

Transistor de unión bipolar

Dispositivos Semiconductores

Maestría en Ciencias de la Ingeniería

Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ingeniería

Docentes a cargo: **M. G. González y S. H. Carbonetto**



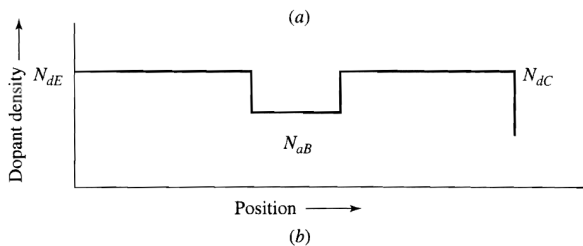
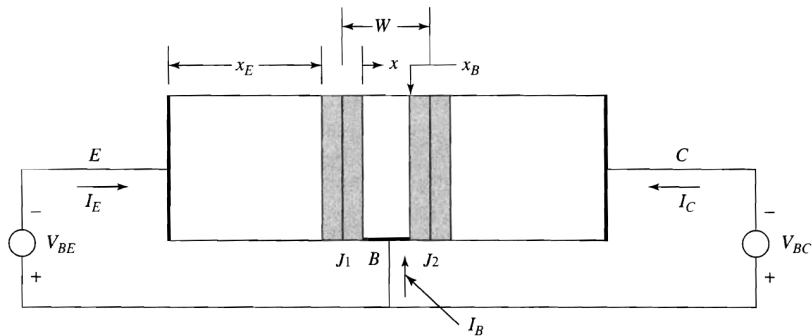
Tabla de contenido

- 1 Generalidades
- 2 Prototipo de TBJ
- 3 Regiones de operación
- 4 TBJ vertical y lateral
- 5 Características I-V en MAD
 - Corriente de colector
 - Corriente de base
 - Ganancia de corriente
 - Mediciones de un TBJ npn vertical
- 6 Modulación del ancho de la base
 - Efecto Early
 - Efecto Kirk

- La estructura PN permite la circulación de grandes corrientes en directa cuyo valor tiene una **dependencia exponencial** con la tensión aplicada entre sus terminales.
- En inversa la corriente es muy pequeña porque se nutre del arrastre de portadores minoritarios. Si se pudiera **agregar portadores en las vecindades de la SCR**, entonces, se podría aumentar el valor de la corriente.
- Un forma de lograr lo anterior es colocar una juntura PN en directa cerca de otra en inversa. Esto tiene la ventaja de que los minoritarios quedan bajo el **control eléctrico de una tensión** aplicada cerca de la unión en directa.

En resumen: la modulación del flujo de corriente en una juntura PN cambiando la tensión aplicada en otra juntura cercana a la primera se llama **acción transistor bipolar**.

Prototipo de TBJ



Hipótesis 1: las corrientes de p^+ , $E \rightarrow C$ y $C \rightarrow E$, son despreciables para cualquier V_{BE} y V_{BC} .

$$J_p = q\mu_p p \mathcal{E} - qD_p \frac{dp}{dx} = 0 \quad \Rightarrow \quad \mathcal{E} = \frac{kT}{q} \frac{1}{p} \frac{dp}{dx} \quad (1)$$

Hipótesis 2: Por otro lado, el flujo de n^- entre emisor (E) y colector (C) es posible ya que ambos pueden suplir de portadores a base (B).

$$J_n = q\mu_n n \mathcal{E} + qD_n \frac{dn}{dx} = kT\mu_n \frac{n}{p} \frac{dp}{dx} + qD_n \frac{dn}{dx} = \frac{qD_n}{p} \frac{d(np)}{dx} \quad (2)$$

Hipótesis 3: La recombinación es despreciable en la B, o sea, $J_n(x) = J_n$:

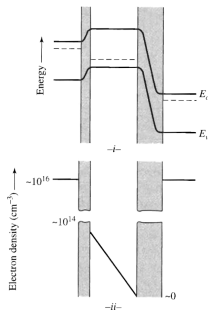
$$J_n \int_0^{W_B} \frac{p}{D_{nB}} dx = p(W_B)n(W_B) - p(0)n(0) \quad (3)$$

Usando ec. 2.14:

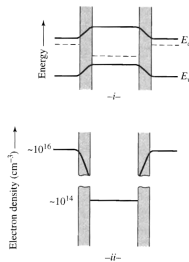
$$J_n = J_s [\exp(V_{BC}/V_{th}) - \exp(V_{BE}/V_{th})] \quad (4)$$

donde $J_s = \frac{q n_i^2 D_{nB}}{N_{aB} W_B}$

MODO ACTIVO DIRECTO

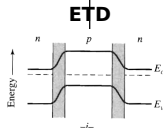


SATURACIÓN

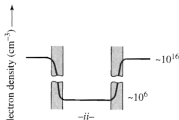
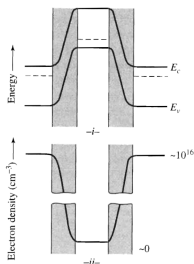


V_{BE}

ETD



CORTE



V_{BC}

MODO ACTIVO REVERSO

Regímenes de operación

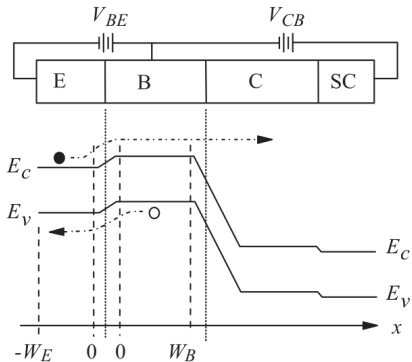
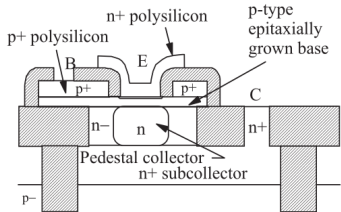
ETD: solo unos pocos e^- en la B ya que la inyección de portadores se encuentra inhibida por las barreras de potencial

CORTE: dado que ambas junturas se encuentran en inversa, se incrementa la altura de las barreras y la B queda sin portadores minoritarios. En DC actúa como circuito abierto y en AC tiene un comportamiento capacitivo.

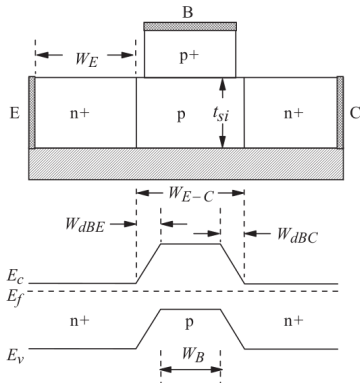
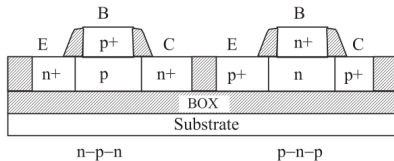
MODO ACTIVO: una juntura está en directa y otra en inversa (acción transistor bipolar). Este régimen es interesante porque hace posible la amplificación de señal. Una juntura emite e^- y otra colecta esos e^- y se establece una corriente entre E y C.

SATURACIÓN: ambas junturas están en directa, se reduce la altura de las barreras y se llena de e^- la B. Se pierde el control de la corriente que fluye entre E y C y lleva tiempo vaciar la B.

