

PRÀCTICA 3. ESTUDI D'UN TRANSISTOR BIPOLAR

3.1. Introducció

Aquesta pràctica té per objectiu estudiar un transistor i s'utilitzarà l'arxiu npn.prm, i els arxius vce.vlt, ib.vlt, vcecon.vlt, ibgli.vlt, gruixbas.txt i gruixem.txt. Els resultats que es demanen es descriuen en el darrer apartat d'aquest guió.

TREBALL PREVI A LA REALITZACIÓ DE LA PRÀCTICA:

a) Llegir amb deteniment aquest guió

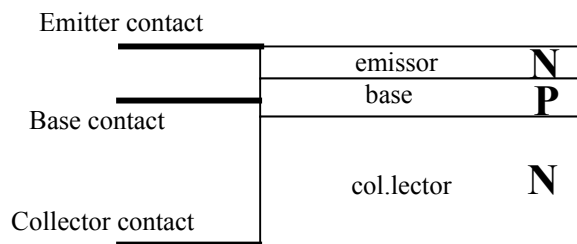
b) Reproduir personalment les simulacions de l'apartat 3.2.1

3.2. Descripció del transistor bipolar

Primer es realitza una breu descripció física de l'estructura i després es descriu el comportament de les variables mitjançant diverses simulacions guiades.

Un transistor bipolar és un dispositiu de tres terminals anomenats emissor, base i col.lector. Està format per 3 capes semiconductor, npn o pnp, i per tant consta de dues juncions np, la d'emissor i la de col.lector, essent el gruix de la regió de base suficientment petit, per tal que es produeixi l'efecte que dóna nom al dispositiu, efecte anomenat transistor (*to transfer resistor*).

Suposem una estructura npn i una polarització directa de la junció d'emissor i inversa de la junció de col.lector. En aquest supòsit, l'emissor injecta electrons a la base (portadors minoritaris), on s'hi difonen, i si el gruix de la base és suficientment petit, la majoria d'electrons assoleixen la zona de càrrega d'espai de la junció de col.lector, on el camp elèctric els arrossega fins a la zona neutra, establint-se així el corrent de col.lector.



Els paràmetres que permeten avaluar l'eficàcia del funcionament del transistor són: el factor de transport, l'eficiència d'emissor i el guany en curt circuit.

El factor de transport α_T de la base relaciona el corrent de minoritaris entrant amb el corrent de minoritaris sortint de la base (corrent total de col.lector). La diferència d'aquests dos corrents és el corrent de recombinació a la base.

El paràmetre anomenat eficiència d'emissor γ_E relaciona el corrent de minoritaris injectat a la base i el corrent total d'emissor, format per l'esmentat corrent de

minoritaris injectats a la base i el corrent transportat pels portadors injectats per la base a l'emissor.

Fixem-nos que el producte dels dos paràmetres anteriors, que es designa amb la lletra α , relaciona el corrent de col·lector i el d'emissor, i que és un valor inferior a la unitat.

Finalment, el guany β del transistor relaciona el corrent de col·lector i el corrent de base.

3.2.1 Simulacions guiades d'un transistor bipolar

L'objectiu de les següents simulacions guiades (S1, S2, S3, S4, S5) és aconseguir la familiarització necessària amb el programa de simulació per poder-lo utilitzar destrament en l'estudi d'un transistor bipolar. És per això que en algunes d'aquestes simulacions es fa un estudi detallat de les magnituds que descriuen els estats del transistor bipolar a simular.

S1: Simulació a l'estat d'equilibri i polarització nul·la

Incorporació de l'arxiu que conté l'estructura a simular

S'incorpora l'arxiu NPN.PRM, i a continuació comprovem que aquests valors siguin els corresponents a la simulació a l'estat d'equilibri.

