

PRESEK

List za mlade matematike, fizike, astronome in računalnikarje

ISSN 0351-6652

Letnik **28** (2000/2001)

Številka 1

Strani 10-17

Janez Strnad:

POLPREVODNIŠKA SLIKOVNA NAPRAVA

Ključne besede: fizika, silicij, polprevodniški elementi, slikovne naprave, fotopomnoževalke.

Elektronska verzija: <http://www.presek.si/28/1430-Strnad.pdf>

© 2000 Društvo matematikov, fizikov in astronomov Slovenije

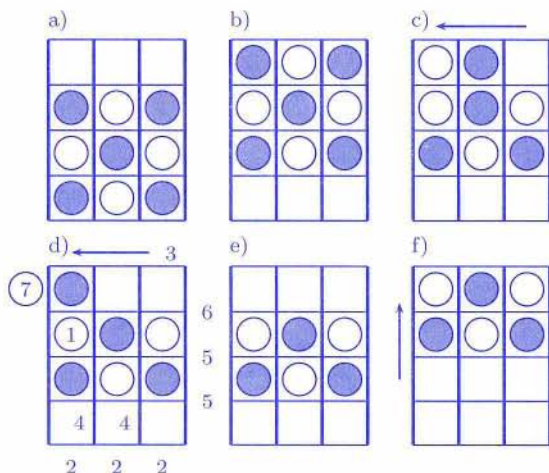
© 2010 DMFA - založništvo

Vse pravice pridržane. Razmnoževanje ali reproduciranje celote ali posameznih delov brez poprejšnjega dovoljenja založnika ni dovoljeno.

POLPREVODNIŠKA SLIKOVNA NAPRAVA

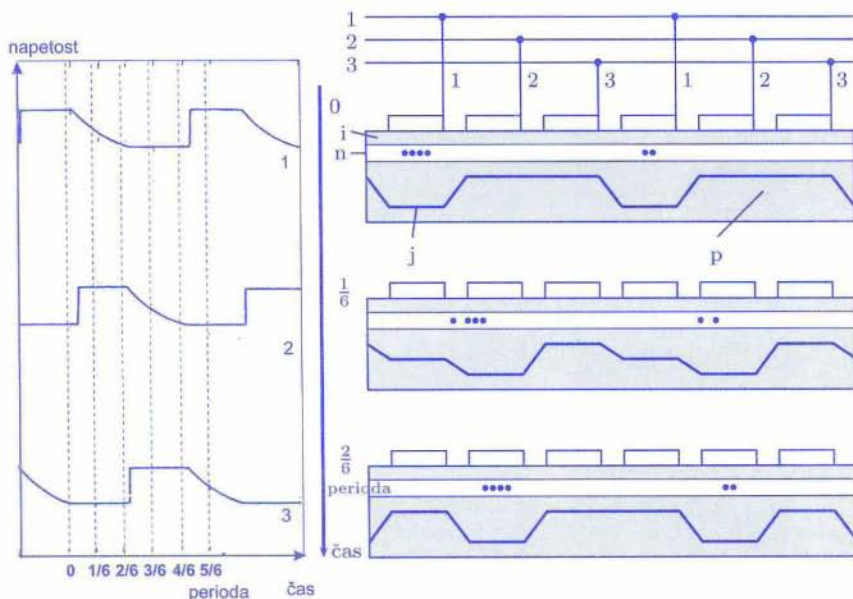
V zadnji številki prejšnjega letnika Preseka smo okvirno pojasnili delovanje nekaterih polprevodniških elementov. *Polprevodniška slikovna naprava* ne bo tako močno vplivala na naše življenje, kot je tranzistor. Vseeno pa je dovolj značilna za polprevodniško elektroniko in prinaša dovolj novosti, da ji je vredno nakloniti poseben zapis.