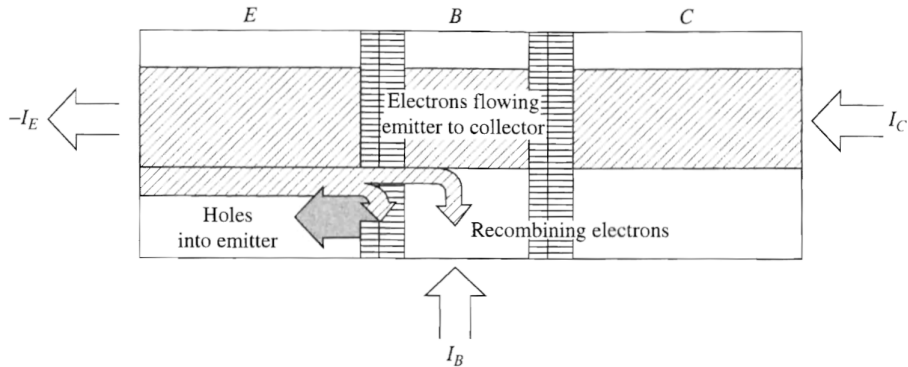
Vertical npn BJT



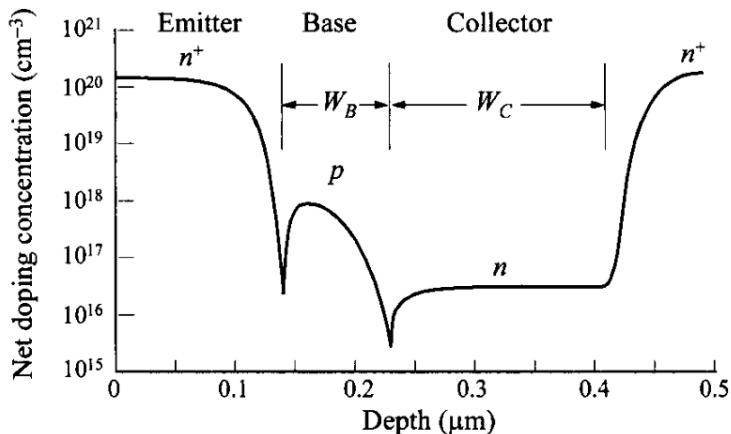
Symmetric lateral BJT on SOI



Corrientes principales en MAD



Perfil de dopaje típico de un TBJ npn vertical



Obtención de la corriente de colector

En la mayoría de los dispositivos VLSI modernos, las corrientes de B y C pueden ser descritas con **ecuaciones de transporte 1-D**.

Hipótesis: no hay recombinación en la QNR-B $\Rightarrow J_n(x) = J_n$

Para la corriente de e^- en la B se usa la ec. 1.44:

$$J_n = -q \mu_{n_B} n_p \frac{d\phi_n}{dx} \quad (5)$$

Considerando los valores típicos de N_B , la resistividad es baja y se puede decir que la **caída de tensión en la QNR-B es despreciable** \Rightarrow banda plana:

$$\frac{d\phi_p}{dx} \approx 0 \quad (6)$$

Usando 6 se puede reescribir 5:

$$J_n \approx q n_p \mu_{n_B} \frac{d(\phi_p - \phi_n)}{dx} \quad (7)$$

Recordando la ec. 1.46:

$$\phi_p - \phi_n = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{n_p p_p}{n_i^2} \right) \quad (8)$$

Reemplazando 8 en 7, y usando las relaciones de Einstein y la ley de acción de masas:

$$J_n = q D_{n_B} \frac{n_i^2}{p_p} \frac{d}{dx} \left(\frac{n_p p_p}{n_i^2} \right) \quad (9)$$

Integrando 9:

$$J_n \int_0^{W_B} \frac{p_p(x)}{q D_{n_B}(x) n_i^2} dx = \frac{n_p(W_B) p_p(W_B)}{n_i^2} - \frac{n_p(0) p_p(0)}{n_i^2} \quad (10)$$

Como se discutió más arriba, en MAD, $n_p(W_B) p_p(W_B) \ll n_p(0) p_p(0)$, entonces:

$$J_n \approx - \frac{n_p(0) p_p(0)}{n_i^2} \frac{1}{\int_0^{W_B} \frac{p_p(x)}{q D_{n_B}(x) n_i^2} dx} \quad (11)$$

Usando 2.14 en 11:

$$J_n = - \frac{\exp \left(\frac{V_{BE}}{V_{th}} \right)}{\int_0^{W_B} \frac{p_p(x)}{q D_{n_B}(x) n_i^2} dx} \quad (12)$$

Si se cumple la hipótesis de **cuasi-neutralidad** y **dopaje uniforme** en la B,

$$p_p(x) = p_{p0}(x) + \Delta p_p(x) = N_B + \Delta n_p(x) \quad (13)$$

Por otro lado, si $W_B \ll L_{n_B}$,

$$\Delta n_p(x) = \Delta n_{p0}(0) \left(1 - \frac{x}{W_B}\right) \quad (14)$$

Planteando la ec. 1.46 en $x = 0$:

$$p_p(0)n_p(0) = [p_{p0}(0) + \Delta p_p(0)] [n_{p0}(0) + \Delta n_p(0)] = n_i^2 \exp\left(\frac{V_{BE}}{V_{th}}\right) \quad (15)$$

