

## Cursul 8.5 Radiația LASER și lumina LED

### RADIAȚIA LASER

#### *Emisia și absorbția radiației electromagnetice*

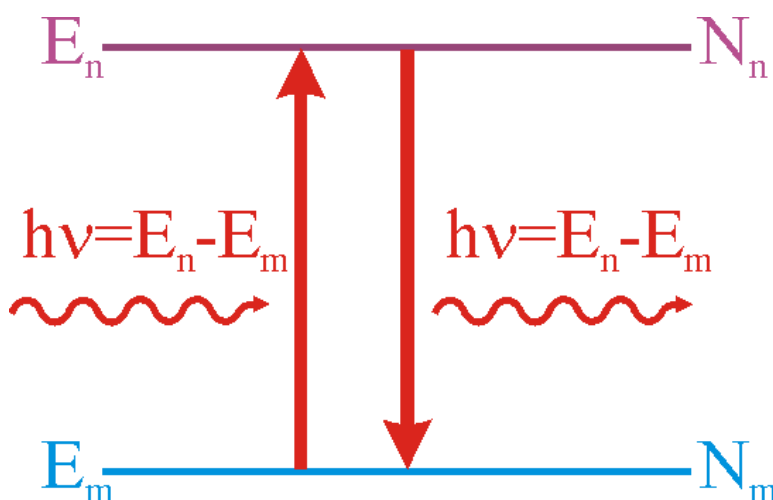
Între corpuri și mediul înconjurător există un permanent schimb de energie și impuls. Atunci putem spune că substanțele pot fi considerate în echilibru staționar doar atunci când sunt în echilibru și cu radiația electromagnetică din mediul înconjurător. Așa cum s-a arătat pentru corpul negru, acesta poate să fie în stare de echilibru termodinamic la o temperatură  $T$  cu radiația electromagnetică dacă aceasta satisface legea de distribuție formulată de Planck. Astfel dacă ne referim la o unitate de suprafață a unui corp, numărul de fotoni emiși în unitatea de timp trebuie să fie egal cu numărul de fotoni absorbiți de acea suprafață în același interval de timp. Probabilitatea ca un foton să fie emis spontan la saltul unui electron de pe nivelul  $n$  pe nivelul  $m$  este proporțională cu numărul  $N_n$  al electronilor de pe acest nivel:

$$P_{em,sp} = A_{nm} N_n, \quad (1)$$

unde  $A_{nm}$  este un factor de proporționalitate al emisie spontane.

Probabilitatea ca un foton să fie absorbit de la tranziția electronilor de pe nivelul energetic  $n$  pe nivelul energetic  $m$  este proporțională cu numărul electronilor de pe stratul  $m$ ,  $N_m$  și cu fluxul energetic de radiației electromagnetice:

$$P_{abs,st} = B_{mn} N_m u_\nu, \quad (2)$$



unde  $B_{mn}$  este un factor de proporționalitate al absorbției stimulate.

La echilibru staționar probabilitatea de emisie este egală cu probabilitatea de absorbție:

Figura 1 Schimbul de energie între două nivele energetice intermediat de radiația electromagnetică.

$$P_{em,sp} = P_{abs,st} \Rightarrow A_{nm} N_n = B_{nm} N_m u_\nu \Rightarrow u_\nu = \frac{A_{nm}}{B_{nm}} \frac{N_n}{N_m} \quad (3)$$

Dacă se consideră că distribuția numărului de electroni pe nivelele energetice este data de funcția de distribuție a lui Boltzmann:

$$N_n = N_0 e^{-\frac{E_n}{k_B T}}, \quad (4)$$

atunci raportul numărului de electroni de pe nivelele energetice  $n$  și  $m$  este dat de:

$$\frac{N_n}{N_m} = \frac{N_0 e^{-\frac{E_n}{k_B T}}}{N_0 e^{-\frac{E_m}{k_B T}}} = e^{-\frac{E_n - E_m}{k_B T}} = e^{-\frac{h\nu}{k_B T}}, \quad (5)$$

