

Princip rada CCD detektora

10.1 CCD detektor

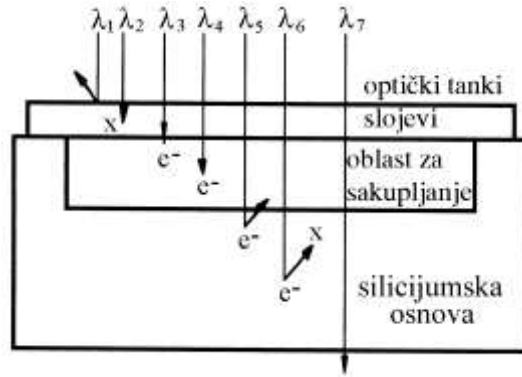
CCD je skraćenica od Charge-Coupled Device, što bi se slobodno moglo prevesti kao sistem sa spregom preko prostornog naelektrisanja. CCD je pronađen krajem 60-tih godina prošlog veka, u Bellovim laboratorijama. Prva namena CCD-a je bila novi tip memorije za računare. Tokom 70-tih godina prošlog veka, otkrivene su mogućnosti primene CCD-a u obradi signala i kao detektora slike, dok je potpuno zaboravljena njegova prvobitna namena kao memorija za računare.

10.1.1 Fizičke osobine CCD detektora

Formiranje slike na CCD detektoru je proces koji se sastoji iz tri koraka:

- pretvaranje fluksa svetlosnog zračenja u nosioce naelektrisanja (elektroni i parovi elektron-šupljina) na pikselima CCD detektora,
- prenos naelektrisanja u okviru silicijumske podloge,
- pretvaranje naelektrisanja u napon i pojačanje izlaznog signala.

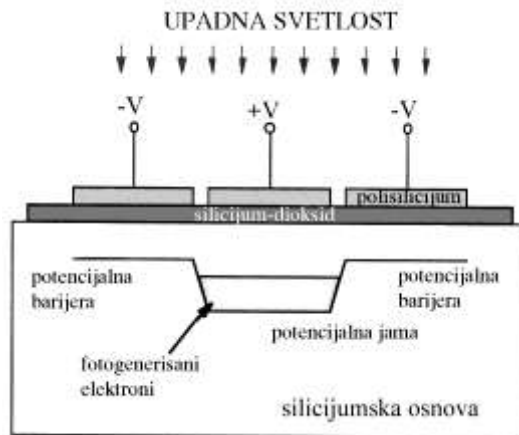
Prvi korak prilikom formiranja slike na CCD detektoru je pretvaranje fluksa svetlosnog zračenja u nosioce naelektrisanja. Upadna svetlost koja se sastoji iz fotona formira lik predmeta na matrici piksela. Svaki foton iz upadne svetlosti predaje svoju energiju silicijumu i izaziva stvaranje nosioca naelektrisanja (elektrona i para elektron-šupljina). Broj elektrona koji se stvaraju na svakom pikselu je linearno zavisano od fluksa upadne svetlosti i vremena ekspozicije, a nelinearno zavisano od talasne dužine upadne svetlosti. Mnogi činioci mogu da utiču na mogućnost detekcije fotona. Tanki slojevi materijala koji su naneti na silicijum prilikom proizvodnje CCD detektora imaju tendenciju da apsorbuju ili reflektuju upadnu svetlost. Fotoni se apsorbuju na različitim debljinama u silicijumu u zavisnosti od njihove talasne dužine. Proces apsorpcije fotona u silicijumu prikazan je na slici 10.1.



Slika 10.1. Proces apsorpcije fotona na silicijumu

Sa slike se jasno vidi da samo fotoni koji se apsorbuju u oblasti za skupljanje, generišu naelektrisanje koje može da se iskoristi u daljem procesu. Fotoni koji se reflektuju ili apsorbuju u silicijumskoj podlozi su izgubljeni za dalji rad CCD detektora.

CCD detektori rade na principu MOS tehnologije. MOS je skraćenica od engleskih reči Metal Oxide Semiconductor – poluprovodnik od metalnog oksida. Struktura CCD detektora je prikazana na slici 10.2.