Despejando $\Delta n_p(0)$ y reemplazando en 13 se obtiene:

$$p_p(x) = \frac{N_B}{2} + \frac{N_B}{2} \left[\sqrt{1 + \frac{4n_i^2}{N_B^2} \exp\left(\frac{V_{BE}}{V_{th}}\right)} - 1 \right] \quad (16)$$

Entonces,

$$\int_0^{W_B} p_p(x) dx = N_B W_B + \frac{N_B W_B}{4} \left[\sqrt{1 + \frac{4n_i^2}{N_B^2} \exp\left(\frac{V_{BE}}{V_{th}}\right)} - 1 \right] \quad (17)$$

En los TBJ vertical y lateral, el área que limita la corriente es la del E,

$$I_C = -A_E J_n \quad (18)$$

Reemplazando 17 en 12 y luego en 18:

$$I_C = \frac{A_E q D_{n_B} n_i^2}{N_B W_B} \left[1 + \frac{1}{4} \left(\sqrt{1 + \frac{4n_i^2}{N_B^2} \exp\left(\frac{V_{BE}}{V_{th}}\right)} - 1 \right) \right]^{-1} \exp\left(\frac{V_{BE}}{V_{th}}\right) \quad (19)$$

$$I_C = I_{C_0}(V_{BE}, V_{BC}) \exp\left(\frac{V_{BE}}{V_{th}}\right) \quad (20)$$

La ec. 20 es la corriente de colector para una **base angosta y uniformemente dopada** y es **válida para cualquier nivel de inyección**.

Para **alto nivel de inyección**, la expresión anterior se simplifica:

$$I_C(V_{BE} \gg V_{th}) = \frac{A_E 2 q D_{n_B} n_i}{W_B} \exp\left(\frac{V_{BE}}{2 V_{th}}\right) \quad (21)$$

Estas ecuaciones representan bastante bien el comportamiento de un **TBJ lateral simétrico**.

En el caso de un **TBJ vertical** (como se verá más adelante):

- $N_C < N_B$ para evitar que $W_B = 0$ (*punch-through*).
- $\Delta n < N_C$ para reducir el efecto Kirk.

En base a lo anterior, se debe operar en condición de **bajo nivel de inyección** (BNI), o sea, $\Delta n_p(x) \ll p_{p0}(x) \Rightarrow p_p(x) \approx p_{p0}(x)$. Por lo tanto, la corriente de colector si la siguiente expresión (reemplazando 12 en 18):

$$I_C = \frac{A_E q D_{n_B} n_i^2}{\int_0^{W_B} p_{p0}(x) dx} \exp\left(\frac{V_{BE}}{V_{th}}\right) = I_{C0} \exp\left(\frac{V_{BE}}{V_{th}}\right) \quad (22)$$

Si el dopaje es uniforme,

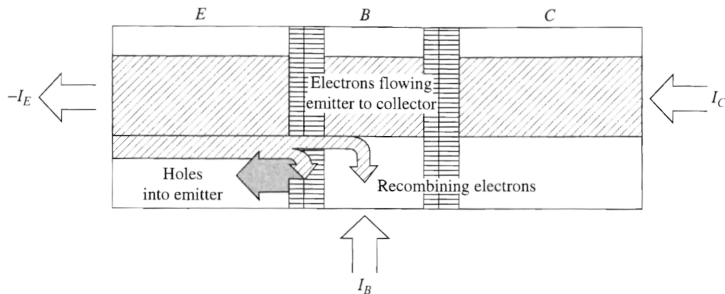
$$I_{C0}(V_{BE}, V_{BC}) = \frac{A_E q D_{n_B} n_i^2}{N_B W_B} \quad (23)$$

Obtención de la corriente de base

Las tres componentes principales de la corriente de base son:

- 1 La inyección de minoritarios en el emisor.
- 2 La recombinación de h^+ en la QNR-B con los e^- inyectados por E.
- 3 La recombinación de h^+ con e^- en la SCR-BE.

