

รายงานการวิจัยและพัฒนา

โครงการพัฒนาเทคโนโลยีวัสดุและชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์

โครงการออปโตอิเล็กทรอนิกส์
(ระยะที่ 2)

OPTOELECTRONICS

ผู้ผล	อัครเด่น	หัวหน้าโครงการ
มนตรี	สวัสดิ์ศฤงคาร	ผู้ร่วมวิจัย
บรรณง	โศภะเสวีรุทงศ์	ผู้ร่วมวิจัย
ธาวา	ศตพรานี	ผู้ร่วมวิจัย

ห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
โทร. 2525001 ต่อ 265

พ
วค 15
007182
ธ. 2

ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ
กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและการพลังงาน

รายงานการวิจัยและพัฒนา

โครงการพัฒนาเทคโนโลยีวัสดุและชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์



โครงการออปโตอิเล็กทรอนิกส์
(ระยะที่ 2)

OPTOELECTRONICS

ชุมพล	อินทรเสน	หัวหน้าโครงการ
มนตรี	สวัสดิ์ศฤงฆาร	ผู้ร่วมวิจัย
บรรยง	โตประเสริฐมงคล	ผู้ร่วมวิจัย
ธำรา	ชลปราณี	ผู้ร่วมวิจัย

ห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
โทร. 2525001 ต่อ 265

ได้รับทุนสนับสนุนจาก

ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ
กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและการพลังงาน

บทคัดย่อ

ได้กล่าวถึงข้อเด่นของหัวต่อต่างชนิดในส่วนที่เกี่ยวข้องกับโฟโตทรานซิสเตอร์ หัวต่อต่างชนิดอิมิตเตอร์-เบส จากนั้นได้ทำการทบทวนทฤษฎีการทำงานของโฟโตทรานซิสเตอร์ โดยพิจารณาถึงขีดจำกัดต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกัน อัตราขยายกระแส อัตราขยายแสง ความไวและผลตอบสนองเชิงความถี่ พร้อมทั้งศึกษาการปลูกผลึกบางมากของ GaAs ด้วยวิธีการเอพิแทกซ์สถานะของเหลวแบบแนวนอน ก่อนที่จะทำการผลิต โฟโตทรานซิสเตอร์หัวต่อต่างชนิดอิมิตเตอร์-เบสของ $Ga_{1-x}Al_xAs(n)/GaAs(p)$ ปรากฏว่าโฟโตทรานซิสเตอร์ที่ทำการผลิตได้ สามารถให้อัตราขยายกระแสถึง 750 เท่า ผลตอบสนองต่อพัลส์มีค่าเวลาขึ้น และเวลาลง 5.52 และ 7.22 ไมโครวินาที ตามลำดับ นอกจากนี้ ได้ทำการวัด ค่าความไว ความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสคอลเล็กเตอร์ อัตราขยายแสงกับกำลังแสงด้วย

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ABSTRACT

Avances in heterojunctions and the theory of operation of the heterojunction phototransistor (HPT) are reviewed. The limitations on current gain, optical gain, sensitivity and speed response are also examined. Then, the growth of very thin layer of GaAs has been experimented before the $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}(\text{n})/\text{GaAs}(\text{p})$ emitter-base heterojunction phototransistors have been realized and studied. Devices with current gains of 750 and the response time, with risetime = 5.52 and fall time = 7.22 μs have been achieved using a pulse laser. Finally, the sensitivity, the relation between collector current and optical gain with optical power have been characterized.

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตาราง	เรื่อง	หน้า
1	เปรียบเทียบคุณสมบัติทางไฟฟ้าระหว่าง Si กับ GaAs	2
2	ขั้นตอนการเตรียมแวนดิลิก GaAs	15
3	การเตรียมสารเจือและอะลูมิเนียม	15



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของอิเล็กตรอนกับสนามไฟฟ้าผัดผาของสารประกอบกึ่งตัวนำ GaAs, InP และสารกึ่งตัวนำ Si	2
2	ระดับความเข้มข้นของสารเจือปนของหัวต่อต่างชนิด N_D (GaAlAs) < N_A (GaAs)	3
3	โครงสร้างของโฟโตทรานซิสเตอร์หัวต่อต่างชนิดของ GaAlAs/GaAs	3
4	โครงสร้างของโฟโตทรานซิสเตอร์ซิลิกอน	5
5	ผังแถบพลังงานของ HPT GaAlAs/GaAs ขณะถูกฉายแสง	5
6	โดยสร้างของโฟโตทรานซิสเตอร์หัวต่อต่างชนิดที่ได้ทำการออกแบบ	9
7	ระดับความเข้มข้นของสารเจือปน และความหนาของชั้นผลึกต่าง ๆ ของโฟโตทรานซิสเตอร์	9
8	แบบหน้ากาก (Mask) ของโฟโตทรานซิสเตอร์	10
9	แผนภูมิอุณหภูมิตงเตาเอพิแทกซ์ที่ใช้ในการปลูกผลึก	12
10	ภาพตัดขวางชั้นผลึกถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน	12
11	แผนภูมิอุณหภูมิตงเตาปลูกผลึก $\Delta T = 0$ โดยใช้แวนผลึก "Dummy" A	13
12	ขั้นตอนการผลิตโฟโตทรานซิสเตอร์	17
13	แวนผลึกของโฟโตทรานซิสเตอร์ก่อนการตัดแบ่ง	18
14	ชิ้น (Chip) ของ HPT หลังจากตัดแบ่ง	19
15	ชิ้นของ HPT หลังจากติดตั้งบนฐานโลหะและต่อเส้นลวดโลหะเรียบร้อยแล้ว.	19
16	ลักษณะสมบัติกระแสคอลเล็กเตอร์ (I_C) แรงดันคอลเล็กเตอร์-อิมิตเตอร์ (V_{CE})	21
17	ความไว (Sensitivity) ของ HPT ที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ	22
18	ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเล็กเตอร์-กำลังแสงส่องกระทบ	22
19	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราขยายกระแส-กำลังแสงส่องกระทบ	23
20	ชุดเครื่องวัดผลตอบสนองพัลส์ของ HPT	23
21	Pulse Response ของ HPT	24
22	Pulse Response ของ Si-Phototransistor	25

คำอธิบายสัญลักษณ์ (List of Abbreviations)

C_{TC}	ทรานซิสชันคาร์ปาซิแตนซ์หัวต่อคอลเล็กเตอร์-เบส, pF
C_{TE}	ทรานซิสชันคาร์ปาซิแตนซ์หัวต่ออิมิตเตอร์-เบส, pF
D_{nB}	สัมประสิทธิ์การแพร่ซึมของอิเล็กตรอนในเบส, cm^2/s
D_{pE}	สัมประสิทธิ์การแพร่ซึมของโฮลในอิมิตเตอร์, cm^2/s
E_g	แถบพลังงานต้องห้าม, eV
f_T	Gain Bandwidth Product, GHz
G	อัตราขยายแสง
h_{FE}	อัตราขยายกระแส
I_E	กระแสตรงอิมิตเตอร์, mA
I_d	กระแสมีด, mA
i_c	กระแสคอลเล็กเตอร์ขณะใด ๆ, mA
i_f, i_i	กระแสคอลเล็กเตอร์เริ่มต้นและสุดท้าย, mA
k	ค่าคงตัว Boltzmann
L_{nB}	ความยาวแห่งการแพร่ซึมของอิเล็กตรอนในเบส, cm
L_{pE}	ความยาวแห่งการแพร่ซึมของโฮลในอิมิตเตอร์, cm
n_E	ความหนาแน่นอิเล็กตรอนในอิมิตเตอร์, cm^{-3}
N	Overdrive factor
N_{CB}	สเตทอิเล็กตรอนิกส์ในแถบนำไฟฟ้าของเบส, cm^{-3}
N_{VB}	สเตทอิเล็กตรอนิกส์ในแถบเวเลนซ์ของเบส, cm^{-3}
N_{CE}	สเตทอิเล็กตรอนิกส์ในแถบนำไฟฟ้าของอิมิตเตอร์, cm^{-3}
N_{VE}	สเตทอิเล็กตรอนิกส์ในแถบเวเลนซ์ของอิมิตเตอร์, cm^{-3}
P_o	ขนาดของสัญญาณแสงเข้าเฉลี่ย, Watt
P_B	ความหนาแน่นโฮลในเบส, cm^{-3}
q	ค่าประจุไฟฟ้าอิเล็กตรอนิกส์ (C)
T	อุณหภูมิ (°K, °C)
t_r, t_f	เวลาขึ้นและเวลาลงของพัลส์, s
W_B	ความกว้างของเบส (cm)
η	ประสิทธิภาพเชิงควอนตัม
γ_o	ประสิทธิภาพในการฉีดพาหะ
τ_{EC}	Total emitter-to-collector signal delay time (s)
τ_E	เวลาเติมประจุที่ C_{TE} ผ่าน r_E (s)

คำอธิบายสัญลักษณ์ (ต่อ)

- τ_B เวลาที่ใช้ในชั้นเบส (s)
 τ_D เวลาที่ใช้ในช่องทางลดพาหะเบส-คอลเล็กเตอร์ (s)
 τ_C เวลาเต็มประจุที่ C_{TC} ผ่าน R_C (s)



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



1. บทนำ (Introduction)

ในบรรดาสิ่งประดิษฐ์ที่เป็นตัวรับแสง (Detectors) ถือได้ว่า Avalanche Photodiodes (APD's) เป็นสิ่งประดิษฐ์ที่มีการใช้งานกว้างขวางที่สุด อย่างไรก็ตาม แม้ว่าสิ่งประดิษฐ์ชนิดนี้จะสามารถให้อัตราขยายสัญญาณที่สูง (High Gain) กระแสมืดมีค่าต่ำ (Low Dark Current) ผลตอบสนองเร็ว (Fast Response) และมีประสิทธิภาพเชิงควอนตัมสูง (High Quantum Efficiency) APD's ต้องใช้แรงดันไบแอสสูงกว่า 100 โวลต์ จึงก่อให้เกิดสัญญาณรบกวน (Noise) ค่อนข้างสูง ในส่วนของโฟโตทรานซิสเตอร์ที่ทำจากซิลิกอน (Si-Phototransistor) แม้ว่าจะมีสัญญาณรบกวนน้อย อัตราขยายสูง แต่ผลตอบสนองเชิงความถี่ต่ำ (ไม่เกิน 500 Mbits/sec) จึงเป็นต้นเหตุจูงใจให้เกิดการพัฒนาผลิตโฟโตทรานซิสเตอร์ชนิดหัวต่อต่างชนิด (Heterojunction Phototransistor, HPT) อิมิตเตอร์-เบสของ $Ga_{1-x}Al_xAs/GaAs$ ขึ้นมา เพื่อให้มีคุณสมบัติที่จำเป็นครบถ้วนด้วยเหตุผล

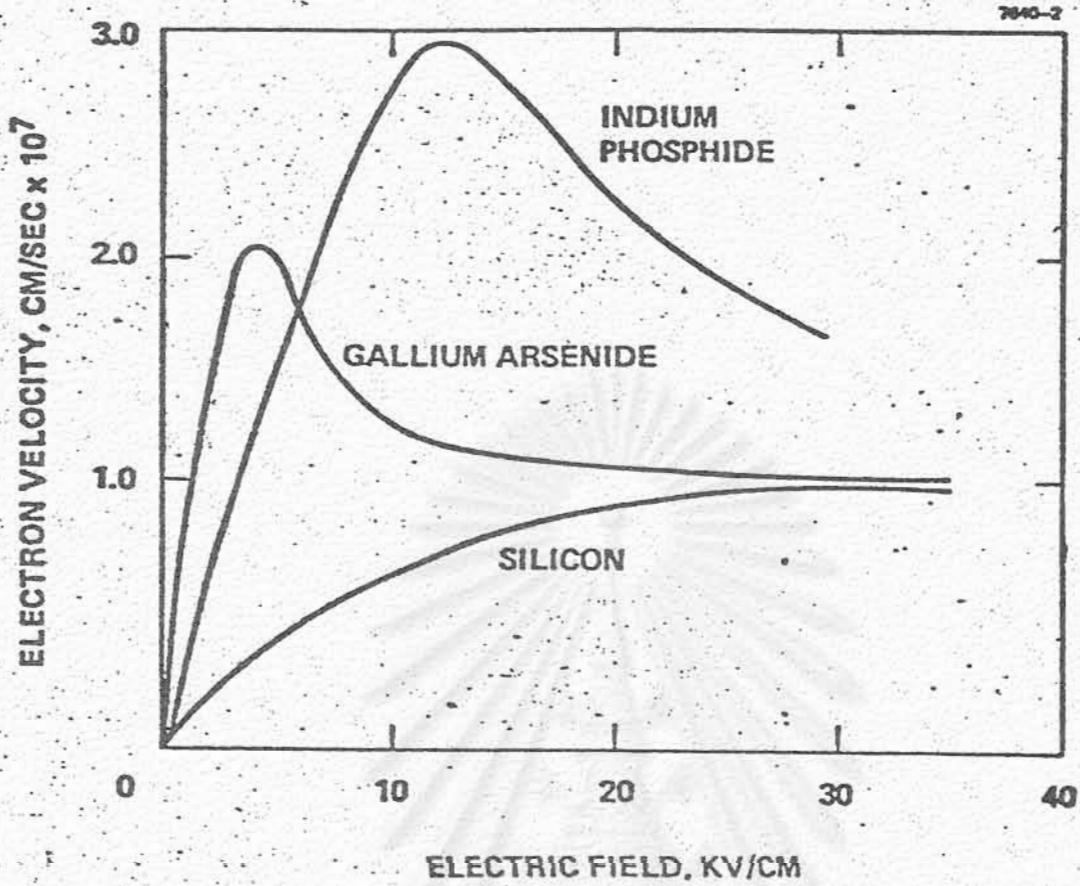
1. ความคล่องตัวของอิเล็กตรอนในสาร GaAs มีค่าสูงมาก เมื่อเทียบกับของ Si ดังรูปที่ 1 และตารางที่ 1
2. หัวต่อต่างชนิดอิมิตเตอร์-เบสของ GaAlAs กับ GaAs ทำให้ประสิทธิภาพในการฉีดพาหะ (Injection Efficiency) มีค่าสูงมาก และสูงกว่าหัวต่อธรรมดาถึง $\exp(\Delta E_g/KT)$ เท่า กล่าวคือ

$$\text{Heterojunction Efficiency} = \text{Homojunction Efficiency} * \exp(\Delta E_g/KT)$$

$$\text{โดยที่ } \Delta E_g = E_g(\text{GaAlAs}) - E_g(\text{GaAs})$$

ส่งผลให้อัตราขยายกระแสไฟฟ้าไม่ขึ้นกับระดับความเข้มข้นของสารเจือปนในอิมิตเตอร์และในเบสโดยตรงอย่างที่เห็นในกรณีทรานซิสเตอร์ธรรมดา ทำให้สามารถลดความเข้มข้นของสารเจือปนของอิมิตเตอร์ลง เน้นความเข้มข้นของสารเจือปนของเบสให้มากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2 เป็นผลให้ค่าทรานซิชันคาร์ปาซิแตนซ์ (Transition Capacitances) ของหัวต่ออิมิตเตอร์-เบส C_{TE} และความต้านทานของชั้นเบส r_{BB} (Base Resistance) มีค่าลดลง ส่งผลให้ผลตอบสนองเชิงความถี่มีค่าสูงขึ้น

