

Vežba 4: CCD senzor i difrakcija laserske svetlosti

Uvod

Kada svetlost, zvuk, ili materijalni talas, naiđe na prepreku (transparentnu ili netransparentnu) dolazi do difrakcije, tj. do promene talasnog fronta bilo u amplitudi, bilo u fazi. Prvi koji je objavio detaljnu studiju ove pojave bio je Frančesko Grimaldi u sedamnaestom veku. Nema bitne razlike između interferencije i difrakcije. Ipak, postalo je uobičajeno da se o interferenciji govori kada se razmatra superpozicija nekoliko talasa, a o difrakciji kada se razmatra veliki broj talasa.

Talasna teorija nije jedini način za tretiranje određenih difrakcionih fenomena. Na primer, difrakcija na rešetki može biti analizirana korišćenjem korpuskularnog kvantnog prilaza.

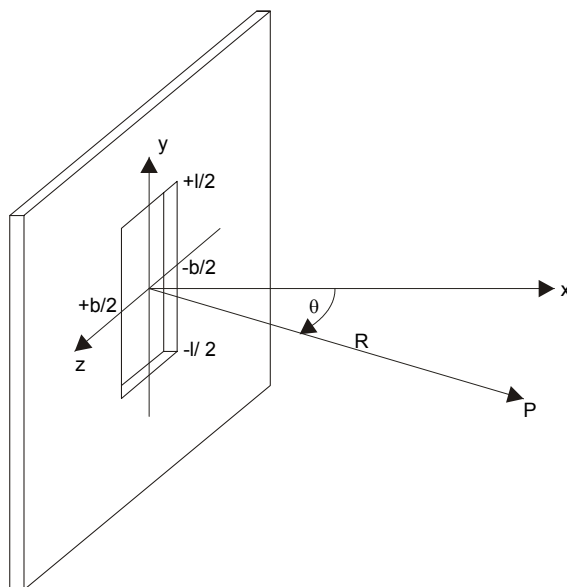
Kako optički instrumenti koriste samo deo upadnog talasnog fronta, difrakcioni efekti su bitni jer, ako bi se uklonili svi defekti, oštrina lika bi zavisila samo od difrakcije. Hajgensov princip ne može biti primenjen za objašnjenje difrakcije. Na primer, zvučni talas ($\nu=500\text{Hz}$, $\lambda=68\text{cm}$) se lako "savija" oko velikih objekata, kao što je recimo drvo, dok se pri osvetljavanju istog objekta dobijaju prilično izražene senke. Hajgensov princip ne vodi računa o talasnoj dužini i predviđa istu konfiguraciju talasnog fronta u oba slučaja. Teškoću je razrešio Frenel dodajući koncept intereferencije. Hajgens-Frenelov princip glasi: *Svaka tačka talasnog fronta, u datom trenutku, služi kao izvor sekundarnih talasa, koji imaju istu frekvenciju kao i primarni talas. Amplituda optičkog polja u bilo kojoj tački je superpozicija svih sekundarnih talasa, uzimajući u obzir njihove amplitude i relativne faze.*

Kirhof je razvio rigorozniju teoriju baziranu na direktnom rešenju diferencijalne talasne jednačine. Njegova teorija je aproksimacija koja daje dobre rezultate za dovoljno malo λ , tj. kada su dimenzije difrakcionih apertura velike u poređenju sa λ .

Potpuno rešenje problema difrakcije jedno je od najtežih u optici. Prvo takvo rešenje, koje koristi elektromagnetsku teoriju svetlosti, objavio je Somerfeld (1868-1951) godine 1896. Međutim, ni danas ne postoji potpuno rešenje za mnoge slučajeve koji su od praktičnog značaja.

Fraunhoferova i Frenelova difrakcija

Neka neproziran ekran Σ sadrži mali otvor koji je osvetljen ravnim talasom iz veoma udaljenog tačkastog izvora S. Neka je ravan posmatranja σ ekran paralelan sa, i vrlo blizu Σ . Pod ovakvim uslovima lik otvora, koji se projektuje na ekran, je jasno prepoznatljiv uprkos malim prugama oko njegove periferije. Ako bi se σ pomerao dalje od Σ lik otvora, iako još uvek lako prepoznatljiv, postaje složeniji i pruge postaju češće. Ovaj fenomen se naziva *Frenelova difrakcija* ili *near-field diffraction*.

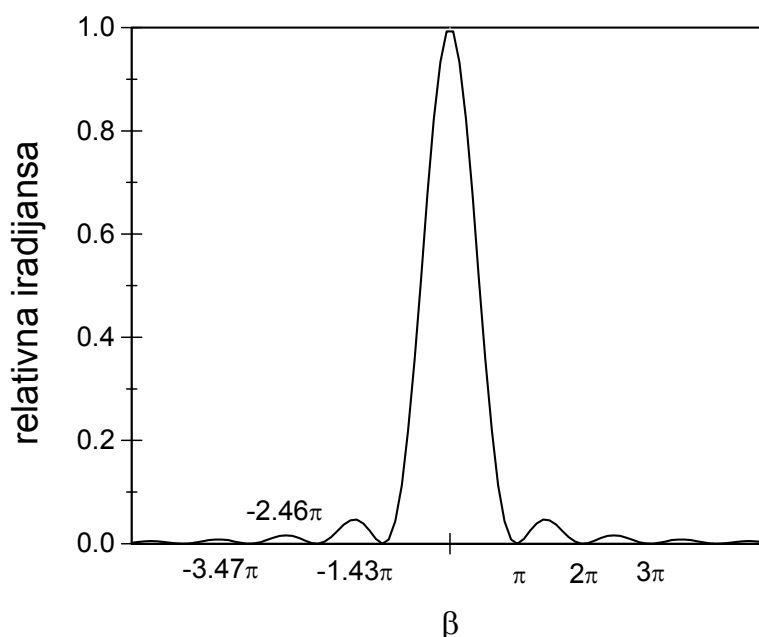


Sl.1. Prorez

Pomeranjem σ još dalje dolazi do kontinualne promene u prugama. Za veliku udaljenost projektovana struktura će se značajno raširiti, imajući malo ili nimalo sličnosti sa otvorom. Iza toga, pomerajući σ značajno, došlo bi samo do promene veličine strukture, ne i njenog oblika. To je *Fraunhoferova difrakcija* ili *far-field diffraction*.

Ako bi se u ovoj tački mogla značajno smanjiti talasna dužina dobio bi se opet slučaj Frenelove difrakcije. Ako bi se λ još smanjila, tako da teži nuli, pruge bi nestale i lik bi dobio oblik otvora, kako je predviđeno geometrijskom optikom. Ako bi se, pak, izvor

približno Σ na otvor bi dolazili sferni talasi pa bi se ponovo dobila Frenelova difrakciona slika, čak i za velika rastojanja između dva ekrana.



Sl.2. Fraunhoferova difrakciona slika za prorez

Drugim rečima, ako su S i P (tačka na σ) veoma daleko od Σ , i ako nema sočiva, dok su talasi koji dolaze i odlaze sa otvora ravni reč je o Fraunhoferovoj difrakciji. Kada su S ili/ P suviše blizu Σ da bi zakrivljenost talasnog fronta bila zanemarljiva, reč je o Frenelovoj difrakciji.

Fraunhoferova difrakcija na jednom prorezu

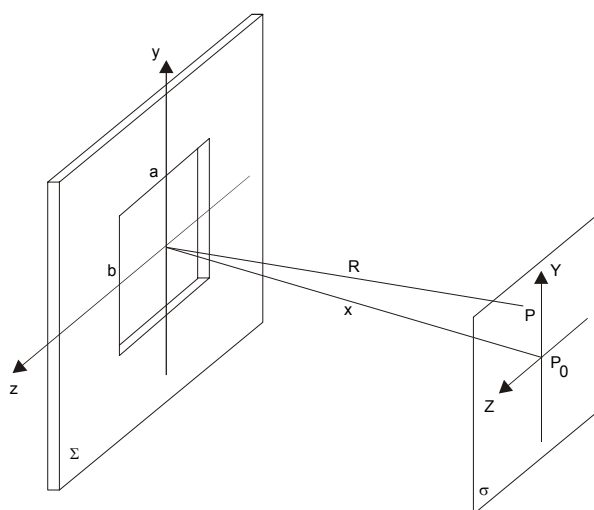
Neka talas prolazi kroz prorez ili izdužen pravougaoni otvor čija širina iznosi nekoliko stotina λ , a dužina nekoliko centimetara (Sl.1). Kako je prorez dugačak, talasni front na izlazu će biti praktično nepromenjen u pravcu y-ose. Zbog toga praktično neće biti difrakcije paralelno sa ivicama proreza. Iradijansa u tački koja je vrlo daleko od proreza će biti:

$$I(\theta) = I(0) \left(\frac{\sin \beta}{\beta} \right)^2. \quad (1)$$

U prethodnoj jednačini β je

$$\beta = (kb/2) \sin \theta, \quad (2)$$

gde je k talasni broj, b širina proreza, a θ se meri od xz -ravni (Sl.1).