Cómo $W_B \ll L_{nB}$, la componente 2 suele ser despreciable frente a las otras dos. Cómo se vio en la clase "Diodos PN", la componente 3 es relevante a muy bajos valores de V_{BE} . Por lo tanto, en MAD, **la componente 1 es la predominante**.



Para la corriente de h^+ en la E se usa la ec. 1.45:

$$J_p = -q \mu_{pE} p_n \frac{d\phi_p}{dx} \quad (24)$$

Dados los valores típicos de N_E , la resistividad es muy baja y se puede decir que la **caída de tensión en la QNR-E es despreciable**, entonces:

$$\frac{d\phi_n}{dx} \approx 0 \quad (25)$$

Usando 25 se puede reescribir 24:

$$J_p \approx -q p_n \mu_{pE} \frac{d(\phi_p - \phi_n)}{dx} \quad (26)$$

Recordando la ec. 1.46:

$$\phi_p - \phi_n = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{p_n n_n}{n_i^2} \right) \quad (27)$$

Reemplazando 27 en 26, y usando las relaciones de Einstein y la ley de acción de masas:

$$J_p = -q D_{pE} \frac{n_i^2}{n_n} \frac{d}{dx} \left(\frac{p_n n_n}{n_i^2} \right) \quad (28)$$

Hipótesis 1: como el E suele estar fuertemente dopado, se puede suponer que para todas las tensiones “útiles” se está en una condición de bajo nivel de inyección, o sea, $n_n \approx n_{n0} = N_E$:

$$J_p = -q D_{pE} \frac{n_i^2}{n_{n0}} \frac{d}{dx} \left(\frac{p_n n_{n0}}{n_i^2} \right) \quad (29)$$

Hipótesis 2: se considera **emisor poco profundo o “transparente”** lo que implica que $W_E \ll L_{pE} \Rightarrow R_p \approx 0 \Rightarrow J_p(x) = J_p$

En el borde del E se suele escribir la corriente en función de la **velocidad de recombinación superficial**:

$$J_p (-W_E - x_{BE}) = J_p (-W'_E) = -q (p_n - p_{n0})_{x=W'_E} S_p \quad (30)$$

Integrando 29:

$$J_p \int_{-W_E}^{-x_{BE}} \frac{n_{n0}}{q D_{pE} n_i^2} dx = - \left. \frac{n_{p0} p_n}{n_i^2} \right|_{x=-x_{BE}} + \left. \frac{n_{p0} p_n}{n_i^2} \right|_{x=-W'_E} \quad (31)$$

Usando 2.14 en el primer término de la derecha y reemplazando 30 en 31:

$$J_p \int_{-W_E}^{-x_{BE}} \frac{n_{n0}}{q D_{pE} n_i^2} dx = - \exp\left(\frac{V_{BE}}{V_{th}}\right) + \frac{n_{n0}(-W'_E)}{n_i^2} \left(p_{p0} - \frac{J_p}{q S_p}\right) \quad (32)$$

Despejando J_p :

$$J_p = \frac{-q \exp\left(\frac{V_{BE}}{V_{th}}\right)}{\int_{-W_E}^{-x_{BE}} \frac{n_{n0}}{D_{pE} n_i^2} dx + \frac{n_{n0}(-W'_E)}{n_i^2 S_p}} \quad (33)$$

Por lo tanto,

$$I_B = A_E |J_p| = q A_E \exp\left(\frac{V_{BE}}{V_{th}}\right) \left(\int_{-W_E}^{-x_{BE}} \frac{n_{n0}}{D_{pE} n_i^2} dx + \frac{n_{n0}(-W'_E)}{n_i^2 S_p}\right)^{-1} \quad (34)$$

En el caso de **dopaje uniforme** en el E:

$$I_B = \frac{q A_E n_i^2}{N_E} \left(\frac{W_E}{D_{pE}} + \frac{1}{S_p} \right)^{-1} \exp \left(\frac{V_{BE}}{V_{th}} \right) \quad (35)$$

Nota: en el caso de un E de polisilicio, S_p se utiliza como parámetro variable para ajustar la ec. 35 con la I_B medida.

