne celice glede izkoristka precej zaostajajo za ostalimi tipi sončnih celic, vendar so zaradi nizke cene in lažje izdelave najbolj perspektiven material [4].

Pri načrtovanju sončnih celic moramo upoštevati sončni spekter (slika 8), saj je z njim tesno povezan celotni izkoristek. Na sliki 9 je prikazan delež sončnega spektra (izkoristek), ki ga zajame polprevodnik z določeno energijsko špranjo. Vidimo, da je ta delež največji pri energijski špranji širine 1.5 eV [3].

Amorfni silicij veliko bolje absorbira sončno sevanje kot kristalni silicij. Dodajanje vodika precej zmanjša električno upornost amorfne silicija ter omogoča, da dodajamo donorje in akceptorje. Amorfni silicij nanašamo na nosilno plast (steklo, nerjavna pločevina...) v komorah, kjer prehajata iz plazme silana (SiH_4) pri temperaturi okoli $300\text{ }^\circ\text{C}$ na podlago v tankih slojih silicij in vodik.



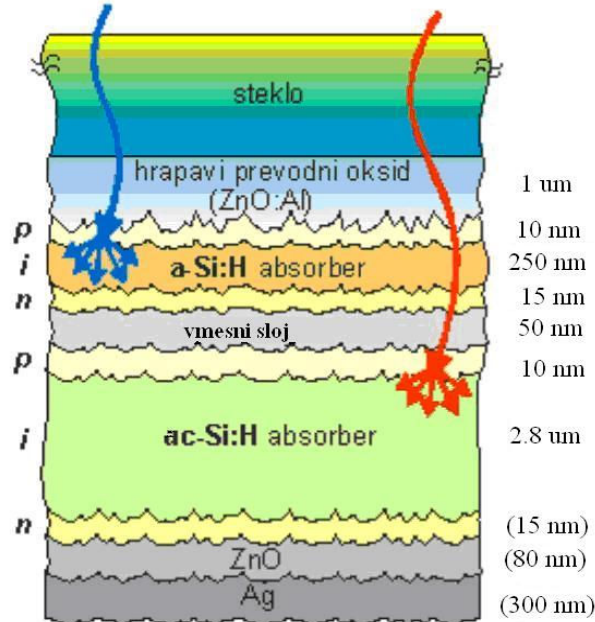
Slika 8: Spektralna gostota sončnega sevanja na Zemlji [3].



Slika 9: Preračunani izkoristki glede na spektralno gostoto in širino energijske špranje. Dodani so posamezni materiali in njihove energijske špranje [3].

Izdelava amorfnih silicijevih sončnih celic je precej cenejša kot izdelava kristalnih in tudi energetsko varčnejša. Izkoristki sončnih celic iz amorfne silicija dosežejo v laboratorijskih pogojih do 12%, v serijski proizvodnji pa med 5 in 8%. Glavna slabost teh celic je neodpornost na svetlobo in s tem povezano manjši izkoristki. Tako že po nekaj mesecih izkoristek pade na 4% [5].

Relativno ozko območje fotonov s primerno energijo za vzbuditev atomov amorfne silicija razširimo z izdelavo tankoslojne sončne celice z več p-n spoji. Med vsakega od p-n spojev vgradimo čisti amorfni silicij z dodatki, ki absorbirajo fotone z različnimi valovnimi dolžinami. Če na primer dodamo siliciju ogljik, sloj absorbira fotone z manjšo valovno dolžino (modro svetlobo) in prepusti fotone z večjo valovno dolžino. Če dodamo siliciju germanij, sloj absorbira fotone z večjo valovno dolžino (rdečo svetlobo). Take sončne celice imenujemo večslojne sončne celice (slika 10 prikazuje dvoslojno oz. tandemsko sončno celico).



Slika 10: Amorfnе silicijeve tankoplastne sončne celice – tandemska (pin/pin) izvedba. Med p-n spojem je nedopirana (intrinzična) i-plast z dodatki, ki omogoča absorpcijo fotonov različnih valovnih dolžin in boljše ločevanje prostih nosilcev naboja [5].

3.2.2 Spominske naprave

Nekatere novejšje spominske naprave izkoriščajo unikatno lastnost halkogenih stekel, katerim lahko s spreminjanjem temperature spremenimo stanje iz kristalnega v amorfno. Zato jim s tujko pravimo "*phase change memory*" (znano tudi kot PCM, PRAM in Chalcogenide RAM ali na kratko C-RAM).