Sl.3. Pravougaoni otvor

Minimumi $I(\theta)$ se javljaju za

$$\beta = \pm\pi, \pm 2\pi, \pm 3\pi, \dots \quad (3)$$

a maksimumi kada je

$$\text{tg}\beta = \beta \quad (4)$$

Rešenje ove transcendentne jednačine je:

$$\beta = 0, \pm 1.43\pi, \pm 2.46\pi, \pm 3.47\pi, \dots \quad (5)$$

Sl.2 prikazuje iradijansu datu prethodnim jednačinama. Pošto je $\beta = (\pi b/\lambda)\sin\theta$, povećavanje širine proreza zahteva smanjenje ugla θ da bi β ostalo konstantno. To znači da se povećanjem širine proreza difrakciona slika skuplja ka centralnom maksimumu, što bi se desilo i kada bi se λ smanjilo.

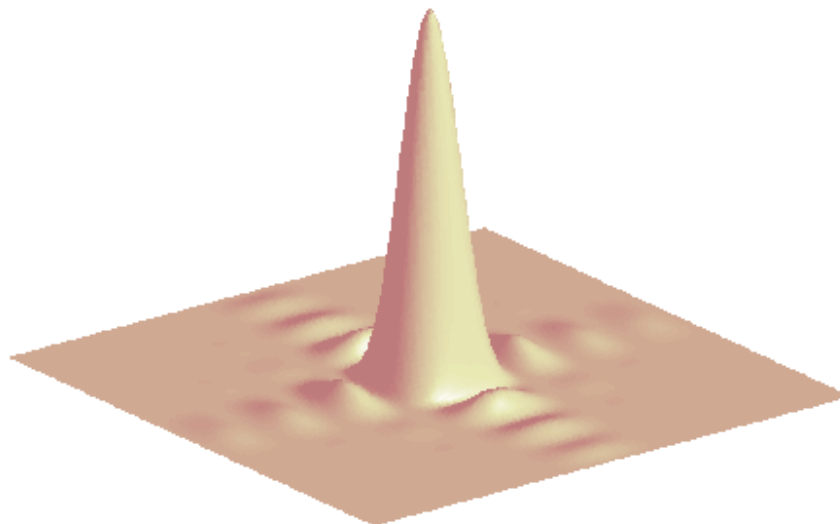
Fraunhoferova difrakcija na pravougaonom otvoru

Neka monohromatski talas, prostirući se u prvcu x -ose (Sl.3), dolazi do ekrana na kome je pravougaoni otvor dimenzija a i b . Iradijansa u tački P će biti:

$$I(Y, Z) = I(0) \left(\frac{\sin \alpha'}{\alpha'} \right)^2 \left(\frac{\sin \beta'}{\beta'} \right)^2, \quad (6)$$

gde je $I(0)$ iradijansa u tački P ($Y=0, Z=0$), $\alpha' = kaZ/2R$, $\beta' = kbY/2R$.

Za vrednosti $\alpha'=0$ ili $\beta'=0$ iradijansa $I(Y,Z)$ ima već poznati oblik sa Sl.2. Kada su α' i β' nenulti celi umnošci π , ili što je ekvivalentno, kada su Y i Z nenulti celi umnošci $\lambda R/b$, odnosno $\lambda R/a$, respektivno, tada je $I(Y,Z)=0$.



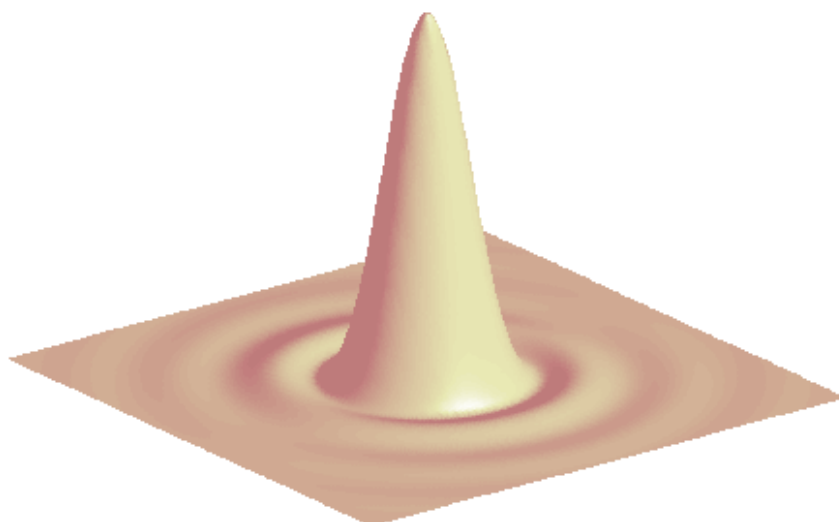
Sl.4. Distribucija iradijance za pravougaoni otvor

Između sporednih maksimuma koji se nalaze na glavnim osama ($\alpha'=0$ i $\beta'=0$), i koji se sasvim jasno uočavaju na Sl.4, postoje i maksimumi koji su van ove dve glavne ose, ali su oni jako mali i ne vide se na slici.

Fraunhoferova difrakcija na kružnom otvoru

Fraunhoferova difrakcija na kružnom otvoru je efekat koji je izuzetno važan u proučavanju optičkih instrumenata.. Tipična postavka je sledeća: ravan talas dolazi na ekran Σ koji ima kružni otvor, a odgovarajuća difrakciona slika se formira na udaljenom ekranu σ . Koristeći sočivo iza ekrana Σ , može se ekran σ približiti otvoru, a da se difrakciona slika ne promeni. Ako je sočivo centrirano i ako tačno popunjava difrakcioni otvor difrakciona slika će ostati potpuno nepromenjena.

Svetlosni talas koji prolazi Σ je odsečen tako da se samo deo talasa prostire kroz sočivo. Potpuno isto se dešava i u oku, teleskopu, mikroskopu ili fotoaparatu. Lik udaljenog tačkastog izvora koji formira savršeno sočivo bez aberacija nikada nije tačka, već neka vrsta difrakcione slike. Pošto se prikuplja samo deo talasnog fronta ne može se ni očekivati formiranje savršenog lika.



Sl.5. Distribucija iradijance za kružni otvor (Airy-evi prstenovi)

Ako se rastojanje R (vidi Sl.3) može smatrati konstantnim za celu difrakcionu sliku, tada se može pisati:

$$I = I(0) \left[\frac{2J_1(kaq/R)}{kaq/R} \right]^2, \quad (7)$$

gde je q rastojanje od centra ekrana σ (tačka P_0) do tačke P , a je poluprečnik otvora, a J_1 Beselova funkcija prve vrste reda 1.

Kako je $\sin\theta = q/R$ to je iradijansa

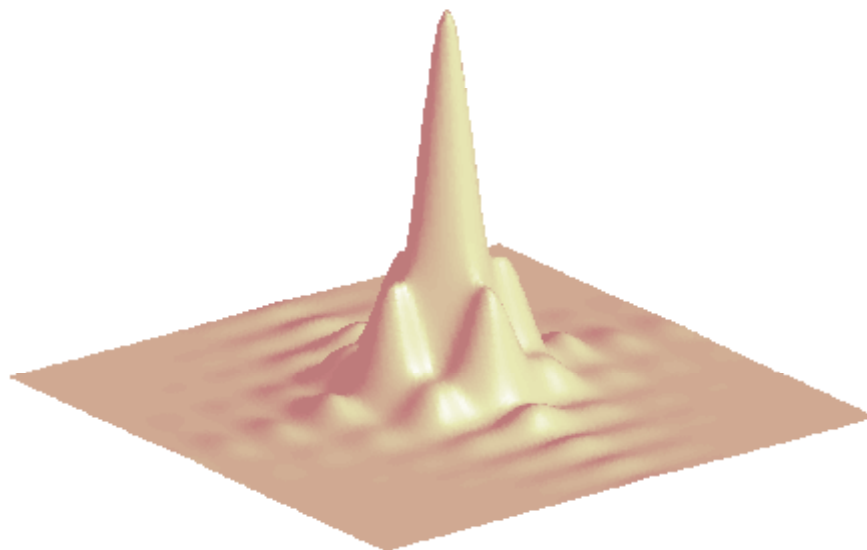
$$I = I(0) \left[\frac{2J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} \right]^2, \quad (8)$$

i prikazana je na Sl.5. Centralni maksimum se naziva Ejrijev disk, po Džordžu Ejriju (George Airy 1801-1892), astronomu koji je prvi izveo ovu jednačinu.

