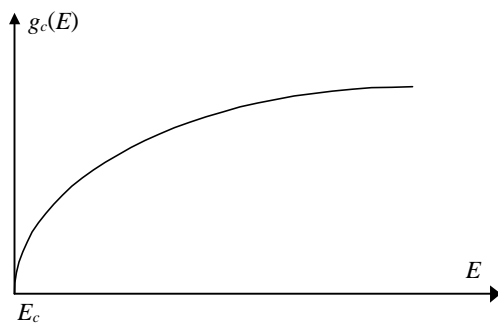


## LASERI CU STRUCTURI MEZOSCOPICE

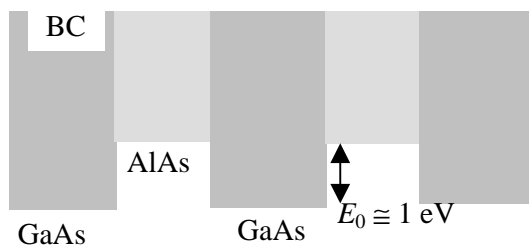
- spectrul radiatiei laser emise depinde de densitatile de stari in BC si BV,  $g_c(E)$  si  $g_v(E)$ . Aceste densitati de stari variaza parabolic cu energia in semiconductori omogeni, dar au un spectru mult mai confinat in jurul unor energii rezonante (energiile unor stari stationare) daca in loc de jonctiuni p-n sau heterostructuri se folosesc structuri cu dimensiuni reduse (structuri mezoscopice), de exemplu gropi cuantice, fire cuantice sau puncte cuantice. Confinarea densitatii de stari in jurul unor energii duce la cresterea coeficientului de castig

-  $g_c(E)$  in BC pentru un semiconductor omogen arata ca in figura de mai jos, si este dat de

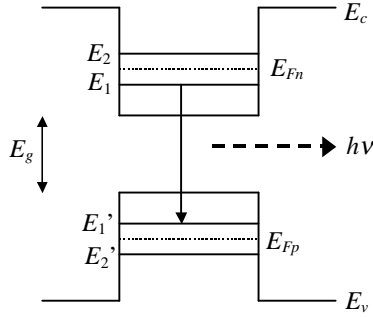
$$g_c(E) = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{2m_c}{\hbar^2} \right)^{3/2} \sqrt{E - E_c}$$



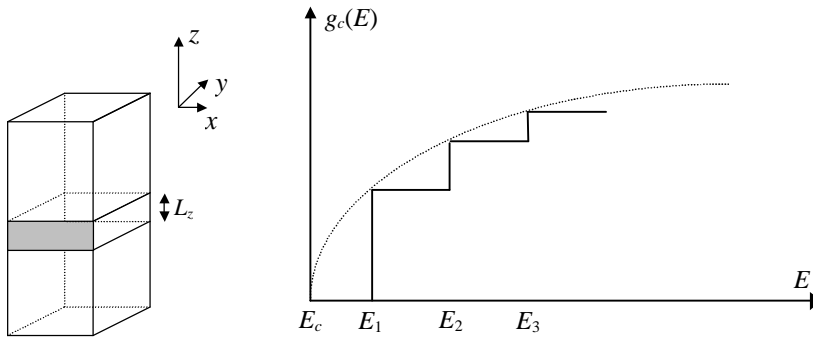
- o groapa cuantica este formata dintr-o succesiune de straturi subtiri din semiconductori diferiti, astfel incat la interfata a doua astfel de straturi marginile BV, respective BC, sufera discontinuitati (semiconductorii au benzi interzide de largimi  $E_g$  diferite). Diagrama energetica a BC, de exemplu, intr-o groapa cuantica arata ca in figura de mai jos



AlAs este in acest caz bariera pentru miscarea electronilor, si GaAs este groapa de potential (pot exista una sau mai multe gropi). Deoarece nivelele energetice ale electronilor intr-o groapa cuantica sunt discrete, datorita confinarii spatiale, tranzitiile au loc in acest caz intre nivele discrete din BC si nivele discrete din BV, astfel incat spectrul tranzitiei este mult mai ingust decat la laserii cu jonctiuni p-n obisnuite. Nivelele discrete din BV si BC intre care au loc tranzitiile, precum si pozitia nivelelor Fermi in BV si BC, sunt reprezentate in figura de mai jos



