

ESTUDI DE FOTOEMISSORS

Objectius

Donada la importància creixent dels dispositius òptics i electro-òptics en la tecnologia industrial actual (senyors, lectors, impressores, processat de materials mitjançant làser, comunicacions, etc.), en aquesta pràctica ens plantejem l'estudi d'una de les parts habitualment constituents dels mateixos, els *fotoemissors*. Els objectius bàsics són tres: en primer lloc, que l'estudiant d'enginyeria industrial conegui els fenòmens físics que permeten aquest fet fantàstic de la generació de llum (i, en general, d'ones electromagnètiques en el domini òptic), distingint en particular entre emissió espontània i estimulada. En segon lloc, que conegui les característiques bàsiques dels diferents tipus de fotoemissors, i, en tercer lloc, que conegui i vegi com s'estudien les propietats de la llum generada per aquests fotoemissors (les quals són la base per al disseny de possibles aplicacions).

Fonament teòric

Tal com s'ha vist a classe de Teoria, la llum és una ona electromagnètica que oscil·la a una freqüència molt elevada. En el domini "òptic" de l'espectre electromagnètic, el qual inclou els subdominis de l'infraroig, visible i ultraviolat, la freqüència és de l'ordre de 10^{13} a 10^{15} Hz. Per contra, les longituds d'ona que els corresponen són molt petites: de l'ordre de 10^{-5} a 10^{-7} m, respectivament.

La manera de generar una ona electromagnètica és, en principi, fent oscil·lar càrregues elèctriques. Si oscil·len a freqüència ν , generaran una ona electromagnètica de la mateixa freqüència ν . En el cas d'ones de freqüència baixa, com les ones de ràdio, es fa en efecte moure amunt-avall (mitjançant una font de tensió alterna) els electrons que circulen per la barra metàl·lica de l'antena emissora, i així es genera l'ona electromagnètica. Però en el domini òptic, en particular en el visible o prop d'ell, la freqüència és tan elevada que cal recórrer a les oscil·lacions naturals que fan els electrons en els àtoms, quan "salten" des d'una òrbita a una altra d'energia més baixa. Se sap que, en efecte, mentres l'electró cau d'òrbita, el seu orbital es posa a oscil·lar i emet una ona de freqüència ν donada per la coneguda regla de Bohr:

$$\nu = \frac{E_2 - E_1}{h} \quad (1)$$

on $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ és la constant de Planck i E_2 i E_1 són les energies de l'electró quan es troba a l'òrbita superior o a la inferior, respectivament. Si es donen valors a E_2 i E_1 , es pot veure que, en efecte, llavors el valor de la freqüència ν pot ser de l'ordre de magnitud de 10^{13} a 10^{15} Hz. La quantitat total d'energia que emet és, $E_2 - E_1$, és a dir, segons (1):

$$\text{Energia emesa} = h\nu = \text{energia de "1 fotó"}$$

Aquesta energia és emesa en un temps molt curt, de l'ordre de 10^{-6} - 10^{-8} s, segons els casos. L'energia d'un fotó és molt petita, però com que en un medi material hi han molts àtoms, resulta que a cada instant es poden emetre molts fotons, i això pot donar una quantitat de llum important.

Òbviament, perquè l'electró pugui caure d'una òrbita a una altra i emetre llum, primer l'hem d'haver "pujat" a l'òrbita d'energia E_2 , (la qual cosa s'aconsegueix donant energia a l'àtom, de la manera que veurem) i de manera que quedi un "forat" en l'òrbita d'energia E_1 , si no l'electró no hi podria caure.

Tal com també s'ha vist a Teoria, aquesta caiguda de l'electró amb emissió d'un fotó de llum es pot fer de dues maneres, conegudes com *l'emissió espontània* i *l'emissió estimulada*:

L'***emissió espontània*** és aquella que, com el seu nom indica, no necessita de cap senyal inicial perquè tingui lloc. És a dir, que una vegada l'electró ha sigut pujat a una òrbita d'energia alta E_2 , pot caure en qualsevol moment a l'òrbita d'energia E_1 . L'instant en que comença a caure i, per tant, a emetre llum, és a l'atzar (si bé el valor mig és també de l'ordre de 10^{-6} - 10^{-8} s), i la direcció en que sortirà el fotó pot ser qualsevol. L'emissió espontània és la que es produeix més sovint a la natura, és la que ens genera la major part de llum que utilitzem.

L'***emissió estimulada*** (descoberta per Einstein), en canvi, necessita d'un senyal lluminós que l'iniciï. És a dir, que perquè l'electró caigui d'òrbita i emeti llum d'una freqüència ν determinada, primer cal fer incidir sobre l'àtom llum de la mateixa freqüència ν . Llavors, el que succeeix és que el fotó que emet l'àtom és idèntic al fotó (o fotons) incidents: té no sols la mateixa freqüència, sino també la mateixa direcció de propagació, mateixa polarització i mateixa fase. Per tant, el que aconseguim és amplificar el feix de llum incident que teníem, sense alterar cap de les seves propietats. Aquest fenomen és la base dels *làsers*.

Per completar el panorama, hem d'assenyalar que aquests fenòmens no sols tenen lloc per a electrons que estan lligats als àtoms, sino també per a qualsevol cas en que tinguem nivells o bandes d'energia. Per exemple, es poden produir amb els electrons lliures (mòbils) que hi han dins als semiconductors (en aquest cas,

L'emissió del fotó té lloc quan l'electró cau des d'un estat que està dins la "banda de conducció" cap a un estat que està dins la "banda de valència"), o amb molècules que estiguin vibrant (la molècula perd una mica d'energia de vibració i emet un fotó), o amb molècules que estiguin girant (la molècula perd una mica d'energia de rotació i emet un fotó), etc. Finalment, cal recordar també una altra variant de l'emissió espontània, que té lloc en conductors o semiconductors (o en qualsevol altre material, si es troba a alta temperatura), on hi han electrons lliures (no subjectes a un àtom). Si aquests electrons sofreixen una frenada o accelerada brusca (per exemple, quan xoquen amb un àtom o impuresa, etc.), llavors també poden emetre energia lluminosa. La seva freqüència no està tan ben definida com abans, pot prendre diferents valors, segons l'acceleració que l'electró adquireixi durant la frenada o accelerada.

En aquesta pràctica veurem exemples de diferents elements o dispositius emissors de llum, i estudiarem com la seva emissió encaixa dins d'algun dels tipus aquí explicats. Veurem també les diferències en les característiques de la llum que s'emet en cada cas. De fet, segons el tipus d'àtoms, o el tipus de material sòlid, o la temperatura a que es trobi aquest material, tindrem emissions de característiques ben diferents.

Material

Fonts de llum: llum del sol, bombetes de filament (no halògena i halògena), làmpada de descàrrega, tub fluorescent, LED d'infraroig, LEDs de visible, i làser (d'He-Ne i/o díode làser). Xarxa de difracció (de 1000 ratlles/mm), prisma de vidre, un CD ROM gravat, 2 plaques de vidre planes, làmina polaritzadora, mirall pla, goniòmetre (o monocromador, si se'n disposa), lent de distància focal de l'ordre de 20-50cm, una altra lent de qualsevol distància focal, escletxa (preferible d'amplada regulable), fotodetector (amb font d'alimentació si cal; s'ha de disposar també de la corba de resposta espectral del fotodetector; preferible fotodetector sensible al visible i part de l'infraroig), autotransformador, multímetre, oscil·loscopi (de 20 MHz o més), cables elèctrics normals, cable coaxial, suports mecànics i paper (o drap) negre. Optatiu: un tub de flash (de làmpada estroboscòpica, o de càmera fotogràfica).

