บทที่ 2

ทฤษฎีพื้นฐานของ Double Heterojunction Bipolar Transistor

จากการที่ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ชนิด Double Heterojunction Bipolar Transistor (DHBT) มีข้อได้เปรียบหลายประการเมื่อเปรียบเทียบกับชนิด Single Heterojunction Bipolar Transistor (SHBT) ดังที่ได้กล่าวข้างต้นในบทที่ 1 Baibe et al จึงได้เสนอทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ชนิดนี้ [3] โดยกล่าวถึงลักษณะสมบัติกระแสแรงดันและอัตราขยายกระแส ทั้งกรณีหัวต่อแบบชันและแบบลาด โดยชี้ให้เห็นว่าความลาดชันของหัวต่อส่งผลต่ออิทธิพลของ "Spike" ซึ่งเกิดจากความไม่ต่อเนื่องของแถบพลังงานต้องห้าม นอกจากนี้อิทธิพลของ "Spike" ยังถูกควบคุมโดยปริมาณอลูมิเนียม ปริมาณสารเจือ และแรงดันไบแอส

2.1 ทฤษฎีพื้นฐานทางด้านกระแสตรง

เพื่อศึกษาทฤษฎีพื้นฐานของสิ่งประดิษฐ์ เราควรทบทวนสมการที่สำคัญๆโดยเริ่มต้นจากสมการทั่วไปของกระแสอิเล็กตรอนและกระแสโฮลในสารกึ่งตัวนำ ดังสมการ (2-1) และ (2-2) ตามลำดับ

$$\frac{J_n}{qD_n n} = \left[-\frac{1}{U_T} \times \frac{d(V+\chi)}{dW} \right] + \frac{d(\ln(n/N_c))}{dW} \qquad (2\text{-}1)$$

$$\frac{J_p}{qD_p p} = \left[-\frac{1}{U_T} \times \frac{d(V+\chi)}{dW} \right] - \frac{d(\ln(p/N_v))}{dW} - \left[\frac{1}{qU_T} \times \frac{dE_g}{dW} \right] \qquad (2\text{-}2)$$

โดย V คือ ศักดาไฟฟ้า

χ คืออิเล็กตรอนแอฟฟินิตี้

J_n คือ ความหนาแน่นกระแสอิเล็กตรอน

J_p คือ ความหนาแน่นกระแสโฮล

E_g คือ ความกว้างของช่องว่างพลังงาน

W คือ ระยะทางในแนวตั้งฉากกับหัวต่อ

n คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน

p คือ ความหนาแน่นของโฮล

D_n คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ซึมของอิเล็กตรอน

D_p คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ซึมของโฮล

N_c คือ ความหนาแน่นประสิทธิผลของสถานะในแถบนำไฟฟ้า

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

N_v คือ ความหนาแน่นประสิทธิผลของสถานะในแถบวาเลนซ์

U_T คือ Thermal Voltage

นอกจากเทอมอันเกิดเนื่องจากผลของสนามไฟฟ้า และความลาดเอียงของพาหะ (กระแสพัดพาและกระแสแพร่ซึม) สมการ (2-1) และ (2-2) ยังแสดงการเกิดกระแส อันเนื่องมาจากการแปรค่าของช่องว่างแถบพลังงาน ค่าอิเล็กตรอนแอฟฟินิตี้ และค่าความหนาแน่นประสิทธิผลของสถานะในแถบนำไฟฟ้า และแถบเวเลนซ์ กับระยะทางด้วย

นอกจากนี้ยังมีสมการอีก 2 สมการซึ่งใช้อธิบายการไหลของพาหะในสิ่งประดิษฐ์ กล่าวคือ "Continuity Equation" และสมการของ "Gauss" ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลาดเอียงของสนามไฟฟ้ากับประจุไฟฟ้า ดังสมการ (2-3) , (2-4) , (2-5) และ (2-6) ตามลำดับ

$$\frac{1}{q}\frac{dJ_n}{dW} - U = 0 \qquad (2\text{-}3)$$

$$\frac{1}{q}\frac{dJ_p}{dW} + U = 0 \qquad (2\text{-}4)$$

$$\mathrm{E} = -\frac{dV}{dW} \qquad (2\text{-}5)$$

$$\frac{d^2V}{dW^2} = -\frac{q}{\varepsilon}(p - n + N_D - N_A) - \frac{1}{\varepsilon}\frac{dV}{dW}\frac{d\mathrm{E}}{dW} \qquad (2\text{-}6)$$

โดย ε คือ ค่า Permittivity ของสารกึ่งตัวนำ

N_D และ N_A คือความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้และผู้รับ

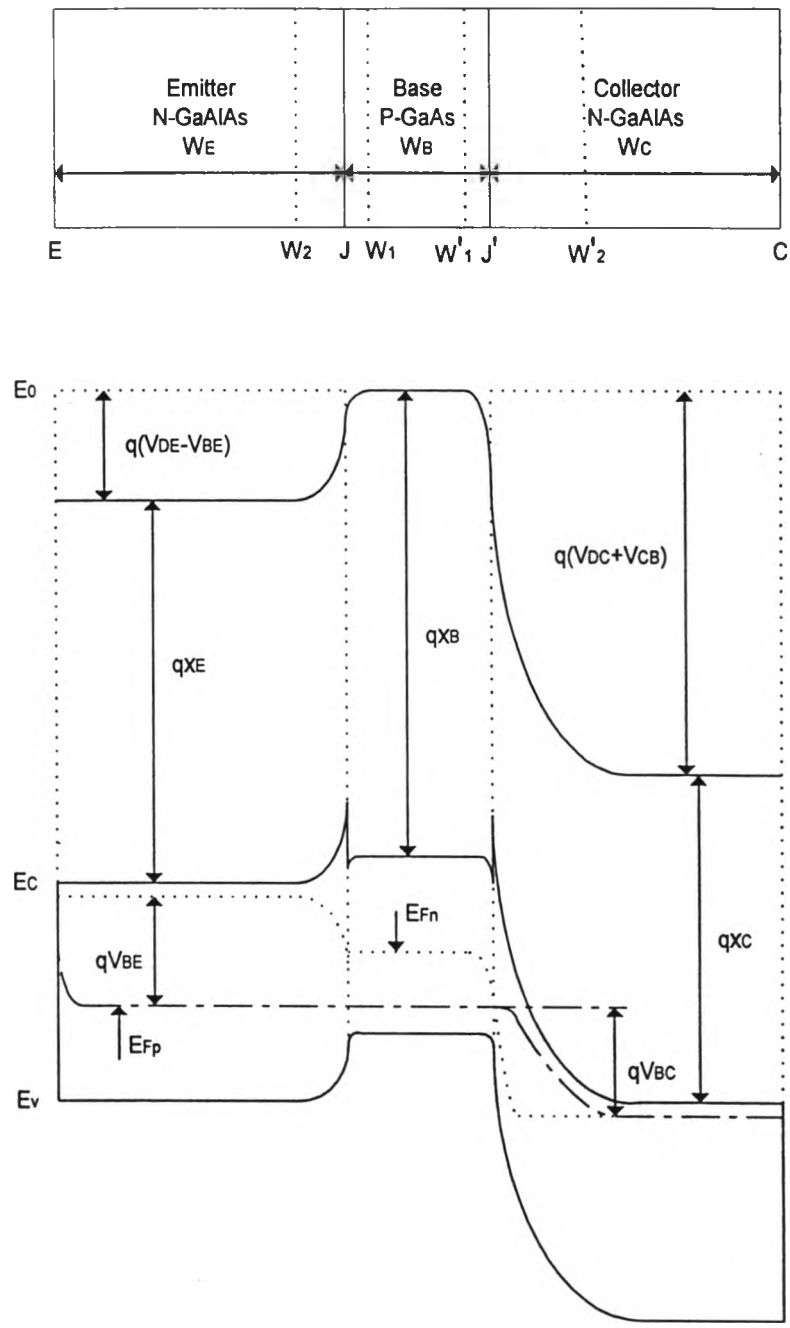
U คือ อัตราการรวมตัวพาหะ

สำหรับโครงสร้างของทรานซิสเตอร์ชนิดหัวต่อต่างชนิดคู่ของ GaAlAs(N) และ GaAs(P) รวมทั้งภาพของช่องว่างแถบพลังงานบริเวณหัวต่อ แสดงไว้ในรูปที่ 2.1 จะเห็นว่าที่ขอบของแถบนำไฟฟ้า จะปรากฏ "Spike" 2 จุดที่หัวต่ออิมิตเตอร์-เบส และ หัวต่อคอลเล็กเตอร์-เบส ซึ่งจะมีบทบาทต่อพฤติกรรมของทรานซิสเตอร์ ทั้งลักษณะสมบัติ (J_C,V_{BE}) และ อัตราขยายกระแส

2.1.1 ลักษณะสมบัติ (J_C,V_{BE})

จากความสัมพันธ์ระหว่าง n_i (Intrinsic Carrier Concentration) กับระยะทาง ตามสมการ

$$n_i^2 = N_C N_V \exp(-E_g / kT) \qquad (2\text{-}7)$$



รูปที่ 2.1 แผนผังแถบพลังงานต้องห้ามของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ชนิดหัวต่อต่างชนิดคู่ของ GaAlAs(N)/GaAs(P)/GaAlAs(N) เมื่อถูกไบแอสใช้งานในโมดปกติ

และโดยสมการ (2-1) ลบด้วยสมการ (2-2) จะได้

$$(p/n_i^2)(J_n/qD_n)-(n/n_i^2)(J_p/qD_p)=\frac{d}{dW}(pn/n_i^2) \qquad (2\text{-}8)$$

อินติเกรด สมการ (2-8) จาก W_2 ถึง C จะได้สมการ (2-9)

$$\int_{W_2}^{C}\frac{n}{n_i^2}\frac{J_p}{qD_p}dW-\int_{W_2}^{C}\frac{p}{n_i^2}\frac{J_n}{qD_n}dW=\left(\frac{pn}{n_i^2}\right)_{W_2}-\left(\frac{pn}{n_i^2}\right)_C \qquad (2\text{-}9)$$

พิจารณาเทอมแรก สามารถแยกออกเป็น 3 ส่วน

$$\int_{W_2}^{C}\frac{n}{n_i^2}\frac{J_p}{qD_p}dW=\int_{W_2}^{J}\frac{n}{n_i^2}\frac{J_p}{qD_p}dW+\int_{J}^{J'}\frac{n}{n_i^2}\frac{J_p}{qD_p}dW+\int_{J'}^{C}\frac{n}{n_i^2}\frac{J_p}{qD_p}dW \qquad (2\text{-}10)$$

ในย่านแปรเปลี่ยนด้านอิมิตเตอร์ (ระหว่าง W_2 และ J) กระแสโฮล ที่ฉีดจากเบส เข้าสู่อิมิตเตอร์ สามารถละเลยได้ เนื่องจากประสิทธิภาพในการฉีดที่สูงของหัวต่อต่างชนิด

ในย่านคอลเล็กเตอร์ (ระหว่าง J' และ C) กระแสโฮล ที่ฉีดจากเบสเข้าสู่คอลเล็กเตอร์ สามารถละเลยได้ เนื่องจากหัวต่อคอลเล็กเตอร์-เบส ถูกไบแอสกลับทาง ดังนั้น

$$\int_{W_2}^{C}\frac{n}{n_i^2}\frac{J_p}{qD_p}dW=\int_{J}^{J'}\frac{n}{n_i^2}\frac{J_p}{qD_p}dW \qquad (2\text{-}11)$$

ทำนองเดียวกันสำหรับกระแสอิเล็กตรอน

$$\int_{W_2}^{C}\frac{p}{n_i^2}\frac{J_n}{qD_n}dW=\int_{W_2}^{J}\frac{p}{n_i^2}\frac{J_n}{qD_n}dW+\int_{J}^{J'}\frac{p}{n_i^2}\frac{J_n}{qD_n}dW+\int_{J'}^{C}\frac{p}{n_i^2}\frac{J_n}{qD_n}dW \qquad (2\text{-}12)$$