-  $g_c(E)$  pentru electroni intr-o groapa cuantica in BC confinata de-a lungul axei  $z$  arata ca in figura de mai jos.  $E_j$  sunt stările stationare in groapa cuantica (cu linie punctata este reprezentat  $g_c(E)$  pentru semiconductorul omogen)



$g_c(E)$  se poate calcula daca se cunoaste spectrul energetic al electronilor din BC. Pentru o bariera de inaltime de potential infinita nivelele discrete de energie sunt date de

$$E_j = \frac{\hbar^2}{2m_c} \left( \frac{j\pi}{L_z} \right)^2,$$

unde  $m_c$  este masa efectiva a electronului si  $j$  este un intreg. Nivelul de referinta al energiei este luat la marginea inferioara a BC, adica este  $E_c$ . Deoarece  $E_j > 0$ , nivelele discrete de energie sunt in interiorul BC

- densitatea de stari pentru o distributie arbitrara de energie in spatiul  $\mathbf{k}$  se poate calcula cu formula generala (vezi cursul de solid)

$$g(E) = \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{\Sigma} \frac{dS}{|\nabla_{\mathbf{k}} E|_{E=\text{const.}}}$$

unde  $\Sigma$  este suprafata in spatiul  $\mathbf{k}$  pe care energia  $E(\mathbf{k})$  este constanta, si integrarea se face pe

aceasta suprafata. Pentru groapa cuantica  $E(\mathbf{k}) = \frac{\hbar^2}{2m_c} \left[ k_x^2 + k_y^2 + \left( \frac{j\pi}{L_z} \right)^2 \right]$  si

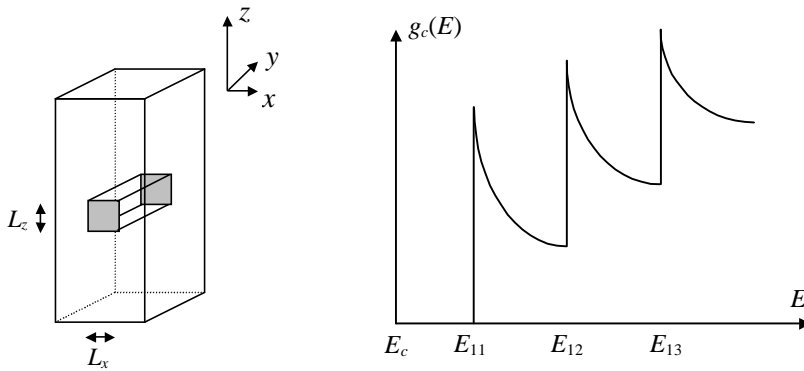
$$g_c(E) = \frac{m_c}{\pi \hbar^2 L_z} \sum_j \theta(E - E_j),$$

unde  $\theta$  este functia treapta a lui Heaviside. Pentru  $E = E_j$ ,  $g_c(E) = j(m_c / \pi \hbar^2 L_z)$  o valoare identical cu densitatea de stari  $g_c(E) = (2m_c / \hbar^2)^{3/2} \sqrt{E} / 2\pi^2$ ,  $E > E_c$ , intr-un semiconductor omogen pentru aceeasi valoare a energiei (vezi figura de mai sus)

- nivelele de energie discrete in BV se calculeaza analog, dar rezultatele sunt mai complicate datorita prezentei benzilor de goluri usoare si grele, care se mixeaza si a caror comportare de-a lungul lui  $z$  si perpendicular pe  $z$  (directia de confinare) este diferita

- daca mai multe gropi cuantice sunt plasate la distante mici, electronii confinati in una din gropi pot sau nu interactiona cu electronii din gropile adiacente. In primul caz electronii sunt localizati intr-o singura groapa si transportul lor dintr-o groapa in alta, in prezenta unor campuri externe, de exemplu, are loc prin tunelare secventiala intre gropi adiacente. In al doilea caz gropile cuantice sunt cuplate si structura se numeste superlatice cuantica (superlaticea este de obicei o structura periodica de gropi cuantice separate de bariere de potential). Functia de unda a electronului se extinde de-a lungul intregii structuri si stările energetice nu mai sunt discrete ci formeaza benzi permise si interzise.