Procediment i anàlisi de resultats

S'estudiarà l'emissió de llum (o d'infraroig) per part de diferents tipus de materials o dispositius (els quals s'indiquen a continuació), fent atenció a les característiques tant del dispositiu en sí mateix, com de la llum que emiteixen, en especial la seva longitud d'ona. Serà molt instructiu fer comparacions entre ells.

Operacions i observacions a efectuar:

Deixarem un cert grau de llibertat a l'estudiant perquè ell mateix dedueixi o elegeixi el procediment concret d'operació en cada cas (comptarà sempre amb l'ajut del professor). Aquí donarem únicament unes directrius o instruccions generals. En cada cas a estudiar (més avall es detallen tots els casos a considerar), aquestes directrius o instruccions s'hauran d'adaptar, lògicament, a les característiques del mateix.

Les operacions o observacions a efectuar **en cada cas** són, en principi, les següents:

- (a) 1^a observació qualitativa.- Observar visualment i reflexionar sobre les característiques del(s) dispositiu(s) a estudiar: tipus d'alimentació elèctrica (tensió típica, forma en que s'aplica), estructura del dispositiu, forma en que té lloc l'"excitació" dels àtoms (o del material que sigui) a nivells d'energia superiors, tipus d'emissió (espontània o estimulada), i, finalment, color(s), direccionalitat (o distribució angular) i potència de la llum emesa.
- (b) 2^a observació qualitativa.- (b.1) Estimar la longitud d'ona (o longituds d'ona) d'emissió del dispositiu, de manera senzilla: mitjançant una xarxa de difracció (o un prisma de vidre, o un CD ROM gravat qualsevol) agafada amb la mà, es podrà visualitzar directament l'espectre de la llum emesa. Fixar-se en el grau de monocromaticitat de la llum en cada cas (número de longituds d'ona que emet, amplada espectral de l'emissió, color(s)). Deduir si es correspon amb el que s'ha vist a classe de Teoria o no (*esperem que sí...*).
(b.2) Mitjançant un polaritzador, observar el grau de polarització de la llum. Interpretar la seva causa.
- (c) 1^a observació quantitativa.- Una mesura més precisa de la longitud d'ona es pot aconseguir mitjançant un espectròmetre, espectrofotòmetre o monocromador. En aquesta pràctica s'utilitzarà un aparell d'aquest tipus més senzill (manual, enlloc d'automàtic), però que ens permet veure millor com funciona. Es tracta d'un goniòmetre (aparell per a la mesura d'angles), en el qual hi incorporarem o bé la xarxa de difracció, o bé, millor, un prisma de vidre. D'aquesta manera, cada longitud d'ona que compona la llum a estudiar es desviarà un angle diferent, i per tant les podrem separar i mesurar.

Per mesurar aquests angles, a la sortida del goniòmetre hi posarem el nostre ull per observar i enfocar amb precisió cada component espectral de la llum que estem investigant, i anotar l'angle corresponent (presteu atenció a la influència de l'obertura de l'escletxa del goniòmetre). Per saber, a continuació, quin és el valor de la longitud d'ona que correspon a cada angle de sortida, caldrà una corba de calibració del goniòmetre. Aquest punt es discutirà amb el professor.

- (d) 2^a observació quantitativa.- A més de la longitud d'ona, es pot mesurar també el flux radiant que emet el fotoemissor, per cada longitud d'ona. Per a això caldrà apartar el braç de sortida del goniòmetre, i col·locar en el seu lloc una lent convergent. Serà convenient primer observar visualment què es veu en el pla focal de la lent (col·locar-hi un full de paper blanc, que s'anirà movent endavant i enrera fins trobar el pla focal). A continuació, per efectuar la mesura quantitativa, treurem el paper i posarem, en el pla focal de la lent, una escletxa d'amplada regulable. I just darrera de l'escletxa hi col·locarem un fotodetector, que connectarem a un multímetre o oscil·loscopi. Amb aquest fotodetector, es podran efectuar mesures de la potència lluminosa rebuda, per a diferents angles (és a dir, per a diferents longituds d'ona).

En el cas que el fotodetector fos sensible a la zona de l'infraroig o a la de l'ultraviolat. (consultar la corba de resposta espectral del fotodetector), efectuar també alguna mesura en aquestes zones de l'espectre, per comprovar si, encara que el nostre ull no ho vegi, ens hi arriba energia radiant.

Cal tenir en compte que cada una d'aquestes mesures s'hauran de dividir per la sensibilitat del fotodetector a la corresponent longitud d'ona (reflexionar per què).

Si no hi hagués prou temps, aquest apartat (d) es farà sols per algunes de les fonts de llum.

- (e) 3^a observació quantitativa.- Amb el muntatge anterior, o bé inclús sense el goniòmetre (és a dir, enviant directament la llum del fotoemissor sobre el fotodetector), si el fotodetector es connecta a un oscil·loscopi podrem observar també la dependència temporal del flux de llum emès pel fotoemissor. (Serà bo col·locar l'escletxa, o uns filtres, davant del fotodetector, per controlar el flux de llum i assegurar que no es saturi el fotodetector).

L'interés aquí es centrarà en veure si és emissió contínua o bé modulada en el temps, i, en aquest segon cas, en dibuixar la forma de l'evolució temporal i mesurar la freqüència de modulació. Caldrà explicar l'origen de la presència o absència de modulació, en cada cas. També ens podrem fixar en l'estabilitat de l'emissió (fluctuacions de l'amplitud del senyal).

Passem ja assenyalar els fotoemissors que haurem d'estudiar:

1.- **Radiació solar i radiació de bombeta de filament (no halògena i halògena).**

En aquest cas, es tracta d'emissió espontània per cossos materials que es troben a alta temperatura: la capa exterior del sol es troba a temperatures de l'ordre de 6000 K (si bé la radiació que ens arriba d'ella es troba una mica filtrada, sobretot en l'ultraviolat, per les capes atmosfèriques, en particular

l'ozó), una bombeta no halògena té un filament de tungsté (o wolframi) que agafa temperatures de l'ordre de 2000K, i una bombeta halògena arriba a 3000K.

En aquestes condicions, i tenint també en compte la densitat i tipus de material emissor, resulta que l'energia interna que tenen els àtoms, ions, etc, és tan elevada que els electrons pugen a moltes òrbites possibles, inclús s'arrenquen dels seus àtoms, o (si són lliures) agafen moltes velocitats (elevades), de forma que els salts d'òrbita que es poden produir, les frenades o accelerades que poden patir els electrons lliures, o les vibracions que poden efectuar els àtoms o ions, etc., són tan variades que pràcticament poden tenir qualsevol freqüència. Llavors, la llum que emeten sol ser una superposició d'ones de moltes freqüències diferents. És el que se'n diu “*radiació tèrmica*”, o “*radiació tipus cos negre*”. La potència de la radiació emesa, en funció de la seva freqüència (o longitud d'ona), vé donada aproximadament per la coneguda *Llei de Planck* (Fig. 1), i la potència total emesa (és a dir, per a qualsevol freqüència o longitud d'ona) creix amb la temperatura del cos segons la llei de Stefan-Boltzmann:

$$M = \varepsilon \sigma T^4 \quad (2)$$

on M és l'emitància (potència total emesa per unitat d'àrea del cos emissor; vé donada en W/m^2), ε és l'emissivitat del cos ($0 < \varepsilon < 1$), $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} W/m^2 K^4$ és una constant i T és la temperatura del cos emissor, en K.