Slika 10.2. Struktura CCD detektora

Preuzeto iz [30]

Sa slike 10.2, vidi se da se CCD detektor sastoji iz elektroprovodnog materijala (dopirani polisilicijum) koji naleže na izolator (silicijum dioksid). Polisilicijum i silicijum dioksid naneti su kao tanki slojevi na silicijumskoj osnovi. Kada se dovede odgovarajući napon na polisilicijum, elektrostaticki potencijali u okviru silicijuma se mogu skupljati u potencijalne jame. One imaju mogućnost da skupljaju naelektrisanja koja su formirali fotoni iz upadne svetlosti. Naelektrisanje u okviru određene oblasti može se zadržati formiranjem zona potencijalnih razlika. Te zone se nazivaju barijere i one okružuju svaku potencijalnu jamu. U zavisnosti od dovedenog napona polisilicijum, može da formira potencijalnu jamu ili barijeru.

10.1.2 Tehnike prenosa naelektrisanja u CCD detektorima

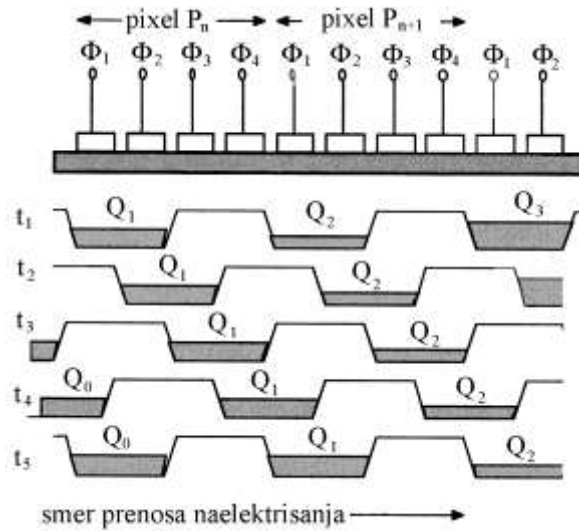
Prvi korak u svakom CCD detektoru je stvaranje naelektrisanja putem apsorpcije fotona iz upadnog zračenja. To naelektrisanje se skuplja na jednom mestu u okviru piksela na CCD detektoru, primenom odgovarajućih napona. Drugi važan korak je mogućnost prenosa naelektrisanja kroz CCD detektor radi mogućnosti njegove kasnije obrade. Da bi se to omogućilo razvijene su sledeće tehnike:

- tehnika četiri faze,
- tehnika tri faze,
- tehnika pseudo dve faze,
- tehnika dve faze,
- tehnika virtuelne faze.

U nastavku ove Glave, biće opisane svaka od ovih tehnika prenosa naelektrisanja. Prilikom opisa svake od ovih tehnika prenosa naelektrisanja mora se uvek imati na umu da, kada se pomeri naelektrisanje vezano za jedan piksel, u isto vreme se pomeraju naelektrisanja vezana za sve piksele u jednom redu ili jednoj koloni.

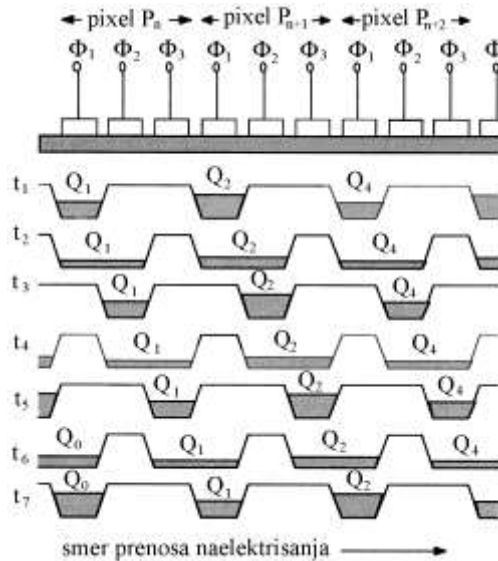
Kod tehnike četiri faze, prenos naelektrisanja se ostvaruje na sledeći način. Registri za prenos naelektrisanja u CCD detektoru se formiraju tako što elektrode u polisilicijumu definišu dugačak niz prenosnih barijera duž jedne ose. Ako se dovede visok napon na jednu od prenosnih barijera, ispod nje se stvara potencijalna jama. Okolne prenosne barijere se nalaze na niskom naponu i formiraju potencijalnu barijeru. Na slici 10.3 prikazan je vremenski dijagram prenosa naelektrisanja kod tehnike četiri faze.

Kao što se sa slike 10.3 vidi, svaki piksel se sastoji iz četiri prenosne barijere, označene sa Φ_1 do Φ_4 . Ako se prenosne barijere Φ_1 i Φ_2 nalaze na visokom naponu, a prenosne barijere Φ_3 i Φ_4 nalaze na niskom naponu, tada se formira potencijalna jama ispod prenosnih barijera Φ_1 i Φ_2 . U potencijalnoj jami se skuplja svo fotoindukovano naelektrisanje na pikselu P_n . Ako prenosne barijere Φ_1 i Φ_3 promene polaritet (Φ_1 sa visokog napona pređe na niski napon i Φ_3 sa niskog napona pređe na visoki napon) tada se potencijalna jama sa prikupljenim naelektrisanjem, pod dejstvom elektrostatičkih sila, pomera na mesto između prenosnih barijera Φ_2 i Φ_3 . Ako sada prenosne barijere Φ_2 i Φ_4 promene polaritet, potencijalna jama se pomera na mesto između prenosnih barijera Φ_3 i Φ_4 . Proces promene polariteta prenosnih barijera se ponavlja, sve dok se potencijalna jama sa prikupljenim naelektrisanjem ne premesti između prenosnih barijera Φ_1 i Φ_2 piksela P_{n+1} .



Slika 10.3. Vremenski dijagram prenosa naelektrisanja kod tehnike četiri faze
Preuzeto iz [30]

Tehnika tri faze za prenos naelektrisanja je veoma slična tehnici četiri faze. Za definiciju jednog piksela koriste se tri prenosne barijere. Kod ove tehnike, naelektrisanje se nalazi u potencijalnoj jami ispod prenosne barijere Φ_1 koja je na visokom naponu, dok su prenosne barijere Φ_2 i Φ_3 na niskom naponu i ograničavaju potencijalnu jamu ispod prenosne barijere Φ_1 . Vremenski dijagram prenosa naelektrisanja kod tehnike tri faze prikazan je na slici 10.4.

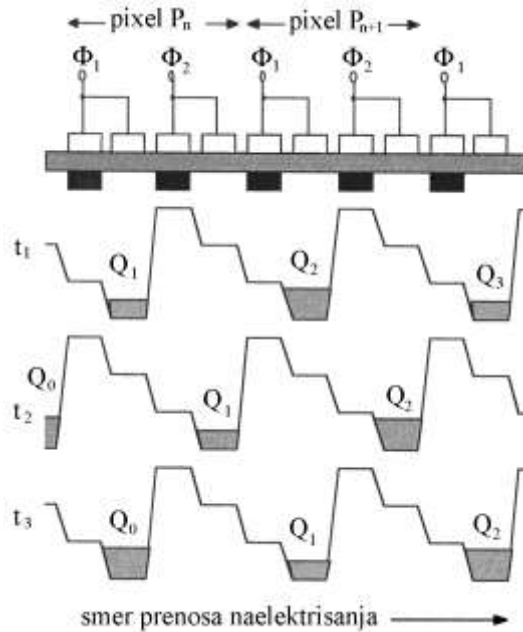


Slika 10.4. Vremenski dijagram prenosa naelektrisanja kod tehnike tri faze
Preuzeto iz [30]

Sa slike 10.4, vidi se da se naelektrisanje u trenutku t_1 nalazi skoncentrisano ispod prenosne barijere Φ_1 . U trenutku t_2 , na prenosnu barijeru Φ_2 dovodi se visok napon, pa se potencijalna

jama sa fotoindukovanim naelektrisanjem širi na prenosne barijere Φ_1 i Φ_2 . U trenutku t_3 , na prenosnu barijeru Φ_1 dovodi se nizak napon, pa se potencijalna jama skuplja ispod prenosne barijere Φ_2 . Na ovaj način, u dva koraka izvršeno je pomeranje potencijalne jame sa fotoindukovanim naelektrisanjem sa prenosne barijere Φ_1 na prenosnu barijeru Φ_2 . Na isti način vrši se i pomeranje potencijalne jame sa prenosne barijere Φ_2 na prenosnu barijeru Φ_3 . Ciklus prenosa naelektrisanja se završava kada se naelektrisanje prenese u prostor ispod prenosne barijere Φ_1 sledećeg piksela P_{n+1} . Prednost tehnike tri faze u odnosu na tehniku četiri faze je u smanjenom broju prenosnih barijera koje definišu jedan piksel. Na taj način je moguće postići veću gustinu pakovanja piksela na datoj površini CCD detektora a, samim tim, i veću rezoluciju CCD detektora. Nedostatak tehnike tri faze, u odnosu na tehniku četiri faze, je komplikovanija elektronika koja upravlja dovodenjem visokog i niskog napona na prenosne barijere.