Hipótesis 3: si se considera que en $x = -W'_E$ hay un **contacto óhmico**, entonces $S_p \rightarrow \infty$. De esta manera, 35 toma la siguiente forma:

$$I_B = \frac{q A_E D_{pE} n_i^2}{N_E W_E} \exp \left(\frac{V_{BE}}{V_{th}} \right) = I_{B0} (V_{BE}) \exp \left(\frac{V_{BE}}{V_{th}} \right) \quad (36)$$

Ganancia de corriente

La **ganancia de corriente estática de emisor común** se define como:

$$\beta_0 \equiv \frac{I_C}{I_B} = \frac{J_{C_0}}{J_{B_0}} \quad (37)$$

Reemplazando las ecs. 23 y 36 en 37 se obtiene:

$$\beta_0 \approx \frac{D_{n_B}}{D_{p_E}} \frac{N_E}{N_B} \frac{W_E}{W_B} \quad (38)$$

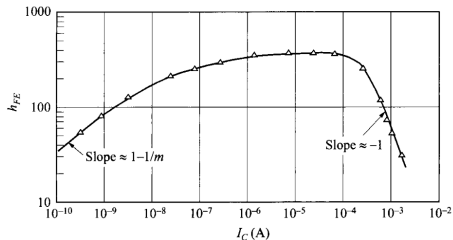
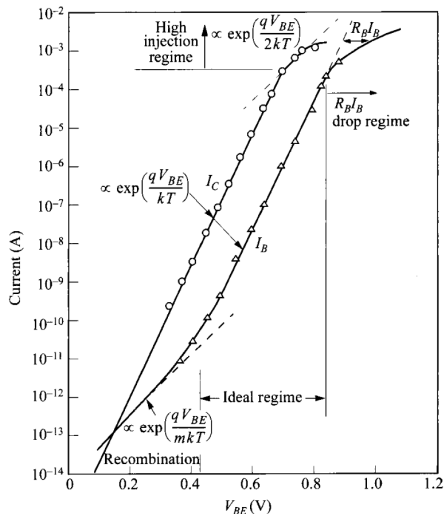
También se define la **ganancia de corriente estática de base**:

$$\alpha_0 \equiv \frac{I_C}{-I_E} \quad (39)$$

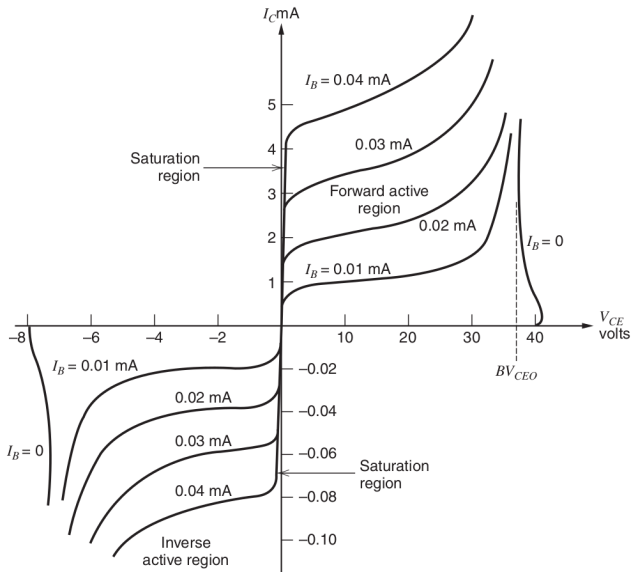
Dado que $I_C + I_B + I_E = 0$,

$$\alpha_0 = \frac{\beta_0}{1 + \beta_0} \quad \wedge \quad \beta_0 = \frac{\alpha_0}{1 - \alpha_0} \quad (40)$$

Mediciones de un TBJ npn vertical



Curva de salida de un TBJ npn vertical



Efecto Early

En las curvas de salida medidas se observa que $I_C \uparrow$ cuando $V_{CE} \uparrow$. Esto se encuentra relacionado con el tamaño de la B que suele ser muy chico en los dispositivos VLSI.