Začnimo s preprosto prispodobo. Mislimo si, da bi radi ugotovili, koliko vode dobijo pri namakanju s škropljenjem deli polja. Po polju razpostavimo mrežo enakih posod in za določen čas vključimo škropljenje. Nato poženemo tekoče trakove, ki pomikajo posode. Trakovi se ubranijo gibljejo od nas (in se vračajo v smeri proti nam). Na njih so posode urejene v vrste (slika 1). Na oddaljenem robu prevzame posode tekoči trak, ki se pomika z desne na levo. Na levem robu tega traku je tehtnica, s katero tehtamo posodo za posodo. Potem ko zaporedno tehtamo posode s traku, ki potuje proti levi, se trakovi z vrstami posod pomaknejo za en korak, da vrhni trak proti levi prevzame posode iz naslednje vrste. Postopek ponavljamo, dokler ne tehtamo vseh posod. Začetno lego posode določimo po tem, kdaj posoda pride na vrsto za tehtanje. Nazadnje se posode vrnejo v svoje začetne lege, spet za določen čas vključimo škropljenje in postopek ponovimo.



Slika 1. Zaporedni koraki od a) do f) v prispodobi s posodami z vodo na tekočih trakovih: 1 posoda z vodo ustreza slikovnemu elementu, 2 tekoči trakovi v smeri od nas, 3 vodoravni tekoči trak, register, 4 zapora, 5 vrata, 6 prehodna vrata, 7 tehtanje vode, ojačevalnik za merjenje naboja. Prispodobo sta uporabila Jerome Kristian in Morley Blouke leta 1982 v članku v reviji Scientific American.

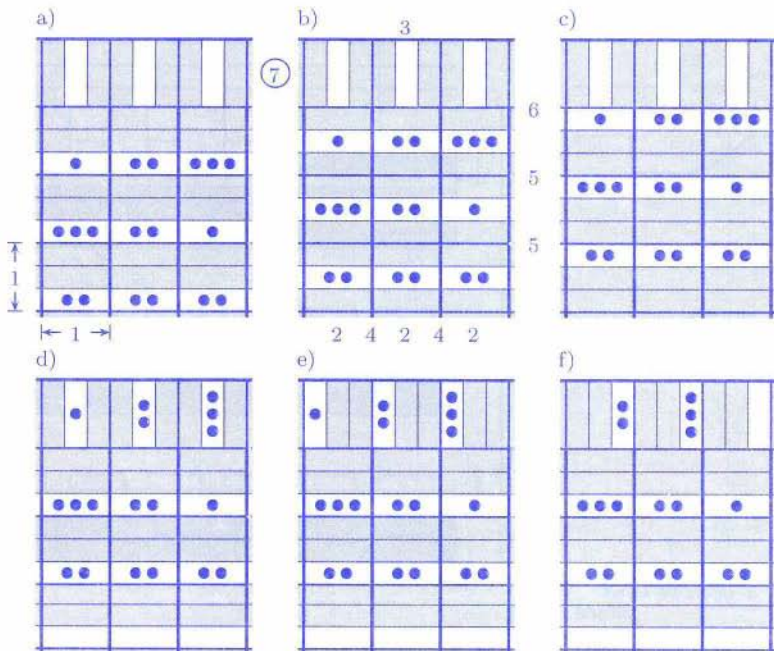
Zdaj preidimo k silicijevi ploščici in jo osvetlimo. Vodi v zraku ustreza svetloba in njenim kapljicam obroki energije, *fotoni*. Fotoni povzročijo, da se v ploščici sprostijo nosilci naboja enega znaka. Njihovo število ali njihov naboj ustreza masi vode v posodi. Z zbranim nabojem ravnamo podobno, kot smo ravnali v prisposobi z vodo v posodah. Posodi v začetni legi ustreza *slikovni element, pixel*. Slikovne elemente določajo elektrode, *vrata*, ki po ploščici potekajo od leve proti desni. V tej smeri so slikovni elementi urejeni v vrste. V smeri od nas slikovni elementi sestavljajo stolpce, *kanale*. Kanal od levega in desnega soseda loči *zapora*, ki preprečuje, da bi naboj odtekel levo ali desno. Naboje vrst korak za korakom pomaknemo v bolj oddaljeno vrsto, kar smo v prisposobi dosegli s tekočimi trakovi, ki so se gibali od nas. Nato v vrhnji vrsti pomaknemo naboje proti levi in jih na levem robu v ojačevalniku drugega za drugim izmerimo. Vrsta, ki ustreza tekočemu traku proti levi, *register*, je že zunaj slikovnega dela ploščice za izolirnim delom ali *prehodnimi vrati*.



