

การพัฒนาหัววัดรังสีชนิด GaAs p-i-n สำหรับวัดรังสีเอกซ์



นาย สุภโชค ไทยน้อย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี

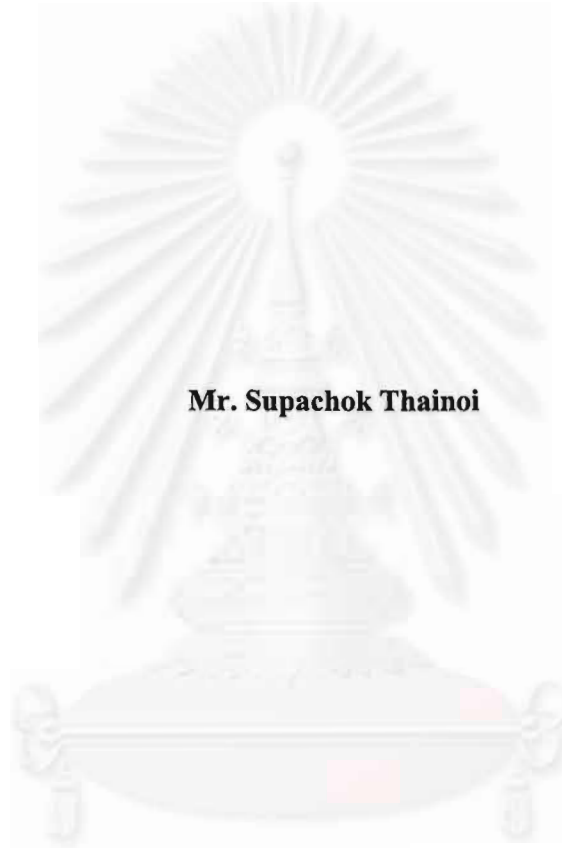
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2542

ISBN 974-334-303-2

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEVELOPMENT OF GaAs p-i-n RADIATION DETECTORS FOR X-RAY DETECTION



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Nuclear Technology**

Department of Nuclear Technology

Faculty of Engineering, Chulalongkorn University

Academic Year 1999

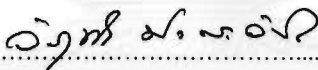
ISBN 974-334-303-2

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การพัฒนาหัวเว็ดรังสีชนิด GaAs p-i-n สำหรับวัดรังสีเอกซ์
โดย นาย ศุภโชค ไทยน้อย
ภาควิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุวิทย์ ปุณณชัยยะ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม รองศาสตราจารย์ ดร. ชุมพล อันตรเสน

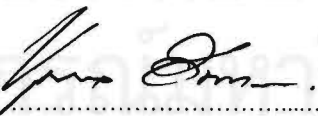
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

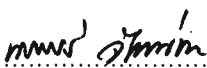

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ วิรุพห์ มังคละวิรัช)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุวิทย์ ปุณณชัยยะ)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(รองศาสตราจารย์ ดร. ชุมพล อันตรเสน)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ นเรศร์ จันทน์ขาว)

ศุภโชค ไทยน้อย : การพัฒนาหัววัดรังสีชนิด GaAs p-i-n สำหรับวัดรังสีเอกซ์

(DEVELOPMENT OF GaAs p-i-n RADIATION DETECTORS FOR X-RAY DETECTION)

อ. ที่ปรึกษา : ผศ. สุวิทย์ ปุณณชัยยะ, อ. ที่ปรึกษาร่วม : รศ. ดร. ชุมพล อันตรเสน, 88 หน้า.

ISBN 974-334-303-2.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและสร้างหัววัดรังสีเอกซ์ที่มีโครงสร้างเป็นไดโอดชนิดรอยต่อ พี-ไอ-เอ็น จากวัสดุสารประกอบกึ่งตัวนำแกลเลียมอาร์เซไนด์ทำงานที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้เทคนิคเอพิแทกซีเฟสของเหลวและเทคนิคการแพร่ซึม แวนผลึกเริ่มต้น 3 ชนิดที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้ได้แก่ แวนผลึกแกลเลียมอาร์เซไนด์ชนิดเอ็น ชนิดอินโคป และชนิดเอสไอ ในช่วงความหนา 0.2-0.6 มิลลิเมตร มีพื้นที่รับรังสีขนาด 40 ตารางมิลลิเมตร