Esto se debe a la combinación de dos efectos:

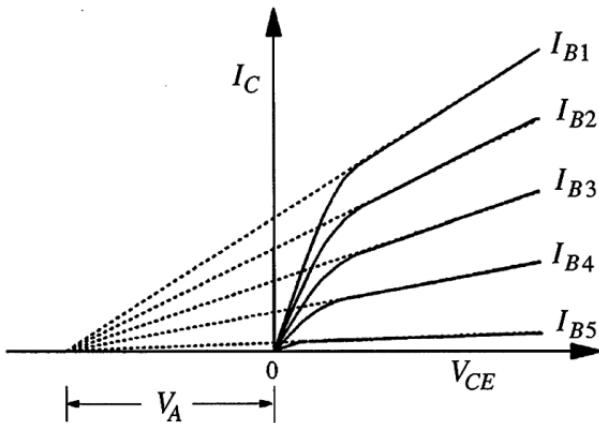
- **Ruptura por avalancha** en la juntura B-C (ver clase “Diodo PN”).
- **Efecto Early** o modulación de la QNR-B cuando se varía V_{BC} en MAD.

En MAD y con $V_{BE} = V_{BE_{on}}$ (fijo), cuando $V_{BC} \downarrow \Rightarrow I_C \uparrow$. En estas condiciones se define la tensión de Early a través de la siguiente expresión:

$$V_A \equiv I_C \left(\frac{\partial I_C}{\partial V_{CE}} \right)^{-1} - V_{CE} \quad (41)$$

donde se supuso que V_A es independiente de I_B .

$$V_A + V_{CE} = I_C \left(\frac{\partial I_C}{\partial V_{CE}} \right)^{-1}$$



Suponiendo BNI, se reescribe la ec. 22:

$$I_C = \frac{A_E q^2 D_{n_B} n_i^2}{Q_{p0}(W_B)} \exp\left(\frac{V_{BE}}{V_{th}}\right) \quad \text{donde} \quad Q_{p0} = q \int_0^{W_B} p_{p0}(x) dx \quad (42)$$

Reemplazando 42 en 41:

$$V_A + V_{CE} = I_C \left(-\frac{I_C}{Q_{p0}} \frac{\partial Q_{p0}}{\partial V_{CE}} \right)^{-1} \quad (43)$$

Teniendo en cuenta que V_{BE} está fijo $\Rightarrow dV_{CE} = dV_{CB}$:

$$V_A + V_{CE} = I_C \left(-\frac{I_C}{Q_{p0}} \frac{\partial Q_{p0}}{\partial V_{CB}} \right)^{-1} = I_C \left(\frac{I_C}{Q_{p0}} \frac{\partial Q_{p0}}{\partial V_{BC}} \right)^{-1} \quad (44)$$

Recordando que $\frac{\partial Q_{p0}}{\partial V_{BC}} = C_{jBC}$ (ver clase "Diodo PN"):

$$V_A + V_{CE} = I_C \left(\frac{I_C}{Q_{p0}} C_{jBC} \right)^{-1} \quad (45)$$

Reacomodando 45,

$$V_A + V_{CE} = \frac{Q_{p0}}{C_{jBC}} \quad (46)$$

Si el dopaje de la B es uniforme:

$$V_A + V_{CE} = \frac{q N_B W_B (V_{CE})}{C_{jBC} (V_{CE})} \quad (47)$$

Típicamente, $V_A \gg V_{CEQ}$ entonces,

$$V_A \approx \frac{q N_B W_B (V_{CE})}{C_{jBC} (V_{CE})} \quad (48)$$

Nota: dado los niveles de dopaje usados en el TBJ lateral, V_A es significativamente más chico que con respecto a un TBJ vertical.

Punch-through o perforación de la base

El **caso extremo** de modulación del ancho de la base es el fenómeno denominado *punch-through*.

Si el dispositivo tiene un valor pequeño de Q_{p0} , entonces con relativamente bajos valores de V_{CE} se puede alcanzar la situación donde $W_B \rightarrow 0$.