unde s-a introdus energia fotonului emis:

$$h\nu = E_n - E_m, \quad (6)$$

Dacă ținem cont de raportul din ecuația (3) și îl introducem în ecuația (5) obținem relația de proporționalitate pentru densitatea de energie radiantă:

$$u_\nu \propto e^{-\frac{h\nu}{k_B T}}, \quad (7)$$

dar care nu descrie exact funcția de distribuție a lui Planck. Aici trebuie să observăm că nu am ținut cont de toate procesele care au loc. Fenomenul complex a fost studiat de către Einstein și care a arătat că odată cu emisia spontană a fotonilor și care este independentă de prezența și fluxul radiației electromagnetice din mediul înconjurător mai are loc și o emisie stimulată de către absorbția unei radiații electromagnetice care provoacă trecerea electronilor de pe starea inferioară  $m$  pe starea superioară  $n$ . Probabilitatea emisie stimulată este dată de o relație asemănătoare cu aceea dată de ecuația (3):

$$P_{em,stim} = B_{nm} N_m u_\nu, \quad (8)$$

unde  $B_{nm}$  este un factor de proporționalitate al emisie stimulată.

Astfel probabilitatea emisie spontană și stimulată este dată de suma celor două probabilități:

$$P_{em} = A_{nm} N_n + B_{nm} N_m u_\nu. \quad (9)$$

Considerând acum echilibrul dintre probabilitățile de emisie și absorbție se obține densitatea de energie:

$$P_{em} = P_{abs} \Rightarrow u_{\nu} = \frac{A_{nm}}{B_{nm} e^{\frac{h\nu}{k_B T}} - B_{nm}}, \quad (10)$$

pe care o putem compara cu funcția de distribuție a densității spectrale de energie a lui Planck:

$$u(\nu, T) = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{k_B T}} - 1}, \quad (11)$$

se observă că pentru:

$$\begin{cases} B_{nm} = B_{mn} \\ A_{nm} = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} B_{nm} \end{cases} \quad (12)$$

cele două ecuații coincid. Coeficienții  $A_{nm}$ ,  $B_{mn}$  și  $B_{nm}$  se numesc coeficienții lui Einstein.

Prin urmare emisia undelor electromagnetice se produce prin, emisie spontană și emisie stimulată și satisface relația lui Planck. **Emisia spontană** se produce în mod aleatoriu și în toate direcțiile cu aceeași probabilitate. Undele electromagnetice emise din diferite domenii ale unei aceleiași substanțe nu sunt coerente. Emisia stimulată se produce sub influența câmpului electromagnetic extern. Polarizarea, orientarea și faza fotonului emis prin emisie stimulată coincide cu polarizarea, orientarea și faza unde electromagnetice sub influența căruia s-a produs emisia stimulată.

### **Emisia și absorbția radiației electromagnetice în echilibru**

Mai sus s-a arătat că pentru ca o substanță de orice natură se considera în echilibru cu radiația din mediul înconjurător numai dacă distribuția fotonilor după energie este dată de funcția de distribuție a lui Planck. Astfel, dacă două substanțe arbitrare au aceeași temperatură atunci ambele trebuie să fie concomitent în echilibru cu aceeași radiație termică. Dacă în schimb temperatura lor diferă atunci câmpul de radiație asigură transportul energiei termice de la corpul cu temperatura mai ridicată la corpul cu temperatura mai scăzută. Corpul mai rece va absorbi la orice frecvență mai mulți fotoni decât va emite, iar numărul fotonilor emiși de către corpul cald la orice frecvență este mai mare decât numărul fotonilor absorbiți:

$$\begin{aligned} P_{em}^{cald} &> P_{abs}^{cald} && \text{pentru corpul cald} \\ P_{abs}^{rece} &> P_{em}^{rece} && \text{pentru corpul rece} \end{aligned} \quad (13)$$