-  $g_c(E)$  pentru electroni intr-un fir cuantic confinat de-a lungul axelor  $x$  si  $z$  arata ca in figura de mai jos.  $E_{pq}$  sunt stările stationare in firul cuantic



- nivelele discrete de energie ale unui electron intr-un fir cuantic in BC inconjurat de bariere infinite de potential sunt

$$E_{pq} = \frac{\hbar^2}{2m_c} \left[ \left( \frac{p\pi}{L_x} \right)^2 + \left( \frac{q\pi}{L_z} \right)^2 \right]$$

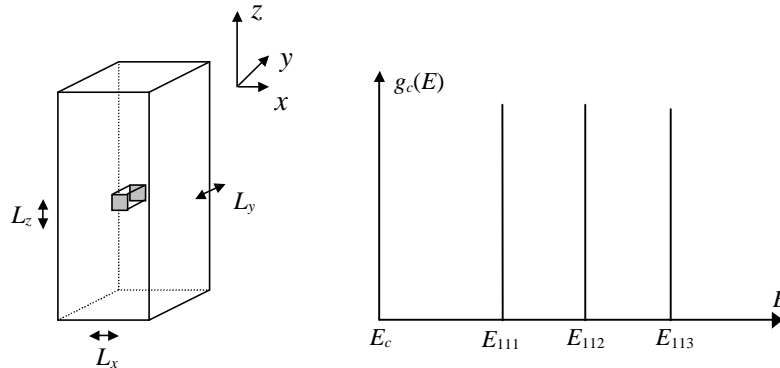
iar energia totala este

$$E = \frac{\hbar^2}{2m_c} \left[ k_y^2 + \left( \frac{p\pi}{L_x} \right)^2 + \left( \frac{q\pi}{L_z} \right)^2 \right]$$

- densitatea de stari este (folosind formula generala de mai sus)

$$g_c(E) = \frac{1}{\pi L_x L_z} \sqrt{\frac{2m_c}{\hbar^2}} \sum_{p,q} \frac{1}{\sqrt{E - E_{pq}}}$$

-  $g_c(E)$  pentru electroni intr-un punct cuantic confinat de-a lungul celor trei axe  $x$ ,  $y$  si  $z$  arata ca in figura de mai jos.  $E_{pqr}$  sunt starile stationare in firul cuantic



Intr-un punct cuantic nivelele de energie sunt date de

$$E_{pqr} = \frac{\hbar^2}{2m_c} \left[ \left( \frac{p\pi}{L_x} \right)^2 + \left( \frac{q\pi}{L_y} \right)^2 + \left( \frac{r\pi}{L_z} \right)^2 \right]$$

iar densitatea de stari (calculata cu formula generala de mai sus) este proportionala cu functia Dirac:

$$g_c(E) = \frac{2}{L_x L_y L_z} \sum_{p,q,r} \delta(E - E_{pqr})$$

### LASERI CU STRUCTURI MEZOSCOPICE CA MEDII ACTIVE

- deoarece densitatea de stari in structurile mezoscopice este mai confinata in jurul energiilor rezonante (energiile starilor stationare), coeficientul de castig in laserii cu structuri mezoscopice ca medii active este mai mare, iar curentul de prag este mai mic decat la laserii cu injectie cu jonctiuni p-n. Pe de alta parte, puterea emisa de laserii care au structuri mezoscopice ca medii active este mai mica pentru ca numarul de purtatori implicati in tranzitii este mai mic. Laserii cu structuri mezoscopice ca medii active sunt preferati fata de laserii cu jonctiuni p-n in aplicatii unde este necesara o rata mare de modulatie in frecventa. Considerand parametrii laserilor cu jonctiuni p-n ca unitate, imbunatatirea (teoretica) a coeficientului de castig, densitatii de curent de prag si benzii de modulatie in laserii cu structuri mezoscopice ca medii active este prezentata in tabelul de mai jos

parametru	semiconductor omogen	groapa cuantica	fir cuantic	punct cuantic
coeficient de castig	1	2	3	30
densitate de curent de prag	1	1/3	1/8	1/20
banda de modulatie	1	2	3	5