ในย่านแปรเปลี่ยน (W_2 ถึง J) และในย่านคอลเล็กเตอร์ J' ถึง C J_n เป็นค่าความหนาแน่นกระแสอิเล็กตรอนซึ่งเป็นพาหะข้างมาก ไม่สามารถละเลยได้

ในขณะที่ย่านเบส การเจือสารสูง p>>n และ J_n เป็นกระแสที่ถูกฉีดจากอิมิตเตอร์ และ $J_n>J_p$ ดังนั้น

$$\int_{J}^{J'}\frac{n}{n_i^2}\frac{J_p}{qD_p}dW<<\int_{J}^{J'}\frac{p}{n_i^2}\frac{J_n}{qD_n}dW \qquad (2\text{-}13)$$

เมื่อพิจารณา (2-11) และ (2-13) และทราบว่า $pn=n_i^2$ ที่ผิวสัมผัสโอห์มมิก C สมการ (2-9) จะดูง่ายขึ้น

$$\int_{C}^{W_2} \frac{p}{n_i^2} \frac{J_n}{qD_n} dW = \left(\frac{pn}{n_i^2}\right)_{W_2} - 1 \qquad (2\text{-}14)$$

พบว่าจากการพิจารณาหัวต่อต่างชนิดเฉพาะที่หัวต่ออิมิตเตอร์-เบส [1] โดยตรง จะได้ว่า

$$\left(\frac{pn}{n_i^2}\right)_{W_2} = \exp\left(\frac{V_{BE}}{U_T}\right) \qquad (2\text{-}15)$$

ถ้าการรวมตัวของพาหะถูกละเลย J_n จะคงที่ไม่ขึ้นกับระยะทาง W ดังนั้น

$$J_n = \frac{\exp(\frac{V_{BE}}{U_T}) - 1}{\int_{C}^{W_2} \frac{p}{qn_i^2 D_n} dW} \qquad (2\text{-}16)$$

ในกรณีที่ $V_{BE} >> U_T$ จะได้

$$J_n = \frac{\exp(\frac{V_{BE}}{U_T})}{\int_{C}^{W_2} \frac{p}{qn_i^2 D_n} dW} \qquad (2\text{-}17)$$

ถ้าเราพิจารณา Integral term ด้านล่างของสมการระหว่างผิวสัมผัส C กับจุด W_2 ขอบของย่านแปรเปลี่ยนด้านอิมิตเตอร์ จะได้

$$\int_{C}^{W_2} \frac{p}{qn_i^2 D_n} dW = \int_{C}^{W_2'} \frac{p}{qn_i^2 D_{nC}} dW + \int_{W_2'}^{J'} \frac{p}{qn_i^2 D_{nC}} dW + \int_{J'}^{J} \frac{p}{qn_{iB}^2 D_{nB}} dW + \int_{J}^{W_2} \frac{p}{qn_{iE}^2 D_{nE}} dW \qquad (2\text{-}18)$$

ในย่านเบส ระหว่าง J ถึง J' ความหนาแน่นโฮล ในย่านแปรเปลี่ยนระหว่าง J' ถึง W_1' ส่วนหนึ่ง และ ระหว่าง W_1 ถึง J อีกส่วนหนึ่งจะน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับย่าน quasi-neutral ระหว่าง W_1' ถึง W_1 ซึ่งจะมีค่า p(W) เท่ากับความหนาแน่นของสารเจือผู้รับในเบส ($N_{AB}(W)$) รวมกับโฮลส่วนเกินเพื่อรักษาสภาพความเป็นกลาง $\hat{p}(W) = \hat{n}(W)$ โดยที่ $\hat{n}(W)$ คือความหนาแน่นของอิเล็กตรอนส่วนเกินในย่านเบส ดังนั้นเราสามารถเขียนต่อไปว่า

$$\int_{J'}^{J} \frac{p}{qn_{iB}^2 D_{nB}} dW = \int_{W_1'}^{W_1} \frac{p}{qn_{iB}^2 D_{nB}} dW = \pi_B + \pi_{SB} \qquad (2\text{-}19)$$

โดย $$\pi_B = \int_{W_1'}^{W_1} \frac{N_{AB}}{qn_{iB}^2 D_{nB}} dW = \frac{N_{AB} W_B}{qn_{iB}^2 D_{nB}} \qquad (2\text{-}20)$$

$$\pi_{SB} = \int_{W_1'}^{W_1} \frac{\hat{p}(W)}{qn_{iB}^2 D_{nB}} dW = \int_{W_1'}^{W_1} \frac{\hat{n}(W)}{qn_{iB}^2 D_{nE}} dW \qquad (2\text{-}21)$$

ผลจากการคำนวณโดยใช้สมการ (2-1) ถึง (2-6) กับหัวต่อต่างชนิด GaAs (p)/$Ga_{0.4}Al_{0.6}As$ (n) ตามรูป (2-2) ทำให้สามารถสรุปได้ว่าในย่านแปรเปลี่ยนระหว่าง J และ W_2 เทอม $\frac{p}{n_{iE}^2}$ สามารถมีค่าที่สูงเนื่องจาก "Spike" ที่ขอบของแถบนำไฟฟ้า จึงให้

$$\pi_{TE} = \int_{J}^{W_2} \frac{p}{qn_{iE}^2 D_{nE}} dW \qquad (2\text{-}22)$$

ซึ่งใช้ในการศึกษาบทบาทของ "Spike" บริเวณนี้ได้ ในทำนองเดียวกัน เทอม $\frac{p}{n_{iC}^2}$ ในย่านแปรเปลี่ยนระหว่าง W_2' และ J' ก็มีบทบาทในลักษณะเดียวกัน จึงให้

$$\pi_{TC} = \int_{W_2'}^{J'} \frac{p}{qn_{iC}^2 D_{nC}} dW \qquad (2\text{-}23)$$

ซึ่งจะแสดงบทบาทของ Spike ของบริเวณนี้เช่นกัน

สำหรับในย่าน quasi-neutral ของคอลเล็กเตอร์ จาก C ถึง W_2' p(W) แสดงถึงความหนาแน่นของพาหะข้างน้อย ซึ่งจะมีค่าน้อยเมื่อพิจารณาว่า หัวต่อคอลเล็กเตอร์-เบส ในสภาพไบแอสกลับทาง ดังนั้นสามารถละเลยเทอม $\int_{C}^{W_2'} \frac{p}{qn_{iC}^2 D_{nC}} dW$ เมื่อเปรียบเทียบกับ $\pi_B + \pi_{TC}$

ถ้าเราละเลยการรวมตัวในย่านเบส และหัวต่อคอลเล็กเตอร์-เบส อยู่ในสภาวะไบแอสกลับทาง กระแสอิเล็กตรอนก็คือ กระแสคอลเล็กเตอร์ ดังนั้น ความสัมพันธ์ (J_C,V_{BE}) ของทรานซิสเตอร์หัวต่อต่างชนิดคู่จะเขียนได้เป็น

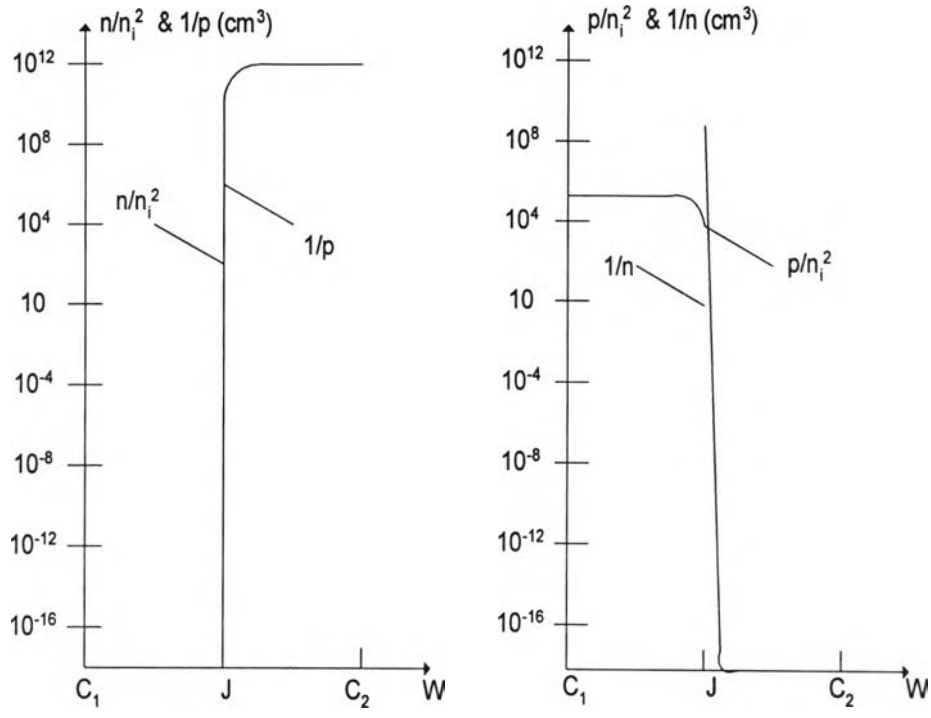
$$J_C = J_n = \frac{\exp(V_{BE}/U_T)}{\pi_B + \pi_{SB} + \pi_{TE} + \pi_{TC}} \qquad (2\text{-}24)$$

หรือ

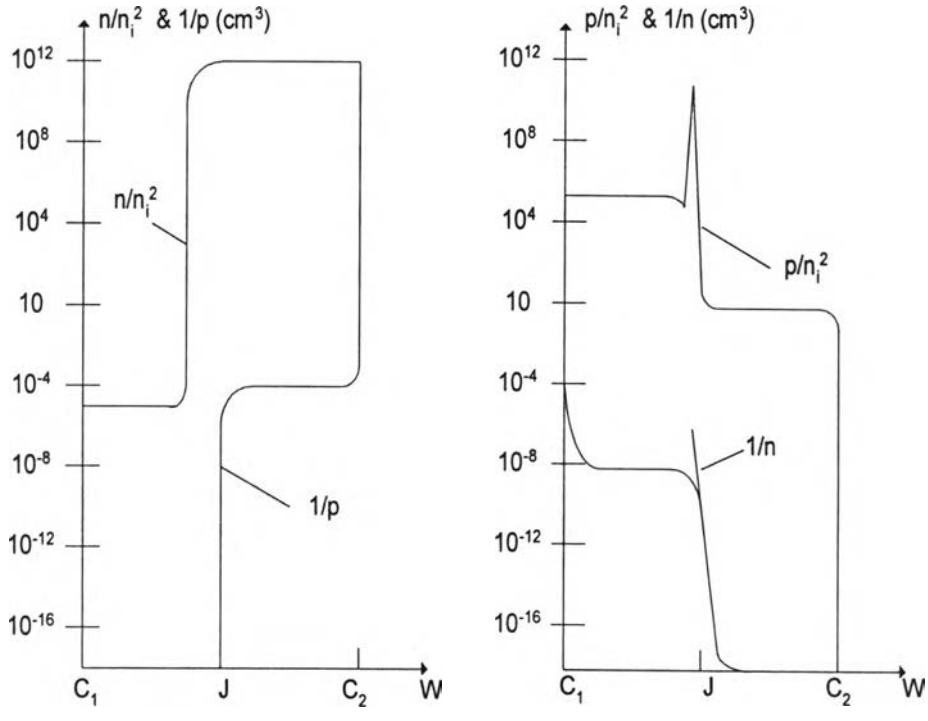
$$\frac{1}{J_C} = \frac{1}{J_1} + \frac{1}{J_2} + \frac{1}{J_3} + \frac{1}{J_4} \qquad (2\text{-}25)$$

โดยที่ $J_1 = \frac{1}{\pi_B}\exp(V_{BE}/U_T)$, $\pi_B = \frac{N_{AB}W_B}{qn_{iB}^2 D_{nB}}$ (2-26)