Cu toate ca inegalitățile (13) sunt satisfăcute la orice frecvența pentru oricare substanțe, diferența probabilităților de absorbție și emisie este o funcție de frecvența radiației electromagnetice din mediul înconjurător:

$$\begin{aligned} P_{em} - P_{abs} &= \left( \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} + u_\nu \right) B_{nm} C_e^{-\frac{E_n}{kT}} - u_\nu B_{nm} C_e^{-\frac{E_m}{kT}}, \\ P_{em} - P_{abs} &= f(B_{nm}(\nu)) \end{aligned} \quad (14)$$

unde s-a introdus distribuția Maxwell-Boltzmann a numărului de particule pe nivelele energetice ale substanței:

$$N_n = C_e^{-\frac{E_n}{kT}}. \quad (15)$$

Dependenta coeficientului  $B_{nm}$  de frecvența depinde de la substanța la substanța așa cum s-a arătat deja în teoria tranzițiilor cuantice. Astfel, existența tranzițiilor cuantificate poate să fie generalizată pentru întreaga substanță. Acest lucru înseamnă că pentru anumite frecvențe, caracteristice fiecărei substanței, probabilitatea de emisie (și în consecință și cea de absorbție) este mai mare decât pentru alte frecvențe. Spectrul undelor electromagnetice nu va mai fi un spectru continuu, ci unele frecvențe vor apărea cu o intensitate mult mai mare decât celelalte. Astfel spectrul radiației substanței cu temperatura mai mare este în preponderența de emisie în timp ce spectrul substanței cu temperatura mai scăzută este în preponderența un spectru de absorbție. Intensitatea liniilor spectrale este cu atât mai mare cu cât dezechilibrul dintre temperatura corpului și radiația electromagnetică este mai mare.

Atunci când substanțele prin intermediul moleculelor și a atomilor constituenți trec dintr-o stare energetică în alta pot absorbi sau emite fotoni cu o frecvență proporțională cu diferența de energie:

$$\nu_0 = \frac{E_n - E_m}{h}. \quad (16)$$

Relația (16) se poate interpreta ca o determinare exactă a frecvențelor fotonilor emiși și/sau absorbiți. În spectrele de emisie și absorbție ar trebui să fie apară întotdeauna linii extrem de subțiri, cu o intensitate mare. Experimental nu se constată acest lucru.

### Timpul de relaxare și lărgimea de linie. Principiul de incertitudine a lui Heisenberg

Liniile spectrale experimentale au anumite lățimi dependente de temperatura și densitatea substanței emitente sau absorbante. Se pot identifica câteva efecte care produc lărgirea liniilor spectrale.

I Mișcarea Browniana a atomilor care constituie fiecare substanță. Atomii emitenți pot avea orice viteză,  $v$  și prin urmare frecvența observată,  $\nu$  este afectată de efectul Doppler:

$$\nu = \frac{c}{c - v} \nu_0, \quad (17)$$

unde  $c$  este viteza undei electromagnetice. Intensitatea luminii emise în funcție de frecvența se poate scrie atunci:

$$I_G(\nu) \propto e^{-\frac{m \cdot (\nu - \nu_0)^2}{2kT \cdot \nu^2}}. \quad (18)$$

pentru care se poate scrie lărgimea de linie la semiînălțime ca fiind:

$$\Delta \nu_G = \frac{2\nu_0}{c} \sqrt{\frac{2k_B T \ln 2}{m}} \propto \sqrt{\frac{T}{\mu}} \nu_0, \quad (19)$$

unde s-a notat cu  $\mu$  masa molară a substanței. Observația importantă aici este aceea că lărgimea liniei spectrale crește proporțional cu  $T^{1/2}$ , aceasta fiind o măsură a mișcării haotice a atomilor. Această mișcare corelată cu efectul Doppler poate să explice într-o manieră asemănătoare și spectrele de absorbție.