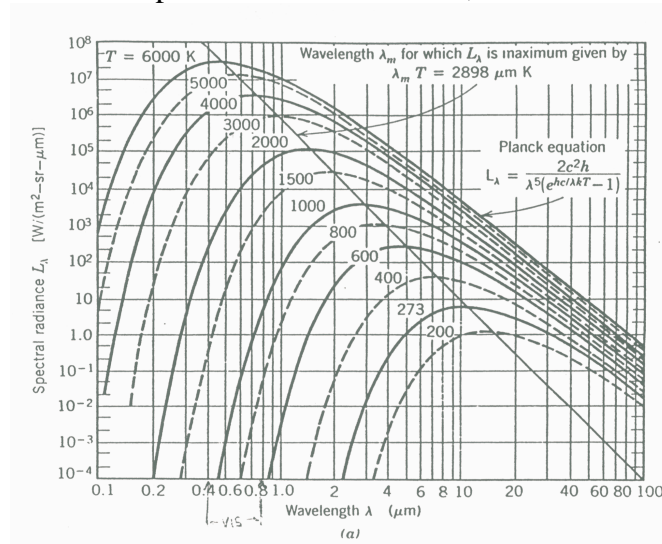


FIGURA 1 Radiació tèrmica (radiació del cos negre)

Les mesures quantitatives que s'efectuïn en els apartats (c) i (d) haurien de coincidir aproximadament amb la informació que hi ha en la Fig. 1. Si no fos

així, reflexioneu sobre possibles causes de la discrepància (parleu amb el professor).

2. Làmpades de descàrrega i tub fluorescent.

En aquest cas, el material emissor és gairebé el més senzill que es pot arribar a tenir: es tracta d'una gas a molt baixa pressió (és a dir, que conté relativament pocs àtoms, per la qual cosa són pràcticament independents entre sí, excepte en els curts moments en que xoquen entre sí), on tots els àtoms són, en general, de la mateixa espècie. Exemples en són les làmpades grogues d'il·luminació en les autopistes o carreteres (contenen àtoms de sodi, Na), les làmpades blanc-blavoses de les autopistes o carreteres (contenen àtoms de mercuri, Hg), els fars anti-boira dels cotxes (poden ser de diferents àtoms, si bé molts són de Na), els tubs fluorescents ordinaris (són també d'àtoms de Hg), els tubs fluorescents per a anuncis (els de color rosa són d'àtoms de Ne, etc.), i els tubs flash dels fotògrafs o les làmpades estroboscòpiques.

Es tracta, doncs, d'un cas pur d'emissió espontània com el de la Fig. 2a, on cada fotó que s'emet és perquè un electró cau d'una òrbita atòmica d'energia alta a una altra de menor energia. No obstant, per aconseguir això, cal primer pujar l'electró a l'òrbita d'energia més alta, perquè després pugui caure i emetre el fotó. Tal com s'ha vist a classe de teoria, això s'aconsegueix gràcies a que es fa saltar una descàrrega elèctrica entre dos electrodes que penetren en el recinte del gas. Segons el tipus d'àtom que considerem, i la potència de la descàrrega elèctrica, podrà succeir que els electrons puguin pujar a òrbites bastant altes, des d'on puguin caure a vàries òrbites possibles, de menor energia. Si això succeeix, podrem tenir vàries freqüències (o longituds d'ona) emeses simultàniament. Habitualment són unes poques freqüències entre 1 i 10, si bé en alguns casos arriben a més.

En efectuar l'operació (d), en el moment de posar el paper blanc en el pla focal de la lent (és a dir, abans de col·locar-hi el fotodetector) recomanem fer-ho per a la làmpada de mercuri (com a mínim). Serà interessant comparar, en aquest cas, la distribució de llum que es veurà sobre el paper blanc, amb la que s'haurà observat visualment en les manipulacions (b) i (c). Observeu que ara es podran “veure” les longituds d'ona corresponents a l'ultraviolat!. Interpreteu aquest fet sorprenent.

També serà bo veure i interpretar les semblances i diferències entre l'espectre d'emissió de la làmpada de Hg i la d'un tub fluorescent.

Finalment, serà bo també comprovar que les longituds d'ona emeses per les làmpades de Na i/o Hg es corresponen amb els valors que estan tabulats en els llibres.

3.- LED's de visible i d'infraroig.

Tal com s'ha vist a classe de Teoria, en aquest cas, el material emissor és una unió pn , és a dir, una unió entre dos semiconductors dopats, un de tipus p (el qual té pocs electrons i per tant té “forats” en la “banda de valència”) i un de tipus n (el qual té molts electrons i per tant té alguns electrons lliures que han pujat a la “banda de conducció”). En condicions normals, els electrons lliures de la part n estan separats físicament dels “forats” (o estats vacants) de la part p , ja que estan a un costat i altre de la frontera que separa les parts p i n (en aquesta frontera hi ha un camp elèctric que fa de “barrera” permanent). Però si apliquem una diferència de potencial que empenyi els electrons lliures de la part n cap a la part p (i els forats de la part p cap a la part n), llavors els electrons lliures i els forats es trobaran, i podrà tenir lloc el fenòmen de l'emissió espontània: cada electró lliure de la banda de conducció pot caure i ocupar un “forat” de la banda de valència, alliberant l'energia que perd en forma d'un fotó. Emetrà llum de freqüència donada per l'expressió (1), on ara $E_2 - E_1$ és la diferència en energia entre la banda de conducció i la banda de valència, la qual s'anomena l'energia del “gap” o banda prohibida.

Per tant, donada una unió determinada (per exemple, una feta amb semiconductor GaAs), l'energia del “gap” tindrà un valor determinat i la freqüència de la llum emesa també tindrà, segons (1), un valor determinat. Ara bé, s'ha de tenir en compte que la banda de conducció i la banda de valència tenen una certa amplada, en energia, cada una d'elles, i per tant pot succeir que cada electró faci un salt una mica diferent en energia, per la qual cosa la freqüència de la llum emesa serà lleugerament diferent per a cada electró. El resultat és que si bé la llum emesa per un LED (“Light Emitting Díode”) és bastant monocromàtica, no ho és tant com l'emesa per una làmpada espectral, ja que emet dins d'un petit marge de longituds d'ona al voltant d'un cert valor.

En l'operació (a), serà instructiu observar primer, visualment, l'estructura dels LED, mitjançant una lupa o un microscopi. Veure les petites dimensions de la part activa, els fins cables d'alimentació elèctrica, l'encapsulat, el senyal que ens permet identificar quin és el càtode i quin l'ànode, quin ha de ser, d'aquests, el pol positiu i quin el negatiu. Informareu-vos de quina és la tensió màxima que aguanta el LED, i reflexioneu sobre què passaria si es connectés la tensió en sentit oposat al correcte. Reflexioneu, finalment, sobre quina és la causa que cada LED emeti en un color (o longitud d'ona) diferent.

L'operació (d) serà suficient en efectuar-la solament per al cas del LED d'infraroig (si es disposa d'un fotodetector sensible a l'infraroig), per adonar-

nos, una vegada més, que el que el nostre ull no veu, un fotodetector apropiat sí que ho pot veure.

4.- Làsers.

El làser és l'exemple típic d'emissió estimulada. Tal com s'ha vist a classe de teoria, les propietats tan interessants del fenomen de l'emissió estimulada, junt amb la forma allargada de la cavitat òptica del làser, fan que la llum emesa per un làser sigui: molt direccional, molt monocromàtica, molt "coherent", etc. La seva potència, pot ser petita o gran. En el cas de baixa potència, el làser s'utilitza per a control i mesura: sensors, lectors, etc. En el cas d'alta potència, el làser es pot utilitzar inclús per al processament de materials (tall, soldadura, perforació, etc.).