$J_2 = \frac{1}{\pi_{SB}}\exp(V_{BE}/U_T)$, $\pi_{SB} = \int_{W_1'}^{W_1} \frac{\hat{n}}{qn_{iB}^2 D_{nB}} dW$ (2-27)



a) V_a=0 J_n=0



b) V_a=1V J_n=5.5*10^{-5}A/cm^2

รูปที่ 2.2 ค่าของ $\frac{1}{n}, \frac{1}{p}, \frac{n}{n_i^2}$ และ $\frac{p}{n_i^2}$ บริเวณหัวต่อต่างชนิดของ GaAs(p)/$Ga_{0.4}Al_{0.6}As$(n) [1]

$$J_3 = \frac{1}{\pi_{TE}} \exp(V_{BE}/U_T) \quad , \quad \pi_{TE} = \int_J^{W_2} \frac{p}{qn_{iE}^2 D_{nE}} dW \qquad (2\text{-}28)$$

$$J_4 = \frac{1}{\pi_{TC}} \exp(V_{BE}/U_T) \quad , \quad \pi_{TC} = \int_{W_2'}^{J'} \frac{p}{qn_{iC}^2 D_{nC}} dW \qquad (2\text{-}29)$$

เทอมแรก $1/J_1 = \pi_B \exp(-V_{BE}/U_T)$ แสดงถึงกฎของกระแส-ความต่างศักย์ที่เปลี่ยนแปลง โดยคิดว่าหัวต่อเป็นแบบอุดมคติ ในเทอมที่สอง $1/J_2 = \pi_{SB} \exp(-V_{BE}/U_T)$ แสดงถึงผลที่เกิดจากการฉีดพาหะที่สูงในเบส ส่วนในเทอมที่สาม และสี่ $1/J_3 = \pi_{TE} \exp(-V_{BE}/U_T)$, $1/J_4 = \pi_{TC} \exp(-V_{BE}/U_T)$ แสดงถึงอิทธิพลของสไปค์ (Spike) ที่อิมิตเตอร์ และที่คอลเล็กเตอร์ ที่มีผลต่อการขนถ่ายพาหะ ตามลำดับ ตามสมการ (2-25) จะเห็นว่าค่ากระแสที่ต่ำที่สุดระหว่าง J_1, J_2, J_3 และ J_4 จะเป็นตัวกำหนดค่ากระแส J_C

เพื่อพิจารณาผลกระทบในย่านที่มี "Spike" เราต้องพิจารณาค่าของ π_{TE} และ π_{TC} ในเทอมของแรงดัน V_{BE} ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทราบการกระจายโฮล p(W) ในย่านแปรเปลี่ยนของอิมิตเตอร์ และ คอลเล็กเตอร์ ซึ่งขึ้นอยู่กับรูปแบบของ "Spike" และความมากน้อยของความลาดชันของหัวต่อต่างชนิด GaAlAs/GaAs ทั้งที่อิมิตเตอร์-เบส และของคอลเล็กเตอร์-เบส เราจึงแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 2 กรณี คือ หัวต่อแบบชันและหัวต่อแบบลาด

ก) กรณีหัวต่อต่างชนิดแบบชัน

เราสามารถหาค่า p(W) ในเทอมของศักดาไฟฟ้า V(W) โดยการอินทิเกรตความสัมพันธ์ (2-1) ระหว่างจุดสัมผัสกับเบส (J) ถึงค่า W ใดๆ ที่อยู่ระหว่าง J กับ W_2 ในกรณีหัวต่ออิมิตเตอร์-เบส และระหว่างจุดสัมผัสกับเบส (J') ถึงค่า W ใดๆ ที่อยู่ระหว่าง J' กับ W_2' สำหรับหัวต่อคอลเล็กเตอร์-เบส ดังนั้น

สำหรับหัวต่ออิมิตเตอร์-เบส

$$p(W) = \frac{n_{iE}^2}{N_{DE}} \exp\left(\frac{k_E V_{DE}}{U_T}\right) \exp\left(\frac{k_{BE} V_{BE}}{U_T}\right) \exp\left(-\frac{V(W)}{U_T}\right) \qquad (2\text{-}30)$$

เมื่อ $$V_{DE} = \chi_B - \chi_E + U_T \ln\left(\frac{N_{CB}}{N_{CE}} \times \frac{N_{AB} \cdot N_{DE}}{n_{iB}^2}\right) \qquad (2\text{-}31)$$

และสำหรับหัวต่อคอลเล็กเตอร์-เบส

$$p(W) = \frac{n_{iC}^2}{N_{DC}} \exp\left(\frac{k_C V_{DC}}{U_T}\right) \exp\left(\frac{k_{BC} V_{BC}}{U_T}\right) \exp\left(-\frac{V(W)}{U_T}\right) \qquad (2\text{-}32)$$

เมื่อ $$V_{DC} = \chi_B - \chi_C + U_T \ln\left(\frac{N_{CB}}{N_{CC}} \times \frac{N_{AB} \cdot N_{DC}}{n_{iB}^2}\right) \quad (2\text{-}33)$$

โดยที่ $$k_E = \frac{\varepsilon_B N_{AB}}{\varepsilon_B N_{AB} + \varepsilon_E N_{DE}} \qquad k_C = \frac{\varepsilon_B N_{AB}}{\varepsilon_B N_{AB} + \varepsilon_C N_{DC}}$$

$$k_{BE} = \frac{\varepsilon_E N_{DE}}{\varepsilon_B N_{AB} + \varepsilon_E N_{DE}} \qquad k_{BC} = \frac{\varepsilon_C N_{DC}}{\varepsilon_B N_{AB} + \varepsilon_C N_{DC}} \quad (2\text{-}34)$$

สมการ J_3 และ J_4 จึงเขียนได้เป็น

$$\frac{1}{J_3} = \frac{\exp(-V_{BE}/U_T)}{qD_{nE}N_{DE}} \exp\left(\frac{k_E V_{DE}}{U_T}\right) \exp\left(\frac{k_{BE} V_{BE}}{U_T}\right) \int_J^{W_2} \exp\left(-\frac{V(W)}{U_T}\right) dW \quad (2\text{-}35)$$

และ

$$\frac{1}{J_4} = \frac{\exp(-V_{BE}/U_T)}{qD_{nC}N_{DC}} \exp\left(\frac{k_C V_{DC}}{U_T}\right) \exp\left(\frac{k_{BC} V_{BC}}{U_T}\right) \int_{W_2'}^{J'} \exp\left(-\frac{V(W)}{U_T}\right) dW \quad (2\text{-}36)$$

ถ้าเราพิจารณาอนุโลมให้การเปลี่ยนแปลงศักดาไฟฟ้าในบริเวณหัวต่อ เป็นเชิงเส้น ผ่านจุดกำเนิดแกน (W,V) ซึ่งอยู่บนระนาบหัวต่อเชิงผลึก J และ J' ซึ่งทำให้เทอม $\frac{p}{n_{iE}^2}$ และ $\frac{p}{n_{iC}^2}$ มีค่าสูงสุด จะได้

$$V(W) = \frac{-2W}{W_2'}(V_{DC} - V_{BC})k_C \qquad \text{ระหว่าง } W_2' \text{ และ } J' \quad (2\text{-}37)$$

และ

$$V(W) = \frac{2W}{W_2}(V_{DE} - V_{BE})k_E \qquad \text{ระหว่าง } J \text{ และ } W_2 \quad (2\text{-}38)$$

ด้วยเงื่อนไขนี้ J_3 และ J_4 จะอยู่ในรูปสมการ

$$J_3 = \left[\frac{D_{nE}(qN_{DE})^{3/2}\sqrt{2(V_{DE} - V_{BE})}}{U_T\sqrt{\varepsilon_E n_E}}\right] \exp\left(-\frac{V_{DE}}{n_E U_T}\right) \times \exp\left(\frac{V_{BE}}{n_E U_T}\right) \quad (2\text{-}39)$$

โดย $$n_E = 1 + \frac{\varepsilon_E N_{DE}}{\varepsilon_B N_{AB}} \quad (2\text{-}40)$$

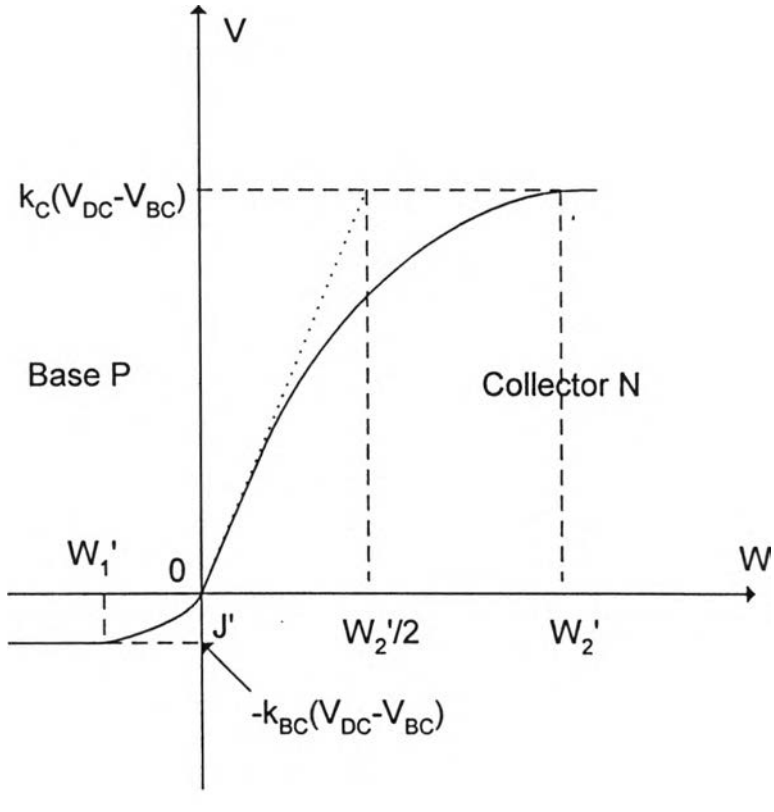
$$J_4 = \left[\frac{D_{nC}(qN_{DC})^{3/2}\sqrt{2(V_{DC} - V_{BC})}}{U_T\sqrt{\varepsilon_C n_C}}\right] \exp\left(-\frac{V_{DC}}{n_C U_T}\right) \times \exp\left(\frac{V_{BE}}{U_T}\right) \times \exp\left(\frac{1 - n_C}{n_C} \cdot \frac{V_{BC}}{U_T}\right)$$

(2-41)

โดย $n_C = 1 + \frac{\varepsilon_C N_{DC}}{\varepsilon_B N_{AB}}$ (2-42)

จุดสำคัญที่ต้องกล่าวถึง ก็คือ ลักษณะสมบัติกระแสคอลเล็กเตอร์ ส่วนที่ควบคุมโดย "Spike" ของหัวต่ออิมิตเตอร์ แสดงโดยความสัมพันธ์ exponential $J_3 = J_{S3} \exp(\frac{V_{BE}}{n_E U_T})$ ซึ่ง n_E เป็นแฟคเตอร์อุดมคติ และ J_{S3} เป็นค่ากระแสอิ่มตัวซึ่งในทางปฏิบัติจะไม่ขึ้นกับแรงดันขับ V_{BE}

ในทางตรงกันข้าม ลักษณะสมบัติของกระแสคอลเล็กเตอร์ ส่วนที่ควบคุมโดย "Spike" ของหัวต่อคอลเล็กเตอร์ อธิบายด้วย $J_4 = J_{S4} \exp(\frac{V_{BE}}{U_T})$ โดยที่ J_{S4} จะขึ้นกับแรงดันขับ V_{BC}