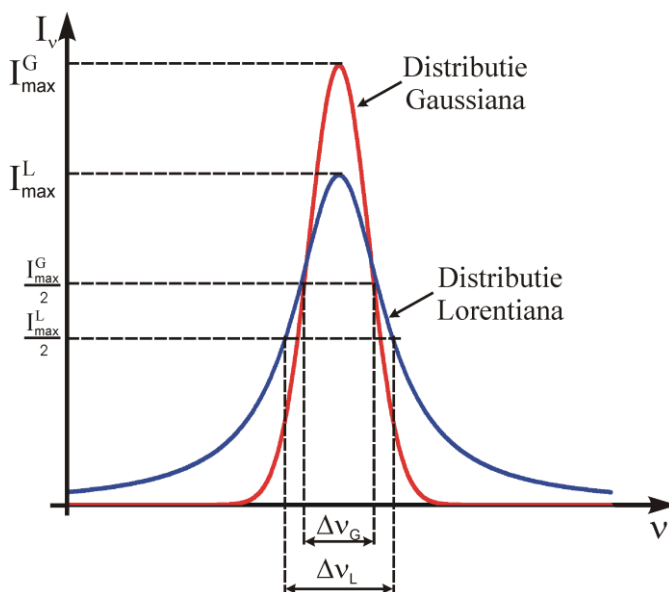


Figura 2 Distribuții Gaussiană și Lorentziană a lărgimii nivelurilor energetice.

II Undele electromagnetice nu sunt unde monocromatice, ci sunt considerate doar ca anumite trenuri de undă cu durată mai scurtă decât timpul mediu dintre două ciocniri consecutive a atomilor în mișcarea lor. Un astfel de tren de unde de durată,  $\tau$  și de frecvență  $\nu_0$  este considerat ca o suprapunere de foarte multe unde monocromatice de frecvențe

apropiate cu  $v_0$ . Intensitatea unui astfel de tren de unde este poate să fie descrisă de funcția Lorentziană:

$$I_L(\nu) \propto \frac{1}{(\nu - \nu_0)^2 + \left(\frac{1}{2\pi\tau}\right)^2} + \frac{1}{(\nu + \nu_0)^2 + \left(\frac{1}{2\pi\tau}\right)^2}. \quad (20)$$

și care este caracterizată de lărgimea de linie la semiînălțime:

$$\Delta\nu_G = \frac{1}{\pi\tau}, \quad (21)$$

și care depinde de durata trenurilor de unde,  $\tau$  și astfel depinde de timpul mediu dintre două ciocniri succesive care este mai mare decât  $\tau$ .

**III** Un efect cuantic al lărgirii de linie este acela care rezultă din **principiul de incertitudine a lui Heisenberg**. Acest principiu afirmă că nu se poate determina prin nici o măsurătoare simultană localizarea unei particule și impulsul acesteia cu o precizie infinit mare. Astfel produsul impreciziilor în determinarea poziției și a impulsului nu poate să fie mai mic decât constanta lui Planck:

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq h. \quad (22)$$

Acest principiu se poate scrie și pentru alte două observabile cuantice și anume energia și timpul. Astfel **principiul de incertitudine a lui Heisenberg** pentru lărgimea unui nivel energetic și timpul de viață al unei particule (în particular electronul) pe acest nivel energetic există relația:

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq h. \quad (23)$$

Din relația (23) rezultă că pentru ca un nivel energetic să fie descris de o energie foarte bine definită trebuie ca particulele aflate pe acest nivel energetic să aibă un timp de viață infinit. În cealaltă extremă sunt particule cu timp de viață extrem de scurt dar pentru care energia lor este rău definită, lucru care duce la lărgirea liniilor spectrale.

### **Inversiunea de populație**

Radiația electromagnetică emisă de către diferitele domenii ale unei substanțe incandescente nu sunt coerente ci sunt polarizate în plane diferite iar planul de polarizare se schimbă în mod complet aleatoriu de la un tren de unde la altul. Aceste proprietăți sunt observate pentru filamentele incandescente ale becurilor electrice sau gazele incandescente dintr-un arc electric. Astfel creșterea numărului de electroni pe

nivelele superioare și distrugerea echilibrului dintre substanța și câmpul de radiație electromagnetică din mediul înconjurător se realizează prin creșterea temperaturii substanței. Există însă și alte posibilități de a realiza emisia luminii. Una dintre acestea presupune producerea unui dezechilibru între substanța și radiația electromagnetică prin aplicarea unei metode oarecare pentru a se realiza o creștere a numărului de electroni pe nivelele energetice superioare și scăderea pe nivelele inferioare. Creșterea numărului de electroni pe nivelele superioare se poate realiza, de exemplu, prin bombardarea substanței cu particule accelerate sau cu un fascicul de fotoni. În practică asemenea procese se pot obține în tuburile de descărcări în gaze unde atomii din gaz obțin energia necesară prin ciocniri.

Caracterizarea formală a cazurilor pentru care numărul electronilor de pe nivelele energetice superioare este mai mare decât numărul electronilor de pe nivelele energetice inferioare se poate face prin introducerea conceptului de *temperatura negativă*. Formal se poate utiliza funcția de distribuție Maxwell–Boltzmann pentru raportul numărului de particule de pe două nivele succesive:

$$\frac{N_n}{N_m} = e^{-\frac{E_n - E_m}{k_B T}}, \quad (24)$$

unde  $E_n > E_m$  și  $N_n > N_m$  deci  $T$  este considerată formal negativă.

*Inversiunea de populație prin intermediul fasciculului de particule sau fotoni se poate realiza atunci când fasciculul de particule sau fotoni este suficient de intens pentru ca timpul caracteristic saltului electronilor pe nivelele superioare să fie mai mic sau de ordinul de mărime al timpului caracteristic în care electronii trec de pe nivelele superioare pe cele inferioare iar timpul în care s-ar restabili natural distribuția Maxwell–Boltzmann este suficient de mare pentru ca ciocnirile să nu distrugă inversiunea de populație.*

### **Metode de realizare a inversiunii de populație**

Metodele de realizare a inversiunii de populație sunt foarte variate și care sunt bazate pe anumite procese specifice:

- a) Iradierea substanței cu unde electromagnetice, atât în domeniul vizibil cât și în domeniile infraroșu sau ultraviolet sau cu radiații Röntgen.
- b) Bombardarea substanței cu particule accelerate, electroni, ioni, nuclee atomice.
- c) Inversiunea orientării câmpului magnetic exterior.

d) Aplicarea unei diferențe de potențial la suprafața de contact dintre semiconductorii de tip  $n$  și  $p$ .

Realizarea inversiunii de populație în joncțiunea  $np$  descrisă la punctul d) are o deosebită importanță pentru laserii cu semiconductori, accesibili pe scară largă. Laserii cu semiconductori s-au realizat sub forma unor diode laser din GaAs, GaP, InP, GaSb, InAs, InSb dopate cu impurități.

## LASERII

Substanțele pentru care s-a realizat inversiunea de populație prezintă o proprietate esențială: *Dacă prin substanța trece o undă electromagnetică de energie egală cu diferența de populație  $h\nu = E_n - E_m$  atunci unda electromagnetică va induce o emisie stimulată de aceeași frecvență, aceeași polarizare și de aceeași fază, care se va suprapune peste unda incidentă, și care va conduce o amplificare a intensității unde electromagnetice.* Sursele optice de amplificatori cuantici se numesc laseri (light amplification by stimulated emission of radiation)<sup>1</sup>.

Unul dintre laserii clasici este laserul cu rubin. Impulsurile unui astfel de laser sunt caracterizate de anumite proprietăți: putere mare, 20-30 kW dar energie mică 0.1-1.5 J, monocromaticitate pronunțată, polarizare perfectă, coerență spațială, coerență temporară (lungimea de coerență  $\sim 3$  m care corespunde unei coerențe de  $\sim 10^{-8}$  s), paralelism pronunțat. Datorită acestor proprietăți ale luminii emise de laseri aceștia pot fi utilizați ca: surse de lumină monocromatică (etalonarea spectrografelor, măsurători interferometrice de distanțe, determinarea vitezelor prin efect Doppler), surse de iluminare, spectroscopie, sudare, medicină, telecomunicații.