Centralni disk je okružen tamnim prstenom koji odgovara nuli funkcije $J_1(u)$. Iz standardnih tabela se dobija da je $J_1(u)=0$ za $u=3.83$, tj. kada je $kaq/R=3.83$. Odavde je poluprečnik koji odgovara prvom tamnom prstenu:

$$q_1 = 1.22 \frac{R\lambda}{2a}. \quad (9)$$

Vidi se da je prečnik Ejrijevog diska obrnuto srazmeran prečniku otvora.



Sl.6. Frenelova difrakciona slika za kvadratni otvor

Nule većeg reda se javljaju za kaq/R jednako 7.02, 10.17 itd. Sporedni maksimumi se javljaju za kaq/R od 5.14, 8.42, 11.6 itd. Za njih je $I/I(0)$ 0.0175, 0.0042 i 0.0016, respektivno. Može se izračunati da Ejrijev disk sadrži 84% svetlosti difrakcione slike, dok je 91% sadržano u prva dva svetla diska.

Frenelova difrakcija

Svaka tačka na primarnom talasnom frontu predstavlja kontinualni emiter sfernih sekundarnih talasa. Ali ako se svaki talas emituje uniformno u svim pravcima trebao bi da se pojavi i talas koji se kreće ka izvoru. Kako postojanje takvog talasa nije potvrđeno eksperimentalno, mora se modifikovati tvrdnja o emitovanju sekundarnih talasa.

Zbog toga se uvodi funkcija $K(\theta)$, poznata kao faktor inklinacije, kako bi se opisao pravac sekundarnih talasa. Ovaj faktor ima sledeći oblik

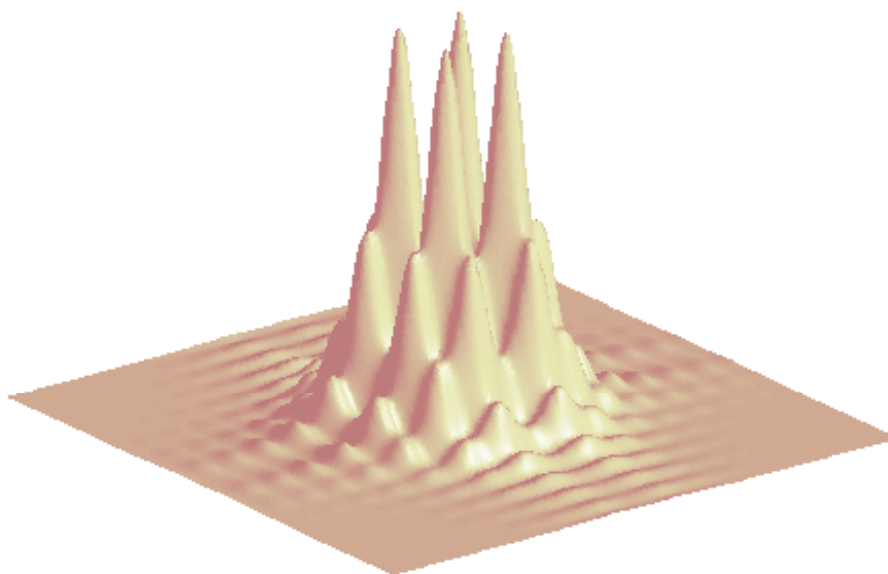
$$K(\theta) = \frac{1}{2}(1 + \cos \theta), \quad (10)$$

gde je θ ugao u odnosu na vektor \mathbf{k} primarnog talasa. Faktor ima maksimalnu vrednost $K(0)=1$, dok je minimalna vrednost $K(\pi)=0$, što znači da nema emitovanja sekundarnih talasa ka izvoru.

Frenelova difrakcija na pravougaonim otvorima i preprekama se matematički opisuje uz pomoć Frenelovih integrala, koji imaju sledeći oblik:

$$C(w) = \int_0^w \cos(\pi w'^2) dw', \quad S(w) = \int_0^w \sin(\pi w'^2) dw' . \quad (11)$$

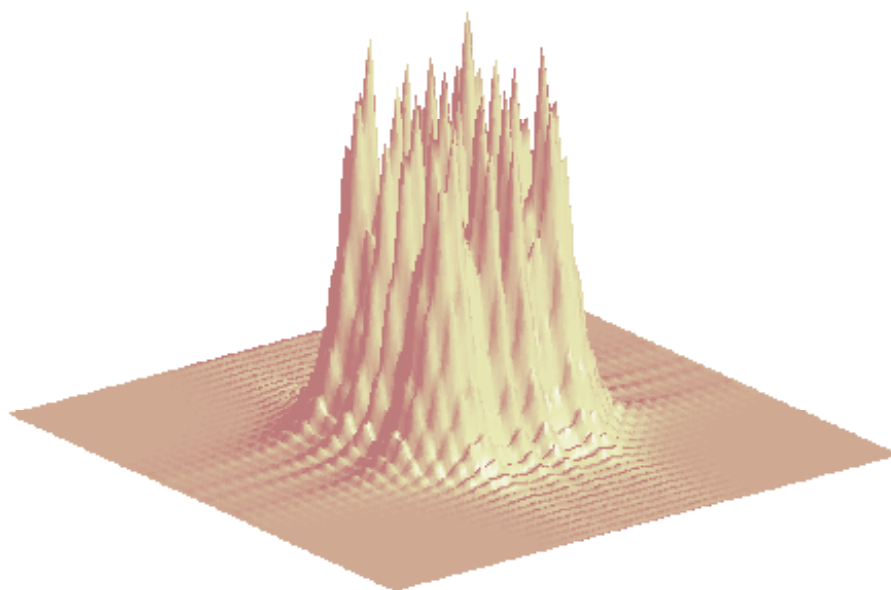
Marie Alfred Cornu (1841-1902), profesor na Ecole Polytechnique iz Pariza, pronašao je elegantan način geometrijskog prikazivanja Frenelovih integrala. Tzv. Kornuova spirala je grafik funkcije $B(w)=C(w)+iS(w)$ u kompleksnoj ravni, za w između 0 i $\pm\infty$. Ona je pogodna kako za kvantitativne proračune, tako i kao pomoć pri dobijanju kvalitativne slike difrakcije.



Sl.7. Frenelova difrakciona slika za kvadratni otvor većih dimenzija

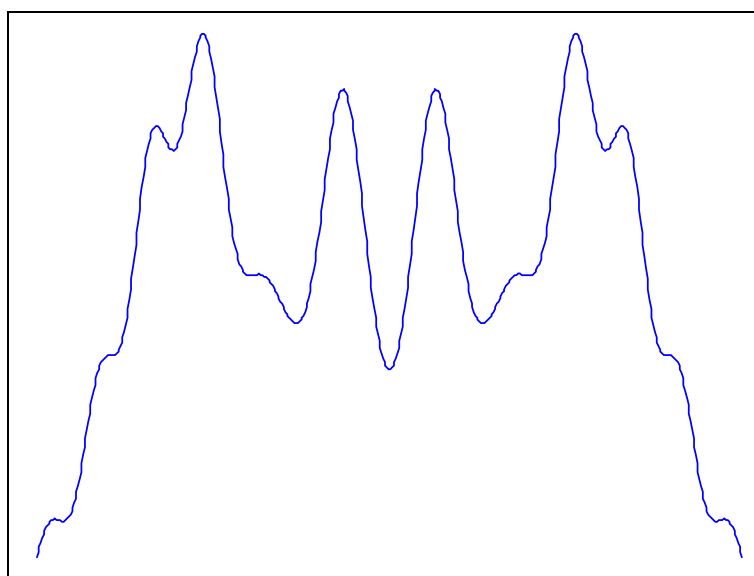
Sl.6 prikazuje difrakcionu sliku za kvadratni otvor. Vidi se da je ona slična Fraunhoferovoj difrakcionoj slici, ali za razliku od nje ima izraženije sporedne maksimume, i to ne samo one na glavnim osama. Sa povećanjem dimenzija otvora difrakciona slika se usložnjava (Sl.7) i počinje da dobija lokalizovaniju strukturu, dobijajući oblik otvora (Sl.8).

Frenelova difrakcija na preseku se može tretirati kao i difrakcija na pravougaonom otvoru, s tim što koordinate rubnih tačaka po jednoj osi teže beskonačnosti. Za male širine preseka postoji široki centralni maksimum, a sa povećanjem širine pojavljuju se minimumi i maksimumi u geometrijskom liku preseka (Sl.9), što nije bio slučaj kod Fraunhoferove difrakcije. Kao i kod pravougaonog otvora, sa povećanjem širine preseka dolazi do povećavanja broja pruga unutar geometrijskog lika, a difrakciona slika se ne prostire značajno van njega.