En aquesta pràctica sols estudiarem les propietats de direccionalitat i monocromaticitat de làsers de baixa potència, en concret de làsers de semiconductor (també coneguts com díodes làser) i de He-Ne.

MOLT IMPORTANT!!!: CAL EVITAR SEMPRE QUE LA LLUM DEL LÀSER ENTRI DIRECTAMENT AL NOSTRE ULL!!. QUAN S'HAGI D'OBSERVAR LA LLUM LÀSER, ES FARÀ QUE AQUESTA INCIDEIXI SOBRE UN PAPER O PANTALLA, I S'OBSERVARÀ ÚNICAMENT LA LLUM QUE DIFON EL PAPER O LA PANTALLA. EN CADA EXPERIMENT, ABANS D'UTILITZAR EL LÀSER, PARLEU AMB EL PROFESSOR PERQUÈ DONI EL VIST-I-PLAU A LES OPERACIONS I OBSERVACIONS QUE ANEU A EFECTUAR.

En l'operació (a), observeu primer l'estructura dels làsers considerats. Amb l'ajut del professor, mireu i interpreteu tots els detalls de l'estructura interna i el funcionament d'un dels làsers (el d'He-Ne).

En el cas del làser de semiconductor, observeu (si és possible) les petites dimensions de la seva part activa, observeu que no té miralls externs, recordeu l'estructura i funcionament del dispositiu vistos a classe de Teoria, observeu si té alguna lent davant per fer l'emissió més direccional, etc.

També en l'operació (a), intentar mesurar l'angle de divergència del feix de llum d'un dels làsers (penseu com fer-ho). Finalment observeu com mitjançant lents convergents o divergents es pot variar el diàmetre del feix de llum. Observaeu una secció del feix de llum ampliada, i fixeu-vos en el fenomen del "speckle", i en altres detalls que hi apareixin (interpreteu-los).

BIBLIOGRAFIA

E. Uiga: **Optoelectronics**. Ed. Prentice Hall (1995).

Luxon, J.T. and Parker, D.E., **Industrial lasers and their applications**, Prentice Hall (1992).

Documentació tècnica de dispositius i sistemes comercials.

EL FOTODÍODE I LES SEVES APLICACIONS

Objectiu

L'objectiu d'aquesta pràctica és l'estudi del fotodíode i les seves aplicacions. En el guió es proposa que s'estudiï el comportament del fotodíode quan aquest es connecta en ambdós modes: el fotovoltaic i el fotoconductiu. L'estudi de les aplicacions del fotodíode es pot ampliar a partir del suggeriment d'altres aplicacions pràctiques i de la seva realització.

Material

Fotodíodes 5DP/SB i UV20, Làser de Nd doblat en freqüència i bombejat amb díodes làser, filtre de densitat òptica esglaonada, suports i banc òptic.

Fonament teòric

El fotodíode consisteix en la unió d'un semiconductor tipus p i un semiconductor tipus n que en ser il·luminada absorbeix la llum. Per tal que aquesta absorció es produeixi de forma eficaç, cal utilitzar semiconductors amb un gap d'energia petita, com per exemple el silici que té un gap d'energia igual a 1,12 eV. Aquesta petita energia del gap permet que els fotons de la llum visible puguin excitar els electrons de la banda de valència a la banda de conducció. Això dóna com a resultat la creació d'una parella electró-forat que pot ésser utilitzada per la generació d'un corrent elèctric.

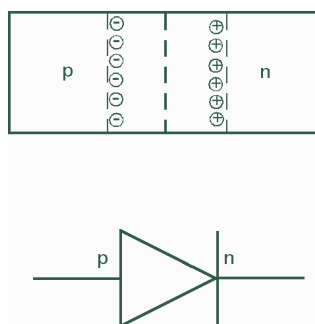


FIGURA 1 Esquema de la unió p-n i representació d'un fotodíode en un circuit elèctric

El fotodíode es pot representar esquemàticament tal com es mostra en la figura 1. El camp elèctric que es genera degut a la separació de càrregues en la regió

de la unió p-n, impedeix la recombinació de la parella electró-forat, escombrant els forats cap a la regió p i els electrons cap a la regió n. Llavors, quan el díode es connecta a un circuit extern es produïx la circulació d'un corrent des de l'ànode cap al càtode. La generació d'aquest corrent es coneix com l'efecte fotovoltaic.

L'aprofitament d'aquest corrent generat quan la unió p-n queda exposada a la llum es pot fer configurant el fotodíode en el mode fotovoltaic (PV) o bé en el mode fotoconductor (PC). En el primer, que s'anomena també el mode de cel·la solar, no s'aplica cap diferència de potencial a través del fotodíode. En aquesta configuració el fotodíode s'utilitza, en general, per proporcionar potència elèctrica. En el segon mode, s'aplica una diferència de potencial V_{BIAS} amb polarització inversa, de forma que s'augmenta la regió sense càrregues. Entre altres, això dóna com a resultat una resposta lineal del fotodíode per una ampli rang d'intensitats lluminoses. En aquesta configuració el fotodíode s'utilitza, en general, per a la detecció i mesura de la intensitat de llum.

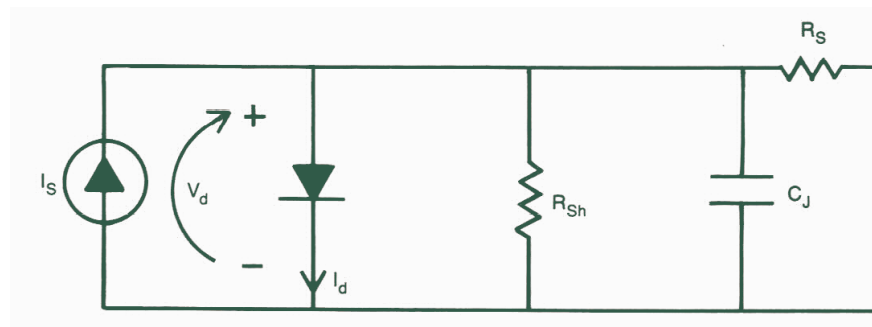


FIGURA 2 Circuit equivalent per a un fotodíode

El fotodíode es pot representar amb un circuit equivalent tal com es mostra en la figura 2. Els paràmetres característics d'aquesta representació són la resistència en sèrie R_s molt petita (en aquesta pràctica suposarem que val 0), la resistència R_{sh} , la capacitat de la unió C_j i una font de corrent constant I_s introduïda per la il·luminació que es troben en paral·lel amb un díode rectificador. Aquest circuit equivalent ens indica que el fotodíode actua com una font de corrent amb una sortida que és una funció lineal de la intensitat de la llum. Quan la il·luminació és zero, la corba I-V del fotodíode és semblant a la corba d'un díode rectificador

$$I_d = I_{sat} \{ \exp(eV / kT) - 1 \}$$

a on I_d és el corrent d'obscuritat, I_{sat} és el corrent de saturació, e és la càrrega de l'electró, V és la diferència de potencial, k és la constant de Boltzmann i T la

temperatura en graus Kelvin. Quan s'il·lumina el fotodíode, la radiació òptica produïx un desplaçament de la corba I-V en una quantitat igual a

$$I_S = R_\lambda P$$

a on I_S és el fotocorrent, R_λ la resposta espectral i P la intensitat de llum. Per tant el corrent total en presència de llum, representat en la figura 3, ve determinat per