3. มี "Window Effect" ที่หัวต่ออิมิตเตอร์-เบส เนื่องจากช่องว่างแถบพลังงานของอิมิตเตอร์ GaAlAs มีค่าสูง ดังนั้นแสงที่มีค่าพลังงานต่ำกว่าช่องว่างแถบพลังงานนี้ จะสามารถผ่านชั้นอิมิตเตอร์ได้อย่างอิสระจนถึงชั้นเบสและหัวต่อเบส-คอลเล็กเตอร์ และโดนดูดกลืนได้อย่างมีประสิทธิภาพ จากคุณสมบัติข้อนี้ทำให้สามารถออกแบบโครงสร้างของโฟโตทรานซิสเตอร์หัวต่อต่างชนิดได้ดังรูปที่ 3 โดยมีหัวต่อเบส-คอลเล็กเตอร์ อยู่ใต้หัวต่ออิมิตเตอร์-เบส ยกเว้นบริเวณผิวสัมผัสโอห์มมิกของเบส ซึ่งต่างจากโครงสร้างของ

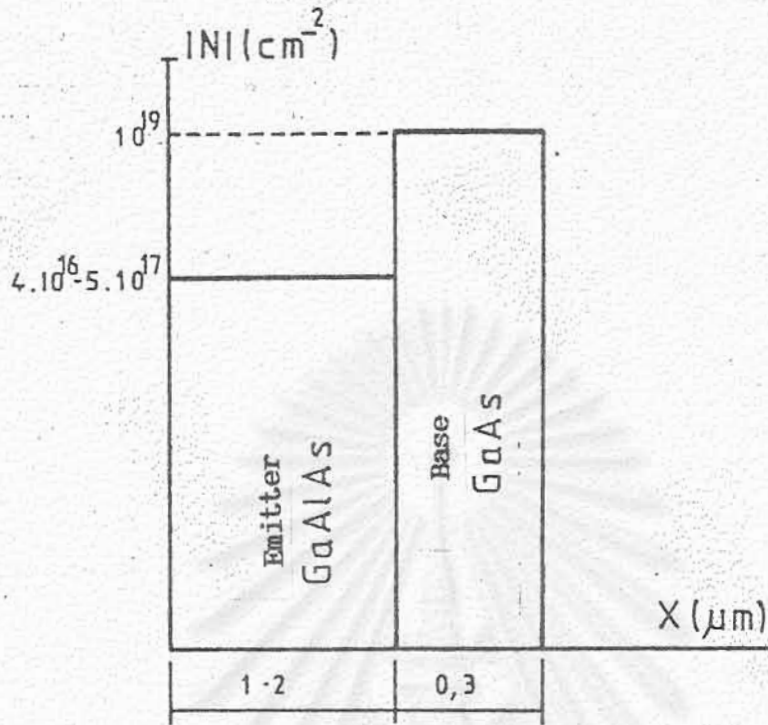


รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของอิเล็กตรอนกับสนามไฟฟ้านัดมาของสารประกอบกึ่งตัวนำ GaAs, InP และสารกึ่งตัวนำ Si

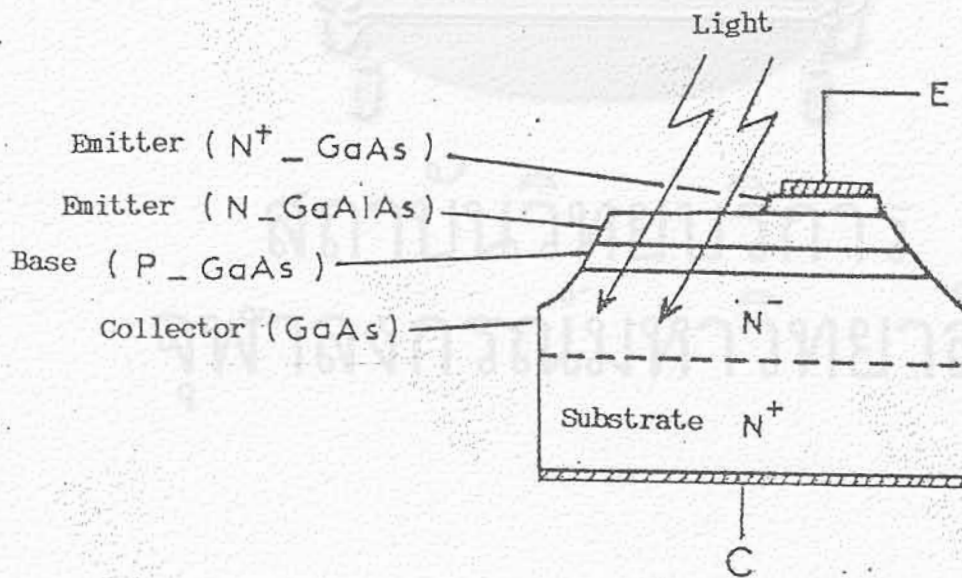
ตารางที่ 1

เปรียบเทียบคุณสมบัติทางไฟฟ้าระหว่าง Si กับ GaAs

	Si	GaAs
ช่องว่างแถบพลังงาน (Energy Gap) (eV)	1.1	1.43
ความคล่องตัว (Mobility) (cm ² /V.S.)	1,500	8,500



รูปที่ 2 ระดับความเข้มข้นของสารเจือปนของหัวต่อต่างชนิด
 $N_D(\text{GaAlAs}) < N_A(\text{GaAs})$



รูปที่ 3 โครงสร้างของโฟโตทรานซิสเตอร์หัวต่อต่างชนิดของ
 GaAlAs/GaAs

โฟโตทรานซิสเตอร์ที่ทำจากซิลิกอนในรูปแบบที่ 4 หัวต่อเบส-คอลเล็กเตอร์ส่วนที่อยู่ใต้หัวต่ออิมิตเตอร์-เบส ไม่สามารถรับแสงได้ ดังนั้นจึงต้องขยายพื้นที่หัวต่อเบส-คอลเล็กเตอร์ให้มากขึ้น เมื่อต้องการพื้นผิวรับแสงเท่ากัน ส่งผลให้ค่าทรานซิสชันคาร์ปาซิแตนซ์ของหัวต่อเบส-คอลเล็กเตอร์, C_{TC} ของโฟโตทรานซิสเตอร์หัวต่อต่างชนิดมีค่าต่ำกว่าเมื่อใช้พื้นที่รับแสงแสงเท่ากัน

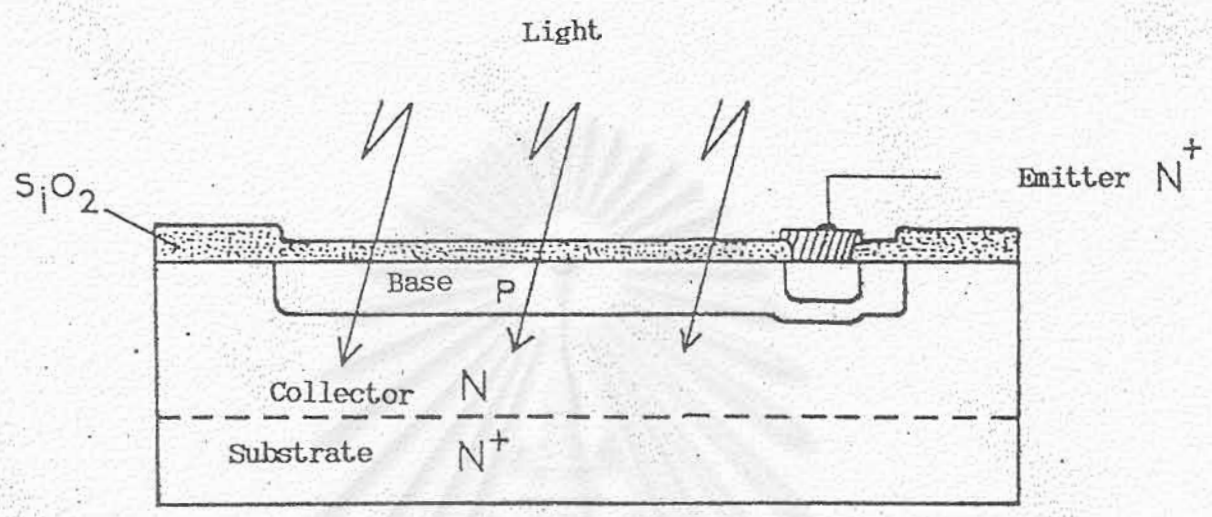
2. ทฤษฎีการทำงาน (Theory of Operation)

มีลักษณะการทำงานเหมือนกับทรานซิสเตอร์ธรรมดา เว้นแต่สัญญาณเข้าเป็นสัญญาณแสง โดยพิจารณาจากผังแถบพลังงานในรูปแบบที่ 5 เมื่อขั้วโลหะอิมิตเตอร์-คอลเล็กเตอร์ถูกไบแอสกลับทางเป็นผลให้หัวต่อเบส-คอลเล็กเตอร์ถูกไบแอสกลับทางด้วยดังเช่นในโฟโตไดโอด สัญญาณแสงซึ่งส่องกระทบผิวหน้าส่วนที่มีพลังงานมากกว่า $E_g(\text{GaAlAs})$ จะผ่านชั้นผลึก GaAlAs ของอิมิตเตอร์โดยไม่ถูกดูดกลืนจนถึงชั้นเบส เขตปลอดพาหะเบส-คอลเล็กเตอร์ และชั้นคอลเล็กเตอร์ แสงส่วนที่มีพลังงานมากกว่า $E_g(\text{GaAs})$ จะกระตุ้นให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลในบริเวณเหล่านี้ โฮลจะถูกขยับด้วยสนามไฟฟ้าเข้าสู่เบสเป็นผลให้หัวต่ออิมิตเตอร์-เบสถูกไบแอสตรง อิมิตเตอร์จะฉีดอิเล็กตรอนเข้าสู่เบสแล้วเลยไปถึงคอลเล็กเตอร์ ดังนั้นถ้าเราฉายแสงมากก็จะเกิดคู่อิเล็กตรอนโฮลมาก หัวต่ออิมิตเตอร์-เบสจะถูกไบแอสตามมากขึ้น อิมิตเตอร์จะฉีดอิเล็กตรอนเข้าไปในเบส แล้วเลยสู่อิมิตเตอร์มากขึ้น เกิดกลไกการทำงานแบบทรานซิสเตอร์ทั่ว ๆ ไป โดยที่กระแสที่ไหลผ่านคอลเล็กเตอร์จะมีค่ามากขึ้นไปตามความเข้มของแสง ถ้าสมมุติว่าหัวต่อต่างชนิด อิมิตเตอร์-เบสเป็นหัวต่อแบบชัน (Abrupt) และอุดมคติ (Ideal) และไม่มีการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลในเขตปลอดพาหะ เราจะได้อัตราขยายกระแสในวงจรอิมิตเตอร์ร่วมดังสมการ [Milano R.A. et al]