ผลการทดสอบพิกัดทางไฟฟ้าตามลักษณะสมบัติกระแสแรงดันของหัววัดรังสีที่สร้างจากวัสดุเริ่มต้นดังกล่าวพบว่า ค่าแรงดันพังทลายของรอยต่อที่สร้างด้วยเทคนิคการแพร่ซึมมีค่ามากกว่าการสร้างด้วยเทคนิคการปลูกผลึก โดยมีค่าประมาณ 200 และ 4 โวลต์ตามลำดับ มีกระแสรั่วไหลค่อนข้างสูงประมาณ 8 ไมโครแอมแปร์ สำหรับการทดสอบคุณสมบัติในการวัดรังสีพบว่า หัววัดรังสีที่สร้างด้วยเทคนิคการปลูกผลึกเอพิแทกซีไม่ตอบสนองการวัดรังสี แต่หัววัดรังสีที่สร้างด้วยเทคนิคการแพร่ซึมตอบสนองการวัดรังสีอัลฟา (พลังงาน 5.48 MeV ของ Am-241) รังสีเบตา (พลังงาน 0.546 MeV, 2.2 MeV ของ Sr-90/Y-90) ส่วนรังสีเอกซ์ (พลังงาน 60 keV ของ Am-241) สามารถวัดได้ทางอ้อมจากอิเล็กทรอนิกส์ที่ได้ออกจากอันตรกิริยาของโฟตอนกับภาชนะห่อหุ้ม แต่เนื่องจากมีประสิทธิภาพการรวบรวมปริมาณประจุต่ำ จึงทำให้ขนาดสัญญาณพัลส์ที่เกิดจากปริมาณของคู่อิเล็กตรอน-โฮลมีขนาดเล็กไม่สามารถวัดสเปกตรัมพลังงานของรังสีเอกซ์ได้ จำเป็นต้องมีการแก้ไขกระบวนการสร้างรอยต่อให้มีกระแสรั่วไหลต่ำ และมีบริเวณไวการวัดรังสีที่มีคุณภาพต่อไป


ภาควิชา นวัตกรรมเทคโนโลยี.....

สาขาวิชา นวัตกรรมเทคโนโลยี.....

ปีการศึกษา 2542.....

ลายมือชื่อนิสิต 

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา 

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม 

3971893421 : MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY

KEY WORD : GaAs DETECTOR/LIQUID PHASE EPITAXY/DIFFUSION/X-RAY DETECTOR

SUPACHOK THAINOI : DEVELOPMENT OF GaAs p-i-n RADIATION DETECTORS FOR X-RAY DETECTION. THESIS ADVISOR : ASSIST. PROF. SUVIT PUNNACHAIYA, THESIS CO-ADVISOR : ASSOC. PROF. CHOOMPOL ANTARASENA, D. Eng. 88. pp. ISBN 974-334-303-2.

This thesis is to design and fabricate a room-temperature x-ray detector from the GaAs p-i-n junction diode structure using Liquid Phase Epitaxy (LPE) and diffusion techniques. Three types of the selected wafer were N-type, undoped type and SI-type with a thickness in range of 0.2-0.6 mm and a radiation detector has a sensitive area of 40 mm².

The V-I characteristic curve of the fabricated x-ray detectors were tested and found that the breakdown voltage of a diffuse junction diode was higher than that of LPE junction diode, at 200 V and 4 V respectively, with rather high leakage current of 8 μ A. For radiation detection, LPE junction diode had no response to any radiation but the diffuse junction diode could response to alpha radiation (5.48 MeV of Am-241 source), beta radiation (0.546 MeV, 2.2 MeV of Sr-90/Y-90 source). In case of x-ray photon (60 keV of Am-241 source), a photon detection can be processed indirectly via photon interaction with aluminium housing of a detector, created secondary electron. However, the x-ray spectrum could not be detected because of the low charge collection efficiency at the diode junction, therefore a signal pulse height produced from the e-h pairs became too small. These results indicate that the fabrication process has to be improved to develop a low leakage junction diode with high quality radiation sensitive area.

ภาควิชา นวัตกรรมเทคโนโลยี.....
สาขาวิชา นวัตกรรมเทคโนโลยี.....
ปีการศึกษา 2542.....