$$I_{dl} = I_{sat} \{ \exp(eV / kT) - 1 \} - I_S$$

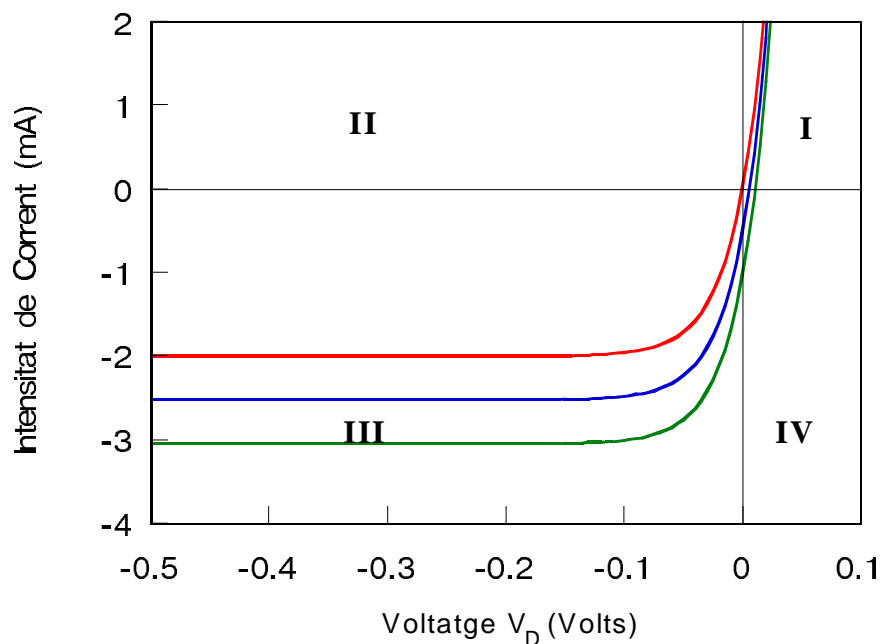


FIGURA 3 Corba característica del fotodíode 5DP/SB quan la il·luminació és igual a 0 mW (línia vermella), quan la il·luminació a 532 nm és igual a 1,5 mW (línia blava) i 3 mW (línia verda).

Mètode Experimental

Mode Fotovoltaic

El propòsit d'utilitzar el fotodíode en aquest mode és el de convertir l'energia lluminosa del sol en energia elèctrica. En aquest cas es important que la resposta espectral del nostre fotodíode s'assembli al màxim a la distribució espectral de la radiació solar. També és important que el fotodíode tingui la màxima superfície perquè es pugui captar la màxima radiació.

Tal com ja s'ha dit anteriorment, en aquest mode el fotodíode opera sense que s'apliqui cap diferència de potencial i, per tant podem determinar quina és la intensitat de corrent elèctric que circula a través del fotodíode a partir del punt d'intersecció de les corbes I-V del fotodíode en el quart quadrant amb la línia de càrrega tal com es mostra en la figura 4. Quan el díode opera en aquest quadrant ha d'estar connectat tal com es mostra en la figura 5.

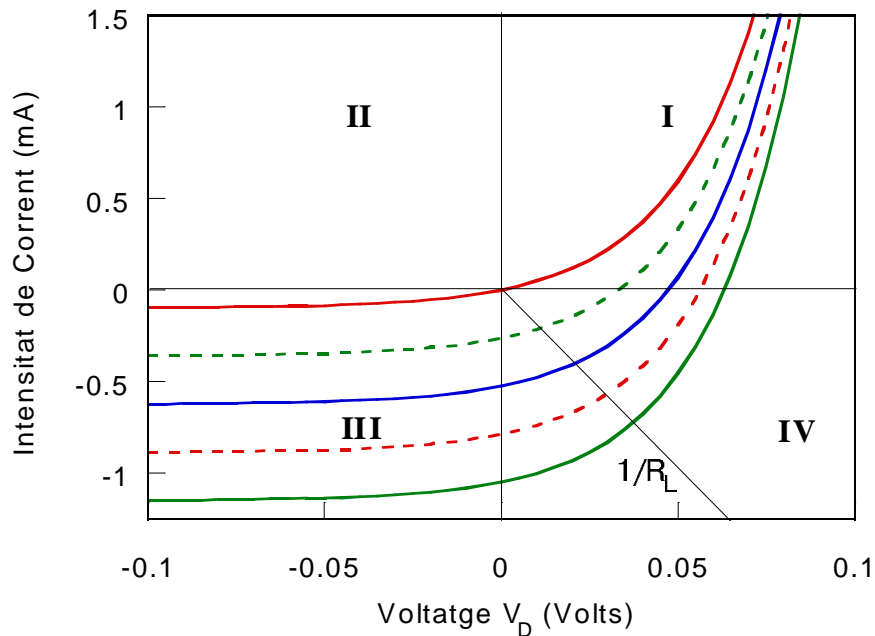


FIGURA 4 Corbes I-V per al fotodíode UV20 quan la il.luminació és igual a 0 mW (línia vermella), quan la il.luminació a 532 nm és igual a 0.75 mW (línia verda a trets), 1,5 mW (línia blava), 2,25 mW (línia vermella a trets) i 3 mW (línia verda). La línia negra és una recta de pendent $1/R_L$.

A partir de la figura 4, determina per aquest circuit quina és la resistència de càrrega R_L que maximitza el producte VI i amb la qual s'obtindrà el màxim rendiment per una intensitat de llum donada. Posa el fotodíode al sol i mesura la potència elèctrica utilitzant el valor de la resistència de càrrega que més s'assembli al valor que hagi determinat. Amb altres resistències comprova que la potència elèctrica es inferior.

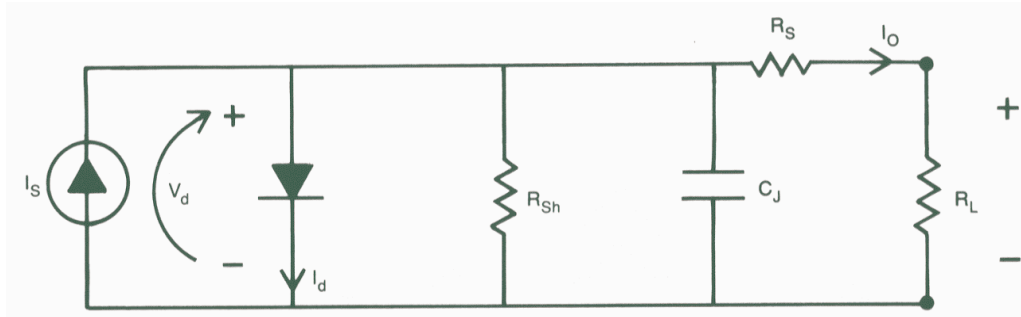


FIGURE 5 Circuit bàsic d'un fotodíode connectat en mode fotovoltai

Mode Fotoconductiu

Quan un fotodíode s'utilitza per a la mesura d'un senyal, opera fonamentalment en el tercer quadrant. En aquest mode d'operació, la resposta del fotodíode és més estable i presenta un ampli rang de resposta lineal. Per tant, aquest mode permet la utilització del díode en dispositius de mesura de precisió i en dispositius de telecomunicacions.

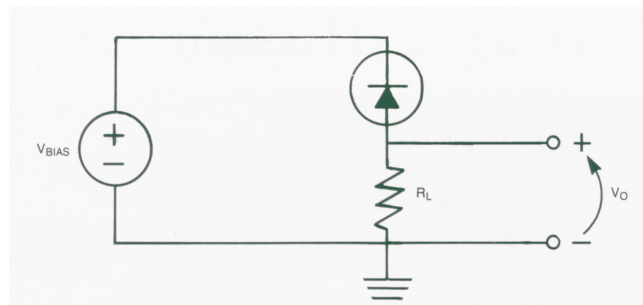


FIGURA 6 Circuit bàsic d'un fotodíode connectat en mode fotoconductiu o de polarització inversa.