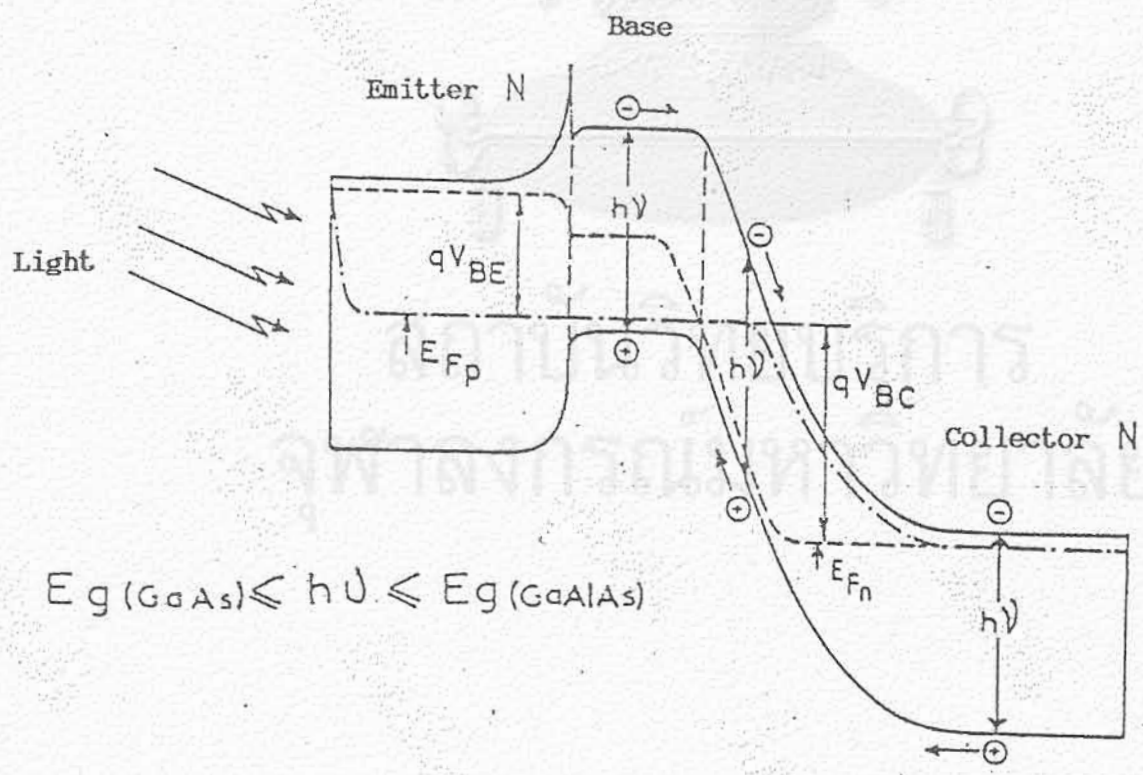
$$h_{FE} = \frac{\gamma_0 \frac{(\sinh W_B/L_{nB})}{\gamma_0 (\cosh W_B/L_{nB} - 1)}}{[1 + \frac{\sinh W_B/L_{nB}}{\gamma_0 (\cosh W_B/L_{nB} - 1)}]} \quad (1)$$

- โดยที่ W_B = ความกว้างของชั้นเบส
 L_{nB} = ความยาวทางการแพร่ซึมของพาหะข้างน้อยในเบส
 γ_0 = ประสิทธิภาพในการฉีดพาหะของหัวต่ออิมิตเตอร์-เบส

[Kroemer H.]



รูปที่ 4 โครงสร้างของโฟโตทรานซิสเตอร์ซิลิกอน



รูปที่ 5 พลังงานของ HPT GaAlAs/GaAs ขณะถูกฉายแสง

$$\begin{aligned}
 &= \frac{\text{กระแสอิเล็กตรอน (Jn)}}{\text{กระแสโฮล (Jp)}} \\
 &= \frac{(D_{nB} L_{pE} n_E)}{(D_{pE} L_{nB} p_B)} \frac{(N_{CB} N_{VB})}{(N_{CE} N_{VE})} \cdot \exp(E_g/kT) \quad (2)
 \end{aligned}$$

สำหรับหัวต่อต่างชนิดอิมิตเตอร์-เบส กำแพงพลังงานของโฮลมีค่าสูงมาก เป็นผลให้เทอมที่สองของตัวหาร ในสมการที่ 1 มีค่าสูงกว่า 1 มาก ๆ ดังนั้นอัตราขยายกระแสจะมีค่า

$$h_{FE} \approx \left(\cosh \frac{W_B}{L_{nB}} - 1 \right)^{-1} \quad (3)$$

และอัตราขยายแสงมีค่า

$$G \approx \eta h_{FE} \quad (4)$$

เมื่อ η = ประสิทธิภาพเชิงคลอนตัน ของหัวต่อเบส-คอลเล็กเตอร์

จะเห็นว่าอัตราขยายกระแส (h_{FE}) และอัตราขยายแสง (G) ขึ้น กับความกว้างของเบส (W_B) ความยาวแห่งการแพร่ซึมของอิเล็กตรอนในชั้นเบส (L_{nB}) และขนาดความแตกต่างระหว่างช่องว่างแถบพลังงาน (ΔE_g) ระหว่างอิมิตเตอร์กับเบส

ลักษณะสมบัติที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งของ HPT ก็คือความเร็วในการตอบสนอง (Speed of Response) สำหรับสัญญาณขนาดเล็กสามารถอธิบายด้วย "Gain Bandwidth Product", $f_T = 2\pi\tau_{EC}$ โดย τ_{EC} คือ ค่าเสียเวลาของสัญญาณระหว่างขั้วโลหะอิมิตเตอร์กับคอลเล็กเตอร์โดยรวม (Total Emitter-to-Collector Signal Delay Time) ซึ่งประกอบด้วย [Ladd G.O. และ Feucht D.L.]

$$\tau_{EC} = \tau_E + \tau_B + \tau_D + \tau_C \quad (5)$$

โดย

$$\tau_E = \text{เวลาเติมประจุที่ } C_{TE} \text{ ผ่าน } r_E (= \frac{kT}{qI_E})$$

$$\tau_B = \text{เวลาที่ใช้ในชั้นเบส}$$

$$\tau_D = \text{เวลาที่ใช้ในช่องปลอดพาหะเบส-คอลเล็กเตอร์}$$

$$\tau_C = \text{เวลาเติมประจุที่ } C_{TC} \text{ ผ่าน } R_C$$

สมมติว่า HPT เป็นโครงสร้างที่ไม่มีขั้วโลหะเบส และสัญญาณแสง $P = P_0 (1 + m \cos \omega t)$ โดย $m < 1$ และ P_0 เป็นกำลังแสงเฉลี่ยตกกระทบ จะได้

$$\tau_E = [(kT/q)/I_E] (C_{TE} + C_{TC}) \quad (6)$$

โดย $I_E = q\eta P_0 h_{FE}/h\nu$

จากสมการ (6) จะเห็นว่า เมื่อใช้สัญญาณขนาดเล็ก $\tau_E \propto P_0$ เป็นผลให้ $f_T \propto P_0$ ดังนั้นในการใช้งาน HPT สัญญาณแสง P_0 ควรมีค่าสูงพอควรเพื่อที่ I_E จะมีค่าสูง ทำให้ τ_E มีบทบาทลดลงไป ($\tau_E \ll \tau_B + \tau_D$) เราสามารถแก้ปัญหานี้ได้อีกวิธีหนึ่งก็คือ การสร้าง HPT ที่มีขั้วโลหะเบส (Base Contact) เพื่อที่จะได้ทำการไบแอสหัวต่ออิมิตเตอร์-เบสด้วยสัญญาณไฟฟ้าโดยตรง ซึ่งจะได้ดำเนินการในการวิจัยครั้งนี้

สำหรับผลตอบสนองต่อสัญญาณขนาดใหญ่ในสภาวะชั่วคราว (Large Signal Transient Response to a step-function change in illumination intensity) โดยการใช้ "Charge Control Analysis" สามารถคำนวณค่ากระแสคอลเล็กเตอร์ และเวลาตอบสนอง ดังสมการ

$$i_c(t) \approx \frac{i_f}{[1 + (i_f/i_i - 1) e^{-t/\tau}]} \quad (7)$$

$$\tau = h_{FE} [(kT/q)(C_{TE} + C_{TC})]/(q\eta P_0 h_{FE}/h\nu + I_D) \quad (8)$$

โดย P_0 คือขนาดของสัญญาณเข้า

I_D คือกระแสมีด

ในการหาสมการ (7) และ (8) จะต้องสมมติว่า ช่วงเวลาของพัลส์ยาวกว่าช่วงเวลา $\tau_B + \tau_D$ เพื่อว่าค่าเฉลี่ยของ "Gain Bandwidth Product" ขึ้นอยู่กับเวลาที่ใช้ประจุหัวต่อทั้งสองเท่านั้น

ค่าเวลาขึ้น (Rise Time) เวลาที่ค่า i_c มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 10 เปอร์เซ็นต์ ถึง 90 เปอร์เซ็นต์ เมื่อจ่ายสัญญาณพัลส์แก่ HPT เป็นค่าอีกค่าหนึ่งที่มีความสำคัญ สามารถคำนวณได้จากสมการ (7) กล่าวคือ

$$t_r = \tau \ln 9 (N - 0.1)/(N - 0.9) \quad (9)$$

โดยที่ N คือ Overdrive Factor และเมื่อ $N \gg 1$ จะได้ค่าเวลาดำเนินต่ำสุด
 $t_{\text{min}} = 2.2 \tau$

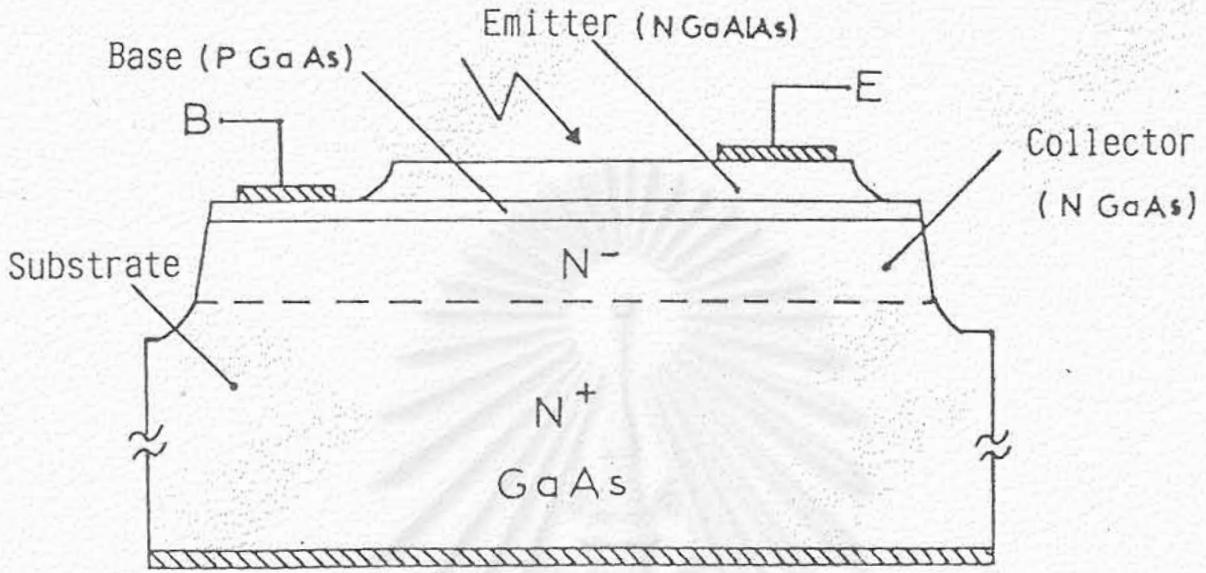
จากสมการ (8) จะเห็นว่าค่า τ มีค่าขึ้นกับ h_{FE} ดังนั้นถ้าสามารถลดค่า h_{FE} ค่า τ จะมีค่าลดลง ซึ่งสามารถกระทำได้ด้วยวิธีการเพิ่มความหนาของชั้นเบส แต่อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดจะเกิดจากค่าอัตราขยายแสง (Optical Gain) มีค่าลดลง ซึ่งจะต้องพิจารณาให้เหมาะสม