Poznamo dve vrsti *faznega zapisovanja*. Prvo je optično, z laserjem in drugo električno. Pri obeh gre za spreminjanje faze s hitrim segrevanje in hitrim ohlajanjem.

Optične spominske naprave, ki temeljijo na principu spreminjanja faze, so znane že dalj časa in jih poznamo kot CD-RW, DVD-RW, DVD-RAM... Različne optične lastnosti posameznih faz halkogenih stekel definirajo binarne vrednosti.

Električno zapisovanje je še vedno na stopnji razvoja, vendar že obstajajo prototipi, ki veliko obetajo [6]. PRAM je nova vrsta spominskih naprav, ki ne izgubijo podatkov, ko niso priključene na vir energije.

Osnova za PRAM je halkogeno steklo v obliki tankega filma, poznano kot GST (GeSbTe). Za zapisovanje se uporablja električni tok, ki segreje film na okrog 600°C, tako da dobimo talino. Ko se ohladi, se *zamrzne* v amorfno stanje. Če pa GST segrejemo nad temperaturo kristalizacije (okrog 400°C), toda pod temperaturo tališča (okrog 600°C), se bo pri ohlajanju spremenilo v kristalno fazo. Ti prehodi med stanjema se lahko zgodijo v času 5 ns. Amorfna in kristalna faza halkogenih stekel imata zelo različni električni upornosti. Amorfno stanje ima veliko upornost in predstavlja binarno '0', medtem ko ima kristalno stanje bistveno nižjo upornost in predstavlja binarno '1' [6].

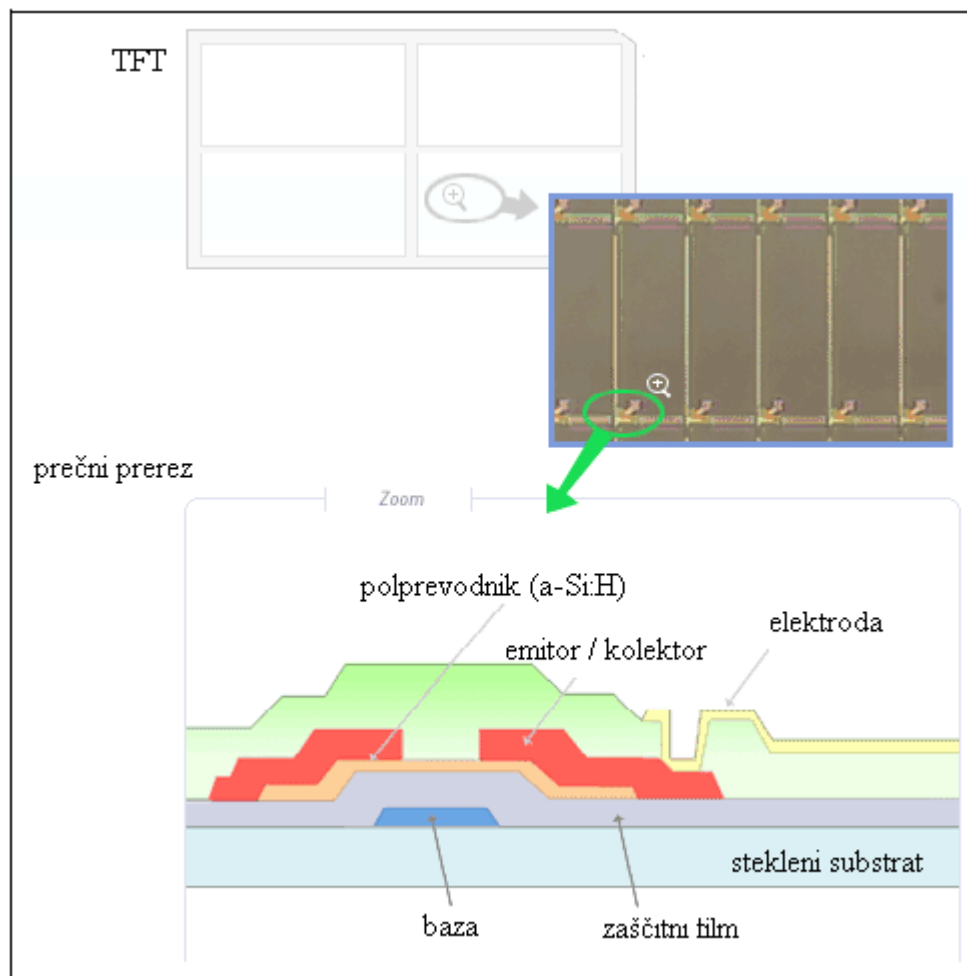
Prednost PRAM pred ostalimi električnimi spominskimi elementi (Flash, DRAM, SRAM...) je v manjši in preprostejši strukturi, kar se odraža v enostavnejši (v prihodnosti tudi cenejši) izdelavi. Če bi ga uporabljali namesto DRAM, nam ne bi bilo potrebno ob zagonu računalnika čakati, da se programi naložijo in tudi ob nenadnem izklopu računalnika bi podatki ostali shranjeni. Ker PRAM za vzdrževanje podatkov med delom in v '*stanju pripravljenosti*' ne potrebuje energije, je idealen za prenosne naprave.