Verificació dels valors dels paràmetres de l'estructura

En primer lloc, a continuació del mot **DEVICE**, que apareix en vermell, s'hi han de veure en negreta les línies de text següents:

Device area: 1 mm²

Emitter contact enabled (1 $\mu\Omega$ i 0 μm)

Base contact enabled (1 $\mu\Omega$ i 0.35 μm)

Collector contact: 0.1 Ω (5 μm)

(Entre parèntesi s'indica la resistència de contacte i/o la posició del contacte)

La resta de línies de text que s'hi llegeixen han d'estar en itàlica, el que vol dir que estan desactivats els paràmetres corresponents.

En segon lloc, a continuació del mot **REGION 1**, que apareix en vermell, s'hi ha de veure en negreta les línies de text següents:

Thickness: 5 μm

Material from si.mat

Carrier mobilities from internal model

Dielectric constant: 11.9

Band gap: 1.124 eV

Intrinsic conc. at 300K: 1x10⁺⁰¹⁰ cm⁻³

Refractive index from si.inr

Absorption coeff. From si300.abs

Free carrier absorption enabled
N-type background doping: $1 \times 10^{+015} \text{ cm}^{-3}$
1st front diff. : P-type, $1 \times 10^{+018} \text{ cm}^{-3}$ **peak**
2nd front diff.: N-type, $1 \times 10^{+020} \text{ cm}^{-3}$ **peak**
Bulk recombination: $\tau_n = \tau_p = 0.1 \mu\text{s}$
Front-surface recom.: S model, $S_n = S_p = 1 \times 10^{+004} \text{ cm/s}$
Rear-surface recom.: S model, $S_n = S_p = 1 \times 10^{+004} \text{ cm/s}$

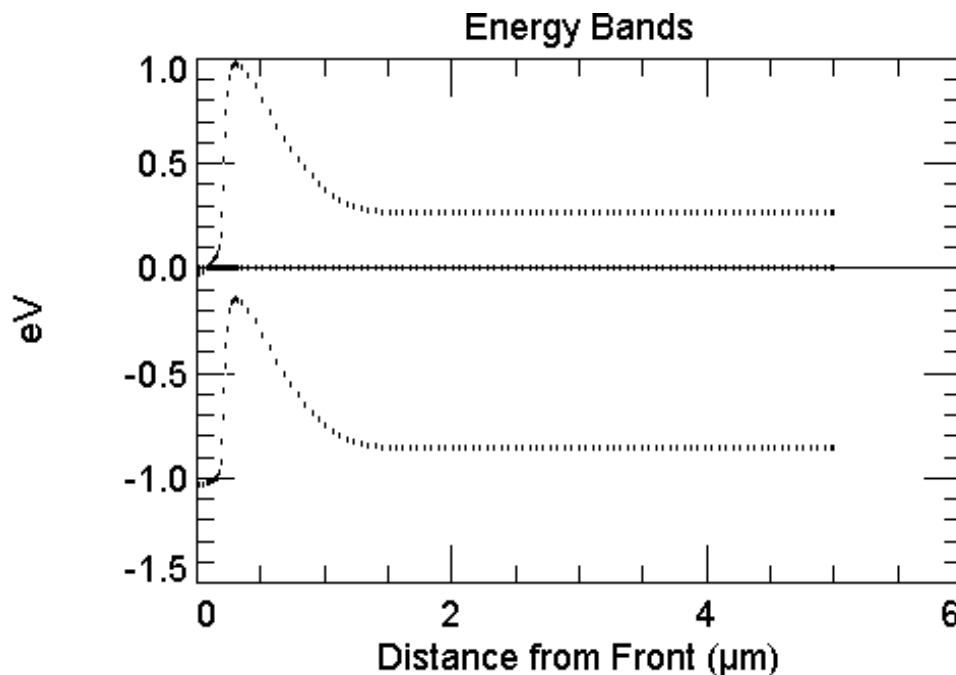
La resta de frases que s'hi llegeixen han d'estar en *itàlica*, el que vol dir que estan desactivats els paràmetres corresponents.

Verificació dels valors dels paràmetres de l'excitació a la qual se sotmet l'estructura

En tercer lloc, a continuació del mot **EXCITATION**, que apareix en vermell, s'hi ha de poder llegir el text següent:

Excitation mode: Equilibrium
Temperature: 300 K

En quart lloc, i en el menú principal del programa, es tria **Compute** i es verifica que els paràmetres que determinen el procés de convergència siguin els per defecte i que el mode **Batch** estigui inactiu. Fet això s'executa el programa triant l'opció **Run**.