En aquest mode el fotodíode opera en el tercer quadrant, ja que s'aplica una diferència de potencial en sentit invers. Dissenya un circuit tal com el que es mostra en la figura 5. La intensitat I_L de corrent elèctric que circula dins del circuit de la figura 5, es pot determinar trobant els punts d'intersecció de la línia de càrrega ($-V_{BIAS} - I_L R_L$) amb les corbes V-I del díode que utilitzis, tal com es mostra de forma esquemàtica en la figura 6. Utilitzant el làser i el filtre a passos mesura quina és la intensitat de corrent elèctric I_L que s'obté en cada pas. Representa després aquesta intensitat de corrent elèctric en funció de la intensitat de llum transmesa a través del filtre i comprova que la resposta del fotodíode és lineal.

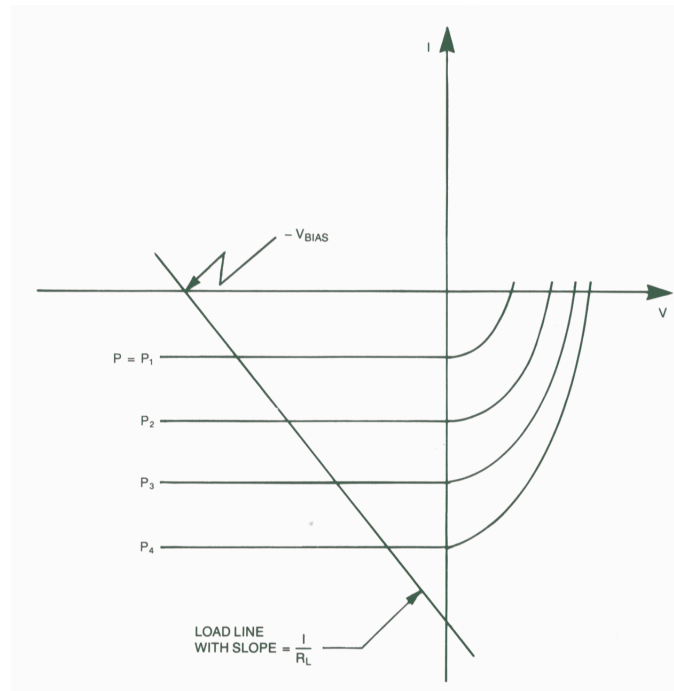


FIGURA 7 Corbes I-V corresponents a un fotodíode i línia de càrrega

Altres aplicacions

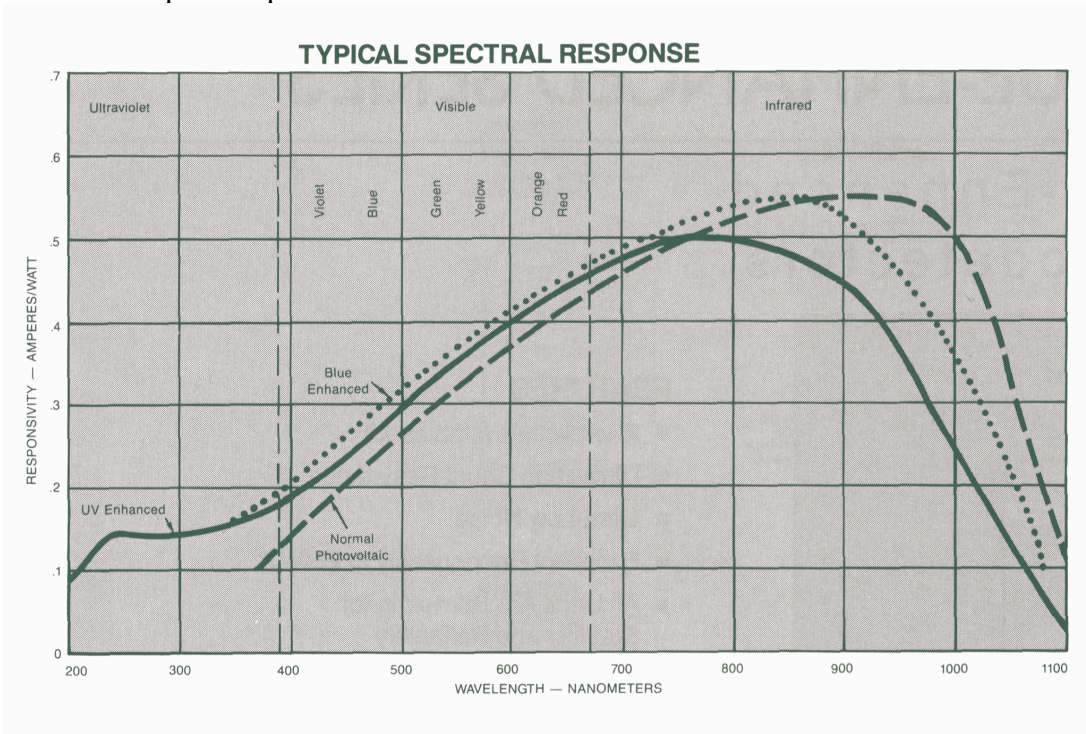
Amb els coneixements dels quals disposes, dissenya un dispositiu que utilitzi un fotodíode i tingui alguna utilitat pràctica. Si et cal pots utilitzar altres elements com poden ser amplificadors operacionals, piles, etc.

APÈNDIX

Especificacions dels fotodíodes

Model	Area (mm ²)	R _λ (A/W)	Resp. Espectral	C _j (pF)	R _{Sh} (MΩ)	I _{sat} (mA)	T _r (μs)
5DP/SB	5	0.2 a 410 nm	Blue Enhanced	450	150	2.0	0.2
UV20	20	0.214 a 254 nm	UV Enhanced	1000	50	0.1	2.0

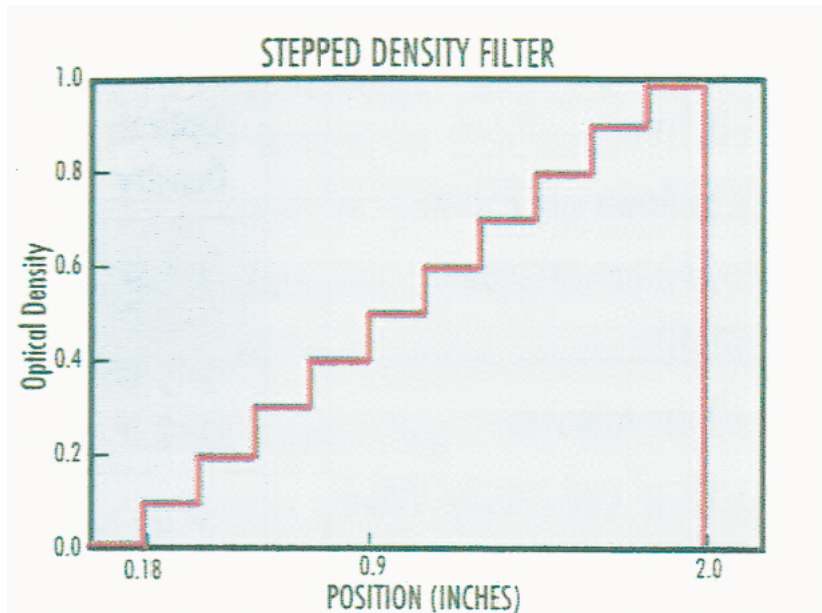
Corba de resposta espectral



Filtre a de densitat esglaonada

11 passos discrets des de densitat òptica 0 fins a 1.