Tehnika pseudo dve faze za prenos naelektrisanja je veoma slična tehnici četiri faze, samo što se kod tehnike pseudo dve faze koriste dva takta, da bi se implementirala kompletna procedura za prenos naelektrisanja. Da bi se obezbedilo da se naelektrisanja sa susednih piksela ne mešaju prilikom prenosa, uvek se obrađuju suprotne prenosne barijere koje se nalaze na različitim elektrostatičkim potencijalima. Vremenski dijagram prenosa naelektrisanja kod tehnike pseudo dve faze prikazan je na slici 10.5.

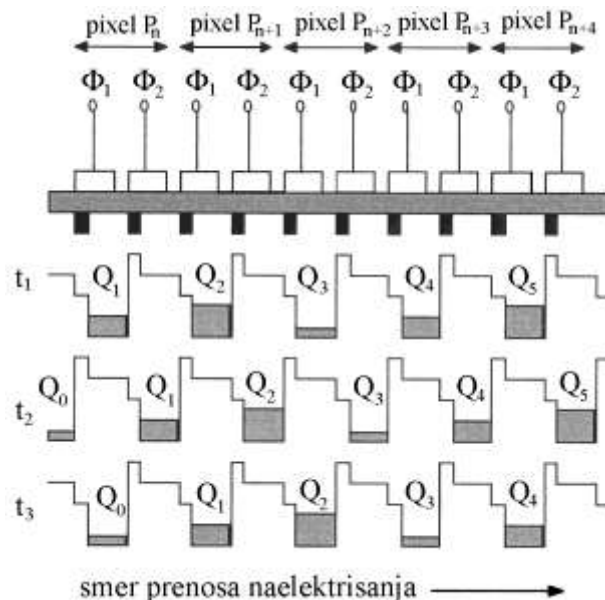


Slika 10.5. Vremenski dijagram prenosa naelektrisanja kod tehnike pseudo dve faze
Preuzeto iz [30]

Sa slike 10.5 vidi se da za kompletan ciklus prenosa naelektrisanja sa jednog piksela na drugi piksel potrebna su samo dva takta. Na ovaj način smanjena je kompleksnost elektronike za prenos naelektrisanja, ali je zato povećana kompleksnost elektronike pomoću koje se vrši obrada prenetog naelektrisanja.

Kod tehnike dve faze, za prenos naelektrisanja koriste se samo dve prenosne barijere po pikselu i kompletan proces prenosa naelektrisanja se obavlja u dva takta. To je postignuto kreiranjem

stepenastog elektrostatickog potencijala između dve prenosne barijere. Kod tehnike pseudo dve faze, ista stvar se postiže spajanjem dve susedne prenosne barijere i formiranjem stepenastog elektrostatickog potencijala. Vremenski dijagram prenosa naelektrisanja kod tehnike dve faze je isti kao i kod tehnike pseudo dve faze i prikazan je na slici 10.6.

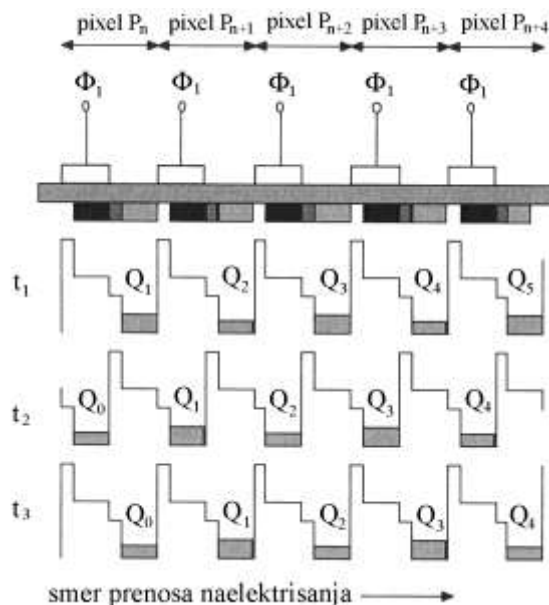


Slika 10.6. Vremenski dijagram prenosa naelektrisanja kod tehnike dve faze
Preuzeto iz [30]

Prednost tehnike dve faze, u odnosu na tehniku pseudo dve faze, je mogućnost formiranja CCD detektora veoma visoke gustine, odnosno CCD detektora sa visokom rezolucijom.