- laserii cu structuri mezoscopice ca medii active functioneaza pe acelasi principiu ca laserii cu jonctiuni p-n: coeficientul de castig trebuie sa fie mai mare decat pierderile interne (trebuie sa se realizeze conditia de amplificarea a radiatiei), si mediul activ trebuie sa fie pus intr-o cavitata Fabry-Perot pentru a se realiza conditia de coerenta a radiatiei emise

- coeficientul de castig se calculeaza intr-un mod similar cu cel al laserului cu jonctiune p-n folosind noile expresii ale densitatii de stari si introducand in functiile de distributie Fermi-Dirac expresiile energiilor electronilor confinati.

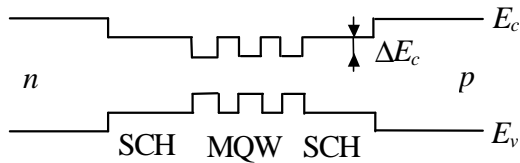
- ca rezultat al acestor modificari, coeficientul de castig  $g$  nu mai este dependent liniar de  $j$  (pentru  $j > j_p$ ) sau de densitatea de electroni  $N$  pentru  $N > N_p$ , ci are o dependenta de tipul

$$g(N) = g_p \ln(N / N_p)$$

- desi in principiu exista (si chiar au fost demonstrati experimental) laseri cu fire cuantice si chiar cu puncte cuantice, marea majoritate a laserilor cu medii active mezoscopice sunt laseri cu gropi cuantice. Considerentele sunt in principal de natura tehnologica

- laserii cu gropi cuantice pot avea una sau mai multe gropi in mediul activ. In primul caz se numesc SQW (single quantum well), iar in al doilea caz MQW (multiple quantum well).

- in ambele cazuri regiunea activa este separata de un strat intermediar SCH (separate confinement heterostructure) de regiunile dopate p, n care reprezinta sursa de purtatori



Aceste regiuni intermediare, care pot avea benzi de energie constante sau gradate au rolul de a creste gradul de confinare a radiatiei in regiunea activa, actionand ca ghid de unda pentru radiatia optica.

Observatie: structurile mezoscopice (gropile cuantice in particular) sunt nedopate, pentru ca nivelele energetice sa ramana discrete!

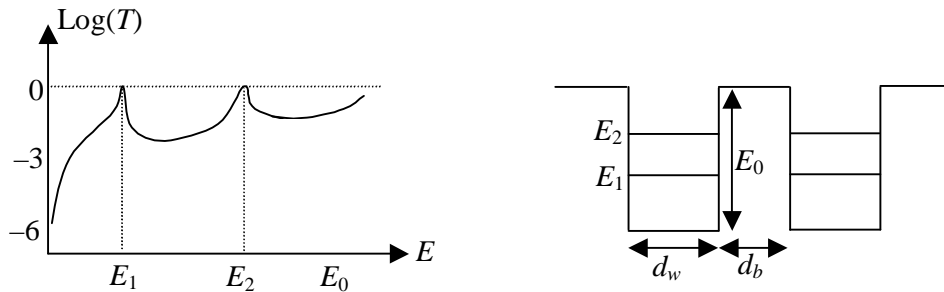
- pentru a scadea coeficientul de castig de prag si deci a scadea  $j_p$ , o solutie este si de a stresa materialul; pentru grosimi ale stratului mai mici decat o valoare critica nu se formeaza dislocatii datorita stresului de la interfata a doua materiale cu latici diferite. Dar in astfel de materiale BC, si BV pentru goluri usoare si grele sunt deplasate, degenerarea intre goluri usoare si grele pentru  $k = 0$  dispare, si masa efectiva a golurilor, respectiv densitatea lor de stari se modifica. Calcule detaliate arata ca coeficientul de castig de prag scade cu pana la 50% intr-un laser cu AlGaInP, de exemplu, pentru o modificare a laticii datorata stresului de 0.5%. Rezultatele sunt diferite pentru stres compresiv si dilatativ (compressive strain si tensile strain)