Od sistemov Flash se razlikuje po hitrejših časih zapisovanja, saj ni potrebno predhodno brisanje podatkov (PRAM bi naj bil od 500 do 1000 krat hitrejši), kar bistveno zmanjša obrabo. Število ciklov je za PRAM ocenjeno na 10 milijard, medtem ko znaša za Flash le okrog 100000 [7].

3.2.3 a-Si:H TFT LCD

Za krmiljenje tekočerkristalnih zaslonov (LCD) se uporabljajo tankoplastni tranzistorji (TFT), ki jih ponavadi naredijo tako, da na steklen substrat naporijo amorfn silicij. Uporablja se tudi monokristalni in polikristalni silicij. Vse tri vrste silicija imajo svoje prednosti in slabosti. Izbira je odvisna od uporabe LCD.

TFT iz amorfnega silicija (slika 11) je veliko lažje in ceneje izdelati, saj ga je možno naporiti na velike površine pri nizkih temperaturah (okrog 300°C [3]). Ker pri pripravi ne potrebujemo visokih temperatur, lahko za substrat uporabimo cenejše steklo. Glavna slabost a-Si:H je dolg odzivni čas, ki je posledica prostih vezi. Rešitev predstavlja kristalizacija a-Si:H, ki jo dosežemo z obsevanjem z visokoenergijskimi laserskimi pulzi. Pri tem moramo paziti, da stekla ne segrejejo preveč (temperatura doseže do 400°C) [4].

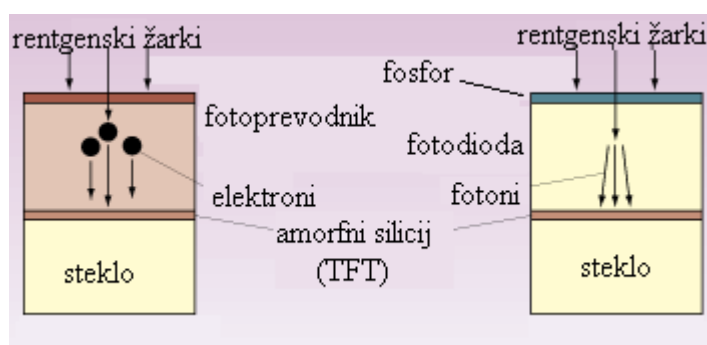


Slika 11: Zgradba TFT iz amorfnega silicija (a-Si:H). Zgoraj je celoten zaslon, v sredini je povečana ena vrstica pikselov, spodaj pa je prečni prerez piksla, ki prikazuje zgradbo posameznega TFT [8].

3.2.4 Senzorji rentgenskega sevanja

Senzorji rentgenskega sevanja spremenijo rentgensko sliko v električni signal, ki ga potem s pomočjo računalnika prikažemo na zaslonu.

Senzor je sestavljen iz aktivne matrice (TFT), ki služi za naslavljanje pikslov, in iz vrhnjega rentgensko občutljivega sloja. Pri tem ločimo dva načina elektronskega detektiranja rentgenskih žarkov, posrednega in neposrednega (slika 12). Pri posrednem imamo pred aktivno matriko fosfor, ki spremeni rentgenske žarke v vidno svetlobo in jo zaznamo s fotodiodo. Pri neposrednem pa imamo pred aktivno matriko polprevodnik, ki je občutljiv na rentgenske žarke (fotoprevodnik). Fotoprevodnik pretvori rentgenske žarke v naboj v enem koraku (slika 13) [3].