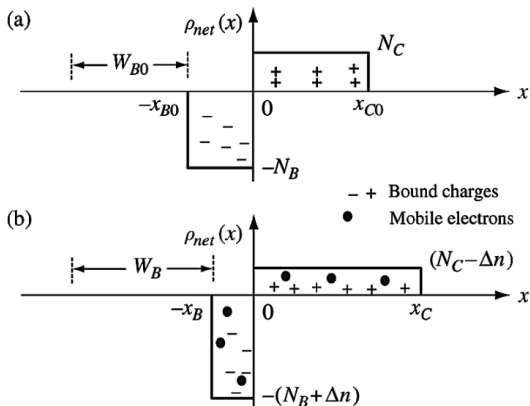
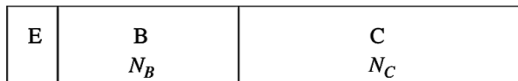
Cuando la SCR-BC se une con la SCR-BE se genera una **corriente muy alta** que solo es limitada por las resistencias series de E y C.

Cuando W_B está cerca de cero, la I_C **no es controlada** adecuadamente por la B y se dice que se perdió la “acción transistor”.

Punch-through **debe evitarse** bajo funcionamiento normal. Por ejemplo, se puede modificar el perfil de dopaje de B para que Q_{p0} sea lo suficientemente grande para las tensiones de trabajo.

Efecto Kirk

Si $W_B \uparrow \Rightarrow I_C$ aumenta con una menor pendiente que la predicha por 20.



En la juntura B-C en ETD se tiene (ver clase “Juntura PN”):

$$x_{B_0} N_B = x_{C_0} N_C \quad (49)$$

Y la caída de tensión se puede escribir como,

$$\psi_{mBC} = \frac{\mathcal{E}_m (x_{B_0} + x_{C_0})}{2} = \frac{q}{2\epsilon_{Si}} (N_B x_{B_0}^2 + N_C x_{C_0}^2) \quad (50)$$

Mientras la concentración de e^- que se mueven a través de las SCR-BC sea pequeña comparada con las impurezas descompensadas \Rightarrow se puede usar la aproximación de vaciamiento en la ec. 50.

Hipótesis 1: para simplificar se va a considerar que los e^- colectados, Δn , transitan la unión BC a la velocidad de saturación v_{sat} :

$$J_C = q v_{sat} \Delta n \quad (51)$$

Entonces, en la SCR, $N_B \uparrow$ y $N_C \downarrow$:

$$x_B (N_B + \Delta n) = x_C (N_C - \Delta n) \quad (52)$$

Hipótesis 2: para hacer una estimación del ensanchamiento de la B se supone que el dispositivo se encuentra en MAD con V_{BC} fijo y de pequeño valor:

$$\psi_{mBC} = \frac{q}{2\epsilon_{Si}} [x_B^2 (N_B + \Delta n) = x_C^2 (N_C - \Delta n)] \quad (53)$$

Hipótesis 3: se considera que $\Delta n < N_C$ y $N_B > N_C \Rightarrow \Delta n \ll N_B$ (características de un TBJ vertical).

Como V_{BC} no varió, se igualan 50 y 53,

$$x_C \approx \frac{x_{C_0}}{\sqrt{1 - \frac{\Delta n}{N_C}}} \quad \wedge \quad x_B \approx x_{B_0} \sqrt{1 - \frac{\Delta n}{N_C}} \quad (54)$$

En el TBJ lateral, $N_C \gg N_B \Rightarrow x_C = x_{C_0} \approx 0$, por lo tanto:

$$x_B \approx x_{B_0} \sqrt{\frac{N_B}{N_B + \Delta n}} \quad (55)$$

Nota: como en el TBJ vertical $N_C \ll N_B$, para el mismo valor de N_B , el efecto Kirk comienza a menores I_C en relación al TBJ lateral.

Tiempo de tránsito en la base

En un TBJ npn en MAD, la carga de minoritarios en exceso en la B se puede escribir a través de la siguiente expresión:

$$Q_B = -q \int_0^{W_B} (n_p - n_{p0}) dx \quad (56)$$

Usando 14 se resuelve la integral de 56 (superficie de un triángulo):

$$Q_B = -\frac{q (n_p - n_{p0})_{x=0} W_B}{2} = J_n t_B \quad (57)$$

donde t_B es el **tiempo de tránsito en la base**:

$$t_B \equiv \frac{Q_B}{J_n} = \frac{W_B^2}{2 D_{nB}} \quad (58)$$

Nota: t_B es un **indicador de la respuesta en frecuencia** del dispositivo. En este sentido, efectos de ensanchamiento de la B degradan la velocidad del TBJ.