ลายมือชื่อนิสิต
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุวิทย์ ปุณณชัยยะ และ รองศาสตราจารย์ ดร. ชุมพล อันตรเสน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งเป็นผู้ให้โอกาสแก่ผู้วิจัยในการศึกษาในระดับปริญญาโทมาโดยตลอด และได้ให้คำแนะนำรวมทั้ง ข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์อย่างมากตลอดระยะเวลาที่ทำการวิจัย ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอย่างสูง

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณคณาจารย์ ภาควิชานิเทศศาสตร์เทคโนโลยีทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง รองศาสตราจารย์ นเรศร์ จันทน์ขาว รองศาสตราจารย์ ดร. รัชชัย สุมิตร ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อรรถพร ภัทรสุมันต์ ที่ให้ความช่วยเหลือและให้โอกาสในการเข้ามศึกษา และขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิศิษฐ์ ทวีปรัญญ์พร อาจารย์ เดโช ทองอร่าม รองศาสตราจารย์ ชยากริต ศิริอุปถัมภ์ และคุณบัญชา อุนพานิช ที่ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ วุริพห์ มังคละวิรัช ที่สละเวลามาเป็นประธาน กรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ และให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ในการสอบวิทยานิพนธ์

นอกจากนี้ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมชัย รัตนธรรมพันธ์ ที่ให้โอกาสมาศึกษา และขอขอบคุณ คุณสุวิทย์ กิระวิทยา คุณฤดีสันต์ ส่องเมือง ที่ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ และขอขอบพระคุณห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์ สารกึ่งตัวนำ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่เอื้อเฟื้อวัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือในการทำวิทยานิพนธ์ ในครั้งนี้

ท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้การสนับสนุน ทุนวิจัยครั้งนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญภาพ	ฎ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	3
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ขอบเขตการวิจัย	4
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
2 ทฤษฎี	5
2.1 รังสีนิวเคลียร์ (Nuclear Radiation)	5
2.1.1 รังสีเอกซ์ (X-rays)	5
2.1.2 อันตรกิริยาของรังสีเอกซ์กับสสาร (Interaction of X-rays Radiation with Matter)	7
2.1.2.1 ปปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric Effect)	7
2.1.2.2 ปปรากฏการณ์คอมป์ตัน (Compton Effect)	8
2.1.2.3 การเกิดคู่อิเล็กตรอน-โพซิตรอน (Pair Production)	9
2.1.3 การดูดกลืนและการลดปริมาณรังสีเอกซ์ (Attenuation of X-rays Radiation)	11
2.2 คุณสมบัติทางกายภาพของหัววัดรังสีแบบสารกึ่งตัวนำ	13
2.2.1 แถบพลังงาน (Energy gap)	14
2.2.2 การเคลื่อนที่ของประจุ (Charge Transport)	15

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
2.2.3 สิ่งเจือปนและความไม่สมบูรณ์ของโครงสร้างของสาร (Impurities and Lattice Defects)	16
2.2.4 การปรับตัวเข้าสู่ภาวะสมดุล (Equilibrium Condition)	16
2.2.5 การเกิด ไอออนในเซชันและการรวบรวมประจุ (Ionization and Charges Collection)	17
2.2.6 หลักการทำงานของรอยต่อ p-i-n	19
2.3 การวัดพลังงานรังสีเอกซ์	30
2.3.1 ลักษณะสัญญาณพัลส์	31
2.3.2 กระบวนการวัดพลังงานของรังสี	32
3 การสร้างหัววัดรังสีชนิด GaAs p-i-n สำหรับวัดรังสีเอกซ์	36
3.1 การปลูกผลึกโดยวิธีเอพิแทกซ์เฟสของเหลว (Liquid Phase Epitaxy)	36
3.1.1 การปลูกผลึกแบบทรานเซียนต์	37
3.1.1.1 วิธี Equilibrium-Cooling	39
3.1.1.2 วิธี Step-Cooling	39
3.1.1.3 วิธี Supercooling	40
3.1.1.4 วิธี Two-Phase-Solution Cooling	40
3.1.2 การปลูกผลึกแบบสถานะอยู่ตัว	40
3.2 เงื่อนไขการปลูกผลึกโดยวิธีเอพิแทกซ์เฟสของเหลว	41
3.2.1 ระดับความชื้นของก๊าซในระบบ	41
3.2.2 ชนิดของสารเจือปน	41
3.2.3 การเตรียมวัสดุ	42
3.2.4 อุณหภูมิที่ใช้ในการปลูกผลึก	43
3.2.5 การปลูกผลึกเกล็ดเลียมอาร์เซไนต์	44