Slika 2. Skupine elektronov po silicijevi ploščici pomakamo s sklopitvijo nabojev tako, da uravnavaemo zunanje električne napetosti vrata proti osnovi ploščice. Leva risba kaže časovno odvisnost napetosti na treh skupinah vrat 1, 2, 3 proti osnovi ploščice. Desna risba kaže shematično razporeditev vrat na ploščici, plast silicijevega dioksida kot izolatorja *i*, tanko območje *n* in osnovo *p*. Vrisan je še krajevni potek potencialne energije elektrona s potencialnimi jamami *j*, v katerih se zberejo prevodniški elektroni. Od zgoraj navzdol si sledijo trenutki v časovnih razmikih po šestinah periode.

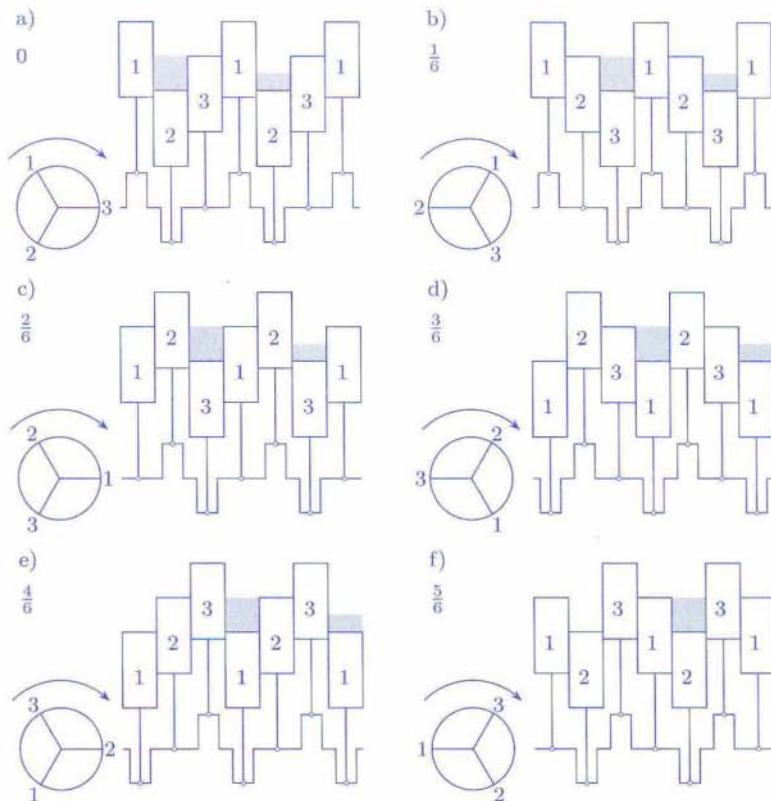
Potem ko drugega za drugim izmerimo naboje v registru, vrste nabojev pomaknemo za en korak, da register prevzame naboje iz naslednje vrste. Postopek ponavljamo, dokler ne izmerimo vseh nabojev. Iz katerega slikovnega elementa izvira kak naboj, določimo po tem, kdaj pride na vrsto pri merjenju. Potem ko poskrbimo, da v ploščici ni več nabojev, vse skupaj začnemo znova. Za določen čas vključimo osvetlitev in tako dalje.

Naboj iz slikovnega elementa v sosednji element pomaknemo v zeleni smeri s postopkom, ki mu pravimo *sklopitev nabojev*. Zato polprevodniško slikovno napravo imenujemo *naprava na sklopitev nabojev*, *charge-coupled device*, CCD. Preden se lotimo sklopitve, povejmo nekaj o naboju, ki ga sprosti svetloba. Osnova silicijeve ploščice je polprevodnik p, v katerem so vrzeli večinski nosilci naboja. Nad njo je območje n, ki skupaj z osnovo sestavlja diodo. Svetloba v območju n izbije elektron iz valenčnega pasu in nastaneta prevodniški elektron in vrzel. Vrzel odtava na območje



Slika 3. Slikovni element in element registra imata po tri dele, tako da je bila prisposodba na sliki 1 preveč poenostavljena: 1 slikovni element, 2 kanali, 3 register, 4 zapora, 5 vrata, 6 prehodna vrata, 7 ojačevalnik za merjenje naboja. Svetlo so nakazani deli slikovnih elementov z nizko potencialno energijo, to je potencialne jame, osenčeno pa deli z visoko potencialno energijo, to je ograde. Prevodniški elektroni se zberejo v potencialnih jamah, ki s časom spreminjajo svojo lego.