3. การพัฒนาเทคโนโลยีของโครงการ

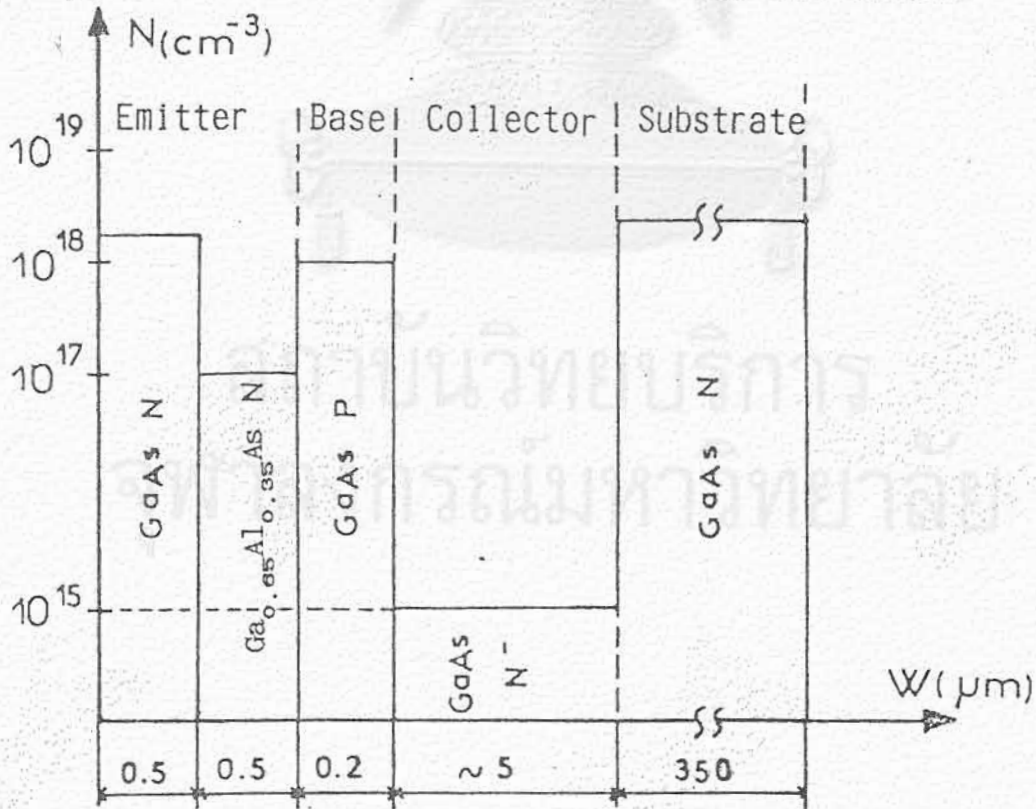
3.1 การออกแบบโครงสร้างของสิ่งประดิษฐ์

จากข้อดีของหัวต่อต่างชนิดในแง่ของประสิทธิภาพในการจัดพาหะ และ "Window Effect" ซึ่งปล่อยแสงส่วนที่มีค่าพลังงานสูงกว่า E_g (GaAlAs) ผ่านไป ประกอบกันเป็นเงื่อนไขในการออกแบบโครงสร้างของสิ่งประดิษฐ์ รูปที่ 6 แสดงโครงสร้างของ HPT แบบ "Mesa" ที่ได้ทำการออกแบบโดยกำหนดให้ปริมาณของธาตุอะลูมิเนียมในชั้นอิมิตเตอร์มีค่าประมาณ 0.35 ซึ่งจะได้ค่า $\Delta E_g \approx 1.86$ eV เหตุผลที่เลือกค่า $x \approx 0.35$ มาจาก 2 ประเด็น ประเด็นแรก เมื่อปริมาณของธาตุอะลูมิเนียมสูงกว่า 0.35 ผลึก GaAlAs จะกลายเป็นสารกึ่งตัวนำแบบอ้อม (Indirect Semiconductor) และมีความคลาดเคลื่อนของค่าคงตัวผลึก (Lattice Mismatch) ระหว่างอิมิตเตอร์กับเบสมาก ซึ่งจะมีผลต่อประสิทธิภาพเชิงควอนตัมของ HPT อีกประเด็นหนึ่ง ถ้าปริมาณอะลูมิเนียมมีค่า < 0.35 การกักชั้นอิมิตเตอร์เพื่อเข้าสู่ชั้นเบสจะมีปัญหา เพราะไม่มีสารละลายทางเคมีที่สามารถกักชั้นผลึก GaAlAs และไม่กัก GaAs เมื่อ $x < 0.35$ จึงต้องกำหนด $x = 0.35$ ซึ่งเป็นข้อจำกัดหนึ่งของโครงสร้างแบบ "Mesa" ของ HPT สำหรับความเข้มข้นของสารเจือปน และความหนาของชั้นต่าง ๆ แสดงไว้ในรูปที่ 7 ดังรายละเอียดดังนี้

- ชั้นคอลเล็กเตอร์ค่าความเข้มข้นของสารเจือปนอยู่ระหว่าง $5 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ - $5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ และความหนาระหว่าง 3 ถึง 5 ไมครอน
- ชั้นเบส ค่าความเข้มข้นของสารเจือปนกำหนดให้มีค่าคงที่ที่ 10^{18} cm^{-3} ซึ่งน้อยกว่าของทรานซิสเตอร์หัวต่อธรรมดา ซึ่งกำหนดไว้มีค่า 10^{19} cm^{-3} ทั้งนี้เพื่อให้ค่าอัตราขยายกระแส (h_{FE}) และค่าอัตราขยายแสง (G) มีค่าสูง ส่วนความหนาของเบสมีค่าระหว่าง 0.1 ถึง 0.3 ไมครอน (μm) ซึ่งเป็นความหนาของชั้นผลึกในระดับที่บางมาก สำหรับเทคโนโลยีการปลูกผลึกบางจากของเหลว (Liquid Phase Epitaxy) ซึ่งจะกล่าวถึงวิธีการปลูกชั้นผลึกบางมาก ๆ ในหัวข้อถัดไป



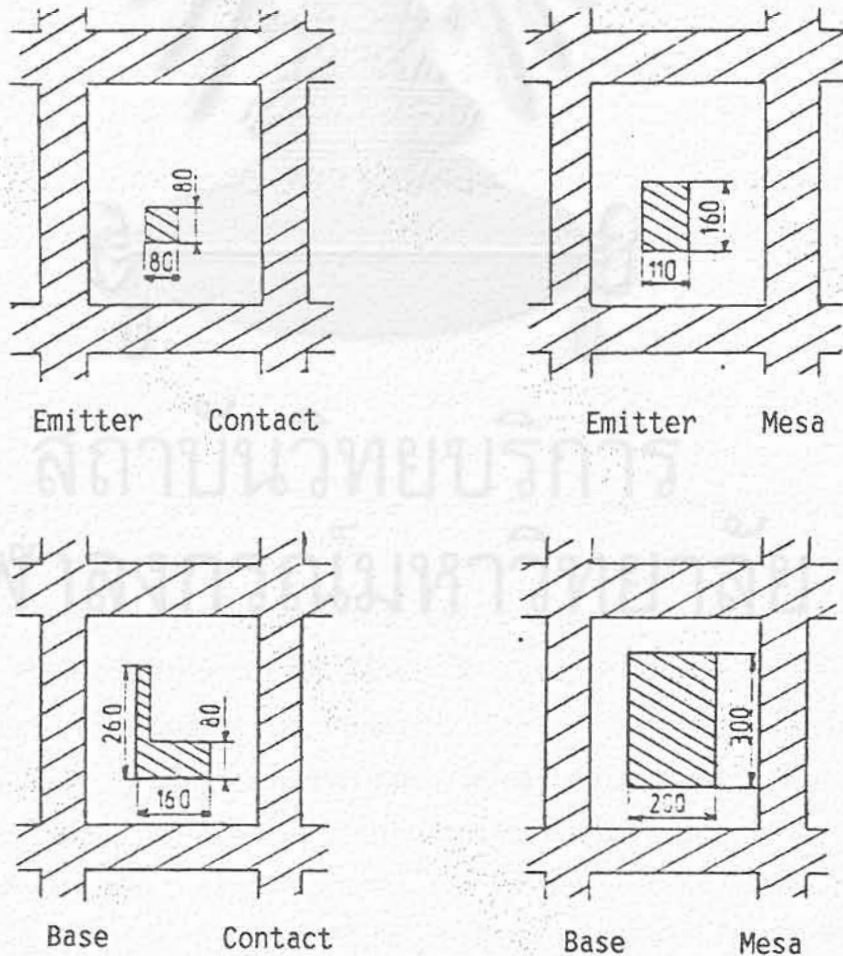
รูปที่ 6 โครงสร้างของไฟโตทรานซิสเตอร์หัวต่อต่างชนิดที่ได้ทำการออกแบบ



รูปที่ 7 ระดับความเข้มข้นของสารเจือปน และความหนาของชั้นผลึกต่าง ๆ ของไฟโตทรานซิสเตอร์

- ชั้นผิวหรือชั้นบนสุดของ GaAs กำหนดให้มีความเข้มข้นของสารเจือประมาณ $2 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ทั้งนี้เพื่อให้ผิวสัมผัสโอห์มมิกของอิมิตเตอร์มีค่าความต้านทานต่ำ ๆ
- ชั้นอิมิตเตอร์ของ $\text{Ga}_{0.65}\text{Al}_{0.35}\text{As}$ ถูกกำหนดให้มีความเข้มข้นของสารเจือที่ 10^{17} cm^{-3} ซึ่งเป็นค่าที่ค่อนข้างต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับของทรานซิสเตอร์ธรรมดา ทั้งนี้ด้วยเหตุผล 2 ประการ ประการแรกเพื่อให้ค่า C_{TE} มีค่าไม่สูงนัก ในขณะที่ประสิทธิภาพในการฉีดอิเล็กตรอนของอิมิตเตอร์ยังมีค่าสูงพอ ประการที่สองเพื่อให้ผลกระทบของหัวต่อต่างชนิดชนิด "Isotype" ของ $\text{GaAs}(N^+)/\text{GaAlAs}(N)$ มีค่าไม่มากนัก

สำหรับแบบหน้ากากของ HPT แสดงดังรูปที่ 8 ซึ่งประกอบด้วยหน้ากาก Emitter Contact, Emitter Mesa, Base Contact และ Base Mesa โดยอิมิตเตอร์มีเนื้อที่ $160 \mu\text{m} \times 110 \mu\text{m}$ ในขณะที่คอลเล็กเตอร์มีเนื้อที่ $200 \mu\text{m} \times 300 \mu\text{m}$.



รูปที่ 8 แบบหน้ากาก (Mask) ของไฟโตทรานซิสเตอร์

3.2 การปลูกชั้นผลึกเอพิแทกซ์บางมาก ๆ

สำหรับเทคนิคในการปลูกผลึกเอพิแทกซ์ที่ทั่ว ๆ ไป ได้กล่าวไว้แล้วในรายงานฉบับสมบูรณ์ โครงการออปโตอิเล็กทรอนิกส์ระยะที่ 1 ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะกรรมวิธีปลูกผลึกเพื่อให้ได้มาซึ่งชั้นผลึกบางมาก ๆ ของเบส ซึ่งเป็นตัวกำหนดค่าตอบสนอง (Sensitivity) ของ HPT

จากเทคนิคการปลูกผลึกด้วยวิธี "Super Cooling" นั้นความหนาของชั้นผลึกสามารถคำนวณได้จากสมการ [Hsieh J.J.]

$$e(t) = K (\Delta T)^{1/2} + \frac{2}{3} R t^{3/2} \quad (10)$$

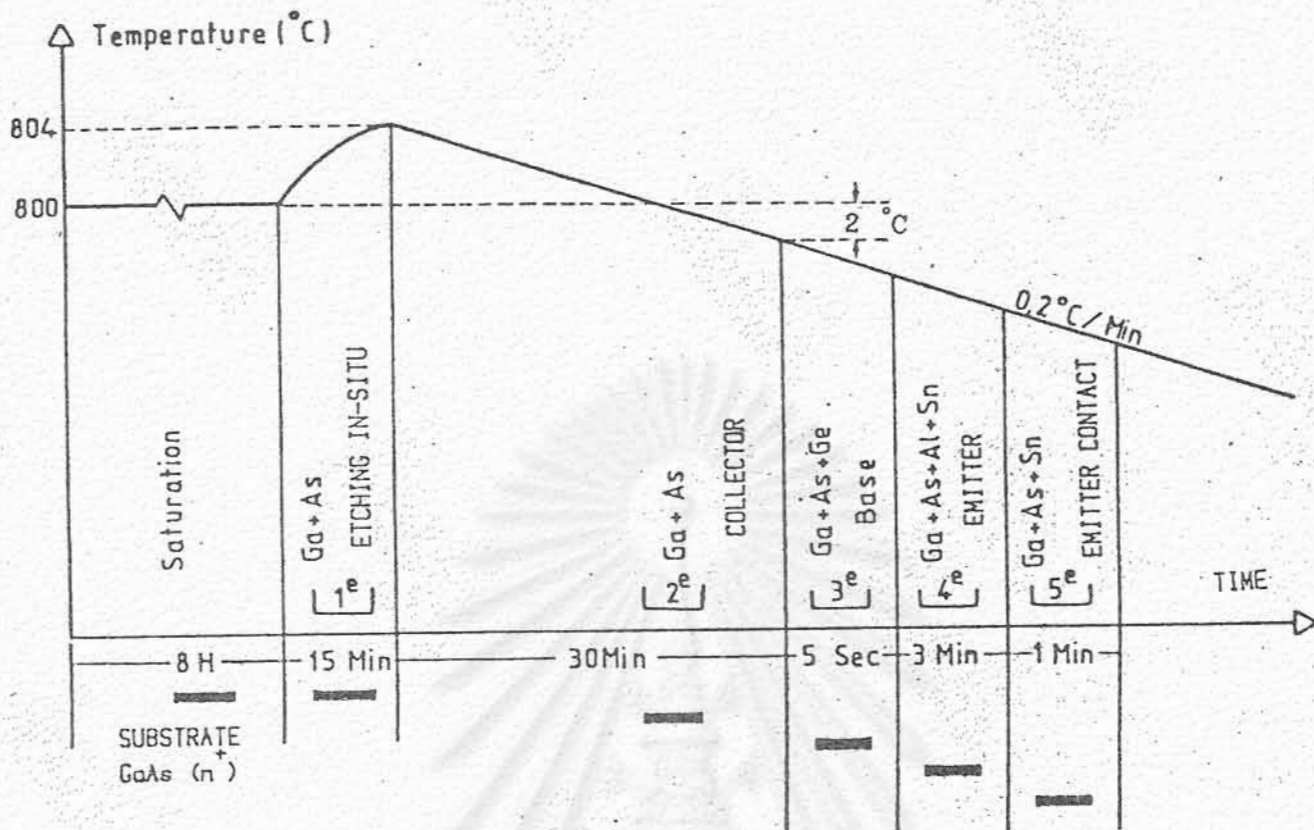
เมื่อ K เป็นค่าคงที่ที่ขึ้นกับความหนาแน่นของ As ในของเหลว