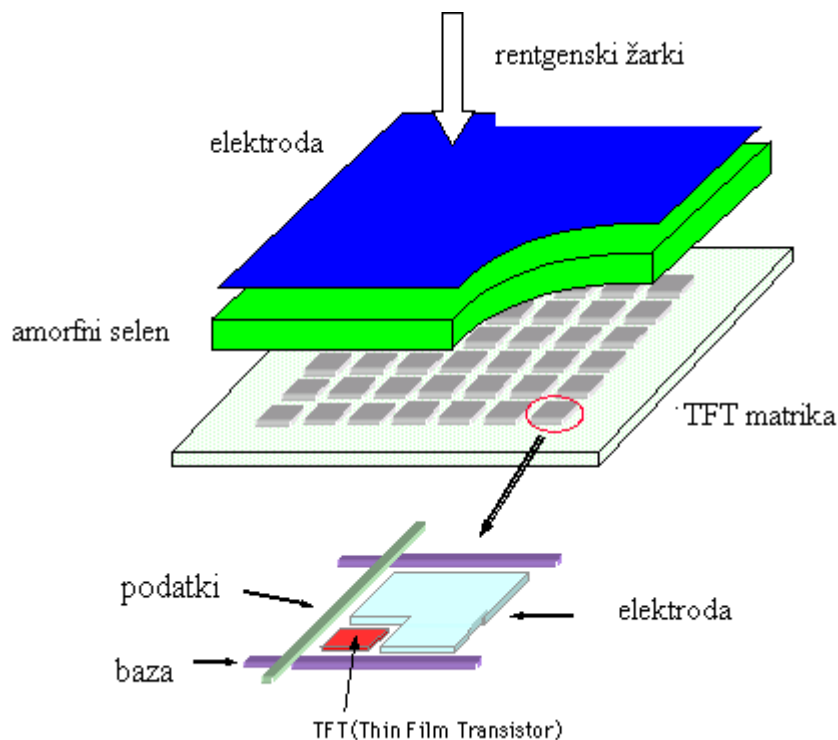


Slika 12: Dva načina detektiranja rentgenskega sevanja neposredno (levo) in posredno (desno). Pri neposrednem detektiranju nam fotoprevodnik pretvori rentgensko sevanje v naboj v enem koraku [9].

Fotoprevodnik mora absorbirati večino rentgenskega sevanja in tvoriti čim več parov elektron-vrzel, da se izognemo nepotrebnim visokim dozam sevanja. Za fotoprevodnik se večinoma uporablja amorfni selen (a-Se), ki ga stabiliziramo z arzenom (0.2-0.5% As), saj je čisti a-Se termično nestabilen. Zaradi arzena se skrajša življenski čas vrzeli, zato fotoprevodnik rahlo dopiramo (10-20 ppm - delcev na milijon) s halogeni (npr. Cl). Energijska špranja tako stabiliziranega in dopiranega a-Se znaša okrog 2.1 eV [3].

Pri absorpciji rentgenskega žarka v fotoprevodniku nastane visokoenergijski – primarni elektron, ki nato s trki tvori nove pare elektron – vrzel. Le delež teh parov doprinese k toku v polprevodniku, saj se jih veliko rekombinira.

S to vrsto rentgenskih detektorjev dobimo zelo kvalitetne slike z visoko ločljivostjo pri nizkih dozah obsevanja.



Slika 13: Shematični prikaz detektorja rentgenske svetlobe. Amorfni selen nastopa v stabilizirani obliki [9].

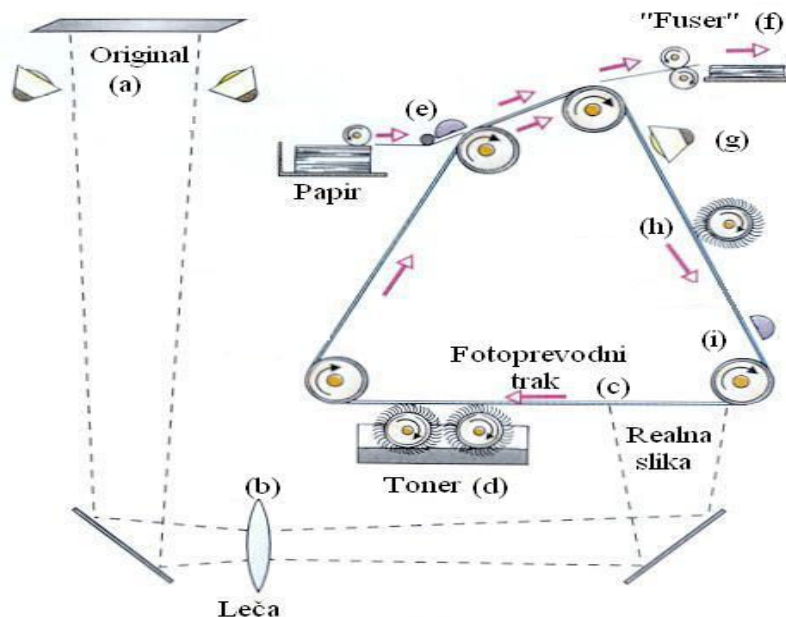
3.2.5 Fotokopirni stroj

Amorfni polprevodnik najdemo tudi v fotokopirnih strojih. Osnovne komponente fotokopirnega stroja so polprevodniški trak (fotoprevodnik), *corona* žice, svetilo in leče, toner ter *fuser* [10].