Per visualitzar els resultats de la simulació, es tria, en el menú principal del programa, **View**, i a continuació **4 Graphs**, amb la qual cosa apareixen 4 gràfiques a la pantalla. Aquí fornim la del diagrama de bandes.

S2, S3: Simulacions a l'estat estacionari i escombrat del valor de la tensió de base

Es manté el mateix arxiu que a la simulació anterior

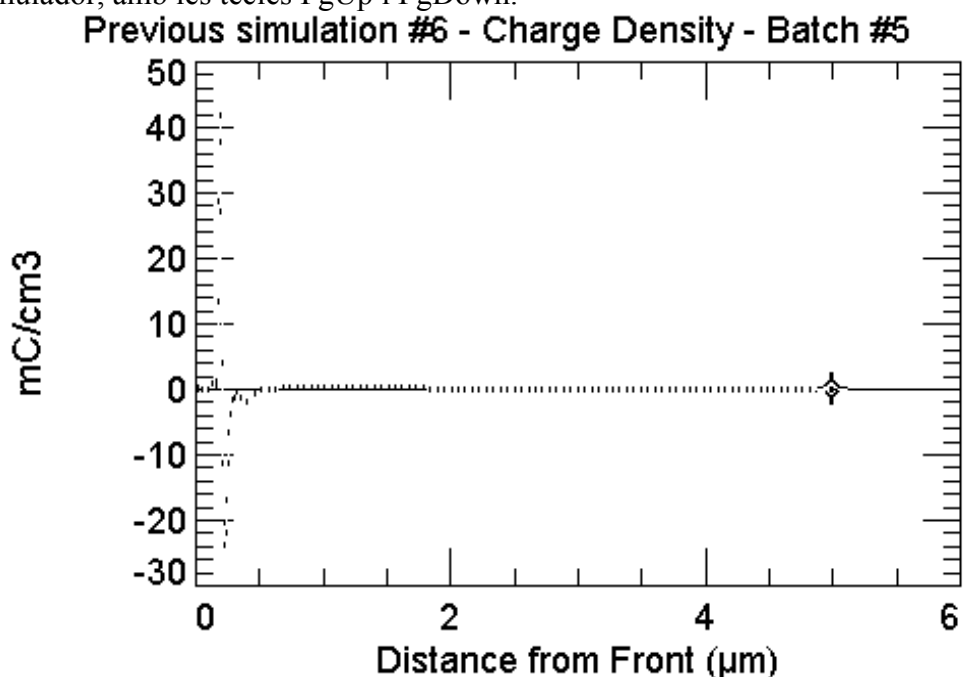
Verificació dels valors dels paràmetres de l'excitació a la qual se sotmet l'estructura

Es tria el mode d'excitació **Steady State**.

A continuació, i en el menú principal del programa, es tria **Compute** i es verifica que els paràmetres que determinen el procés de convergència siguin els per defecte i que el mode **Batch** estigui actiu. S'empra el mode de càlcul anomenat **Quick Batch** i es fa un escombrat pels valors següents de la tensió de la base (es verifica que la tensió de col.lector estigui fixada a 2V en Steady State):

BaseVltSS inicial	BaseVltSS final	Nombre d'etapes
0	0.9	10
0	-0.9	10

Si cal disminueix el valor final en directa i augmenta el valor final en invers. A continuació, i en el menú principal del programa, es tria **View** i es tria **Interactive Graph**. Situat ja en aquesta opció es tria, en el menú principal, **Graph**, i dins del menú desplegable la magnitud que ens interessi estudiar, en aquest cas la densitat de càrrega, una magnitud espacial (**Spatial**) i cal seleccionar a continuació **Charge Density**. Fet això s'executa el programa triant l'opció **Run**, i a continuació s'observa l'evolució de la densitat de càrrega recorrent les 10 etapes o estats intermitjos, per les quals ha passat el simulador, amb les tecles PgUp i PgDown.