Increment de densitat òptica entre pas i pas: 0.1



MESURA DE DESPLAÇAMENTS O PERFILS SENSE CONTACTE

Objectius

L'objectiu d'aquesta pràctica és familiaritzar-se amb les mesures sense contacte a partir de mètodes òptics. El tipus de mesures que s'efectuen es basen en la tècnica de la triangulació òptica.

Material

Sensor de desplaçament làser CCD model LK-031, Controlador de Sensor analògic RV-10, font de 24 Volts, suports i material opto-mecànic.

Fonament teòric

La tecnologia òptica moderna permet efectuar mesures de gran precisió evitant el contacte amb l'objecte sobre el qual es vol efectuar la mesura. Aquest tipus de mesures són avui de gran importància tan en el control de qualitat com en l'automatització industrial. El dispositiu del qual disposes en aquesta pràctica, es tracta d'un sistema que es pot utilitzar en un entorn industrial, ja sigui per controlar amb una gran precisió el moviment d'un braç mecànic, o bé, per exemple, per inspeccionar les irregularitats en una superfície. Aquest dispositiu, el funcionament del qual es basa en la triangulació òptica, permet mesurar petits desplaçaments.

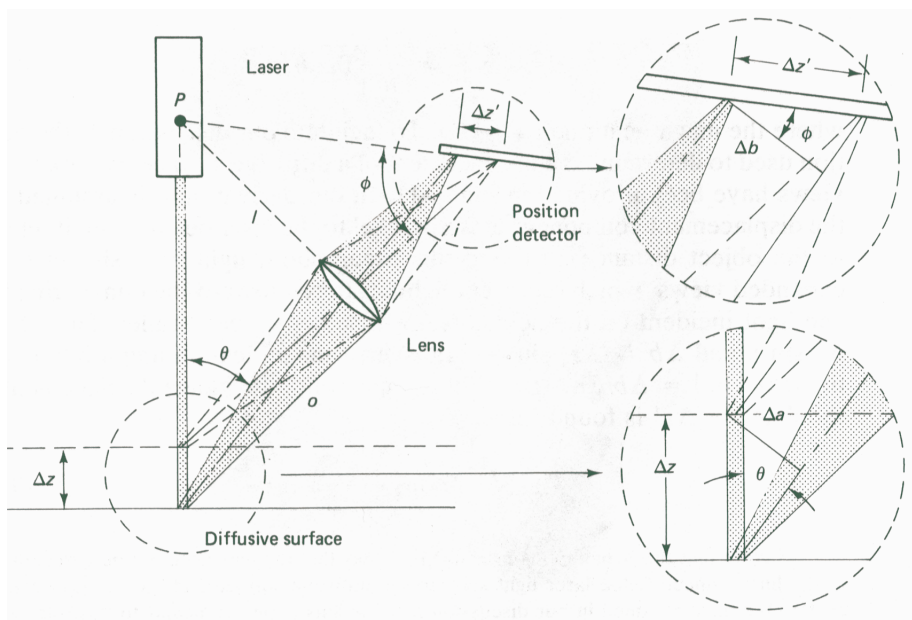


FIGURA 1 Diagrama del sistema òptic de triangulació

A més de mesurar petits desplaçaments la tècnica de la triangulació òptica permet la mesura de gruixos o perfils de superfícies difusores sense contacte. El mètode més comunament utilitzat, i el que també utilitza el sensor d'aquesta pràctica es basa en la projecció d'un punt de llum damunt d'una superfície difusora. Part de la llum difosa per aquesta superfície és recollida per una lent convergent, la qual forma una imatge del punt damunt d'un detector CCD o de posició.

En el sensor del qual disposes, s'utilitza un díode làser per produir un punt de llum damunt una superfície difusora. Suposarem que el feix làser incideix de forma perpendicular a la superfície. Si aquesta superfície es desplaça una distància Δz en la direcció paral·lela al feix de llum del làser, el punt de llum tindrà una component de desplaçament Δa perpendicular a l'eix òptic de la lent convergent tal com es mostra en la figura 1. Aquest desplaçament provoca una component de desplaçament Δb de la imatge del punt també en la direcció perpendicular a l'eix. Δb es pot determinar a partir del desplaçament de la imatge damunt el detector $\Delta z'$. Com que Δa i Δb es poden relacionar a través de la magnificació transversal de la lent m , podrem relacionar Δz amb $\Delta z'$. Si es fa el disseny del sistema òptic de forma que compleixi la condició de Scheimpflug, és a dir, de forma que tant el pla de la lent com el pla de l'objecte com el pla de la imatge interseccionin en un punt, el desplaçament en la direcció perpendicular a la superfície ve determinat per

$$\Delta z' = |m| \frac{\sin \theta}{\sin \phi} \Delta z \quad (1)$$

a on θ és l'angle entre el feix laser i l'eix òptic, i ϕ és l'angle entre aquest últim eix i el del detector CCD.

Mètode Experimental

El sensor del qual disposes permet mesurar variacions de fins a 10 mm en el gruix d'una superfície i amb una precisió de fins a una micra. Per a la utilització correcta d'aquestes possibilitats de mesura cal que el sensor estigui correctament posicionat. Abans d'iniciar cap tipus de mesura ajusta la posició del sensor comprovant que el LED de control que es troba situat a la part superior del capçal del sensor doni la senyal correcta. Tal com s'indica en la figura 2, aquest LED s'il·lumina de color groc quan el sensor es troba a una distància d'entre 25 i 35 mm de la superfície i de color verd quan la distància és exactament de 25 mm. Quan el sensor es troba posicionat correctament, el diàmetre del punt d'il·luminació del làser és mínim.

Un cop hakis fet aquest primer ajust, comprova que la lectura del controlador es correspon a la distància que mesura el sensor. Tal com s'indica també en la figura 2, el senyal de sortida analògica és d'un volt per a cada mm de desplaçament, al mateix temps que l'origen de tensions es troba a 25 mm. (Si més endavant vols modificar aquest origen, ho pots fer amb la funció Auto Zero tal com s'indica al maunal del Sensor LK-031).