$\Delta T = T_s - T$ โดย T_s เป็นอุณหภูมิที่ใช้เตรียมสารละลายส่วน T เป็นอุณหภูมิที่เริ่มต้นปลูกผลึก

t = ช่วงเวลาที่ใช้ปลูกผลึก

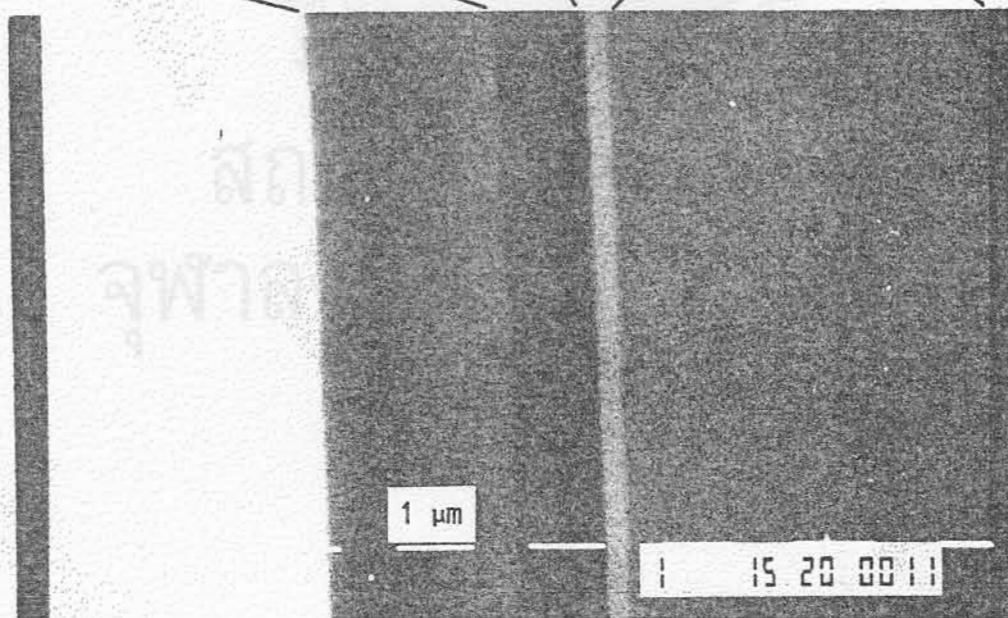
R = อัตราการลดลงของอุณหภูมิ = dT/dt ($^{\circ}C/min$)

จะเห็นว่าความหนาของชั้นผลึกขึ้นอยู่กับค่า ΔT , t และ R ซึ่งแสดงความหมายไว้ในแผนภูมิอุณหภูมิในรูปที่ 9 จึงได้ทดลองปลูกผลึกโดยเปลี่ยนแปลงค่า ΔT ระหว่าง $0.5^{\circ}C$ ถึง $3^{\circ}C$ และ t จาก 5 วินาที ถึง 20 วินาที ส่วนค่า dT/dt คงไว้ที่ $0.2^{\circ}C/min$ พบว่าชั้นผลึกเบสที่ปลูกได้มีความหนาระหว่าง $0.2 \mu m$ ถึง $1 \mu m$ โดยความหนาต่ำสุด ($0.2 \mu m$) ได้จากการทดลองที่กำหนดให้ $\Delta T = 2^{\circ}C$ และ $t = 10$ วินาที ดังตัวอย่างผลการทดลองในรูปที่ 9 อีกวิธีการหนึ่งที่จะได้มา ซึ่งผลึกบาง ๆ ของ GaAs โดยพิจารณาจากสมการที่ (10) ให้ $\Delta T = 0$ ความหนาของผลึกจะขึ้นกับเวลาที่ใช้ปลูกผลึกและอัตราการลดลงของอุณหภูมิเท่านั้น แต่วิธีนี้ในทางปฏิบัติทำได้ยากมาก เพราะอุณหภูมิของเตาย่อมมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยตามคุณภาพของเตา ($0.05^{\circ}C$ สำหรับชุดที่ใช้ทดลอง) วิธีการหนึ่งที่สามารถทำได้ ก็คือการใช้ "Dummy Substrate" นำหน้าแผ่นผลึกหลัก ดังรูปที่ 11 แผ่นผลึก A เป็น "Dummy Substrate" แผ่นผลึก B คือแผ่นผลึกที่ต้องการสร้างผลึก ในกรณีที่สายละลายอยู่ในสถานะอิ่มตัวยิ่งยวด (Super saturated) สายละลายก็จะสามารถคายปริมาณของ As ส่วนเกินออกลงบนแผ่นผลึก A และเข้าสู่ภาวะสมดุลก่อนที่จะเคลื่อนแผ่นผลึก B เข้าได้สายละลาย ในทางกลับกันถ้าสายละลายขาดปริมาณของ As (Undersaturated) สายละลายก็สามารถเข้าสู่ภาวะสมดุลได้เช่นเดียวกัน โดยการกัดแผ่นผลึก A นำ As เข้ามาชดเชยก่อนจะเคลื่อนแผ่นผลึก B เข้าได้สายละลาย



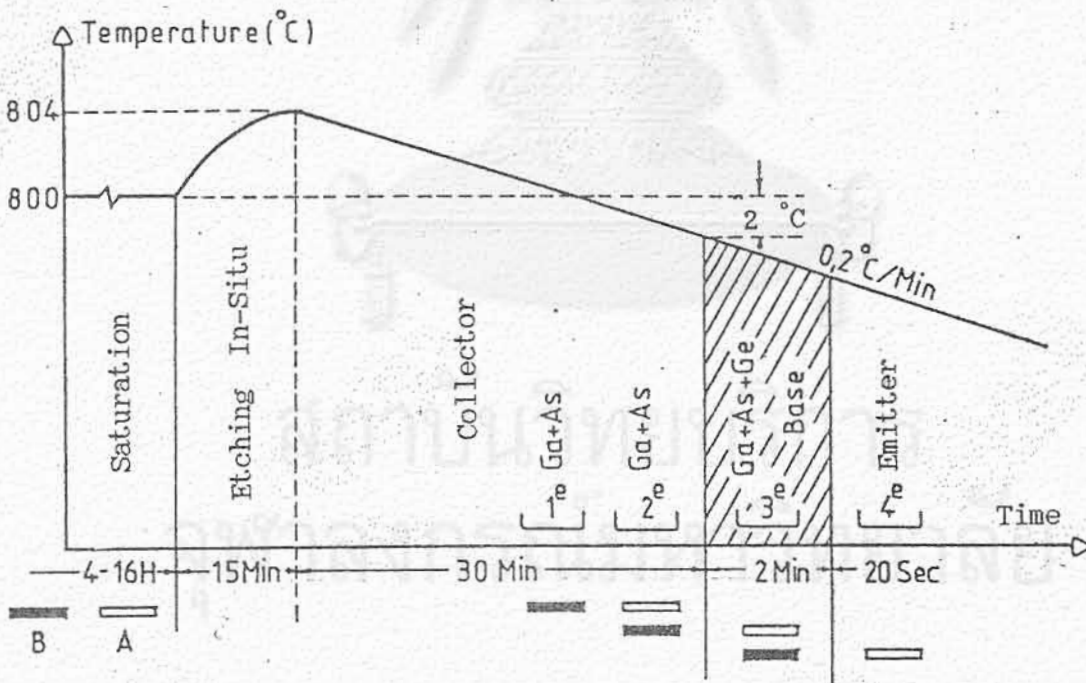
รูปที่ 9 แผนภูมิอุณหภูมิของเตาเอพิแทกซ์ที่ใช้ในการปลูกผลึกบาง

Emitter Contact GaAs (n ⁺)	Emitter Active Ga _{0.65} Al _{0.35} As	Base GaAs (p)	Collector GaAs (n ⁻)
---	--	------------------	-------------------------------------



รูปที่ 10 ภาพตัดขวางชั้นผลึกถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

อย่างไรก็ตาม จากการทดลองคุณภาพของผลึกที่ได้มีคุณภาพด้อยกว่าวิธี "Super Cooling" เหตุผลอาจจะเนื่องมาจากการหมุนวนของสารละลายขณะที่มีการเคลื่อนที่ (Slide) แวนผลึกสารละลายซึ่งอยู่ส่วนในอาจมีอุณหภูมิสูงกว่าส่วนนอกที่แตะกับเบ้าสายละลาย ดังนั้นทันทีที่มีการเคลื่อนที่แวนผลึก สภาวะสมดุลจะโดนทำลายไปทุกครั้ง ดังนั้นสภาวะ $\Delta T = 0$ จึงไม่เกิดขึ้นในทางปฏิบัติ



รูปที่ 11 แผนภูมิอุณหภูมิกการปลูกผลึก $\Delta T = 0$ โดยใช้แวนผลึก "Dummy" A

4. ขั้นตอนการผลิต HPT

ลำดับขั้นตอนการผลิตแบ่งออกได้เป็น 6 ขั้นตอนหลัก กล่าวคือ

1. เตรียมวัสดุ
2. เพาเข้าหลอมสารละลายเปลาที่อุณหภูมิ 900 °C ภายในเตาเอพิแทกซีภายใต้บรรยากาศไฮโดรเจนเพื่อจัดความขึ้นและสิ่งแปลกปลอมภายในเป่าสารละลาย
3. ใส่วัสดุที่เตรียมลงในเป่าสารละลายภายใต้บรรยากาศไฮโดรเจน
4. เพาเป่าสารละลายพร้อมสารละลายที่อุณหภูมิ 800 °C เพื่อเตรียมปลูกผลึก
5. ลดอุณหภูมิเตาด้วยอัตราการลดที่คงที่จากนั้นทำการปลูกผลึกดังที่ได้กล่าวมาแล้ว
6. หยดจ่ายกำลังไฟฟ้าแก่เตาและเลื่อนตัวเตาออกจากบริเวณเป่าหลอมสารละลายทันที

4.1 การเตรียมวัสดุ

แวนผลึกที่ใช้ในการทดลองมี 2 ชนิด ชนิดแรกเป็น GaAs ที่ไม่มีสารเจือปนได้ทั้งผลึกเดี่ยวและผลึกหลายรูปใช้สำหรับเตรียมสารละลายในหลุมต่าง ๆ ส่วนแวนผลึกชนิดที่สองเป็นผลึกเดี่ยวของ GaAs สำหรับใช้เป็นผลึกเริ่มต้น เป็นผลึกชนิด N ของสารเจือ Te หรือ Si ที่ $3 \times 10^{18} - 5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ทิศทาง <100> การเตรียมแวนผลึกทั้งสองเป็นวิธีการทำความสะอาดทางเคมี ซึ่งขั้นตอนการทำความสะอาดแสดงไว้ในตารางที่ 2 ในส่วนของสารเจือและอะลูมิเนียมแสดงไว้ในตารางที่ 3

4.2 การปลูกผลึก [ซุ่มพล อันตรเสน และกลุ่ม]

หลังจากเตรียมสายละลายอิมิตัวที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลาอย่างน้อย 4 ชม. กระบวนการปลูกผลึกก็จะเริ่มขึ้น (ดูรูปที่ 9 ประกอบ) โดยการเคลื่อนแวนผลึกเข้าได้หลุมสารละลายหลุมแรก จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิเตาขึ้น 4 ° เป็น 804 °C เพื่อกัดผิวแวนผลึก (Etch-Back in-situ) จากนั้นลดอุณหภูมิเตาลงด้วยอัตรา 0.2 °C/min พร้อมกับเคลื่อนแวนผลึกเข้าได้หลุมที่สองเพื่อปลูกชั้นผลึกคอลเล็กเตอร์ของ GaAs เมื่ออุณหภูมิลดลงถึง 798 °C เคลื่อนแวนผลึกเข้าได้หลุมที่ 3 ของ GaAs(p+) เพื่อปลูกชั้นเบสเป็นเวลา 10-20 วินาที จากนั้น ขึ้น GaAlAs (n) ของอิมิตเตอร์และชั้น GaAs(n⁺) ของผิวสัมผัสโอห์มมิกก็จะถูกสร้างขึ้นตามลำดับ

ตารางที่ 2
ขั้นตอนการเตรียมแผ่นผลึก GaAs

อันดับที่	ใช้สารละลาย	เวลา	จุดประสงค์
1	Trichloethylene	5 นาที	ล้างคลาบไขมัน
2	Acetone	5 นาที	ล้าง Trichlo ที่หลงเหลือ
3	H ₂ O-DI		ล้าง Acetone
4	เป่าแห้งด้วยก๊าซ N ₂		
5	4H ₂ SO ₄ + H ₂ O ₂ (30%) + H ₂ O 75 °C	20 วินาที	กัด Oxide ที่ผิว และขัดมันผิว
6	H ₂ O-DI		
7	HCl (50%)	> 5 นาที	กัด Oxide ที่หลงเหลือ
8	H ₂ O-DI		
9	เป่าแห้งด้วยก๊าซ N ₂		

ตารางที่ 3
การเตรียมสารเจือและอะลูมิเนียม

วัสดุ	ใช้สารละลาย	เวลา
Al	H ₃ PO ₄ , 120 °C	30 วินาที
Ge, Te	ไม่ต้องทำความสะอาด	
Sn	HCl (conc)	1 นาที

4.3 การฉาบผิวโลหะ การกัดชั้นผลึก และการถ่ายแบบ

หลังจากการปลูกชั้นผลึกของชั้นต่าง ๆ ตามที่ต้องการแล้ว จะต้องผ่านกระบวนการย่อย ๆ อีก 5 ขั้นตอน ดังรูปที่ 12 ประกอบด้วย

4.3.1 ฉาบผิวโลหะ AuGe + Ni บนชั้นอิมิตเตอร์และคอลเล็กเตอร์

- ฉาบผิวโลหะ AuGe ด้านหน้าและด้านหลังหนา 2000 Å
- ฉาบผิวโลหะ Ni ด้านหน้าและด้านหลังหนา 500 Å
- ถ่ายแบบ (Photolithography) ชั่วโลหะอิมิตเตอร์ (Emitter Contact)
- กัดโลหะ Ni ด้านหน้าด้วย HCl (conc) 1 นาที
- กัดโลหะ AuGe ด้านหน้าด้วย KI + I₂ 15 วินาที
- อบผิวโลหะที่อุณหภูมิ 475 °C เป็นเวลา 2 นาที ภายใต้บรรยากาศ N₂ + H₂

4.3.2 กำหนดพื้นที่การทำงานของหัวต่ออิมิตเตอร์-เบส (Emitter Mesa)

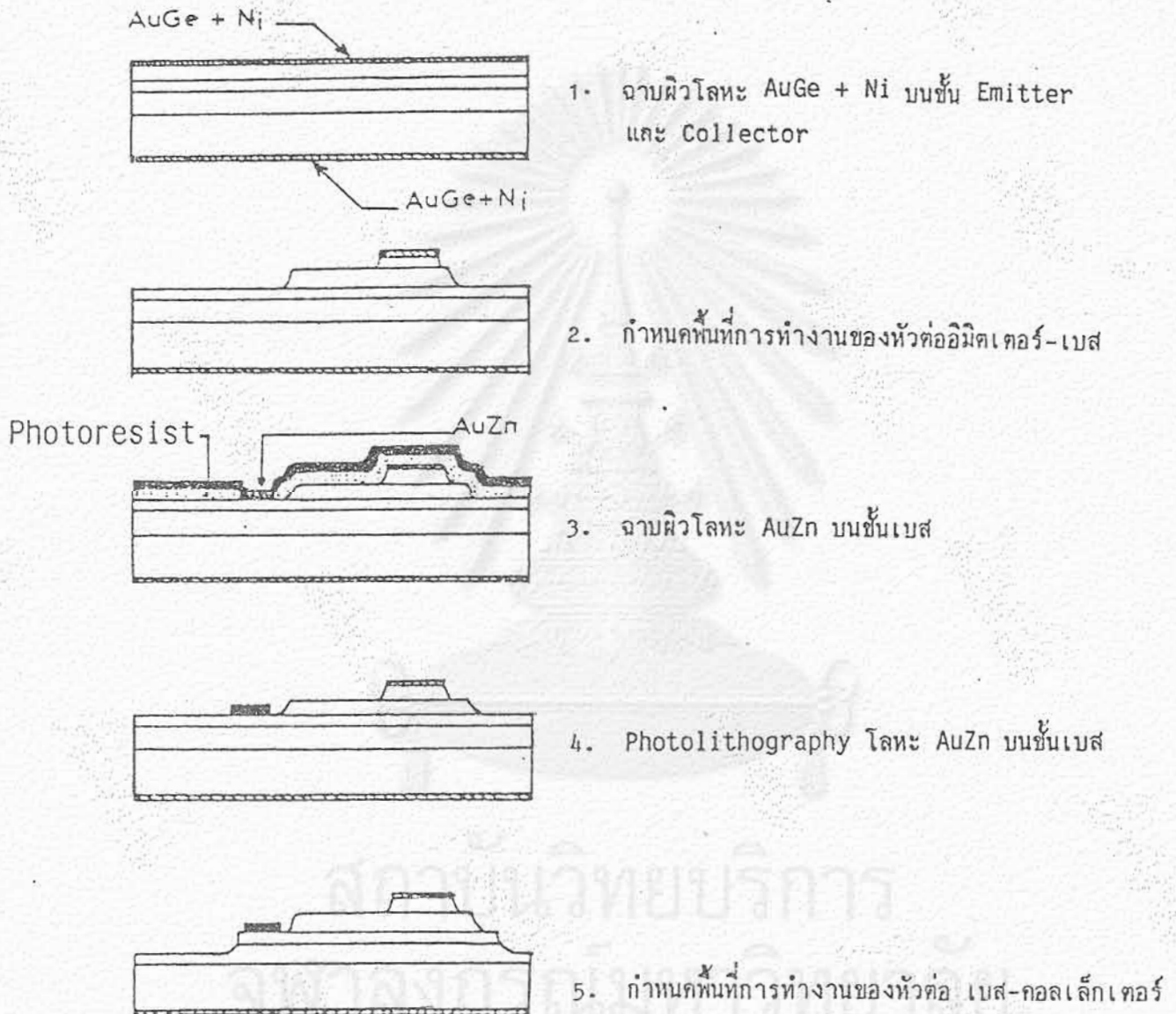
- ถ่ายแบบชั่วคราวโลหะอิมิตเตอร์
- กัดชั้น GaAs (n⁺) ด้วย NH₄OH+H₂O₂ pH 8.4
- ถ่ายแบบอิมิตเตอร์ทำงานหรืออิมิตเตอร์รับแสงของ GaAlAs
- กัดชั้น GaAlAs ด้วย HF (conc) ที่ 50 °C (Emitter Mesa)

4.3.3 ฉาบผิวโลหะ AuZn บนชั้นเบส

- ถ่ายแบบเปิดช่องชั่วคราวโลหะเบส
- ฉาบผิวโลหะ AuZn

4.3.4 ถ่ายแบบชั่วคราวโลหะ AuZn บนชั้นเบส

- ถ่ายแบบชั่วคราวโลหะ AuZn (Base Contact)
- กัดโลหะเบสด้วย KI + I₂

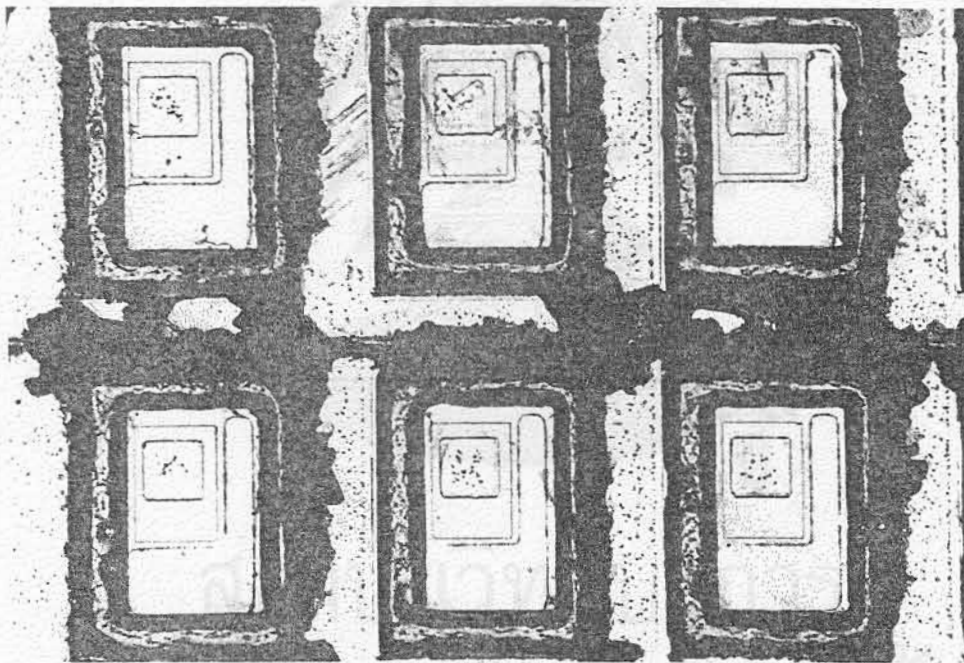


รูปที่ 12 ขั้นตอนการผลิตไฟโตทรานซิสเตอร์

4.3.5 กำหนดพื้นที่การทำงานของหัวต่อเบส-คอลเล็กเตอร์

- ถ่ายแบบ Base MeSa
- กัดด้วย $4\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$

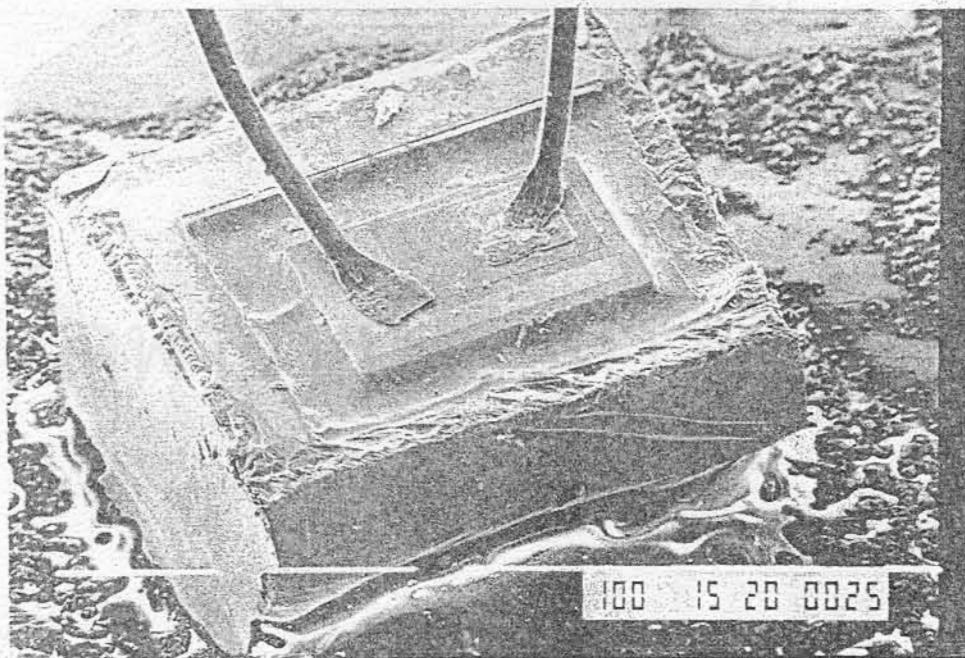
จากนั้นจะนำไปตรวจสอบการทำงานด้วยโพรบโลหะ (Prob Station) ตัดแบ่งต่อหัวโลหะ ดังแสดงในรูปที่ 13, 14 และ 15



รูปที่ 13 แฉกผลึกของไฟโตทรานซิสเตอร์ก่อนการตัดแบ่ง



รูปที่ 14 ชิป (chip) ของ HPT หลังจากตัดแบ่ง



รูปที่ 15 ชิปของ HPT หลังจากติดตั้งบนฐานโลหะและต่อเส้นลวดโลหะเรียบร้อยแล้ว

5. ผลการทดลอง

5.1 ลักษณะสมบัติสถิต (Static Characteristics)

ลักษณะสมบัติสถิตที่สำคัญ ๆ ของ HPT มีดังต่อไปนี้

5.1.1 อัตราขยายกระแส (h_{FE}) แสดงไว้ในรูปที่ 16 ก, ข และ ค อัตราขยายสูงสุดที่สามารถผลิตได้ประมาณ 750 ซึ่งเป็นค่าที่สูงมากเมื่อเทียบกับทรานซิสเตอร์ทั่ว ๆ ไป ทั้งนี้เป็นผลมาจากค่าประสิทธิภาพในการฉีดอิเล็กตรอนที่สูงของหัวต่ออิมิตเตอร์-เบสประกอบกับความหนาของเบสต่ำมากมีค่าประมาณ 0.1-0.2 ไมครอน จากการที่ค่า h_{FE} มีค่าสูงทำให้อัตราขยายแสง (G) และ "Sensitivity" ของ HPT มีค่าสูงตามไปด้วย

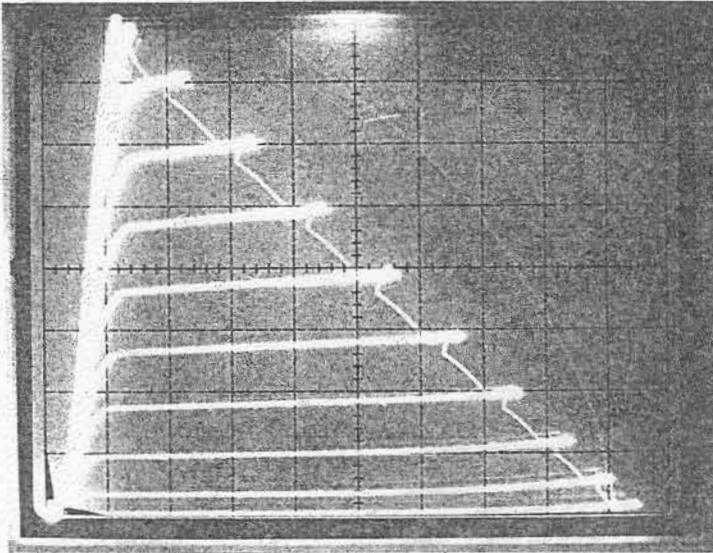
5.1.2 ความไว (Sensitivity) แสดงไว้ในรูปที่ 17 ซึ่งสอดคล้องตามทฤษฎีทุกอย่าง กล่าวคือ ความไวของ HPT สามารถวัดค่าได้อยู่ในช่วงความยาวคลื่นที่สอดคล้องกับ E_{GaAlAs} ถึงความยาวคลื่นที่สอดคล้องกับ E_{GaAs} และความยาวคลื่นที่มีความไวสูงสุด (λ_{max}) \approx 0.8 ไมครอน