Totes les gràfiques que has d'haver obtingut de la densitat de càrrega (des de la de l'etapa 1 a la de l'etapa 10) han de ser semblants a la que fornim aquí, que es correspon a l'etapa 5, essent menys important la zona de càrrega d'espai de la junció d'emissor quan la tensió és més positiva (fixa't que a l'esquema elèctric la part positiva de la pila es connecta a la base, que és la part P de les junccions d'emissor i de col.lector).

En definitiva, repetirem cada simulació (S2 i S3) tants cops com variables volguem estudiar, triant la variable que volem estudiar com a gràfica interactiva, per tal de poder-la visualitzar en cada una de les etapes per les quals passa el simulador.

Les gràfiques que heu d'haver obtingut han de donar, en recórrer-les amb les tecles PgUp i PgDown una visió gràfica de com evolucionen els paràmetres de l'estructura en variar la polarització de la junció emissora amb la tensió de col·lector fixada i la d'emissor nul·la.

S4: Simulacions a l'estat transitori i obtenció del Gummel Plot

Es manté el mateix arxiu que a la simulació anterior.

Verificació dels valors dels paràmetres que caracteritzen l'estructura a simular

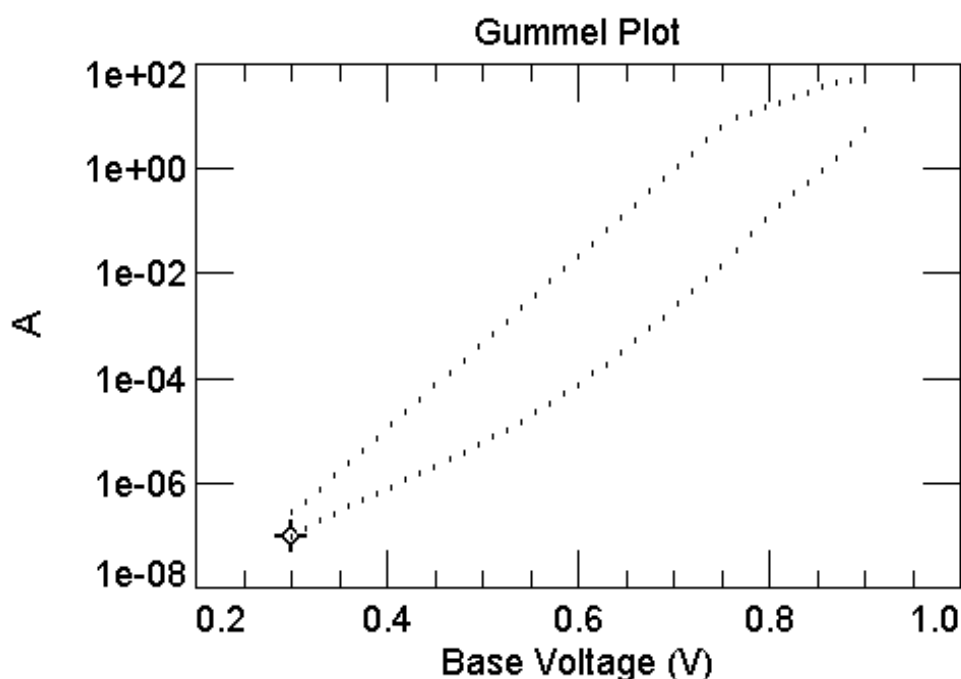
Es mantenen els mateixos valors que els del arxiu de la simulació anterior

Verificació dels valors dels paràmetres de l'excitació a la qual se sotmet l'estructura

Es tria el mode d'excitació **Transient**. A continuació, i en el menú principal del programa, es tria **Compute** i es verifica que els paràmetres que determinen el procés de convergència siguin els per defecte i que el mode **Batch** estigui inactiu. S'empra el mode de càlcul normal, es fixa el valor de la tensió de col·lector a 5V a les caselles de steady state i transient i s'obté el Gummel Plot fent variar la tensió de base (les resistències sèrie de les dues fonts es trien nul·les):