Polprevodniški trak (uporablja se tudi polprevodniški boben [11]) je iz amorfne polprevodnika (ponavadi a-Si). Kristalni polprevodnik ni primeren, ker ga je na tako velikih površinah težje izdelati in ne preneša mehanskih obremenitev. Amorfni polprevodniki so tudi precej cenejši.

Corona žice so priključene na visoko napetost, da lahko naelektrijo polprevodniški trak in list. Svetilo mora imeti dovolj energije, da izbije elektrone iz polprevodnika. V te namene se uporablja bela svetloba. Z lečami preslikamo original na fotoprevodnik in ga z njimi tudi povečamo ali pomanjšamo. Toner je (plastično) barvilo v obliki prahu, ki ga pred nanosom negativno naelektrimo, da se oprime pozitivno nabitega polprevodnika. Fuser raztopi toner in ga trajno pritrdi na list. Fuser je sestavljen iz valjev, ki so prekriti s teflonom, kar preprečuje oprijemanje tonerja na valje. V valju je žarnica, ki segreva valj [10].

Princip delovanja fotokopirnega stroja nam prikazuje slika 14. Najprej s corona žico pozitivno naelektrimo zgornjo plast fotoprevodnika. Nato osvetlimo list (original), ki ga želimo fotokopirati. Svetloba prodre skozi list, le na popisanem delu lista se absorbira. Prepuščena svetloba v fotoprevodniku izbije elektrone, ki se rekombinirajo s pozitivnimi ioni na vrhu polprevodnika. Na mestih, kjer ni prišlo do rekombinacije, ostane polprevodnik pozitivno naelektren. Na fotoprevodniku nastane odtis originala. Sledi nanos negativno naelektrenega tonerja, ki se veže na pozitivno naelektrena področja polprevodnika. Nato s corona žico pozitivno naelektrimo list, na katerega želimo preslikati original. Toner potem odtisnemo na list. Fuser na koncu zapeče toner na papir. Sledi še razelektritev in čiščenje polprevodnika [10].



Slika 14: Shematični prikaz delovanja fotokopirnega stroja. Original (a) osvetlimo in z lečami (b) ustvarimo realno sliko na pozitivno naelektrenem polprevodniškem traku (c). Sledi nanašanje negativno nabite barve (toner) (d). Papir pozitivno naelektrimo (e), da lahko toner prenesemo na papir. 'Fuser' (f) nato zapeče toner na papir. Sledi razelektritev (g), čiščenje (h) in ponovna naelektritev polprevodniškega traku (i) [11].

4 Zaključek

Amorfni polprevodniki so se uveljavili na skoraj vseh področjih, ki so jih do sedaj pokrivali kristalni polprevodniki. Zaradi nepoznavanja vseh fizikalnih mehanizmov in lastnosti še vedno niso povsem tehnološko izkoriščeni material in predstavljajo velik potencial za prihodnost.

Pomembno vlogo igrajo v elektroniki in računalništvu, zato velika podjetja (IBM, Intel, ...) veliko vlagajo v razvoj amorfnih polprevodnikov ter njihovih aplikacij, zato lahko na tem področju pričakujemo veliko izboljšav in novih odkritij.

Literatura:

- [1] J. Strnad, *Fizika 4* (DMFA - založništvo, Ljubljana, 2005).
- [2] <http://fs-server.uni-mb.si>
- [3] S. O. Kasap, *Springer handbook of electronic and photonic materials* (Springer, New York, 2006).
- [4] J. Orton, *The story of semiconductors* (Oxford University Press, Oxford, 2004).
- [5] <http://www1.eere.energy.gov>
- [6] <http://samsung.com>
- [7] <http://ovonyx.com>
- [8] <http://www.lgphilips-lcd.com>
- [9] <http://www.laserfocusworld.com>
- [10] <http://home.howstuffworks.com/photocopier1.htm>
- [11] <http://www.physics.hku.hk/~phys0607/lectures/chap06.html>