## LASERI CU TUNELARE

- pot exista laseri in care tranzitiile au loc intre nivele discrete din aceeași banda, BC sau BV, si la care la efect participa doar un singur tip de purtatori de sarcina. Acesti laseri functioneaza

in domeniul infrarou (IR) indepartat ( $h\nu$  este mult mai mic decat la laserii pe baza de tranzitii intre BV-BC sau intre nivele discrete din aceste benzi) si au de asemenea un spectru foarte ingust pentru ca tranzitiile au loc din nou intre nivele discrete

- acesti laseri se bazeaza pe fenomenul de tunelare a electronilor dintr-o parte in alta a unei structuri care consta gropi si bariere de potential. Deplasarea electronilor intr-o astfel de structura se face prin tunelare in cazul in care energia lor are valori mai mici decat bariera de potential de la interfata dintre groapa si bariera de potential,  $E_0$ . Contrar asteptarilor, transmisia printr-o astfel de structura poate avea valori mari, chiar egale cu 1, pentru anumite energii. Un exemplu tipic de curba de transmisie este dat in figura de mai jos.



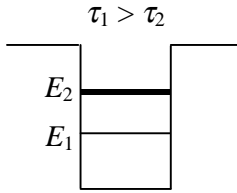
Pozitiile energetice ale maximelor curbei de transmisie,  $E_1$  si  $E_2$ , corespund formarii unor stari stationare in groapa de potential de inaltime  $E_0$ . Energiile acestor stari sunt valorile proprii ale Hamiltonianului asociat miscarii purtatorilor de sarcina. Starile energetice stationare sunt inguste, deci si transmisia la aceste energii este ingusta. Latimea gropii de potential  $d_w$  si latimea barierei de potential  $d_b$  sunt cuprinse in intervalul 20–200 Å. Curba de transmisie are valori mari doar daca am cel putin doua gropi de energie separate printr-o bariera ingusta (ca in figura de mai sus). In acest caz structura se numeste rezonanta.

- trecerea electronilor printr-o structura rezonanta de tipul celei de mai sus (tunelarea electronilor) la energii corespunzatoare starilor stationare din groapa se numeste tunelare rezonanta. Numarul si pozitia energetica a maximelor transmisiei depinde de latimea gropii si inaltimea barierei; numarul starilor creste cu cresterea latimii gropii si cu cresterea inaltimei barierei. Daca s-ar putea realiza inversia de populatie intre starile stationare s-ar putea realiza un laser cu un spectru foarte ingust.

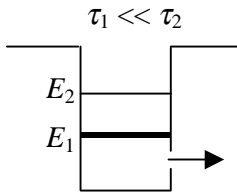
Observatie: Nivelele stationare nu au populatie proprie, nu sunt stari de echilibru! La echilibru termic populatia nivelelor  $E_1$  si  $E_2$  sunt formate din purtatori de sarcina in tranzitie dintr-o parte in alta a structurii rezonante

- discutia referitoare la inversia de populatie se pune in termeni de probabilitati de tranzitie intre cele doua nivele, respective timpi de viata ai acestor nivele, egale cu inversul probabilitatilor de tranzitie