Kod tehnike virtuelne faze, za prenos naelektrisanja koristi se samo jedna prenosna barijera po pikselu i kompletan proces prenosa naelektrisanja se obavlja u jednom taktu. Karakteristika CCD detektora sa tehnikom virtuelne faze je odsustvo polisilicijumskih elektroda između prenosnih barijera. Ova osobina čini CCD detektore sa tehnikom virtuelne faze značajno osjetljivijim na svetlost, zbog smanjenog broja tankih slojeva koji se preklapaju i koji mogu da apsorbuju ili reflektuju svetlost. Vremenski dijagram prenosa naelektrisanja kod tehnike virtuelne faze prikazan je na slici 10.7.

Sa slike 10.7 vidi se da se prenos naelektrisanja vrši pomoću stepenastog elektrostatickog naelektrisanja.



Slika 10.7. Vremenski dijagram prenosa naelektrisanja kod tehnike virtualne faze
Preuzeto iz [30]

10.1.3 Konfiguracije CCD detektora

CCD detektor se može projektovati na više načina od kojih će ovde biti opisane samo dve konfiguracije:

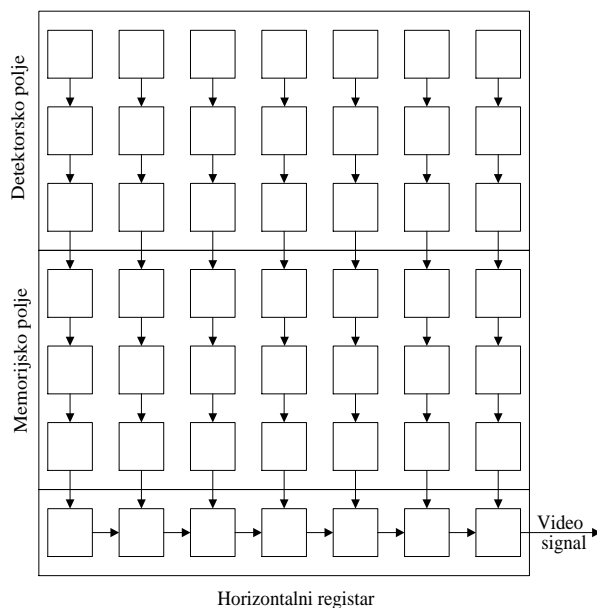
- CCD sa prenosom u slikama (Frame transfer CCD),
- CCD sa međulinijskim prenosom (Interline transfer CCD).

CCD detektor sa prenosom u slikama sastoji se iz dva dela. Prvi deo CCD detektora se naziva blok slike i služi za generisanje naelektrisanja na osnovu upadnog zračenja. Drugi deo CCD detektora je memorijski blok i služi za memorisanje fotogenerisanog naelektrisanja iz bloka slike. Memorijski blok je prevučen neprovidnim slojem i na taj način zaštićen od upadnog zračenja. Fotogenerisano naelektrisanje, koristeći jednu od opisanih tehnika prenosa naelektrisanja prenosi se iz bloka slike u memorijski blok. Na taj način se oslobađa blok slike za generisanje nove slike. Opšta blok šema CCD detektora sa prenosom u slikama data je na slici 10.8.

Sa slike 10.8 vidi se da se naelektrisanje pomera vertikalno naniže, iz jednog reda CCD detektora u drugi red. Poslednji red koji se nalazi u memorijskom bloku prelazi u horizontalni registar i tu se očitava piksel po piksel. Vreme koje je potrebno da se preko horizontalnog registra očitava kompletan memorijski blok, jednako je vremenu za generisanje nove slike. To znači da dok se u bloku slike generiše nova slika, u memorijskom bloku se očitava prethodno preneti slika.