p in ne sodeluje pri pojavih, ki nas zanimajo in v katerih izkoristimo le prevodniške elektrone. Pomembno je, da par ne nastane blizu površine, ker bi se lahko elektroni vezali nanjo. Kjer je svetlobni tok gostejši in pade na površinsko enoto več fotonov, se nabere več elektronov. Od daleč spominja pojav na *fotoefekt*, pri katerem kratkovalovna svetloba izbija prevodniške elektrone iz kovine. "Fotoefekt" v polprevodniku ima svoje posebnosti, denimo to, da je za sprostitvev elektrona potrebna v povprečju manjša energija kot pri fotoefektu v kovini.



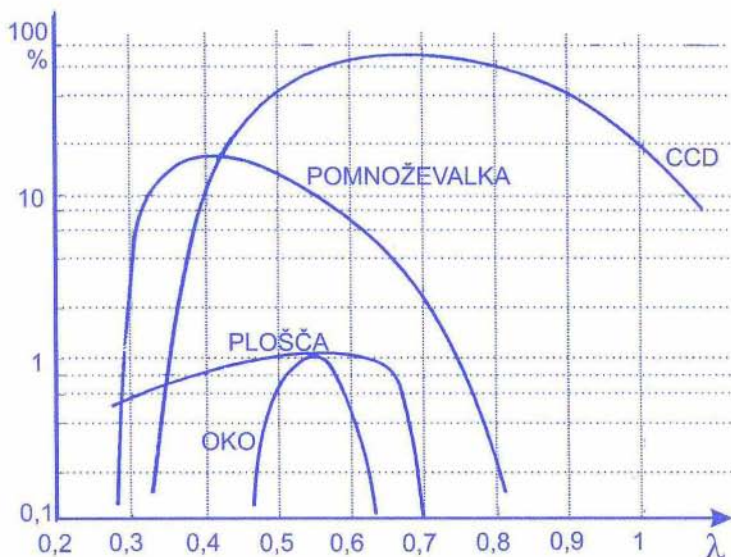
Slika 4. Pomikanje skupin elektronov v slikovnih elementih kanalov in registra s sklopitvijo nabojev ponazorimo s prispodobno. Ojnica premika bate v povezanih valjih, tako da se tekočina pomika proti desni, če kolo na ojnici vrtimo kot desni vijak. Od risbe do risbe zasučemo kolo za 60° , to je za šestino periode. Tekočina v valjih se pomika proti desni, ko kolo vrtimo tako, kot se vrtil desni vijak. Vrtenju kolesa ustreza nihajoča napetost in njen nihajni čas seže navzdol do stotimilijonine sekunde. Risbi f) sledi zopet a). Prispodobno je uporabil Gilbert Amelio v članku v Scientific American leta 1974.

Elektron, ki se sprosti v območju n , se ujame v bližnjo *potencialno jamo*. To je območje z nizko potencialno energijo, ki ga ustvarimo z napetostjo na vratih, to je na elektrodah, proti osnovi ploščice. Elektron ima negativni naboj, tako da je potencialna energija nizka na območju, na katerem je napetost proti osnovi ploščice pozitivna. Vsak slikovni element je v smeri pomikanja naboja z elektrodami, ki smo jih imenovali vrata, razdeljen na tri dele. V dveh je potencialna energija elektrona visoka in ti delujeta kot ograji, v tretjem pa je nizka, in ta deluje kot potencialna jama (slika 2). V tem pogledu je bila prisposoba s posodami nekoliko preveč poenostavljena (slika 3). Z uravnavanjem napetosti na elektrodah pomikamo zbrane elektrone v korakih v zeleni smeri. To je *trifazni način delovanja* naprave. Tudi pri tem pride prav prisposoba. Mislimo na trojice povezanih batov v večji skupini, ki jih poganjamo s kolesom na njnici (slika 4).

