

Uvod

Proces merenja je termodinamička interakcija između pojave koju merimo i ulaznog pretvarača. Ulazni pretvarač pretvara pojavu koju merimo u pojavu koja nam je lakša za obradu. Signal procesor ili modifikator ne menja prirodu signala. To je mikrokontroler ili računar. Izlazni pretvarač vrši krajnje pretvaranje i signal se prikazuje na željeni način. Pretvarači su svi uređaji koji pretvaraju jednu energiju u drugi vid energije. Mašine imaju izlazni signal u mehaničkom domenu. Senzori imaju izlazni signal u električnom domenu. Električni signal je najpogodniji za obradu. Signal procesor procesira u električnom domenu jer je taj princip najpovoljniji. Informacija je značenje pridruženo podacima koji se posmatraju pod nekom konvekcijom. SI sistem je zasnovan na fundamentalnim konstantama: brzina svetlosti u vakumu, elementarno naelektrisanje elektrona, Boltzmanova konstanta, Avogadrov broj i Plankova konstanta. Danas se najpreciznije meri vreme od svih mernih veličina. Ne možemo napraviti merenje, a da ne izvršimo uticaj na objekat merenja zato što je protok informacija vezan za protok energije. Senzori mogu raditi bez pomoćnog energetskog protoka ili sa njim. Kod senzora bez pomoćnog energetskog protoka možemo vršiti reverzibilna merenja. Dva sistema su u termodinamičkoj ravnoteži ako su im temperature jednake. Zakon održanja energije kaže:

$$dQ = dU + p \cdot dV$$

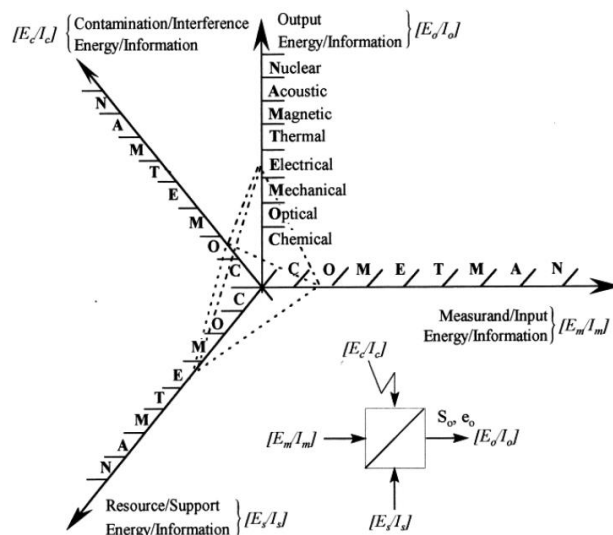
Dakle, zbir količine toplote i mehaničkog rada u zatvoren sistemu je isti. Drugim rečima, energija zatvorenog sistema ne može nestati niti ni iz čega nastati, energija može samo prelaziti iz jednog oblika u drugi, i ona je konstantna. Drugi zakon termodinamike navodi da se ukupna entropija izolovanog sistema nikada ne može smanjiti tokom vremena. Ukupna entropija sistema može ostati konstantna u idealnim slučajima kada je sistem u termodinamičkoj ravnoteži. U svim postojećim procesima, uključujući i spontane, ukupna entropija se povećava i proces je nepovratan. Opisan je ovom jednačinom:

$$dQ = T \cdot dS$$

Ona nam direktno kaže da se ne može sva toplota pretvoriti u rad, znači entropija raste.

Na temperaturi od 0K je entropija minimalna i sistem ne može biti uređeniji. Apsolutnu nulu je ne moguće dostići. Potpuno uređen sistem je nemoguće postići. Pritisak, specifična zapremina, temperatura, entropija, entalpija, slobodna entropija, slobodna energija i unutrašnja energija. Ovih 8 veličina stanja potpuno opisuju termodinamički sistem. Imamo dve veličine procese: razmenjena količina toplote sa okolinom i mehanički rad. Veličine procesa opisuju pomeranje granica termodinamičkog sistema. Rad opisuje promenu fizičkih granica, a razmenjena toplota opisuje promenu energije sa okolinom. Proces merenja možemo da posmatramo kao spregu između stanja sistema. Termodinamika ne računa unutrašnje karakteristike sistema kao što je koeficijent iskorišćenja termodinamičkog ciklusa. Ono što zavisi od temperature termodinamiku ne zanima. Ona posmatra interakcije sistema sa okolinom.

Generalisane veličine stanje. One se dele na intenzivne i ekstenzivne. Intenzivne veličine stanja ne zavise od mase (temperatura, koncentracija, gustina, električno polje...). Ekstenzivne veličine stanja zavise od mase (masa, količina naelektrisanja, vektor dielektričnog pomeraja...). Svaka intenzivna veličina ima sebi odgovarajuću ekstenzivnu veličinu tako da je zbir proizvoda parova energija koja je reverzibilno sadržana u sistemu. Definišimo 6 energetskih domena. U termalnom domenu imamo intenzivnu veličinu temperaturu i ekstenzivnu veličinu entropiju, kod hemijskog domena imamo masu i hemijski potencijal, kod mehaničkog relativnu deformaciju i naprezanje... Generalisana struja je izvod po vremenu ekstenzivne veličine (npr. $dQ/dt = i$). Generalisana sila je gradijent intenzivne veličine (npr. $F = -\text{grad}U$). Gradijent koncentracije/temperature je efektivno gledajući sila. Kada se formira proizvod generalisane sile i generalisane struje dobija se ireverzibilna energija, odnosno energija koja se nepovratno troši u sistemu. Ako kod mernih traka držimo konstantnu generalisanu struju, odnosno običnu struju, pod dejstvom mehaničke sile menja se generalisana sila, odnosno napon. Ne moguće je preći iz jednog energetskog domena isključivo u drugi. Svi ostali domeni utiču na merenje koje je koncentrisano na neki domen. Povećavamo osetljivost na fizičku veličinu koju želimo da merimo, ali u isto vreme suzbijamo uticaj svih ostalih veličina koje ne želimo da merimo. Definišimo kocku pretvaračkih efekata:



U njoj se unose tri koordinate. Na svakoj koordinati su izređani svi domeni. Bilo koji uređaj možemo opisati pomoću ove tri koordinate. Definišu se kao [Ulaz, Izlaz, Modulacija]. Veš mašina[Električni, Mehanički, Električni], fotodioda[Radijacioni, Električni, 0], merna traka[Električni, Električni, Mehanički]. Možemo dodati još jednu osu koja predstavlja dominantnu smetnju. To je obično termalni domen. Često je signal prikazan uz neku vrstu šuma ili sistematska greška. Sistematska greška je sve što možemo da otklonimo jer predstavlja determinističku grešku koju možemo otkloniti. Šum je nedeterministička veličina. Na osnovu toga što poznajemo sistem u vremenskom trenutku t , ne možemo znati šta će se desiti u kasnijem trenutku. Termalni šum na provodnicima je gomila determinističkih situacija kojih je toliko

mnogo da cela ta pojava postaje nedeterministička. Šum ne možemo otkloniti kao sistematsku grešku, već ga možemo filtrirati u nekom spektralnom opsegu ukoliko poznajemo spektar našeg signala. Postoje termalni šum, šum sačme, elektromagnetni šum u žicama... U praktičnim primenama je termalni šum ili Džonsonov šum najveći problem. Prisutan je u svakom provodniku, nezavisan od struje, predstavlja superpoziciju mnogo vremenskih brzih događaja i jedina stvar poznata je njegova srednja snaga:

$$\langle P \rangle = 4kTR\Delta f$$

Ravna karakteristika sve do učestanosti od 2THz, kada počinje blago da opada. Δf je propusni opseg. Ukoliko smanjimo opseg, tj. filtriramo signal, smanjićemo uticaj termalnog šuma na merenje. Lock-in tehnika merenja. Nosioc energetskog toka modulišemo poznatom frekvencijom. Nju znamo i kontrolišemo. Informaciju o frekvenciji vodimo na Lock-in pojačavač. Takođe i merni signal vodimo na Lock-in pojačavač. On vrši filtriranje u što je moguće užem opsegu oko te frekvencije koja mu stiže kao podatak i na taj način izdvaja taj signal i potiskuje šum na svim ostalim frekvencijama. Ne možemo izbeći šum ako je poremećaj na baš toj frekvenciji. Primer: Fotodioda, laser pada na fotodiodu, a smetaju nam svetlo sa prozora ili sa sijalice. Ubacimo **mehanički čoper**. On se vrti ispred lasera i fizički odseca snop u nekim vremenskim trenucima. Tu frekvenciju vodimo na Lock-in pojačavač, on filtrira te frekvencije i dobijamo rezultat koji ne zavisi od toga da li napolju prolazi oblak ili ne prolazi oblak. Frekvencija koju ne možemo dati lock-in pojačavaču je 50Hz, niti njen umnožak koji se nalazi u okruženju. Filtriranje u frekvencijskom domenu predstavlja integraciju u vremenskom domenu. Ukoliko želimo usko filtriranje, moramo duže čekati rezultat. Ako dugo čekamo rezultat, frekvencijski opseg našeg uređaja je mali. Periodičnost signala proveravamo Furijeovom transformacijom. Osciloskop radi furijeovu transformaciju. Na frekvencijama gde imamo ponavljanje dobijamo pikove. Drugačiji pristup bi bio da uradimo autokorelacionu funkciju:

$$c(\tau) = \lim_{(T \rightarrow \infty)} \frac{1}{T} \int_0^T u(t) u(t+\tau) dt$$

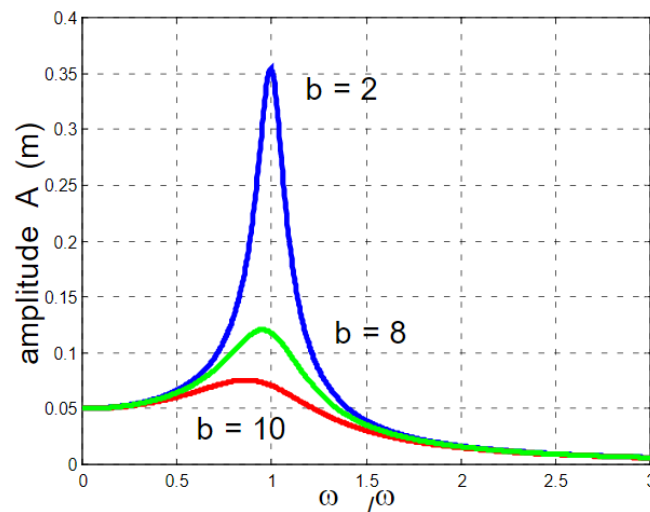
Pomnožimo signal sam sa sobom, ali je jedan zakašnjen za neku vremensku konstantu. Integralimo po svim mogućim kašnjenjima. Ukoliko je signal periodičan i autokorelaciona funkcija će biti periodična. Pomoću nje možemo ustanoviti koliko je signal brz. Ako signal ima široku korelacionu funkciju, on je spor. Uska bi bila za signal koji se brzo menja. Možemo odrediti da li je signal periodičan, da li ima srednju vrednost (da li ide oko nule ili ima neku DC komponentu) i možemo odrediti njegovu brzinu. Sve ovo možemo odrediti iz Furijeove transformacije. Da li imamo DC komponentu zavisi da li imamo komponentu na 0 Hz. Iz Furijeove transformacije određujemo brzinu senzora tako da što više ima komponenti na višem frekvencijama, to je brži. Informacioni sadržaj Furijeove transformacije i Autokorelacione

funkcije je isti. Autokorelaciona funkcija i Spektralna gustina snage su Furijeov par. Slučajne promene signala se uvek posmatraju uz pomoć Gausove raspodele. Potreban uslov da bi se raspodela rezultata povinovala Gausovoj raspodeli je da je u pitanju šum. Kroskorelaciona funkcija omogućava da ustanovimo da li ima veze između dva signala:

$$c(\tau) = \lim_{(T \rightarrow \infty)} \frac{1}{T} \int_0^T u_1(t) u_2(t+\tau) dt$$

Kod nezavisnih signala kroskorelaciona funkcija teži nuli.

Karakteristike senzora možemo podeliti na statičke i dinamičke. Dinamičke karakteristike opisuju kako se taj merni sistem u vremenskom domenu. Možemo ih posmatrati i u frekvencijskom domenu uz pomoć Bodeovih dijagrama. Posmatramo položaje polova i nula u prenosnoj funkciji u frekvencijskom domenu. Na osnovu toga, zaključujemo kako će se sistem ponašati u vremenu. Red sistema je određen redom diferencijalne jednačine koja modeluje taj sistem. Sistem nultog reda bi bio neki potencijometar. Kontaktni termometri su obično sistemi prvog reda, zbog jednačine koja se brine o prenosu energije. Akcelometri su tipično drugog reda zbog inercijalnog elementa, opruge i prigušenja i to je prigušeni oscilator. Tipična prenosna karakteristika sistema drugog reda:



Prigušenje je određeno koeficijentom b koji se menja pri pobudama različite frekvencije. Na osnovu ove krive određujemo frekvencijski opseg sistema drugog reda. Ukoliko želimo deo krive gde nam odziv ne zavisi od frekvencije, obično ga definišemo kao 3db propusni opseg gde se prenosna funkcija ne promeni više od korena iz 2 puta po intenzitetu u odnosu na DC vrednost. Možemo pojačati prigušenje tako da crvena kriva još legne dole i tako povećamo propusni opseg ovog senzora.

Statičke karakteristike senzora:

- Prenosna funkcija : Određuje osetljivost izlaza na ulaz. Možemo jednačinama modelovati, ali i eksperimentalnim menjanjem ulaza i snimanjem izlaza. Treba oba primenjivati.
- Granica greške je maksimalno odstupanje kalibracione krive od idealne krive koja je dobijena modelovanjem
- Linearnost: da li je veza između ulazne i izlazne veličine linearna. Ka tome težimo jer nelinearne funkcije stvaraju više harmonike koje izobličuju signal na izlazu i proširuju frekvencijski opseg.
- Histerezis: Povećanje ulaznog signala ne daje istu prenosnu funkciju u odnosu na kada smanjujemo ulazni signal. Svaki sistem koji poseduje histerezis je nelinearan. Što je veća površina unutar histerezisne petlje, to ćemo imati veće gubitke energije u sistemu. Želimo da bude što uži. Neizbežan u magnetnim materijalima.
- Stabilnost i drift su dva međusobno suprotna pojma. Senzor koji ima stabilan izlaz malo driftuje po vremenu. Drift je vezan za dugotrajne vremenske promene koje nastaju u našem mernom sistemu. Te promene mogu biti posledica sporih promena temperature ili starenja komponente.
- Osetljivost: Ako imamo linearnu prenosnu funkciju, osetljivost je svuda ista. Za nelinearnu funkciju, promena signala u jednoj tački neće dovesti do iste promene izlaznog signala kao kad bi bila u drugoj tački. Kod ovakvih sistema se priča o radnoj tački koja je postavljena na optimalno mesto (obično najveće osetljivosti). Za veliki signal data kao odnos izlazne i ulazne veličine. Za mali signal je data kao izvod izlaza od ulaza.
- Ukrštena osetljivost: osetljivost našeg senzora na sve veličine koje ne želimo da merimo. Želili bi da sve te osetljivosti potisnemo.
- Detektivnost ili Noise Equivalent Power će biti minimalna promena koju naš senzor može da detektuje u definisanom frekvencijskom propusnom opsegu. Minimalni odnos signal/šum koji za nas predstavlja relevantan rezultat moramo definisati pre detektivnosti. Detektivnost se takođe može definisati kao maksimalna osetljivost koju možemo postići. Jedinica za detektivnost sadrži koren iz Hz u imeniocu, jer zavisi od same frekvencije.
- Tačnost, preciznost i rezolucija. Tačnost je odstupanje od idealne tačne veličine. Preciznost je minimalno raštrkavanje rezultata merenja. Rezolucija je najmanja promena ulazne veličine koju možemo detektovati.
- Merni opseg je opseg ulaznih veličina koje senzor može da meri sa zadatom tačnošću.
- Frekvencijski opseg predstavlja opseg frekvencija ulazne veličine koje može senzor detektovati sa zadatom tačnošću
- Temperaturski opseg je opseg temperatura pod kojim senzor funkcioniše pravilno
- Dinamički opseg daje istu informaciju istu kao i merni opseg, samo definisan na logaritamskoj skali.
- Pouzdanost funkcija verovatnoće da neki uređaj neće otkazati do nekog trenutka.

Pouzdanost

$$R(t) = P\{T > t\}; t > 0$$

$$F(t) = P\{T \leq t\}; t > 0 \Rightarrow R(t) + F(t) = 1$$

$$f(t) = dF(t)/dt = -dR(t)/dt$$

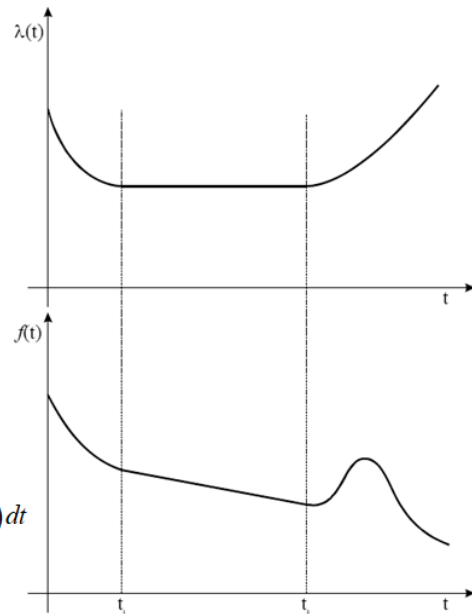
$$R(t) = n_1(t)/N \quad F(t) = n_2(t)/N; \quad n_1(t) + n_2(t) = N$$

$$F(t) = 1 - n_1(t)/N = 1 - R(t) \Rightarrow R(t) + F(t) = 1$$

$$\lambda(t) = \left| \frac{dR(t)}{dt} \right| \frac{1}{R(t)} = -\frac{dR(t)}{dt} \frac{1}{R(t)} = \frac{f(t)}{R(t)}; \quad \lambda(t) > 0$$

$$T_{SR} = \int_0^{\infty} t f(t) dt = \int_0^{\infty} t \left(-\frac{dR(t)}{dt} \right) dt = -\int_0^{\infty} t dR(t) = -tR(t) \Big|_0^{\infty} + \int_0^{\infty} R(t) dt$$

$$t \rightarrow \infty \Rightarrow R(t) \rightarrow 0 \Rightarrow T_{SR} = \int_0^{\infty} R(t) dt$$



Kalibracija se vrši pomoću senzora koji ima 10 puta bolju tačnost od senzora na kojem izvršavamo kalibraciju. Mora da se radi u uslovima poznate konstantne temperature. Obezbeđuje tačnost merenja u celom opsegu.

1. Radijacioni Domen

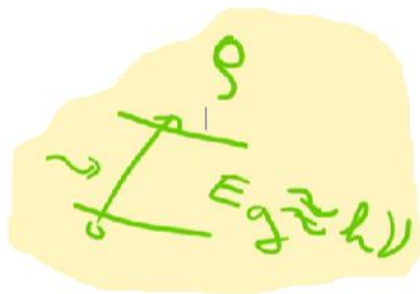
1.1. SENZORI VIDLJIVOG DELA SPEKTRA:

Fotomultiplikatori (fotomultiplikatorske cevi) su veoma masivni uređaji i koriste se kada nemamo puno svetlosti koju treba da detektujemo pošto može da detektuje minimalnu iradijansu. Koristićemo je kada radimo spektroskopiju i imamo jako malo svetlosti na raspolaganju. Ova cev je napravljena tako da ima veći broj elektroda koje se nazivaju dinode. Projektovane su tako da elektron, kada padne na tu elektrodu, ima dovoljnu energiju da izbije elektron iz atoma, i taj izbijeni elektron se ubrzava u električnom polju i udara u sledeću elektrodu. Polje je toliko jako, da ubrzan elektron izbije više elektrona iz sledeće elektrode. Proces se ponavlja i dešava se lavinska jonizacija. Ono što dobijamo je da jedan elektron na ulazu stvara gomilu elektrona na izlazu. Prednost je što fotostruja ima veliko pojačanje i ima veliku osetljivost. Problem sa njima je što su velike, što im treba veliko napajanje, što nisu prenosive tj. vezani su za laboratoriju i što nisu kompatibilni sa optičkim vlaknima.



Piroelektrični detektori su zasnovani na promeni karakteristika materijala zbog zagrevanja koje je posledica dejstva svetlosti. Dakle, svetlost nosi energiju, ukoliko je svetlost apsorbovana, zagrejaće materijal, i promeniće njegove karakteristike. Problem sa njegovim principom rada je što je spor. Treba vremena da se zagreje i ohladi. Dok se ne ohladi ne može da detektuje drugi svetlosni impuls.

Poluprovodnički fotoprovodnici su jeftini senzori i rade na jednostavnom principu. Ukoliko imamo fotone odgovarajuće energije i ukoliko imamo poluprovodnik odgovarajućeg energetskeg procepa, tako da energija fotona bude približno jednaka energiji energetskeg procepa, upadnim fotonom ćemo pobuditi elektron, podići ga na veći energetskeg nivo i samim tim ćemo menjati otpornost/provodnost ovog poluprovodnika. Tu pojavu možemo ispitivati pomoću Vitstonovog mosta. Idealni su za situacije "on/off" zato što su veoma brzi, ali su takođe manje osetljivi od fototranzistora i fotodioda.

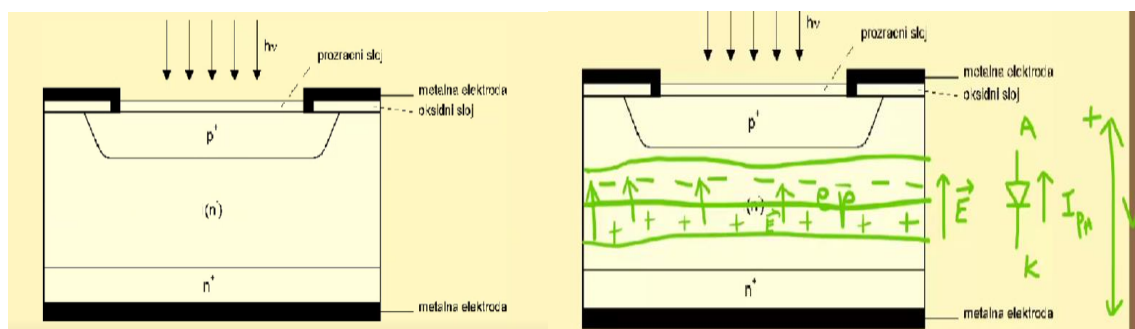


Fotodioda

Fotodioda je u današnje vreme optimum između cene i kvaliteta ukoliko pričamo o detektorima svetlosti. One se dele na dve vrste: PiN fotodiode i lavinske fotodiode.

PiN fotodiode – Kod njih je veoma bitno da niskodopirani ili sopstveni(intrinsic) sloj ima dovoljnu debljinu(zapreminu). Taj sopstveni poluprovodnik omogućava da oblast prostornog tovara bude veća nakon formiranja pn spoja.

Dakle, formirao se pn spoj, čime se formirala oblast prostornog tovara. U n-tipu poluprovodnika imamo višak elektrona, oni će se kretati difuzijom na p stranu i tamo će doći do rekombinacije. Stvara se ugrađeno električno polje zbog fiksnih jona u oblasti prostornog tovara. Električno polje se opire difuziji koja opada sve dok ne dođe do ravnotežne situacije u slučaju da nema nikakve pobude sa strane. Smatramo, u aproksimaciji, da u prostornom tovaru nema slobodnih naelektrisanja. Dakle, ugrađeno električno polje razdvaja elektrone i šupljine.

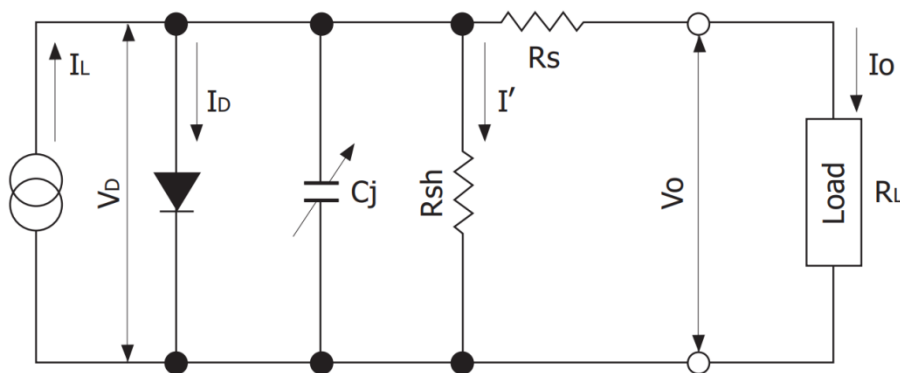


Princip rada fotodiode je zasnovan na apsorpciji fotona veće energije od energije energetskog procepa pn spoja od kog je načinjena fotodioda. Posmatrajmo situaciju, gde na fotodiodu padaju fotoni veće energije od energije energetskog procepa ($h\nu > E_g$). Dakle, oni mogu da izvrše prebacivanje elektrona iz valentne zone u provodnu, i samim tim će se formirati par elektron-šupljina. Nije cilj da dođe do njihove rekombinacije jer onda ne doprinose struji koja nam je odraz upadnih fotona. Verovatnoća rekombinacije u OPT je izuzetno mala. Svaki generisani par elektron-šupljina koji se stvori u OPT-u, napusti ga. Nosioци zbog električnog polja odlaze tamo gde su većinski i ako imamo odlazno kolo vezano za fotodiodu, nosioci naelektrisanja napuštaju fotodiodu i stvaraju fotostruju. Kada je dioda vezana u spoljašnje kolo, ako nema dovoljno velike srednje difuzione duzine manjinskih nosilaca, oni se rekombinuju u p ili n delu pn spoja i ne

doprinosu struji koja napušta pn spoj u odlazno kolo. Zato se moramo potruditi da OPT bude što veći. Par generisan van OPT-a takođe može doprineti fotostruji, ako difuzijom nosioc dodje do oblasti prostornog tovara, a zatim će električno polje u oblasti prostornog tovara da ih razdvoji kao i one fotone koji su direktno pali na OPT. Nama je svakako najpovoljnije da par elektron-šupljina bude generisan u oblasti prostornog tovara zbog skoro sigurnog doprinosa fotostruji. Upravo zato se koriste pin diode, zbog velike sopstvene oblasti koja stvara široki OPT. Dakle, prešli smo iz radijacionog domena u električni.

Najvažniji parametri diode: vreme odziva(da bude što brži), totalna ekvivalentna snaga šuma(što manja), kvantna efikasnost(broj parova elektron-šupljina koji će se stvoriti u odnosu na upadni broj fotona) i osetljivost. Ako padne 100 fotona, a apsorbira se 60, kvantna efikasnost je 0,6. Fotostruja kroz diodu teče od katode ka anodi(inverzna struja kroz diodu). Teče suprotno od struje diode kada se ona koristi kao pasivni element.

Modelovanje fotodiode. Upadni fotoni stvaraju fotostruju i mi možemo da je posmatramo kao strujni izvor. Imamo prebacivanje šupljina na p stranu, odnosno elektrona na n stranu, ukoliko je kolo otvoreno, doćiće do nagomilavanja pozitivnih na p i negativnih naelektrisanja na n strani što će praktično smanjiti ugrađeno električno polje. Sve diode poseduju kapacitivnost. Delimo je na difuzionu kapacitivnost i kapacitivnost oblasti prostornog tovara. Ukoliko posmatramo nepolarizovanu diodu, kapacitivnost prostornog tovara je dominantna, i to je kapacitivnost koja se puni kada je dioda osvetljena svetlošću. Uvek imamo parazitne struje koje se ne zatvaraju van kućista diode, nego se zatvaraju kroz same kontakte i ove parazitne struje se modeluju Shant otpornošću .

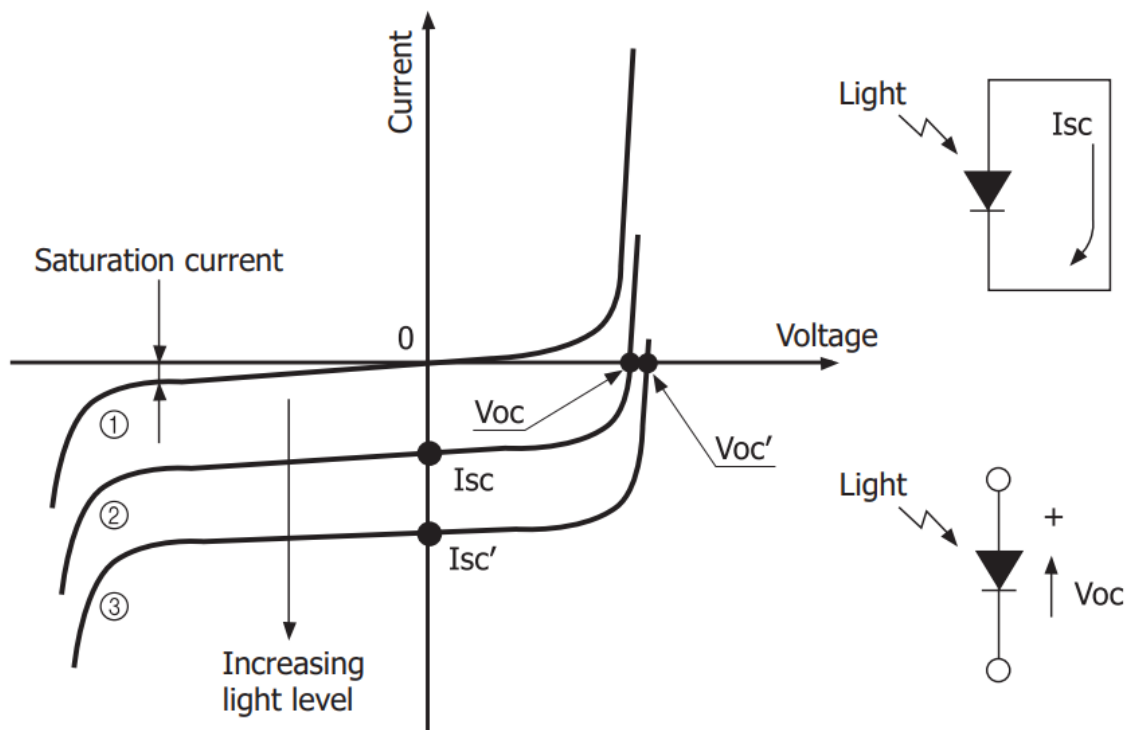


Dakle, mi imamo diodu koju možemo da modelujemo kao strujni izvor, on je direktno zavisen od iradijancije svetlosti(broj fotona koji padaju na fotodiodu) i od kvantne efikasnosti(ako je konstantna imamo strujni izvor koji je kontrolisan samo svetlošću). Kapacitivnost oblasti prostornog tovara je vezana izmedju ulaza i izlaza strujnog generatora. Shant može biti desetak mega oma. Takođe, serijska otpornost modeluje otpornost kontakata i dela poluprovodnika kroz koju nosioci moraju da prodju da bi stigli do kontakata.

$$I_O = I_L - I_D - I' = I_L - I_S \left(\exp \frac{q V_D}{k T} - 1 \right) - I'$$

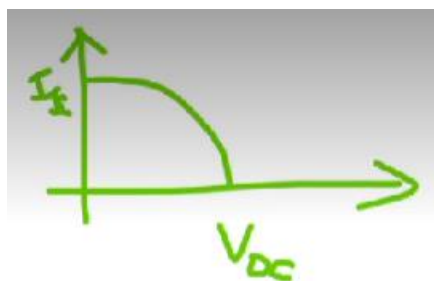
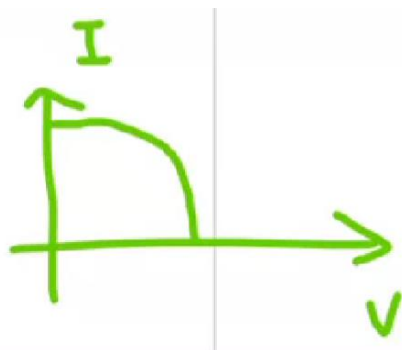
Jednačina strujno naponske karakteristiku fotodiode. Primetimo da je V_D definisan sa + kao kod standardne diode.

Što je dioda više osvetljena, to njena strujno naponska karakteristika seče strujnu osu niže. Kako raste iradijansa, fotostruja linearno raste, pa se strujna karakteristika dalje pomera na dole.



KPDC0005EA

Fotodiodu posmatramo kao strujni generator inverzne struje diode. Posmatrajući četvrti kvadrant invertovan, dobićemo strujno naponsku karakteristiku fotostruje diode u prvom kvadrantu



Imamo **karakteristične tačke**, struja kratkog spoja **I_{sc}** i napon otvorene veze **V_{oc}**. V_{oc} dobijamo kada stavimo da je struja kroz diodu 0. Dakle, fotostruja koju fotodioda stvara kada je osvetljena svetlošću je veoma linearna sa iradijansom svetlosti. Ukoliko diodu posmatramo u otvorenoj vezi, onda je V_{oc} logaritamski zavisn od ove struje, dakle logaritamska veza je između iradijancije i napona otvorene veze. Možemo dodati u jednačinu za V_{oc} faktor idealnosti n koji množi kT i kreće se od 1 do 2.

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_L - I'}{I_s} + 1 \right) \quad \eta = \frac{I_p / q}{P_0 / h\nu}$$

Kvantna efikasnost se računa kao odnos fotostruje podeljena sa elementarnim naelektrisanjem (broj nosioca) i snage svetlosti podeljenom sa energijom jednog fotona (broj fotona u sekundi). U praksi se kreće od 30-90%. Ona zavisi od energetskog procepa materijala. Ukoliko je energija fotona veća od energetskog procepa, utoliko je apsorpcija svetlosti veća i jača, zatim zavisi od dopiranoosti p, i i n oblasti i njihovih debljina. Dopiranoost i debljina određuju veličinu OPTa. Zavisi i od talasne dužine fotona. Ako želimo visoku osetljivost, želimo i visoku kvantnu efikasnost.

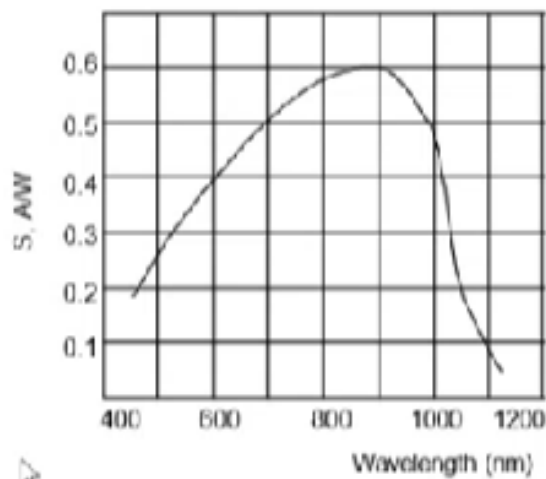
Visoko energetski foton će biti apsorbovan veoma brzo i to pre nego što stigne do OPT-a. Ukoliko ima malu energiju, odnosno veliku talasnu dužinu, ne može prebaciti elektron iz valentne u provodnu. Postoji kritična najveća talasna dužina koju može fotodioda da detektuje:

$$\lambda_c (\mu\text{m}) = \frac{hc}{E_g} = \frac{1.24}{E_g (\text{eV})}$$

Osetljivost:

$$R = \frac{I_p}{P_0} = \frac{\eta q}{h\nu}$$

Količnik fotostruje i snage svetlosti koja pada na fotodiodu je **osetljivost**. Osetljivost fotodiode mora da bude funkcija talasne dužine:



Osetljivost je data u [A/W]. Ima strm pad na većim talasnim dužinama jer fotoni nemaju dovoljnu energiju da prebace elektron i da stvore par elektron – šupljina, a za male talasne dužine opada iz dva razloga. Jedan razlog je što na manjim talasnim dužinama imamo veću apsorpciju i sve više fotona se apsorbiraju van OPT-a. Drugi uzrok je to što imamo gubitak energije ukoliko prebacimo elektron iz valentne u provodnu zonu jer nećemo prebaciti elektron na dno provodne zone nego na neku višu poziciju i deo energije će elektron izgubiti termalno (u sudarima) i taj deo energije nismo uhvatili kroz fotostruju (u električnom domenu).

Fotoni veće energije bi zahtevali prevelike energetske procepe, pa je ultraljubičasti deo spektra loše pokriven poluprovodnicima, pa se za njihovu detekciju ne može koristiti fotodioda.

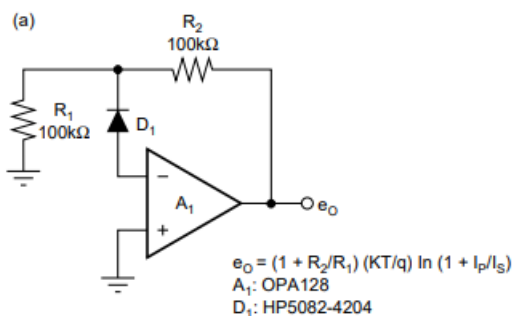
Vreme odziva zavisi od vremena preleta generisanih elektron-šupljina kroz OPT.

Vreme odziva zavisi i od vremena difuzije generisanih fotonosilaca van OPT-a.

Takođe zavisi i od RC vremenske konstante fotodiode i pridruženog kola i na to možemo da utičemo u zavisnosti od toga kako povežemo fotodiodu u kolo:

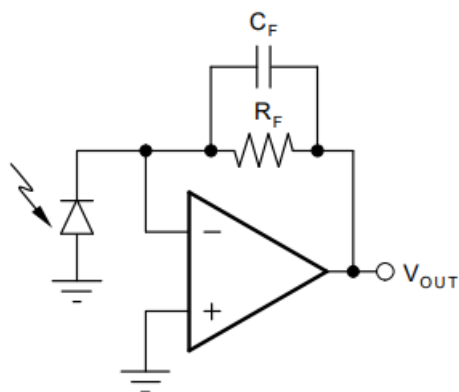
Fotodioda će ili raditi kao nepolarizovana kada je neinverzna struja (struja koja ne dolazi iz optičkog domena) mala ili kao inverzno polarizovana. Može raditi u fotoprovodnom režimu ili fotonaponskom.