5.1.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเล็กเตอร์อัตราขยายแสงกับกำลังแสง

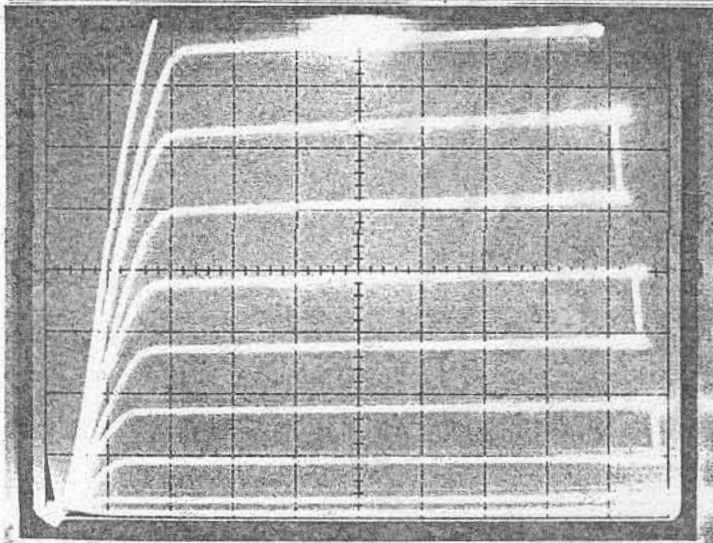
รูปที่ 18 และ 19 แสดงค่ากระแสคอลเล็กเตอร์และอัตราขยายแสงเมื่อกำลังแสงส่องกระทบมีค่าเปลี่ยนไป โดยใช้แสงความยาวคลื่นที่ให้ค่าความไวสูงสุด

5.2 ลักษณะสมบัติพลวัต (Dynamic Characteristics)

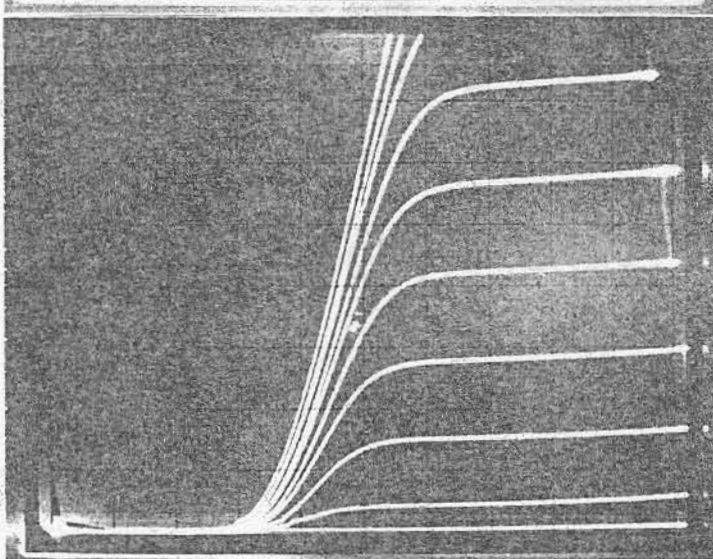
เราสามารถตรวจสอบผลตอบสนองเชิงความถี่ของ HPT โดยการวัดค่าเวลาขึ้น (Rise Time) และเวลาลง (Fall Time) ของ HPT เมื่อส่องกระทบด้วยพัลส์ของแสงจากไดโอดเลเซอร์ เครื่องกำเนิดพัลส์ (Pulse Generator) จะเป็นตัวขับไดโอดเลเซอร์ แสงจากไดโอดเลเซอร์จะอยู่ในลักษณะพัลส์ส่องกระทบผิวหน้า HPT ค่ากระแสคอลเล็กเตอร์ที่เกิดขึ้นจะถูกบันทึกด้วยออสซิลโลสโคปแบบดิจิตอล (Digitizing Oscilloscope) ชุดเครื่องมือวัดแสดงไว้ในรูปที่ 20 ส่วนรูปที่ 21 และ 22 แสดงผลการวัดของ HPT และ Si-phototransistor เพื่อทำการเปรียบเทียบผลปรากฏว่า t_r (Rise Time) และ T_f (Fall Time) ของ HPT มีค่า 5.52 และ 7.22 μs ใน



2 mA/Div
1 V/Div
50 μ A/Step

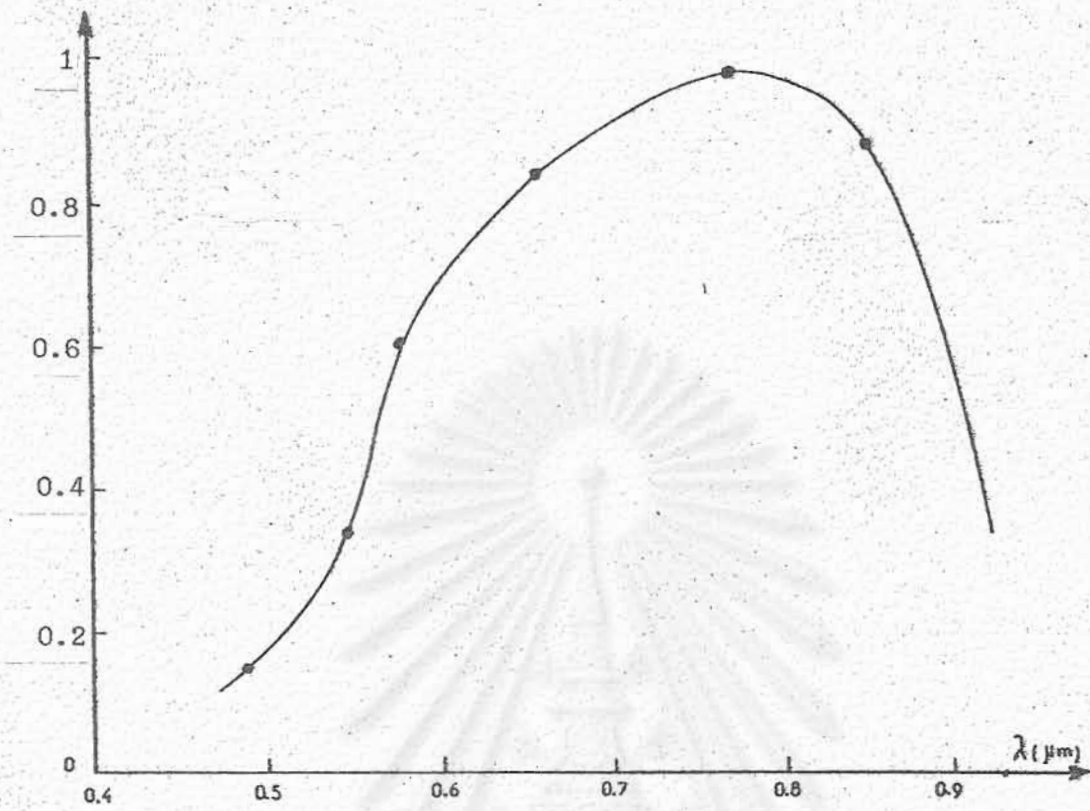


0.5 mA/Div
0.5 V/Div
20 μ A/Step

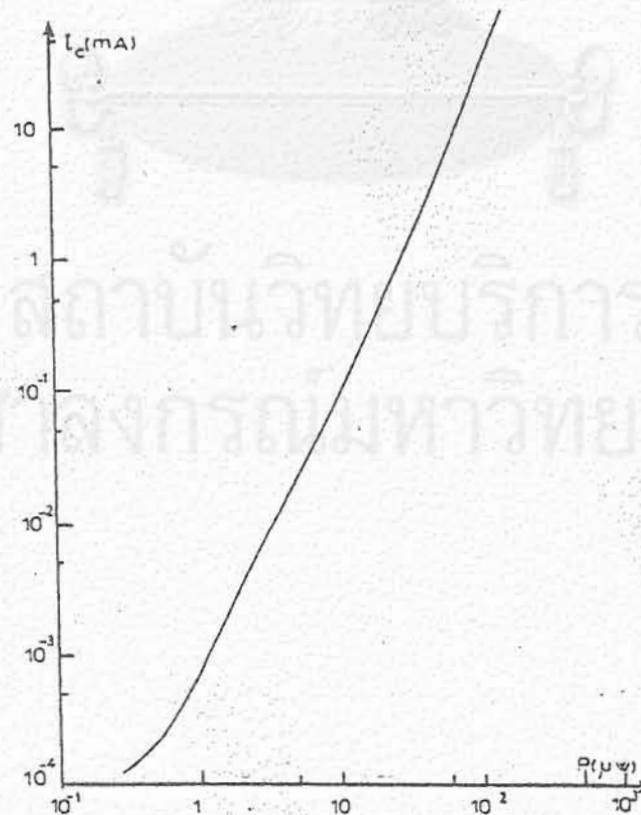


1 mA/Div
0.2 V/Div
2 μ A/Step

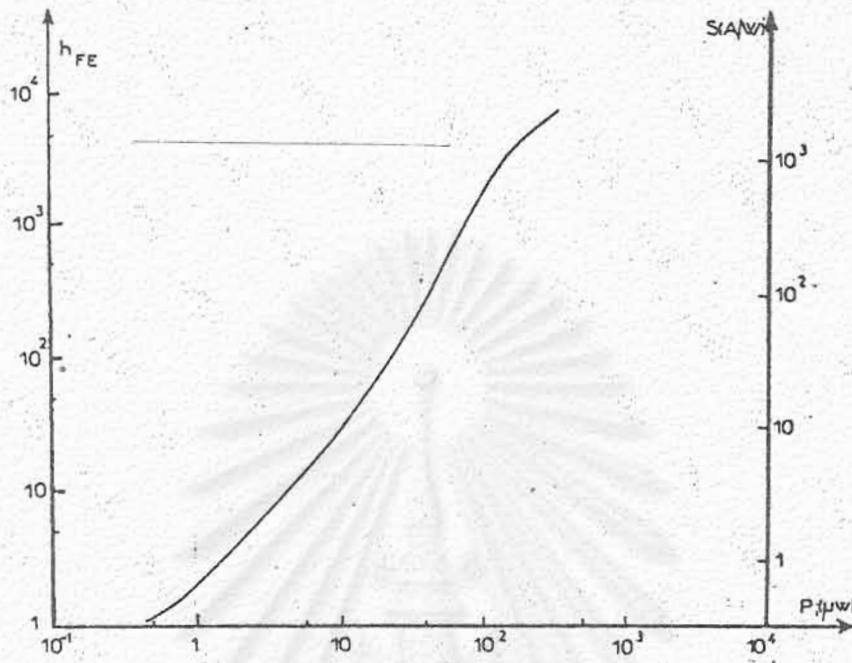
รูปที่ 16 ก, ข, ค ลักษณะสมบัติกระแสคอลเล็กเตอร์ (I_c) แรงดันคอลเล็กเตอร์-อีมีตเตอร์ (V_{ce}) โดยมีกระแสเบส (I_b) เป็นตัวแปร



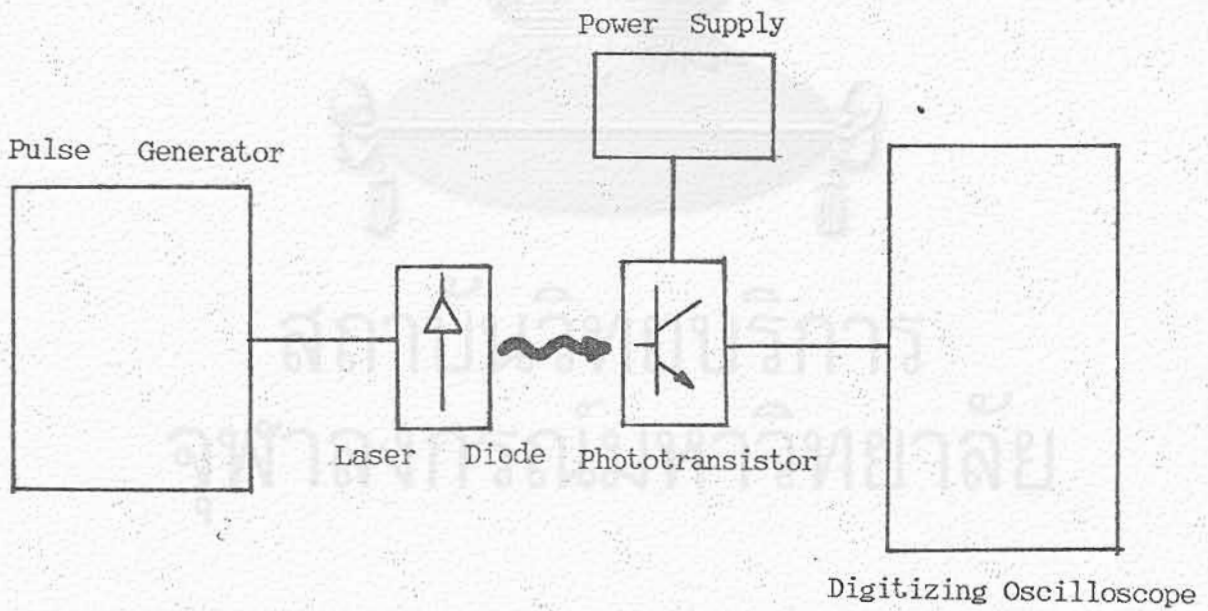
รูปที่ 17 ความไว (Sensitivity) ของ HPT ที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ



รูปที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเล็กเตอร์-กำลังแสงส่องกระทบ



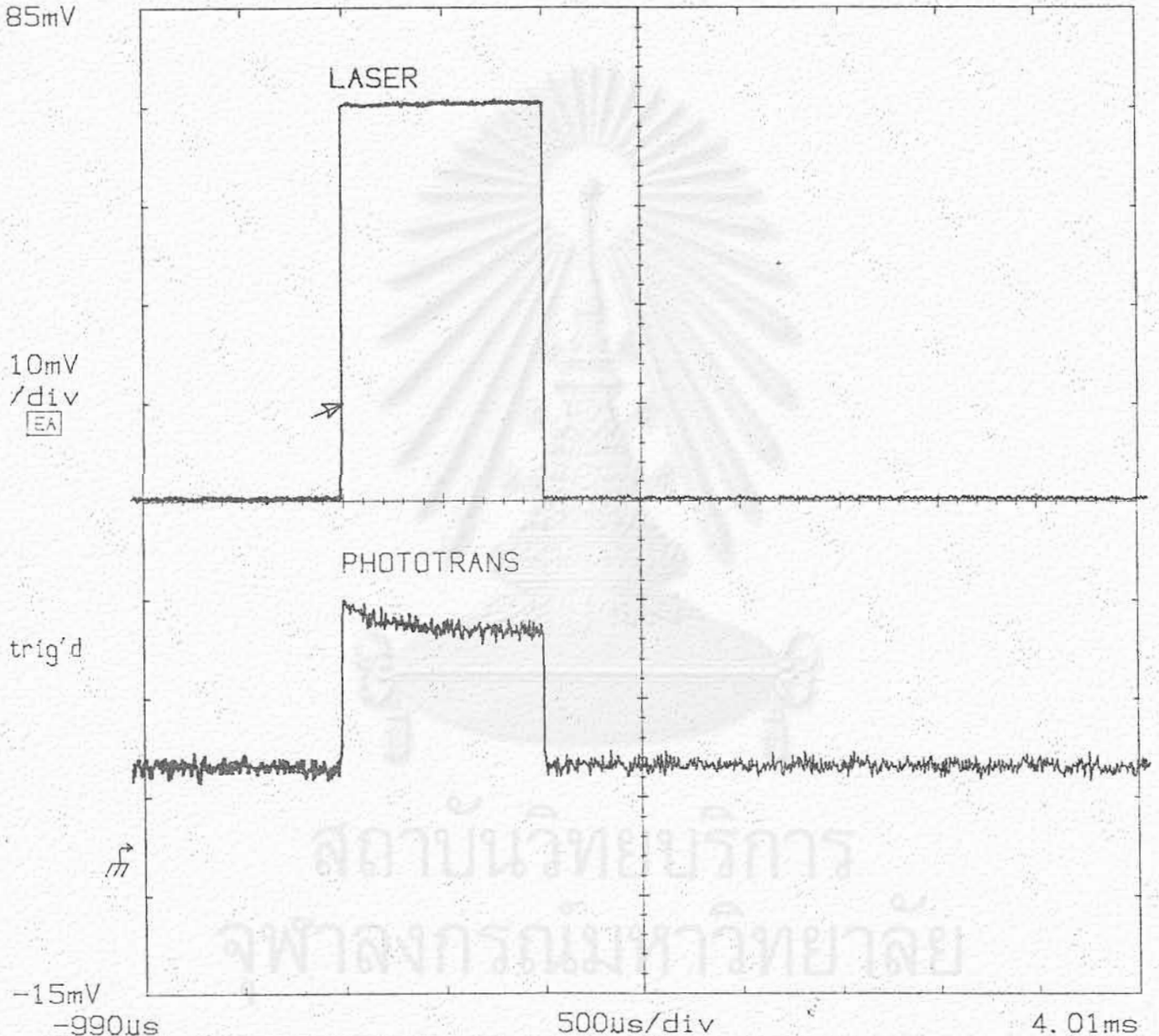
รูปที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราขยายกระแส-กำลังแสงส่องกระทบ



รูปที่ 20 ชุดเครื่องวัดผลตอบสนองพัลส์ของ HPT

11402A DIGITIZING OSCILLOSCOPE
 date: 19-OCT-90 time: 15:34:35

(exp: 2.2, dig: 2.1, dsy: 2.0)
 Instrument ID# B010220



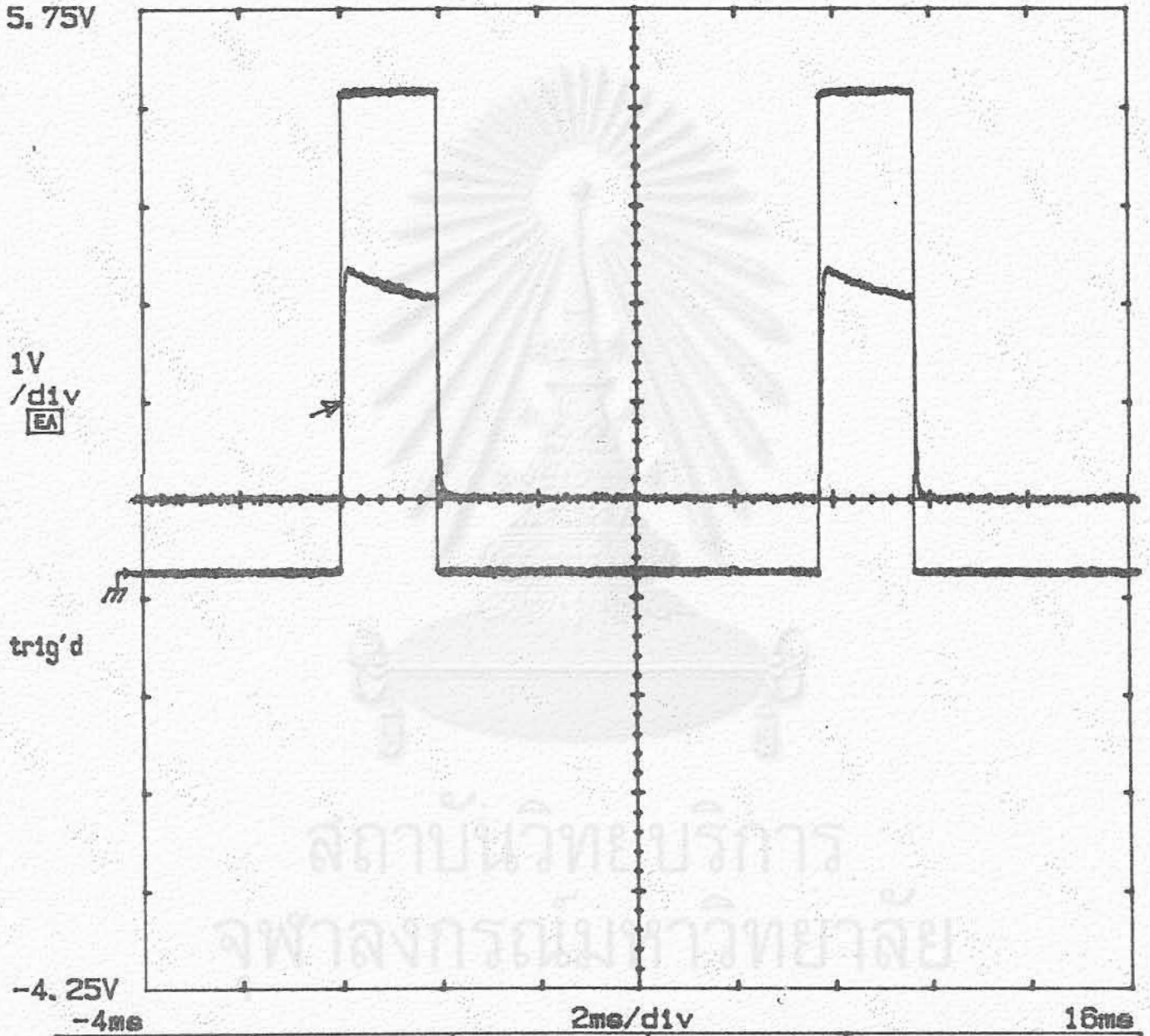
Rise	Fall		Measurements	Main Size	
5.516	7.219			500us/div	
us	us			Main Pos	
				-1.05ms	
			Statistics	Remove	Pan/
			Comp & Def	Wfm 3	Zoom
			continuous	Avg (L2)	off
				Main	

รูปที่ 21 Pulse Response ของ HPT



11402A DIGITIZING OSCILLOSCOPE
 date: 10-AUG-90 time: 10:44:03

{exp: 2.2, d1g: 2.1, dsy: 2.0}
 Instrument ID# B010220



Freq- uency 102.7 Hz	Duty Cycle 19.92 %	Rise 16.43 us	Measure- ments	Main Size 2ms/div Main Pos -4.24ms	
Fall 16.20 us			Statistics Comp & Def continuous	Remove Wfm 1 L1 Main	Pan/ Zoom off

รูปที่ 22 Pulse Response ของ Si-Phototransistor

ขณะที่ Si-Phototransistor มีค่า t_r และ $t_f \approx 16 \mu s$ บ่งบอกถึงความสามารถของ HPT ในการใช้งานที่ความถี่สูง

6 สรุป

ในรายงานฉบับนี้ได้กล่าวถึงการวิจัยและพัฒนาโครงการออปโตอิเล็กทรอนิกส์ระยะที่สอง ซึ่งเกี่ยวข้องกับการผลิตโฟโตทรานซิสเตอร์หัวต่อต่างชนิดของ $Ga_{1-x}Al_xAs(n)/GaAs(p)$ ระหว่างอิมิตเตอร์กับเบสด้วยเหตุผลที่ว่า GaAs มีความเร็วอิเล็กตรอนสูงกว่าของซิลิกอน หัวต่อต่างชนิด $Ga_{1-x}Al_xAs(n)/GaAs(p)$ มีประสิทธิภาพในการฉีดพาหะสูง และโฟโตทรานซิสเตอร์ชนิดนี้มี "Window Effect" ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาทฤษฎีการทำงานของโฟโตทรานซิสเตอร์ชนิดนี้ทั้งทางด้านสถิต (Static) และทางด้านพลวัต (Dynamic) เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบโครงสร้างของสิ่งประดิษฐ์ จากนั้นได้ทำการพัฒนาเทคโนโลยีเอพิแทกซีในสถานะของเหลวแบบแนวนอน (Horizontal Liquid Phase Epitaxy) โดยเฉพาะเงื่อนไขสำคัญ ๆ ในอันที่จะสามารถปลูกผลึกบางของเบสได้ พร้อมกันนั้นได้กำหนดขั้นตอนการผลิตสิ่งประดิษฐ์เป็นผลสำเร็จ สิ่งประดิษฐ์ที่ผลิตได้ได้ถูกนำมาตรวจสอบลักษณะสมบัติและความสามารถในการทำงานทั้งทางด้านไฟฟ้า และทางด้านแสงปรากฏว่าสามารถทำงานได้เป็นที่น่าพอใจ อย่างไรก็ตามในโครงการออปโตอิเล็กทรอนิกส์ระยะที่ 3 จะได้ทำการพัฒนาให้มีสมรรถนะในการทำงานสูงยิ่งขึ้น

7. เอกสารอ้างอิง (References)

ชุมพล อันตรเสน, มนตรี สวัสดิ์ศฤงฆาร, บรรยง โตประเสริฐวงศ์, เกียรติศักดิ์ เกลิมิตระกุล และ ชารา ชลปราณี "รายงานการวิจัยและพัฒนาโครงการพัฒนาเทคโนโลยีวัสดุและชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ โครงการออปโตอิเล็กทรอนิกส์ระยะที่ 1", ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและการพลังงาน

Hsich J.J., "Thickness and Surface Morphology of GaAs LPE Layers Grown by Supercooling, Step-cooling, Equilibrium-cooling and Two-phase Solution Techniques", J. Crystal Growth, Vol. 27, 1974, pp. 49-61.

Kroemer H., "Heterostructure Bipolar Transistor : What should we build?" J. Vac. Sci. Technol. B1 (2), Apr.- Jun. 1983, pp 126-130.

Ladd G.O. and Feucht D.L., "Performance Potential of High-Frequency Heterojunction Transistors" IEEE Trans Electron. Devices, Vol. ED-17, May. 1970, pp. 413-420.

Milano R.A., Dapkus P.D. and Stillman G.E., "An Analysis of the Performance of Heterojunction Phototransistors for Fiber Optic Communications" IEEE Trans. Electron. Devices, Vol. ED-29, FEB. 1982, pp. 266-274.

8. สิ่งตีพิมพ์

1. "ไดโอดเปล่งแสงด้านข้างแบบหัวต่อเฮตเตอร์โรชนิด GaAs/GaAlAs", ในการประชุมวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 12, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 16-17 พฤศจิกายน 2532.
2. "Fabrication of Side Emitting LEDs", Second Regional Symposium on Optoelectronics, Nov. 27-28 1989, Jakarta, Indonesia.
3. "Fabrication of $Ga_{0.6}Al_{0.4}As/GaAs$ Heterojunction Bipolar Transistor", Second Regional Symposium on Optoelectronics, Nov. 27-28, 1989, Jakarta, Indonesia.

9. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

โครงการ "ออปโตอิเล็กทรอนิกส์" ระยะที่ 2 ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยและพัฒนาจากศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและการพลังงาน ประจำปีงบประมาณ 2532 เป็นเงิน 700,000 บาท