Izdelava slikovnih naprav je dokaj zapletena. Polprevodniku v talini dodajo primes trivalentnega elementa in vzgojijo velike kristale silicija s premerom več kot deset centimetrov. Iz tega območja p z zmernim električnim uporom izrežejo tanko ploščico, iz katere izdelajo več slikovnih naprav. Najprej naredijo ograde kanalov, tako da v $5 \mu\text{m}$ širokih vzporednih območjih v silicijevo kristalno mrežo vgradijo atome trivalentnega bora. ($1 \mu\text{m}$ je milijonina metra ali tisočina milimetra.) Ploščico prej prevlečejo s plastjo za svetlobo občutljive snovi in jo osvetlijo skozi "masko", tako da ta območja niso osvetljena, območja med njimi pa so. Na območjih med ogradami svetloba polimerizira snov, da se pozneje v topilu ne raztopi. Na območjih ograd pa se neosvetljena snov v topilu raztopi. Na teh območjih dosežejo, da se v silicijevo kristalno mrežo vgradijo atomi bora, in območja še prevlečejo z $1 \mu\text{m}$ debelo plastjo silicijevega dioksida. Postopek s snovjo, ki je občutljiva za svetlobo, in topilom, jedkanje, pri katerem na določenih območjih odstranijo silicijev dioksid, in druge postopke večkrat ponovijo. V enem od njih naredijo kanale s tem, da na območjih med ogradami v silicijevo kristalno mrežo vgradijo atome petvalentnega fosfora. Njihova gostota preseže gostoto prvotne trivalentne primesi in nastane $0,2$ do $0,3 \mu\text{m}$ debelo območje n . Na površini ploščice ustvarijo $0,12 \mu\text{m}$ debelo plast silicijevega dioksida kot izolacijsko podlago za elektrode. Elektrode položijo drugo za drugo v treh med seboj izoliranih, po $0,5 \mu\text{m}$ debelih plasteh iz polikristalnega silicija. Tega sestavljajo drobni kristalčki,

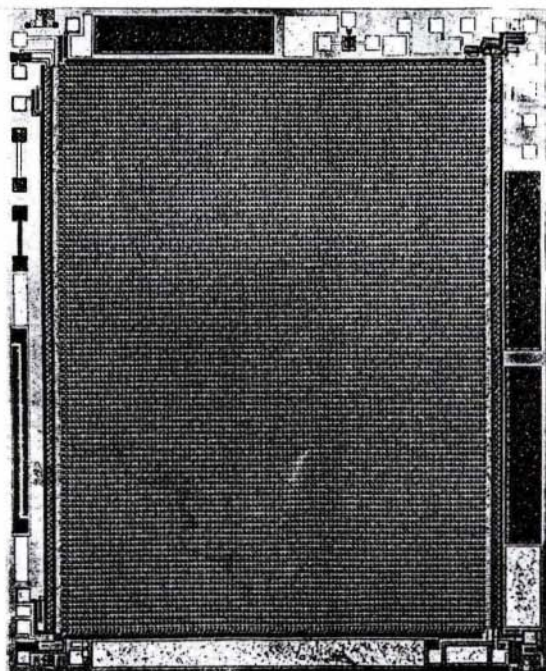
usmerjeni v vse mogoče smeri (medtem ko je ploščica iz enega samega velikega kristala). V polikristalni silicij vgradijo precej atomov fosfora, tako da dobro prevaja. Nazadnje narišejo na nekatere dele ploščice plasti aluminija, ki delujejo kot elektrode. Prej na določenih delih odjedkajo silicijev dioksid, da aluminij dobi stik s polikristalnimi elektrodami. Na aluminijeve elektrode priključijo zunanje vodnike.

Opisane slikovne naprave imajo pred sorodnimi napravami več prednosti. V *fotopomnoževalki*, ki izkorišča fotoefekt na tanki kovinski katodi v vakuumu, je treba v povprečju pet ali več fotonov, da se sprosti en elektron, v slikovni napravi pa pet fotonov sprosti celo štiri elektrone. V fotografski plošči in očesu zaznamo kvečjemu vsak deseti foton (slika 5).



Slika 5. Kvantni izkoristek slikovne naprave in fotopomnoževalke v odvisnosti od valovne dolžine svetlobe. Kvantni izkoristek je razmerje med številom izbitih elektronov in številom fotonov v vpadni svetlobi z določeno valovno dolžino. Kvantni izkoristek 10 % pomeni, da v povprečju vsak deseti foton izbije elektron. Kvantni izkoristek očesa in tudi fotografske plošče ocenimo posredno. Na navpično os je nanosen kvantni izkoristek v odstotkih, na vodoravno pa valovna dolžina v mikrometrih, $1 \mu\text{m} = 1000 \text{ nm}$.