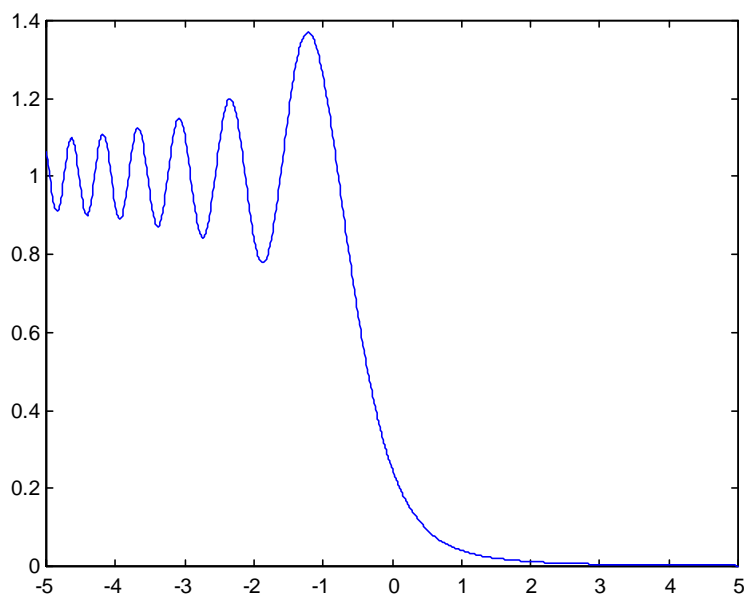
Sl.8. Frenelova difrakciona slika za kvadratni otvor još većih dimenzija

Neka sada postoji polubeskonačan ravan neproziran ekran. Difrakciona slika za ovaj slučaj je prikazana na Sl.10. Vidi se da je u tački koja je slika ivice ekrana relativna iradijansa jednaka jednoj četvrtini. Svetlost prodire u oblast geometrijske senke, ali iradijansa monotono opada, brzo i bez oscilacija. Za oblast van geometrijske senke karakteristične su oscilacije, čija se amplituda polako smanjuje sa udaljavanjem od ivice ekrana. Očigledno je da će se ovakva difrakciona slika pojaviti i blizu ivica širokog proreza. Iradijansa koju daje geometrijska optika će se dobiti samo kada talasna dužina svetlosti teži nuli. Sa smanjivanjem talasne dužine pruge se približavaju ivici i postaju uže.



Sl.9. Frenelova difrakciona slika za prorez

Šta se dešava ako se postavi uska prepreka? Ono što je zanimljivo je da se pojavljuju maksimumi u području geometrijske senke. Što su dimenzije prepreke veće postoji više maksimuma (Sl.11). Za uže prepreke sa smanjivanjem širine iradijansa van oblasti senke sporije opada, a pruge su bliže jedna drugoj (Sl.12).



Sl.10. Frenelova difrakciona slika za polubeskonačni ravni neprozirni ekran

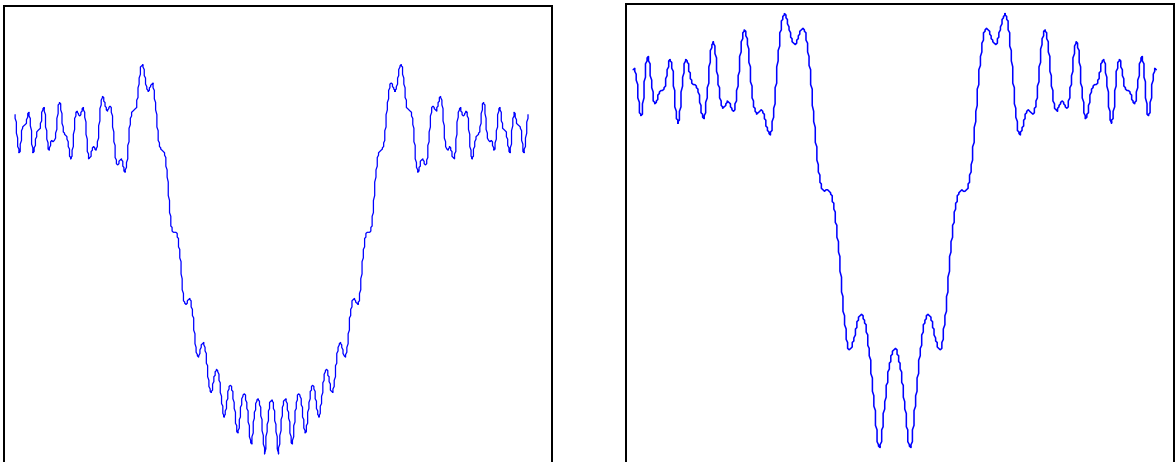
Interesantna je priča vezana za otkriće maksimuma unutar oblasti geometrijske senke. Godine 1818. Frenel se prijavio na takmičenje čiji je pokrovitelj bila Francuska akademija. Njegov rad o teoriji difrakcije je na kraju dobio prvu nagradu. Žiri je imao sledeći sastav: Laplas, Bio, Poason, Arago i Gej Lisak. Poason, koji je bio vatreni protivnik talasne teorije svetlosti, izveo je izuzetan i na izgled neodrživ zaključak iz Frenelove teorije. On je pokazao da će postojati svetla tačka na centru senke koju formira kružna neprozirna prepreka. To je bio rezultat koji je, kako je verovao, pokazivao apsurdnost Frenelove teorije. Ovu neočekivanu pretpostavku, koja je trebala da zada smrtni udarac talasnoj teoriji, je odmah zatim verifikovao eksperimentalno Arago. Svetla tačka je zaista postojala. Zanimljivo je da je Poasonovu tačku, kako se sada naziva, mnogo godina ranije (1723) uočio Maraldi, ali je njegov rad dugo bio neprimećen.

Babineov princip

Za dva difrakciona ekrana se kaže da su komplementarni kada transparentna područja jednog potpuno odgovaraju netransparentnim područjima drugog, i obratno. Kada se dva takva ekrana stave jedan preko drugog dobija se, očigledno, potpuno neproziran ekran.

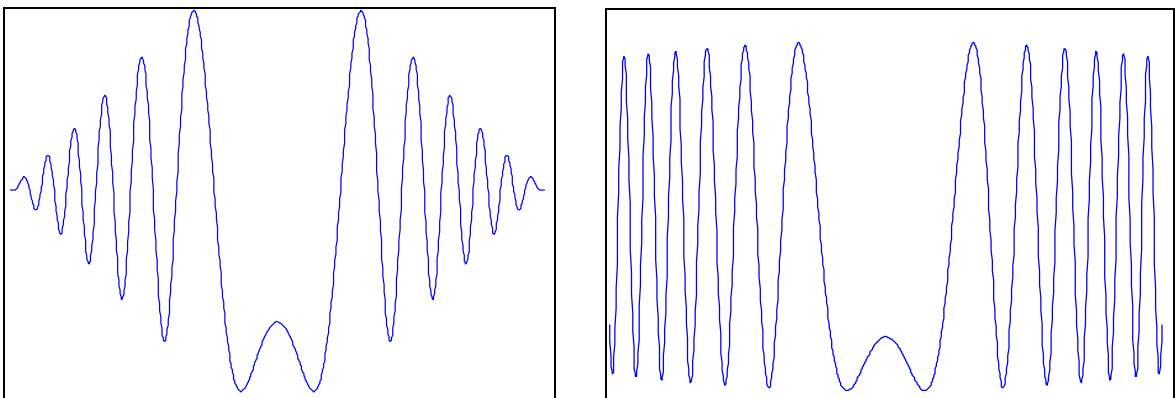
Neka su E_1 i E_2 skalarni optički poremećaji u tački P kada se koriste ekrani Σ_1 i Σ_2 , respektivno. Ukupan doprinos svake aperture se izračunava integracijom na površini oivičenoj aperturom. Ako su obe *aperture* prisutne odjednom nema neprozirnih područja, pa granice integracije idu ka beskonačnosti i dobija se nepromenjen poremećaj E_0 , gdje je

$$E_1 + E_2 = E_0 . \quad (12)$$



Sl.11. Rastojanje između unutrašnjih pruga je obrnuto proporcionalno širini prepreke

Ovo je *Babineov princip*. Iz njega se zaključuje da kada je $E_0=0$, $E_1=-E_2$, tj. poremećaji su potpuno jednake veličine, a faze im se razlikuju za 180° . Stoga bi pri korišćenju apertura Σ_1 i Σ_2 trebala da se dobije potpuno ista raspodela iradijance. Ovo je zaista zanimljiv rezultat. Princip se skoro u potpunosti može primeniti kod Fraunhoferove difrakcije, dok kod Frenelove difrakcije difrakcione slike za komplementarne ekrane nisu ekvivalentne.



Sl.12. Sa daljim smanjivanjem širine prepreke smanjuje se broj maksimuma unutar geometrijske senke, a oscilovnje iradijance je intenzivnije i sporije opada

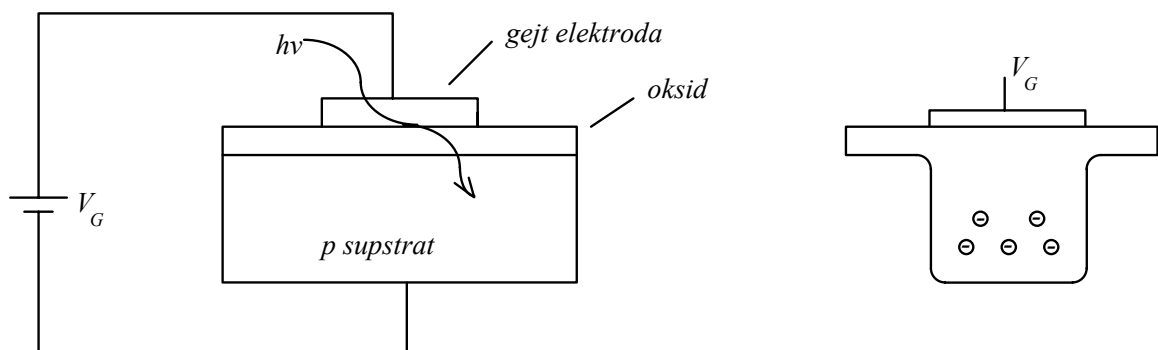
CCD senzor

U mnogim primenama potrebno je detektovati ceo optički lik i negde ga memorisati. U takvim aplikacijama koristi se detektorski niz i generisana električna informacija se smešta u elektronsku memoriju radi dalje manipulacije. Najvažnija tehnologija koja se razvila u optičkim primenama je CCD (*charged coupled device*) tehnologija. Ona je izvršila revoluciju u industriji video kamera. Danas postoje CCD čipovi i sa 2 miliona piksela. CCD tehnologija je takođe odgovorna za kućnu video industriju, koja je omogućila prosečnom potrošaču bez posebnog znanja, da pravi video filmove. CCD se često koristi u astronomiji jer ima veću kvantnu efikasnost u poređenju sa fotografskim medijima, veliku linearnost, veliki dinamički opseg, prilično uniforman odziv, relativno mali šum i digitalan je!

CCD mora da izvede četiri zadatka kako bi se generisao lik: 1. generisanje naelektrisanja, 2. skupljanje naelektrisanja u pikselima, 3. transfer naelektrisanja i 4. detektovanje naelektrisanja. Osnovni uređaj na kome je zasnovana CCD tehnologija je MIS (*metal-insulator-semiconductor*) ili MOS (*metal-oxide-semiconductor*) kondenzator. U Si tehnologiji koristi se MOS struktura.

Princip rada CCD senzora

CCD senzor je detektor slike, ima diskretnu strukturu, i može biti jednodimenzionalan i dvodimenzionalan. Osnovni princip rada jedne njegove ćelije je ilustrovan na Sl.13.

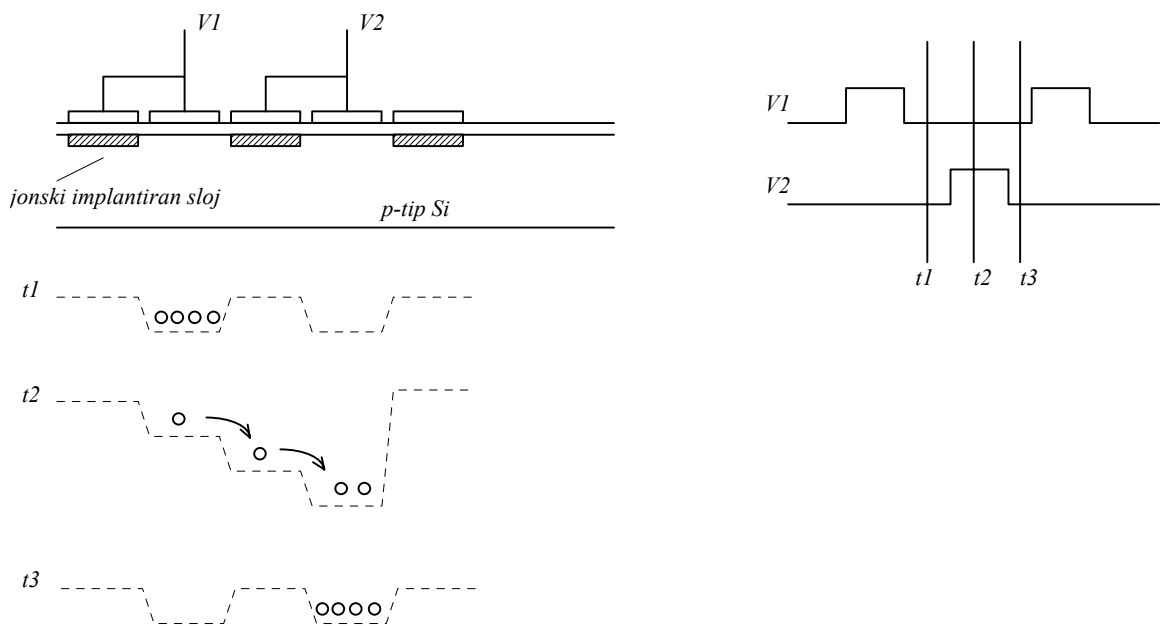


Sl.13. Šematski prikaz jedne ćelije CCD senzora i osnovni princip detekcije zračenja

Uloga primenjenog napona na gejtu, V_G , je udaljavanje većinskih nosilaca (šupljina) od gornje strane poluprovodnika i obrazovanje "potencijalne jame" u provodnoj zoni koju vide manjinski nosioci, tj. elektroni. Spoljašnje zračenje prolazi kroz tanak sloj metalnog gejta i apsorbuje se u poluprovodniku. Generisani par nosilaca se razdvaja, tako da se

manjinski nosioci skupljaju u potencijalnoj jami. Broj elektrona “zarobljenih” u potencijalnoj jami ispod gejta direktno je proporcionalan iradijansi zračenja koja pada na fotoosetljivu površinu gejta. Ovakva ćelija predstavlja osnovu CCD detektora, koji sadrži čitav niz piksela (elemenata senzora). Ostaje još da se izmeri tj. očita ovo optički generisano naelektrisanje radi dobijanja izlaznog signala.

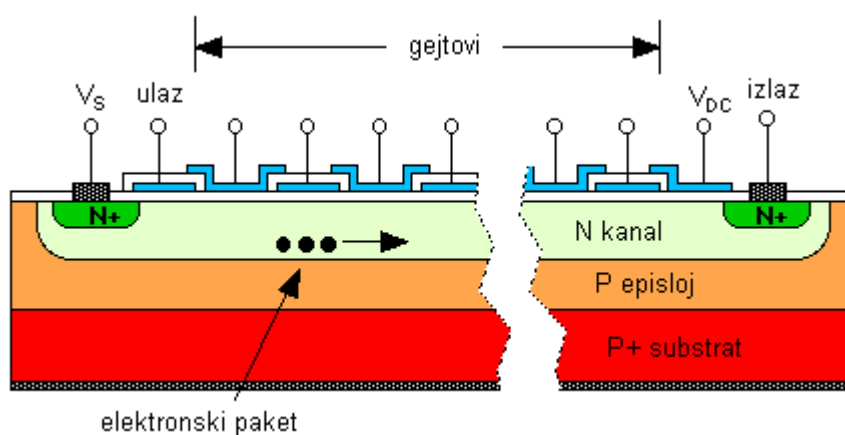
Očitavanje količina naelektrisanja kod mreže foto-MIS kondenzatora se obavlja prenosom naelektrisanja iz jedne ćelije u drugu, paralelno sa osjetljivom površinom, do izlaza, gde se nalazi *on-chip* pojačavač, na kojem se sukcesivno generiše naponski signal koji je proporcionalan količini naelektrisanja.



Sl.14. Dvofazni pomerač

Sušтина i najvažnija osobina CCD elemenata je sposobnost transporta pojedinačnih kapacitivnih tovara. Prenos naelektrisanja iz jedne u drugu ćeliju biće objašnjen na primeru dvofazne konfiguracije. U pitanju je sinhrono merenje (postoji *clock* signal). Jedna ćelija pri dvofaznom očitavanju prikazana je na Sl.14. Inače, potencijalna barijera se može menjati, osim spoljašnjim naponom, i samim fizičkim parametrima strukture. Naime, ako je sloj oksida deblji ili je p -sloj više dopiran, to je potencijalna jama plića. Radi ostvarivanja potencijalne barijere, ispod svake druge elektrode je izvršena jonska implantacija. Kada se dovede isti napon na dve susedne elektrode, potencijalna jama ispod elektrode koja ima ugrađeni sloj je manja nego jama ispod susedne elektrode. Na Sl.14 se vidi kako ova osobina obezbeđuje direktivnost kretanja naelektrisanja.

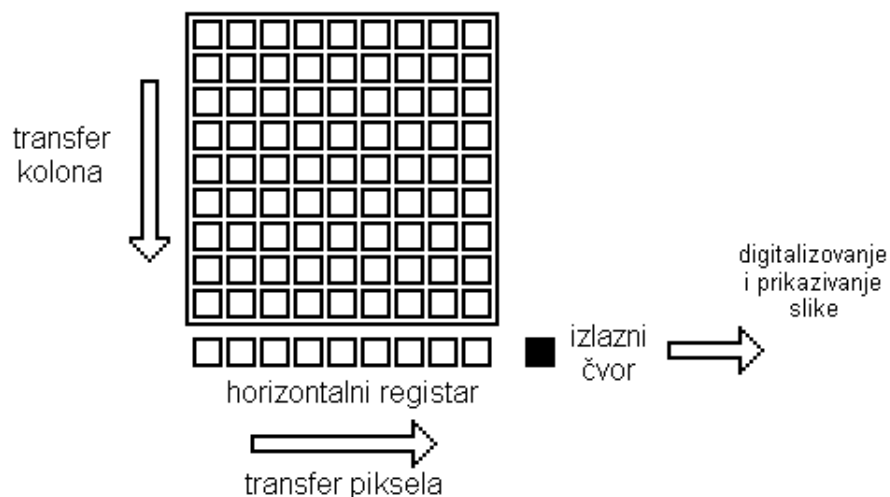
Ako svetlost kontinualno pada na površinu senzora pojavljuje se problem, jer se za vreme prenosa naelektrisanja i očitavanja ćelija u njima i dalje generišu manjinski nosioci. Nova informacija se superponira na početnu raspodelu i kviri sliku koja se očitava. Praktično rešenje je upotreba dve posebne identične strukture, od kojih jedna vrši detekciju a druga prenos naelektrisanja. CCD fotodetektujućim kondenzatorima su smešteni pored CCD registra za očitavanje, koji je dobro zaštićen od upadnog zračenja. Između njih je prenosni gejt. Posle odgovarajućeg vremena integracije, za koje se na foto-MIS kondenzatorima nagomilava naelektrisanje proporcionalno ukupnom upadnom fluksu, otvara se prenosni gejt i nosioci se paralelno prebacuju u drugu MIS strukturu. Ova struktura se očitava u narednom periodu integracije, te je tako jedini prekid kontinualne detekcije za vreme veoma kratkog prenosa kroz gejt.



Sl.15. SiC CCD sa ukopanim kanalom

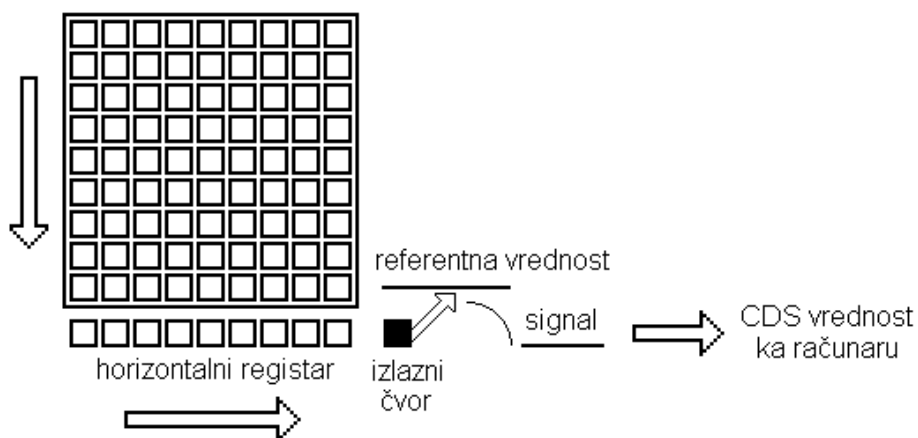
Na Sl.15 je prikazan poprečni presek SiC CCD-ja sa ukopanim kanalom. Sors i drejn, i ukopani kanal n-tipa su formirani jonskom implantacijom azota. Može se videti da se gejtovi preklapaju. Paketi naelektrisanja su zarobljeni u potencijalnim jamama ispod gejtova i pomeraju se na desno pogodnom sekvencom *clock* signala primenjenih na gejtove. Broj elemenata u CCD-u i *clock rate* određuju vremensko kašnjenje. Ukopani kanal služi da se izbegne problem "zarobljavanja" naelektrisanja od strane brzih površinskih stanja.

Pošto se osvetli površina CCD-a elektroni se gomilaju u svakom pikselu. Broj elektrona koji mogu da se nagomilaju u svakom pikselu se definiše kao *dubina jame*. Ova vrednost može ići i do 350.000 elektrona.



Sl.16. Transfer naelektrisanja

Kada je eksponiranje završeno naelektrisanje mora biti prebačeno do izlaza i digitalizovano. Ova operacija se izvršava iz dva koraka. Prvo se ceo red pomeri u vertikalnom pravcu ka horizontalnom registru. Drugo, naelektrisanje se pomera horizontalno u ovom registru ka izlaznom pojačavaču (Sl.16).



Sl.17. CDS tehnika

Skoro svi ozbiljni video sistemi poseduju tzv. CDS (*correlated double sampling*) tehniku. Pre nego što se naelektrisanje svakog piksela transportuje do izlaznog čvora CCD-a, čvor se postavi na referentnu vrednost. Tada se naelektrisanje iz piksela dovodi do izlaznog čvora. Konačna vrednost dodeljena pikselu je razlika referentne vrednosti i prenetog naelektrisanja. Ovaj proces se označava kao usaglašeno dvostruko uzorkovanje i služi da se što bolje predstavi stvarno naelektrisanje svakog piksela. Na Sl.17 je dat šematski prikaz ove metode.

Istorijat razvoja CCD senzora

CCD detektori su pronađeni početkom sedamdesetih u Bell Labs, ali nisu odmah bili dostupni, kako u naučnim, tako i u komercijalnim primenama. Razlog je bio u nerazvijenoj proizvodnoj tehnologiji, visokoj ceni i lošim performansama. Tada su se u detekciji svetlosti i spektroskopiji koristile fotografske emulzije i fotomultiplikatorske cevi (PMTs), koje su relativno dobro zadovoljavale tadašnje zahteve.

Fotografski filmovi su se vremenom pokazali kao nepraktični, nelinearni i nekompatibilni sa pomoćnim elektronsko-digitalnim kolima za obradu, jer su bile potrebne različite vrste emulzije da pokriju čitav pojas talasnih dužina od interesa; osim toga, emulzije imaju nelinearnu funkciju odziva u odnosu na upadnu svetlost, svetlosno su inertne, a dinamički opseg im je ograničen na svega dva reda veličine. Uz to, potrebno je veliko vreme za razvijanje, kalibraciju i čitanje tako osvetljenih filmova.

PMTs zauzimaju jako važno mesto u detekciji svetlosti i spektroskopiji, te su i danas jako rašireni. PMTs omogućavaju trenutno čitanje svetlosnog intenziteta na svakoj prikazanoj talasnoj dužini. Ali one nisu u mogućnosti da detektuju svetlost niskog nivoa i brzih promena, niti da vrše simultana merenja više spektralnih linija. Zatim, potrebna je velika snaga za njihov rad, imaju lošu kvantnu efikasnost iznad UV opsega i osetljive su na magnetska zračenja.

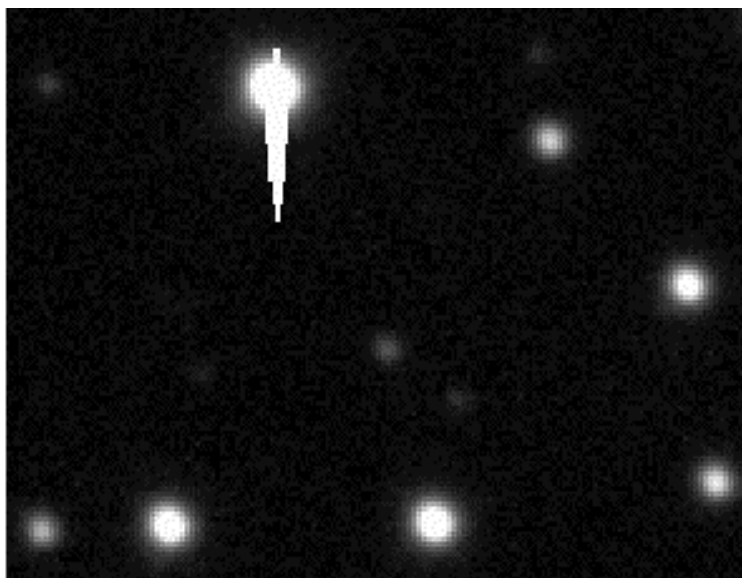
Sam prelaz na CCD nizove bio je postepen. Na početku su to bili fotodiodni nizovi (PDA), 1024×1 piksel, koji podatke o svetlosti uzimaju u multipleksiranoj formi. Podaci se uzimaju simultano čime je pokrivena čitava žižna ravan spektrometra i to pri jednom merenju.

PDA su kasnije poboljšani uvođenjem pojačavača slike. Time je poboljšan dosta loš odnos signal/šum (S/Š). PDA su smanjili vreme merenja – čitav spektar se može izmeriti za manje od 5ns. Međutim, danas su potrebni i podaci o prostornoj raspodeli spektralnog profila datog uzorka. PDA nije mogao odgovoriti ovom zahtevu, pa se ubrzo prešlo na dvodimenzionalne CCD nizove.

"Cvetanje" slike

Posle generisanja, kapacitivni paketi sa signal-elektronima traže oblasti sa najnižom potencijalnom energijom. Potencijalne jame se ponašaju linearno, kao kondenzatori, do zasićenja: kako se povećava broj elektrona koji se gomilaju u oblasti jame, tako se

povećava potencijalna energija jame, i to približno linearno u odnosu na broj smeštenih signal-elektrona. Ovo se odvija sve dok potencijalna energija jame ne dostigne potencijalnu energiju barijere, koja ovu jamu odvaja od susednih. Kada se jama napuni nastaje zasićenje: elektroni se "presipaju" od jame do jame što dovodi do pojave zvane *efekat cvetanja slike*.

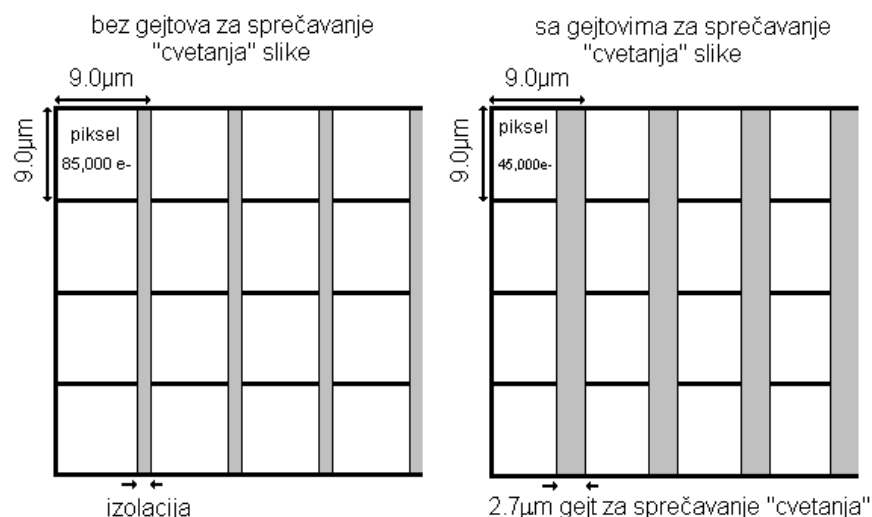


Sl.18. "Cvetanje" slike

Neki senzori imaju gejtove koji sprečavaju ovo "cvetanje" (*anti-blooming gates*). Bez ovakvih gejtova će, na primer, sjajna zvezda, koja piksele dovodi u zasićenje, uzrokovati pojavu vertikalne crte (Sl.18). Ako ova crta padne preko objekta koji se snima nema načina da se povrate izgubljeni podaci.

Gejtovi koji sprečavaju cvetanje zauzimaju oko 30% površine piksela. Usled toga smanjena je osetljivost i dubina jame. Smanjena osetljivost znači da se mora povećati ekspozicija skoro dva puta da bi se dobio isti nivo signala kao kod CCD senzora bez ovakvih gejtova.

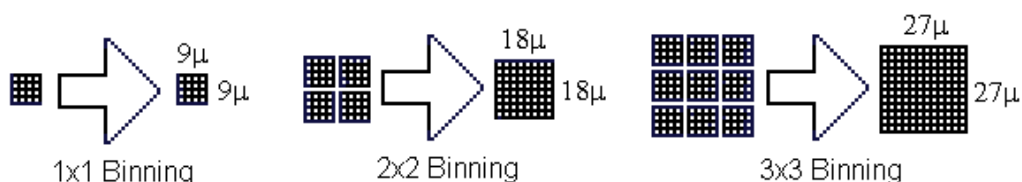
Površina zauzeta od strane *anti-blooming* gejtova uslovljava smanjenje efektivne rezolucije senzora (Sl.19). Zbog toga se u nekim slučajevima koriste alternativne metode da se izbegne "cvetanje" slike. Jedna od njih je da se uzima nekoliko kraćih ekspozicija pri kojima svetli objekti neće početi da "cvetaju", a da se onda softverski od više snimaka dobije jedan. Na ovaj način očuvan je odnos S/Š, a na rezultatu nema vertikalnih crta.



Sl.19. Gejtovi za sprečavanje "cvetanja" slike smanjuju rezoluciju za oko 30%

Binning metoda

Kao jedna od metoda za analizu podataka često se sreće *binning* metoda. Ona predstavlja proces kombinovanja naelektrisanja susednih piksela u "super piksel", i za to vreme proces čitanja. Na primer, *binning* 2×2 znači da se površina od 4 susedna piksela kombinuje u jedan veći piksel (Sl.20). Na ovaj način se osetljivost na svetlost povećava 4 puta, ali se rezolucija smanjuje na pola. Odnos S/Š se povećava $N^{1/2}$ puta, gde je N broj piksela koji ulaze u sastav super piksela. *Binning* je vrlo koristan jer se ubrzava obrada slike.



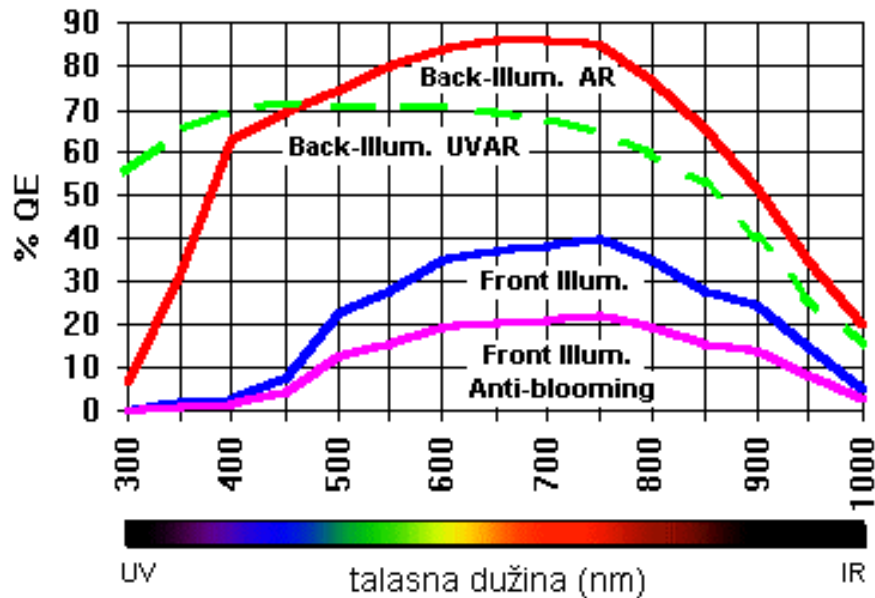
Sl.20. Binning metoda

Najvažnije karakteristike jednog CCD senzora su: kvantna efikasnost, efikasnost transporta naelektrisanja, dinamički opseg, generisanje elektrona u "mraku" i dimenzije. Nešto više o ovim veličinama u daljem tekstu.

Kvantna efikasnost

Standardni senzori koji se osvetljavaju sa prednje strane (frontalno osvetljavanje) su osetljiviji na zeleni, crveni i infracrveni deo spektra (500-800nm) nego na plavi deo (400-500nm) (vidi Sl.21). Uzrok ovome je apsorpcija "plavih" fotona na gejtu i povećanje reflektivnosti površine sa smanjivanjem talasne dužine. CCD senzori koji se osvetljavaju

leđno imaju izuzetnu kvantnu efikasnost. Uzrok ovakve velike kvantne efikasnosti je način na koji je takav CCD konstruisan: substrat je istanjen na $15\mu\text{m}$ i omogućeno je osvetljavanje sa leđne strane. Na taj način fotoni bez prolaska kroz gejt strukturu stižu do potencijalnih jama.



Sl.21. Kvantna efikasnost za frontalno i leđno osvetljene CCD senzore

Tipične krive za kvantnu efikasnost za frontalno i leđno osvetljen (*front-illuminated* i *back-illuminated*) CCD su prikazane na Sl.21. Treba primetiti da senzori sa gejtovima za spečavanje "cvetanja" slike imaju upola manju QE od onih koji nemaju takve gejtove. Senzori sa leđnim osvetljavanjem mogu da imaju QE i preko 85%. Oblaganjem pogodnim slojevima može se povećati QE u UV oblasti (Sl.21).

Efikasnost transporta naelektrisanja (CTE)

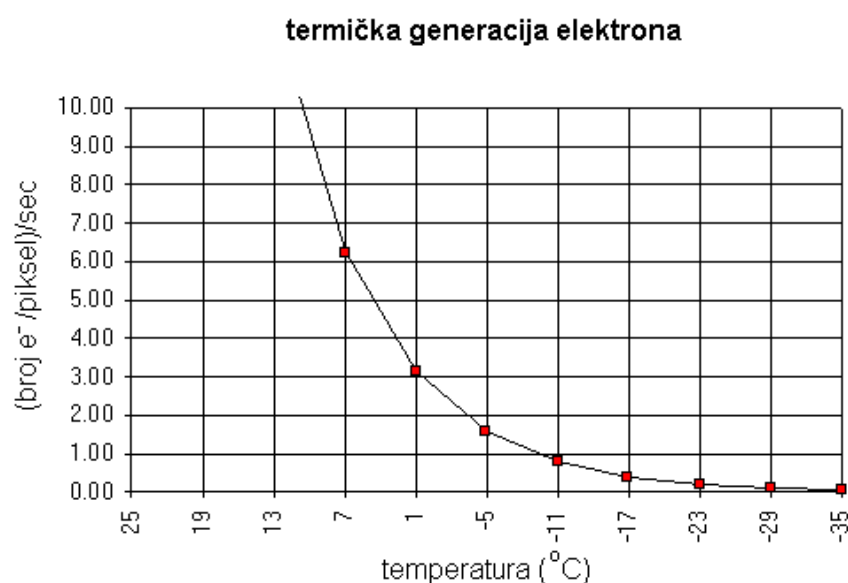
CTE (*charge transfer efficiency*) je karakteristika CCD-a koja opisuje efikasnost transporta naelektrisanja. Slika iz CCD-a se očitava transportom redova u horizontalni registar, a zatim transportom svakog piksela u horizontalnom registru do izlaznog čvora. Naelektrisanje svakog piksela se zatim digitalizuje i odvodi do računara koji služi za prikaz slike. Ali ne biva svaki elektron prenesen do izlaznog čvora. Neki zaostanu ili bivaju "zarobljeni". CTE od 0.99997 znači da se pri prenosu 85000 elektrona 2.5 elektrona negde "zagube".

Dinamički opseg

Dinamički opseg se često predstavlja kao logaritam količnika dubine jame i šuma, u decibelima. Na primer, za sistem sa dubinom jame od 85000 elektrona i šumom od 12 elektrona dinamički opseg će biti $20 \log(85000/12)$, ili 77dB. Što je veća vrednost opsega to bolje. Ovaj odnos je takođe i indikacija broja nivoa digitalizacije koji je pogodan za dati senzor. Senzor sa dubinom jame od 35000 elektrona i šumom od 15 elektrona daje odnos $35000/15=2333$. Stoga bi sistem od 12 bita sa 4096 nivoa bio pogodan u tom slučaju. Što je veća digitalna rezolucija sporiji je transfer podataka. Dubina jame, šum i sistemsko pojačanje su faktori koji određuju odgovarajuću digitalizaciju.

Generacija elektrona u "mraku"

Kako se i bez eksponiranja generišu elektroni u jamama, usled termičke generacije, neophodno je hladiti senzor. Ova termička generacija je nezgodna ako se želi snimiti objekat niskog svetlostnog intenziteta, jer su tada potrebne duže ekspozicije, pa dolazi do nagomilavanja termički generisanih elektrona. Sa Sl.22 se vidi da se ova generacija udvostručava na svakih 6°C.



Sl.22. Generacija elektrona u "mraku"

Prema primeni CCD detektori se dele u dve kategorije:

- *detektori visokih performansi* su jako pogodni u spektroskopiji zbog odličnog odnosa S/Š i linearne funkcije odziva, moraju se aktivno hladiti i imaju relativno malu brzinu skeniranja;

- *detektori umerenih performansi* (TV kamere i kamkorderi) se odlikuju velikom brzinom skeniranja.

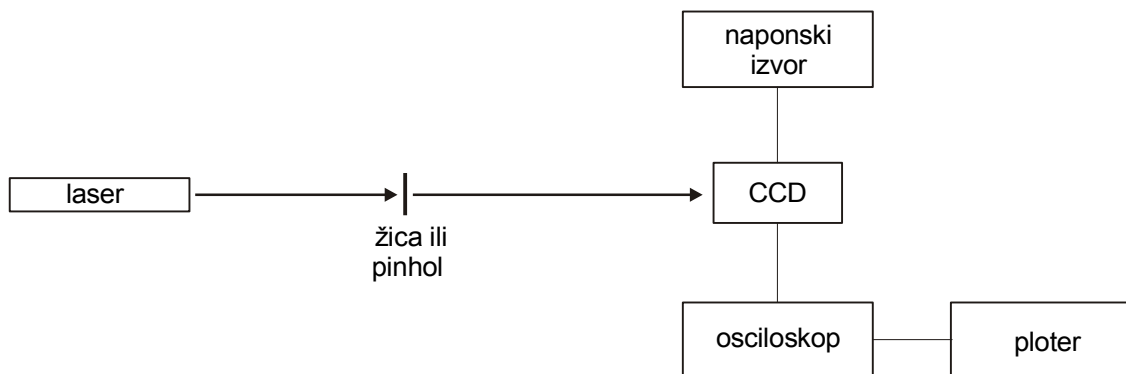
Što se tiče veličine CCD detektora, danas je standard 2048x2048, dok je još 1990. najveći niz još uvek bio 800x800. Detektori mogu da obrade 1000 okvira (slika) u sekundi. Cena CCD sistema je funkcija ukupnog broja piksela. CCD nizovi veličine 4096x2048 i 5120x5120 svoju primenu nalaze u savremenim teleskopima.

Zadatak vežbe

Za dobijanje difrakcione slike moguće je koristiti pinhol (*pinhole* - kružni otvor malih dimenzija) ili žicu. Potrebno je dobiti sliku na osciloskopu, a zatim je nacrtati ploterom. Iz izračunatih vrednosti, i koristeći odgovarajuće jednačine, date u odeljcima koji su opisivali Fraunhoferovu difrakciju, treba odrediti prečnik pinhola, odnosno žice, i uporediti te vrednosti sa "tačnim" vrednostima.

Postavka vežbe i postupak merenja

Šema aparature je data na Sl.23. Kao izvor svetlosti koristi se He-Ne laser koji emituje svetlost crvene boje, talasne dužine 632.8nm. Kao detektor slike koristi se CCD. Signal koji daje CCD se vodi na digitalni osciloskop, koji je povezan sa ploterom.



Sl.23. Šema aparature

Da bi se dobila Fraunhoferova difrakcija potrebno je da pinhol ili žica budu dosta udaljeni od lasera i CCD senzora. Može se postupiti i tako da pinhol ili žica budu daleko od izvora, a da se iza njih postavi sočivo i tako omogući dobijanje Fraunhoferove difrakcione slike na CCD-u koji je blizu prepreke.

Postupak se sastoji u sledećem. Prvo se odrede rastojanja između lasera i prepreke, i CCD-a i prepreke. Kada se na osciloskopu dobije difrakciona slika, ona se "zamrzne", odštampa, i sa nje se odrede rastojanja za nekoliko susednih maksimuma. Sa osciloscopa se čitaju rastojanja na vremenskoj skali. Da bi se dobila prava, prostorna, rastojanja vremenska baza se smanji tako da se vide ćelije CCD-a. Zna se da jedna ćelija ima $13\mu\text{m}$. Kursori se postave tako da obuhvate što više ćelija, pa se onda ukupno vreme podeli sa brojem ćelija. Odatle se izračuna koliko je $13\mu\text{m}$ na vremenskoj skali. Sada se postave jednostavne proporcije i izračunaju prava rastojanja između maksimuma.

Koristeći jednačine za Fraunhoferovu difrakciju za kružni otvor i uski prorez (za Fraunhoferovu difrakciju se može koristiti Babineov princip!) dolazi se do vrednosti prečnika pinhola i žice. Ako ima više izračunatih vrednosti nađe se srednja i ta srednja vrednost se uporedi sa "tačnom". Za pinhol je tačna vrednost utisnuta (25 ili 50 mikrona), dok se debljina žice može dobiti, na primer, mikrometarskim zavrtanjem.