CCD detektor sa prenosom u slikama ima sledeći značajan problem. Proces generisanja slike se ne zaustavlja ni prilikom prebacivanja naelektrisanja iz bloka slike u memorijski blok. To znači da svetlost pada na CCD detektor i prilikom prebacivanja naelektrisanja. Ta svetlost generiše

novo naelektrisanje, koje se meša sa naelektrisanjem koje se prebacuje iz bloka slike u memorijski blok. Ovo mešanje naelektrisanja stvara grešku koja se naziva razlivanje po vertikali (smearing). Razlivanje po vertikali se na slici vidi kao vertikalna bela ili crvena linija, koja se proteže iznad i ispod jako osvetljenih delova slike. Da bi se rešio problem razlivanja po vertikali uvodi se mehanički poklopac (shutter) koji štiti CCD detektor od osvetljenja, tako da nema generisanja slike dok traje prenos naelektrisanja.

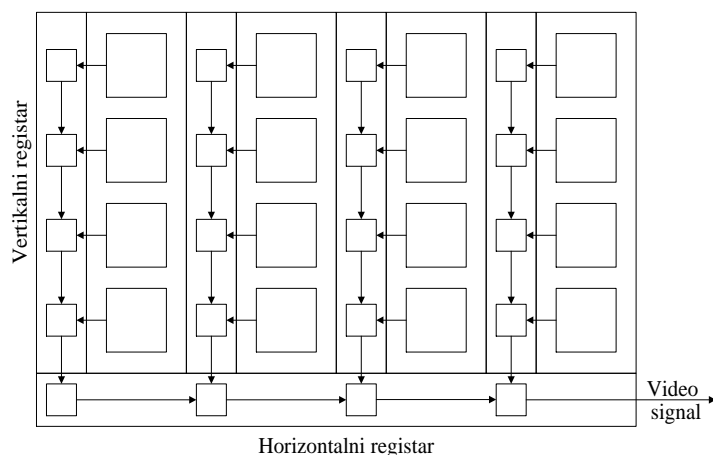


Slika 10.8. CCD detektor sa prenosom u slikama

CCD detektor sa međulinijским prenosom je razvijen kao pokušaj poboljšanja CCD detektora sa prenosom u slikama. Kod CCD detektora sa međulinijским prenosom, jedan piksel se sastoji iz fotoosetljive ćelije koja služi za generisanje slike i memorijske ćelije koja služi za skladištenje fotogenerisanog naelektrisanja. U ovom slučaju, memorijska ćelija se naziva vertikalni registar i zaštićena je od upadne svetlosti. Vertikalni registar je po svojoj funkciji sličan memorijskom bloku kod CCD detektora sa prenosom u slikama. Kod CCD detektora sa međulinijским prenosom, koristi se linijski prenos naelektrisanja i odvojeni elementi za generisanje i skladištenje naelektrisanja. Opšta blok šema CCD detektora sa međulinijским prenosom data je na slici 10.9.

Fotogenerisano naelektrisanje se, u jednom koraku, prebacuje u vertikalni registar. Sadržaj vertikalnih registara pomera se za jednu liniju naniže. Sadržaj poslednje linije prebacuje se u horizontalni registar. Ceo ovaj proces prebacivanja je veoma sličan kao kod CCD detektora sa prenosom u slikama.

Pošto se vertikalni registar nalazi u okviru piksela, to je fotoosetljivi deo manji i samim tim osetljivost CCD detektora je manja. Jedan od načina za rešavanje problema smanjene osetljivosti CCD detektora je ugradnja minijaturnih sočiva, koja usmeravaju i fokusiraju upadnu svetlost na fotoosetljivu ćeliju.



Slika 10.9. CCD detektor sa međulinijskim prenosom

Kod CCD detektora sa međulinijskim transferom, problem razlivanja po vertikali je skoro u potpunosti rešen, jer se transfer fotogenerisanog naelektrisanja u vertikalne registre izvršava u jednom koraku.

Glavni nedostatak CCD detektora sa međulinijskim prenosom je njihova kompleksnost, koja dovodi do povećane cene CCD detektora po komadu kao i smanjene osjetljivosti.

Na slici 10.10 prikazana je fotografija CCD detektora. Na fotografiji se pored CCD detektora nalazi olovka da bi se lakše moglo uporediti red veličina CCD detektora.



Slika 10.10. CCD detektor

Na slici 10.11 prikazana je fotografija CCD kamere. Na fotografiji se pored CCD kamere nalazi olovka da bi se lakše moglo uporediti red veličina CCD kamere.



Slika 10.11. CCD kamera