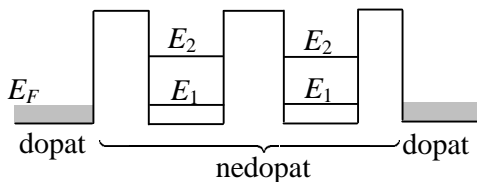
- in conditii normale, timpul de viata al starii inferioare,  $\tau_1$ , este totdeauna mai mare ca cel al starii superioare,  $\tau_2$ , iar densitatile de populatie respective se afla in relatia  $N_1 > N_2$ . Din relatia de incertitudine, latimea energetica a  $E_1$ ,  $\Delta E_1$ , este mai mica decat  $\Delta E_2$  (latimile energetice sunt reprezentate in figura de mai jos prin grosimea liniilor care reprezinta starile stationare)



- pentru o inversie de populatie semnificativa este necesar ca  $\tau_1 \ll \tau_2$ . Cea mai simpla metoda de realizare a acestei conditii este practicarea unei 'ferestre' la marginea inferioara a gropii, astfel incat sa existe posibilitatea ca functia de unda electronica sa se extinda dincolo de groapa de potential (vezi figura de mai jos)

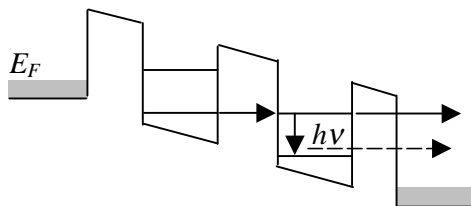


- practice, asa ceva se poate realiza intr-o structura cu mai multe bariere si gropi. 'Fereastra' este in acest caz prezenta celei de-a doua gropi separata de prima printr-o bariera ingusta. Structura poate fi simetrica sau nu, si la echilibru arata ca in figura de mai jos



- daca structura are gropi identice, 'ferestrele' pentru nivelele din prima groapa (posibilitatea de tunelare rezonanta pe nivelele din a doua groapa) sunt deschise simultan pentru cele doua nivele, astfel incat nu se poate realiza o inversie de populatie

- daca se aplica pe structura o diferenta de potential, diagrama nivelelor energetice se modifica si arata ca in figura de mai jos



- regiunea dopata, aflata la o energie potentiala mai mare este emitor, cea la o energie potentiala mai mica este colector de electroni. Structura mesoscopica nu este dopata, pentru ca nivelele energetice sa ramana discrete.

- presupun ca primul nivel al primei gropi se afla aproximativ la nivelul Fermi al semiconductorului din stanga structurii (emitor). In acest caz el este nivelul populat cu electroni care tuneleaza pe al doilea nivel din cea de-a doua groapa

De aici electronii au urmatoarele posibilitati:

- 1) tranzitii radiative (cu emisie de fotoni) pe primul nivel din a doua groapa cuantica
- 2) tranzitii neradiative (cu participarea fononilor) pe primul nivel din a doua groapa
- 3) tunelare prin bariera in exteriorul structurii

Pentru a se realiza inversia de populatie trebuie ca numarul de electroni pe al doilea nivel din a doua groapa cuantica sa fie mai mare decat pe primul:  $N_2 > N_1$ . Deci, din electronii care vin din stanga este important sa am un numar cat mai mic care tuneleaza. Inversia de populatie se realizeaza cand  $\tau_{21} > \tau_1$ , unde  $1/\tau_{21} = P_r + P_{nr}$  este probabilitatea totala de tranzitie (radiativa plus neradiativa) de pe nivelul 2 pe 1 din a doua groapa cuantica, si  $1/\tau_1 = P_t$  este probabilitatea de tunelare de pe nivelul 1 in colector

Practic  $\Delta N = N_2 - N_1 = \frac{j}{e}(\tau_{21} - \tau_1)$ , unde  $j$  este densitatea de current

- eficienta cuantica a acestui proces este

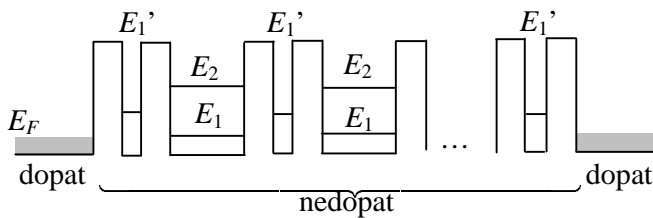
$$\eta_{ci} = \frac{P_r}{P_r + P_{nr} + P_t}$$