BaseVlt Inicial	BaseVlt Final	Tensió Col·lector	Nombre d'<i>steps</i>
0.3V	0.9V	5V	40

Arribat a aquest punt, s'executa el programa triant l'opció **Run**, i a continuació, en el menú principal del programa, es tria **View** i **Interactive Graph**. Llavors s'escolleix dins del menú desplegable **Graph** les magnituds que ens interressi estudiar, en aquest cas el corrent a la base, i el corrent de col·lector, que són magnituds temporals (**Temporal**). Se selecciona **BaseVlt** com a variable de l'eix d'abcisses, es dona un nom a la gràfica (**Gummel Plot**), i es tria escala logarítmica per a l'eix d'ordenades. Fet això, s'observa la variació del guany del transistor en funció de la tensió de base. A tall de comprovació fornim aquí aquesta gràfica.



S5: Simulacions a l'estat transitori i obtenció de les característiques $i_C(v_{CE})$

Es manté el mateix arxiu que a la simulació anterior

Verificació dels valors dels paràmetres que caracteritzen l'estructura a simular

Es mantenen els mateixos valors que els de l'arxiu de la simulació anterior

Verificació dels valors dels paràmetres de l'excitació a la qual se sotmet l'estructura

Es tria el mode d'excitació **Transient**, amb els valors següents:

Number of time steps 40

Time step size 1s

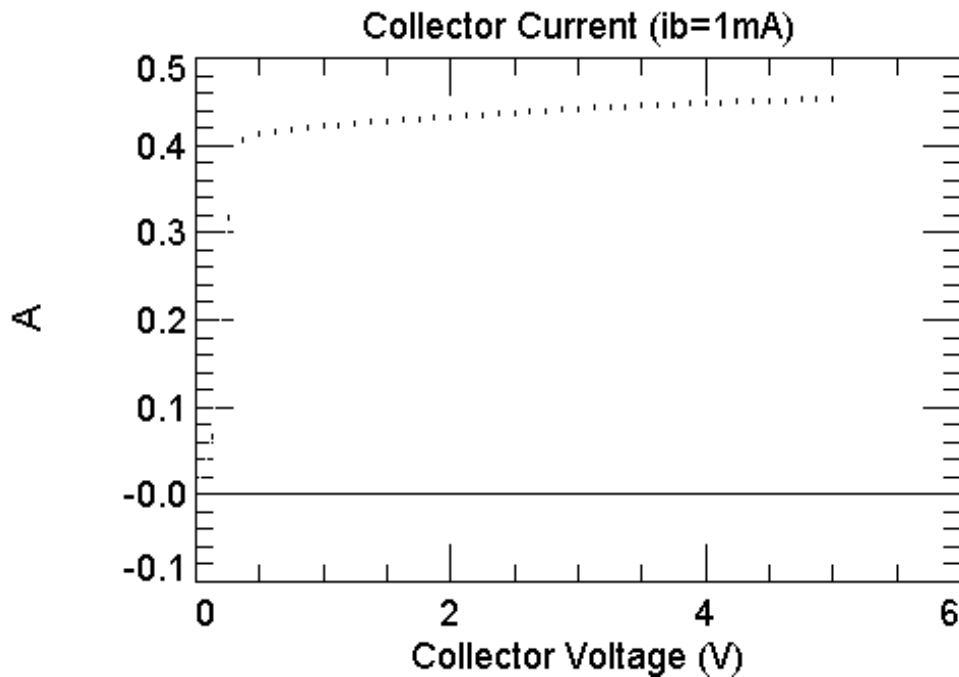
Time step at $t=0$ 1e-009

A continuació, i en el menú principal del programa, es tria **Compute** i es verifica que els paràmetres que determinen el procés de convergència siguin els per defecte i que el mode **Batch** estigui inactiu. S'empra el mode de càlcul temporal i es fixa el valor de la intensitat de base a 1mA: la resistència sèrie de la font de la base es fixa a 10k Ω , i la tensió de base a 11V (10V + la tensió de la junció d'emissor, que aquí suposem igual a un volt).

CollectorVlt Inicial	CollectorVlt Final	Nombre d' <i>steps</i>
0V	5V	40

A continuació, i en el menú principal del programa, es tria **View** i **Interactive Graph**. Llavors es tria en el menú principal, **Graph**, i dins del menú desplegable la intensitat de

col.lector en funció de la tensió de col.lector: **Collector Current vs Voltage**. Fet això s'executa el programa triant l'opció **Run**, i a continuació s'observa la característica de col.lector per una intensitat de base de 1mA. A tall de comprovació fornim aquí aquesta característica.



Per obtenir més d'una característica a la mateixa figura es poden generar dos arxius externs amb 3 valors per línia (time, voltage, resistance), un per la font de col.lector (VCE.vlt) i l'altre per la font de base (IB.vlt). Així s'obtenen quatre característiques $i_C(V_{CE})$ per quatre valors de la intensitat de base (0.1mA, 0.2mA, 0.3mA i 0.4mA) en una mateixa figura. Obra aquests arxius per verificar que els valors són els següents:

VCE.vlt

TIME (s)	VOLTAGE (V)	RESISTANCE (Ω)
0	0.05	10
7	1.2	10
10	5	10
11	5	10
14	1.8	10
21	0.05	10
22	0.05	10
29	2.4	10
32	5	10
33	5	10
36	3.0	10
43	0.05	10

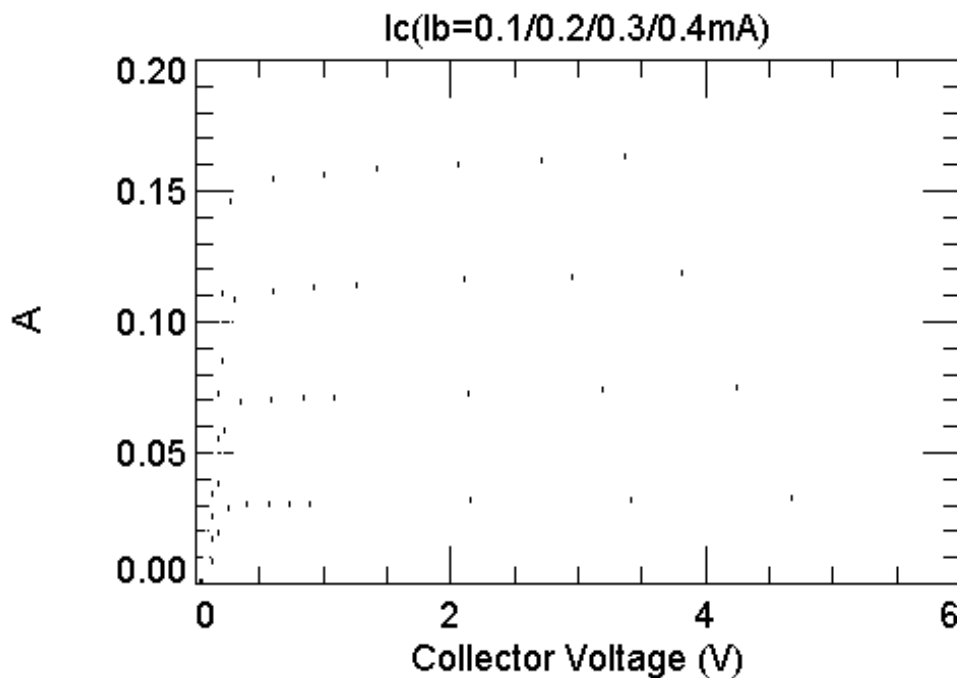
Els valors de la tensió de la font de base es trien força grans per poder menysprear la tensió de la junció d'emissor i obtenir així els valors esmentats, des de 0.1mA fins 0.4 mA.

IB.vlt

TIME (s)	VOLTAGE (V)	RESISTANCE (Ω)
0	100	1e6
10	100	1e6
11	200	1e6
21	200	1e6
22	300	1e6
32	300	1e6
33	400	1e6
43	400	1e6

Els temps pels quals no es defineix explícitament un valor el programa manté el valor precedent.

A continuació s'incorporen aquests arxius a través de la casella **Excitation/Circuit/External**, i atès que hi ha 43 instants de temps, es fixa en 43 el nombre d'steps a **Transient**, i s'obtenen les quatre corbes $i_C(v_{CE})$ esmentades en una sola simulació. Aquí fornim a tall de comprovació aquestes característiques.



A continuació s'explica com normalment fixarem la tensió o el corrent en un terminal.

Tensió constant en un terminal: valor nul de la resistència de la font i el valor que es vulgui de la font de tensió

Corrent constant en un terminal: valors de la resistència de la font i de la tensió força elevats, de tal manera que el valor del seu quocient sigui el del corrent que es vulgui (per exemple l'arxiu ib.vlt)

Terminal en circuit obert: valor elevat de la resistència (per exemple $10^6 \Omega$) i petit de la font (per exemple nul).

3.3 Qüestions pràctiques relatives al transistor bipolar simulat

Es proposa a continuació que l'estudiant resolgui les qüestions següents fent ús del simulador. Es demana també que raoni els resultats que obtingui tenint present el que prediu la teoria, i que indiqui l'origen de les diferències si s'escau.

TREBALL PRÀCTIC:

a) Resoldre les qüestions pràctiques de l'apartat 3.3

b) Presentar una memòria amb els resultats i la seva obtenció

Q1. Fer diferents simulacions en mode Batch i representar el corrent de difusió i el d'arrossegament de majoritaris i de minoritaris a les diferents regions del transistor. Quin és el corrent que domina, el d'electrons o el de forats?

Q2. A partir del Gummel plot de l'apartat 3.2 indicar el valor de β del transistor als diferents intervals de funcionament del transistor. Indicar el valor del coeficient η de l'equació $i = i_s (e^{\frac{V}{\eta V_T}} - 1)$ amb que es modela el corrent de base i el de col·lector. Fes un estudi per zones

Q3. Quin tipus d'emissor és el del transistor simulat, degenerat o no degenerat, transparent o profund? Modificar el valor de pic del dopat d'emissor dins d'un interval comprès entre 10^{19} cm^{-3} i 10^{20} cm^{-3} , mitjançant una simulació en mode Batch. Representar el Gummel plot pels anteriors valors. Passar a un full de càlcul el valor dels corrents i estudiar la variació de β en funció del dopat.

N.B. Emissor transparent/profund = longitud de difusió de minoritaris molt més gran/petita que el gruix de l'emissor
Emissor degenerat/no degenerat = el nivell de Fermi està a menys/més de $3kT$ de la banda de conducció o de valència.

Q4. Modificar el gruix de base i el gruix d'emissor successivament, observar els seus efectes sobre el corrent de base i de col·lector, i explicar el motiu d'aquests canvis. Aquí fornim l'arxiu gruixbas.txt i gruixem.txt per realitzar una simulació en mode Batch i obtenir I_b i I_c . Amb aquests arxius s'obtenen transistors de diferents gruixos d'emissor i base en variar el factor de profunditat de les dues difusions frontals.

Q5. Canviar el tipus de dopat de les tres zones i passar d'una estructura npn a pnp. Representar per aquest nou transistor el Gummel Plot i discutir les diferències a partir d'aquesta gràfica.

Q6. Estudiar el pas de la regió de tall a la regió activa del transistor de l'apartat 3.2: observar la variació temporal de la intensitat de col·lector quan la tensió de col·lector es manté fixada a 2V i el corrent de base passa de ser nul a valer 0.2mA. S'aconsella utilitzar arxius d'excitació, com els utilitzats a l'apartat 3.2 (arxius vce.vlt i ib.vlt). Aquí es forneixen els arxius vcecon.vlt i ibgli.vlt amb els que es pot realitzar un primer estudi (obrir-los i comprovar el contingut).

N.B. Introduir a la casella de Time step size i Number of time steps de **Mode Transient** valors adequats als dels arxius *.vlt utilitzats.