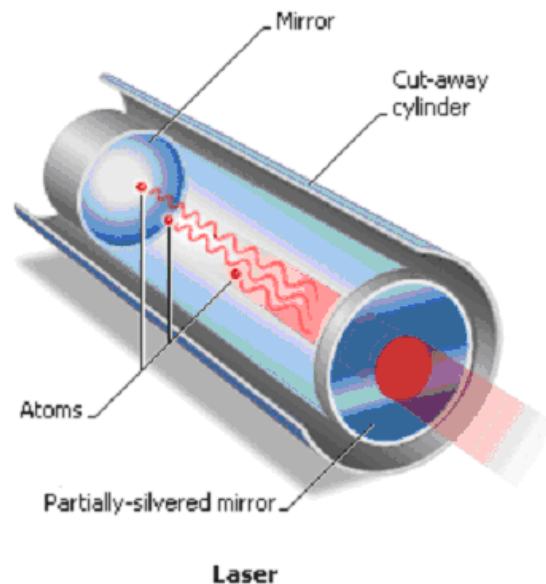


Figura 3 Reprezentare schematică a generării luminii LASER.

<sup>1</sup> Primul LASER cu heliu și neon a fost construit în 1960 pe baza studiilor efectuate de Jovan și Sanders. Înaintea acestora (1950) prima amplificare a microundelor a fost propusă în URSS de către Basov și Prohov și de către Weber și Townes în SUA. În România primul laser a fost construit în anul 1962, la Institutul de Fizică Atomică de către prof. I. Agarbiceanu.



## Holografia

Prin Holografie se înțelege o metodă de înregistrare și de reconstrucție a fronturilor undelor electromagnetice și acustice în care se conservă informația legată de amplitudinea și faza undelor. Holografia optică<sup>2</sup> reprezintă mijlocul de a capta pe o placă fotografică structura unei luminoase reflectate de un obiect. La iluminarea acestei plăci, numită *holograma*, cu un fascicul luminos se obține o undă de forma celei inițiale, astfel încât privind holograma se vede o imagine în relief și care dă senzația ca se privește însuși obiectul.

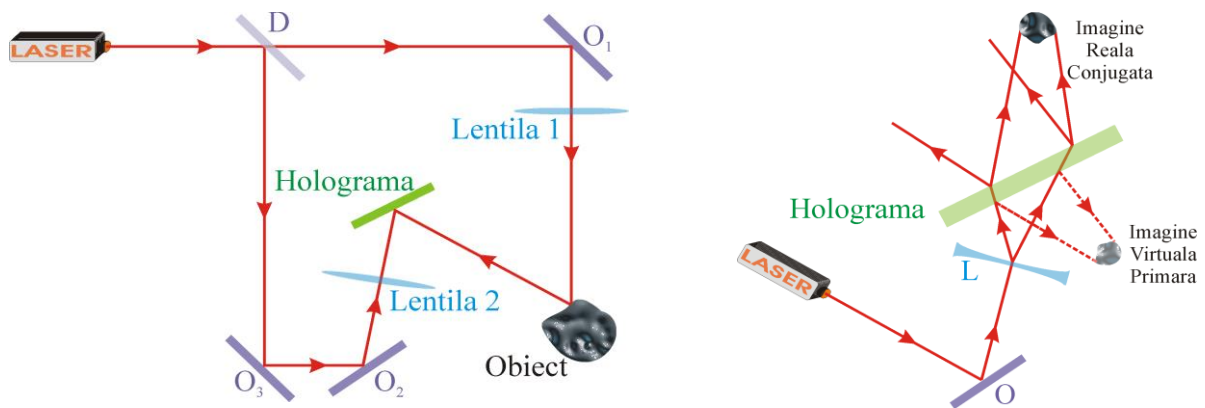


Figura 4 Codarea 3D a imaginii unui obiect real (stânga) și decodarea imaginii din hologramă obținerea unei imagini reale și virtuale a obiectului (dreapta).

Holografia a fost propusă inițial de către fizicianul englez Dennis Gabor în anul 1947 însă descoperirea sa a putut fi materializată doar în anul 1963 după ce a fost posibilă utilizarea unei surse de lumină monocromatică și coerentă ca aceea produsă de un laser cu heliu-neon utilizată de către fizicienii americani Leith și Upatnicks.