Eficienta cuantica depinde de temperatura: este mai mare la temperaturi mai mici pentru ca  $N_1$  este mai mic. In general  $\eta_{ci} \cong 10^{-4}$ . Din acest motiv laserii cu tunelare nu sunt folositi inca pe scara larga. Oricum, aceasta eficienta de  $10^{-4}$  este mult mai mare (cu aproximativ trei ordine de marime) decat orice alta metoda de a genera radiatie coerenta in IR indepartat (pentru lungimi de unda mai mari ca  $10 \mu\text{m}$ )

- intensitatea radiatiei emise creste daca, punand structura intr-o cavitate rezonanta, apare un feedback al cavitatii; curentul de prag atinge  $j_p \cong 5 \text{ kA/cm}^2$

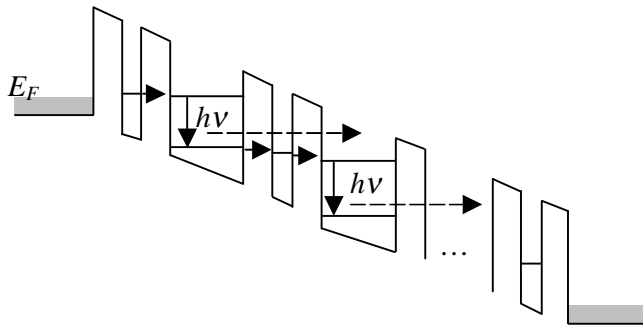
- intensitatea radiatiei emise creste de asemenea daca am o cascada de astfel de laseri cu gropi cuantice. Laserul in acest caz se numeste laser in cascada

Exemplu: structura cu gropi neidentice



Grosimea gropilor se alege astfel incat la echilibru ( $V = 0$ )  $E_1' = (E_1 + E_2)/2$ . Atunci, la aplicarea unei tensiuni exterioare, diagrama benzilor energetice se modifica ca in figura de mai jos

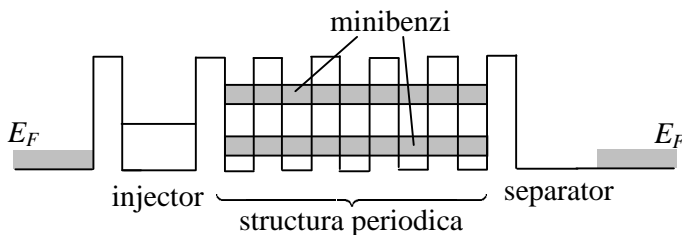




Pot exista 60–80 astfel de perioade

- structura prezentata mai sus functioneaza la  $V > 0$ . Pot exista structuri care functioneaza pentru ambele polaritati ale campului electric aplicat:  $V > 0$  si  $V < 0$

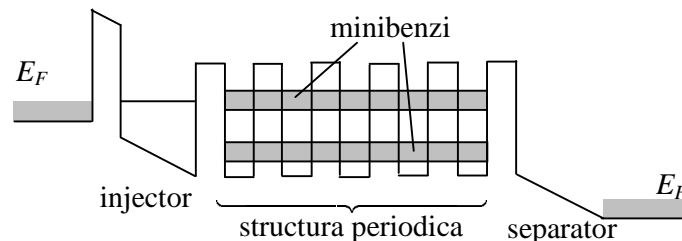
Exemplu:



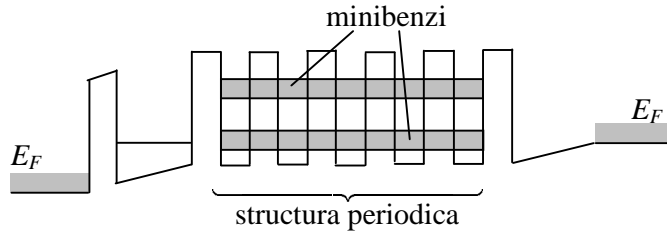
Minibenzile apar datorita unirii, in structura periodica, a nivelelor de impuritati din fiecare groapa (structura periodica este dopata in acest caz)