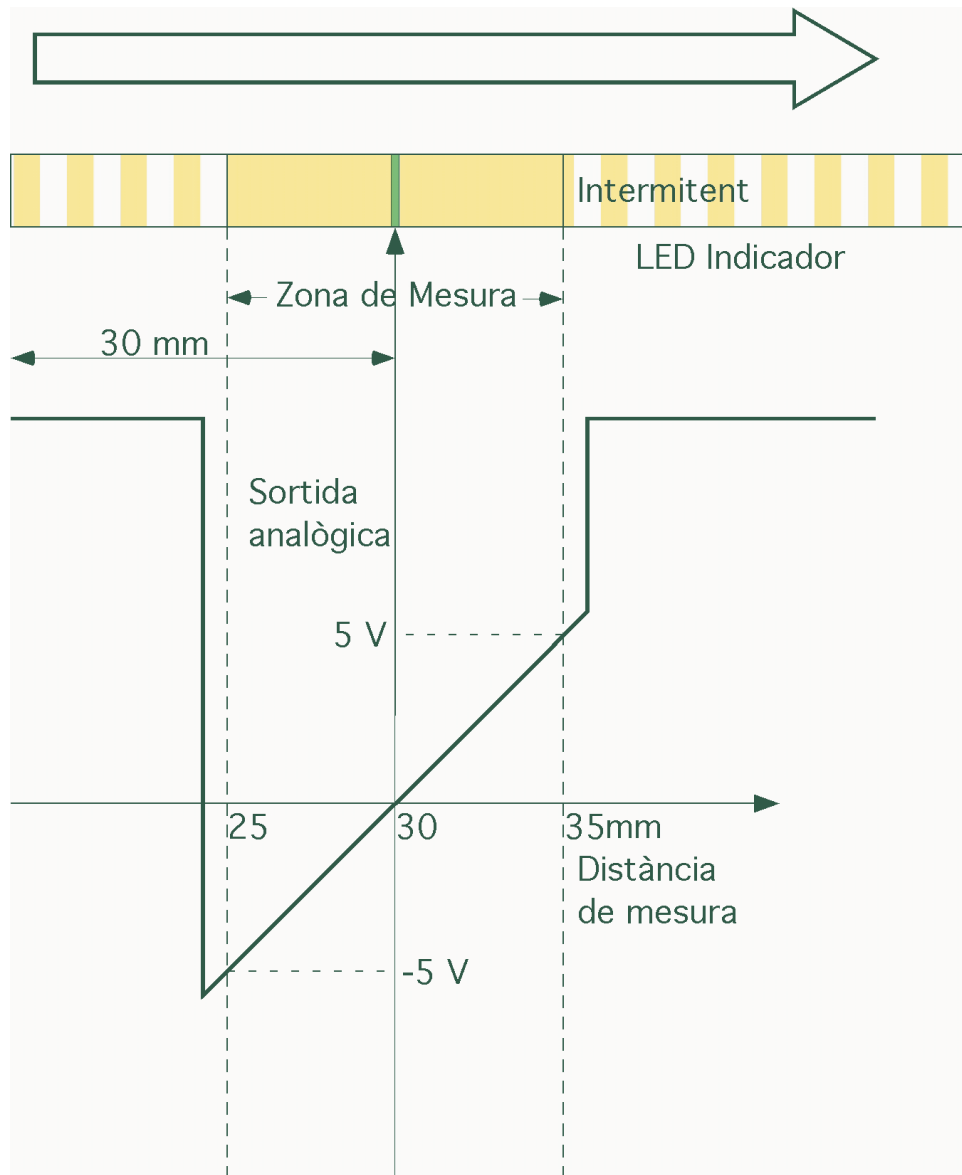


FIGURA 2 Diagrama de funcionament del sensor LK-031

Procediment

- 1) Com a primer estudi de les possibilitats del sensor del qual disposes, efectua la mesura del gruix d'una objecte pla però difusor. Indica quines son les variacions

de gruix que mesures d'un costat a l'altre de la peça. Tingues la precaució de col·locar l'objecte en una superfície que sigui el màxim de plana possible.

2) Repeteix la mesura de l'apartat anterior, però utilitzant un objecte transparent del qual coneguis el seu índex de refracció. Indica quines correccions cal fer al valor que s'obté a la pantalla del controlador RV-10.

3) Entre altres funcions el controlador RV-10 et permet establir un interval de tolerància que t'indica quan el gruix d'un objecte o la distància de separació surt dels límits establerts. Amb el controlador pots establir un límit inferior (LOW) i un límit superior (HIGH). Això et permet diferenciar entre tres tipus de senyal: HIGH, GO, i LOW. Quan la mesura està dins dels límits de tolerància fixats la lectura del controlador s'il·lumina en verd, mentre que quan el resultat es HIGH o LOW, la il·luminació és en vermell.

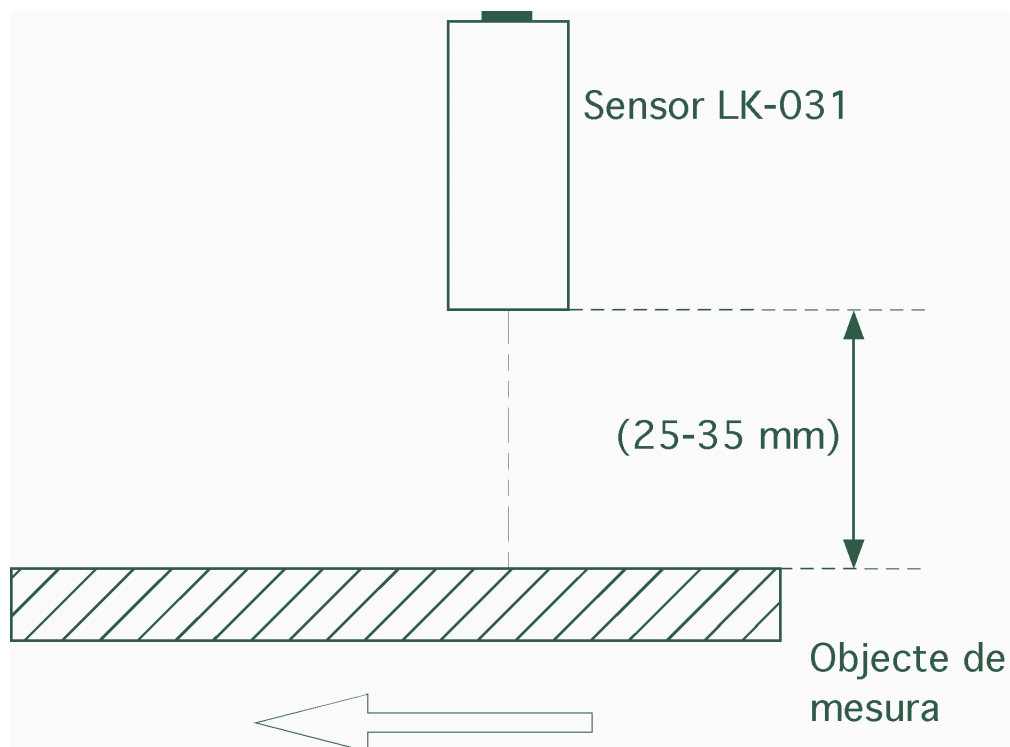


FIGURA 3 Mesura de la variació de gruix d'una peça en moviment.

El procediment per establir els límits de tolerància és el següent:

1. Apreta la tecla [SET] per entrar en el mode de fixar toleràncies.

L'RV-10 es posa automàticament en el mode per fixar el límit HIGH. El valor establert es mostra en color carbassa, mentre que l'indicador de HIGH i el dígit

de més a l'esquerra s'il·lumina de forma intermitent. Si hi ha quatre dígit el cinquè (el de més a l'esquerra) correspon al signe.

2. La tecla [▲] et permet canviar el valor d'aquest dígit, mentre que la tecla [➤] et permet canviar de dígit. Si apretes la tecla [ZERO] el valor en pantalla torna a 0.
3. Apreta la tecla [CALL] per acceptar el valor del límit superior que hagi fixat. En el moment que hagi apretat aquesta tecla l'RV-10 es posa automàticament en el mode per fixar el límit LOW.
4. Repeteix els passos 2 i 3 per a fixar el límit inferior.

Agafa dues o més peces idèntiques (o aparentment idèntiques) i estableix el límit de tolerància per a una d'elles de forma que si desplaces la peça tal com es mostra en la figura 3 el senyal sempre és del tipus GO. Un cop hagi fixat la tolerància repeteix la mesura amb les altres peces, i indica quin tipus de desviació hi ha entre aquesta i les altres peces.

Altres aplicacions

Consulta els manuals del sensor LK-031 i del controlador RV-10 i proposa una aplicació en la qual s'utilitzaria un dispositiu semblant al que has estudiat. Tingues en compte les altres funcions que tens disponibles amb el controlador com per exemple són: la funció promig, la funció de precessament de dades, la funció comparació, etc.

Qüestions

1. Demuestra l'expressió 1. Indica quina aproximació cal fer per arribar a aquesta expressió.