รูปที่ 2.3 ศักดาไฟฟ้าบริเวณหัวต่อ

ข) กรณีหัวต่อต่างชนิดแบบลาด

ในกรณีนี้บริเวณใกล้ๆผิวสัมผัสเชิงผลึก J และ J' ค่าความหนาแน่น n_i มีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง การคำนวณเทอม π_{TE} และ π_{TC} หรือค่ากระแส J_3 และ J_4 จึงต้องพิจารณาใหม่ แต่เพื่อให้การวิเคราะห์ง่ายที่สุด จึงตั้งสมมุติฐาน ดังต่อไปนี้

- ส่วนผสมของสารประกอบ GaAlAs ให้มีการเปลี่ยนแปลงเฉพาะด้านอิมิตเตอร์และคอลเล็กเตอร์ (ด้าน N) และครอบคลุมระยะทาง L_{gE} และ L_{gC} และน้อยกว่าระยะ W_2 และ W_2' ของย่านแปรเปลี่ยนของแต่ละหัวต่อตามลำดับ (รูปที่ 2.1 และ 2.4)

- สัดส่วนอลูมิเนียม x_{AlE} และ x_{AlC} แปรผันแบบเชิงเส้นระหว่าง 0 และ L_{gE} สำหรับอิมิตเตอร์ และระหว่าง 0 กับ L_{gC} สำหรับคอลเล็กเตอร์ นั่นก็หมายความว่าค่าอิเล็กตรอนแอฟฟินิตี้ χ_E และ χ_C และช่องว่างแถบพลังงาน E_{gE} และ E_{gC}มีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นกับ W ด้วย

เราสามารถละเลยผลกระทบที่เป็นไปได้ต่อค่า N_C, N_V และ ε ในช่วง 0 ถึง L_{gE} และ 0 ถึง L_{gC} สำหรับ อิมิตเตอร์ และคอลเล็กเตอร์ ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับค่า $\Delta\chi_E$ และ $\Delta\chi_C$ หรือ ΔE_{gE} และ ΔE_{gC} ที่เกิดขึ้น

จากสมการ (2-29) ของกระแส J_4เขียนใหม่เป็น

$$J_4 = \frac{\exp(\frac{V_{BE}}{U_T})}{-\int_{J'}^{W_2'} \frac{p(W)}{qn_{iC}^2 D_{nC}} dW} \tag{2-43}$$

เราสามารถคำนวณการกระจายของโฮล p(W)ดังเช่นกรณีของหัวต่อต่างชนิดแบบชันโดยการอินทิเกรต สมการ (2-1) ระหว่างจุดที่สัมผัสกับเบสกับจุด W ใดๆของย่านแปรเปลี่ยนด้านคอลเล็กเตอร์ จะได้

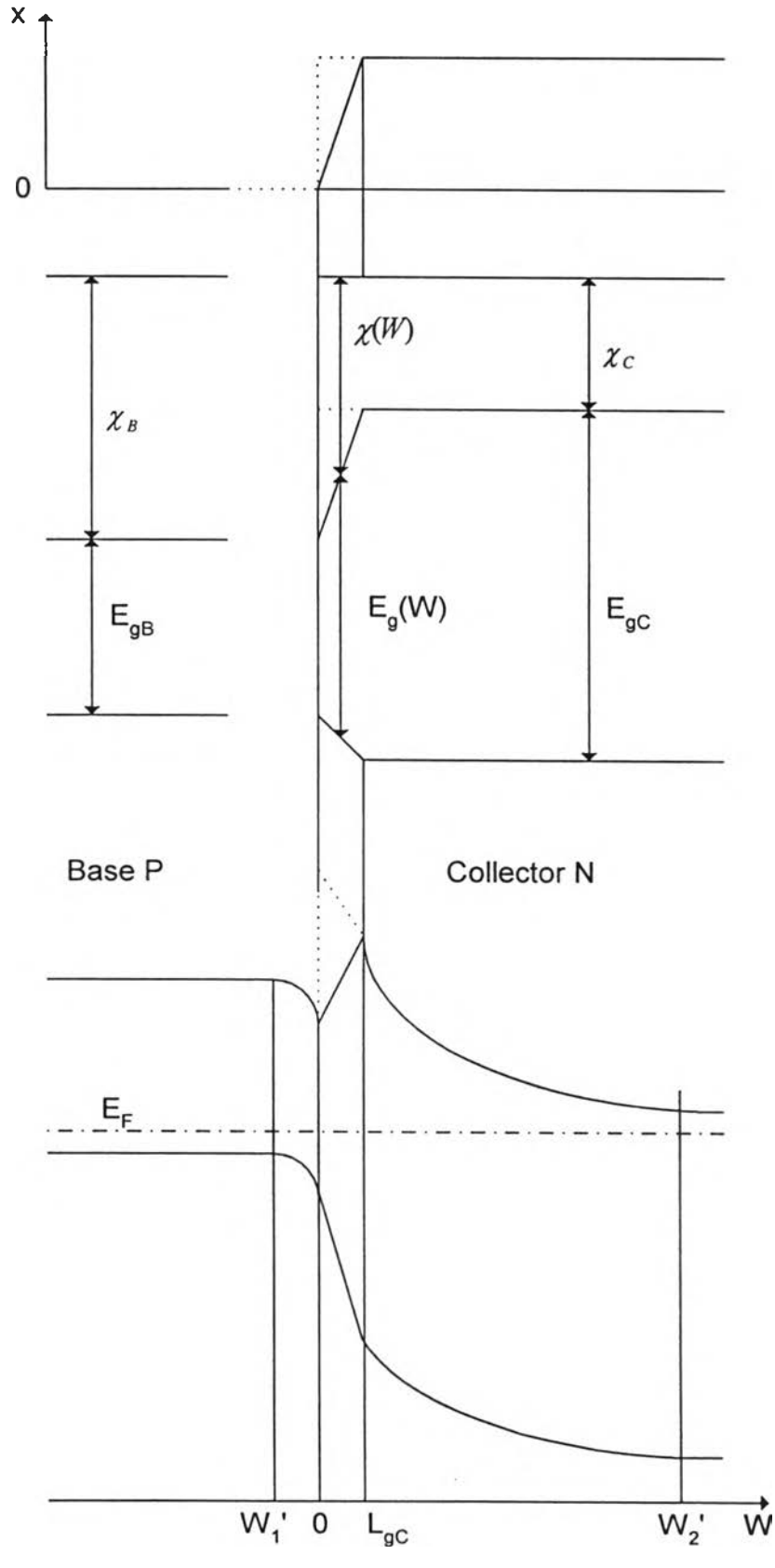
$$\ln(\frac{p(W)}{N_V(W)}) = -\left[\frac{V(W)}{U_T} + \frac{k_{BC}(V_{DC} - V_{BC})}{U_T} + \frac{\Delta E_g(W) - \Delta\chi(W)}{U_T}\right] + \ln(\frac{P_B}{N_{VB}}) \tag{2-44}$$

โดยที่ $\Delta E_g(W) = E_g(W) - E_{gB}$

และ $\Delta\chi(W) = \chi_B - \chi(W)$ (2-45)

โดยใช้สมการ (2-33) และ (2-7) ของแรงดันแพร่ซึม V_{DC} และความหนาแน่นพาหะ n_i ตามลำดับจะได้สมการ p(W) ในช่วง $0 < W < L_{gC}$

$$p(W) = \frac{N_{CC}}{N_{DC}} \exp(\frac{k_C V_{DC}}{U_T}) \exp(\frac{k_{BC} V_{BC}}{U_T}) \frac{n_i^2(W)}{N_C(W)} \exp\left[-\frac{V(W)}{U_T} + \frac{\chi_C - \chi(W)}{U_T}\right] \tag{2-46}$$



รูปที่ 2.4 แผนภาพแถบพลังงานต้องห้ามบริเวณหัวต่อ เบส คอลเล็กเตอร์

และในช่วง $L_{gC} < W < W_2'$

$$p(W) = \exp(\frac{k_C V_{DC}}{U_T}) \exp(\frac{k_{BC} V_{BC}}{U_T}) \frac{n_{iC}^2}{N_{DC}} \exp\left[-\frac{V(W)}{U_T} \right] \quad (2\text{-}47)$$

ดังนั้นสมการ (2-43) $1/J_4$ สามารถเขียนได้เป็น

$$\frac{1}{J_4} = -\exp\left(\frac{-V_{BE}}{U_T} \right) \left[\int_{J'}^{L_{gC}} \frac{p(W)}{q n_{iC}^2 D_{nC}} + \int_{L_{gC}}^{W_2'} \frac{p(W)}{q n_{iC}^2 D_{nC}} \right] \quad (2\text{-}48)$$

โดยให้ศักดาไฟฟ้าที่หัวต่อ V(W) อยู่ในรูปของสมการ (2-37) (เชิงเส้น) เราสามารถเขียน J_4 อยู่ในรูปแบบ

$$(J_4) \text{ในกรณี Graded junction} = (J_4) \text{ ในกรณี Abrupt junction} \times \eta_C \quad (2\text{-}49)$$

โดย η_C จะเป็นแฟคเตอร์ ซึ่งมีค่าตามสมการ

$$\frac{1}{\eta_C} = \frac{1}{\frac{\chi_B - \chi_C}{L_{gC}} \sqrt{\frac{n_C \varepsilon_C}{2qN_{DC}(V_{DC} - V_{BC})} - 1}} \times \left[\exp\left(-\frac{L_{gC}}{U_T} \cdot \sqrt{\frac{2qN_{DC}(V_{DC} - V_{BC})}{n_C \varepsilon_C}} \right) - \exp\left(\frac{\chi_C - \chi_B}{U_T} \right) \right] \quad (2\text{-}50)$$

$$+ \left[\exp\left(-\frac{L_{gC}}{U_T} \cdot \sqrt{\frac{2qN_{DC}(V_{DC} - V_{BC})}{n_C \varepsilon_C}} \right) - \exp\left(\frac{(V_{DC} - V_{BC})}{n_C U_T} \right) \right]$$

ทำนองเดียวกันเราสามารถแสดงให้เห็นว่า

$$(J_3) \text{ในกรณี Graded junction} = (J_3) \text{ ในกรณี Abrupt junction} \times \eta_E \quad (2\text{-}51)$$

โดย η_E จะเป็นแฟคเตอร์ ซึ่งมีค่าตามสมการ

$$\frac{1}{\eta_E} = \frac{1}{\frac{\chi_B - \chi_E}{L_{gE}} \sqrt{\frac{n_E \varepsilon_E}{2qN_{DE}(V_{DE} - V_{BE})} - 1}} \times \left[\exp\left(-\frac{L_{gE}}{U_T} \cdot \sqrt{\frac{2qN_{DE}(V_{DE} - V_{BE})}{n_E \varepsilon_E}} \right) - \exp\left(\frac{\chi_E - \chi_B}{U_T} \right) \right] \quad (2\text{-}52)$$

$$+ \left[\exp\left(-\frac{L_{gE}}{U_T} \cdot \sqrt{\frac{2qN_{DE}(V_{DE} - V_{BE})}{n_E \varepsilon_E}} \right) - \exp\left(\frac{(V_{DE} - V_{BE})}{n_E U_T} \right) \right]$$

ในทางปฏิบัติ η_E และ η_C จะขึ้นกับค่า L_{gE} และ L_{gC} โดยมีค่าเป็น 1 (สำหรับ L_{gE} และ L_{gC}=0) จนถึงค่าสูงมากๆ ประมาณ 10^5

ในกรณีหลังนี้ J_3 แบบลาด และ J_4 แบบลาดจะมีค่าใหญ่มาก ซึ่งแสดงให้เห็นว่า "Spike" ไม่มีบทบาทใดๆ กล่าวคือ $\frac{1}{J_3} << \frac{1}{J_1}$ และ $\frac{1}{J_4} << \frac{1}{J_1}$

รูปที่ 2.5 แสดงการเปลี่ยนแปลงของ η_E และ η_C กับแรงดันที่หัวต่อ V_{BE} และ V_{BC} ที่ L_{gE} และ L_{gC} ค่าต่างๆ ส่วนรูปที่ 2.6 แสดงลักษณะสมบัติ (J_C,V_{BE}) ทั้งที่ได้จากสมการ (2-1) และ (2-2) โดยตรง เปรียบเทียบกับวิธีวิเคราะห์ที่ผ่านมา ซึ่งจะเห็นว่าสอดคล้องกันอย่างดี

2.1.2 อัตราขยายกระแส (Current gain)

อัตราขยายกระแสอินทรินซิคของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ พิจารณาจากภายใต้เงื่อนไขที่ยังไม่คิดการรวมตัวของพาหะในเขตปลอดพาหะของหัวต่อ ซึ่งสามารถแสดงอยู่ในรูปแบบของสมการ

$$\frac{1}{h_{FE}^{\bullet}} = \frac{1}{\gamma} + \frac{1}{\delta} \tag{2-53}$$

โดยที่ γ และ δ คือประสิทธิภาพในการฉีดพาหะที่หัวต่ออิมิตเตอร์-เบส และแฟคเตอร์การขนถ่ายพาหะในเบส ตามลำดับ

ประสิทธิภาพในการฉีด γ คือ อัตราส่วนระหว่างกระแสคอลเล็กเตอร์ J_n ที่ถูกฉีดจากอิมิตเตอร์เข้าสู่เบสต่อกระแสโฮลที่ฉีดจากเบสเข้าสู่อิมิตเตอร์เหมือนกับกรณีทรานซิสเตอร์หัวต่อต่างชนิดเดี่ยว กระแสแพร่ซึมของโฮลในอิมิตเตอร์เขียนได้เป็น

$$J_p = \frac{\exp(\frac{V_{BE}}{U_T})}{\upsilon_E} \tag{2-54}$$

$$\text{โดยที่ } \upsilon_E = \int_{W_1}^{E} \frac{n}{qn_{iE}^2 D_{nE}} dW \tag{2-55}$$

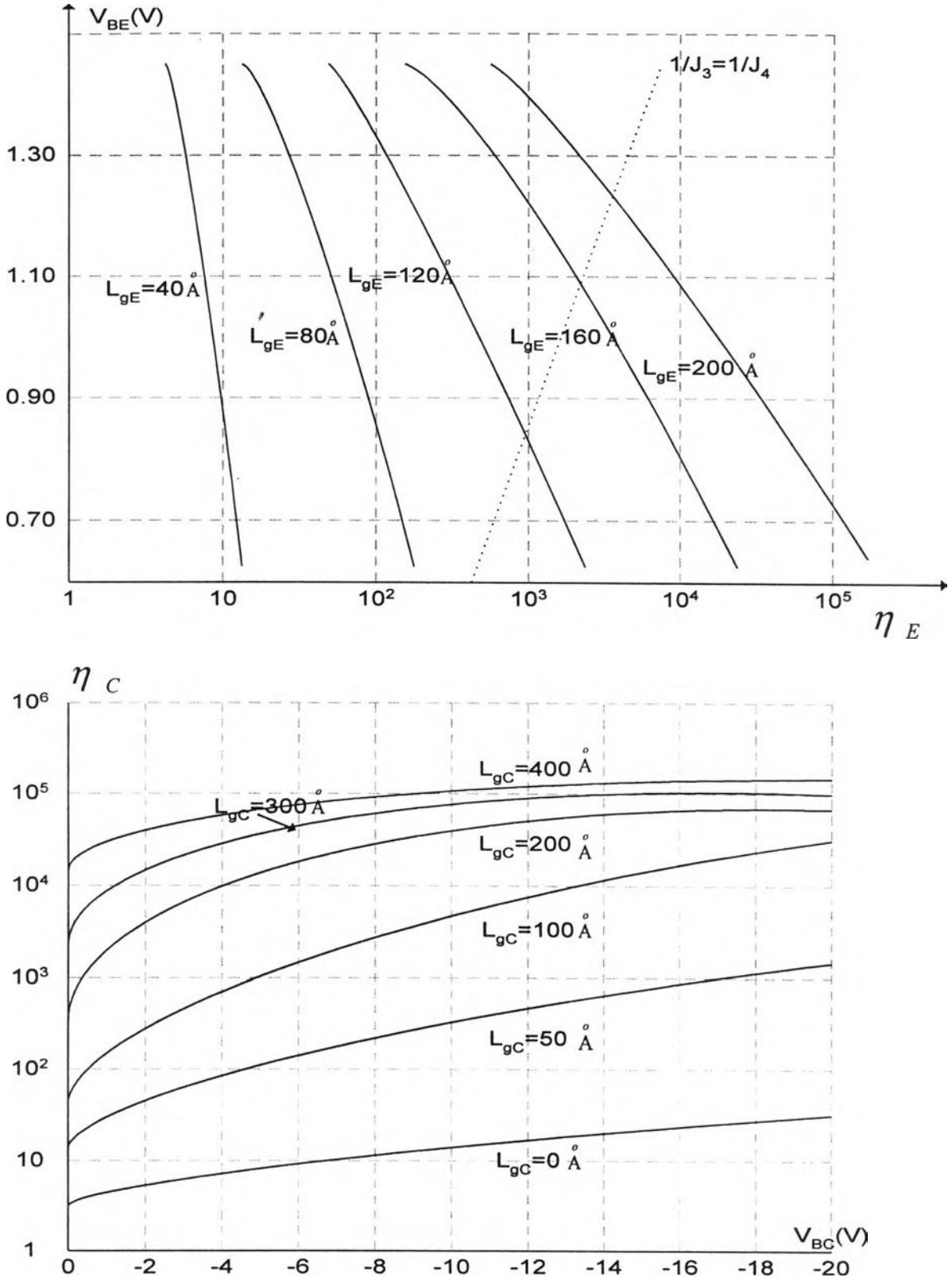
ดังนั้นประสิทธิภาพในการฉีด จึงเขียนได้เป็น

$$\gamma = \frac{\upsilon_E}{\pi_B + \pi_{SB} + \pi_{TE} + \pi_{TC}} \tag{2-56}$$

สำหรับค่าแฟคเตอร์ของการขนถ่ายพาหะซึ่งนิยามเป็นอัตราส่วนระหว่างกระแสอิเล็กตรอนที่ไปถึง คอลเล็กเตอร์ได้ต่อกระแสรวมตัวในเบส (J_{RV}):

$$\delta = \frac{J_C}{J_{RV}} \tag{2-57}$$

J_{RV} อธิบายด้วยประจุไฟฟ้าส่วนเกินในย่านเบสที่เป็นกลาง Q_{SB} และค่าชีวิตพาหะอิเล็กตรอน τ_{nB} ในเบส ตามความสัมพันธ์



รูปที่ 2.5 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่า η_E และ η_C กับแรงดันที่หัวต่อ V_{BE} และ V_{BC} ที่ L_{gE} และ L_{gC} ค่าต่างๆกัน ตามลำดับ

$$J_{RV} = \frac{Q_{SB}}{\tau_{nB}} \qquad (2\text{-}58)$$

ในกรณีของทรานซิสเตอร์หัวต่อต่างชนิดคู่ "Spike" ณ บริเวณคอลเล็กเตอร์เป็นสาเหตุให้มีการเพิ่มขึ้นของพาหะข้างน้อยบริเวณหัวต่อเบส-คอลเล็กเตอร์ ผลก็คือ มีการเพิ่มพาหะส่วนเกินในเบส (รูปที่ 2.7)

กระแสพาหะข้างน้อยอิเล็กตรอนในย่านเบสเป็นกลางซึ่งมีขนาดแคบ และมีสารเจือคงที่ต้องเป็นกระแสแพร่ซึมแน่นอน และการรวมตัวที่เกิดขึ้นในย่านนี้ถือว่าเล็กน้อยตัดทิ้งได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเราสามารถอนุโลมว่าค่ากระแสอิเล็กตรอนมีค่าไม่ขึ้นกับตำแหน่ง W กล่าวคือ การกระจายพาหะข้างน้อยในเบสเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นกับ W จึงเขียนค่าประจุไฟฟ้าสะสม Q_{SB} ได้ว่า:

$$Q_{SB} = \frac{q}{2} \cdot (\hat{n}_{BE} + \hat{n}_{BC}) W_B \qquad (2\text{-}59)$$

โดย $\hat{n}_{BE}$ และ $\hat{n}_{BC}$ คือค่าความหนาแน่นพาหะส่วนเกินในเบส ณ ขอบ J และ J' ของย่านอิมิตเตอร์และ คอลเล็กเตอร์ ตามลำดับ

จากสมการกระแสแพร่ซึม $J_C = qD_{nB} \frac{\partial \hat{n}}{\partial W}$ (2-60 ก)

จะได้ $J_C = qD_{nB} \frac{\hat{n}_{BE} - \hat{n}_{BC}}{W_B}$ (2-60 ข)

ดังนั้น $\hat{n}_{BC} = \hat{n}_{BE} - \frac{J_C W_B}{qD_{nB}}$ (2-60)

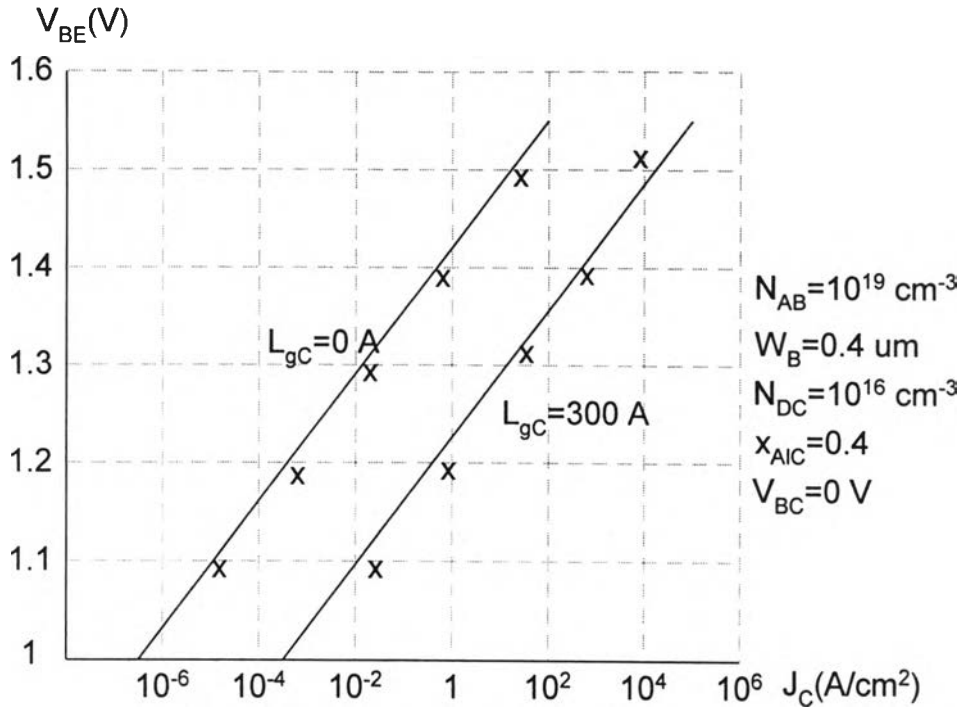
พื้นฐานการคำนวณค่า $\hat{n}_{BE}$ จะเหมือนกับการหาค่า J_C กล่าวคือโดยการอินติเกรดความสัมพันธ์ (2-8) ระหว่างผิวคอลเล็กเตอร์ C ถึงหัวต่ออิมิตเตอร์-เบส J, จะได้

$$\left(\frac{pn}{n_i^2}\right)_J - 1 = \int_C^J \frac{p}{n_i^2} \frac{J_n}{qD_n} dW - \int_C^J \frac{n}{n_i^2} \frac{J_p}{qD_p} dW \qquad (2\text{-}61)$$

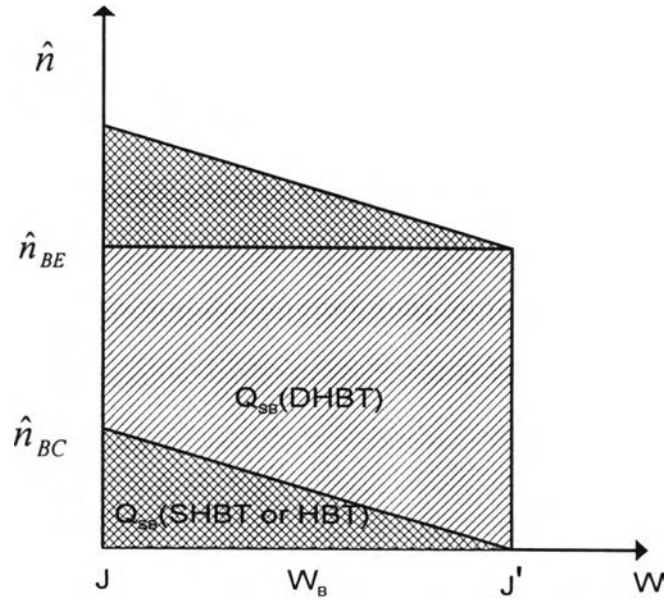
และจากการพิจารณาอาศัยสมการ (2-13), (2-18) และ (2-19) จะได้

$$\left(\frac{pn}{n_i^2}\right) = J_C \left(\int_{W_2'}^{J'} \frac{p}{qn_{iC}^2 D_{nC}} dW + \int_{J'}^{J} \frac{p}{qn_{iB}^2 D_{nB}} dW \right) + 1 \qquad (2\text{-}62)$$

ซึ่งก็คือ $\left(\frac{pn}{n_i^2}\right)_J = J_C(\pi_B + \pi_{TC}) + 1$ (2-63)



รูปที่ 2.6 ลักษณะสมบัติ J_C, V_{BE} ที่ได้จากสมการ (2-1) และ (2-2) โดยตรง (X) เปรียบเทียบกับที่ได้วิเคราะห์ (—)



รูปที่ 2.7 พาหะส่วนเกินในเบส

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ที่หัวต่ออิมิตเตอร์-เบส p=N_{AB} ดังนั้น ความหนาแน่นอิเล็กตรอนจะเขียนได้เป็น

$$n_{BE} = \frac{n_{iB}^2}{N_{AB}} \cdot ((\pi_B + \pi_{TC})J_C + 1) \tag{2-64}$$

ดังที่ทราบ ความหนาแน่นอิเล็กตรอนในสภาวะสมดุล $\bar{n}_{BE} = \frac{n_{iB}^2}{N_{AB}}$ ดังนั้น ความหนาแน่นของพาหะส่วนเกิน จะเป็น

$$\hat{n}_{BE} = \frac{n_{iB}^2}{N_{AB}} \cdot (\pi_B + \pi_{TC})J_C \tag{2-65}$$

และประจุไฟฟ้าสะสมในเบสสามารถเขียนได้ว่า

$$Q_{SB} = \frac{qn_{iB}^2}{N_{AB}} \cdot (\pi_B + \pi_{TC})W_B J_C - \frac{W_B^2}{2D_{nB}} J_C \tag{2-66}$$

ช่วงเวลาของพาหะเคลื่อนที่ผ่านเบส τ_B ซึ่งกำหนดจากอัตราส่วน $\tau_B = Q_{SB}/J_C$ ดังนั้น

$$\tau_B = \frac{qn_{iB}^2}{N_{AB}} \cdot (\pi_B + \pi_{TC})W_B - \frac{W_B^2}{2D_{nB}} \tag{2-67}$$

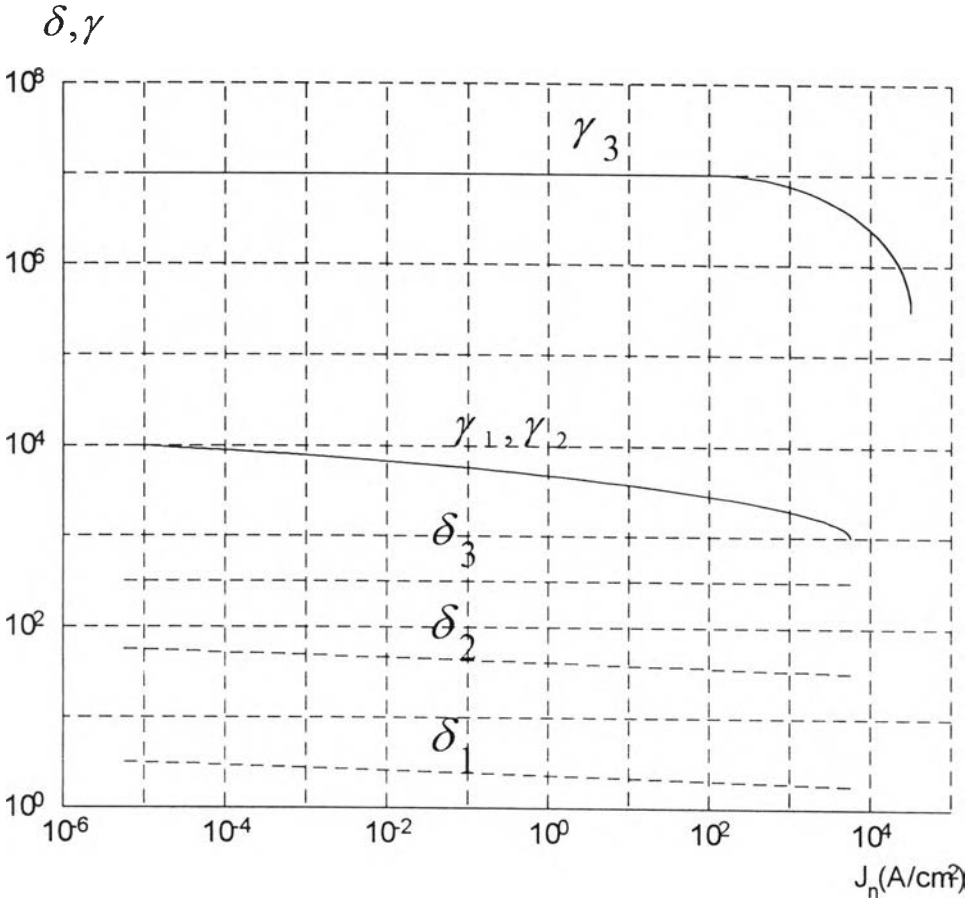
และแฟคเตอร์การขนถ่ายพาหะ แสดงโดยสมการ

$$\delta = \frac{\tau_{nB}}{\tau_B} = \frac{\tau_{nB}}{\frac{qn_{iB}^2}{N_{AB}} \cdot (\pi_B + \pi_{TC})W_B - \frac{W_B^2}{2D_{nB}}} \tag{2-68}$$

ผลกระทบจาก "Spike" อันเนื่องมาจากหัวต่อต่างชนิดแบบชันของหัวต่อคอลเล็กเตอร์-เบส พิจารณาได้จากเทอม π_{TC} ที่ปรากฏในสมการ ซึ่งจะทำให้ช่วงเวลาในการขนถ่ายพาหะข้ามเบสยาวขึ้น แฟคเตอร์การขนถ่ายพาหะลดลง จึงมีความจำเป็นที่จะลดผลกระทบจาก "Spike" ที่หัวต่อคอลเล็กเตอร์-เบส โดยใช้หัวต่อต่างชนิดแบบลาด จึงทำให้สมการแฟคเตอร์การขนถ่ายพาหะ กลายเป็น

$$\delta = \frac{\tau_{nB}}{\tau_B} = \frac{\tau_{nB}}{\frac{qn_{iB}^2}{N_{AB}} \cdot \left(\pi_B + \frac{\pi_{TC}}{\eta_C}\right)W_B - \frac{W_B^2}{2D_{nB}}} \tag{2-69}$$

การเปลี่ยนแปลงค่าประสิทธิภาพในการฉีด γ และแฟคเตอร์ในการขนถ่ายพาหะ δ กับค่ากระแสอิเล็กตรอนในกรณีหัวต่อต่างชนิดแบบลาด แสดงไว้ในรูปที่ 2.8 จะเห็นว่าถ้าความลาดของหัวต่อคอลเล็กเตอร์อยู่ระหว่าง 100 Å ถึง 500 Å ประสิทธิภาพในการฉีดพาหะจะมีค่าเหนือกว่า



1) $L_{gE}=L_{gC}$ Å

2) L_{gE}=100 Å, L_{gC}=500 Å

3) L_{gE}=500 Å, L_{gC}=200 Å

รูปที่ 2.8 ผลของความลาดเอียงที่มีต่อประสิทธิภาพในการฉีด และแฟคเตอร์การขนถ่ายพาหะ

แฟคเตอร์การขนถ่ายพาหะ ผลก็คือ (ตามสมการ 1-53) อัตราขยายกระแส h_{FE}^{*} จะเท่ากับ δ $\left(\frac{1}{h_{FE}^{*}}=\frac{1}{\delta}\right)$ หรืออีกมุมมองหนึ่งก็คือความลาดเอียงของหัวต่อเพิ่มขึ้น δ เพิ่มขึ้น ผล h_{FE}^{*} เพิ่มขึ้น ซึ่งบ่งบอกถึงบทบาทของ "Spike" หัวต่อคอลเล็กเตอร์-เบส ต่อการทำงานของทรานซิสเตอร์หัวต่อต่างชนิดคู่

2.2 พารามิเตอร์ที่มีผลต่อการทำงานของทรานซิสเตอร์หัวต่อต่างชนิดสองหัวต่อ

สำหรับตอนนี้เราจะนำโมเดลที่เราได้นำเสนอในตอนที่แล้วมาวิเคราะห์หาผลของลักษณะสมบัติหลักๆ ทั้งทางด้านเทคโนโลยีและไฟฟ้า ซึ่งควบคุมการทำงานของทรานซิสเตอร์ โดยขั้นแรกเราจะคำนวณลักษณะสมบัติกระแสแรงดัน และอัตราขยายกระแส โดยเลือกค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่เกี่ยวข้องซึ่งแสดงในตารางที่ 2.1 เป็นค่าตัวอย่างของพารามิเตอร์ดังกล่าว ซึ่งพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ได้เลือกสรรค่าที่ทำให้บทบาทของ "Spike" ที่หัวต่ออิมิตเตอร์-เบส สามารถละเลยได้ กล่าวคือ ($J_3 >> J_1$)

x_{AlE}	N_{DE}	W_E	L_{gE}	N_{AB}	W_B	x_{AlC}	N_{DC}	L_{gC}	V_{BC}
0.4	10^{17} cm^{-3}	1 μm	500 Å	10^{19} cm^{-3}	0.4 μm	0.3	10^{16} cm^{-3}	100 Å	-5 V

ตารางที่ 2.1 พารามิเตอร์ต่างๆของทรานซิสเตอร์พร้อมค่าตัวอย่าง

เพื่อศึกษาผลกระทบอันเนื่องมาจากพารามิเตอร์ต่างๆที่มีต่อตำแหน่งและขนาดของ "Spike" ในย่านคอลเล็กเตอร์ จึงทำการแปรค่าพารามิเตอร์ต่างๆทีละค่าโดยใช้พารามิเตอร์อื่นๆคงที่ พารามิเตอร์ที่ทำการศึกษามีค่าสารเจือในชั้นเบสและคอลเล็กเตอร์ ปริมาณอลูมิเนียมของคอลเล็กเตอร์ ความลาดเอียงของหัวต่อ และแรงดันที่จ่ายให้หัวต่อเบส-คอลเล็กเตอร์

2.2.1 ผลของปริมาณอลูมิเนียมในชั้นคอลเล็กเตอร์

ถ้าเราพิจารณาลักษณะสมบัติกระแสแรงดัน (J_C , V_{BE}) สำหรับปริมาณอลูมิเนียมแปรค่าระหว่าง $x_{AlC} = 0$ ถึง $x_{AlC} = 0.4$ เราสรุปจากรูปที่ 2.9(ก) ว่า กระแส J_C จะถูกกำหนดด้วยกระแส J_4 เมื่อ x_{AlC} มีค่า ≥ 0.2 สรุปได้ว่าในกรณีนี้ "Spike" ของหัวต่อต่างชนิดคอลเล็กเตอร์-เบส มีบทบาทอย่างสำคัญ เนื่องจากเทอม π_{TC} ซึ่งสัมพันธ์อยู่กับ "Spike" มีค่ามากกว่า π_B ($\pi_{TC} > \pi_B$ ทำให้ $J_4 < J_1$)

ในทางตรงกันข้ามเมื่อปริมาณอลูมิเนียม $x_{AlC} < 0.2$ J_4 จะมีค่าสูงกว่า J_1 ดังนั้น J_1 จะเป็นตัวกำหนดค่า J_C นั่นก็คือหัวต่อคอลเล็กเตอร์-เบส ไม่มีบทบาทใดๆเหนือลักษณะสมบัติ (J_C, V_{BE}) , $(\pi_{TC} < \pi_B)$

ในส่วนของอัตราขยายกระแสอินทรินซิก h_{FE}^* (รูปที่ 2.9(ข)) จะขึ้นกับแฟคเตอร์การขนถ่ายพาหะ δ (γ มักจะมีค่าโตกว่า δ เสมอ ดูรูปที่ 2.8) สำหรับปริมาณอลูมิเนียม x_{AlC} <0.2 "Spike" ที่หัวต่อคอลเล็กเตอร์-เบส จะไม่เข้ามายุ่งเกี่ยวและแฟคเตอร์ของการขนถ่ายพาหะ จะเท่ากับของทรานซิสเตอร์หัวต่อเหมือน (Homojunction) หรือ ของ SHBT กล่าวคือ

$$\delta = \frac{\tau_{nB}}{\tau_B} \qquad \text{โดย } \tau_B = \frac{W_B^2}{2D_{nB}} \tag{2-70}$$

เมื่อปริมาณอลูมิเนียม $x_{AlC} \geq 0.2$ เทอม π_{TC} จะเด่นขึ้น ทำให้เวลาในการขนถ่ายพาหะในเบสเพิ่มขึ้น (ตามสมการ 1-67) ดังนั้น เทอมแฟคเตอร์การขนถ่ายพาหะ δ และอัตราขยายกระแสอินทรินซิก h_{FE}^* จะลดลง ตามความสัมพันธ์ (2-68) และ (2-53)

คำอธิบายเกี่ยวกับเรื่องนี้จะพิจารณาดูได้จากรูปที่ 2.9(ค) ซึ่งความสูงของกำแพง B ซึ่งนิยามด้วย "Spike" มีขนาดลดลงเมื่อปริมาณอลูมิเนียมในคอลเล็กเตอร์ลดลง

2.2.2 ผลที่เกิดจากความลาดของหัวต่อต่างชนิดคอลเล็กเตอร์-เบส

จากการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติ J_C, V_{BE} ในรูปที่ 2.10(ก) จุดที่ความลาดของหัวต่อ $L_g \approx 200\,\mathring{A}$ ค่า $J_1 \approx J_C$ แต่เมื่อ $L_g < 200\,\mathring{A}$ $J_C < J_1$ ที่ V_{BE} ค่าเดียวกัน ทั้งนี้เนื่องจาก เมื่อ $L_g < 200\,\mathring{A}$ เทอม η_C จะน้อย (รูปที่ 2.5) ค่ากระแสคอลเล็กเตอร์ J_C จะถูกควบคุมด้วย "Spike" ที่หัวต่อคอลเล็กเตอร์-เบส ($J_C \approx J_4$) ในขณะเดียวกันสมการ (2-69) แสดงให้เห็นว่าถ้า η_C มีค่าต่ำ $\frac{\pi_{TC}}{\eta_C}$ จะมีค่าสูงขึ้น แฟคเตอร์การขนถ่ายพาหะ δ ถูกเปลี่ยนแปลง ดังจะเห็นได้จากการลดลงของอัตราขยายกระแส

ในลักษณะตรงกันข้าม ถ้าความลาดของหัวต่อต่างชนิดเบส-คอลเล็กเตอร์มากขึ้น ($L_g > 200\,\mathring{A}$) กระแส J_4 จะมีค่าสูงมาก ซึ่งแสดงให้เห็นว่า "Spike" ตรงหัวต่อไม่มีบทบาทใดๆต่อพฤติกรรมของทรานซิสเตอร์ ผล $J_1 << J_4$ ณ จุดนี้ค่าแฟคเตอร์การขนถ่ายพาหะจะมีค่าเท่ากับของทรานซิสเตอร์หัวต่อต่างชนิดเดี่ยว ดังสมการ (2-70)

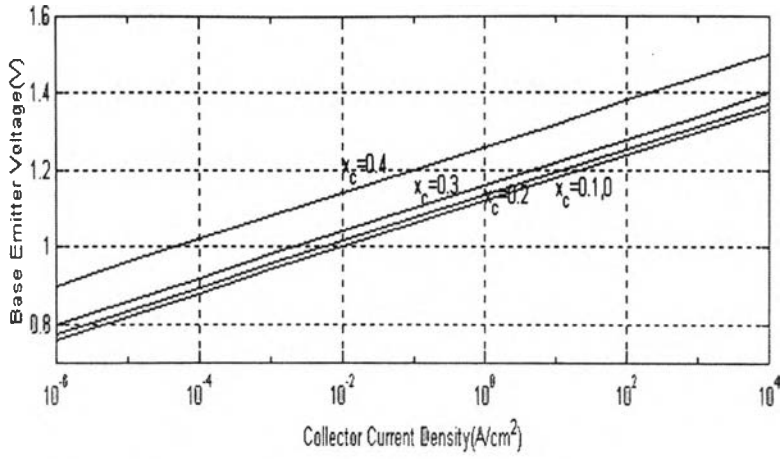
รูปที่ 2.10(ค) แสดงการเปลี่ยนแปลงความสูงของกำแพงพลังงาน B ที่หัวต่อคอลเล็กเตอร์-เบส เมื่อความลาดต่างกัน

2.2.3 ผลกระทบจากปริมาณสารเจือในชั้นคอลเล็กเตอร์ N_{DC}

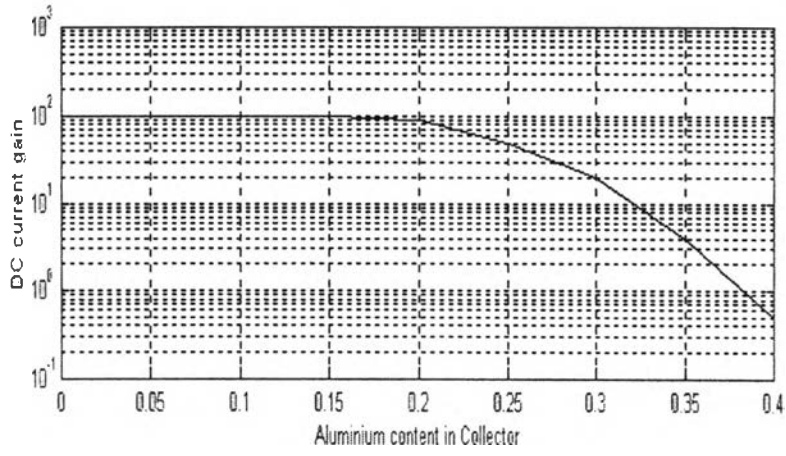
ผลกระทบจากการแปรค่าสารเจือปนในคอลเล็กเตอร์ต่อลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน และอัตราขยายกระแส แสดงไว้ในรูปที่ 2.11(ก) และ (ข) ตามลำดับ ในกรณีนี้จะเกิดการปรับระยะทางของย่านแปรเปลี่ยนในแต่ละข้างของหัวต่อคอลเล็กเตอร์-เบส ความสูงของ "Spike" ลดลง และตำแหน่งของ "Spike" จะมีการเลื่อนไปในลักษณะที่ทำให้ผลกระทบต่อลักษณะสมบัติลดลง และมีแนวโน้มจะหมดไป (Disappear) เมื่อปริมาณสารเจือมากขึ้น (ดูรูป 2.11(ค))

2.2.4 ผลกระทบจากแรงดันคอลเล็กเตอร์-เบส V_{BC}

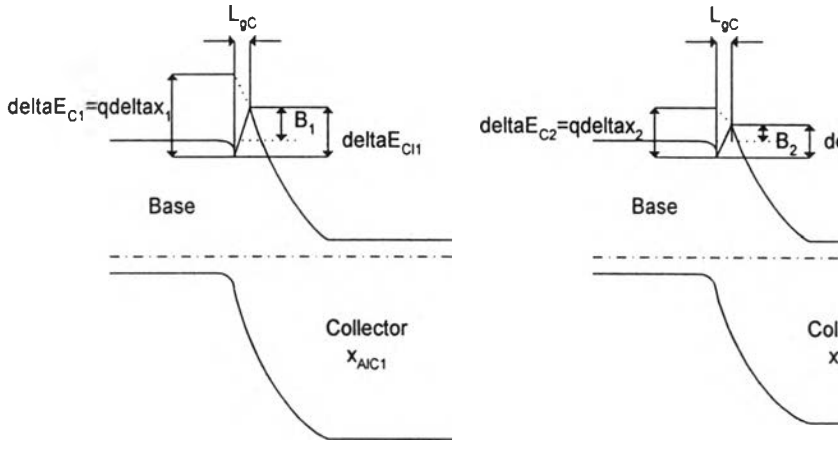
จากลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน และแฟคเตอร์การขนถ่ายพาหะที่มีการเปลี่ยนแปลง เมื่อถูกขับด้วยแรงดัน V_{BC} ค่าต่างๆดังนี้ (รูปที่ 2.12(ก) และ (ข)) ชี้ให้เห็นว่าอิทธิพลของ "Spike" คอลเล็กเตอร์-เบสน้อย เมื่อแรงดัน V_{BC} สูงขึ้น ในกรณีนี้ เทอม π_{TC} (สมการ 2-29) จะมีค่าลดลง มีข้อสังเกตุว่าการเปลี่ยนแปลงนี้ไม่ได้มาจากการเปลี่ยนแปลงของความสูงของกำแพงพาหะ (อย่างน้อยตราบเท่าที่หัวต่อเบส-คอลเล็กเตอร์ คือ $P^{++}N$) แต่ขึ้นกับความกว้าง



ก)



ข)



ค)

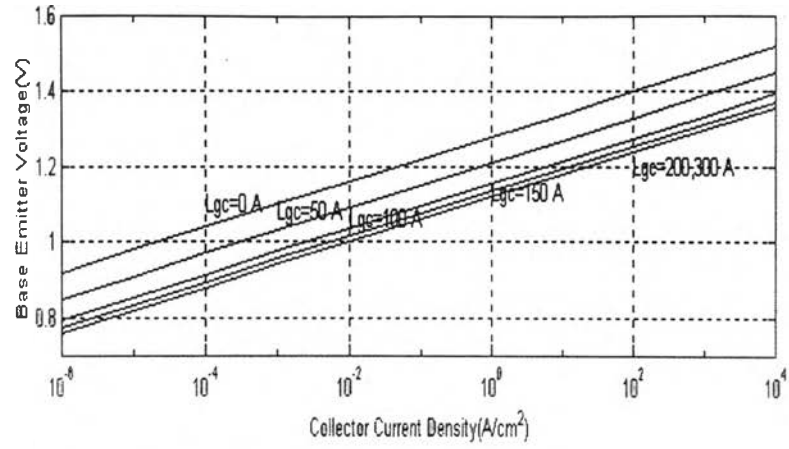
$x_{AlC1} > x_{AlC2}$
$deltaE_{C1} > deltaE_{C2}$
$deltaE_{Cl1} > deltaE_{Cl2}$
$B_1 > B_2$

รูปที่ 2.9 ผลของปริมาณอลูมิเนียม x_{AlC} ในชั้นคอลเล็กเตอร์ ต่อ

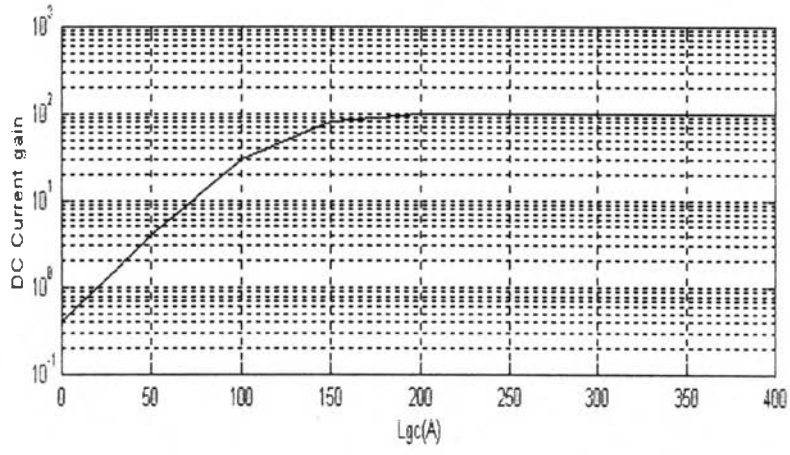
ก) ลักษณะสมบัติกระแสแรงดัน J_C, V_{BE}

ข) อัตราขยายกระแสอินทรินซิก h_{FE}^{*}

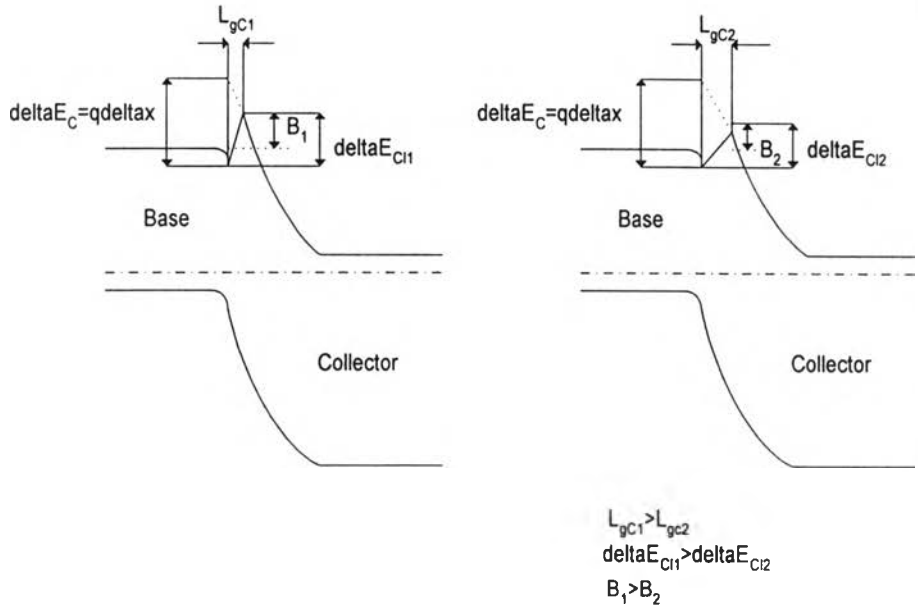
ค) แผนภาพแถบพลังงานบริเวณหัวต่อเบส-คอลเล็กเตอร์



ก)



ข)



ค)

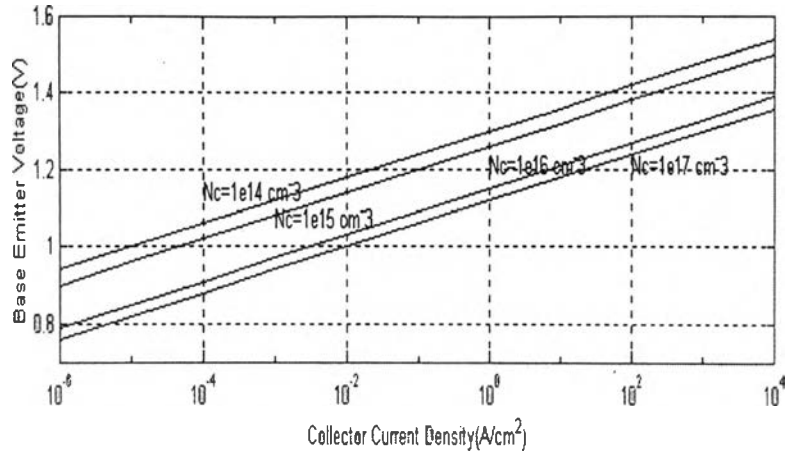
$L_{gC1} > L_{gc2}$
$deltaE_{C1} > deltaE_{C2}$
$B_1 > B_2$

รูปที่ 2.10 ผลของความลาด L_{gC} ของหัวต่อคอลเล็กเตอร์-เบส ต่อ

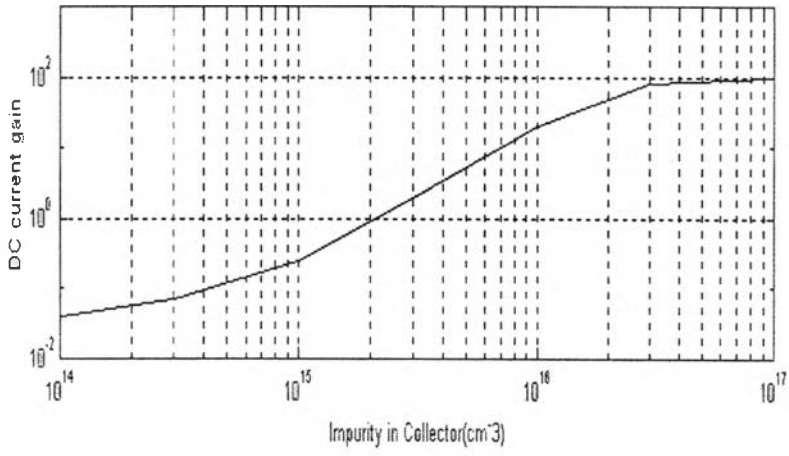
ก) ลักษณะสมบัติกระแสแรงดัน J_C, V_{BE}

ข) อัตราขยายกระแสอินทรินซิก h_{FE}^*

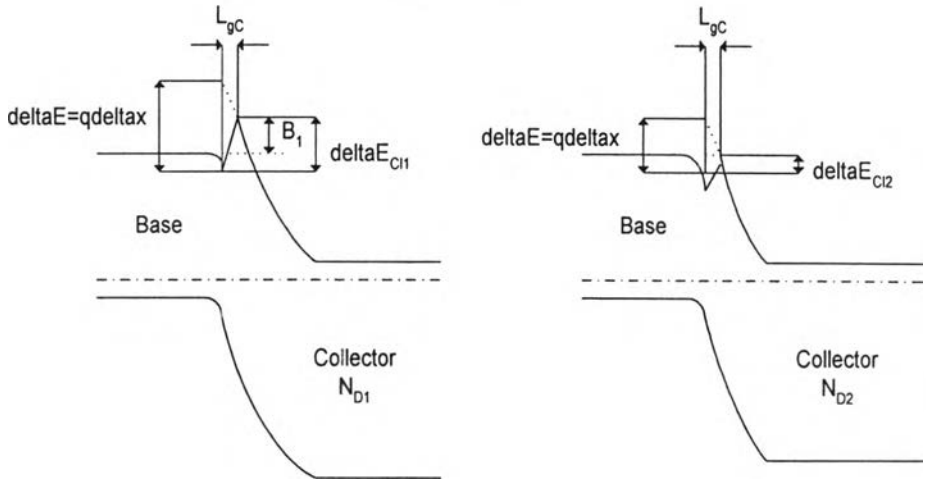
ค) แผนภาพแถบพลังงานบริเวณหัวต่อเบส-คอลเล็กเตอร์



ก)



ข)



ค)

$N_{D1}<N_{D2}$

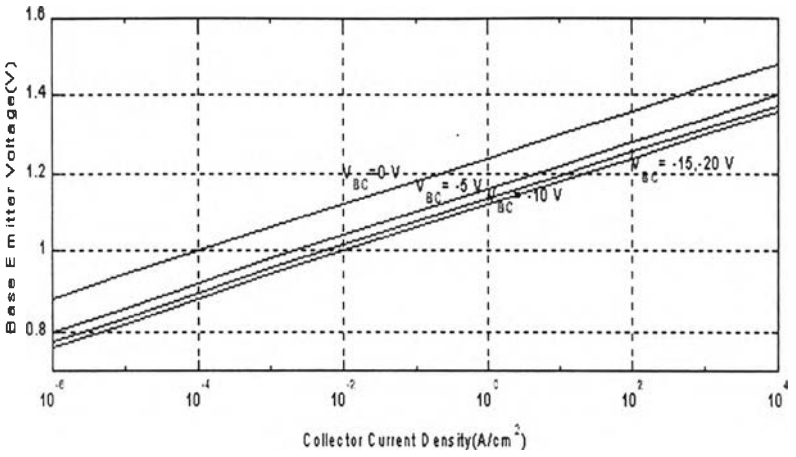
$deltaE_{Cl1}>deltaE_{Cl2}$

รูปที่ 2.11 ผลกระทบจากสารเจือในชั้นคอลเล็กเตอร์ N_{DC} ต่อ

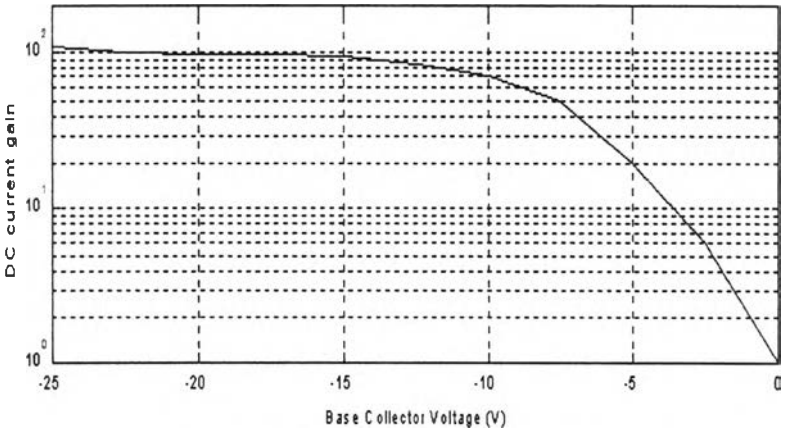
ก) ลักษณะสมบัติกระแสแรงดัน J_C,V_{BE}

ข) อัตราขยายกระแสอินทรินซิก h_{FE}^{*}

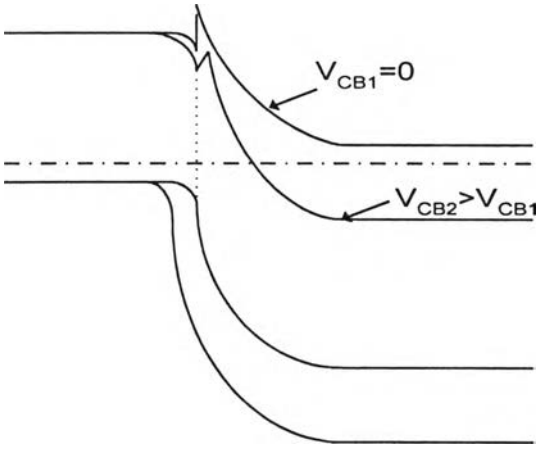
ค) แผนภาพแถบพลังงานบริเวณหัวต่อเบส-คอลเล็กเตอร์



ก)



ข)



ค)

รูปที่ 2.12 ผลกระทบจากแรงดันคอลเล็กเตอร์-เบส ต่อ

ก) ลักษณะสมบัติกระแสแรงดัน J_C,V_{BE}

ข) อัตราขยายกระแสอินทรินซิก h_{FE}^{*}

ค) แผนภาพแถบพลังงานบริเวณหัวต่อเบส-คอลเล็กเตอร์