- pentru a explica cum functioneaza dispozitivul prezentat mai sus, presupunem ca intreaga cadere de potential cade pe injector si separator (nedopate)

- daca  $V > 0$  (vezi figura de mai jos), starea stationara a injectorului este aliniata la banda superioara a regiunii periodice (active), astfel incat populatia acesteia creste (aici avem populatie de echilibru initiala, pentru  $V = 0$ !). Apare astfel inversia de populatie. Populatia nivelului inferior al regiunii active ar creste si ea pentru ca se afla aproximativ la nivelul Fermi al colectorului, in conditii de echilibru – de aceea este necesar separatorul



- daca  $V < 0$  inversia de populatie se realizeaza prin tunelarea rezonanta a nivelului injectorului (care joaca acum rol de ‘fereastră’)



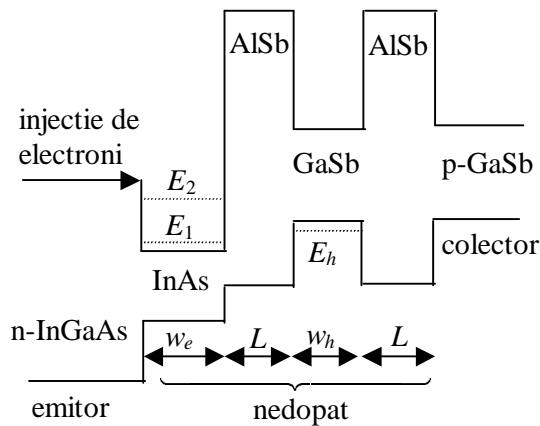
Pot exista diverse combinatii de astfel de laseri cu benzi aliniate

- pana acum am studiat laseri cu semiconductori in care participa un singur tip de purtatori de sarcina. Pot exista laseri in IR indepartat la care sa participe purtatori de sarcina de ambele tipuri, fara ca tranzitiile sa se realizeze intre BV si BC ale unui semiconductor. Acestia sunt asa numiti laseri cu heterostructuri politip.

- heterostructurile se pot clasifica in doua tipuri: I si II:

- heterostructuri de tip I sunt cele la care ne-am referit pana acum, in care purtatorii de sarcina implicati in traversarea heterostructurii sunt de un singur tip: electroni sau goluri. Heterostructuri de tip I sunt GaAs/AlAs, GaAs/AlGaAs
- la heterostructurile de tip II ambele tipuri de purtatori de sarcina sunt implicate in traversarea heterostructurii. Exemplu de heterostructura de tip II : InAs/AlSb/GaSb

Exemplu de structura de laser politip:



$$w_e = 70-120 \text{ \AA}, L = 15-30 \text{ \AA}, w_h = 120 \text{ \AA}$$

Prima grupa de potential este proiectata astfel incat sa aiba doua nivele rezonante. A doua grupa are un nivel  $E_h$ . De fapt in GaSb exista doua grapi cuantice: una in BC, alta in BV. Doar ultima joaca un rol in emisia laser. Fereastra se datoreaza lui  $E_h$ .

Printr-o alegere corespunzatoare a latimii primei grapi  $E_2$  poate fi impins in banda interzisa a structurii de la dreapta sa iar  $E_1$  poate fi aproximativ in dreptul lui  $E_h$ , astfel incat electronii din  $E_2$  ajung in collector doar datorita tranzitiei pe  $E_1$  si apoi tunelare

La echilibru  $E_h > E_1$  astfel incat ele sa se alinieze perfect pentru o anumita tensiune

- inversia de populatie este data de

$$\Delta N \approx \tau_{21} - \tau_{11}$$

unde  $\tau_{21}$  este timpul total de relaxare de pe  $E_2$  pe  $E_1$ , si  $\tau_{t1}$  este timpul necesar electronului de pe  $E_1$  sa iasa din prima groapa cuantica prin tunelare

- realizarea inversiei de populatie se poate realiza si intre nivele din BV:

