

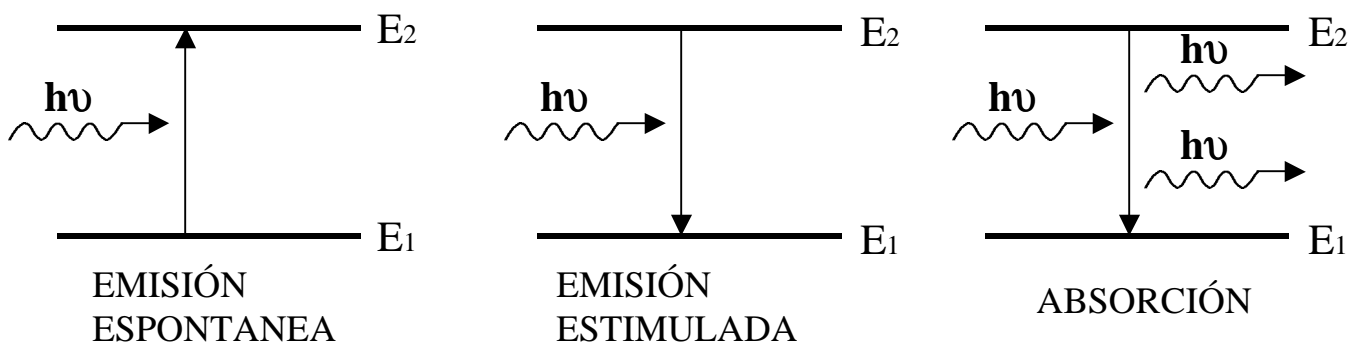
EL TRANSMISOR ÓPTICO

- **CONVERSIÓN DE LA SEÑAL DE ENTRADA ELÉCTRICA EN SEÑAL ÓPTICA.**
- **FUENTES ÓPTICAS SEMICONDUCTORAS:**
 - **LED:** DIODOS EMISORES DE LUZ.
 - **EL LASER:**

VENTAJAS DE LAS FUENTES ÓPTICAS SEMICONDUCTORAS

- DIMENSIONES COMPACTAS.
- ELEVADA DE EFICIENCIA.
- BUENA CONFIABILIDAD.
- RANGO DE LONGITUD DE ONDA ADECUADA.
- ÁREA DE EMISIÓN ESTRECHA COMPATIBLE CON LAS DIMENSIONES DEL NÚCLEO DE LA FIBRA.
- POSIBILIDAD DE LA MODULACIÓN DIRECTA PARA RELATIVAS ALTAS FRECUENCIAS.
 - SE ELIMINA LA NECESIDAD DE UN MODULADOR EXTERNO EXTERNO.

CONCEPTOS BÁSICOS PROCESOS FUNDAMENTALES



E_1 =ESTADO FUNDAMENTAL DE ENERGÍA

E_2 =ESTADO EXCITADO DE ENERGÍA

ABSORCIÓN

- EL FOTÓN ES ABSORBIDO POR EL ÁTOMO.
- ENERGÍA $h\nu$ ES IGUAL A $E_g = E_2 - E_1$
- LA LUZ INCIDENTE SE ATENÚA COMO CONSECUENCIA DE NUMEROSOS EVENTOS DE ABSORCIÓN SIMILARES QUE OCURREN EN EL MEDIO MATERIAL.

EMISIÓN

- LOS ÁTOMOS EXCITADOS EVENTUALMENTE RETORNAN A SU ESTADO ENERGÉTICO FUNDAMENTAL NORMAL EMITIENDO LUZ DURANTE ESTE PROCESO.
- PROCESOS DE EMISIÓN:
 - **EMISIÓN ESPONTÁNEA:** SE EMITE FOTONES EN DIRECCIONES ALEATORIAS SIN NINGUNA RELACIÓN DE FASE ENTRE SI.
 - EL LED EMITE LUZ A TRAVÉS DE PROCESOS INCOHERENTES DE EMISIÓN ESPONTÁNEA.
 - **EMISIÓN ESTIMULADA:** LA EMISIÓN SE INICIA CON FOTONES, CUYAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS SON CONOCIDAS.
 - SE EMITE LUZ COHERENTE.
 - LOS FOTONES EMITIDOS ESTÁN RELACIONADOS CON EL FOTÓN INICIAL EN SUS PARÁMETROS DE ENERGÍA, FRECUENCIA Y DIRECCIÓN DE PROPAGACIÓN.
 - TODOS LOS LASERS SEMICONDUCTORES EMITEN A TRAVÉS DE PROCESOS DE EMISIÓN ESTIMULADA Y POR LO TANTO GENERAN LUZ COHERENTE.

VELOCIDADES DE EMISIÓN Y ABSORCIÓN

- VELOCIDAD DE EMISIÓN ESPONTÁNEA: $R_{\text{spon}} = A \cdot N_2$
- VELOCIDAD DE EMISIÓN ESTIMULADA: $R_{\text{stim}} = B \cdot N_2 \cdot \rho_{\text{ph}}$
- VELOCIDAD DE ABSORCIÓN: $R_{\text{abs}} = B' \cdot N_1 \cdot \rho_{\text{ph}}$
 - ρ_{ph} = ES LA DENSIDAD ESPECTRAL.
 - SISTEMA ATÓMICO DE DOS NIVELES.
 - N_1 = DENSIDAD ATÓMICA EN EL NIVEL FUNDAMENTAL.
 - N_2 = DENSIDAD ATÓMICA EN EL ESTADO EXCITADO.
 - A, B, B' SON CONSTANTES.

DISTRIBUCIÓN DE LAS DENSIDADES ATÓMICAS DISTRIBUIDAS DE ACUERDO A LA ESTADÍSTICA DE BOLTZMANN

$$N_2 / N_1 = e^{-E_g / K_B T} = e^{-h\nu / K_B T} \quad \begin{array}{l} K_B = \text{CONSTANTE DE BOLTZMANN} \\ T = \text{TEMPERATURA ABSOLUTA} \end{array}$$

**VELOCIDAD DE TRANSICIÓN DE LOS PROCESOS
ASCENDENTES (DE E₁ A E₂) Y DESCENDENTES (DE E₂ A E₁)
EMISIÓN=ABSORCIÓN. $R_{\text{spon}} + R_{\text{stim}} = R_{\text{abs}}$**

$$A N_2 + B N_2 \rho_{\text{ph}} = B' N_1 \rho_{\text{ph}}$$

SE OBTIENE LA DENSIDAD ESPECTRAL:

$$\rho_{\text{ph}} = \frac{A / B}{\frac{B'}{B} e^{h\nu / K_B T} - 1}$$

COMPARACIÓN CON LA FÓRMULA DE
PLANCK: PARA LA DENSIDAD ESPECTRAL DE
LA RADIACIÓN DE UN CUERPO NEGRO

$$\rho_{\text{ph}} = \frac{8\pi h \nu^3 / C^3}{e^{h\nu / K_B T} - 1}$$

RESULTAN LOS COEFICIENTES DE
EINSTEIN:

$$A = (8\pi h \nu^3 / C^3) \cdot B \quad \text{y} \quad B' = B$$

CONCLUSIONES

- PARA $K_B T > h\nu$ LA VELOCIDAD DE EMISIÓN ESPONTÁNEA R_{spon} PUEDE SUPERAR CONSIDERÁBLEMENTE TANTO A LA:
 - VELOCIDAD DE EMISIÓN ESTIMULADA R_{stim} .
 - VELOCIDAD DE ABSORCIÓN R_{abs} .
 - LAS FUENTES TÉRMICAS OPERAN EN ESTE RÉGIMEN.
- EN EQUILIBRIO TÉRMICO A TEMPERATURA AMBIENTE $K_B T = 25 \text{ meV}$. PARA LA REGIÓN VISIBLE CERCANA A LA INFRAROJA ($h\nu = 1 \text{ eV}$)
 - LA EMISIÓN ESPONTÁNEA ES DOMINANTE SOBRE LA EMISIÓN ESTIMULADA. DONDE:

$$\frac{R_{\text{stim}}}{R_{\text{spon}}} = \frac{1}{e^{h\nu / K_B T}} \ll 1 \quad \rightarrow \quad R_{\text{stim}} \ll R_{\text{spon}}$$

- POR ESTA RAZÓN TODOS LOS LASERS DEBEN OPERAR LEJOS DEL EQUILIBRIO TÉRMICO
 - SE LOGRA BOMBEANDO EL LASER CON UNA FUENTE DE ENERGÍA EXTERNA.

CONDICIÓN DE INVERSIÓN DE LA VECINDAD DE DENSIDADES ATÓMICAS

•EN UN SISTEMA ATÓMICO BOMBEADO EXTERNAMENTE:

•LA EMISIÓN ESTIMULADA NO ES EL PROCESO DOMINANTE:

•SE TIENE QUE VENCER LA ABSORCIÓN:

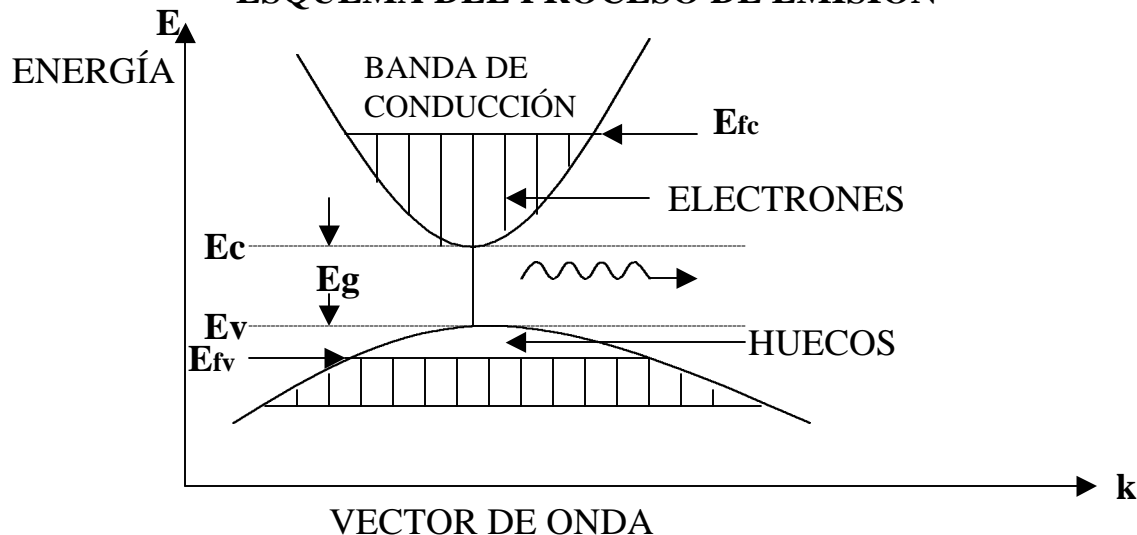
•CONDICIÓN: $R_{stim} > R_{abs}$ si $N_2 > N_1$

•NO SE ALCANZA EN SISTEMAS EN EQUILIBRIO TÉRMICO

•PARA QUE EL LASER OPERE DEBE CUMPLIRSE ESTA CONDICIÓN

•UNA FUENTE DE ENERGÍA ARRANCA LA VECINDAD DE DENSIDADES ATÓMICAS DEL ESTADO FUNDAMENTAL, EXCITÁNDOLO EN UN ESTADO SITUADO POR ARRIBA.

ESQUEMA DEL PROCESO DE EMISIÓN



•LOS ELECTRONES EN LA BANDA DE CONDUCCIÓN Y HUECOS EN LA BANDA DE VALENCIA, PUEDEN RECOMBINARSE

•EMITEN UN FOTÓN A TRAVÉS:

•EMISIÓN ESPONTÁNEA

•EMISIÓN ESTIMULADA

LAS VELOCIDADES DE EMISIÓN Y ABSORCIÓN DEPENDE DE:

LAS BANDAS DE ENERGÍA ASOCIADA CON EL SEMICONDUCTOR

LA EMISIÓN ESPONTANEA: OCURRE SI EL ESTADO DE ENERGÍA E_2 ES OCUPADO POR UN ELECTRÓN Y EL ESTADO DE ENERGÍA E_1 ESTÁ VACÍO (OCUPADO POR UN HUECO).

LA FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN DE FERMI: PROBABILIDAD DE OCUPACIÓN DE ESTADOS POR ELECTRONES EN LA BANDA DE CONDUCCIÓN:

$$f_c(E_2) = \frac{1}{1 + e^{\frac{E_2 - E_{fc}}{k_B T}}}$$

PROBABILIDAD DE OCUPACIÓN DE ESTADOS POR ELECTRONES EN LA BANDA DE VALENCIA:

$$f_v(E_1) = \frac{1}{1 + e^{\frac{E_1 - E_{fv}}{k_B T}}}$$

LA VELOCIDAD TOTAL DE EMISIÓN ESPONTANEA PARA LA FRECUENCIA ω $R_{\text{spon}}(\omega)$: SE OBTIENE DE LA SUMATORIA SOBRE TODAS LAS TRANSICIONES POSIBLES ENTRE LAS DOS BANDAS:

• SI E_{ph} ES LA ENERGÍA EMITIDA POR EL FOTÓN:

$$E_{\text{ph}} = E_2 - E_1 = \hbar\omega$$

$$\text{con } \omega = 2\pi\nu \quad \text{y} \quad \hbar = \frac{h}{2\pi}$$

• CON LA DENSIDAD DE ESTADOS DE LA UNIÓN: ρ_{cv} . NÚMERO DE ESTADOS POR UNIDAD DE VOLUMEN Y POR UNIDAD DE RANGO DE ENERGÍA.

$$R_{\text{spon}} = \int_{E_c}^{\infty} A(E_1, E_2) f_c(E_2) [1 - f_v(E_1)] \rho_{\text{cv}} dE_2; \quad \rho_{\text{cv}} = \frac{(2m_r)^{3/2}}{2\pi^2 \hbar^3} (\hbar\omega - E_g)^{1/2};$$

$$m_r = \frac{m_c m_v}{m_c + m_v}$$

m_r ES LA MASA REDUCIDA

$A(E_1, E_2)$ ES EL ELEMENTO MATRICIAL DEL IMPULSO

LAS VELOCIDADES DE EMISIÓN Y ABSORCIÓN ESTIMULADA

$$R_{\text{stim}}(\omega) = \int_{E_c}^{\infty} B(E_1, E_2) f_c(E_2) [1 - f_v(E_1)] \rho_{\text{cv}} \rho_{\text{ph}} dE_2$$

$$R_{\text{abs}}(\omega) = \int_{E_c}^{\infty} B(E_1, E_2) f_v(E_1) [1 - f_c(E_2)] \rho_{\text{cv}} \rho_{\text{ph}} dE_1$$

ρ_{ph} ES LA DENSIDAD ESPECTRAL DEL FOTÓN, SE OBTIENE SIMILAR A ρ_{cv}

LA CONDICIÓN DE INVERSIÓN DE LA VECINDAD DE DENSIDADES ATÓMICAS

$$R_{stim} > R_{abs} \rightarrow f_c(E_2) > f_v(E_1)$$

CON LAS FUNCIONES DE DISTRIBUCIÓN DE FERMI

$$f_c(E_2) = \frac{1}{1 + e^{\frac{E_2 - E_{fc}}{k_B T}}} \quad f_v(E_1) = \frac{1}{1 + e^{\frac{E_1 - E_{fv}}{k_B T}}} \quad \begin{matrix} E_2 - E_{fc} < E_1 - E_{fv} \\ E_2 - E_1 < E_{fc} - E_{fv} \end{matrix}$$

$$E_{fc} - E_{fv} > E_2 - E_1 > E_g$$

CONDICIONES PARA LA GENERACIÓN DE LA INVERSIÓN DE LA VECINDAD DE DENSIDADES ATÓMICAS

- LOS NIVELES DE FERMI DEBEN SER MAYORES QUE LA BANDA PROHIBIDA.
- EL VALOR MÍNIMO $E_2 - E_1$ ES E_g
- EN EQUILIBRIO TÉRMICO, LOS DOS NIVELES DE FERMI COINCIDEN: $E_{fc} = E_{fv}$.
 - SE SEPARA BOMBEANDO ENERGÍA EN EL SEMICONDUCTOR DESDE UNA FUENTE DE ENERGÍA EXTERNA.
 - POR MEDIO DE UNA UNIÓN PN POLARIZADA DIRÉCTAMENTE SE BOMBEA ENERGÍA EN EL SEMICONDUCTOR.

LA UNIÓN PN

NÚCLEO PRINCIPAL DE LA FUENTE ÓPTICA SEMICONDUCTORA

SEMICONDUCTOR TIPO n. EXCESO DE UN ELECTRÓN DE VALENCIA

SEMICONDUCTOR TIPO p. CARENCIA DE UN ELECTRÓN DE VALENCIA

- **PARA EL TIPO n:** LOS ELECTRONES EN EXCESO OCUPAN ESTADOS EN LA BANDA DE CONDUCCIÓN
- **LA DISTRIBUCIÓN DE FERMI DIRAC:** DA LA PROBABILIDAD DE OCUPACIÓN

UBICACIÓN DEL NIVEL DE FERMI

- **SEMICONDUCTOR INTRÍNSECO:** EN EL MEDIO DE LA BANDA PROHIBIDA
- **SEMICONDUCTOR DEGENERADO, ALTAMENTE DOPADO:**
 - **TIPO n** EN LA BANDA DE CONDUCCIÓN.
 - **TIPO p** EN LA BANDA DE VALENCIA

DIAGRAMA DE BANDAS DE ENERGÍA DE LA HOMOUNIÓN PN EN EQUILIBRIO TÉRMICO

- SE USA EL MISMO MATERIAL A AMBOS LADOS DE LA UNIÓN.

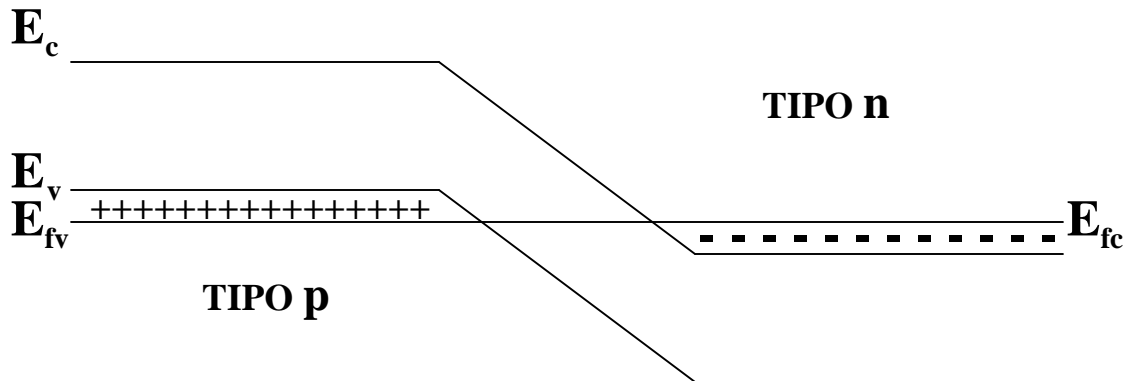


DIAGRAMA DE BANDAS DE ENERGÍA DE LA UNIÓN PN POLARIZADA DIRÉCTAMENTE

- LA CORRIENTE I SE INCREMENTA EXPONENCIALMENTE CON V.

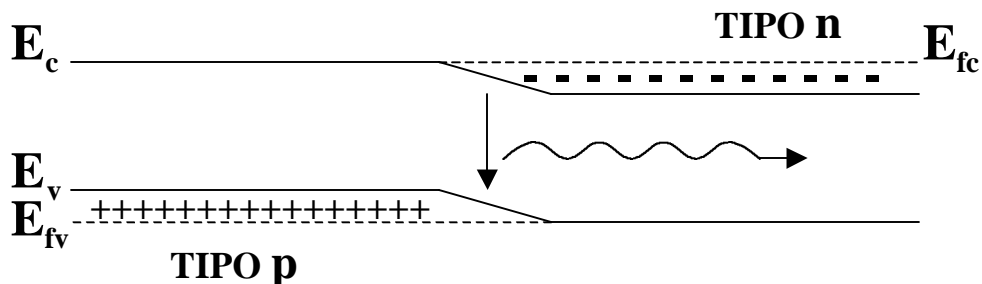
- EN LA REGIÓN DE VACÍAMENTO CERCANA A LA UNIÓN PN POLARIZADA DIRÉCTAMENTE:

- ELECTRONES Y HUECOS APARECEN SIMULTÁNEAMENTE.

- PUEDEN RECOMBINARSE POR EMISIÓN ESPONTÁNEA O ESTIMULADA Y GENERAR LUZ EN UNA FUENTE ÓPTICA SEMICONDUCTORA.

- LA RECOMBINACIÓN DE ELECTRONES Y HUECOS OCURRE EN UNA REGIÓN RELATIVAMENTE ANCHA (1 A 10 μ m).

- NO ES POSIBLE ENCERRAR A LOS PORTADORES DE CARGA EN UNA REGIÓN CERCANA A LA UNIÓN. NO SE LOGRA UNA ALTA CONCENTRACIÓN CERCA DE LA UNIÓN



LA HETEROUNIÓN DOBLE

SOLUCIÓN PARA EL PROBLEMA DE ENCIERRO DE PORTADORES

•SE INTRODUCE ENTRE LAS DOS CAPAS TIPO-**p** Y TIPO-**n** OTRA CAPA MUY DELGADA

- LA BANDA PROHIBIDA DE LA CAPA DELGADA INTERMEDIA ES MÁS ANGOSTA QUE LA ANCHURA DE BANDA PROHIBIDA DE LAS OTRAS DOS CAPAS TIPO **p** Y **n** VECINAS.
- LA CAPA INTERMEDIA PUEDE ESTAR O NO DOPADA.
- LA CAPA INTERMEDIA CUMPLE LA FUNCIÓN DE ENCERRAR LOS PORTADORES DE CARGA INYECTADOS EN LA UNIÓN BAJO POLARIZACIÓN DIRECTA.
- EL ENCIERRO DE LOS PORTADORES DE CARGA SE GENERA DEBIDO A LA DISCONTINUIDAD DE LA BANDA PROHIBIDA.

SEMICONDUCTORES QUE FORMAN HETEROUNIONES:

- TIENEN LA MISMA ESTRUCTURA CRISTALINA O LA MISMA CONSTANTE DE RED.
- TIENEN DIFERENTES ANCHURA DE BANDAS PROHIBIDAS.

DIAGRAMA DE BANDA DE ENERGÍA DE UNA UNIÓN PN CON HETEROESTRUCTURA DOBLE EN EQUILIBRIO TÉRMICO

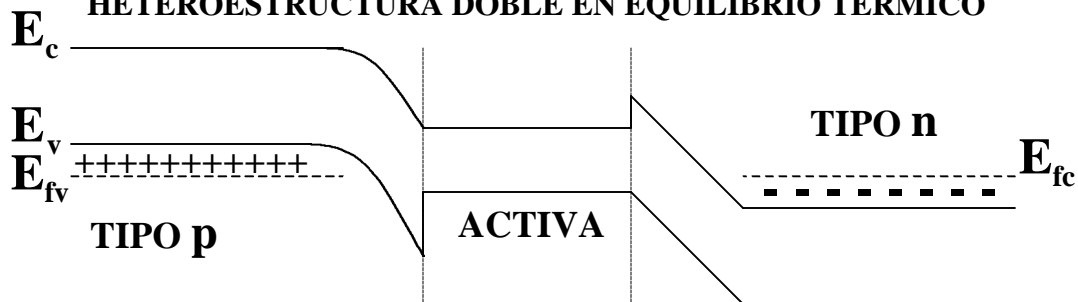
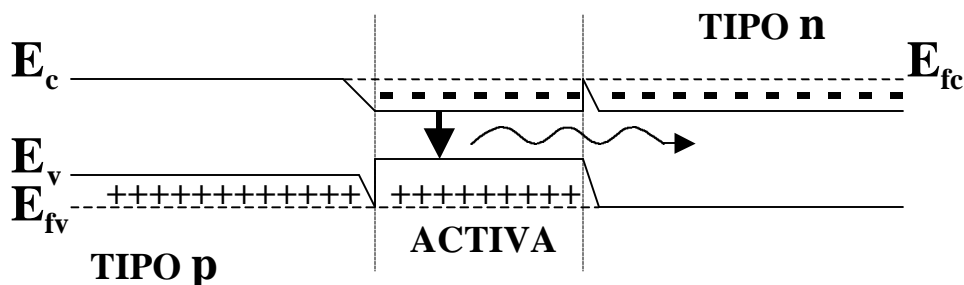


DIAGRAMA DE BANDA DE ENERGÍA DE UNA UNIÓN PN CON HETEROESTRUCTURA DOBLE POLARIZADA DIRECTAMENTE



ANCHURA DE LA CAPA INTERMEDIA

ES POSIBLE LOGRAR UNA ALTA DENSIDAD DE PORTADORES DE CARGA PARA UNA DETERMINADA CORRIENTE DE INYECCIÓN CONTROLANDO EXTERNAMENTE LA DELGADA ANCHURA DE LA CAPA INTERMEDIA.

• **ANCHURA TÍPICA: $0,1\mu\text{m}$**

VENTAJA DE LA GEOMETRÍA DE HETEROESTRUCTURA COMO FUENTE ÓPTICA SEMICONDUCTORA

• LA DIFERENCIA EN LA ANCHURA DE LA BANDA PROHIBIDA ENCIERRA LOS PORTADORES EN LA ZONA ACTIVA, SU RECOMBINACIÓN GENERA EMISIÓN DE LUZ.

• EL ÍNDICE DE REFRACCIÓN DE LA ZONA ACTIVA ES MAYOR QUE EN LAS ZONAS **p** Y **n**. LA ZONA ACTIVA SE COMPORTA COMO UNA GUÍA DE ONDA DIELECTRICA.

• LA CAPA ACTIVA SOPORTA MODOS ÓPTICOS. EL NÚMERO DE MODOS SE CONTROLA CON LA VARIACIÓN DE LA ANCHURA DE LA ZONA ACTIVA.

ENCIERRO SIMULTANEO DE PORTADORES DE CARGA Y LUZ GENERADA

• LA CAPA INTERMEDIA TIENE UNA BANDA PROHIBIDA MÁS ANGOSTA Y UN ÍNDICE DE REFRACCIÓN MÁS ALTO QUE EN LA REGIONES **p** Y **n**.