Prvi način na koji možemo da povežemo fotodiodu u kolo:



Razdelnik napona od mase do izlaza. Kroz fotodiodu ne može da protiče struja. Napon na diodi je jednak naponu otvorene veze. Kada svetlost padne na fotodiodu, napon raste i lako se računa izlazni napon opAmpa. Fotodioda neće biti u linearnom režimu rada. Napon nelinearno zavisi od fotostruje i još ima dodatni efekat. Kada inverzno polarizujemo diodu kao što je ovde slučaj zbog svetlosti, onda se menja i dimenzija OPT-a i sada zbog toga se menja i osetljivost diode jer ona zavisi od samog OPT-a. Dakle, u ovom kolu dioda radi u **nelinearnom režimu** rada i osetljivost zavisi od upadne iradijancije.

Ako želimo da iskoristimo linearnost fotostruje i na izlazu imamo napon koji linearno zavisi od iradijancije svetlosti, tada je vezujemo u kolo **transimpedansnog pojačavača**:

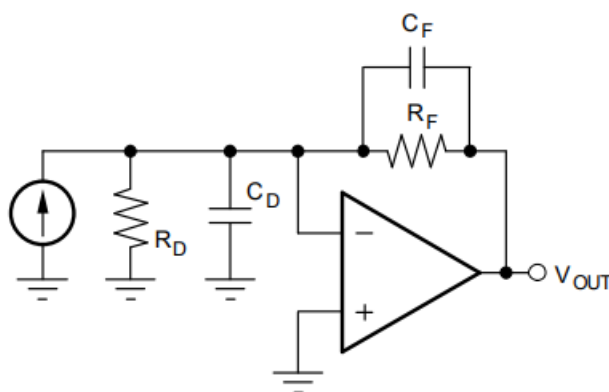


Sva fotostruja koja se generiše u fotodiodi se zatvara kroz transimpedansni otpornik

$$V_{out} = R_f \cdot I_{ph}$$

Fotodioda se nalazi između mase i virtualne mase. Uvek je nultto polarizovana. Zbog toga je debljina OPT-a konstanta. Zbog toga je osetljivost konstantna. Dakle, fotodioda u transimpedansnom pojačavaču će stvarati **linearni izlaz** na pojačavaču u veoma širokom opsegu.

U ovom slučaju možemo da je inverzno polarishemo tako što donji kraj stavimo na negativni potencijal. Kada to uradimo, ona je uvek polarizovana na -5V, ali osetljivost je i dalje konstantna, s tim što dobijamo prednost većeg OPT-a.



Ovo je kolo sa pridruženim elementima koji čine fotodiodu. Ovaj sistem može da menja fazni stav od ulaza do izlaza i ako promeni fazni pomak za π , postoji veliko pojačanje. To je situacija koja dovodi do oscilovanja i ukoliko nije pojačavač kompenzovan ovom kapacitivnosti C_f , naročito uz velike vrednosti R_f doći će do oscilacije. Nađemo prenosnu funkciju povratne sprege i nadjemo gde se seče sa pojačanjem operacionog pojačavaca.

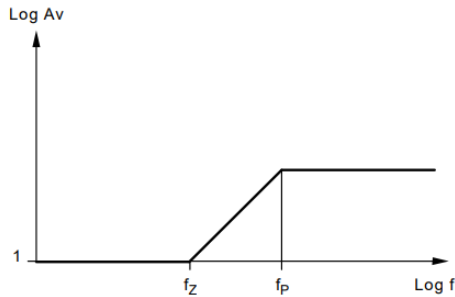


Figure 3. Bode Plot of Noise Analysis

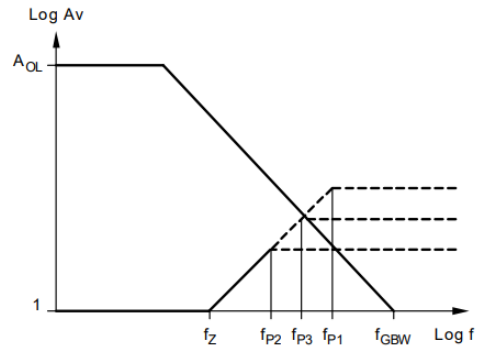


Figure 4. Various Feedback Responses Intersecting Op Amp Open-Loop Gain

Prenosna funkcija naponskog razdelnika od dve impedanse ima jedan pol i jednu nulu pri čemu je frekvencija nule uvek manje od frekvencije pola. Dakle, ovako izgleda funkcija prenosa u ovom delu kola povratne sprege (figure 3). Sa druge strane, prenosna funkcija opampa može da se aproksimira tako da je ravno do mesta dominantnog pola opampa, i pol obara prenosnu karakteristiku. Ukoliko se ove prenosne funkcije seku u gornjem prelomu izlomljene prenosne funkcije povratne sprege imamo uslove za oscilovanje. Ukoliko se seku u donjem delu ispod dela koji seče izlomljena prava karakteristike opAmpa, kompenzovali smo oscilacije. Ukoliko se seku na graničnoj tacki, kao na slici, imamo marginalno stabilan slučaj koji ne mora i može da zaosciluje, ali tada imamo najveći propusni opseg (do f_{p3}).

Ukoliko poznajemo proizvod pojačanja i propusnog opsega za opAmp, i ako znamo kapacitivnost diode, možemo odrediti optimalni C_f koji će obezbediti stabilnost našem kolu, a pri tome će dati maksimalni propusni opseg. Ukoliko posmatramo izraz za propusni opseg, vidimo da je inverzno proporcionalan sa transimpedansnim otpornikom. Kada imamo malo svetlosti, želimo veliki R_f da bismo imali što veći naponski izlaz. Međutim to nije rešenje jer to dovodi do smanjivanja propusnog opsega, kao što vidimo u izrazu. Moramo naći kompromis.

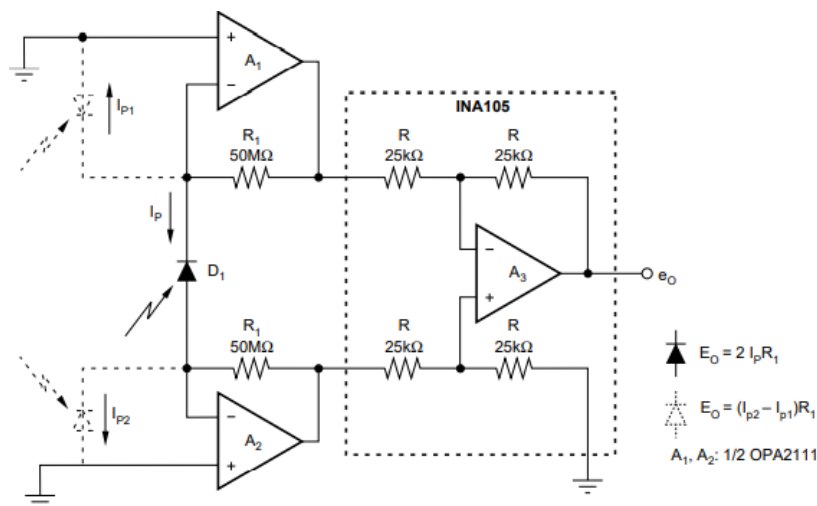
$$A_{CL}(f \gg f_p) = \frac{C_F + C_D}{C_F}$$

$$\frac{GBW}{f_p} = \frac{C_F + C_D}{C_F}$$

$$C_F = \frac{1}{4\pi R_F GBW} \left[1 + \sqrt{(1 + 8\pi R_F C_D GBW)} \right]$$

$$f_p \approx \sqrt{\frac{GBW}{2\pi R_F C_D}}$$

Jedno od rešenje je instrumentacioni pojačavač. Ideja je da sa relativno malim otpornicima dobijemo ulazni signal koji kasnije pojačavamo. Šema je napravljena simetrično, tako da se kompenzuju uticaji koji su suprotni na dva dela kola.

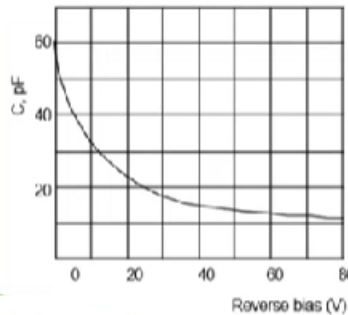


Što se tiče šuma, biće Poasonovog šuma zbog diskretnih nosioca naelektrisanja, ali nas više brine termalni šum. U zavisnosti od temperature, termalno može biti generisan par elektron-šupljina u oblasti prostornog tovara. Što je veća temperatura, veća je i verovatnoća za ovaj događaj. Ne postoji način da razlikujemo par koji je nastao kao posledica fotona i termalno generisan par. Rešenje: hlađenje (povećava odnos signal šum, npr tečni azot). Ako radi dioda kao nepolarizovana, kada nema svetlosti, nula je struja. A ako je inverzno polarišemo, biće struja mraka kao inverzna struja kroz diodu. Ona ima svoje fluktuacije, i remeti detektovanje fotostruje.

Kada inverzno polarišemo diodu, povećavamo električno polje u oblasti prostornog tovara. To dovodi do povećanja oblasti prostornog tovara. Kapacitivnost OPT-a se smanjuje. Nama odgovara jače električno polje, da brže odvaja elektron šupljine. Povećanje OPT-a dovodi do veće osetljivosti i veće kvantne efikasnosti. Odgovara i smanjenje kapacitivnosti jer je potencijalni propusni opseg diode i pridruženog kola veci. Sa svim tim dobrim stranama inverzne polarizacije, nažalost, opada odnos signal-šum.

Ima šum i pridruženog kola. Veći $R_f \Rightarrow$ veći šum.

Pored osetljivosti, najbitnija stvar u datasheet-u fotodiode je kapacitivnost fotodiode u funkciji inverznog napona.

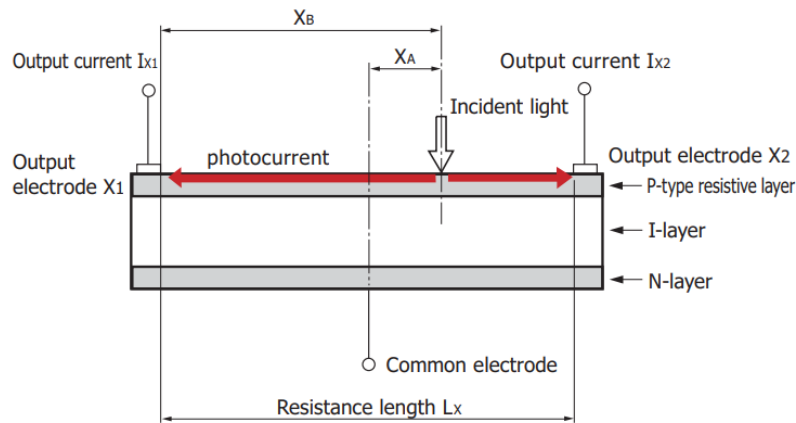


Da bismo mogli da proračunamo optimalni C_f i da bismo dobili max propusni ospeg, moramo znati kapacitivnost fotodiode. Manja kapacitivnost odgovara sa stanovišta veće brzine rada. Bitno je znati i probojni napon, struju mraka (slika šuma), odzivnost, NEP na odgovarajućim talasnim dužinama i aktivna oblast. Nikada ne želimo, zbog kapacitivnost diode, birati preveliku veličinu fotodiode, jer je tada kapacitivnost veća.

Lavinska fotodiode. Ako je napon inverzne polarizacije dovoljno velik, doći će do proboja, kao npr kod zener diode. U probojnom režimu, u kom lavinske fotodiode uvek rade, električno polje u OPT je veliko. Ukoliko svetlost padne na diodu u režimu proboja i u OPT-u generise par elektron-šupljina onda je električno polje ugradjeno u OPT-u toliko snažno da ubrza nosioce da u sudarima sa rešetkom generišu nove parove elektron-šupljina. Toliko snažno polje, da jedan par elektron-šupljina generiše veći broj parova. To dovodi do lavinskog procesa. Jedan generiše dva, dva generiše četiri. Kvantna efikasnost kod lavinske diode je veća od 1. Imamo pojačanje i veliku osetljivost i brzinu, međjutim dioda ima jako veliku struju i u odsustvu svetlosti i ta struja će davati jako veliki šum. Takođe ta struja greje pn spoj i to dovodi do termalno generisanih nosilaca i još šuma. Problem je i inverzni napon napajanja (min 40V).

PSD (Position Sensitive Detector)

Sa stanovišta poluprovodnika, imamo istu strukturu kao kod fotodiode. Ovde imamo zajedničku elektrodu, a druga je razdeljena. Ukoliko svetlost pada na jednu poziciju, tu se stvaraju parovi elektron-šupljina. Međutim zbog različitog rastojanja ove dve elektrode, nejednak deo elektrona će da se zatvori kroz jednu odnosno kroz drugu elektrodu. Ovaj senzor omogućava da merimo poziciju težišta iradijancije. Odnosno, ako bacimo laserski snop na psd, on će da nam poziciju maksimalne iradijancije zračenja. Može se pokazati da poziciju težista možemo dobiti kao razliku dve struje kroz dva pina i normiramo to sa ukupnom strujom.



• When the center point of the PSD is set as the origin:

$$I_{x1} = \frac{\frac{L_x}{2} - X_A}{L_x} \times I_0 \dots (1) \quad I_{x2} = \frac{\frac{L_x}{2} + X_A}{L_x} \times I_0 \dots (2)$$

$$\frac{I_{x2} - I_{x1}}{I_{x1} + I_{x2}} = \frac{2X_A}{L_x} \dots (3) \quad \frac{I_{x1}}{I_{x2}} = \frac{L_x - 2X_A}{L_x + 2X_A} \dots (4)$$

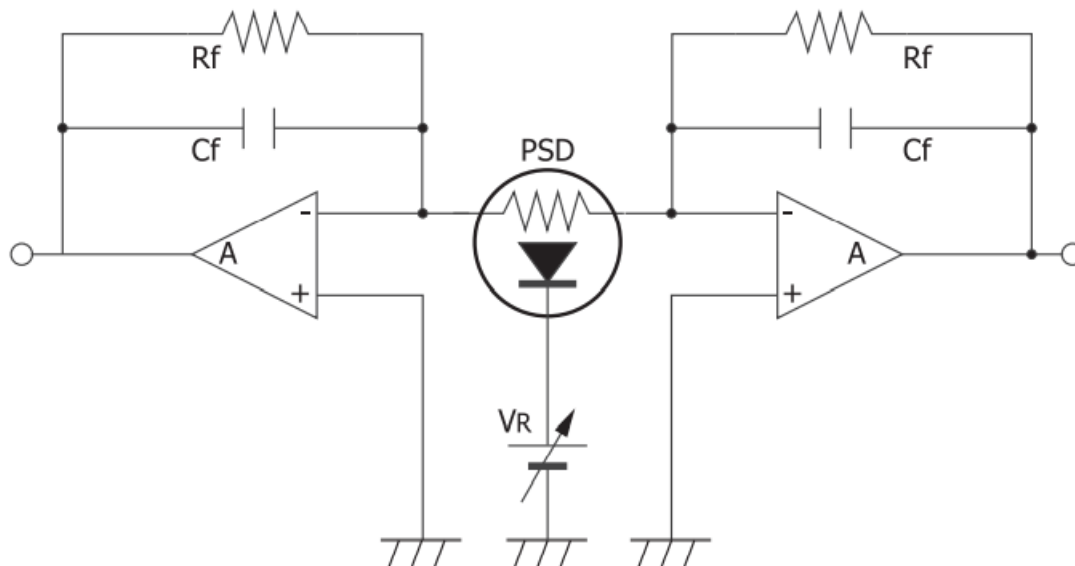
• When the end of the PSD is set as the origin:

$$I_{x1} = \frac{L_x - X_B}{L_x} \times I_0 \dots (5) \quad I_{x2} = \frac{X_B}{L_x} \times I_0 \dots (6)$$

$$\frac{I_{x2} - I_{x1}}{I_{x1} + I_{x2}} = \frac{2X_B - L_x}{L_x} \dots (7) \quad \frac{I_{x1}}{I_{x2}} = \frac{L_x - X_B}{X_B} \dots (8)$$

Mereći struje, možemo odrediti poziciju snopa.

Povezivanje PSD-a(kao da imamo dve fotodiode):



Svaku od dve anode da povežemo u kolo transimpedansnog pojačavača (želimo linearan izlaz koji zavisi od razlike anodnih struja podeljen sa ukupnom strujom).

Moguća i dvodimenzionalna realizacija (4 transimpedansna stepena). Moraju se kompenzovati ivični efekti u ovom slučaju.

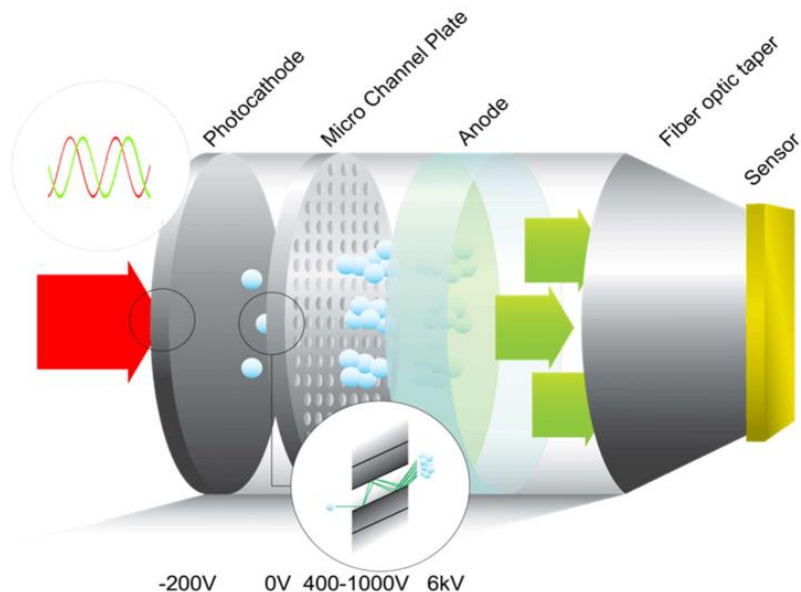
Fototranzistor

Fototranzistor radi na istom principu kao fotodioda. Bipolarni tranzistor kod kog je otkočena baza. Nosioći koji bi dolazili u bazu, predstavljaju nosioći koji su generisani svetlošću. Umesto bazne struje, imamo svetlost koja generise nosioce i sve ostalo se desava isto kao kod ostalih bipolarnih tranzistora. Struja baze pojačana (fotostruja). Znači, imaćemo pojačanje fotostruje. Tj. fototranzistor će imati veću osetljivost od fotodiode. Fototranzistor ima dva pina za povezivanje (baza otkočena), treći pin na fototranzistoru predstavlja ring-pin koji treba galvanski da izoluje aktivnu površinu od ostatka kola. Kod fototranzistora imamo pojačanje, ali smanjenje propusnog opsega. Možemo ga vezati u kolo transimpedansnog pojačavača. Do 10kHz. Najveći problem je kada imamo malo brzopromenljive svetlosti. Kad treba velika osetljivost i brz odziv moramo da idemo na fotodiodu na mali transimpedansni stepen i naknadno pojačanje tog signala.



Pojačavač slike

Koristi se za night-vision kada imamo premali broj fotona koji pada na strukturu. Micro channel plate. Struktura: primarni fosforni ekran. Kod njega, fotoni koji padaju na njega izbijaju elektrone. Nakon njega imamo staklenu pločicu u kojoj imamo mnogo veoma uskih kanala. Ova pločica je postavljena na visok napon (600V). Fotoni izazivaju lavinski efekat koji se prenosi kroz te kanale. Ti elektroni dolaze do fosfornog ekrana i dobijamo sliku koju možemo digitalno da obrađujemo.

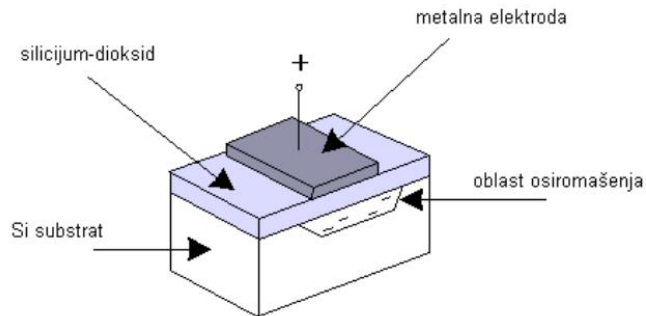


CCD

To je to što se tiče tačkastih detektora. Ako želimo da detektujemo sliku onda nam treba kamera.

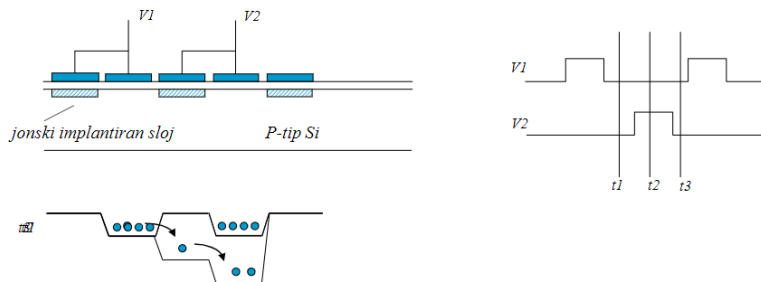
CCD(charge-coupled device) se pojavio zbog potrebe astronomije, a kasnije je bio zgodan zbog obrade slike jer ima elektronsko digitalni izlaz(video industrija): veća kvantna efikasnost, velika linearnost, veliki dinamički upseg, uniforman odziv, relativno mali šum. On ima 4 zadatka: generiše naelektrisanja srazmerno broju fotona koje padne na strukturu, da skupi naelektrisanje u pikselima, da izvrši transfer naelektrisanja i očitava koliko ima naelektrisanja tj. da ih detektuje. Kada se očitava količina naelektrisanja zna se koliko je fotona palo na piksel i tako možemo reprodukovati sliku.

MIS kondenzator



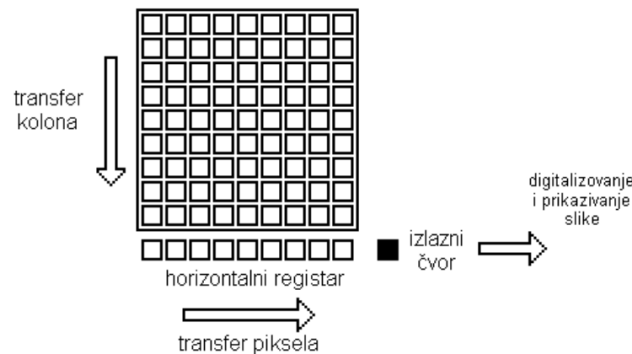
Princip rada je zasnovan na jednom mos kondenzatoru(metal-oksid-poluprovodnik). Imamo metalnu elektrodu, SiO₂ kao izolator i ispod imamo poluprovodnik n tipa, koji izvršava sakupljanje naelektrisanja. Kada svetlost odgovarajuće energije dospe do poluprovodnika generiše se par elektron-šupljina. Dovedimo pozitivan napon na gejt, i taj napon će privlačiti elektron, a odbijati šupljine, i neće doći do rekombinacije. Elektron će biti zarobljen u potencijalnoj jami. Broj elektrona u potencijalnoj jami je srazmeran broju upadnih fotona. Prva dva zadatka su izvršena

Dvofazni pomerač



Sledeći zadatak CCD-a je da ove elektrone pomeri, tj.da ih dovede do piksela za očitavanje. To se radi uz pomoć dvofaznog pomerača. Pored gejta ima i susedni gejt. Povećavamo napon na susednom gejt, a na prošlom smanjujemo(povećavanje i smanjivanje potencijalne jame). Treba dosta energije(15ak V na gejt) i biće zagrevanja ako se brzo radi transfer kolona u horizontalni registar.

Transfer naelektrisanja



Na njegovom izlazu izlazni čvor. Poredi se napon na pikselu sa referentnim i saznaje se količina naelektrisanja indukovano fotonima i dobija se slika.

Ne sme stvaranje novih elektron-šupljina tokom transfera(stvaranje nepotrebnih delova slike). Za CCD je karakterističan **global shutter**(zaklanjenje celokupne slike) dok se vrši očitavanje(mehanički ili drugi). To znači da dok vršimo transfer naelektrisanja(očitavanje slike) zaklonimo čitavu sliku.

Cvetanje slike – problem : kada zarobimo elektron u potencijalnoj jami, ta jama je za sledeći elektron plića. Ako je jak izvor svetlosti, napunićemo potencijalnu jamu i sledeći elektroni će lutati po ostalim pikselima. Moguće rešiti izolacijom susedne piksele, ali smanjujemo aktivnu oblast. Fill factor bi bio manji od 1 zbog izolacije.

Osetljivost različita za crvene i plave fotone. Trik: fotoni ne treba da dolaze sa strane sa koje se nalaze metalne elektrode(na njima ima foton minimalnu šansu zbog metala da prodre do poluprovodnika). Iztanjiti p+ substrat na dnu mos strukture i odozdo postavljati. Dakle, da svetlost ne dolazi tamo gde su gejtovi.

Generacija elektrona u mraku. Termalno generisani nosioci će se ponašati isto kao nosioci generisani svetlošću. Isto kao kod fotodiode.

Kolor sliku dobijamo pomoću filtra(**rgb filter**). Podelimo piksele na tri dela, gde svaki deo najbolje propušta jednu od tri glavnih boja. Tako se formira boja na celokupnoj slici.

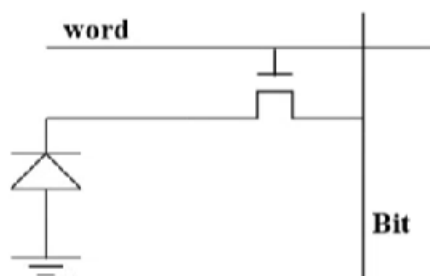
Treba hladiti detektor za dobar odnos signal-šum. Način očitavanja piksela ograničava brzinu. Teško se integriše sa drugim kolima za obradu slike. Spektralni odziv sličan silicijumskoj diodi.
Dinamički opseg mu zavisi od odnosa dubine potencijalne jame i šuma.

Promena iradijanse od 0.1% će se videti na fotodiodi, ali na CCD-u od 1% promena će da se utopi u šum. Osetljivost CCD-a je time slabija od fotodiode, ali bolja od CMOS-a.

CMOS

CMOS je mnogo **kompatibilniji sa električnim kolima** za obradu slike. **Adresiraju se pikseli pojedinačno** i manje energije je potrebno za očitavanje piksela. Manje čipova potrebno, veća brzina odziva. Naponi za napajanje manji i manja energije potrebno za očitavanje => Manje disipacije => manje samozagrevanja => manje termalnog šuma. Mane su veći šum ostalih izvora. Shutter je drugaciji(**rolling shutter**- Pikseli ne snimaju sliku u istim vremenskim trenucima jer su neki skriveni, a neki ne. Kad se brzo menja slika dolazi do izobličenja. Može i global shutter i ovde). Delimo na cmos tehnologiju sa pasivnim i aktivnim pikselima.

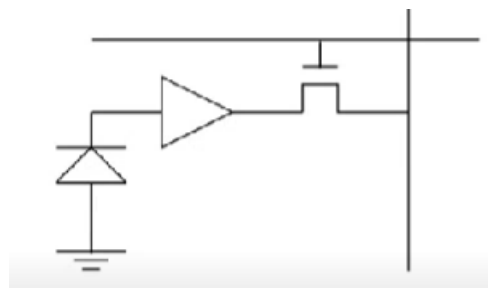
Pasivni:



- 1 tranzistor po pikselu
- Mali piksel
- Veliki fill factor
- Spor
- Nizak odnos signal/šum

Ukoliko imamo fotodiodu, u stanju otvorene veze. To činimo pomoću cmos tranzistora koji radi kao prekidač. Za vreme procesa integracije(nagomilavanja naelektrisanja), kao da je otvorena veza. Kada je dioda osvetljena fotonima određene talasne dužine, dolazi do punjenja kapacitivnosti OPT-a diode i kraj ka tranzistoru postaje pozitivnije naelektrisan i kako traje vreme integracije(snimanja) kapacitivnost postaje sve veća. U jednom trenutku kada želimo da očitamo broj fotona koji je pao na određeni piksel, dovodimo veliki napon na gejt, to dovodi do efekta ekvivaletnog sa spuštanjem prekidača i time ispraznimo kapacitivnost diode. Izvršavamo transfer naelektrisanja i očitavamo broj naelektrisanja. To radimo pomoću CIA(Charge Integration Amplifier). Time dobijamo vrednost ovog piksela. Aktivna površina je ovde manja nego kod CCD-a što dovodi do smanjene osetljivosti(faktor ispune manji). Imamo mnogo više izvora šuma zbog dodatne elektronike. Ovo sve je gore kod aktivnog pikslea. Pasivni piksel je bez ikakvog pojačanja.

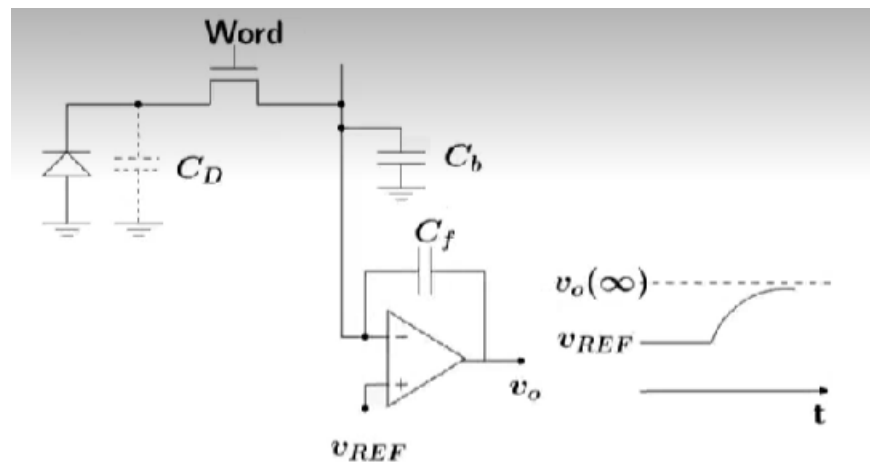
Aktivni:



- 1.5 – 4 tranzistora po pikselu
- Brži
- Veći odnos signal/šum
- Veći piksel
- Manji fill factor
- češće upotrebljiv od pasivnog

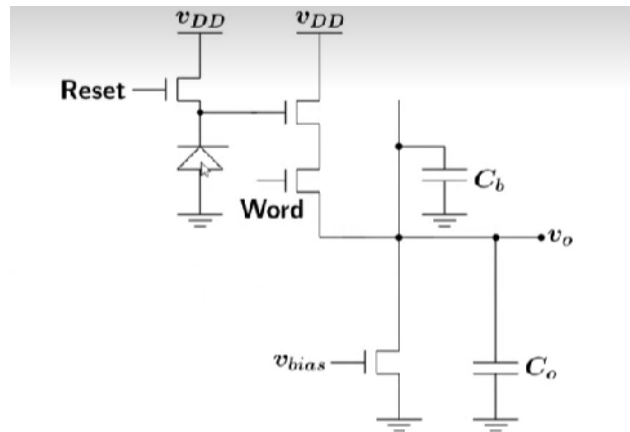
Možemo pojačati signal (umnožiti broj elektrona i šupljina koji je prikupljen) pa da vršimo transfer tako pojačanog signala.

Mane u odnosu na CCD senzor je sto aktivne oblasti imamo manje jer imamo više komponenti. **Fixed pattern noise** postoji zbog neuparenosti pojedinačnih piksela jer je ne moguće napraviti identične piksele. Ovde je mnogo veća razlika između fotodioda ponaosob nego kod CCD senzora. Ako ih obasjamo homogenom iradijansom nećemo svuda imati fotostruju, ni prenesno naelektrisanje. Uklanja se snimanjem na početku rada i time može da se ispegla slika. Znači aktivni ima manju kvantnu efikasnost od pasivnog. Očitavanje naelektrisanja se može vršiti pomoću kapacitivnog transimpedansnog stepena (CIA):



C_f se puni strujom. Problem sa ovim rešenjem gde su pikseli pasivni što je svaki piksel opterećen veoma dugačkim linijama koji moraju da stignu do opAmpa. RC konstanta je velika što znači manju brzinu rada. Očitava se red po red (rolling shutter)

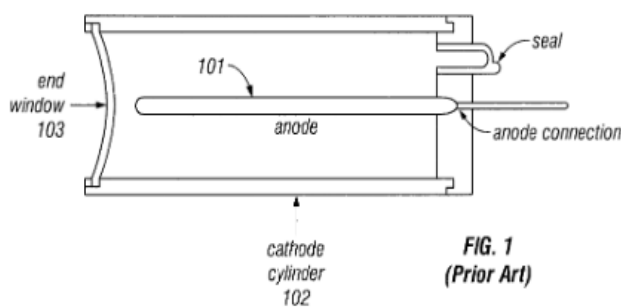
U grani NPS ćemo imati kondenzator i brzina očitavanja zavisi od arhitekture električnog dela kola. Takođe veća greska, prilikom transporta naelektrisanja. 25 puta više kod CMOSa u odnosu na CCD se izgubi elektrona. Diodu razdvajamo od velikih pojačanja u aktivnom pikselu. Logaritamski izraz => veći dinamički opseg. Koristi se kada je malo osvetljenje. Ovakav izlaz veoma osetljiv na temperaturu (linearna zavisnost od temp).



Ovako može da izgleda jedna ćelija kod aktivnog cmos senzora. Naelektrisanja se nagomilavaju na diodi, puni se kapacitivnost, raste potencijal i pojačava se signal. Tranzistor može raditi kao globalni shutter.

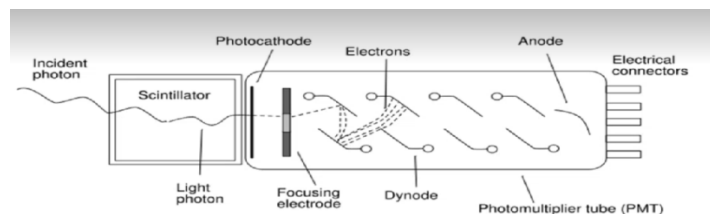
1.2 Senzori X i Gama zraka

Gajger-Milerov brojač: Može da detektuje i alfa i beta čestice pored fotona. Alfa čestice su visokoenergetska jezgra helijuma, a beta čestice elektorni. Karakteristični za radioaktivni raspad. Šematski gledano on se sastoji od jedne unutrašnje elektrode(anode) koja je okružena gasom koji je hermetički zatvoren u kućište, a spoljni deo kućišta je katoda i imamo prozor kroz koji ulaze visokoenergetske čestice(gama zraci), mi sad dovodimo visok napon izmedju elektroda, unutar valjka formiramo jako električno polje. To polje treba da bude na pragu proboja gasa kojom je ispunjenja ova zapremina, ali da ne radi u režimu proboja. Kada gama zrak upadne u ovaj gas, pošto je u pitanju foton velike energije, velika je verovatnoća da ce izvršiti jonizaciju nekog atoma gasa. Tu jonizaciju može da izvrši visokoenergetski elekttron ili alfa čestica. Kada se desi ta inicijalna jonizacija, snažno polje ubrzava elektron i drugi atomi se jonizuju, dešava se lavinski proces i formira se plazma. Tada imamo veliki broj nosioca naelektrisanja, provodnost skače i izmedju elektrode od jednom dolazi do visoke struje, pa to obara napon. Kada naleti gama zrak funkcija napon u vremenu: Kada napon opadne nema električno polje koje kreira lavinski proces i on se polako gasi. Kada se ugasi nemamo slobodnih naelektrisanja. Struja se nuluje, a napon se ponovo podiže i to se ponavlja kada dođe novi foton.



Mane ovog brojača, ukoliko gama foton stigne kada lavinski proces postoji, neće ništa da uradi. Mrtvo vreme dok lavinski proces traje. Ukoliko imamo veliku iradijansu sa ovim brojačem ćemo je potcenjivati.

Drugi način za detektovanje visoko energetskog zračenja su **scintilacioni detektori**:



Scintilacioni materijali imaju osobinu da pod dejstvom visokoenergetskih fotona budu apsorbovani, a da oslobodjanje energije ne ide kroz njih nego kroz fotone niže energije (svetlosne fotone). Sami ti materijali se dele na neorganske i organske scintilatore. Neorganski su bolji i imaju veću efikasnost, sastoje se od halogenih elemenata (bizmut-germanijum-oksidi, Na₂Ti, ZnS itd.) i kada tražimo dobar materijal od interesa je da ima veliku gustinu da imamo što bolju apsorpciju. Postoje i organski (plastični) scintilatori, oni imaju manje efikasnosti, međutim mogu da se naprave u proizvoljnim oblicima. Možemo optimizovati scintilator potrebama koje su nam potrebne.

1.3 THZ deo spektra:

Slobodno definisano od 0,1 do 10 THz. Frekvencija od 1 THz odgovara talasnoj dužini 0,3 mm. Talasne dužine za dva reda veličine veće od talasnih dužina svetlosti, ali su dosta manje od makroskopskih komponenta za antene. Ovaj deo spektra je zanimljiv astronomima jer se 98% fotona koji su emitovani posle velikog praska nalazi u ovom području. THz polje jako dobro interaguje sa polarnim molekulima kao što su H₂O, N₂, O₂, HCl, CO, koji imaju u tom delu spektra mnogo različitih pikova, tako da pomoću ovog zračenja možemo vršiti kontrolu sastava gasnih smesa i to je u današnje vreme zbog zagađenja veoma bitno. Organski molekuli jako dobro interaguju sa ovim zračenjem pa je bitno zbog bioloških primena. U telekomunikacijama što vam je veća frekvencija nosioca, više informacija možemo da prenesemo (veći deo spektra

možemo da upišemo u taj nosioc), tako da su ovi thz talasi zanimljivi zbog povećanja kapaciteta telekomunikacionih mreža. Nije se daleko odmaklo u tome, jer nemamo i dalje dobre izvore thz zračenja. Izvori su male snage i nekoherentni. Jedini izvor zračenja thz zračenja, a da značajnu snagu i da je koherentan je laser sa slobodnim elektronima. Tu jedan elektronski snop ubacujemo u prostoperiodično magnetno polje i elektroni se zatim kreću ubrzano i zrače elektromagnetne talase i mi frekvencijom i jačinom polja određujemo frekvenciju zračenja EM talasa. Sam ovaj princip nam govori da su laseri sa slobodnim elektronima veoma skupi i komplikovani uređaji. Moraćemo da se borimo sa veoma malim snagama signala(a i sami fotoni imaju energiju reda meV). Ta mala energija fotona dovodi do toga da temperatura značajno utiče na detekciju(stvara šum) tako da bez obzira na princip detekcije, moramo hladiti detektor za dobar odnos signal/šum

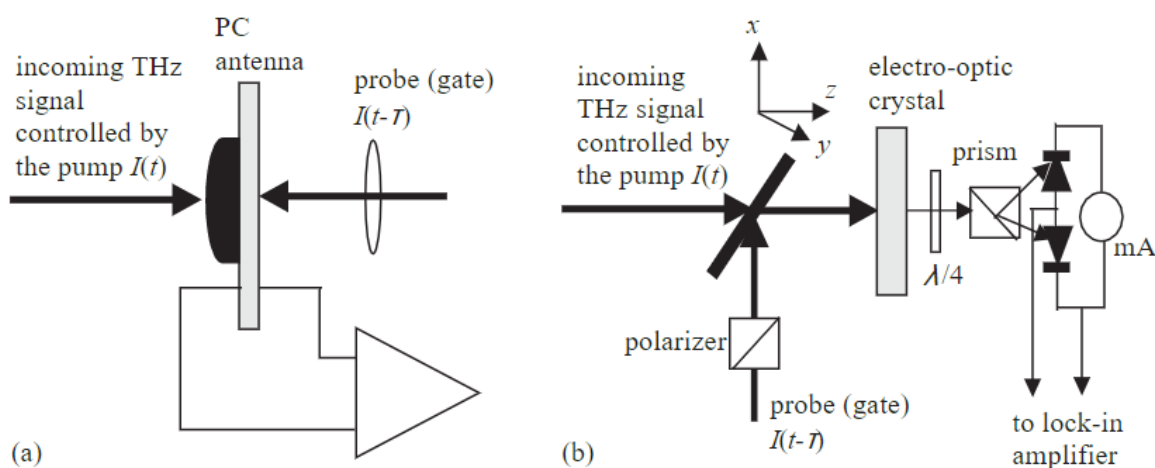


Fig. 34. Ultrashort electrical pulse detection. (a) PC-sampling, (b) FS-EOS.

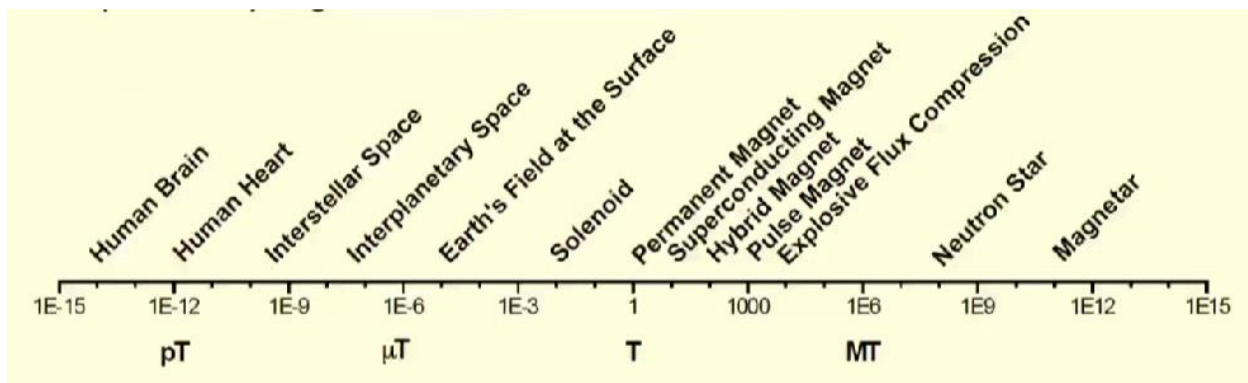
Dva principa detekcije. Sa leve strane fotoprovodnu antenu koja je povezana na elektronsko kolo koje treba da pojača signal. Podseća na detekciju radiotalasa. A sa desne strane vidimo optički princip. U toj postavci imamo elektrooptički kristal, on ima osobinu da mu indeks prelamanja zavisi od električnog polja. Ovo je zapravo korišćenje Pokelsovog efekta. Za svetlost koja ima dva reda veličine veće frekvencije, ovo električno polje THZ talasa je sporopromenljivo. Ovde se zapravo detektuje električno polje thz em talasa tako sto to elektricno polje menja indeks prelamanja Pokelsovog kristala(elektrooptickog), a ta promena dovodi do promene polarizacije i onda se određuje polarizacija svetlosti koja predstavlja sliku elektricnog polja thz em talasa. Implicitno, bez obzira na to sto smo modulisali svetlost bez problema, mi na kraju moramo tu svetlost da očitamo i to sa veoma velikim brzinama. Ako nam je elektricno polje u thz, moramo da imamo elektricno kolo koje ce da ima thz propusni opseg sve zajedno sa fotodiodama pomocu kojih detektujemo svetlost. Nismo relaksirali problem sa stanovista elektronike. Postoji jos jedna zanimljiva mogucnost, da vrsimo heterodinsku detekciju signala. Mesamo signal koji zelimo da detektujemo, tj preklapamo ga prostorno na detektoru sa thz zracenjem lokalnog oscilatora.

Ukoliko imamo dva talasa slicnih frekvenicja, dolazi do izbijanja, a to se desava na razlici ove dve frekvencije. Iz thz mozemo se spustiti na frekvencije koje su u GHZ ili MHZ i znacajno relaksiramo zahteve za elektronski deo sklopa. Poslednji nacin uzpomoc MEMS struktura. Mikroelektromehanicki senzori. U pitanju su senzori napravljeni od veoma tankih strukutra silicijuma koje mogu da se naprave i nagrizzanjem. Silicijum u razlicitim ravnima ima razlicite rastvoriljvisti. Hemijskim postupcima mozemo napraviti nagrizzanjem odredjenje strukture u Si. Kod MEMS ideja je da imamo jednu veoma tanku strukturu koja je podlozna veoma maloj sili. Em talasa kada pada na neku povrisnu vrsi pritisak na tu povrsinu. Ukoliko je to zraccenje reflektovano, pritisak je dva puta veci u odnosu na situaciju kada je zraccenje apsorbovano. Imamo vecu promenu impulsa fotona koji je pao na tu strukturu. Ukoliko napravimo postavku sa siljkom kroz koji moze da se tuneluje struja i kod koga struja koja protice izmedju vrha i donjeg kontakta zavisi snazno od rastojanja, bicemo u stanju da detektujemo veoma male pritiske i veoma mala polja.

*Poremećaji proizilaze najviše iz **termalnog i električnog** domena*

2.Magnetni Domen

- Druga maksvelova jednačina je $\text{div} \mathbf{B} = 0 \Rightarrow$ Magnetno polje je bezizvorno i linije magnetnog polja uvek zatvaraju same u sebe.
- Linije polja su uvek zakrivljene.
- Veoma je teško stvoriti homogeno magnetno polje u nekom većem delu prostora.
- Promenljivo električno polje kreira promenljivo magnetno polje.
- Izvori magnetnog polja su naelketrisanja u pokretu (svaka električna struja), vremenski promenljivo električno polje i namagnetisani materijali.

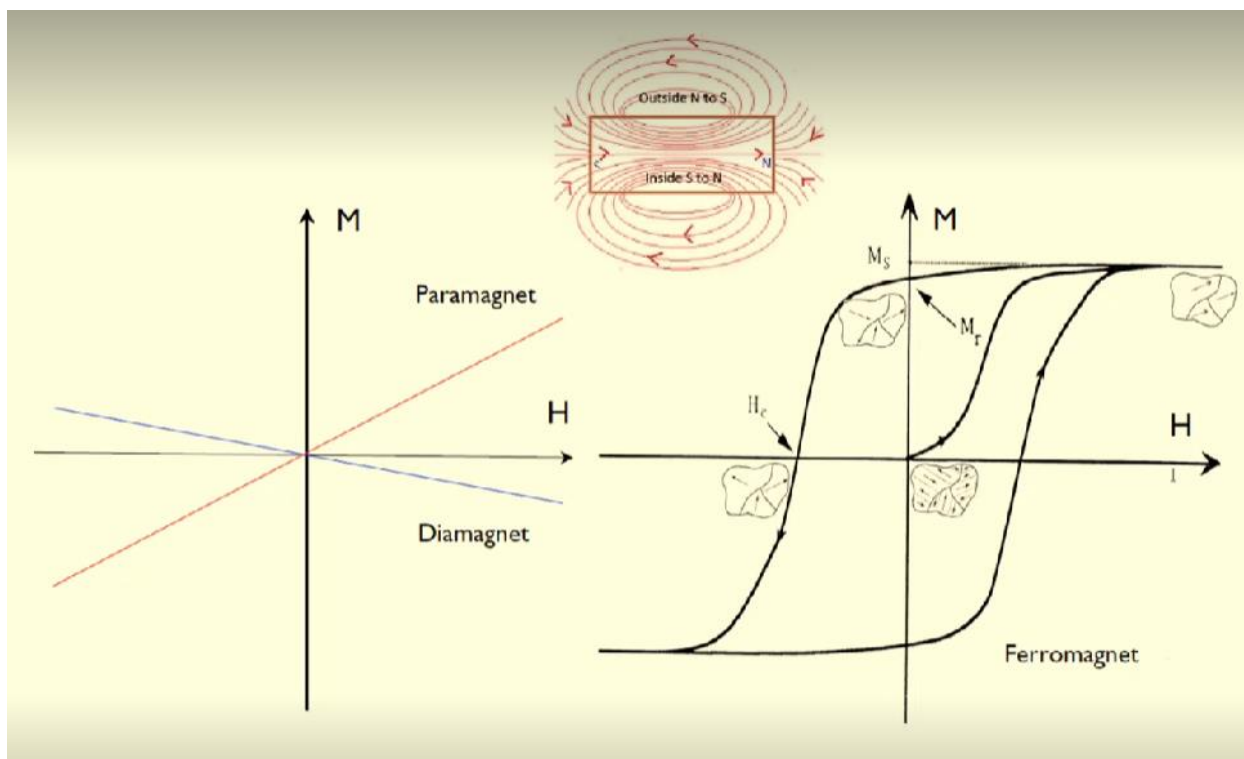


Na zemlji maksimalno možemo postići nekoliko desetina tesli. Materijale, sa stanovništva odziva na magnetno polje, možemo podeliti na tri vrste:

- Paramagnetni
- Dijamagnetni
- Feromagnetni

Senzori magnetskog domena se često koriste za merenje električnog polja ili pomeraja

Feromagnetni materijali imaju neuparene elektrone u najvisim elektronskim ljuskama koji kada se orijentišu vrše magnetizaciju materijala i ta osobina je nelinearna, iz čega nam proizilazi histerezis. Sa histerezisom imamo gubitak energije zbog preorijentacije magnetnih domena i taj gubitak energije po jednom ciklusu je srazmeran površini histerezisa. Histerezisna kriva je simetrična u odnosu na koordinatni početak.



Histerezis je funkcija magnetizacije od jačine magnetskog polja. Većina materijala je paramagnetik. Dijamagnet ima svojstvo magnetizacije koja se vrši u suprotnom smeru od primenjenog polja. Koriste se za levitaciju u gravitacionom polju. Najvažniji feromagnetni materijali su Fe, Co i Ni (imaju visoke Kirijeve temperature). Mi sa feromagneticima imamo koncentratore magnetnog polja i vođenje fluksa, ali imamo veliku nelinearnost i gubitke.

Senzori Magnetnog Polja:

- Indukcioni kalemovi(Faradajev princip EM indukcije)
- Holovi senzori (Lorencova sila)
- Magnetodiode (Lorencova sila)
- Magnetotranzistori (Lorencova sila)
- Magnetootpornici (Lorencova sila)
- Mikrofluksgejt senzori(Faradejev princip em indukcije)
- Fiberoptički senzori magnetnog polja
- SQUID – SuperConducting Quantum Interference Device
- Senzori na bazi slobodne nuklearne precesije
- Rubidijumski senzori
- MEMS na bazi Lorencove sile

Kada se feromagnetik zagreje na temperaturu veću od Kirijeve, dolazi do razmagnetisanja materijala zbog termalnih nasumičnih kretanja naelektrisanih čestica

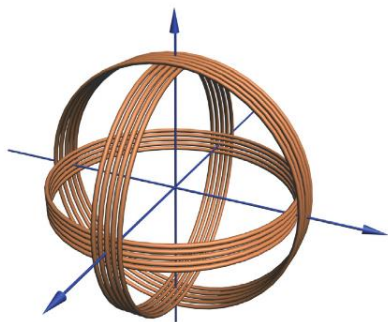
Senzore magnetnog polja ćemo videti u raznim uređajima koji mere i neke druge stvari. Recimo, Holovi senzori se koriste za merenje blizine odnosno rastojanja, brzine rotacije raznih točkova, a sa druge strane, struja je uvek praćena magnetnim poljem. Mi ako znamo geometriju provodnika

mi znamo magnetno polje u njegovoj okolini. Znači, magnetno polje se često koristi indirektno za merenje pomeraja ili struje.

Gornja granica mernog opsega nije od tolikog interesa jer imamo obično NPS na senzoru. Ukoliko na našem senzoru imamo namotaje i napravimo povratnu spregu čija je ideja da generiše magnetno polje jednako, ali tačno suprotnog smera od spoljašnjeg polja, nameštamo da naš senzor uvek radi u istoj mirnoj radnoj tacki, tj. linearno merimo struju koju forsiramo koja je slika spoljašnjeg magnetnog polja. Znači gornja granica može da se poveća ako koristimo senzor u prisustvu povratne sprege i plus, rešavamo problem nelinearnosti, histerezisa i osetljivosti.

2.1. Senzori

Indukcioni kalemovi rade na principu promene fluksa kroz neku konturu i generiše se elektromotorna sila (napon na krajevima). Ukoliko imamo n namotaja, dobićemo n puta veću EMS. Jasno je da je EMS veća ukoliko je površina konture veća. Dobijamo EMS koja je srazmerna izvodu magnetnog polja. U ovakvoj direktnoj konfiguraciji ne možemo meriti vremenski konstantno polje, a ukoliko merimo promenljivo, izlaz nam zavisi od frekvencije polja. Treba nam i frekvencija i EMS da bismo sračunali polje.



$$V = -n \frac{d\Phi}{dt} = -nA \frac{dB}{dt} = \mu_0 nA \frac{dH}{dt}$$

$$B = B_m \sin \omega t$$

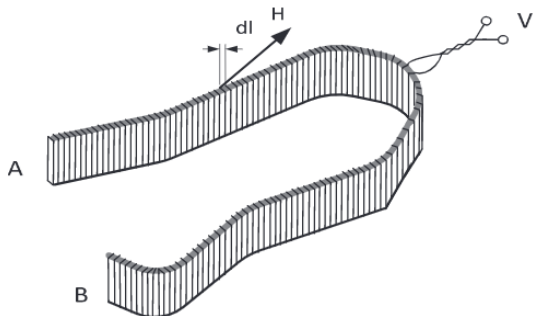
$$V_m = -2\pi n A f B_m$$

*Indukcione kalemove
možemo koristiti u veoma
velikom opsegu
magnetskog polja (najveći
opseg od svih)*

Ukoliko nemamo prostoperiodično polje, nego neki nepoznat spektar to itekako komplikuje stvari. Pozitivna stvar je što možemo napraviti tri međusobno upravna kalem i meriti sve tri komponente. Možemo regulisati merni opseg menjanjem veličine poprečnog preseka. Ako želimo meriti vremenski konstantno polje, možemo nekim motorom učiniti da se kontura rotira, što je ista situacija kao kod generatora električne energije, ili da struktura vibrira, I dovede do promene fluksa kroz konturu i do izlaznog signala.

Unapredjenje ove ideje je namotavanje kalema na feromagnetni materijal:

Rogowski coil (Kalem Rogovskog) je baš to. Oko feromagnetnog materijala obmotamo provodnik i imaćemo značajno jači odziv u odnosu da nemamo ovaj namotaj jer povećavamo promenu fluksa kroz konturu. Bezkontaktno može meriti struju koja prolazi kroz konturu, preko napona koji se generiše na krajevima.



*Ako spojimo krajeve A i B
u zatvorenu konturu:*

$$\oint_C H dl = I_c$$

Mikrofluksgejt senzori rade na promeni fluksa takođe. Oslanjaju se na vođenje fluksa feromagnetnog materijala i na pojačanje odziva. Može da se napravi u konfiguraciji dva paralelna feritna štapića, ali može i u konfiguraciji kružnog jezgra. Konfiguracija dva paralelna štapića i **izvođenje prenosne karakteristike** za njih sledi:

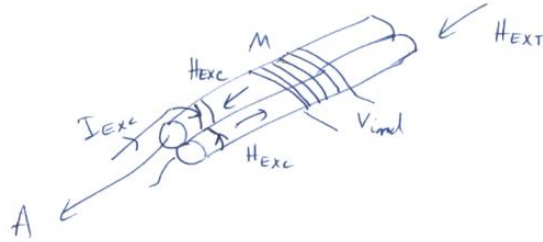
Posmatraćemo prvo jedan štapić:



*Rade u režimu zasićenja,
radi linearnosti*

Na njega je namotan namotaj kroz koji protiče pobudna struja **I_{exc}** i zbog toga se stvara promenljiv fluks kroz ovaj feritni štapić i na drugom namotaju se stvara indukovani napon **V_{ind}**. Prenosna karakteristika je nelinearna, ali ideja je da se ova pobudna struja prebacuje iz jednog zasićenja u jednom smeru u drugo zasićenje u drugom. Dakle, radi u zasićenju. Zbog visoke vrednosti permeabilnosti, magnetno polje i njene linije polja su vođene kroz jezgro. Periodično zasićujemo jezgro u jednom smeru i drugom smeru i zbog nelinearne karakteristike, ova indukovana struja sadrži parne harmonike pobudne frekvencije i filtriranjem dobijamo te harmonike čija je amplituda funkcija spoljašnjeg magnetnog polja.

Prenosna karakteristika na primeru paralelnih fluksgejtova:



Imamo dva paralelna štapića gde su namotaji motani tako da pobudna struja u jednom feritnom štapiću stvara polje u jednom smeru, a u drugom stvara polje u suprotnom smeru. Ovi namotaji na kojim se očitava **Vind** su istovremeno obmotani oko oba feritna štapića. Ukupni fluks kroz namotaje na kojim očitavamo napon jednak zbiru fluksa kroz štapiće pojedinačno:

$$\Phi(t) = \Phi_1(t) + \Phi_2(t) = A \mu(t) (H_1(t) + H_2(t))$$

Ovo važi ako su površine poprečnog preseka iste, odnosno **A**. Ako imamo spoljašnje magnetsko polje koje je **sporopromenljivo** u odnosu na pobudno polje, onda je ukupno polje u prvom štapiću jednako zbiru pobudnog i spoljašnjeg polja, a polje u drugom štapiću je razlika spoljašnjeg i pobudnog polja:

$$H_1 = H_{EXT} + H_{EXC}(t)$$

$$H_2 = H_{EXT} - H_{EXC}(t)$$

Vind je srazmeran promeni fluksa:

$$V_{ind} = - \mu \frac{d\Phi}{dt} = - \mu A \frac{d}{dt} (\mu)$$

Štapići su na suprotnim krajevima histereza. Nagibi su isti, ali suprotnog smera

H1 i **H2** su međusobno protivfazni sa stanovišta pobudne struje, a eksterna struja je sporopromenljiva pa je izvod mnogo manji od izvoda pobudnog polja:

$$\frac{dH_1}{dt} = - \frac{dH_2}{dt}$$

Jasno je da je propusni opseg ograničen uslovom da frekvencija pobudnog polja bude mnogo veća od frekvencije spoljašnjeg polja. Permeabilnost μ je takođe funkcija vremena, pa kada nađemo izvod proizvoda ove dve funkcije uz uslov da je prvi izvod spoljašnjeg polja po vremenu približno jednak nuli, dobijamo:

$$V_{ind} = -\mu A \left(\mu'(H_1) \frac{dH_{EXT}}{dt} H_1 + \mu'(H_2) \frac{dH_{EXT}}{dt} H_2 \right)$$

* ispred mi prim od H_2 treba da stoji minus da bi izvođenje bilo tačno.

Promena permeabilnosti sa vremenom je u dva različita štapića. Potrebno je setiti se histerezisa magnetnog materijala i setiti se da je simetričan u odnosu na koordinatni početak. Ukoliko je pobudna struja oterala jedan štapić u zasićenje na maksimumu magnetizacije, a druga pobudna struja drugi pobudni štapić oterala u zasićenje na drugoj strani MH krive, prvi izvodi na tim mestima su međusobno jednaki pošto smo u zasićenju. Prvi izvod od μ na tim mestima su jednaki, ali suprotnog znaka:

$$H_{EXT} \ll H_{EXC} \Rightarrow \mu'(H_1) = \mu'(H_{EXC}) = -\mu'(H_2)$$

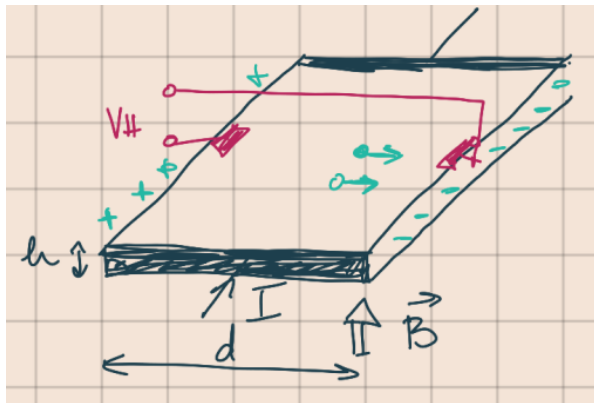
Uz pomoć toga dobijamo izraz za indukovanu EMS koja je srazmerna vrednosti permeabilnosti u zasićenju, broju namotaja, površini feritnih štapića, prvom izvodu ovog pobudnog polja i eksternom magnetnom polju:

$$V_{ind} = -2\mu A \mu(H_{EXC}) \frac{dH_{EXC}}{dt} H_{EXT} \sim H_{EXT}$$

Problem je propusni opseg, pa je ovaj senzor predviđen za merenje DC polja. Zovu ga magnetni kompas jer ima dovoljnu osetljivost da meri magnetno polje zemlje. Tipično ima propusni opseg do 8kHz. Osetljivost mu je 1000 mV/mT(mala), i rezolucija 50 pT/(koren iz Hz).

Sada prelazimo na princip gde magnetno polje utice na nosioce naelektrisanja u poluprovodnicima:

Holovi senzori su bazirani na Holovom efektu (Lorenova sila deluje na naelektrisanje u pokretu). Ukoliko zamislimo jednu poluprovodničku pločicu, ukoliko je n tip poluprovodnika, i unesemo ga u magnetno polje magnetne indukcije koja je upravna na ravan poluprovodnika, imaćemo Lorencovu silu koja deluje na naelektrisanja u pokretu:



$$V_H = \int_d E_H \cdot dl = E_H \cdot d$$

$$E_H = \frac{F_L}{q} = \frac{|\vec{v} \times \vec{B}| q}{q} = \frac{v}{n \cdot e} B$$

$$\Rightarrow V_H = \frac{J}{ne} B d = \frac{J d h}{ne h} B = \frac{I B}{ne h}$$

$$\left(v = \mu E = \mu \cdot \frac{J}{\sigma} = \frac{J}{nq} \right)$$

$$R_H = \frac{1}{ne} = \frac{\mu}{\sigma}$$

$$V_H = R_H \cdot \frac{IB}{h}$$

Zbog Lorencove sile imaćemo skretanje nosioca ka jednoj elektrodi i stvara se električno polje koje dovodi situaciju u ravnotežu, dakle poništava dejstvo Lorencove sile. To polje će biti srazmerno indukciji. E_H je električno polje koje se javlja usled Holovog efekta.

Izlaz kod kog nam se pomoćni energetska tok direktno presluša na rezultat.

Rezultat će varirati, ne samo zbog spoljašnjeg polja, već i ako nemamo stabilnu struju I .

Osetljivost će zavisiti od pobudne struje I .

Pošto imamo električno polje koje je posledica Holovog efekta, imamo električno polje koje je paralelno toku struje zbog koje se struja kreće, možemo definisati **Holov ugao**. On zavisi od pokretljivosti nosioca.

R_H je **Holova konstanta** pločice.

Izraz za Holovu konstantu koji uključuje i dejstvo šupljina pored dejstva elektrona je prikazan na dnu stranice.

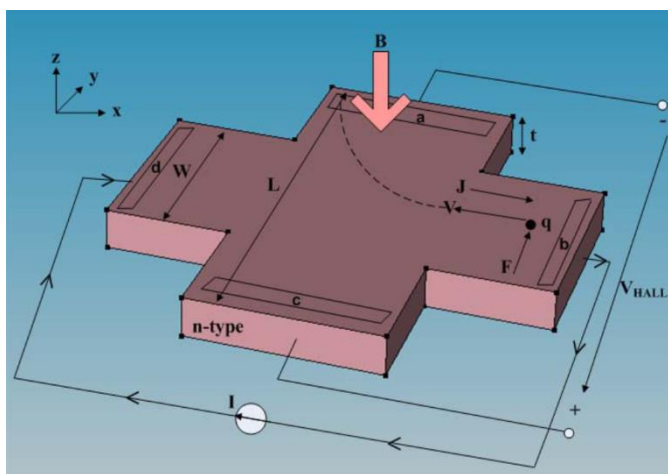
Želimo veliku osetljivost. To nam omogućava mala koncentracija nosilaca, velika pokretljivost nosioca i mala specifičnu provodnost.

$$r_H = \frac{E_H}{J} = \frac{\frac{1}{ne} \frac{dB}{dJ}}{\frac{B}{\sigma}} = \frac{B\sigma}{ne} = B \cdot \mu$$

$$R_H = \frac{1}{e} \frac{n\mu_n^2 - p\mu_p^2}{\mu_n n + \mu_p p}$$

Silicijum nema najveću pokretljivost, ali je najjeftiniji. Koriste se i InSb (najbolja pokretljivost nosioca) i GaAs i InAs.

Problemi: elektrode moraju da budu savršeno simetrično postavljene da bi ovo sve važno, da ne bi bio neželjen pad napona. Predložene su konfiguracije koje su bolje od pločice : jedna od njih je ova krstasta i tu je minimizovan problem asimetrije elektroda:



Zavisnost osetljivosti od temperature se manifestuje kroz tri člana. Sa promenom temperature imamo promenu Holove konstante, koncentracije nosioca i geometrije same strukture

Definišimo osetljivost senzora u zavisnosti od temperature:

$$S = G \cdot \frac{R_H}{n(T) \cdot \mu_{eff}(T) \cdot e}$$

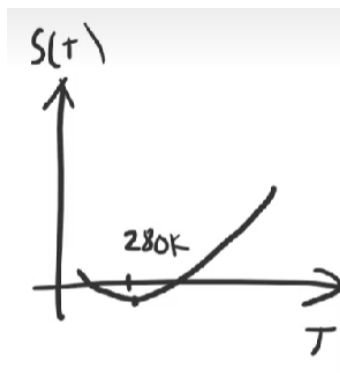
G je geometrijski faktor.

Nađimo relativnu promenu osetljivosti:

$$\frac{1}{S} \cdot \frac{dS}{dT} = \frac{1}{R_H} \cdot \frac{dR_H}{dT} - \frac{1}{n} \cdot \frac{dn}{dT} - \frac{1}{h_{eff}} \cdot \frac{dh_{eff}}{dT}$$

Promenu osjetljivosti sa temperaturom možemo učiniti da bude jednaka 0, zbog komponenti različitog znaka.

Relativna promena osjetljivosti:



Na 282K nulti uticaj temperature, pa forsirajmo senzor da radi u toj tački.

Rezolucija je bolja nego kod mikrofluksgejt senzora, reda mikrotlesa po korenu iz herca, a osjetljivosti su 100 V/AT

Holovi senzori se često koriste u konfiguraciji povratne sprege u kojoj spoljasmim kalemovima forsiramo da ukupno magnetno polje bude jednako nuli, a ta struja koja kontrira spoljašnje polje je slika i mera spoljašnjeg polja. Problem je i offset. Zbir ofseta nesavršene geometrije i ofseta u Holovom naponu. Tipični propusni opsezi 100KHz. Najznačajniji u industriji. Mali, kompaktni i jednostavni.

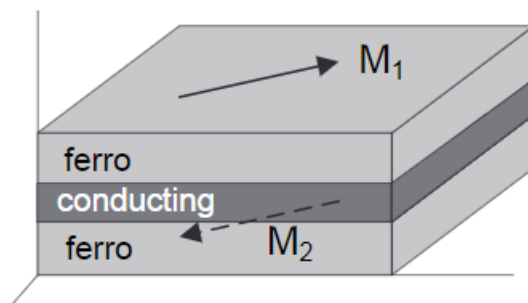
Magnetootpornik: Sam uticaj magnetnog polja na pokretljivost nosioca može da se ispituje i na druge načine. Ukoliko imamo otpornik, njegova otpornost će zavisiti od efektivne dužine kretanja nosioca. Ako primenimo magnetno polje, ono menja **efektivnu dužinu kretanja nosioca**, a samim tim menja i otpornost. Otpornik u magnetnom polju ima otpornost u funkciji od magnetnog polja.

$$l_{eff} = l \sqrt{1 + \mu^2 B^2}$$

Sa ovim senzorima ne mozemo da odredjujemo smer polja jer imamo kvadratnu zavisnost. Promena otpornosti je mnogo mala i ne prelazi 2%. **Promena otpornosti precizno meriti pomoću Vitstonovog mosta.**

Anizotropni magnetootpornici: ako naneseemo leguru gvozdja i nikla(permaloj) na provodnik ili poluprovodnik i pri tome primenimo snažno magnetno polje da bismo orijentilasi domene u permaloju(da bismo ga namagnetisali). Tada ćemo imati različit otpor u pravcu polja i upravno na polje. Ova razlika na otporu će biti nesto veća nego kod običnih magnetotpornika(2-3%). Može da meri polja do nekih 200 mikrotlesli. Reda otpornosti 2 kilooma sa skromnom osetljivošću od 10 V/VT. 10 MHz propusni opseg. Detektivnost bolja od 10 nT/Hz. Snažno spoljašnje magnetno polje može da preorijentiše domene, zato ga ne smemo izlagati istim . Precizno merimo otpornost uzpomoć Vitstonovog mosta.

Gigantska magnetootpornost(hard diskovi). Specijalna sendvič struktura:



Ispod donjeg feromagnetnog materijala imamo antiferomagnetik koji moze da bude od Mn ili NiO. Kod njega se domeni orijetnišu suprotno od smeru delovanja magentnog polja. Hladimo strukturu i *zakucamo* M_1 . U prisustvu snažnog magnetnog polja imamo **fiksnu magnetizaciju** nakon hlađenja. Ponovo ne smemo snažnim poljem da preorijentišemo domene. U prvom M_1 fiksna, a u drugom magnetizacija M_2 funkcija spoljasnjeg polja. Ovo utiče na povećanje rasejanja i kraće srednje vreme života nosioca. Za slojeva koje su do debljine 10 nm, što je manje od slobodnog puta nosilaca, promena otpornosti je velika, 10-25%, što je mnogo više od ostalih senzora. Ovo je moguće napraviti u malim dimenzijama, pa su bili super za harddiskove. Povrsina jednog senzora moze biti manja od 100 kvadratnih mikrometara. Do 150 stepeni rade. Propusni opseg 1MHz. Brzi ali veliki histerezis.

Magnetodiode su pn spojevi koji imaju nehomogeno vreme rekombinacije nosioca po poprecnom preseku. Dakle neuniformno dopirane primese po spoju. Kada primenimo magnetno polje upravno na kretanje nosioca naelektrisanja onda će i elektroni i šupljine, kad propustimo struju kroz diodu, skretati na istu stranu (kreću se u suprotnim smerovima). To je dejstvo Lorencove sile. Pošto ih prebacujemo u deo gde imaju veću ili manju brzinu rekombinacije, time menjamo broj nosioca naelektrisanja i time i otpornost diode. Radi u režimu inverzne polarizacije i dostiže osetljivost 10 V/T pri strujama od 10 mA . Propusni opseg 10 kHz . Veliki uticaj temperature i spoljašnjeg električnog polja na pokazivanje senzora. Jednostavna struktura, ali skromne karakteristike.

Magnetotranzistori su MOSFET strukture pri čemu je *drain* podeljen na dva dela. Podseća na PSD sa podeljenim anodama. U odsustvu magnetnog polja, struktura je simetrična tako da se kroz dva *drain-a* zatvaraju iste struje. Kada primenimo magnetno polje, zbog Lorencove sile na nosioce, imaćemo struju u jednom od ova dva drejna jaču nego u drugom. Zbog nestabilnosti napajanja, ukupna struja fluktuirala, pa moramo razliku te dve struje podeliti sa ukupnom strujom. Ostali parametri su veoma slični magnetodiodama.

SQUID senzori:

Osetljivi su toliko da možemo snimati signale sa ljudskog mozga ili mogu detektovati neprijateljske podmarnice. Dve uparene superprovodne konture. Superprovodnici na niskim temperaturama imaju nultu otpornost. Kada imamo dve uparene superprovodne konture, ukoliko dodje do promene polja, te konture postaju rasparne i dolazi do promene fluksa kroz kolo, stvara se unutrašnje polje koje teži da spreči tu promenu (Lencovo pravilo). Zatvorena povratna sprega. Korigujemo rasparivanje i vraćamo senzor u nultu mirnu radnu tačku. Potreban snažan Faradejev kavez.

Senzori koji se zasnivaju na nuklearnoj magnetnoj rezonanciji i Rubidijumski:

$$\vec{M} = \pm \vec{S}$$

$$\gamma = \frac{M}{L}$$

Magnetni momenat je jednak struja koja prolazi kroz konturu pomnožena sa površinom te konture. Odnos magnetnog momenta i momenta 39mpulse se naziva žiromagnetni odnos. Ako posmatramo 39mpulse u vodoniku:

$$I = ef = \frac{e\omega}{2\pi}$$

$$S = \hbar^2 \pi$$

$$M = \frac{e\omega L^2}{2} \quad L = mvr$$

Malo f označava frekvenciju kruženja elektrona oko atomskog jezgra vodonika.

$$\gamma = \frac{e}{2m} = 8,8 \cdot 10^{10} \text{ Hz}$$

Žiromagnetni odnos predstavlja prirodnu konstantu čestice. Pošto je moment impulsa u atomu kvantovan (electron ne može da se nađe na diskretnim orbitalama), kvantovana je i magnetizacija i možemo uvesti **Borov magneton**:

$$\mathbf{L} = \hbar \times \mathbf{n}$$

Za prvi mogući magnetni broj $n = 1$:

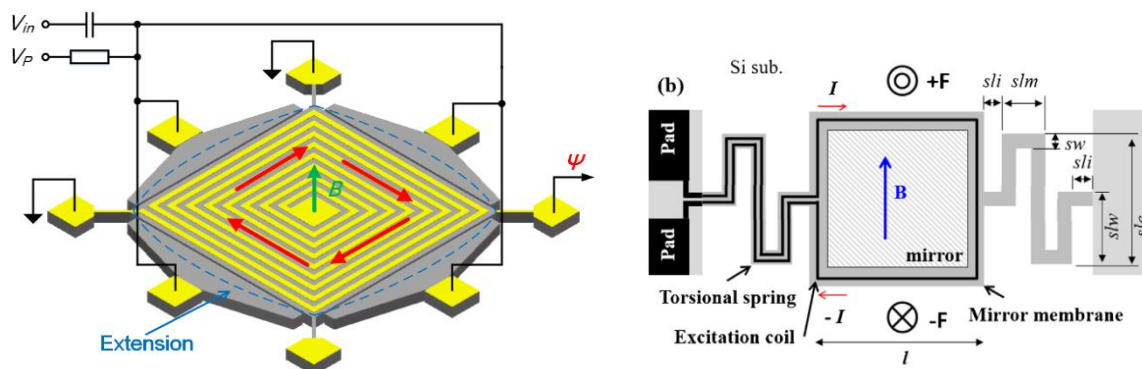
$$\mathbf{M}_B = (\hbar \times e) / 2 \times m$$

Kada primenimo magnetno polje, pošto su elektroni u atomima postavljeni na diskretnim energetske nivoima, dolazi do cepanja degenerisanih energetskih nivoa. Energetski nivoi u atomu mogu biti degenerisani (umnoženi), tj. na jednom energetskom nivou može postojati više čestica postujući Paulijev princip isključenja. Kada primenimo spoljašnju perturbaciju, magnetno ili električno polje, ovi energetski nivo se međusobno razdvajaju, i to se podrazumeva pod cepanje nivoa, znači ti nivo se razlikuju za neku malu energiju. Ovaj efekat cepanja nivoa pod dejstvom magnetnog polja naziva se **Zemanov efekat**. On postoji i u jezgri atoma i u omotaču. Ako se posmatra proton, onda se ovo naziva Nuklearna magnetna rezonancija. Ako posmatramo Zemanov efekat u atomu onda su u pitanju Rubidijumski senzori.

Princip rada: Ideja je da očitamo cepanje nivoa koje je direktno srazmerno spoljašnjem magnetnom polju. Pošto smo u stanju da veoma precizno ispitamo cepanje nivoa određivanjem rezonancije. Svaki taj energetski prelaz ima određenu rezonanciju. Rezonanta ispitivanja su veoma precizna. Pošto ispitujemo rezonanciju između pocepanih energetskih nivoa i možemo veoma precizno odrediti magnetno polje. Ovi senzori su posle SQUID senzora najprecizniji

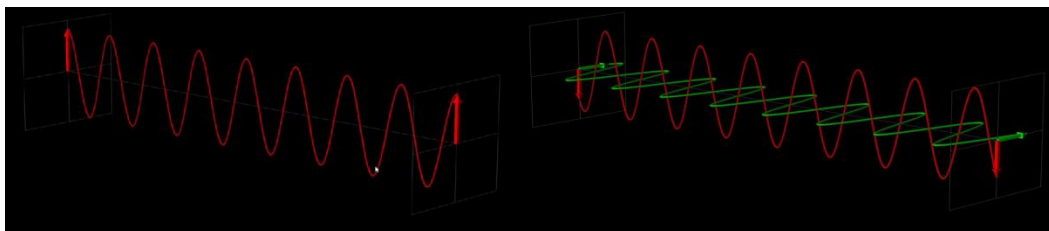
senzori. Ovi uređaji mogu da mapiraju magnetno polje unutar čoveka iz čega mogu da se izvuku razne informacije.

MEMS magnetnog polja: Veoma tanka struktura. Ako na takvu membranu napravimo provodnik i ukoliko primenimo magnetno polje upravno na ravan ove membrane, imaćemo Lorencovu silu $\mathbf{I} \times \mathbf{B}$ koja deluje na provodnike. Ta sila će dovesti do izvijanja membrane, pri čemu treba voditi računa da sama membrane ima svoju mehančku rezonantnu učestanost. Geometriju je moguće razviti na više načina. Desno je prikazana druga vrsta. Membrana gde struja ide oko membrane, a magnetno polje se nalazi u ravni membrane pa će ova Lorencova sila $\mathbf{I} \times \mathbf{B}$ da membranu pomera ka nama, odnosno od nas. Delovaće silom u pravcu upravnom na membranu. Zbog Lorencove sile dolazi do mehaničkog naprezanja membrane i sveli smo problem na to kako da očitamo tu deformaciju membrane. Možemo uz pomoć promene otpornosti linija na samoj membrani. Ako je membrana jedna ploča kondenzatora, onda će dolaziti do promene kapacitivnosti tog kondenzatora, a možemo i pomoću laserskog snopa (refleksija će zavisiti od geometrije i položaja membrane). Mali frekventni opseg, ali bolja osetljivost od Holovog senzora.

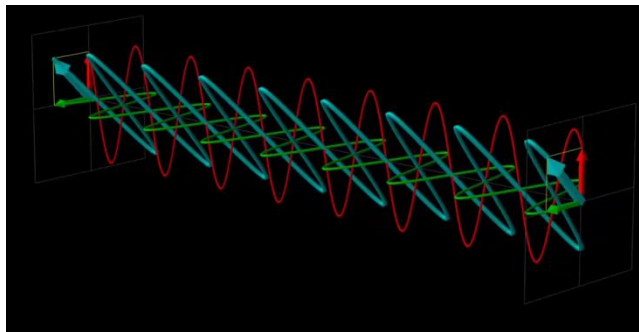


Fiberoptički senzor magnetnog polja [Mag,El,Rad]

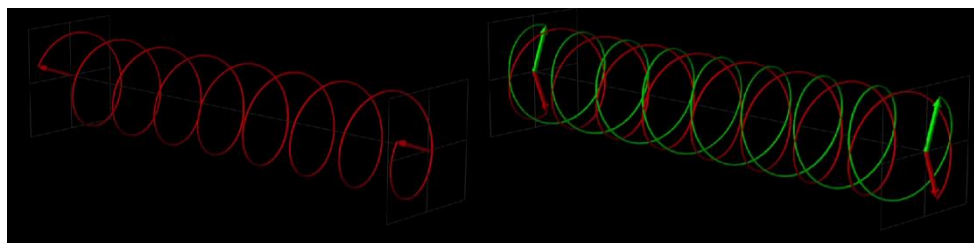
Fiberoptički senzor magnetnog polja je baziran na **Faradejevom efektu**. Moduliramo karakteristike svetlosti da bismo ispitivanjem promene svetlosti odredili magnetno polje. Faradejev efekat predstavlja rotaciju ravni polarizacije linearno polarizovane svetlosti u prisustvu magnetnog polja pri čemu je rotacija srazmerna komponentni magnetnog polja koja je paralelna pravcu prostiranja svetlosti.



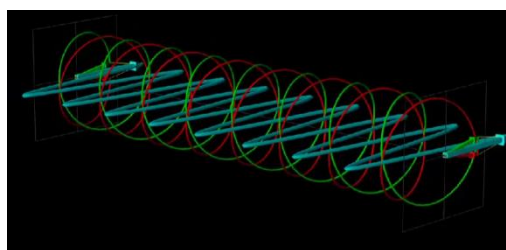
Prva slika je linearno polarizovan talas električnog dela elektromagnetnog polja (električno polje osciluje u jednoj ravni). Upravna komponenta električnog polja je potpuno nezavisna od crvene. To su dva ortogonalna polarizaciona moda. Međusobno su nezavisni. Polarizacije su im pod uglom od 90 stepeni.



Superpozicija ova dva ortogonalno polarizovana moda je ponovo linearno polarizovana svetlost. Ravan polarizacije obeležena svetlo plavom bojom. Možemo svetlost prikazati kao superpoziciju dve cirkularne polarizacije:



Cirkularna polarizacija je kada vektor električnog polja opisuje kružnicu. Dve cirkularne polarizacije daju linearnu polarizaciju ako su im amplitude jednake(plavo je njihov zbir):



U drugom slučaju (kada im amplitude nisu jednake) dobijamo eleptično polarizovanu svetlost. Koncentrišimo se na situaciju kada im jesu amplitude jednake i kada daju linearnu polarizaciju. Zamislimo sada da imamo dva ortogonalna moda cirkularne polarizacije i pretpostavimo da imamo neki kristal. Brzinom svetlosti se kreću talasi van njega, ali u zavisnosti od indeksa prelamanja, neke cirkularne polarizacije mogu da se krecu drugačijom brzinom kroz materijal. Brzina

Pomoćni energetski protok je u radijacionom domenu. Prednost je što nema uticaja spoljašnjeg elektromagnetnog polja

optičkog talasa u materijalu je brzina svetlosti podeljeno sa indeksom prelamanja materijala. Ako je veći indeks prelamanja za crvenu komponentu, zbog razlike u brzini prostiranja, došlo bi do rotiranja ravni polarizacije njihove superpozicije. Dakle, svetlost je i na ulazu i na izlazu linearno polarizovana, ali je rotirana, za neki ugao, ravan oscilovanja. Ako se ovo dešava u nekom kristalu bez dejstva polja, ova pojava se naziva optička aktivnost kristala. Još se naziva i magnetocirkularno dvojno prelamanje. Indeks prelamanja za cirkularnu komponentu clockwise nije isti kao za cirkularnu komponentu koja se kreće counterclockwise. Dakle, modulišemo polarizaciju svetlosti i time određujemo magnetno polje, pa i struju ako napravimo takvu konfiguraciju.

Zamislamo desno i levo cirkularno polarizovane svetlosti $\mathbf{E}_R$ i $\mathbf{E}_L$. Ako pretpostavimo različite indekse prelamanje sto povlači različite talasne duzine i različite talasne brojeve, kada saberemo ova dva cirkularno polarizovana talasa, dobijamo deo koji zavisi od vremena i deo koji ne zavisi od vremena, već od razlike talasnih brojeva i od duzine puta kroz aktivnu sredinu (Faradejev kristal)- ravan polarizacije je rotirana pri prolasku kroz faradejev kristal:

$$\begin{aligned}\vec{E}_R &= \frac{E_0}{2} [\vec{e}_x \cos(k_R z - \omega t) + \vec{e}_y \sin(k_R z - \omega t)] \\ \vec{E}_L &= \frac{E_0}{2} [\vec{e}_x \cos(k_L z - \omega t) - \vec{e}_y \sin(k_L z - \omega t)] \\ \vec{E} &= \vec{E}_R + \vec{E}_L \\ \vec{E} &= E_0 \left[\cos \frac{(k_R + k_L)z}{2} - \omega t \right] \left[\vec{e}_x \cos \frac{(k_R - k_L)z}{2} + \vec{e}_y \sin \frac{(k_R - k_L)z}{2} \right]\end{aligned}$$

Rotacija je srazmerna razlici u indeksu prelamanja desno i levo cirkularno polarizovane svetlosti:

Optička aktivnost

Bilo gde na putanji x i y komponente su u fazi tako da imamo linearno polarizovanu svetlost za bilo koje z .

Neka početna ravan polarizacije sadrži x osu $\vec{E}(z=0) = \vec{e}_x E_0 \cos(\omega t)$

Posle pređenog puta l kroz sredinu ravan polarizacije biti pod uglom

$$\frac{(k_R - k_L)z}{2}$$

Ravan polarizacije rotira za ugao θ u CCW smeru:

$$\theta = \frac{(k_R - k_L)l}{2} = \frac{k_0(n_R - n_L)l}{2} = \frac{\pi \cdot l}{\lambda_0}(n_R - n_L)$$

Dakle, Faradjev efekat je indukovani optički efekat koji je posledica magnetnog polja, i to komponenta magnetnog polja koja je paralelna sa pravcem prostiranja svetlosti. Jače polje će dovesti do veće rotacije ravni polarizacije. Određivanje rotacije, određuje polje koje je to uzrokovalo:

$$\theta = \int_0^l V \vec{H} d\vec{l}$$

Detektor požara: Vosak se topi i svetlost optičkog vlakna se prekida. Ne može da otkáže

Ukupan ugao rotacije biće srazmeran dužini prolaska kroz aktivnu sredinu (integral $\vec{H} \cdot d\vec{l}$). Ukoliko je polje homogeno, ugao će biti ekvivalentan sa $V^* H^* l$. Dužina faradejevog kristala je l , a V je Verdeova konstanta (karakteristika kristala).

Fiberoptički senzor struje je bezkontaktni pasivni senzor koji obuhvata provodnik i dobija vrednost struje uz pomoć magnetnog polja. Bolji je od strujnih transformatora na više načina. Nema uticaja elektromagnetnih smetnji, veliki dinamički opseg, veliki frekvencijski opseg... Nema prekida struje u odnosu na strujni transformator. Fundamentalna prednost je što kod prošlih merenja magnetnog polja smo koristili poluprovodnike i provodnike i perturbovali polje koje merimo, a to je manji slučaj kod cirkularne polarizovane svetlosti koja prolazi kroz Faradejev kristal (ali ga ipak malo namagnetišemo). Dielektrični kristal je u pitanju, zato je bolji

od poluprovodnika ili provodnika. Kod fiberoptičkih senzora svetlost je nosioc informacije, a kod običnih je, kroz bakarne žice, struja. Snažno elektromagnetno polje je promenljivo pa se u bakarnim žicama indukuje elektromotorna sila koja predstavlja poremećaj ili šum. Ovakav efekat ne postoji u optičkom vlaknu. Promenljivo elektromagnetno polje ne utiče na svetlost u vlaknu. Ovakve karakteristike su naročito bitne u elektroenergetskom sistemu. Struktura je takva da vodimo svetlost optičkim vlaknom koji je talasovod za svetlost. I samo optičko vlakno može da posluži kao senzor i tada je u pitanju **unutrašnji senzor**. Možemo svetlost da izvedemo iz vlakna i uvedemo u osetljivi deo(Faradejev kristal) pa da ga ponovo kaplujemo u vlakno. Ovo je **spoljašnji fiberoptički senzor**. Spoljašnji imaju veću modulaciju, a unutrašnji su jednostavniji. Optička vlakna su izradjena ili od stakla ili od plastike (hemijski inertni, biokompatibilni i mali). Možemo ući u ljudsko telo ili razne hemijske supstance. Sama geometrija i material daju određene prednosti. Kod svetlosti svašta možemo da modulišemo: iradijansu, frekvenciju odnosno talasnu duzinu, fazu (interferometri - najprecizniji senzori) i pravac prostiranja (metoda triangulacije - na osnovu refleksije određujemo položaj). Ne postoji ni jedan senzor koji može da otprati frekvencije svetlosti koje su reda 10^{15} Hz i zbog toga, kod svetlosti jedina stvar koju možemo da detektujemo je iradijansa. Zato treba sve ove promene zapravo pretvoriti u promenu iradijanse. Kako te prednosti da iskoristimo, kako ćemo da očitamo ovu promenu u polarizaciji? Tu nam u pomoć dolazi optička komponenta koja se zove **polarizator**. Najjednostavniji plastični. Sadrži makromolukle koji su izduženi u jednom pravcu. Ova struktura dobro može da provodi struju u pravcu u kojem su izduženi makromolekuli, a skoro ne može u pravcu koji je upravan na njih. Ukoliko prođemo sa svetlošću kroz polarizator, mi vektor električnog polja razdvajamo na dve komponente(paralelnu i upravnu na makromolekul). Paralelna komponenta je apsorbirana, a upravna na makromolekule prolazi kroz polarizator bez slabljenja. Ukoliko je ugao između ravni polarizacije svetlosti i transmisione ose polarizatora θ , I_0 iradijansa pre prolaska kroz polarizatore, ovo je definicija **Malusovog zakona**:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 \times \cos\theta$$

$$I \sim E^2$$

$$I = I_0 \times \cos^2\theta$$

On povezuje intenzitet upadne polarizovane svetlosti dobijene pomoću polarizatora s intenzitetom svetlosti propuštenom kroz polarizator. Iradijansa nakon polarizatora zavisi samo od θ .

Ukoliko mi naš Faradejev kristal postavimo između dva polarizatora, svetlost posle prvog polarizatora će biti linearno polarizovana pa će ravan polarizacije rotirati za ugao srazmeran magnetnom polju(Faradejev ugao) i konačno pomoću **analizatora** (polarizatora na izlazu) mi

ćemo promenu polarizacije da konvertujemo u promenu iradijanse. Pretpostavimo da je transmisiona osa analizatora u odnosu na transmisionalnu osu polarizatora, postavljena pod uglom φ . Na izlazu imamo fotodiodu povezanu na transimpednansni stepen, ona daje fotostruju srazmernu iradijansi svetlosti. Ovde vidimo kakva je zavisnost fotostruje od ugla:

Optička mirna radna tačka gde je osetljivost najveća

Modulacija stanja polarizacije se pretvara u modulaciju iradijanse svetlosti po Malusovom zakonu.

$$I_{PH} = k\Gamma_0 \cos^2(\varphi + V B_{\parallel} L) = k\Gamma_0 (1 + \cos(2\varphi + 2V B_{\parallel} L))/2$$

$$dI_{PH}/dB = -k\Gamma_0 V L \sin(2\varphi + 2V B_{\parallel} L)$$

$$d^2 I_{PH}/dB d\varphi = -2R\Gamma_0 V L \cos(2\varphi + 2V B_{\parallel} L) = 0$$

$$2\varphi + 2V B_{\parallel} L = \pi/2 = 90^\circ \quad V B_{\parallel} L \ll \varphi \Rightarrow \varphi = \pi/4 = 45^\circ$$

$$I_{PH}(B) = k\Gamma_0 (1 + \cos(\pi/2 + 2V B_{\parallel} L))/2 = k\Gamma_0 (1 - \sin(2V B_{\parallel} L))/2$$

$$\delta = (I_{PH}(B=0) - I_{PH}(B))/I_{PH}(B=0) = \sin(2V B_{\parallel} L)$$

Prenosna funkcija je nelinearna!

Mi želimo da maksimizujemo promenu fotostruje sa promenom ugla φ . Određivanje mirne radne tačke, odnosno postavljanje optičke mirne radne tačke na mesto maksimuma osetljivosti je naš cilj. Mi ne želimo da maksimizujemo fotostruju, nego promenu fotostruje sa magnetnim poljem. Izvod fotostruje po polju diferenciramo po uglu φ da bismo dobili optimalni ugao φ koji će nam dati optimalnu osetljivost. U praksi faradjevi kristalu su takvi da je VBL uticaj prilično slab, retko kada prelazi 1 stepen, čak i za ozbiljnija polja (pedesetak militesli). Optimalna radna tačka je da su transmisione ose polarizator i analizator pod uglom od 45 stepeni za maksimalnu osetljivost. Imaćemo sinusnu prenosnu karakteristiku, a ona ima najveći izvod u okolini nule.

Problem: naš izlaz zavisi od iradijanse svetlosti svetlosnog izvora. Svi svetlosni izvori fluktuiraju po intenzitetu. Ta promena nas potpuno onemogućava da vršimo merenja. Treba da potisnemo taj uticaj. Rešavanje tog problema se zove **normiranje**. Izmerićemo fotostruju u odsustvu polja, pa ćemo je izmeriti u prisustvu, oduzmemo prvu od druge, i podelimo sa prvom, čime ćemo

dobiti $\sin(2vbl)$ i to ćemo da normiramo sa strujom u odustvu polja. Ovako formiran izraz daje prenosnu karakteristika sinusnu. Pri čemu je uklonjena iradijansa svetlosti.

Kako od senzora struje pravimo senzor magnetnog polja? Moramo imati **koncentrator** koji će potisnuti uticaj svih provodnika osim provodnika čiju struju želimo da merimo. **Merna glava** mora da bude **pasivna** (bez napajanja i elektronski sklopova), **prenosna** (da bi montirali bez prekida dalekovoda), da **sprečava preslušavanje, omogućiti ispravno normiranje** i obezbedi **što veću moguću modulaciju signala**. Merna glava je magnetno kolo sa procepom u kom možemo da smestimo faradejev kristal i ostale optičke komponente i učinimo da se to magnetno kolo može otvoriti. Spoljašnji senzor je u pitanju jer vlakna služe samo da dovedemo svetlost do osetljivog dela i nakon modulacije da svetlost vratimo do elektronskog sklopa za obradu signala.

Merna glava spoljašnjeg fiberoptičkog senzora struje:



Magnetno kolo koje služi kao koncentrator koje povećava magnetno polje na mestu gde se nalazi Faradejev kristal. Magnetno polje koje uzrokuje ovaj provodnik bi bilo manje da nema feromagnetnog materijala. Ako želimo da merimo struju koja potiče od provodnika moramo da potisnemo magnetno polje koje potiče od svih ostalih provodnika struje. Amperov zakon kaže da je integral Hdl po ovoj zatvorenoj putanji unutar koncentratora jednak ukupnoj struji koja prolazi kroz magnetno polje, pod uslovom da je Verdeova konstanta ista u celom Faradejevom kristalu. Jedan provodnik će dati struju I , ako imamo više namotaja biće NI . Ukupan ugao Faradejeve rotacije će biti Verdeova konstanta puta struja koja prolazi kroz kolo. Gubimo, ubacivanjem feromagnetnog materijala, linearnost i uvodimo histerezis.

Ako uklonimo koncentrator, imamo senzor magnetnog polja

Zbog toga se opredeljujemo za meke feromagnetne materijale koji imaju **uzak histerezis**(manji gubici).

Princip rada: Ide struja kroz provodnik i stvara magnetno polje u okolnom kolu, na Faradejevom kristalu uz pomoć polarizatora pre i analizatora posle (čije su transmisione ose pod uglom od 45 stepeni) se polarizacija svetlosti koja je dovedena optičkim vlaknom rotira i time je informacija o magnetnom polju upisana u svetlosti koja je intenzitetski modulirana i odvodi se drugim optičkim vlaknom do kutije sa elektronikom za procesiranje signala.

3. Električni Domen

$$\begin{aligned} \text{rot } \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} & \text{div } \vec{D} &= \rho \\ \vec{D} &= [\epsilon] \vec{E} & \vec{D} &= \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \\ \text{У ВАКУУМУ:} & & \vec{E} & \text{ има изворе и поноре} \\ \text{div } \vec{E} &= \frac{\rho}{\epsilon_0} & & \\ \text{ПОСЛЕ ДИЕЛЕКТРИКА:} & & U_{AB} &= \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{l} \\ & & \vec{D} &= [\epsilon] \vec{E} \end{aligned}$$

ϵ je "конфигурацион" права појединачна за $\vec{B}$

Gausov zakon koji kaže da je divergencija vektora dielektričnog pomeraja jednaka obuhvaćenom naelektrisanju nam govori da električno polje ima izvore i ponore. Izvori električnog polja su pozitivna naelektrisanja, a ponori negativna naelektrisanja. Električno polje je takodje i posledica promenljivog magnetnog polja. Ukoliko u njega unesemo dielektrik, dovešće do polarizacije dielektrika (razdvajanje naelektrisanje) i veza između vektora dielektričnog pomeraja i električnog polja i vektora polarizacije je data ovde. U najopštijem slučaju u pitanju je tenzor (vektor dielektričnog pomeraja ne mora biti paralelan sa vektorom električnog polja). U izotropnim sredinama jeste paralelan. Ukoliko u njega unesemo provodnik, posledica je kretanje naelektrisanja, odnosno struja. U zavisnosti od provodnosti materijala menjaće se i

intenzitet struje za isto električno polje. Napon je posledica elektricnog polja. Često se ne meri električno polje, nego struja i napon. Kapacitivnost je konkretator elektricnog polja. Jedinica električnog polja je V/m. Linije električnog polja se nikad ne seku. Linije polja su upravne na površinsko naelektrisanje. Električno polje unutar metala je nula. Ako poznajemo električno polje, lako dolazimo do napona.

Interferometrija koristi princip superpozicije za kombinovanje talasa na način koji će uzrokovati da rezultat njihove kombinacije ima neku smislenu osobinu iz koje se može dijagnosticirati prvobitno stanje talasa. Ovo funkcioniše, jer kada se dva talasa sa istom frekvencijom spoje, rezultujući patern intenziteta je određen faznom razlikom između dva talasa - talasi koji su u fazi će biti podvrgnuti konstruktivnoj interferenciji, dok će talasi koji su van faze pretrpeti destruktivnu interferenciju. Talasi koji nisu u potpunosti u fazi, niti su potpuno van faze, imaju obrazac srednjeg intenziteta, koji se može koristiti za određivanje njihove relativne fazne razlike. Većina interferometara koristi svetlost ili neki drugi oblik elektromagnetnog talasa. Najpreciznija metoda merenja gde poredimo razlike u optičkoj dužini puta dva svetlosna talasa na nivou talasne dužine.

Fiberoptički senzori naizmeničnog napona i električnog polja:

Kao što možemo iz magnetnog polja da saznamo struju koja ga uzrokuje, tako možemo da saznamo iz električnog polja napon koji ga uzrokuje.

Osnova rada ovog fiberoptičkog senzora je **Pokelsov efekat** koji poseduju neki kristali. Spoljanšnje primenjeno električno polje dovodi do promene tenzora dielektrične impermeabilnosti. To dovodi do promene indeksa prelamanja za dve linearno polarizovane komponente (dvojno prelamanje):

$$\Delta\eta = \Delta\left(\frac{1}{n^2}\right) = rE + sE^2$$

η - tenzor impermeabilnosti; r - linearni elektrooptički koeficijent
 s - kvadratni elektrooptički koeficijent

Kao kod Faradejevog efekata, promeniće se polarizacija svetlosti. Dvojno prelamanje je uzrokovano električnim poljem. Linearno polarizovana svetlost zbog Pokelsovog efekta postaje eliptično polarizovana svetlost. Iz polarizacije se određuje električno polje koje je uzrokovalo promenu indeksa prelamanja. Ukoliko je linearna promena indeksa prelamanja po električnom polju u pitanju je Pokelsov efekat (r različito od nule), a ako je u pitanju kvadratna zavisnost onda je to Kerov efekat (r jednako nula).

Zbog promene indeksa prelamanja dolazi do stvaranja fazne razlike izmedju dva zraka medjusobno upravnih linearnih polarizacija (različite optičke dužine).

$$\Delta\varphi = \varphi_e - \varphi_o = \frac{2\pi L}{\lambda_0} [n_e(\theta) - n_o].$$

L – dužina kristala;

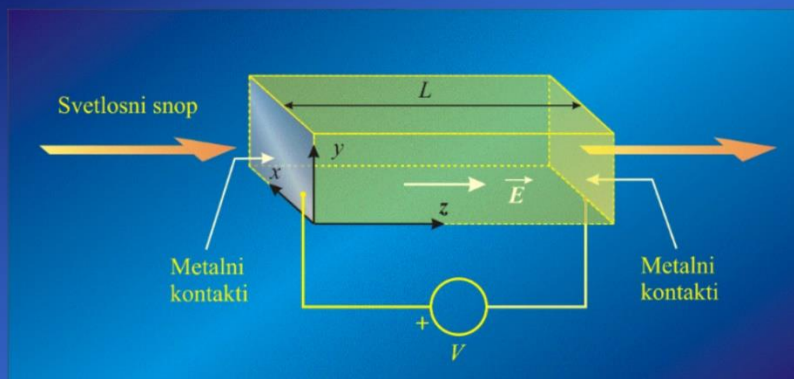
λ_0 – talasna dužina svetlosti;

$n_e(\theta)$ – indeks prelamanja za neredovni zrak;

n_o – indeks prelamanja za redovan zrak

Moguće je Pokelsov senzor napraviti u dve postavke. U longitudinalnoj postavci, svetlost putuje paralelno s električnim poljem. Tada moramo imati transparentne elektrode ili elektrode koje imaju šupljine koje dozvoljavaju da kroz Pokelsov kristal propustimo svetlost.

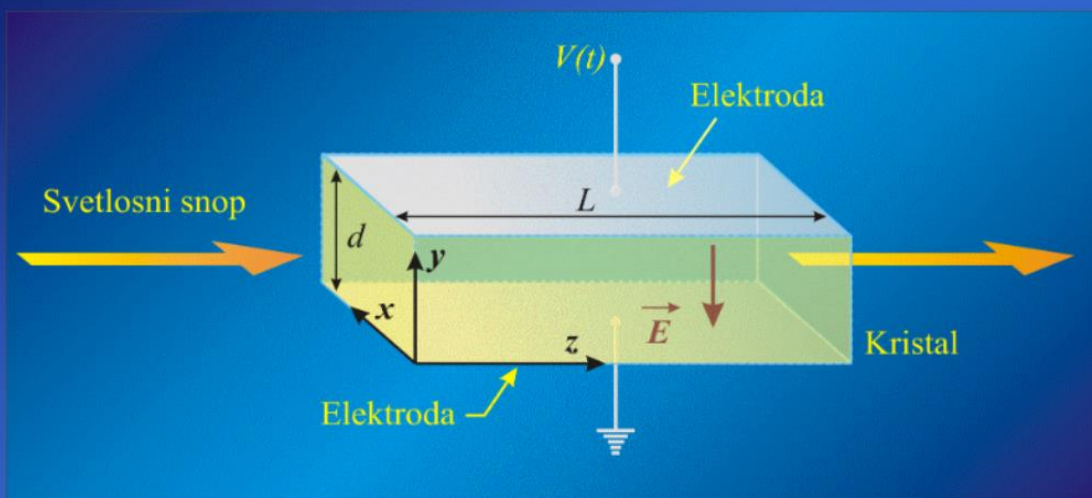
Longitudinalna elektrooptička modulacija



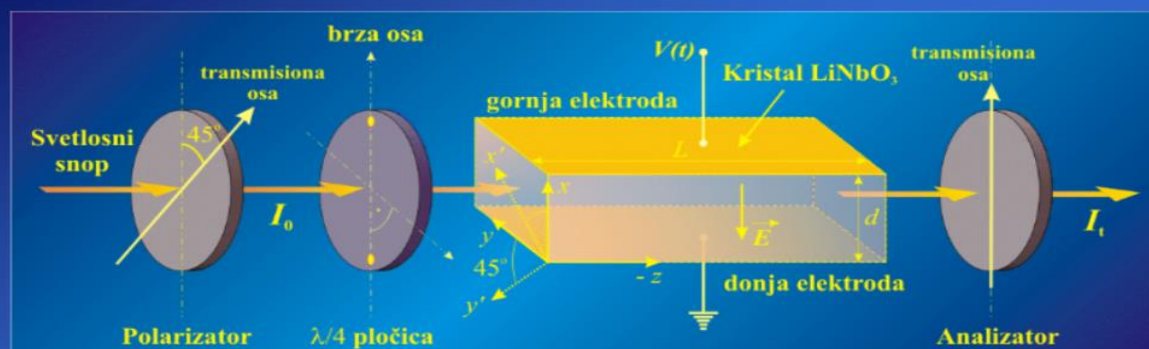
- Električno polje se primenjuje duž pravca prostiranja svetlosti
- Potreba za transparentnim elektrodama

Česća je transversalna elektrooptička modulacija gde nam je sad električno polje transversalno tj. upravno na svetlosni snop. Ti kristali moraju da budu sečeni na određen način, tj. moramo sa svetlošću da udjemo upravno na određene kristalografske ravni da bismo dobili maksimalni efekat. Kada električno polje primenimo transversalno može se pokazati da u takvoj konfiguraciji dobijamo izlaz koji je analogan prenosnoj funkciji koju smo imali kod Faradejevog senzora.

Transverzalna elektrooptička modulacija



Transverzalna EO modulacija sa kristalom LiNbO_3



Princip rada: Linearno polarizovanu svetlosto propuštamo kroz **lambda četvrtinsku pločicu** (ona pravi faznu razliku između dve međusobno upravne svetlosne komponente od $\pi/2$). Sada, kada imamo dve linearne polarizacije sa faznom razlikom od 90 stepeni, njihova superpozicija je cirkularno polarizovana svetlost (cirkularna je superpozicija dve linearne polarizacije sa faznom razlikom od $\pi/2$). Kada ubacimo Pokelsov kristal, i pod dejstvom električnog polja, menja se indeks prelamanja. Kreću se različitim optičkim dužinama, i imamo na izlazu eliptičnu polarizaciju (nesavršena cirkularna polarizacija). Pošto ne možemo da pratimo direktno polarizaciju, postavljanjem analizatora, pretvaramo tu modulaciju stanja polarizacije u modulaciju intenziteta svetlosti. Ako posmatramo po transmisionih osi analizatora iradijansu, ona će zavisiti od orijentacije izduženosti te elipse. Pomoću analizatora saznajemo koliko se polarizacija svetlosti promenila.

Intenzitet svetlosti I_t propuštene kroz analizator:

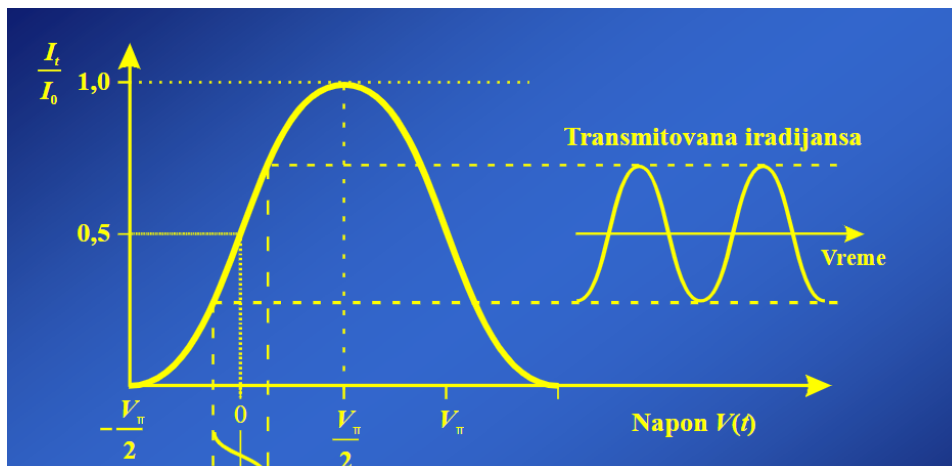
$$\frac{I_t}{I_0} = \frac{1}{2} [1 + \sin(aV(t))]$$

I_0 – intenzitet upadne svetlosti
 $V(t)$ – napon između elektroda

Prenosna funkcija je ponovo istog oblika. Sa ovakvom prenosnom funkcijom imamo ograničenje mernog opsega. U jednom trenutku napon će da dostigne **polutalasnu vrednost napona**. Od nekog trenutka nećemo imati monoton izlaz. Ponavljaće se za sve veća polja. Napon za koji je $a \cdot V$ jednako pi, se zove polutalasni napon. Ponovo je potrebna normalizacija svetlosti zato što izlazni signal zavisi od iradijance svetlosnog izvora i opet imamo sinusnu zavisnost (nelinearni odziv). Konstanta a je zapravo karakteristika materijala i recipročna vrednost od a je polutalasni napon. Može se zapisati ovaj izraz ovako:

$$\frac{I_{out}}{I_{in}} = \frac{1}{2} \left[1 + \sin \left(\pi \frac{V(t)}{V_{\pi}} \right) \right]$$

Polutalasni napon je najveći napon za koji zadržavamo monotonost:



Ako predjemo polutalasni napon nemamo više monotonost. Merni opseg ovog senzora je određen tim naponom. Sam polutalasni napon zavisi od debljine kristala, a ne dužine. Kod transversalne elektrooptičke modulacije zavisi od debljine kristala. Možemo kontrolisati merni opseg debljinom kristala.

$$V_{\pi} = \frac{\lambda_0 d_M}{2Ln_o^3 r_{22}}$$

gde je d debljina.

Povećavanje mernog opsega smanjuje osetljivost.

Obavezna kompenzacija temperature.

Thz detektori – Možemo meriti električno polje pomoću Pockelsovog efekta. Ovo je optički efekat koji ima brzo vreme odziva. Na ovaj način merimo električno polje koje je brzopromenljivo i može se primenjivati u vidu detektora elektromagnetnog zračenja u terahercnom domenu.

Fiberoptički senzor na bazi piezoelektričnog efekta. Piezoelektrični efekat: u električnom polju dolazi do deformacije materijala (sredina se polariše i električno polje na izdvojena pozitivna i negativna naelektrisanja dovodi do deformacije). Važi i obrnuto. Kristal kvarca je piezoelektrični materijal i ukoliko namotamo optičko vlakno oko kristala kvarca i unesemo ga u električno polje onda ćemo moći da napravimo interferometer jer se isteže optičko vlakno. Na osnovu toga što će svetlost proći različitu dužinu puta u odnosu na situaciju kada nema istezanja. Interferometrom merimo razliku u optičkoj dužini puta. Prednost što su interferometri precizni, ali mana je unet kristal kvarca i njegova mehanička rezonancija će nam ograničiti frekvencijski opseg.

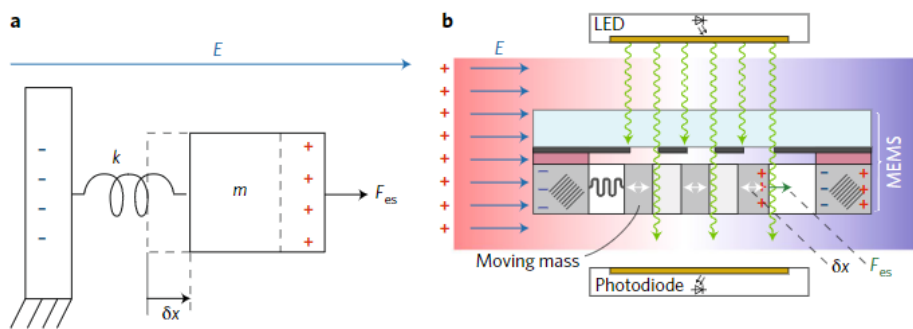
MEMS Senzori Električnog Polja:

Mems senzori električnog polja su mali i zbog toga neperturbuje mnogo polje i može da se napravi i u vidu kamere. Kad bi imali matricu ovih senzora imali bi kameru električnog polja.

Dva ovakva senzora su opisana ovde. Sledi princip rada prvog:

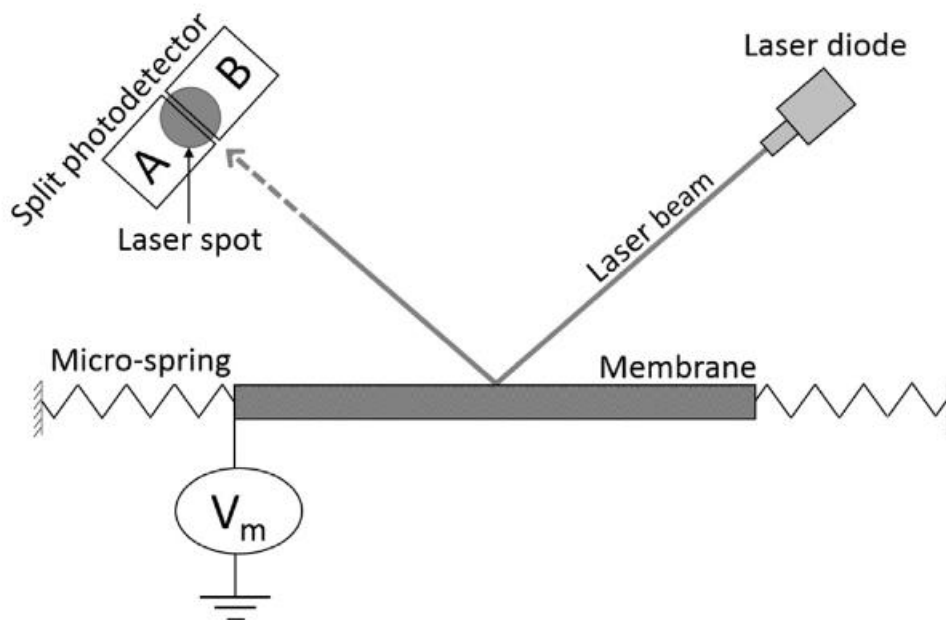
Princip rada: Ako imamo dielektrik koji se nalazi na opruzi i ukoliko bi ta opruga bila provodna i povezana sa drugim materijalom, onda prilikom unošenja ove strukture u električno polje doći će do polarizacije materijala i električno polje na pozitivna naelektrisanja deluje silom na desno na negativna deluje silom na levo. Pretpostavimo da je postolje učvršćeno. Zbog dejstva sile na pozitivna naelektrisanja doći će do istezanja opruge. To istezanje Δx je srazmerno kvadratu električnog polja. Istezanje opruge se očitava optički. U ovom slučaju da bi zadržali prednost male količine provodnika u električnom polju, očitava se pomeraj na sledeći način. Iznad ove

strukture koja se pomera nalazi se jedna matrica transparentnih i netransparentnih područja. Iznad te matrice mozemo dovesti led diodu ili optičko vlakno. Sa druge strane ove strukture mozemo dovesti fotodiodu ili optičko vlakno sa kim bismo odveli signal. Kada deluje električno polje rešetka se pomera i ova rešetka sada postaje neuparena sa ovom rešetkom koja se nalazi iznad nje i svetlost počinje da prolazi. Ukoliko više svetlosti prodje na diodu to je električno polje više pomerilo strukturu:



Količina svetlosti koja na kraju prodje, a koja je funkcija pomeraja delta x je srazmerna kvadratu električnog polja. Imamo senzor intenziteta polja, ne mozemo odrediti smer polja.

MEMS ACDC senzor sa modulisanom osetljivošću. Ekstenzija prošlog principa. Ovde električno polje dovodi do mehaničkog pomeranja neke strukture i treba da očitamo to mehaničko pomeranje. To očitavanje može da se uradi i uz pomoć membrane koja se pomera pod dejstvom polja, ali pomeraj ispitujemo triangulacijom. Pomoću laserke svetlosti gledamo gde pada reflektovana tačka. Gde će on pasti na reflector zavisi od pozicije membrane. Time određujemo električno polje koje je uticalo na tu membranu.



1.4. Temperaturski Domen

Temperatura je mera srednje kinetičke energije čestica. Sve čestice se kreću i njihove kinetičke energije učestvuju u ukupnoj energiji sistema. Količina toplote predstavlja energiju. Razmenjena količina toplote jednaka je masi objekta puta specifičnoj toploti objekta i puta promena temperature.

Handwritten notes showing the relationship between heat transfer and temperature change. The main equation is $dQ = mc dT$. Above it, $\propto S|T - T_0|$ has an arrow pointing to dQ . Below it, $\propto \gamma_{\text{grad}} dT$ has an arrow pointing to dQ . To the right, two arrows point down to dT . Below the main equation, $SEET^4$ has an arrow pointing to dQ .

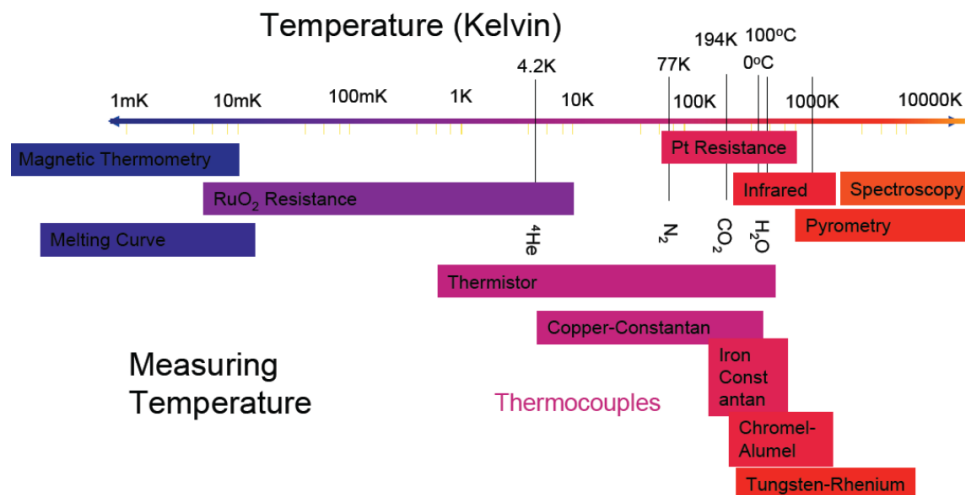
Ukoliko je dQ pozitivno, telo se zagreva. Ukoliko je negativno, predaje energiju okolini. Za razliku od gasova, čvrsta tela veoma malo menjaju svoje dimenzije sa promenom temperature. Tako da je rad koji tela vrše ka okolini približno jednak nuli. Imamo po zakonu termodinamike koji je zapravo zakon održanja energije:

Handwritten equation for the first law of thermodynamics: $dQ = dA + dU$.

Rad u odnosu na okolinu plus promena unutrašnje energije. Ako je rad jednak nuli onda je sva količina toplote koja predajemo telu odlazi na povećanje unutrašnje energije tela što je ukupna kinetička energija svih čestica od kojih se telo sastoji. Koji su mehanizmi prenosa toplote:

Kondukcija(kroz čvrsta tela – srazmeran je gradijentu temperature odnosno razlici u temperaturi i koeficijentu koji zavisi do materijala), konvekcija(sa fluida na čvrsta tela – sve zavisi od površine(sto je već adodirna površina, veci prenos toplote) zavisi od konstante koja zavisi od fluida ai čvrstog materijala i zavisi od razlike temperature između čvrstog materijala i fluida.Treci prenos je zracenje(sva tela na svakoj temperaturi zrace em talase spektar je odredjen plankovim zakonom zracenja a ukupna iradjansa zracenja je odredjena stefan bolcmanovim zakonom) Povrsina puta emisivnost tela puta konstanta stefana i puta T na 4.

Smesa vode i leda ce uvek biti na 0 stepena pod normalnim pritiskom zato sto sve dok se sav led ne otopi, smesa ce biti na 0 ili dok se ne zaledi:



Na veoma visokim temperaturama mozemo koristiti em zracenja koje telo izraci da bismo dobili temp tela. Na niskim temperaturama izraceni deo energije je veoma mali i koristicemo druge principe. Posto je sve zavisno od temperature, mozemo da napravimo termometar na mnogo nacina:

Kontaktni:

Na bazi širenja tečnosti – npr. Živin toplomer. Veoma predvidljivo širenje

Gasni – jednačina stanja idealnog gasa: $pV = nRT$

Bimetalni – Koriste osobinu metala da različiti metali imaju različite koeficijente širenja sa temperaturom. Ako spojimo dve žice od bakra I gvoždja, zbog promene temperature I različite promene dimenzija, dolazi do naprezanja, I to do deformacije koja može da se meri.

$$c = \sqrt{\gamma \frac{R}{M} T}$$

Akustički - - brzina zvuka u vazduhu

Ovo su bili pretvarači, a senzori:

$$u_{eff} = \sqrt{4kRT}$$

Otporni(termistori), termoparovi, na bazi šuma

Kvarcni – kvarc osciluje na sopstevnoj rezonantnoj ucestanosti koja je funkcija temperature,

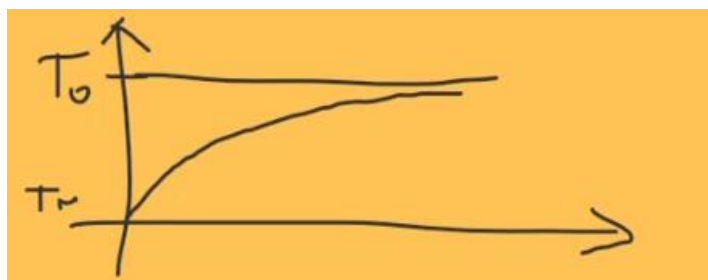
Poluprovodnicki I fiberopticki

Na bazi šuma – na bilo kom otporniku ciji su krajevi slobodni, ukoliko merimo napon, videcemo da zbog šuma, na krajevima ima napon u_{eff} .

Termodinamički termometri, njima ne treba kalibracija, jer u njihovoj prenosnoj funkciji figurisu samo konstante i veličine koje se mogu meriti apsolutno. (ovi sa jednačinama ispisani).

Jedini beskontaktni termometar je onaj koji je baziran na radijacionoj termometriji. Na višim temperaturama on odgovara jer tela zrače više u elektromagnetnom spektru.

Termometar meri sopstvenu temperaturu. Termometar mora da udje u termodinamičku ravnotežu sa telom koje meri da bi je izmerio. Dakle, kada resavamo jednačinu prenosa toplote, sa leve strane se javlja razlika temperature termometra i okoline, a sa desne strane dT promena temp termometra, dobićemo diferencijalnu jednačinu prvog reda i tako su dobro modelovane karakteristike termometra.



Vremenska konstanta zavisi od mase termometra. Termometar brže ulazi u termodinamičku ravnotežu i imaćemo širi frekvencijski opseg.

Kapacitivni merač za niske temperature. Koristi se osobina da imamo jako dobru zavisnost epsilon od temperature. Glavna prednost (20mK – 100K) nulta zavisnost merenja od magnetnog polja.

Kvarcni termometri. Koriste se u opsegu 47K do 435K. Imaju rezoluciju 10 na minus 2 kelvina. Jaku dobru osetljivost reda 1000 HZ/K. U oscilatornim električnim kolima Kristal kvarca koristi za stabilizaciju frekvencije oscilovanja. Ima sopstvenu mehanicku rezonantnu učestanost. On daje takt signala. Pošto je piezoelektričnim efekat zavisi od temperature, imamo situaciju da nam frekvencija oscilovanja zavisi od temperature. Na osnovu promene frekvencije oscilovanja možemo da merimo temperaturu. Velika prednost ovog načina merenja, šum ne igra ulogu, elektromagnetna indukcija ne igra nikakvu ulogu. Ne merimo naponski signal. Mana, veoma skupo.

Otporni za niske temperature (RTD) (14 mK)

Rutenium oksid (<50mK – 40K) za veoma niske temperature, veliku osetljivost na niskim temp(ne smemo ga pregrijati), i malo utice magnetno polje na njega(magnetno polje može da utice na otpornost). Opada sa temperaturom vrednost. Moramo da pazimo na zagrevanje samog otpornika. Problem naprezanje. Važi za sve. Problem korozija.

Platinski termometar – Veoma velik opseg temperature do koje može da radi. Hladjenje mora da se vrši postupno ako se koristi na visokim temperaturama (može doći do promene otpornosti na temperature od 0 celzijusa ako brzo to radimo). Velika ponovljivost. Raste sa temperaturom

Zamenljivost jako bitna, da ne moramo kalibrisati ako zamenimo jedan senzor drugim.

Moraju biti usidreni sa temperaturom. Ne smemo imati gradijent na spoju otpornika i žica, da se ne bi stvorio napon po Zebekovom efektu.

RTD se menjaju linearno sa temperaturom otprilike.

Uz pomoć dve redne diode merenje temperature:

Jednačina diode:

$$I = I_0 \left(e^{\frac{qV}{nKT}} - 1 \right)$$

Napon na njoj:

$$V = \frac{nKT}{q} \ln \left(\frac{I}{I_0} + 1 \right)$$

Ako vezemo dve diode redno i oduzmemo im napone:

$$\Delta V = \frac{nKT}{q} \ln \frac{\frac{I_1 + I_{01}}{I_{01}}}{\frac{I_2 + I_{02}}{I_{02}}}$$

Pošto je redno vezana dioda, $I_1 = I_2$, pa, s obzirom da je $I \gg I_0$:

$$\Delta V = \frac{n k T}{q} \ln \frac{I_{02}}{I_{01}}$$

Ako načinimo da se diode samo razlikuju po površini, i to da je površina jedne (gornje u izrazu) diode veća N puta od druge:

$$\Delta V = \frac{n k T}{q} \ln N$$

Time smo dobili da nam **fluktuacije** struje ne utiču na merenje temperature. Temperaturu merimo. Diode nisu preporučljive gde ima mnogo zračenja i snažno magnetno polje jer menjaju karakteristike diode.

Na visim temperaturama želimo veću osetljivost (temperature u svakodnevnom zivotu) od -20 do 100 stepeni. Za njih možemo termistore da koristimo. Menja se nelinearno.

$$\begin{aligned} \rightarrow NTC &= R_{\infty} e^{\frac{B}{T}} \\ \rightarrow PTC &= A e^{B(T-T_0)} \end{aligned}$$

Primer, ukoliko posmatramo niskodopirani silicijum, njegova provodnost će da raste u ospegu temperature dok se svi donori ne jonizuju, a zatim će sa daljim porastom temperature da provodnost opada do tačke kada ne počne jonizacija i atoma silicijuma u kristalnoj rešetci kada otpornost ponovo počinje da raste. Pozitivni deo krive neće postojati u svim oblastima temperature, već samo u delu krive. Dzulovi gubici moraju biti uracunati da bismo dobili temperature okoline. Posmatra se temperaturski koeficijent otpornosti koji predstavlja relativnu promenu otpornosti sa temperaturom, tj. određuje osetljivost:

$$\alpha = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT}$$

Vecu osetljivost, ali manju ponovljivost od RTD. Što je veća osetljivost, to su spoljašnji uticaji manji.

3. (20) Pokazati (izvođenjem) da za termistor važe relacije:

$$\rightarrow \ln \frac{R_a}{R_i} = \frac{T_i}{T_a} \quad \text{i} \quad \alpha_i (T_a - T_i) = 1,$$

NTC

gde su: R_i – otpornost termistora na temperaturi T_i ($i=1$ maksimum napona, $i=2$ minimum na statičkoj U-I karakteristici termistora); T_a – temperatura okoline; R_a – otpornost termistora na T_a ; α_i – temperaturni sačinilac otpornosti termistora za T_i .

a) Naći izraze za T_1 i T_2 kada je T_a poznato.

b) Do koje temperature $T_{a \max}$ će postojati navedeni ekstremumi?

c) Objasniti postupak izrade termistora i navesti materijale od kojih se izrađuju.

$$R(T) = R_a e^{B(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_a})} \quad / \quad \frac{d}{dT}$$

$$\frac{dR}{dT} = R_a e^{B(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_a})} \cdot \frac{B}{T^2} (-1)$$

$$\frac{dR}{dT} = \underbrace{R_a e^{B(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_a})}}_{R(T)} \cdot \frac{B}{T^2} (-1)$$

$$\underbrace{\frac{1}{R} \frac{dR}{dT}}_{\alpha} = - \frac{B}{T^2}$$

Kako zaraditi ba k e:

$$\hookrightarrow P = \frac{U^2}{R} = \underbrace{\alpha_k S_k}_{k} (T - T_a)$$

$$U^2 = k R (T - T_a) \quad / \quad \frac{d}{dT}$$

$$2U \frac{dU}{dT} = k \frac{dR}{dT} (T - T_a) + k R$$

$$\left. \frac{dU}{dT} \right|_{T_i} = \phi$$

$$\frac{dR}{dT} = \frac{-R}{(T_i - T_a)}$$

$$\frac{1}{R} \frac{dR}{dT} = \frac{1}{T_a - T_i}$$

$$\hookrightarrow \alpha (T_a - T_i) = 1$$

$$\alpha = \frac{1}{T_a - T_i} = - \frac{B}{T_i^2}$$

$$\hookrightarrow B = \frac{T_i^2}{T_i - T_a}$$

$$T_i \rightarrow R_i = R_a e^{B \left(\frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_a} \right)}$$

$$R_i = R_a e^{\frac{T_i^2}{T_i - T_a} \cdot \frac{T_a - T_i}{T_i T_a}}$$

$$\frac{R_i}{R_a} = e^{-\frac{T_i}{T_a}} / \ln$$

$$\ln \frac{R_i}{R_a} = - \frac{T_i}{T_a}$$

$$\ln \frac{R_a}{R_i} = \frac{T_i}{T_a}$$

$$(*) \rightarrow T_i^2 = B(T_i - T_a)$$

$$T_i^2 - B T_i + B T_a = \phi$$

$$T_{i,1,2} = \frac{+B \pm \sqrt{B^2 - 4B}}{2}$$

$$B^2 > 4BT_a$$

$$T_{a_{max}} < \frac{B}{4}$$

Termistori popularni na sobnim temperaturama.

Termoparovi su za veće temperature. Brz odziv i jednostavni po konstrukciji. Negativno: nizak nivo izlaznog signala i moguće oštećenje na visokim temperaturama.

Spoj dva provodnika različita i osnova njihovog rada je Zebekov efekat. Kada spojimo dva provodnika različite temperature, postojeće termoelektrični efekat razlike potencijala između ova dva metala:

$$E = - \int_l S(T, l) \overrightarrow{\nabla T} d\vec{l}$$

dužini provodnika.

*treba da piše dl jer se vrši integracija po

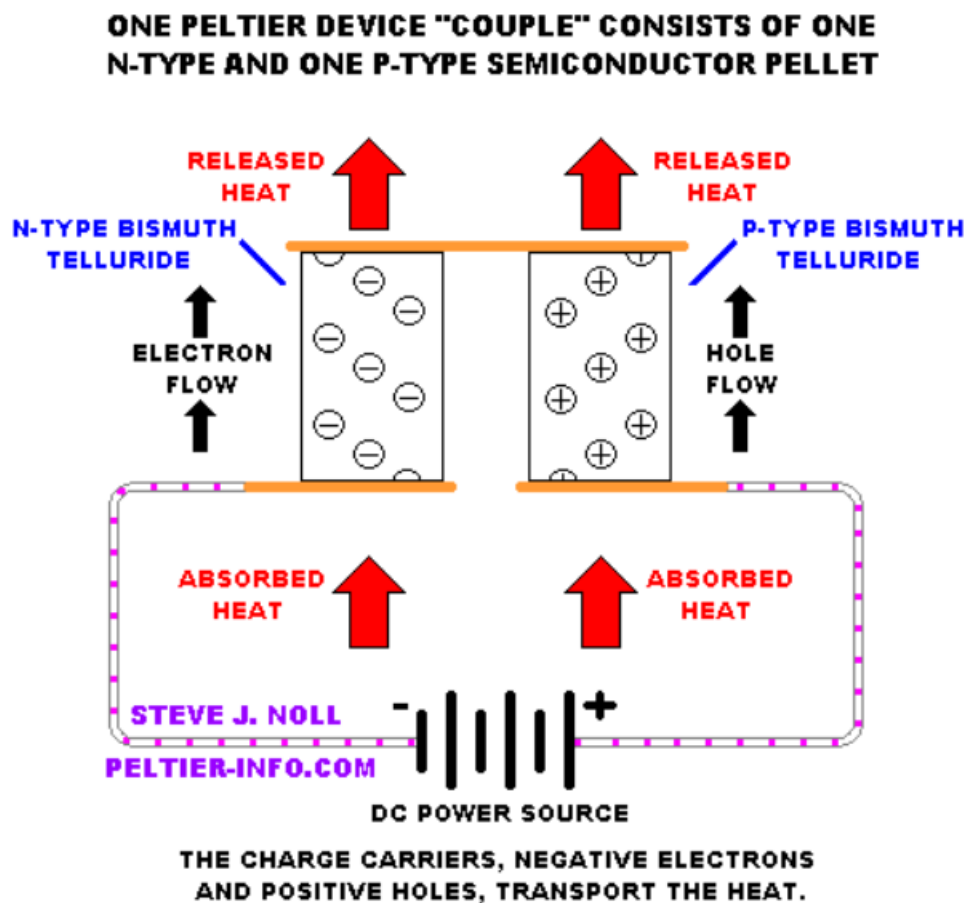
S je Zebekov koeficijent i to je karakteristika materijala. Tačkasti i imaju malu masu. U uzem opsegu temperature u odnosu na provodne senzore temperature. Gradijent temperature pokreće naelektrisane čestice, a električno polje nastaje, da bi zaustavilo to kretanje, i formira se napon kada se izjednače.

- Ako je razlika temperatura $T_A - T_B$ dovoljno mala onda se izraz uprošćava u:

$$E = (S_2 - S_1)(T_A - T_B)$$

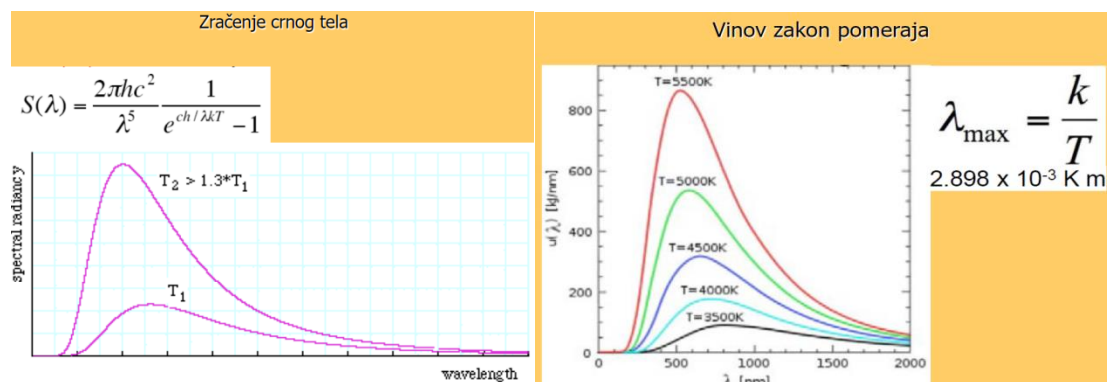
Moramo ga u jednom trenutku spojiti sa žicama bakra od voltmetra. Ukoliko se spojevi ne nalaze na istoj temperaturi doći će do smetnje. Ove spojeve moramo da stavimo na neku referentnu temperaturu. Tipično oba spoja držimo na konstantnoj temperaturi. Tačka mrznjenja vode i topljenja leda (smesa). Male mase i dobre dinamičke karakteristike (veoma brzo ulazimo u ravnotežno stanje). Ali nizak nivo izlaznog signala i oštećenja na visokim temperaturama.

Peltijeov hladnjak – Puštanjem DC struje kroz provodnik hladimo jednu stranu, a druga se zagreva, što je posledica ukoliko postoji temperaturski gradijent duž provodnika, provodnik oslobađa toplotu ako je smer struje istog smera kao i termalni fluks. Ako su suprotnog smera dolazi do apsorpcije toplote. Peltijev hladnjak se koristi za održavanje temperature električnih komponenti.



Za više temp koristimo plankov zakon, tj pratimo spektar zračenja tela koji je funkcija temperature da bismo odredili temp tela. To ćemo zvati radijaciona termometrija.

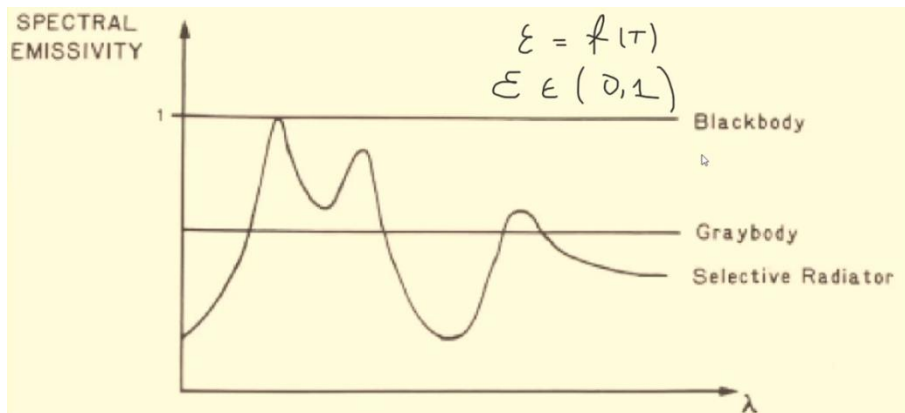
Bezkontaktno. Sva tela na temperaturi veće od apsolutne nule zrače em talase. Spektar(relativni udeo talasnih duzina) zracenja zavisi od temp tela. Spektar se pokorava plankovom zakonu zracenja:



$S(\lambda)$ gustina zračenja funkcija temperature i talasne dužine.

Apsolutno crno telo ima emisivnost 1 sto znaci da apsorbujе svaki foton koji padne na njega. Svu svoju energiju predaje kroz fotone. Problem u citavoj prici je odrediti emisivnost prirodnog tela.

Maksimum u spektru se pomera ka nizim talasnim duzinama , odnosno fotonima više energije kada se telo zagreva. Zato je kada je T_2 veca od T_1 , za T_2 veća gustina zračenja. Sam stefanbolcmanov zakon kaze da ukupna iradijansa srazmerna površini ispod grafika, a ukupna iradijansa je srazmerna apsolutnoj temp na 4 stepen I maksimum zracenja zavisi od temperature. Ovaj maksimum zracenja je dat vinovim zakonom pomeraja. Talasna duzina na kojoj se desava maksimum zracenja je dat njime. To $\lambda_{\max}$ nije dovoljno resenje za odredjivanje temp, jer razlicite talasne duzine trpe razlicitu apsorpciju. Posto je bezkontaktno merenje temperature, infracrvenom kamerom detektovani talasi mogu biti delom izgubljeni u vazduhu. Spektar kada stigne do nas nije jednak polaznom spektru. Znacj apsorpcija je problem. Možemo ga rešiti propagiranjem zračenja kroz optičko vlakno (poznata apsorpcija i slabljenje), ali to malo umanjuje ulogu bezkontaktnog zračenja. Drugi problem je nepoznata emisivnost. Realna tela su siva tela. Emisivnost imaju od ospega od 0 do 1. I ta emisivnost je i funkcija temperature pored vrste materijala.



Ako pogodno odaberemo talasne duzine tako da su apsorpcije veoma slicne, merimo iradijansu na dve talasne duzine, odredjujemo koja je temp u pitanju tako sto posmatramo kolicnik tih iradijansi. Posto je nelinearna temperaturska zavisnost, mozemo ovo raditi.

Emisivnost u slucaju kada nije zagrejan se moze koristiti kao aproksimacija emisivnosti kada jeste.

Mora se resiti I problem pozadinskog zracenja. Ako se temp pozadine ne menja brzo, mozemo da je snimimo, pa oduzmemo od rezultata koji dobijemo sa objektom.

Termalne kamere se najcesce prave pomoću matrice mikrobolometra. Jedna ćelija te kamere je jedan termistor. Em zracenje biva apsorbovano, to zagreva taj jedan piksel i mi ispitujemo zagrevanje tog piksela(električno). Kamera se neprozirnim sočivom je transparentna za infracrveni deo spektra, a nije za vidljivi deo spektra. Formiranje slike isto kao u optičkom domenu (npr CCD). Izgužvanu aluminijmsku foliju, reflektivnost je nasumična i reflektuje sve što dolazi na nju i snimili smo pozadinsko zračenje koje možemo da otklonimo. Nisu kamere koje mogu da snimaju brzo. Zapravo detector em zračenja.

Rešavanje problema nepoznate zavisnosti emisivnosti od temperature:

$$L(\lambda_1, T) = \varepsilon(\lambda_1, T) \cdot \frac{c_1}{\pi \cdot 520 \lambda^5} \cdot e^{-\frac{c_2}{\lambda T}}$$

$$\frac{L(\lambda_1, T)}{L(\lambda_2, T)} = \frac{\varepsilon(\lambda_1, T)}{\varepsilon(\lambda_2, T)} \cdot \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)^5 \cdot e^{\frac{c_2}{T} \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1}\right)}$$

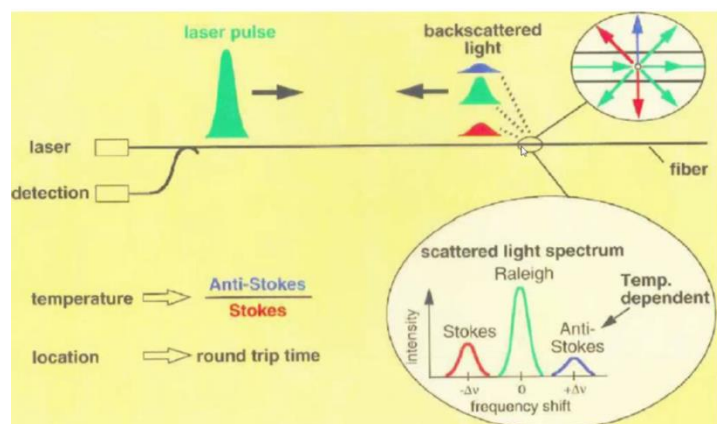
$\uparrow$
 ovaj gvo #ete
 bude zavisni od T
 = const.

Merimo spektralnu gustinu zracenja na dve talasne duzine i podelimo rezultat.

Distribuirani senzori kod kojih možemo detektovati mesto na kojem fizička veličina deluje pored intenziteta. Možemo mapirati temperaturu. Kada pustimo svetlosni impuls duž nekog optičkog vlakna, na svakom mestu gde se dešava indeks prelamanja, deo svetlosti se reflektuje, deo se transmituje. Pustimo impuls, delujemo silom, refleksijska transmisija, ako je indeks prelamanja srazmeran dejstvom sile, reflektovani signal daje po intenzitetu kolika je ova sila F , a po vremenu preleta određujemo gde ta sila deluje.

DART fiberoptički senzor temperature (Distributed Anti-Stokes Radio Thermometry).

Oslanja se na efektu Ramanovog rasejanja. Čestica rasejanja emituje foton iste talasne dužine kao što je bio kada je naišao na česticu (Rejljeova). Ramanovo rasejanje, Stoksove i antistoksove pomereja gde dolazi do konverzije energije elektrona u termalnu energije. Čestica apsorbuje foton, ali nakon toga se pobudjeni atom emituje foton, ali može da bude malo manje ili malo više energije u odnosu na foton koji je apsorbovan. Jedno i drugo rasejanje je funkcija temperature. Pustimo impuls kroz vlakno i pratimo rasejanu svetlost na ove dve talasne dužine:



Znači rasejavaju se i fotoni veće i manje energije. Ako je talasna dužina štoksovih linija λ_s , a anti λ_a , količnik intenziteta ovih svetlosti je:

$$R(T) = \left(\frac{\lambda_s}{\lambda_a} \right)^4 \exp \left(-\frac{h\nu}{kT} \right)$$

Ovim merimo temperaturu, ali je i mapiramo. $R(T)$ reflektivnost.

Štoksove i antištoksove linije postoje u svim optičkim vlaknima. Teoretski ako nam treba temperatura, a imamo vlakno, možemo ga iskoristiti za mapiranje temperature.

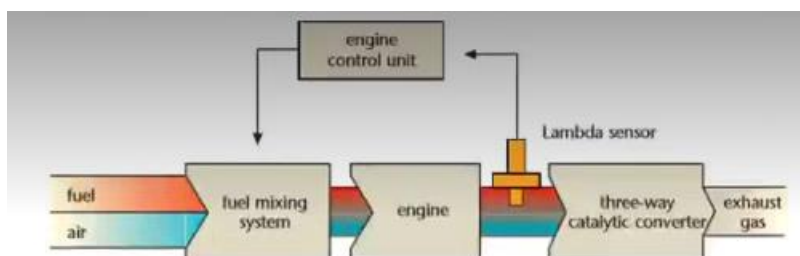
1.4 Hemijski Domen

Lambda senzor [El,El,Hem] – njegova uloga je da obezbedi najbolje moguće sagorevanje benzina u automobilu. Najviše energije ćemo izvući iz benzina ako izvršimo potpuno sagorevanje. Nepotpuno sagorevanje goriva dovodi do izbacivanje izduvnih gasova koji su mnogo štetni: CO, NO_x i HC. Kada imamo potpuno sagorevanje dobijamo: CO₂, H₂O i N₂ i oni nisu toksični. Idealna smeša za potpuno sagorevanje je da je potrebno 14,7 kg vazduha sa 1kg goriva. Parametar lambda ima vrednost 1, ako je smeša (stehiometrijska smeša) baš ovakva:

$$\lambda = \frac{\left(\frac{m_v}{m_G}\right)_{SM}}{\left(\frac{m_v}{m_G}\right)_{ST}}$$

masa vazduha i masa goriva (SM- stvarna smeša, ST-idealna)

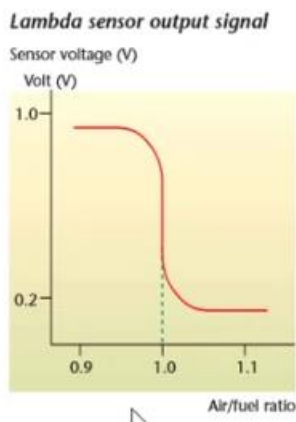
Obezbedujemo da lambda bude 1 uz pomoć lambda senzora sa kojim kontrolišemo prisustvo i koncentraciju kiseonika u izduvnom gasu:



Postoje Zirconia i Titania tipovi.

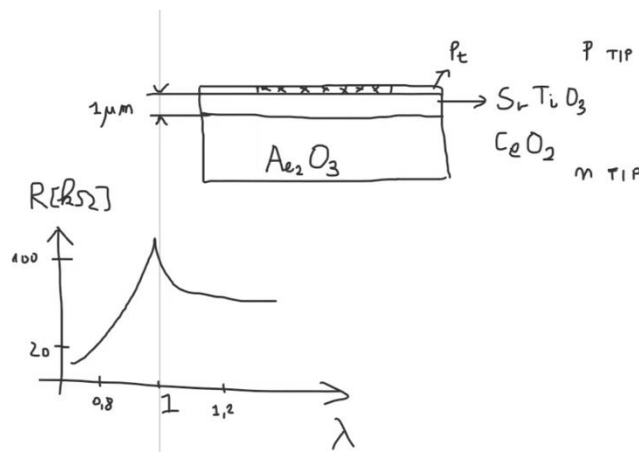
Zirconia – Platinska elektroda služi kao katalizator. Postoji polupropustljiva membrane koja mora da bude zaštitni omotač. Unutrašnjost je izložena spoljašnjem vazduhu. Preko lambda senzora prolazi sagoreli gas iz motora. Postojeće gradijent koncentracije kiseonika. Formiraće se električno polje. To je signal koji povratnom spregom menja rad motora tako da lambda bude što bliže jedinici moguće. Kada su temperature iznad 300 stepeni, izaziva transfer jona kiseonika. Da bi senzor radio dobro, mora da bude na 300 stepeni, tako da na početku paljenja motora, neće raditi dobro dok ne dostigne radnu temperaturu. Treba nam jonizovani kiseonik da bi nam gradijent koncentracije davao napon. Molekuli su elektroneutralni za razliku od jona pa nećemo imati promenu napona.

Ovo stvara napon. Što je veća razlika koncentracije kiseonika između izduvnog gasa i referentnog vazduha u centru senzora, veći je napon. Taj napon se oštro menja, pa ga često nazivaju binarnim senzorom:



Velika osetljivost oko jedinice. Veoma zgodno radi održavanja najboljeg lambda odnosa na 1.

Titania :



Sastoji se od jednog poluprovodnika koji je nanešen na safir(Al_2O_3). Polupropusna membrana propušta jone koji postoje u izduvnim gasovima i zbog dejstva jona na nosioce naelektrisanja, imaćemo različitu otpornost između platinskih elektroda. Otpornost se značajno menja oko jedinice.

U oba slučaja platina služi kao katalizator (ne učestvuje u hemijskim reakcijama, ali doprinose njihovoj brzini).

Određivanje prisustva nekih hemikalija i njihove koncentracije, opet su zgodni optički senzori. Svaki atom ima energetska struktura. Ima elektronske orbitale. Molekuli imaju sopstvene energetske nivoe. Svetlost se apsorbira i emituje kada elektron pređe iz jednog energetskog nivoa u drugi.

Protok energije u radijacionom domenu:

Svaki element ima svoj jedinstven potpis u spektru. Na osnovu njega možemo da odredimo prisustvo raznih elementa. Ponekad možemo i koncentraciju da odredimo

Rezonantno može da emituje fotone približno određenih energija i to odgovara energetskim prelazima koji u tom materijalu postoje. Nikad se ne emituje monohromatska svetlost, uvek postoji širenje linije. Posmatramo iradijansu svetlosti u funkciji talasne dužine, nije uvek pik na jednoj talasnoj dužini.

Kod ovih senzora vršimo modulaciju spektra i na osnovu toga saznajemo koje komponente postoje u smeši i u kojoj koncentraciji. Svetlost može biti apsorbirana (posmatramo apsorbirani spektar), reflektovana (posmatrati spektar u refleksiji (spekularna (promena indeksa prelamanja) i difuzna refleksija)), rasejanje i luminescenciju. Hoćemo da forsiramo difuznu, a da otklonimo spekularnu. Možemo posmatrati kako se rasejava svetlost i luminescencija (naknadno emitovana svetlost druge talasne dužine). Sve metode linearno srazmerne sa koncentracijom reaktanta. Spektar najuži u gasovima (interakcije najslabije). Spektar gasa 0,5 mikrometra – 2 mikrometra. Potrebna su optička vlakna i detektori. Ne možemo baš bilo koji deo spektra da koristimo.

Luminescencija (fluorescencija/fosforescencija) je zakasnelo zračenje. Fosfor apsorbira fotone, a zatim ih posle nekog vremena, emituje kao fotone niže energije uz oslobađanje temperature.

Refleksija se deli na difuznu i spekularnu (zavisi od frenelovih koeficijenata tj. u razlici indeksa prelamanja). Spekularna nije dobra za određivanje tipa materijala i težimo da je poništimo. Difuzna refleksija, gde su fotoni apsorbirani u površinskom sloju, pa zatim emitovani, ona nas zanima.

Pratiti gasove na ovaj način. Neće svaki put da se emituje foton energije ha ni. Postoji nesigurnost. Tada će se oko te energije, postojati fotoni manje i više energije.

Gasovi imaju malo širenje linije u odnosu na tečnosti i čvrsta tela. Potpisi gasova su čistiji. U današnje vreme se koriste principi praćenja gasova.

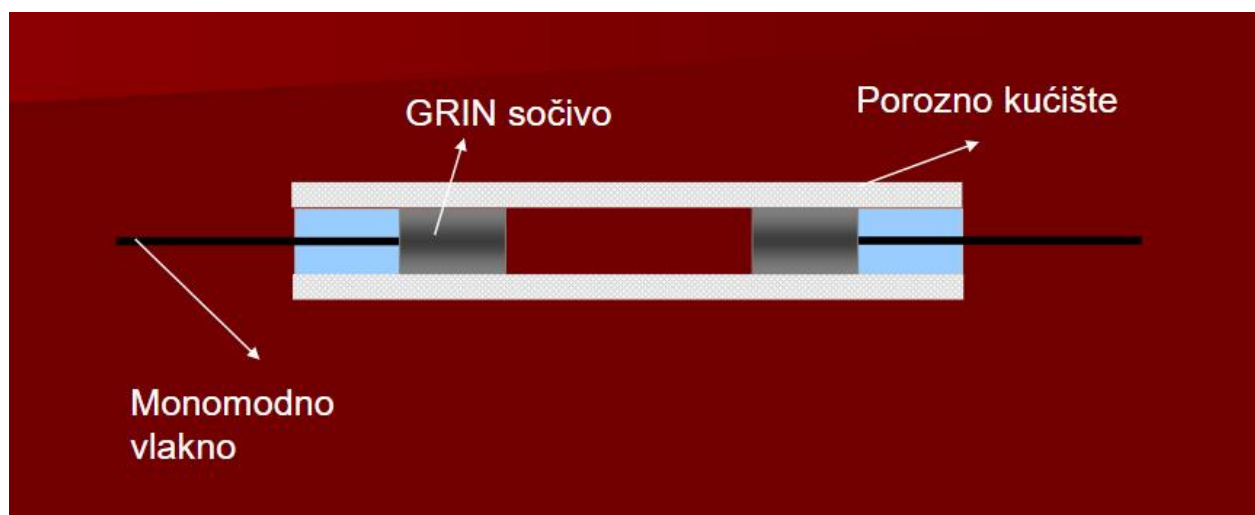
Ako posmatramo transmisiju svetlosti kroz gas, t je funkcija frekvencije, k – snaga apsorpcije, p je parcijalni pritisak, l je dužina fizičkog puta kroz gas. K je vezano sa oblikom linije, pri čemu je on zadat funkcijom f . To je obično gausijan. S je konstanta snaga linije, i što je veći, lakše ćemo meriti.

$$T(\nu) = e^{-k(\nu)p\frac{273}{T}L} \quad k(\nu) = Sf(\nu - \nu_0) \quad \int_{-\infty}^{+\infty} f(\nu - \nu_0)d\nu = 1$$

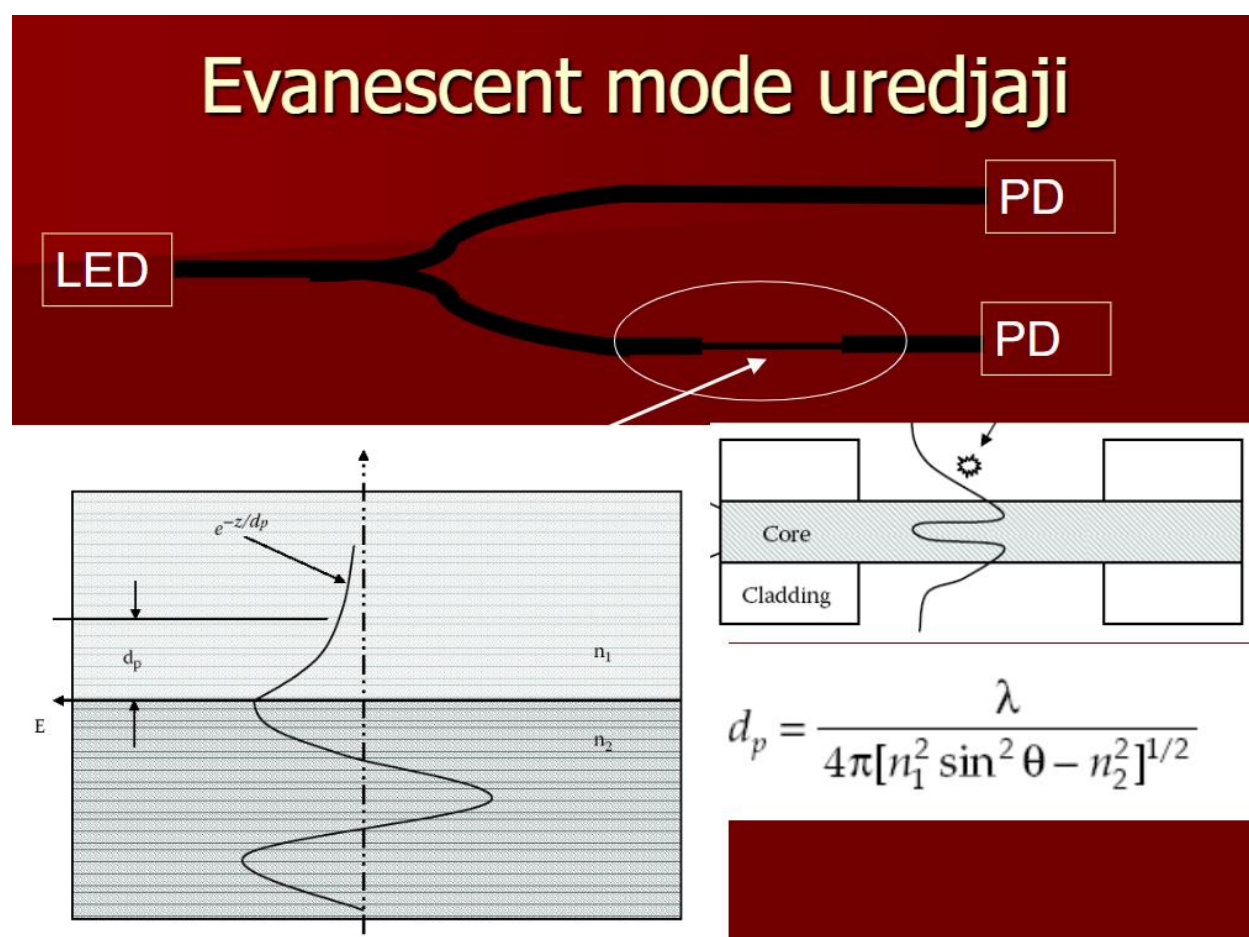
Difrakcijom ili interferencijom određujemo spektar. Difrakcione rešetke za difrakciju, a Fabri-Peroov rezonator za interferenciju. On se sastoji iz dva paralelna ogledala, i održavaće samo talase čiji je celobrojni umnožak polovina talasnih dužina jednak dužini rezonatora. Podržaće diskretne talasne dužine I ako piezoelektričnom pločicom pomeramo jedno od ova dva ogledala I u određenim položijam dobijaćemo pikove zračenja I znaćemo kako izgleda spektar. Svaki paraziti Fabri Peroov rezonator koji se pojavi u strukturi nam može davati lažnu sliku.

Omega sistem za detekciju metana – Imamo mernu glavu. Ova ćelija se sastoji od jednog poroznog kućišta. Propušta čestice metana, a veoma slabo ostale gasove u smeši. Ukoliko stavimo vlakna, imaćemo strukturu koja podseća na Fabri Peroov. Grin sočiva(menja im se indeks prelamanja sa odstojanjem od centra) Da bi sprečili da se formira Fabri pero.

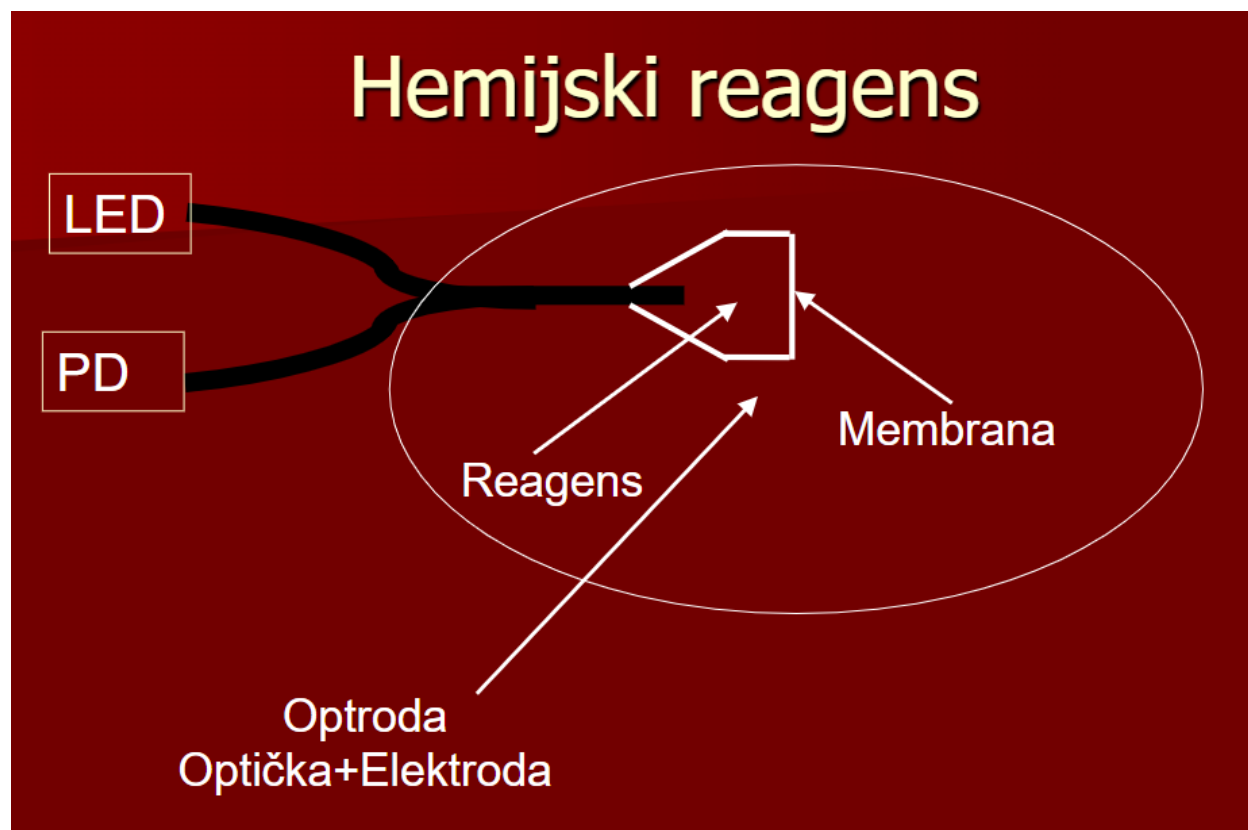
Propustljiva membrana propušta metan, dovodimo ga vlaknom i posmatramo koja svetlost će da se spregne na izlaznom vlaknu. Da ne bi u maloj ćeliji došlo do interferencije sa promenom temperature, da se ne stvori stojeći talas u rezonatoru. Da nam geometrijske karakteristike ne utiče na spektar, Grin sočivom ćemo to srediti. Ono u centru ima veći indeks prelamanja nego pri ivicama. Ideja je da ne postoji ponovljiva optička putanja u rezonatoru. Pik oslikava koncentraciju metana. Menjamo talasnu dužinu izvora dok ne nadjemo najveći odziv. Ne koristimo konstantan izvor, već jitter izvor(namerno izazvana nestabilnost lasera). Dinamičko merenje, spore greške koje su od drifta ne utiču na merenje.



Evanescent Mode (Iščezavajući talas) uređaj. Koristi se kod bioloških struktura. Optičko vlakno vodi svetlost uz pomoć totalne unutrašnje refleksije na mestu gde imamo indeks prelamanja veći od indeksa prelamanja omotača. Ispostavlja se da električno polje u oblasti dva, nije jednako nuli. Ono što je tačno je da ne postoji neto transfer energije upravno na razdvojnu površ. Zbog graničnih uslova, električno polje u oblasti dva nije jednako nula, već eksponencijalno opada kako se odvajamo od razdvojne površi. Možemo definisati dubinu prodiranja d_p , koja zavisi od indeksa prelamanja oblasti, ugla pod kojim pada i talasne dužine. d_p u drugu oblast zavisi od indeksa prelamanja n_2 i ukoliko se menja koncentracija molekula u oblasti gde smo skinuli zaštitni omotač. Optička vlakna se sastoje od jezgra, omotača i zaštitnog omotača. Ako skinemo zaštitu, i omotač i u jednom delu je samo jezgro. Zavisnosti koliki je indeks prelamanja u ovoj ovde oblasti, nama će se menjati dubina prodiranja, menja će se iradijansa koju sprežemo u drugi deo vlakna. Ovo se često postavlja unutar poluproposne membrane i kod bioloških molekula imamo molecule koji se međusobno vole, veoma rado prave veze. Imamo biološke molecule koje možemo da postavimo u tu oblast da hvataju te molecule čiju koncentraciju želimo da izmerimo i da na taj način pojačamo efekat uticaja na ovaj indeks prelamanja n_2 .

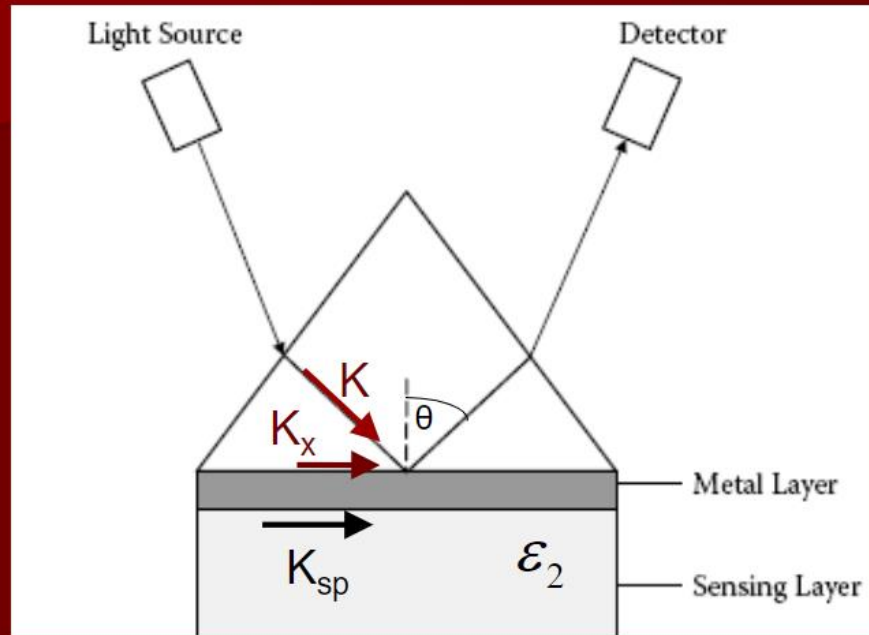


Možemo koristiti princip refleksije odnosno apsorpcije. Optroda (optička elektroda). Gde imamo odgovarajući reagens, i merimo apsorpciju koja se dešava u delu gde se nalazi merna glava.



Princip merenja baziran na rezonanciji površinskih plazmona. Kada se naoravi spoj dielektrik-metal i ukoliko obasjamo ovaj spoj svetlošću, pri totalnoj unutrašnjoj refleksiji mogu se indukovati oscilacije slobodnih elektrona u plazmi. U takvoj situaciji imamo izuzetno povećanu refleksiju. Dovedemo elektrone u rezonantnu poziciju i ta pozicija zavisi od toga koji se materijali nalaze na tom spoju. 0.1 % promene u koncentraciji, uzrokuje promenu ugla totalne unutrašnje refleksije od 10 na minus drugi stepeni. Čini se malo, ali i male uglove možemo lepo da merimo ako se dovoljno udaljimo. Veoma precizno merimo koncentraciju gasa. Ovo je gas za anesteziju.

Surface plasmon resonance



$$K_x = K_{sp} \quad K_{sp} = \frac{\omega}{c} \left(\frac{1}{\epsilon_2} + \frac{1}{\epsilon_m} \right)^{-\frac{1}{2}}$$

Oksimetrija (merenje pO_2) – meri puls i zasićenosti krvi kiseonikom. Koristimo refleksiju na dve različite talasne dužine. Razlikuje se za hemoglobin koji ima vezan kiseonik i koji nema vezan za kiseonik. Kontrolišemo prisustvo kiseonika u krvi. Odlično za primarnu medicinsku primenu.

Oksimetrija (merenje pO_2)

Hemoglobin $R_1(\lambda=650nm)$

$R_2(\lambda=850nm)$

$$\%HbO_2 = A - B \left(\frac{R_1}{R_2} \right)$$

Tačnost bolja od 2%, Opseg 60-90%

1.6.Mehanički Domen:

Vreme ne pripada ni jednom domenu. Ono je hajzenbergov par sa energijom, pa je to možda razlog. Vreme vezano za procese koji se ponavljaju. Sto je period oscilovanja elektricnog oscilatora veci, to preciznije mozemo da merimo vreme. Jedini analogni sat je sunčev sat. Ostali mere najmanje intervale koji se ponavljaju. Elektronskih časovnika čiji je period stabilisan kristalom kvarca je rešio problem.

Mehanički domen: merimo silu, pritisak, masa, protoka fluida, pomeraj, brzina, ubrzanje, ugaona brzina, ugaono ubrzanje, naprezanje...

Uglavnom se meri sila. U beztežinskom stanju, meri se težina uz pomoć oscilatora(krutost i period oscilacija opruge zavise od mase).

Akcelerometri mere ubrzanje na osnovu sile i na osnovu poznavanja mase. Masa se nalazi na oprugama i možemo formirati kondenzator. Kapacitivnost se menja sa pomerajem tela. Odredimo silu, odredimo ubrzanje. Druga varijanta, opet preko sile, ali koristimo piezoelektrični kristal. Tako možemo i smer odrediti.

Merne trake su otporni pretvarači čija je osnovna namena merenje deformacije odnosno naprezanja u materijalima. Na bazi toga mernim trakama se meri i niz drugih veličina koje mogu da proizvedu deformaciju materijala na kome su zalepljene trake. Te veličine su sila, ubrzanje, vibracije, pomeranje, pritisak itd. Merne trake se prave od metalne žice, folije ili od poluprovodničkih materijala. Na slici 1.1 a prikazana je žičana merna traka koja je najstarija po konstrukciji. Otpornost trake data je izrazom:

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (1.1)$$

gde je l dužina žice, $S = r^2 \pi$ poprečni presek, a ρ specifična otpornost materijala. Pri istezanju žice $\Delta l / l$, prečnik žice r se skraćuje srazmerno istezanju $\Delta r / r = -\mu \Delta l / l$, gde je μ tzv. Puasonov koeficijent. Poprečni presek žice ima relativnu promenu $\Delta S / S = 2\Delta r / r = -2\mu \Delta l / l$. Diferenciranjem izraza (1.1) i zamenom gornjih vrednosti dobija se:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l} (2\mu + 1) + \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (1.2)$$

Izraz (1.2) se može napisati u obliku:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l} \left(2\mu + 1 + \frac{\Delta \rho / \rho}{\Delta l / l} \right) \quad (1.3)$$

Treći član u zagradi izraza (1.3) naziva se koeficijent piezorezistencije i kod većine materijala ima konstantnu pozitivnu vrednost. Dakle relativna promena otpornosti trake je linearno srazmerna deformaciji:

$$\frac{\Delta R}{R} = k \frac{\Delta l}{l} \quad (1.4)$$

gde se k naziva osetljivost merne trake i predstavlja konstantu koja karakteriše određenu traku. Za većinu metalnih traka k iznosi oko 2.

Pri konstrukciji mosta sa dve merne trake potrebno je zadovoljiti uslov da deformacije traka pod dejstvom sile budu suprotnog znaka. Suprotne promene otpornosti zbog veze u mostu dovode do sabiranja mernog efekta i do povećanja osetljivosti merenja. U izvesnim slučajevima, kada se na ispitivani uzorak ne mogu zalepiti dve merne trake, druga traka se lepi na komad materijala koji se ne deformiše ali se nalazi u neposrednoj blizini osetljive trake. Ova pomoćna, tzv. slepa merna traka, ne doprinosi povećanju osetljivosti već služi isključivo za kompenzaciju temperaturskih promena. Bitno je i da merne trake jednoznačno prijanjaju na podlogu.

Ako pričamo o merenju pomeraja, rekli smo da su interferometri najjosteljiviji uređaji. Odziv jedan plus kosinus delta fi. Gde je ovo delta fi fazna razlika između talasa u grani a i talasa u grani b ali u praksi ne treba zaboraviti delta fi na optičkim komponentama. Da bismo imali interferenciju, potrebna nam je koherenta svetlost. Da bismo dobili koherentu svetlost, moramo koristiti jedan izvor, jedan laser. Moramo podeliti snop i moramo kasnije da ga dovedemo na isti prostor. Moramo koristiti neka ogledala ili kaplere. Promena faze na optičkim komponentama. Kada pomoću vanparalelne pločice laserski snop podelimo na dva dela, jedan se reflektuje drugi se transmituje, refleksija u optički guscu sredinu menja fazu talasa za pi, u ovom konkretnom slučaju promena faze na optičkim komponentama bi bila pi. Kad bi bile idealne, i ne podložne

vibracijama, imale idealno ravne površine, tako da je ovaj deo u praksi problematičan. To se resava primenom reciprocnog interferometra. Oba talasa tu prelaze iste optičke putanje. Imamo dva svetlosna talasa, nakon refleksije oni menjaju optičke putanje upravo da bismo izbalansirali, eventualno nulovali ovaj deo koji može biti problematičan. Za dva zraka koji su idealno poravnati, fazna razlika je nula. U okolini nula izvod kosinusa je nula, u takozvanoj mirnoj radnoj tački imamo nultu osetljivost. Moramo ovde dodati pi pola da bismo iz kosinusa presli u sinus. Da bismo iz tacke minimalne osetljivosti presli u tacku maksimalne osetljivosti. Na dva nacina mozemo. Mozemo ubaciti komponentu koja nam pravi fazni pomak za pi pola u jednoj od dve grane interferometra i to se naziva homodinska modulacija. To znači da fiksiramo faznu razliku tako da bude pi pola da bismo iz sinusa presli u kosinus. Druga tehnika je da ovaj deo ucinimo prostoperiodicnim i to se naziva heterodinska modulacija.

Интерференци

$$I = I_0 (1 + \cos \Delta\varphi), \quad \Delta\varphi = \varphi_A - \varphi_B + \Delta\varphi_{\text{ок}}$$

промена фазе
на оптичким путањима које
нам дају за добијање
интерференције

(нар: рефл. о оптички путању
средини уноси фазу $+\pi$)

* Реципротни интерференцир — $\Delta\varphi_{\text{ок}}$ је
нулано

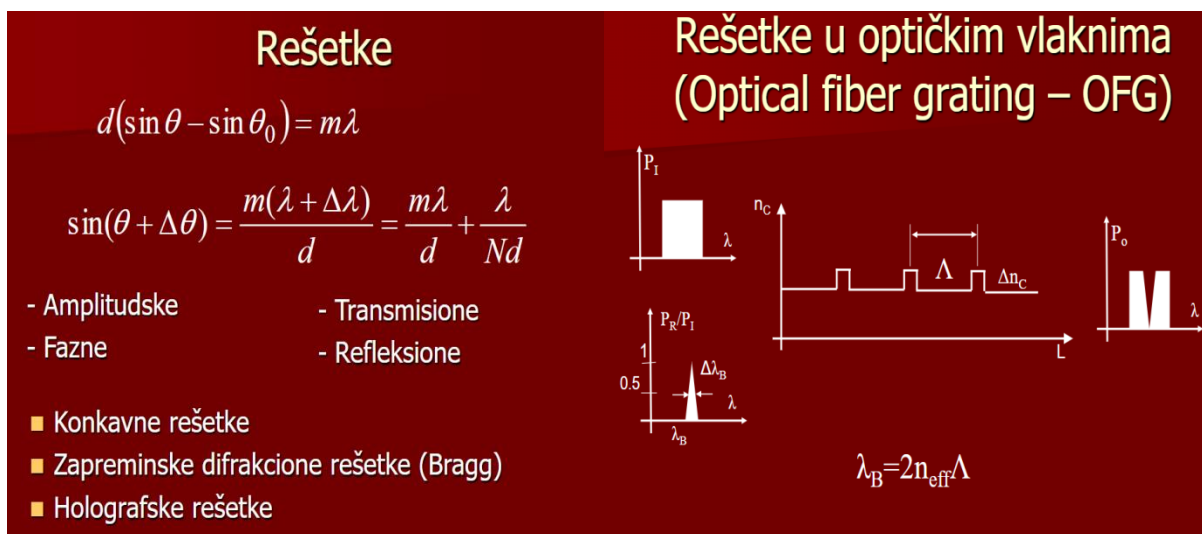
* Каг су || зраци иј: $\Delta\varphi = 0$
продном: $\cos' \Delta\varphi \approx 0$
(нулта осетљивост)

↓

- Хомодинска модулација
($\Delta\varphi$ се фиксира на $\frac{\pi}{2}$)
- Хетеродинска модулација
(операција осцилује)

Bragove rešetke su rešetke upisane u vlakno. Na neki način analogon mernim trakama, samo što je pomoćni protok signala u optičkom, a ne u električnom domenu. Propuštamo svetlost i pratimo promenu raspodele indeksa prelamanja. Zato FBG deli probleme mernih traka

prijanjanje na podlogu i potiskivanje uticaja temperature. Teorija rada: kada svetlost dodje na prepreku dodje na prostornu preraspodelu zračenja, ali ukoliko je prepreka periodična, ta preraspodela se vrši u diskretnim pravcima (npr. difrakciona resetka). Difrakcione rešetke se prave kao standardne transmisione resetke, možemo napraviti i refleksionu periodičnu strukturu(refleksiona difrakciona resetka). Resetke sa najkracim periodom su holografske resetke (6000-10000 zarezova po mm). Kristal predstavlja zapreminsku difrakcionu rešetku.



Da bi ovo iskoristili u optičkim vlaknima, posmatrajmo sledeću strukturu: Zamislamo optičko vlakno gde u samom jezgri vlakna imamo neki indeks prelamanja, ali na određenim mestima možemo da ucinimo indeks prelamanja većim(u praski vecim znači 7-8%). Posmatrajmo idealizovanu situaciju. Da imamo stepenastu promenu indeksa prelamanja. Imamo jezgro ovakvo i pretpostavimo da kroz ovo vlakno propustimo svetlost koja ima konstantu spektralnu snagu u jednom opsegu talasnih duzina. Ako propustimo ovakav spektar, onda će se za jednu talasnu duzinu potrefiti da je jednaka $2n_{eff}\Lambda$. Lambda je period bragove resetke. neff je srednja vrednost indeksa prelamanja po vlaknu, a ovo veliko lambda bragova talasna duzina. Za nju, svetlost u refleksiji od svih ovih stepenika konstruktivno interferira i imaćemo veoma pojačanu refleksivnost na bragovoj talasnoj duzini. Ukoliko analiziramo spektar koji je prošao kroz ovo optičko vlakno, on će izgledati kao na slici gore. Slicno kao kod atoma i molekula, ta linija, bragova talasna duzina, neće biti bukvlano jedna(monohromatska) nego će biti sirenje linije kao u ovoj situaciji skroz desno. Promenom ova dva parametra menjamo Bragovu talasnu dužinu i ako mozemo da je odredimo, možemo da vidimo kolika je promena proizvoda neff puta lamda. Ovo neff i lambda su funkcije temperature i naprezanja. Ako naprezanje menja lambda i neff logicno da i temperatura menja.

Sad imamo jedan senzor koji je vrlo zgodan u optici. Odziv je kodiran talasnom dužinom. Možemo vršiti razdavanje po talasnim duzina. U jednom vlaknu formiramo različite bragove rešetke, sa različitim Bragovim talasnim duzinama. Pustimo širokopojasni izvor i kasnije vršimo razdavanja po talasnim dužinama i time sve Bragove resetke ispitujemo odjednom. Imaju

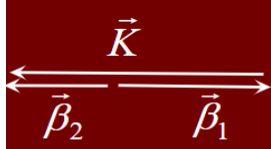
linearan odziv, veliku osetljivost i širok dinamički opseg. Generalno možemo sve rešetke u optičkim vlaknima da podelimo na FBG ili LPG(Long Period Grating). Razlika koja je je vrednost talasne duzine u odnosu na period Λ . Ako je talasna duzina manja perioda rešetke fbg, a ako je period rešetke značajno veći od talasne dužine, koristimo skraćenicu lpg. Pri svim interakcijama moraju biti zadovoljeni zakoni održanja energije i zakon održanja impulsa.

Rešetke u optičkim vlaknima

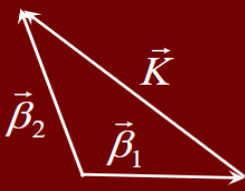


$$K = \frac{2\pi N}{\Lambda}$$

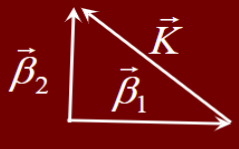
$$\vec{\beta}_i = \vec{\beta}_1 + \vec{K}$$



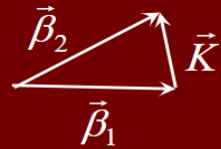
A



B



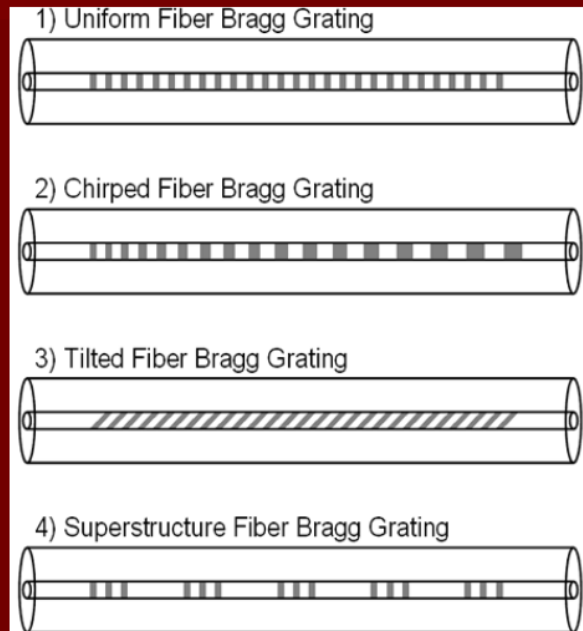
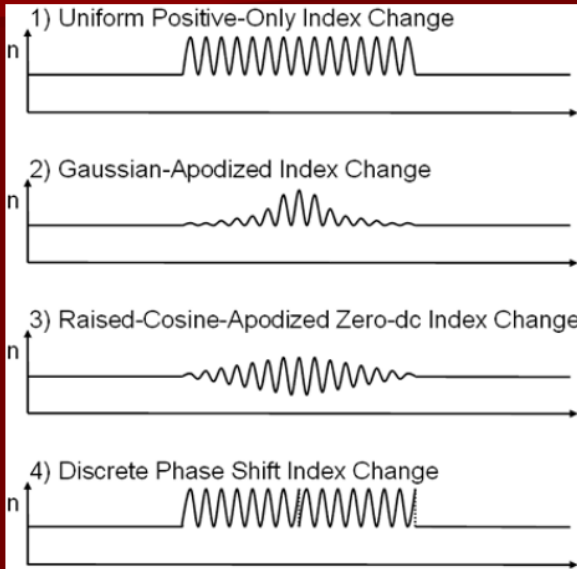
C



D

Ako definisemo period kao k dva pi N kroz Λ , gde je N broj perioda. Možemo definisati vektor koji je upravan na pravac promene indeksa prelamanja. Da bi bio zadovoljen zakon održavanja impulsa mora važiti ova relacije. A, b, c su FBG, dok je d LPG. Ovo je standardna situacija gde posmatramo unazad reflektovanu svetlost. Ukoliko pravimo ovu promenu indeksa prelamanja pod nekim uglom u odnosu na optičku osu koji nije 90 stepeni mi zapravo možemo da spregnemo svetlost unazad reflektujuće modove omotaca posto će i omotac voditi svetlost. U senzorskim primenama slabljenje nije bitno jer su rastojanja značajno kraća. A možemo da forsiramo situaciju da svetlost napušta optičko vlakno i forsiramo slabljenje na nekoj talasnoj dužini. Kod LPG, mi sprežemo svetlost u unapred propagirajuće modove omotača. Moramo da skinemo omotac da bismo upisali promenu indeksa prelamanja, ako nam je okolna sredina većeg indeksa prelamanja od samog jezgra, ovo ne može da radi. Indeks prelamanja okoline mora da bude manji od indeksa prelamanja omotača.

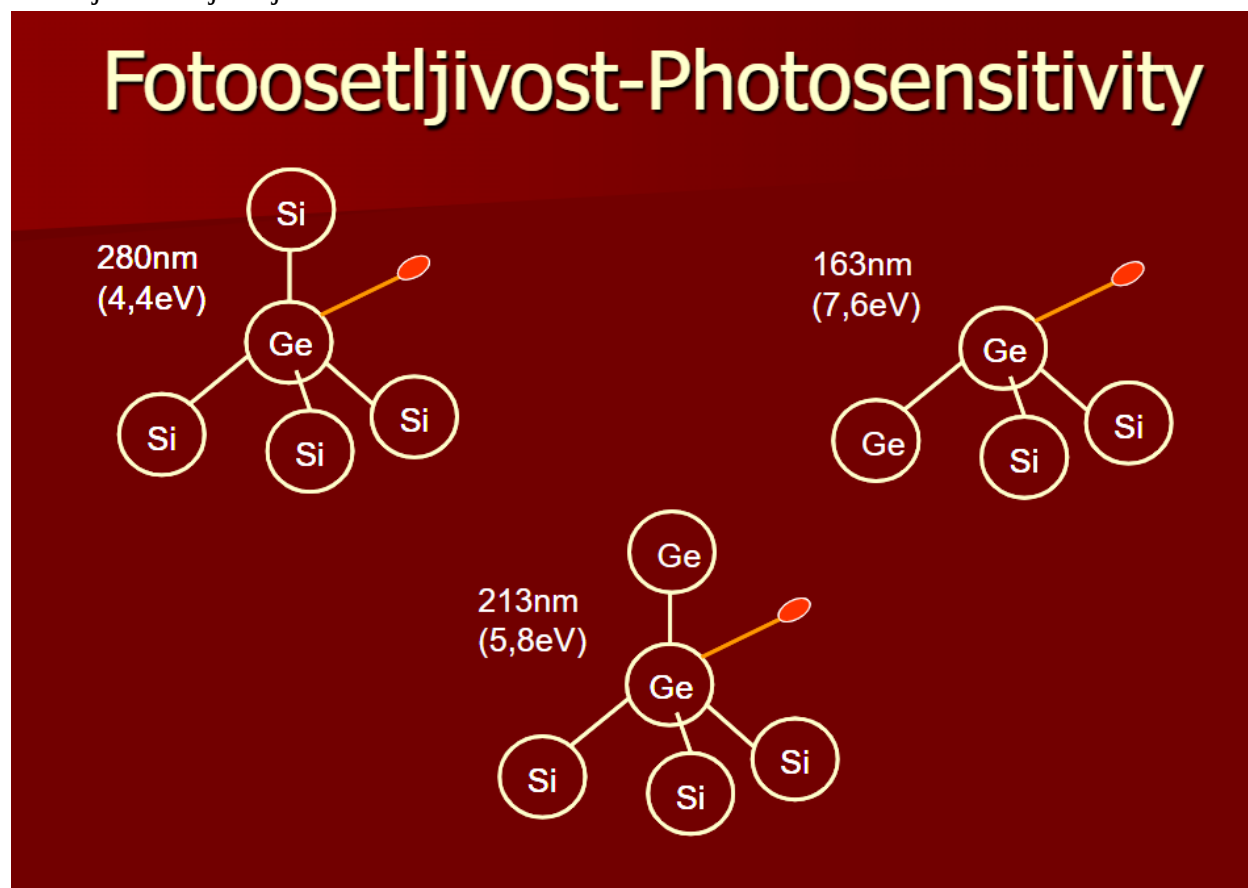
Neuniformne rešetke



Moguće je upisati drugačiju modulaciju u indeksu prelamanja. Razvijene su različite strukture. Sa leve strane se vidi kako se menja indeks prelamanja, a sa desne kako fizički izgleda struktura. Međusobno ih razlikuje oblik spektra koji se reflektuje, odnosno transmituje. Taj oblik će zavisiti od perioda rešetke i načina na koji smo modulirali indeks prelamanja.

Kako možemo da napravimo promenu u indeksu prelamanja? Otkriće fotoosetljivosti je ovo medoprinelo. Ona predstavlja osetljivost indeksa prelamanja materijala na UV zracenje kada je

materijal osvetljen njime.



Mehanizam koji bi mogao da se iskoristi da modeluje ovu situaciju: staklo dopirano sa germanijumom. Taj Ge ima jedan elektron koji može da bude u različitim situacijama, ali moguće je u različitim talasnim dužinama, stvoriti defekte u ovom staklu koje je dopirano Ge. Da iščupamo neke od elektrona. Namerno pravimo defekt. Svaka promena u energetske strukturi materijala dovodi do promene u indeksu prelamanja. Tako da izračunavanje intenzivnom UV možemo formirati bragovu rešetku, možemo napraviti sedam osam procenata razlike u indeksu prelamanja. Najcesce se kao izvor svetlosti koristi drugi harmonik argonskog lasera na 244 nanometra. Takodje mozemo koristiti druge dopante, umesto Ge, mozemo Bor. On ce davati manji indeks prelamanja... hlor aluminijum itd.

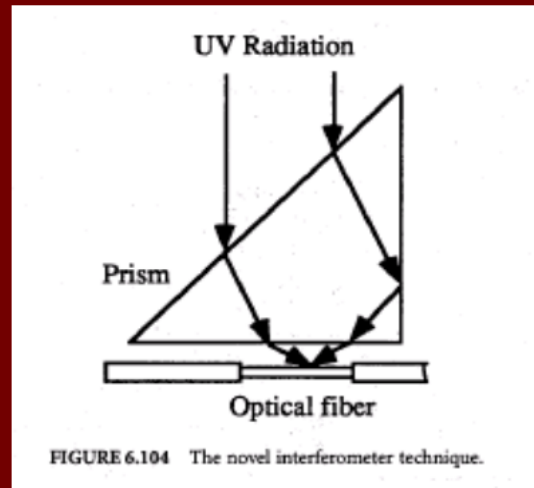
Postoje nekoliko tehnika pomoću kojih možemo upisati rešetku u optičko vlakno. Uzmemo veoma jak laser uV zracenja, pomeramo opticko vlakno, ispalimo impuls, upisemo promenu indeksa prelamanja, pomerimo vlakno... Očigledno sporo i podložno vibracijama. Medjutim postoji drugi nacin, holograsmko upisivanje svetlosti u opticka vlakna. Mozemo da podelimo snop uV lasera na dva dela i da ta dva dela ponovo ukrstimo na mestu gde se nalazimo opticku vlakna u koje zelimo da upisemo promenu indeksa prelamanja. Kada imamo dva snopa iste talasne duzine, docice do interferencije i na mestima konstruktivne interferencije imacemo

veoma snažno zračenje, veliku promenu indeksa prelamanja, a na mestima destruktivne, indeks prelamanja će ostati isti kao na početku.

Upisivanje rešetki u optička vlakna

Nova interferometarska tehnika koja koristi pravouglu prizmu.

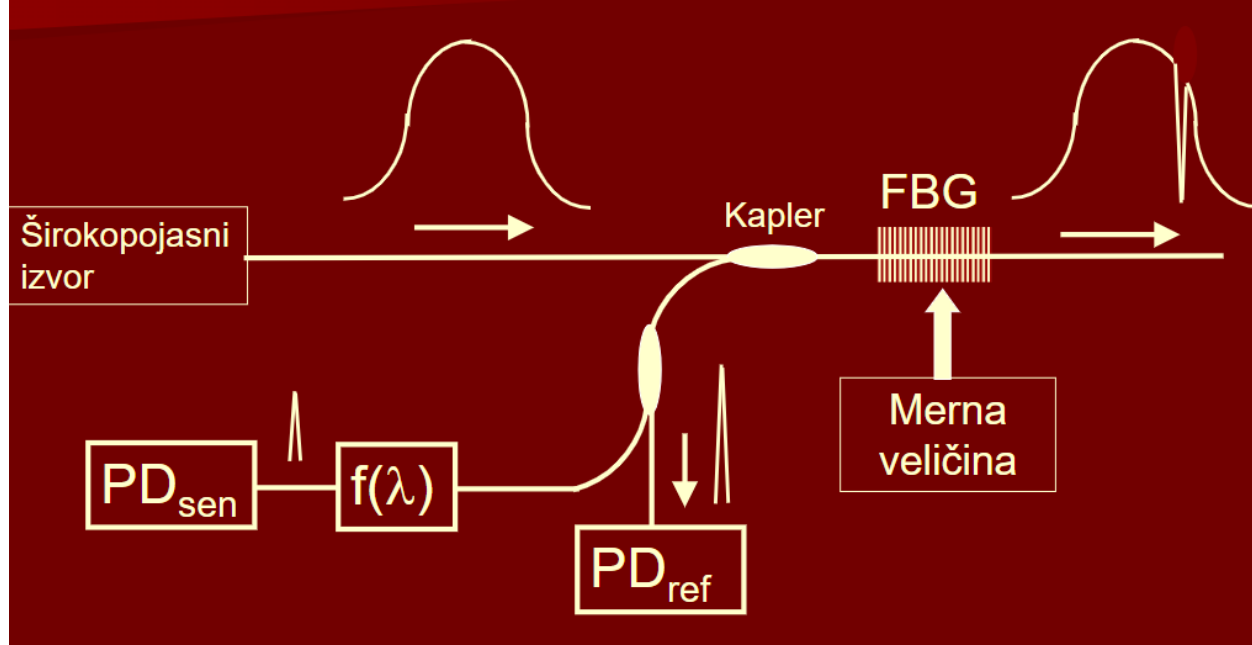
Stabilnija jer vibracije na isti način utiču na oba snopa.



Jedna od tehnika, kako kvalitetno to uraditi, koristimo ovu prizmu, da stvorimo dva referenta snopa, otpornija na vibracije. Mozemo koristiti i masku. Delovi vlakna zaklonjeni. Za sva tri nacina zajednicko, dok pravimo bragovu resetku, mozemo kontrolisati sta radimo. Uv svetlo upucavamo bocno ali istovremeno dok upisujemo resetku, mozemo propustati svetlost kroz opticko vlakno i videti kako nam se menja spektar. Dok pravimo, kontrolisemo tacno ono sto nas zanima.

Tehnike ispitavanja FBG. Dve ideje. Na jednom kraju optical spectrum analiser, stavimo siroko pojasni stabilan izvor kao izvor svetlosti, i posmatramo kako se menja spektar. Drugi način da sa ulazne strane menjamo spektar, podesivim laserom, i dobijemo refleksiju i odredimo talasna duzinu. Ovo je skupo i vezano za laboratoriju. Ako hoćemo da napravimo uredjaj, moramo izvorsiti promenu spektra u neku drugu promenu.

Lateralno filtriranje 1



Lateralno filtriranje spada u tehniku promenu spektra koja dovodi do promene intenziteta. Imamo bragovu resetku u optickom vlaknu, sirokopolasni izvor propustimo svetlost imamo kapler, sa ove strane prodje. Napregnemo resetku pomeri se pik medjutim taj pik se reflektuje i posto imamo kapler iskoristimo neki uredjaj koji ima strmu zavisnost prenosne funkcije od talasne duzine, da bismo promenu spektra doveli do promene intenziteta. To moze da bude neki filter ali mozda jos bolje da bude sama fotodiode. Sve fotodiode imaju osetljivost koja je funkcija talasne duzine. Sto imamo strmiji nagib, imacemo vecu promenu iradjianse u funkciju talasne duzine. Ako se pozicioniramo , promena u spektru se preslikava u promenu fotostruje. Pozicioniramo se tamo gde je najveća osetljivost.

⊕ Задача : $\Delta\lambda = \alpha \cdot \Delta T + \beta\sigma$
 $\lambda - \lambda_0 = \alpha \Delta T + \beta\sigma$

PD у оптички: $U = R \cdot I_{ph}$

$$\frac{dU}{d\sigma} = R \cdot \frac{dI_{ph}}{d\sigma}, \quad I_{ph} = S \cdot \Gamma_0$$

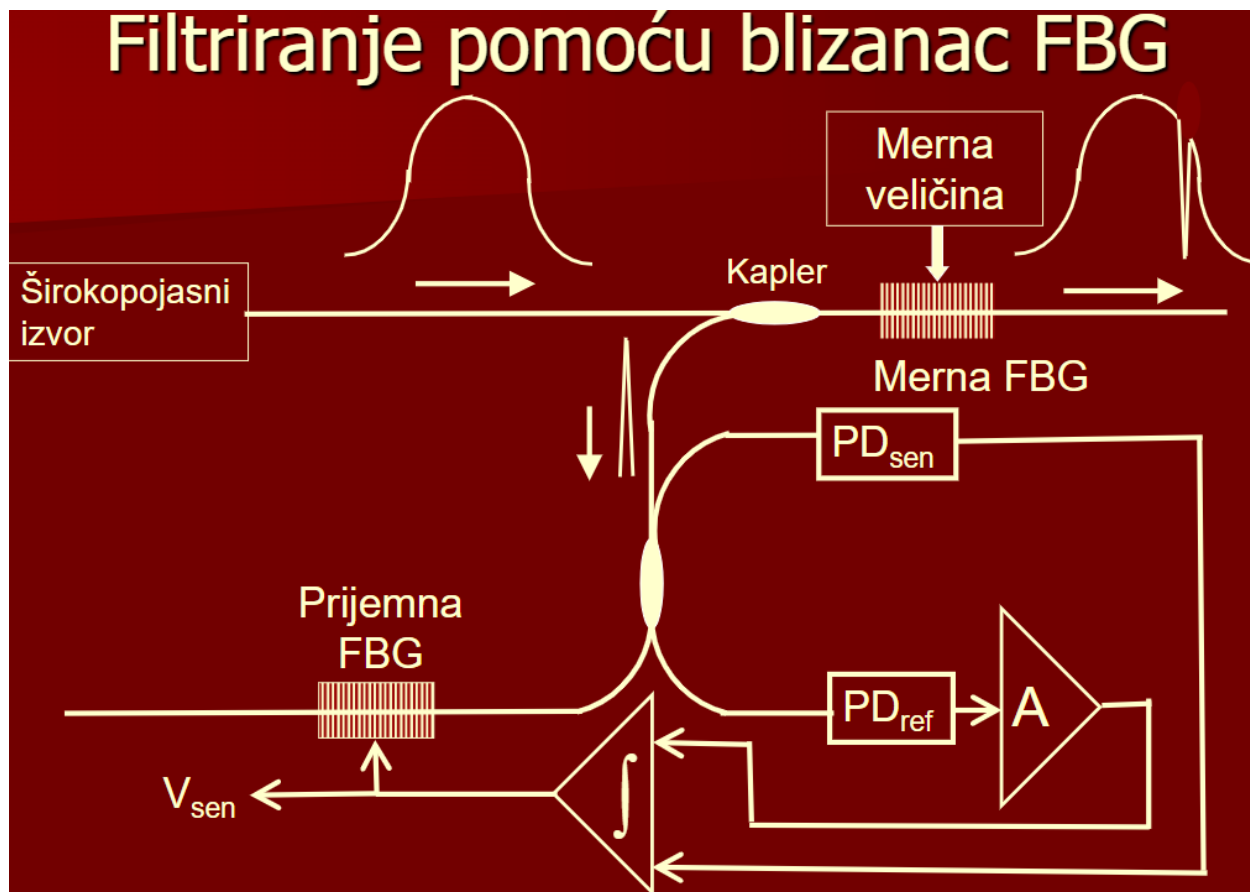
$$\frac{dI_{ph}}{d\sigma} = \frac{dI_{ph}}{d\lambda} \cdot \underbrace{\frac{d\lambda}{d\sigma}}_{=\beta}$$

$$\frac{dI_{ph}}{d\lambda} = \left(\frac{dI_{ph}}{dS} \right)_{\Gamma_0} \frac{dS}{d\lambda}$$

→ ово се паже са графика
који им да

брже се види како
да је у оптичком делу $s(\lambda)$





Filtriranje pomoću dve identične rešetke. Jedna je merna, a druga je prijemna. Propustimo svetlost širokopojasnog izvora, u zavisnosti od naprezanja merne rešetke, nama se jedna talasna dužina reflektuje ide ovamo i ovde se ponovo u prvoj iteraciji ovde prolazi, u povratku će svetlost da se deli na referentnu i osetljivu fotodiodu. Sva ova svetlost dolazi na prijemnu rešetku koja je u početnom trenutku neistegnuta. Dve identične rešetke, ova je napregnuta, ova nije, znači bragove talasne dužine nisu jednake, samo će da prodje. Integrator daje signal napreži prijemnu rešetku, pa je napregne i još nije poklopio, i na kraju se bragove talasne duzine poklapaju, i onda se svetlost reflektuje i ovde, i dobijamo signal da su ove dve resetke poklopljene. Napon koji kontrolise naprezanja, nam je izlaz. Problem je brzina, tj. frekvencijski opseg.

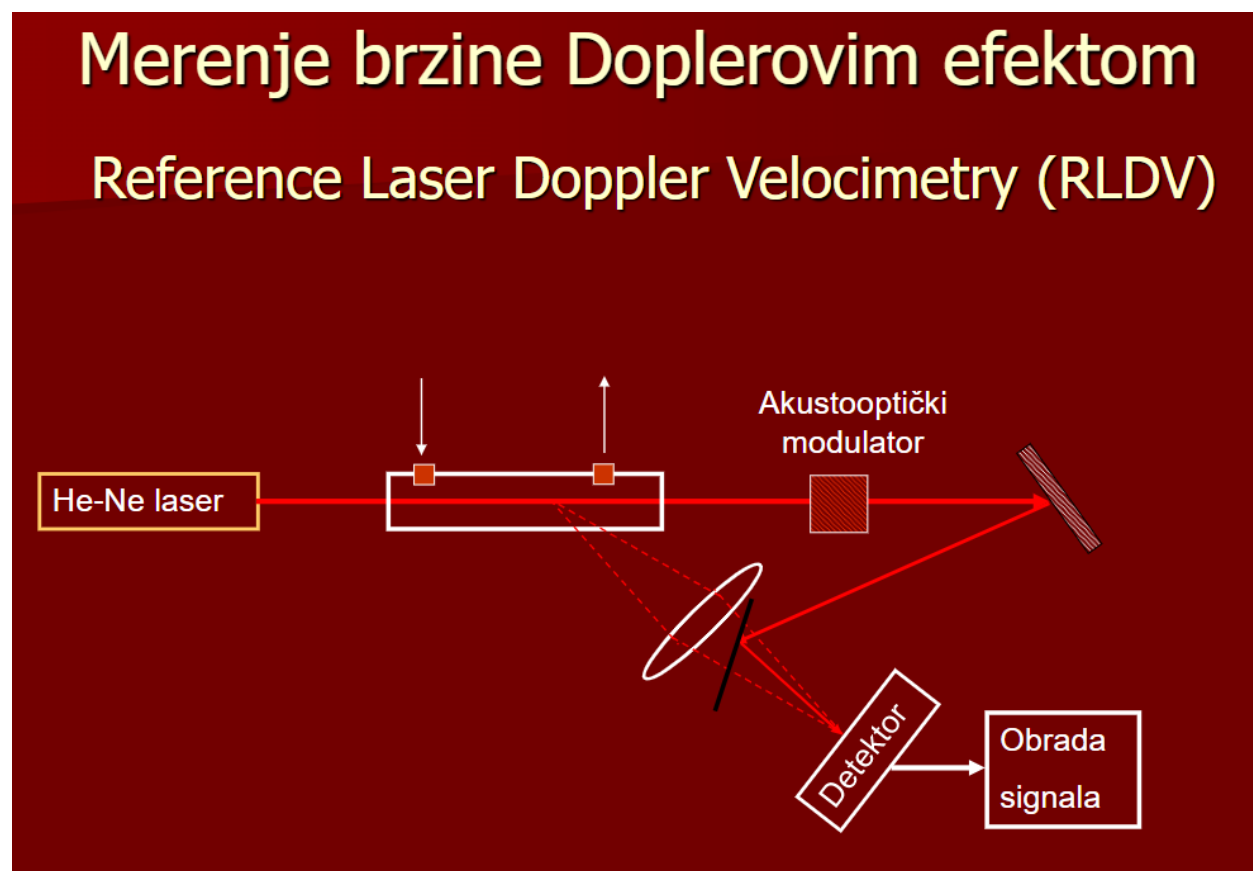
Pouzdanost optičkih rešetki. Imamo defekte koji su stabilniji i koji su manje stabilni, i ako malo zagrejemo rešetku, ostaće samo stabilniji defekti. I to ima duže radno vreme do otkaza. Način na koji možemo da ubrzamo vreme pri ispitavanju, je povećanje temperature.

Bitne su tehnike diskrimancije. Odnosno, potiskivanje neželjnih fizičkih veličina. Svakako ćemo imati uticaj temperature. Možemo praviti iste konfiguracije kao kod mernih traka, gde kompenzujemo temperaturu. Pametnije je da koristimo rešetke upisane u vlakna sa izraženim dvojnim prelamanjem. Indeksi prelamanje za različitom linearnom polarizacijom nisu iste. Sa dve različite propogacione konstante, nema transfera energije, kreću se nezavisne. Kada sa UV

upišemo promenu u indeksu prelamanja, odjednom imamo dve rešetke fizički na istom mestu. Jednu ispitujemo jednom linearnom polarizacijom, drugu drugom. Na potpunom istom mestu dobijamo dve informacije i možemo da izračunamo dve veličine istovremeno. Ovo se ne može uraditi sa mernim trakama.

Pričvrstimo više rešetke i merimo na velikoj površini sa određenom prostornom rezolucijom.

Protokometar. Svetlost možemo koristiti za merenje brzine pomoću doplerovog efekta (promena frekvencije ukoliko postoji relativno kretanje). Za elektromagnetni talas koristimo relativističku teoriju. Za male brzine, možemo ga svesti na klasičan izraz. Ukoliko odredimo doplerovoj pomeraj, možemo odrediti brzinu emitovanog fotona. To možemo iskoristiti da napravimo protokometar.



$$\Delta \varphi = \frac{2v}{\lambda} \quad \text{za ykzag paccjany cb.}$$

$$v = 1 \frac{\text{m}}{\text{s}}, \quad \lambda = 600 \text{ nm} \quad \rightarrow \quad \Delta \varphi = 3,3 \text{ MHz}$$

$$|\Delta \lambda| = \lambda \cdot \frac{\Delta \varphi}{\varphi} = 4 \cdot 10^{-6} \text{ nm}$$

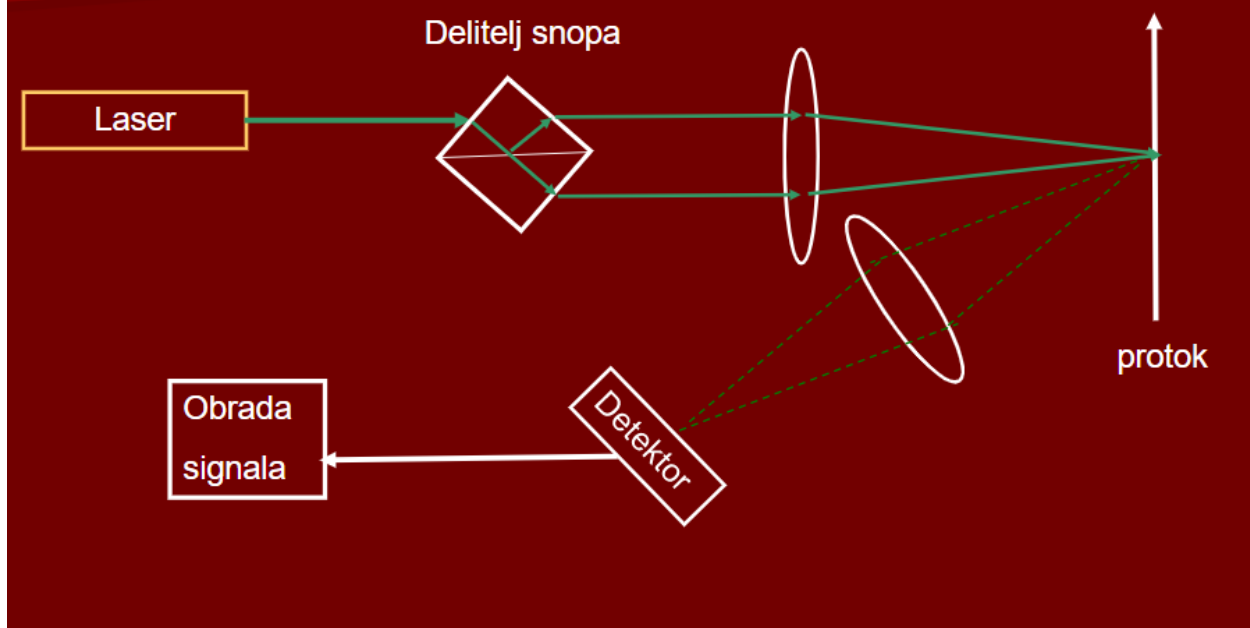
vrno malo

Moramo imati stabilan izvor svetlosti i veliku spektralnu rezoluciju uređaja. Direktno praćenje pomeraja talasne dužine se ne koristi za male brzine. Koristićemo za supersonične protoke.

Imamo jednu ćeliju koja je transparentna za svetlost koje nam ulaze u fluid i izlaze iz njega. Pogodno je da imamo neturbulentni laminalni tok fluida. Akustooptički modulator ignorišemo. Posmatramo rasejanu svetlost. Pomoću nekog sistema ogledala, glavni referentni zrak dovodimo do detektora tako da se preklapa sa rasejanom svetlošću. Kada imamo dva talasa sličnih frekvencija u istom delu prostora doći će do izbijanja. Izbijanje je za gornji primer, biće u oblasti koja je prihvatljiva za elektronske komponente. Ono što će da se vidi na fotodiodi, upravo ovaj signal na frekvenciji 3,3 Mhz. Zatim vršimo u električnom domenu analizator spektra ili jeftiniji način da vidimo koja je frekvencija u pitanju. Tu vidimo iz frekvencijskog pomaka brzinu kretanja fluida. Ako se fluid kreće u jednom smeru ili drugom, biće ista frekvencije. Bez akustooptičkog modulatora ne možemo odrediti smer. On služi da promeni frekvenciju svetlosti. Piezoelektrična pločica koju pobudjujemo sinusom i na njoj se formira talas. Taj talas pravi difrakcionu rešetku i pošto se taj talas kreće imamo doplerov pomak. Služi da dobijemo pik na frekvenciji modulatora, a onda u zavisnosti da li se pik nalazi sa desne ili leve strane, možemo da odredimo smer.

Problem. Količina rasejane svetlosti je mala. Ako želimo dovoljno rasejane svetlosti ugao ne sme da bude prevelik. Centri rasejanja imaju manju komponentu brzine koja odlučuje doplerov pomak, dakle mala modulacija. Ovo se manje koristi, od diferencijalne postavke:

Doppler Difference Velocimetry (DDV)

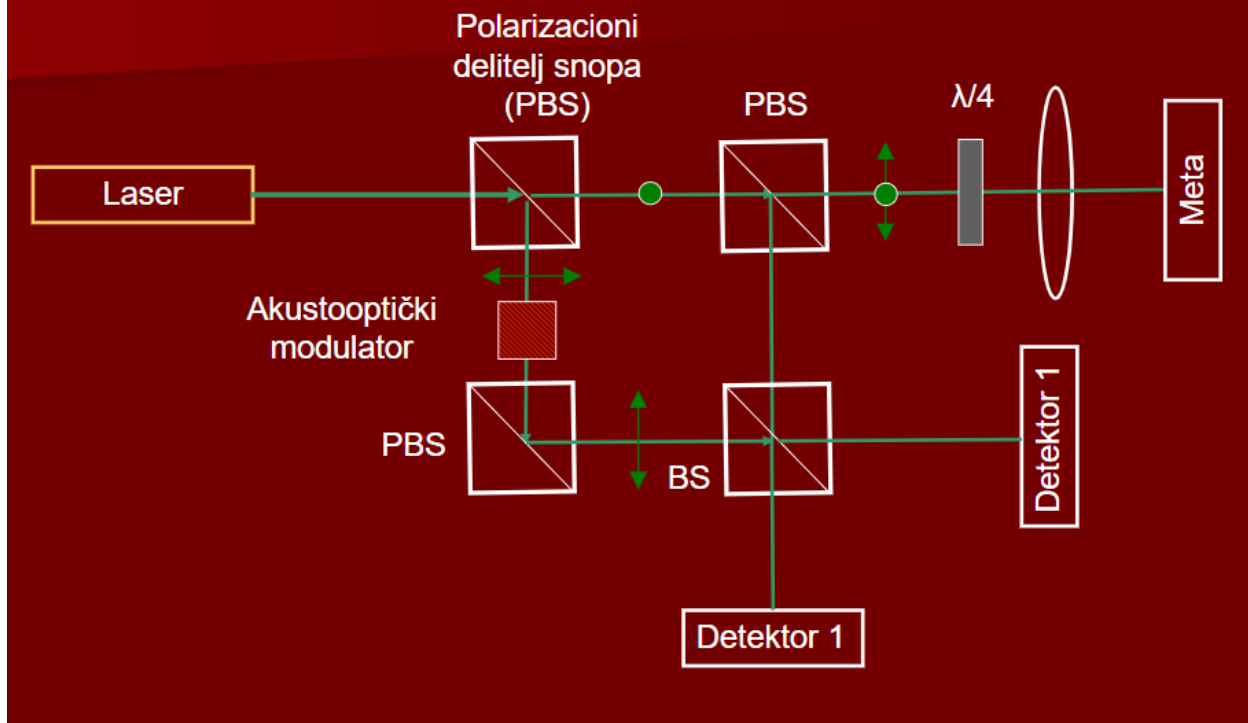


Koristimo jedan laser, čiju svetlost podelimo na dva snopa. Zatim ih pomoću sočiva ukrstimo tako da se seku u jednoj oblasti prostora. Ukoliko u toj oblasti prostora imamo protok fluida, praćenjem rasejane svetlosti, možemo ponovo po principu izbijanja dobiti vrednost pomeraja u frekvenciji odnosno brzine.

Generalna priča svih ovih protokometra je *zasejanje protoka*. Ako imamo neki fluid koji ima sitne čestice. Količina rasejane svetlosti će biti suviše mala. Moramo ubaciti čestice koje će biti centri rasejanja svetlosti. Ako su prevelike, masa i veličina im ne dozvoljava da njihova brzina bude identična brzini fluida. Ako su premale onda će rasejanje biti malo. Veoma je dakle bitan taj odabir.

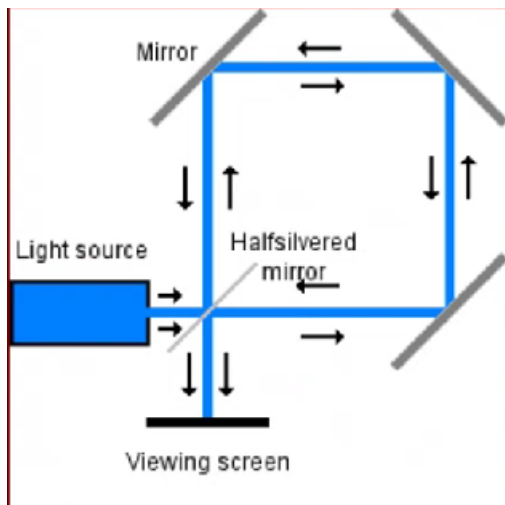
Vibrometar. Veoma sličan akcelometru. Merač ubrzanja, odnosno oscilacija. Imamo čvrstu metu. Rasejanje nije problem. Opšta postavka:

Vibrometri



Koristimo laserski snop kao pobudu i pomoću polarizacionog delitelja snopa, razdvojimo dve polarizacije. Jedna je obeležena kružicom, a upravnu linearnu strelicom. Strelica će služiti kao referentna grana, a ova druga merna, pošto ide na metu. Akustooptički modulator opet služi za određivanje smera kretanja. Ukoliko posmatramo mernu granu, idemo na lambda četvrtisnku pločicu, linearna polarizacija postaje cirkularna, fokusiramo na metu, svetlo se reflektuje, kružna polarizacija prolazi kroz lambda četvrtisnku pločicu, postaje linearna polarizacija koja se razlikuje od prvobitne zbog promeni faze u refleksiji za π . Postaje strelica, dakle ista kao u referentnoj grani. Da bismo imali izbijanje, moramo imati iste linearne polarizacije. Ortogonalne polarizacije neinterferiraju i neće biti izbijanja. Pomoću delitelja snopa šaljemo jedan deo ovde, drugi onde, isto se dešava sa ovom, i praktično imamo i ovde i ovde izbijanje. Dva izlaza su nam zgodna, za merni snop pri transmisiji nema promene faze, u refleksiji imamo promenu faze, i ova dva izlaza će biti protivfazna. Ako se ostvari ovde maksimum, ovde minimum, možemo uraditi delta sigma normalizaciju. Na osnovu ove postavke možemo da odredimo frekvenciju oscilovanja i amplitudu mete.

Žiroskop meri ugaonu brzinu. Mehanički žiroskop funkcioniše na ovaj način: ako zamislimo da su trenje u svim ležištima nula, ukoliko zavrtnemo disk, osa rotacije uvek mora da bude na istom pravcu. Kako god da pomeramo postolje: nulto trenje, imamo nulti momenat sile i ne možemo da promenimo moment impulsa, moment impulsa je vektor. Početni pravac upravan na disk će biti stalno isti. Možemo da merimo odstupanje od tog početnog pravca i samim tim možemo meriti ugaonu brzinu. Znajući ugaonu brzinu možemo da radimo navigaciju u avionima, tj. da znamo gde se nalazimo. Veza između mehaničkog i optičkog žiroskopa: Sanjakov efekat

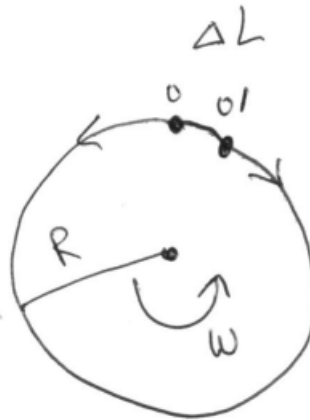


Ako imamo izvor svetlosti koji se nalazi na rotirajućoj platformi, ukoliko zarotiramo platformu, da li će dolaziti do promena frekvencije, tj. da li će pozicija interferometarskih pruga zavistiti od ugaone brzine? Da. Postoji fazna razlika između zraka koji se kreću clockwise i counter-clockwise i ta posledica je posledica rotacije, odnosno ugaone brzine. Klasična i relativistička fizika ovde daju isti rezultat. Ovde tretiramo neinercijalni referentni sistem, znači svaki sistem koji rotira će biti neinercijalni referentni sistem. U pitanju je čista vremenska zavisnost, odnosno u relativističkoj fizici možemo da kažemo da istovremenost ne postoji. Translatorna priča bi bila Čovek u vagonu i čovek pored pruge. Pretpostavimo da se vagon kreće i da postoje ogledala. Baš kad su se njih dvojica poravnali, čovek u vagonu stvori neki svetlosni impuls. U odnosu na ogledala svetlost uvek ide brzinom c , ali dok svetlost stigne do ogledala, voz se pomeri za mrvicu. Za onog u vagonu, oba svetlosna impulsa se vraćaju isto vreme. Ali za onog ko stoji van vagona, prvo će stići jedan impuls sa jednog ogledala, pa onda će drugi. Dakle, istovremenost zavisi od koordinatnog sistema. Da bismo analizirali sanjakov efekat, odnosno našli fazni pomak, možemo uraditi jedno izvođenje:

Znači, pozicija interferometarskih pruga zavisi od ugaone brzine. Postoji fazni pomak između dva zraka. Postoje dva pristupa:

- Vremenski (dva zraka se kreću istim brzinama po različitim putanjama)
- Prostorni (Doplerov efekat – isto pitanje, ali promena talasne dužine)

Imamo vlakno koje se zatvara samo u sebe. Pretpostavimo da ovo vlakno rotira ugaonom brzinom ω . Pretpostavimo da u početnom trenutku iz ove tačke O **krenu dva svetlosna talasa**. Ako posmatramo zrak koji ide clockwise, vraća se u tačku O' jer se čitava kontura malo rotirala za vreme obilaska oko konture. Vreme do O' prim biće



$$t_1 = \frac{(2\pi \times R + \Delta L_1)}{c} \quad \Delta L_1 = R \times \omega \times t_1$$

Dobijamo t_1 iz ove dve jednačine.

Slično računamo vreme obrta i drugog impulsa, samo što u izrazu za t_2 , ΔL_2 dolazi sa predznakom minus.

Računamo razliku ova dva vremena i ako zanemarimo brzinu $r \times \omega$ koja je mnogo manja od brzine svetlosti, dobijamo:

$$\Delta t = t_1 - t_2 = 2R\pi \frac{c + R\omega - c + R\omega}{c^2 - (R\omega)^2}$$

$$= \frac{4\pi R^2 \omega}{c^2 - (R\omega)^2} \approx \frac{2\pi R^2 \omega}{c^2} = \frac{4A}{c^2} \omega$$

Vremenska razlika se pretvara ovako u faznu razliku:

$$\Delta \phi_s = \frac{2\pi c}{\lambda} \Delta t = \frac{8\pi A}{\lambda c} \omega$$

Fazna razlika između ova dva svetlosna talasa biće linearno srazmerna sa ugaonom brzinom. Dobijamo optički žiroskop uz pomoć kog možemo odrediti ugaonom brzinu. Na ovaj način možemo raditi navigaciju.

Postoje dve realizacije. Ring Laser Gyro i Fiber Optic Gyro. Jedna realizacija je laser u slobodnom prostoru. Osetljivost je dosegla do 0,001 stepen po času.

Fiber Optic Gyro ima slabije performanse, 0,1 stepen po času, ali u principu nisu konkurencija jedan drugom. Fiber optic je manji i jeftiniji i koristi se u automobilske industriji. Ring Laser Gyro se koristi u avionima i raketama i u gps sistemima. Najveći merni opseg kod fiberoptičkih senzora. Efekat potpuno nezavisan od propagacije kroz određenu sredinu. Dok se svi ostali efekti optički oslanjaju na modulaciju osobina sredine, ovde imamo efekat koji je nezavisan od sredine. Svaka interakcija sa materijalom je nepoželjna i doprinose šumu. Akustičke talase ne bi mogli koristiti za ovo, znači za isti fazni pomak, potrebna nam je ista frekvencija kao kod svetlosti.

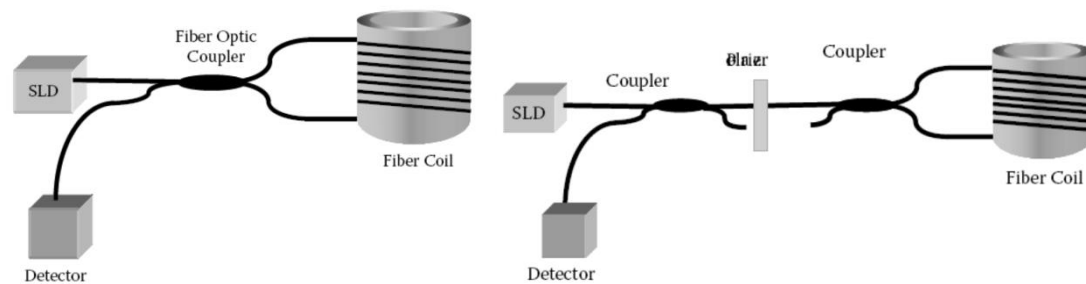
Naša dva zraka CW i CCW će se razlikovati u fazi. Određujemo faznu razliku interferometrom. Ovakva geometrija interferometra se nazivaju Sanjakovi interferometri.

$$I = I_0 [1 - \cos(\phi_s)] \quad \phi_s = \frac{8\pi A N \Omega_p}{\lambda c}$$

$$\Omega_p = \Omega \cos \psi$$

$$\phi_s = \frac{8\pi A \Omega_p}{\lambda c} \quad \phi_s = \frac{8\pi A \Omega_p}{\lambda c} n^2 \quad \phi_s = \frac{8\pi A \Omega_p}{\lambda c} (n^2 - 1)$$

Problemi: osnovna konfiguracija ne radi, minimalna konfiguracija koja radi je recipročna rekonfiguracija. Morali su da ubace dva kaplera, da bi i cw i ccw, tj. oba zraka recipročno prolazili,



Osnovna konfiguracija

Recipročna konfiguracija

odnosno na isti način prolazili kroz druge komponente. Takođe, svaka svetlost koja se raseje kada je na proizvoljnom mestu, i stigne do detektora će da učestvuje u ovoj priči, znači nama zapravo svaka svetlost, ne mora da se reflektuje, odnosno da predje celu optičku putanju i da se reflektuje negde i vrati na isto mesto. To sprečavamo ako bismo umesto lasera koji svetli kontinualno, opalili optički impuls, onda svetlost koja je reflektovana na pola puta, će se vratiti u pogrešnom vremenskom trenutku. Ako merimo u određenim vremenskim trenucima, izbegemo problem rasejane svetlosti. Moramo da koristimo izvor koji ima usku autokorelacionu funkciju. Međutim zgodnije da umesto impulsnog lasera, usku autokorelacionu funkciju možemo da imamo ako koristimo izvor sa malom dužinom koherencije. Interferencionih efekata nema kada je razlika u optičkoj dužini puta veća od dužine koherencije. Svetlost koja se reflektuje na pola puta će imati značajno veću razliku u optičkoj dužini puta od dužine koherencije. Ali cw i ccw će u recipročnoj konfiguraciji sa nultom ugaonom brzinom imati iste pređene pute. Samo će oni

učestvovati u interferenciji, zato se za fiberoptičke ziroskope se koriste izvori sa malom dužinom koherencije.

Sanjakov efekat je nerekipročan efekat. Svi ostali nerekipročni efekti će stvarati faznu razliku. Npr. magnetno polje upravno na ova optička vlakna će stvoriti faznu razliku koju ne možemo da izdvojimo od fazne razlike koja je uzrokovana Sanjakovim efektom. Faradejev efekat, Kerov..

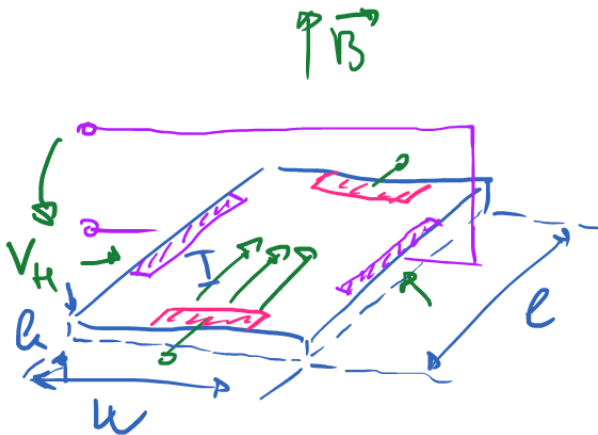
Problem izčežavajuće osetljivosti. U isto vreme senzor držimo u istoj nultoj radnoj tački i rešavamo se nelinearnosti i ovog problema.

Ugrađivanjem fiberoptičkih senzora u kompozitne materijale možemo odrediti integritet strukture. Ako trpi silu materijal, odziv fiberoptičkog senzora će se menjati u zavisnosti od deformacije materijala.

ZADACI:

1. Holov senzor zadatak:

- Za osetljivost $S = 60 \mu\text{V/G}$, odrediti struju napajanja I .
 - Odrediti napon ofseta i pojačanje diferencijalnog pojačavača za kondicioniranje signala
- Napomena: Gaus je oznaka za magnetsku indukciju: $1 \text{ G} = 0.1 \text{ mT}$,



Slika 1. Holov senzor

$\mu_n = 1500 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ - pokretljivost većinskih nosilaca

$n = 2.5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ – koncentracija većinskih nosilaca

$h = 12 \mu\text{m}$ – debljina poluprovodnika

$q = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ – elementarno naelektrisanje nosioca

Slika 2. Parametri Si n-poluprovodnika

Imamo poluprovodnik kroz koji puštamo struju I i ukoliko imamo dejstvo vektora magnetske indukcije B upravno na poluprovodnik očekujemo da će doći do skretanja naelektrisanja ka elektrodama na kojima merimo Holov napon V_h koji se formira usled skretanja naelektrisanja. On iznosi:

$$V_h = \frac{R_h \times (I \times B)}{h}$$

Gde je R_h Holova konstanta koja iznosi:

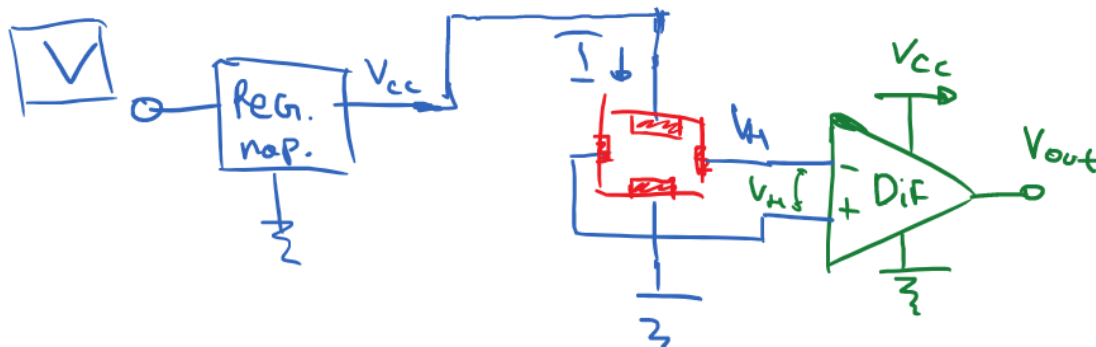
$$R_h = \frac{\mu}{\sigma} = \frac{1}{n \times q} = 2500 \text{ cm}^3 \times \text{C}^{-1}$$

Gde je sigma provodljivost. Holova konstanta srazmerno određuje osetljivost senzora. Red veličine napona koji mogu da se generišu za standardne magnetske indukcije manje od mT su mikrovolti ili desetine mikrovolta. Što imamo veću struju to imamo veću osetljivost, ali u nekom

trenutku bi imali negativan efekat zato što raste temperatura i kvare se ostale osobine. Pretpostavljamo da je temperatura konstantna u ovom zadatku. Izraz za osetljivost glasi:

$$S = \frac{V_h}{B}$$

Računamo struju : $I = 2.88 \text{ mA}$.



Slika 3. Konfiguracija merenja Holovog napona

U poluprovodnik ulazi struja koja napaja Holov senzor. Ona dolazi sa naponskog izvora koji možemo da povežemo na neki regulator napona. Često u senzorima imamo stabilizator napona koji se nalazi u samom kućištu. Ulazni napon koji dovedemo na senzor ide preko regulatora i imamo definisanu vrednost napona V_{cc} i on uvek neovisno od toga koji mi napon dovedemo na ulaz, dok ne preteramo, on će ga uvek regulisati na V_{cc} i neće se karakteristike Holovog senzora menjati. U praksi, nećemo uvek imati mogućnost da menjamo struju kroz senzor. Holov napon treba pojačati preko diferencijalnog pojačavača. B je u opsegu $(-150, 150) \text{ mT}$, a izlazni napon pojačavača računamo kao $V_{out} = V_h \cdot A + V_{of}$. Treba da nadjemo A i V_{of} tako da ovaj pojačavač funkcioniše kako treba. V_{cc} je dato određenom referencom A/D konvertora (bolje rade kad im dajemo stabilan napon) i recimo da je ona 4096 mV . Tada je $V_{of} = 2048 \text{ mV}$. Za nulti holov napon imamo 2048 mV , za negativne holove napone idemo ka 0, a za pozitivne idemo ka V_{cc} . Pojačanje nalazimo :

$$B_{max} = 150 \text{ mT} \Rightarrow A \cdot V_{hmax} + V_{of} = V_{cc} \Rightarrow A = 22,76.$$

2. Dva ravanska harmonijska svetlosna talasa iste talasne dužine λ prostiru se duž pravca određenim ortovima $\mathbf{n}_1$ i $\mathbf{n}_2$. Neka su oba talasa linearno polarizovana i to tako da su vektori električnog polja paralelni. Neka su iradijancije I_1 i I_2 . Odrediti iradijansu resultantnog talasa ako je fazna razlika ova dva koherentna izvora $\Delta\phi$.

Interferencija je superpozicija dva talasa koji imaju iste talasne dužine. Lako ju je ostvariti kada imamo laser, pošto je svetlost lasera koherentna. Interferencija zavisi od fazne razlike. Na fizičkom principu se sabiraju električna polja, a mi vidimo iradijanse. Moramo da krenemo od izraza za električna polja.

Rezultantno električno polje dobija se superpozicijom dva polja:

$$\vec{E}_r = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 = \vec{E}_{01} \sin(k\vec{n}_1\vec{r} - \omega t + \varphi_1) + \vec{E}_{02} \sin(k\vec{n}_2\vec{r} - \omega t + \varphi_2) \quad (1)$$

Kako je $I \sim \overline{E^2}$, kada se izraz (1) kvadrira, zatim iskoristi relacija

$$\sin \alpha \sin \beta = \frac{1}{2} [\cos(\alpha - \beta) - \cos(\alpha + \beta)],$$

i dobijeni izraz usrednji po jednoj periodi za iradijansu rezultantnog talasa se dobija:

$$I_r = I_1 + I_2 +$$

$$\vec{E}_{01} \cdot \vec{E}_{02} \cos [k(\vec{n}_1 - \vec{n}_2) \cdot \vec{r} + \Delta\varphi] \quad (2)$$

gde je:

$$I_1 = \overline{E_1^2} = E_{01}^2 \overline{\sin^2(k\vec{n}_1\vec{r} - \omega t + \varphi_1)} = \frac{E_{01}^2}{2} \quad (3)$$

jer je:

$$\frac{1}{T} \int_0^T \sin^2(\alpha - \omega t) dt = \frac{1}{2}.$$

Vektori električnog polja su kolinearni pa je iz (3)

$$\vec{E}_{01} \cdot \vec{E}_{02} = E_{01} E_{02} = \sqrt{2I_1} \sqrt{2I_2} \quad (4)$$

Konačno je iz (2) i (4)

$$I_r = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta \quad (5)$$

gde je:

$$\delta = \left[\frac{2\pi(\vec{n}_1 - \vec{n}_2) \cdot \vec{r}}{\lambda} + \Delta\varphi \right] \quad (6)$$

3. Ako svetlosni talasi iz predthodnog zadatka imaju istu početnu fazu(tj. $\Delta\varphi = 0$), a prostiru se duž y, odnosno x-ose, tj. $\mathbf{n}_1 = \mathbf{e}_y$, a $\mathbf{n}_2 = \mathbf{e}_x$, odrediti mesta gde iradijansa ima minimume i maksimume. Kolika je vrednost iradijanse na tim mestima?

Prema relaciji (5) prethodnog zadatka minimumi iradijanse se dobijaju kada je $\cos\delta = -1$, odnosno za $\delta = \pm\pi, \pm3\pi, \dots$. Na osnovu relacije (6) prethodnog zadatka ovaj uslov je ispunjen na mestima gde je:

$$\frac{2\pi(\vec{e}_y - \vec{e}_x) \cdot \vec{r}}{\lambda} = (2m + 1)\pi,$$

gde je $m = 0, \pm1, \pm2, \dots$. Kako je $(\vec{e}_y - \vec{e}_x) \cdot \vec{r} = y - x$, minimumi se dobijaju u ravnima normalnim na xOy ravan, a čiji je presek sa ovom ravni dat relacijom:

$$y = x + (2m + 1)\frac{\lambda}{2}.$$

Na ovim mestima imamo da je vrednost iradijanse:

$$I_{\min} = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2}.$$

Maksimumi se dobijaju na mestima gde je ispunjen uslov $\cos\delta = 1$, odnosno za $\delta = 0, \pm2\pi, \pm4\pi, \dots$. Ovaj uslov ponovo definiše ravni normalne na ravan xOy , a mesta preseka su prave:

$$y = x + m\lambda.$$

Maksimalna iradijansa iznosi:

$$I_{\max} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}.$$

4. Vidljivost (ili kontrast) interferencionih pruga je veličina koja se definiše izrazom:

$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$$

Odrediti vidljivost interferencionih efekata u primeru prethodnog zadatka. Kada je vidljivost maksimalna i koliko tada iznosi?

Koristeći izraze za $I_{\max}$ i $I_{\min}$ dobijene u prethodnom zadatku sledi:

$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = \frac{2\sqrt{I_1 I_2}}{I_1 + I_2}.$$

Maksimalna vrednost za V se dobija kada su intenziteti (odnosno amplitude) talasa koji interferiraju jednaki, tj. $I_1 = I_2$, i tada je $V = 1$. Inače, što je veća razlika u intenzitetima interferirajućih zraka to su efekti interferencije slabije izraženi.

Dodatak:

$$\begin{aligned} \delta(\Delta\varphi = \phi) &= \Delta \frac{2\pi}{\lambda} \quad (\vec{m} \rightarrow \vec{r}) \\ &= \frac{2\pi}{\lambda_0} (m_1 s_1 - m_2 s_2) \end{aligned}$$

Merenje sa manjom talasnom dužinom daje veću rezoluciju.

Ukoliko smo ostvarili idealnu situaciju da smo snop podelili 50-50, onda možemo izlaz interferometra da napišemo u ovom obliku:

$$I_1 = I_2 = I_0 = \frac{I_0'}{2}$$

$$I_r = 2 I_0 + 2 \sqrt{I_0^2} \cos \delta =$$

$$= 2 I_0 (1 + \cos \delta) =$$

$$= I_0' (1 + \cos \delta)$$

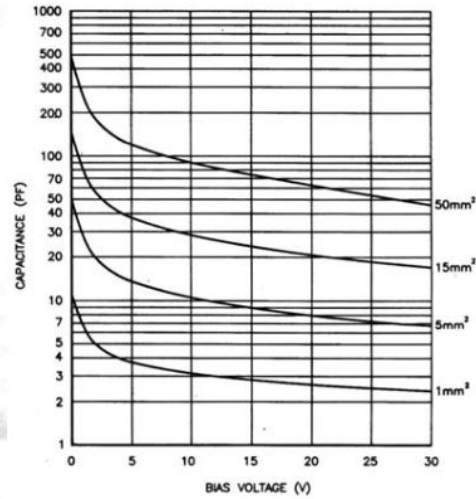
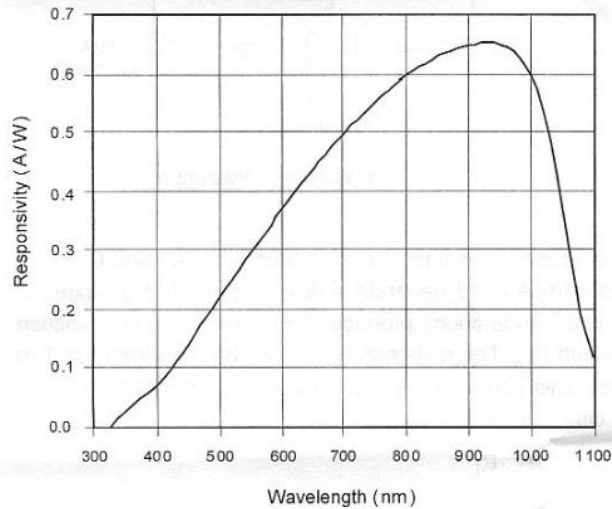
Prenosna funkcija kosinusna i nelinearna. Kosinus ima nultu osetljivost pri interferencijama gde nema fazne razlike. Kosinus u nuli ima nultu osetljivost, a sinus u nuli ima maksimalni nagib, pa imamo želju da ova funkcija bude sinus delta. Fizički to radimo tako što unesemo u mernu granu dodatnu dužinu fibera da unesemo faznu razliku od $\pi/2$.

5. Merna glava fiberoptičkog senzora magnetnog polja koji radi na principu Faradejevog efekta sastoji se od dva polarizatora između kojih se nalazi Faradejev kristal.

a) Odrediti ugao između transmisionih osa polarizatora tako da je osetljivost merne glave najveća.

b) Za takvu konfiguraciju odrediti vrednost transimpedansnog otpornika R_f tako da je napon u odsustvu polja na izlazu transimpedansnog stepena 2V. Izvor svetlosti je LED, snage 1mW na talasnoj dužini od 650nm. Osetljivost fotodiode je data na grafiku. Smatrati da je refleksija na svim razdvojnim površinama 4%, a da je apsorpciju moguće zanemariti.

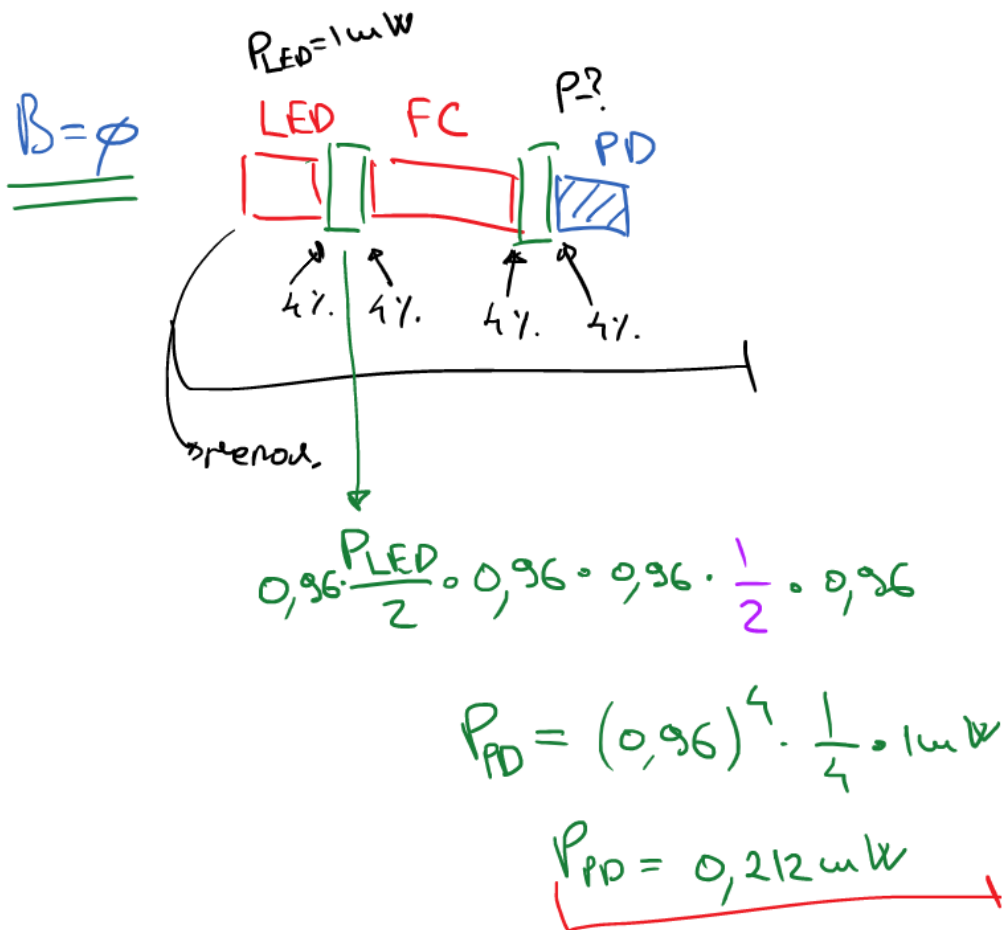
c) Odrediti propusni opseg nekompensovanog transimpedansnog pojačavača ako je kapacitivnost fotodiode data na grafiku (dioda površine 50mm²) a dioda je nepolarisana. GBW = 1MHz



Rešenje:

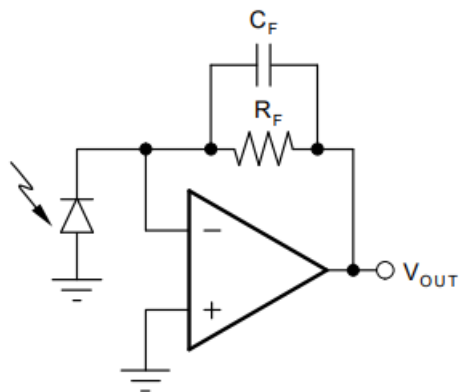
a) Izvođenje se nalazi u delu koji opisuje rad fiberoptičkih senzora magnetnog polja

b) Biramo R_f tako da na izlazu imamo 2V u situaciju kada nemamo magnetsko polje. Računamo kolika optička snaga dolazi do fotodiode. Imamo četiri razdvojne površine (gubimo po 4% vrednosti na svakoj), nakon prvog polarizatora gubimo polovinu optičke snage (pošto je nepolarizovan izvor) i nakon analizatora koji je pod uglom od 45° stepeni snaga je pomnožena sa $\cos^2(45^\circ)$ koje iznosi $1/2$:



Da bismo dobili fotostruju I_{ph} koja se generiše u fotodiodi, očitavamo responsivnost za datu talasnu dužinu na prvom grafiku. Responsivnost predstavlja količnik fotostruje od upadne snage.

$$I_{ph} = R(\lambda) \times P_{pd}$$



$$V_{out} = R_f \times I_{ph}$$

$$R_f = 21 \text{ k}\Omega$$

Po standardu E12, biramo $R_f = 22 \text{ k}\Omega$.

- c) Očitavamo C_d , tj. kapacitivnost diode sa grafika. Znamo da je $V_{\text{polarizacije}} = 0$ jer je dioda nepolarisana. $C_d = 500 \text{ pF}$

$$f_p \approx \sqrt{\frac{GBW}{2\pi R_f C_D}}$$

$$f_p = (2\pi R_f C_f)^{-1}$$

C_f dobijamo iz ovoga da je 60 pF i prema E12 biramo 68 pF .

6. Rešetka sa kratkim periodom (FBG) formira se upisivanjem prostoperiodične promene indeksa prelamanja, gde je minimalni indeks prelamanja $n_{\min} = 1.5$, a maksimalna promena je 6%.

a) Odrediti efektivni indeks prelamanja

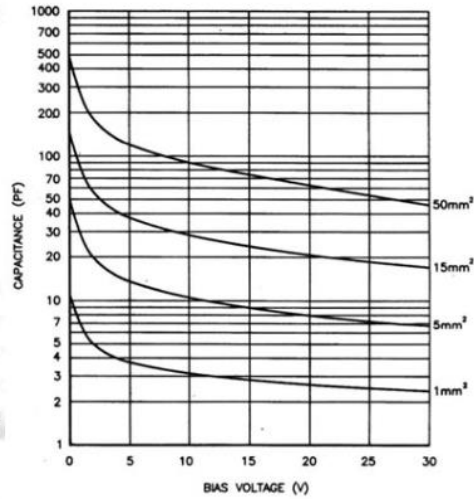
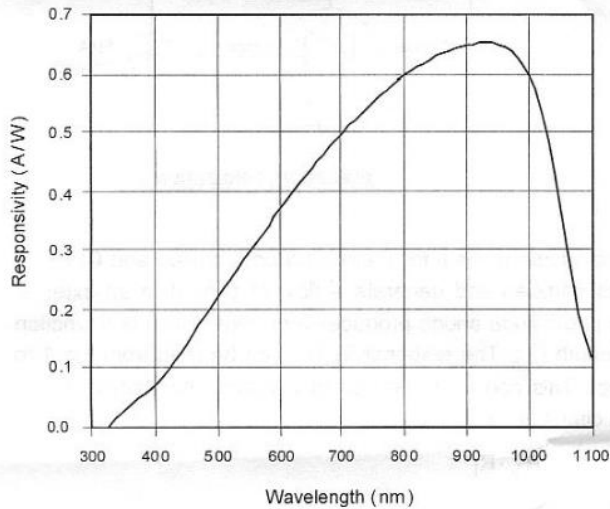
b) Odrediti period rešetke tako da je Bragova talasna dužina $\lambda_b = 632 \text{ nm}$

c) Predložiti šemu za lateralno filtriranje korišćenjem fotodiode sa strmim nagibom osetljivosti

d) PiN fotodiode, čije su karakteristike prikazane na slici, i koja je povezana u kolo transimpedansnog pojačavača koristiti se kao fotodetektor senzora naprežanja na principu Bragovih rešetki u vlaknima. Ako je Bragova talasna dužina nenapregnute rešetke $\lambda_b = 632 \text{ nm}$, odrediti transimpedanski otpornik tako da je izlazni napon V_{out} oko 1 V . Pretpostaviti da svetlosni izvor u opsegu talasnih dužina 628 nm do 638 nm ima ravnu spektralnu karakteristiku, da je ukupna optička snaga izvora $P_o = 100 \text{ mW}$, a da je refleksija u okolini Bragove talasne dužine, $\pm 0.5 \text{ nm}$, 30%.

e) Odrediti osetljivost senzora na naprežanje $dV_{\text{out}}/d\epsilon$, ako se Bragova talasna dužina menja po zakonu:

$$\Delta\lambda/\lambda_0 = k * \epsilon + \alpha * \Delta T, \text{ gde su } k \text{ i } \alpha \text{ poznate konstante.}$$



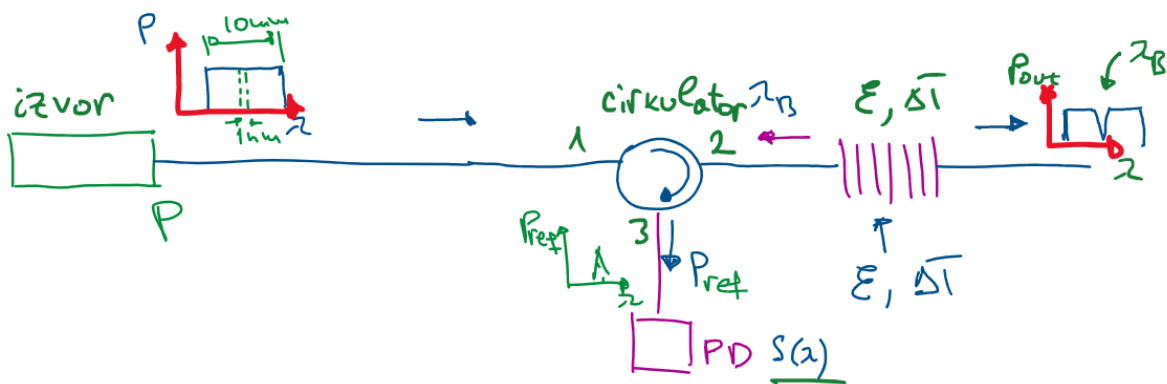
Rešenje:

a) $n_{\max} = n_{\min} \times 1.06$

$n_{\text{eff}} = (n_{\min} + n_{\max}) / 2 = 1.545$

b) $\Lambda = \lambda_b / (2 \times n_{\text{eff}}) = 204.5 \text{ nm}$

- c) Naprezanje ili zagrevanje menja Bragovu talasnu dužinu. Moramo konvertovati tu promenu talasne dužine u promenu neke druge veličine. Koristićemo fotodiodu sa strmim nagibom osetljivosti:



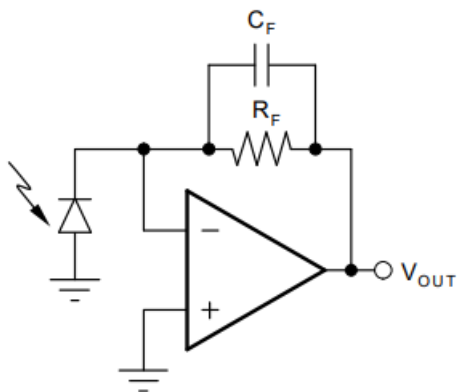
Imamo izvor i to je izvor šireg spektra. Zavisnost optičke snage od talasne dužine je prikazana pored izvora. Pošaljemo ga ka Bragovoj rešetci i pretpostavimo da će svetlost na izlazu biti takva da je skoro ista kao ulazni spekar, ali će faliti deo spektra koji se reflektovao ka nazad. Zgodno ga je poslati ka fotodiodu. Responsivnost fotodiode zavisi od talasne dužine. Ako pretpostavimo da je za sve ove okolne talasne dužine snaga konstantna, onda promena u talasnoj dužini koja se reflektuje sa Bragove rešetke nazad i pada na fotodiodu se direktno prebacuje u promenu izlazne struje fotodiode koja nije posledica promene optičke snage (svuda je ista), nego promenu talasne dužine, pa samim tim i promenu responsivnosti. Merimo reflektovanu svetlost uz pomoć optičkog cirkulatora. On obezbeđuje da šta je ušlo na prvi port, izlazi na drugi port. Ono što se vraća na drugi port, ide na treći, kao reflektovana svetlost.

d) Kada nema naprezanja, Bragova talasna dužina je tačno na sredini opsega sa ravnom spektralnom karakteristikom:

$$P_{632} = (100 \text{ mW} \times 1 \text{ nm}) / 10 \text{ nm} = 10 \text{ mW}$$

$$P_{\text{ref}} = P_{632} \times 0.3 = 3 \text{ mW}$$

$$S(632 \text{ nm}) = 0.4 \text{ A/W}$$



$$R_f = V_{\text{out}} / (P_{\text{ref}} \times S(\lambda)) = 0.833 \text{ k}\Omega$$

Po E12, biramo 1 k Ω .

e) Kompenzovali smo temperaturu i merimo samo naprezanje.

$$dV_{\text{out}}/d\epsilon = (dV_{\text{out}}/d\lambda) * (d\lambda/d\epsilon)$$

Prvi množilac je određen metodom merenja, a drugi je određen senzorom, ali su oba u korelaciji.

$$d\lambda = k * \lambda_0 * d\epsilon, \quad \lambda_0 = 632 \text{ nm},$$

$$d\lambda/d\epsilon = k * 632 \text{ nm}$$

Dalje, računamo drugi množilac:

$$d/d\lambda * (R_f * S(\lambda) * P_{ref}) = R_f * P_{ref} * dS/d\lambda$$

P_{ref} je uvek konstantno u opsegu dužina gde je ravna spektralna karakteristika.

$dS/d\lambda$ je gotovo linearan nagib u opsegu merenja, pa vršimo linearnu aproksimaciju:

$$dS/d\lambda = (0.5 \text{ A/W} - 0.375 \text{ A/W}) / (700 \text{ nm} - 600 \text{ nm}) = 1.25 \text{ mA/Wnm}$$

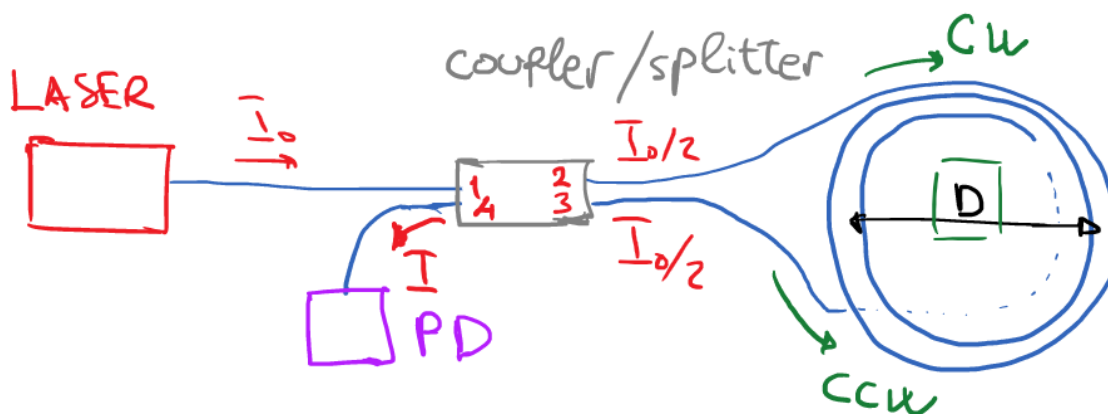
$$dV_{out}/d\lambda = 3.75 \text{ mV/nm}$$

$$dV_{out}/d\epsilon = (dV_{out}/d\lambda) * (d\lambda/d\epsilon) = k * 2.37 \text{ V}$$

7. Imamo osnovnu konfiguraciju fiberoptičkog žiroskopa. Imamo koherentan izvor svetlosti: laser, čiji zrak vodimo do Sanjakovog interferometra. Kapler deli snop na dva talasa jednakog intenziteta. Dobićemo dva kontrapropagirajuća snopa koji se prostiru kroz vlakno. Jedan ide u smeru kazaljke na satu, drugi suprotno. Kada se snopovi vrate nazad, ukombinuju se po relaciji:

$$I = I_0 * (1 - \cos(\Delta\phi)),$$

Gde je '–' posledica faznog pomaka $\Delta\phi$ zbog kaplera:



Da bi fazna razlika bila dovoljno velika, vlakno koje spaja portove 2 i 3 se namotava da bi bilo dovoljno dugačko. Namotano je na cilindar prečnika $D = 10 \text{ cm}$ sa ukupnom dužinom od $L = 200 \text{ m}$. Pušta se svetlo talasne dužine $\lambda = 633 \text{ nm}$. Odredi $\Delta\phi$ za ugaonu rotaciju zemlje $\omega_z = 15^\circ/\text{h}$

Rešenje:

$$\omega_z = (15^\circ/180^\circ) * \pi * 3600 = 72.7 \text{ } \mu\text{rad/s}$$

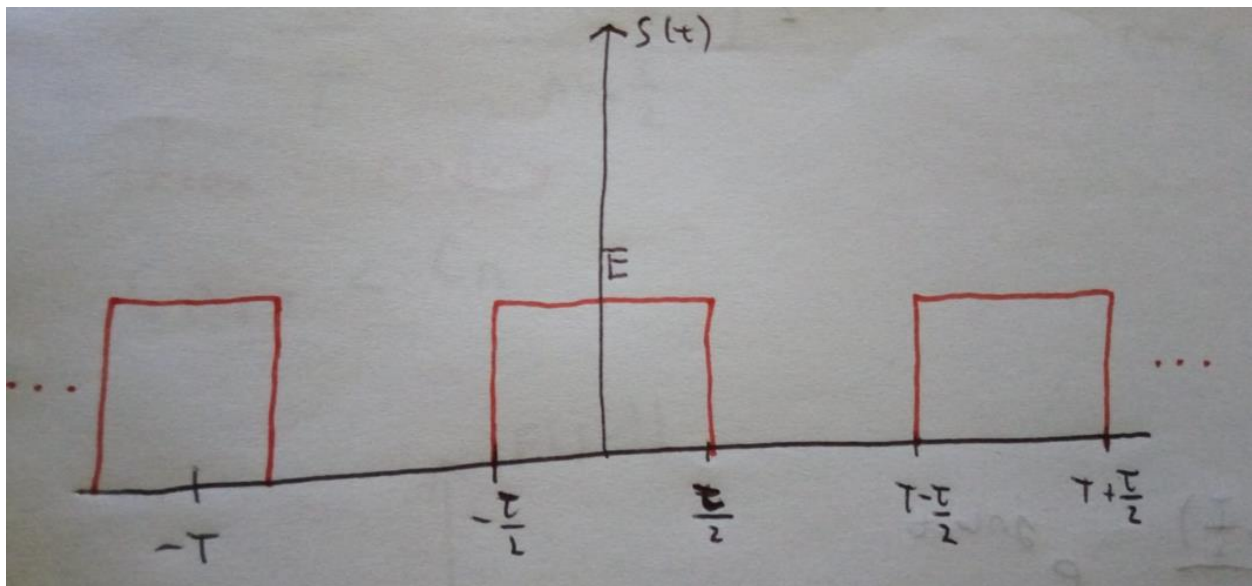
$$A = (D/2)^2 * \pi$$

$$N = L/D * \pi$$

$$\Delta\varphi = (8 * \pi * A * N * \omega_z) / (\lambda * c) = 48 \mu\text{rad}$$

Gde je c brzina svetlosti.

8. Spektar $F(j\omega)$ signala $f(t)$ je ograničen i zauzima učestanosti $|\omega| \leq \omega_m$. Pronaći spektar $X(j\omega)$ signala $x(t) = f(t)s(t)$ ako je $s(t)$ periodična povorka impulsa:



Ako se signal $x(t)$ dovede na ulaz idealnog filtra propusnika niskih učestanosti funkcije prenosa $H(j\omega) = 1$, za $|\omega| \leq \omega_m$ i $H(j\omega) = 0$, za $|\omega| > \omega_m$. Pokazati da se na izlazu filtra dobija neizobličen signal $f(t)$, ako važi $T \leq 1/2f_m$, gde je f_m maksimalna frekvencija u signalu, a T period odabiranja

Rešenje:

Шенонова Теорема (Никвистова) !

$$S(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} S_n e^{jn\omega_0 t} \quad \omega_0 = \frac{2\pi}{T}$$

$$S_n = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} S(t) e^{-jn\omega_0 t} dt = \frac{E}{T} \int_{-T/2}^{T/2} e^{-jn\omega_0 t} dt =$$

$$= \frac{-E}{T} \cdot \frac{1}{jn\omega_0} \left[e^{-jn\omega_0 \frac{T}{2}} - e^{+jn\omega_0 \frac{T}{2}} \right] =$$

$$= \frac{E}{jn\omega_0 T} \cdot 2j \sin(n\omega_0 \frac{T}{2}) = \frac{\sin(n\omega_0 \frac{T}{2})}{n\omega_0 \frac{T}{2}} \cdot \frac{2E \frac{T}{2}}{T} \Rightarrow$$

$$S_n = \frac{ET}{T} \cdot \frac{\sin(n\omega_0 \frac{T}{2})}{n\omega_0 \frac{T}{2}}$$

Ако се у питању поворка Диракових импулса

$$T \rightarrow 0 \quad \wedge \quad \underset{\substack{\text{конст.} \\ \text{површина}}}{ET} \rightarrow 1 \quad \Rightarrow \quad \frac{\sin(n\omega_0 \frac{T}{2})}{n\omega_0 \frac{T}{2}} \rightarrow 1$$

$$S_{nD} = \frac{1}{T}$$

$$S(t) = \frac{T}{T} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \frac{\sin(n\omega_0 \frac{T}{2})}{n\omega_0 \frac{T}{2}} e^{jn\omega_0 t}$$

$$\mathcal{F}(f(t)) = F(j\omega)$$

ТРАЖИМО ФТ Ф-ж која је добијена
SAMPLE-ОВАЊЕМ

$$X(t) = f(t)S(t)$$

$$F(X(t)) = X(j\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt =$$

$$= \int_{-\infty}^{+\infty} \left(\frac{T}{T} \sum_{-\infty}^{+\infty} \frac{\sin(n\omega_0 \frac{T}{2})}{n\omega_0 \frac{T}{2}} e^{jn\omega_0 t} \right) f(t) e^{-j\omega t} dt$$

$$X(j\omega) = \frac{T}{T} \sum_{-\infty}^{+\infty} \frac{\sin(n\omega_0 \frac{T}{2})}{n\omega_0 \frac{T}{2}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{jt(n\omega_0 - \omega)} dt$$

$$= \frac{T}{T} \sum_{-\infty}^{+\infty} \frac{\sin(n\omega_0 \frac{T}{2})}{n\omega_0 \frac{T}{2}} \underbrace{\int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-j(\omega - n\omega_0)t} dt}_{F(j(\omega - n\omega_0))}$$

коэффициент C_n на
основе трансформации
за $n\omega_0$

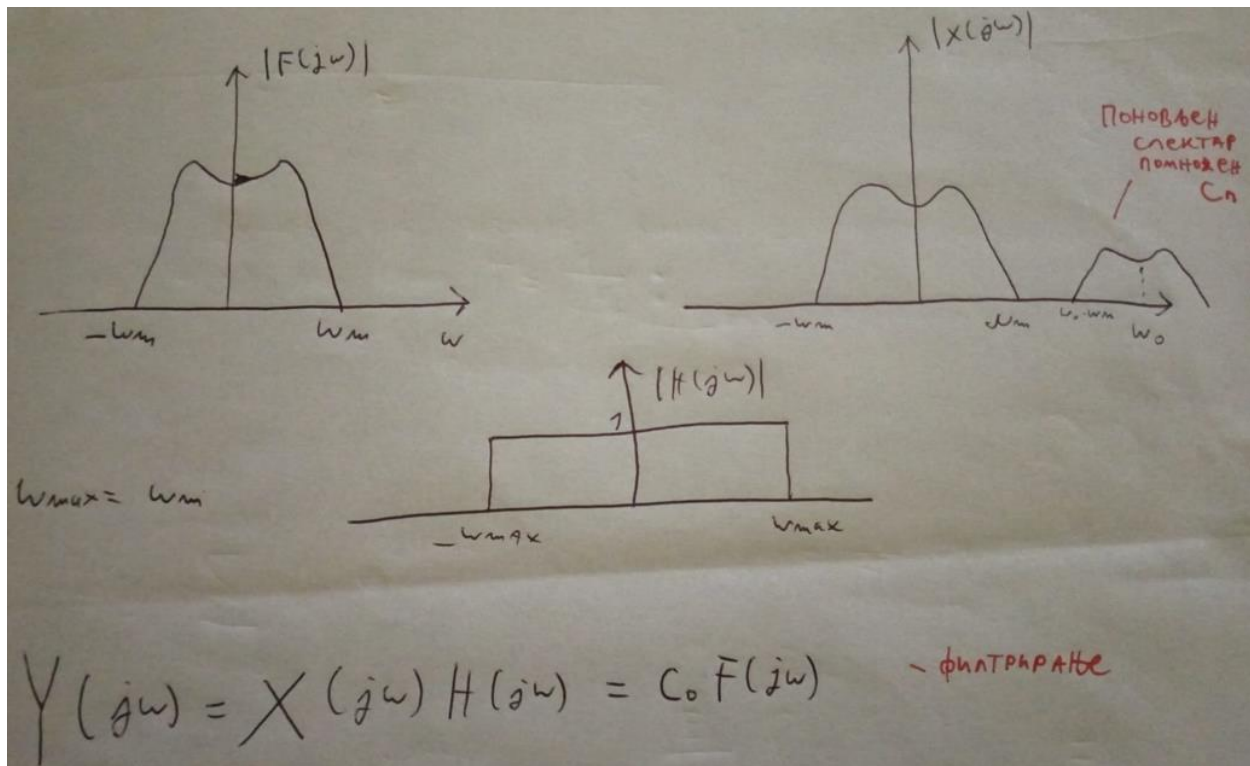
$$X(j\omega) = \sum_{-\infty}^{+\infty} C_n F(j(\omega - n\omega_0))$$

$$C_n = \frac{T}{T} \frac{\sin(n\omega_0 \frac{T}{2})}{n\omega_0 \frac{T}{2}}$$

коэф. C_n разбав

$$C_n < 1$$

$$C_{n+1} < C_n$$



Pod uslovom da važi $\omega_0 - \omega_m \geq \omega_m$, $\omega_0 \geq 2\omega_m \Leftrightarrow 1/T = f_0 \geq 2f_m$

Signal ograničenog spektra se može u potpunosti rekonstruisati ako je frekvencija odabiranja bar dva puta veća od najviše frekvencije u spektru signala.