Slikovna naprava je potemtakem veliko bolj občutljiva od vseh drugih merilnikov. Rezultat, ki ga da slikovna naprava, je sorazmeren z gostoto svetlobnega toka, kar za fotografsko ploščo ne velja. S slikovno napravo je mogoče na sliki hkrati zaznati močan in veliko šibkejši izvir. Vrhu tega je mogoče podatke iz slikovne naprave neposredno voditi na računalnik, jih obdelati, shraniti in zopet priklicati. Ne gre pozabiti še na eno pomembno prednost pred fotografsko ploščo. Astronomi so kdaj po noči opazovanj pri razvijanju neprijetno presenečeni ugotovili, da iz tega ali onega razloga slike na ploščah niso bile uporabne. Pri slikovni napravi pa lahko sproti presodijo, ali so podatki uporabni in ustrezno ukrepajo.



Slika 6. Polprevodniška slikovna naprava družbe Fairchild iz leta 1973 s 100 krat 100 slikovnimi elementi. Napravo z velikostjo 3 mm krat 4 mm so izdelali v raziskovalne namene za televizijsko slikovno kamero. Mimogrede omenimo še lastnosti slabih deset let mlajše naprave družbe Texas Instruments z 800 krat 800 slikovnih elementov: slikovni element je kvadrat s stranico $15\ \mu\text{m}$, slikovni del naprave kvadrat s stranico 12,2 mm in naprava v celoti kvadrat s stranico 17,8 mm. V taki napravi se naboj iz najbolj oddaljenega slikovnega elementa pomakne 4800-krat, v obeh pravokotnih smereh po 3·800. Da ne bi izgubili več kot desetine sproščenih elektronov, pri vsaki premestitvi ne smemo izgubiti več kot dva elektrona na sto tisoč.

V slikovni napravi moti termično gibanje, zaradi katerega se po ključju kdaj nabere več elektronov, kdaj manj. Ta vpliv zmanjšajo tako, da napravo hladijo, če je potrebno, električno ali celo s tekočim zrakom. Silicij slabo prepušča vijolično in ultravijolično svetlobo. Če želijo zaznati tudi to svetlobo, osnovo silicijevega kristala stanjšajo in napravo osvetlijo od spodaj, ne od zgoraj. Slikovna naprava pa za fotografsko ploščo zaostaja v dveh pogledih. Fotografske plošče so lahko več desetkrat večje. Poleg tega so zrnca v njih, ki počrtnijo, veliko manjša kot slikovni elementi in jih veliko več pride na kvadratni centimeter.

Polprevodniško napravo sta si leta 1969 zamislila George Smith in Willard Boyle v laboratorijih ameriške družbe Bell in za to leta 1999 dobila nagrado ameriškega inštituta elektriških in elektronskih inženirjev. Sprva sta želela izdelati elektronsko vzporednico magnetnega pomnilnika za računalnik. Kmalu pa so ugotovili, da se naprava veliko bolje izkaže pri sprejemanju slik in jo danes uporabljajo le v ta namen. Leta 1973 so izdelali prvo napravo z deset tisoč slikovnimi elementi (slika 6). Istega leta so v ameriškem vesoljskem uradu NASA in v nekaterih računalniških družbah pomislili na prednosti naprave v astronomiji. V naslednjih letih so postopno izdelali vse večje naprave. Današnje navadno sestavlja po 2048 krat 2084 slikovnih elementov, le izjemoma več. Največ jih uporabljajo v astronomiji, v kateri omogočijo, da z manjšimi astronomskimi daljnogledi dobijo slike, kot jih je bilo s fotografskimi ploščami mogoče dobiti le z največjimi, ali z enakimi daljnogledi slike v veliko krajšem času. Potrebna pa je zahtevna računalniška oprema, strojna in programska (slika na naslovni strani). Polprevodniške slikovne naprave uporabljajo za opazovanje vesoljskih teles na umetnih satelitih, na primer na vesoljskem daljnogledu Hubble. Uporabljajo jih tudi v televizijskih snemalnih kamerah in v digitalnih fotografskih aparatih, ki že tekmujejo s fotografskimi aparati na film.

Janez Strnad