Procesul de observare holografică cuprinde două etape, în prima etapă se înregistrează holograma în timp ce în etapa a doua are loc reconstrucția suprafeței de undă. Pentru înregistrarea hologramei un fascicul de lumină monocromatică și coerentă, provenit de la o sursă laser, este divizat de către divizorul **D** (care poate să fie o oglindă semiargintată) în două fascicule așa cum se vede în figura. Unul dintre aceste fascicule este dirijat înspre un obiect tridimensional și care îl difuzează mai departe drept **unda obiect** spre mediul de înregistrare (*holograma*) unde se suprapune peste cel de-al doilea fascicul de referință numit **unda de referință** și care este trimis fără a fi alterat spre mediul de înregistrare. Cele două unde fiind coerente, fiindcă

<sup>2</sup> Holografia: care înseamnă scrierea totală, și care provine de la cuvintele grecești, holos = întreg, și grafein = scriere.

provin de la aceeași sursă, vor forma pe mediul de înregistrare un tablou de interferență, un sistem complet de franje și care odată înregistrată va constitui ceea ce se numește holograma obiectului. Holograma astfel obținută conține informațiile complete despre amplitudine și fază caracteristice obiectului. Amplitudinea este înregistrată ca și în metoda fotografică, prin înregistrarea intensității undelor, iar faza este înregistrată prin intermediul fenomenului de interferență. Aceste informații complementare caracteristice frontului de undă al obiectului, oferă caracterul de spațialitate imaginilor obținute prin holografie, caracter care lipsește în metoda fotografică obișnuită, care înregistrează numai intensități fără a stoca și informația legată de fază.

## LED-ul

LED provine din engleză și înseamnă Light emitting diode. LED-urile sunt dispozitive de iluminat extrem de eficiente și fiabile. Acestea pot fi întâlnite în zilele noastre în aproape toate locurile unde este nevoie de o sursă de lumină: iluminarea locuinței, iluminatul stradal și ca și un criteriu de modernism farurile și stopurile automobilelor. LED-urile sunt relativ ieftine în sensul raportului energie consumată preț. Reprezintă în felul acesta o sursă extrem de eficientă de lumină.

Părțile componente ale unui LED sunt redată în figura alăturată. Seamănă cu un bec clasic cu incandescență. Avem doi electrozi unul pozitiv și unul negativ care sunt conectați la anod și la catod. Partea luminescentă efectivă este un semiconductor.

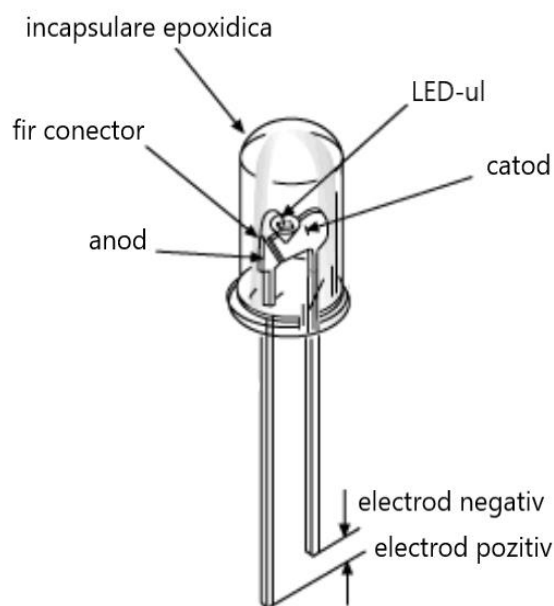


Figura 5 Reprezentarea schematică a unui LED.

Se observă și un fir conector între anod și semiconductor, partea care emite lumină. Pentru o eficiență mai mare fluxul luminos este focalizat folosind o lentilă convergentă localizată în poziția din față. LED-urile pot să emită lumină albă sau colorată: roșu, portocaliu, verde, albastru.