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3.3 การสร้างหัววัดรังสีโครงสร้าง p-i-n ด้วยเทคนิคการแพร์ซึม	55
4 ผลการทดลอง	58
4.1 คุณสมบัติทางด้านกายภาพ	58
4.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์	58
4.2 คุณสมบัติทางด้านไฟฟ้า	60
4.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์	60
4.3 การทดสอบทางด้านการวัดรังสี	62
4.3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์	62
4.3.2 ขั้นตอนการทดสอบ	64
4.3.3 ผลจากการทดสอบรังสี	64
5 วิจัยผลและเสนอแนะ	73
5.1 กระบวนการสร้างถึงประดิษฐ์กิ่งตัวนำ	73
5.2 ระดับความบริสุทธิ์ของชั้นผลึก	74
5.3 กระแสรั่ว และแรงดันพังทลายที่หัวต่อ	75
5.4 ผลกระทบจาก “Deep Level Traps” ในเว่นผลึกเริ่มต้นชนิด SI-GaAs	75
5.5 ข้อเสนอแนะ	75
รายการอ้างอิง	77
ภาคผนวก	79
ภาคผนวก ก การสร้างผิวสัมผัสโอห์มมิกบนผลึก GaAs ชนิดพี และชนิด เอ็น	80
ภาคผนวก ข คุณสมบัติของผลึก GaAs ที่ใช้เป็นผลึกฐานในการสร้างหัววัด รังสี	85
ประวัติผู้เขียน	88

สารบัญญภาพ

รูปที่		หน้า
1.1	โครงสร้างผลึกแบบ Zinc blende ของแกเลียมอาร์เซไนด์	1
1.2	แถบพลังงานของแกเลียมอาร์เซไนด์ GaAs	2
2.1	ลักษณะการเกิดรังสีเอกซ์	6
2.2	แผนภาพลักษณะการเกิดปรากฏการณ์ Photoelectric Effect	8
2.3	แผนภาพลักษณะการเกิดปรากฏการณ์ Compton Effect	9
2.4	ลักษณะการเกิด Pair Production	10
2.5	ความสัมพันธ์ของพลังงานและ โอกาสในการเกิดปรากฏการณ์ของอันตรกิริยา จากโฟตอนใน NaI	11
2.6	ลักษณะแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ	14
2.7	แสดงลักษณะแถบพลังงานแบบตรงและแบบไม่ตรงของสารกึ่งตัวนำ	15
2.8	ภาพแสดงลักษณะทางกายภาพของหัววัดรังสี	17
2.9	ลักษณะรอยต่อพี-เอ็น (ก) ที่สภาวะสมดุล (ข) ไบอัสตาม และ (ค) ไบอัสย้อน ...	19
2.10	ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน (I-V Curve)	23
2.11	ลักษณะกระแส-แรงดันขณะรับแสงของรอยต่อ p-n	25
2.12	แผนภาพแสดงการทำงานของโฟโตไดโอดรอยต่อ p-i-n (ก) ภาพตัดขวาง โครงสร้างรอยต่อ p-i-n (ข) ลักษณะแถบพลังงานของรอยต่อ p-i-n ขณะ ดูดกลืนโฟตอนภายใต้ไบอัสย้อน (ค) สนามไฟฟ้าบริเวณปลอดพาหะ (W) และ (ง) การดูดกลืนโฟตอนที่ระยะต่างๆ ภายในรอยต่อ p-i-n	26
2.13	แสดงการเกิดสัญญาณพัลส์นิวเคลียร์ (ก) วงจรของหัววัดรังสี (ข) วงจรสมมูล ของหัววัดรังสี และ (ค) สัญญาณพัลส์ของหัววัดรังสี	31
2.14	แผนภาพแสดงขั้นตอนการวัดพลังงานของรังสี	32
2.15	สัญญาณที่ออกจากภาคขยายส่วนหน้า	34
2.16	ลักษณะของสัญญาณที่ออกจากภาคขยายสัญญาณ ซึ่งมีค่า shaping time ต่างกัน เปรียบเทียบกับกัน	34
2.17	ภาพแสดงสเปกตรัมจากหัววัดชนิดต่างๆ ของรังสีเอกซ์	35
3.1	เตาปลูกผลึกโดยวิธีเอพิแทกซีเฟสของเหลวแบบแนวนอน (Horizontal Liquid Phase Epitaxy)	36

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.2	37
3.3	38
3.4	38
3.5	41
3.6	44
3.7	45
3.8	47
3.9	49
3.10	49
3.11	50
3.12	50
3.13	53
3.14	54
3.15	55
3.16	55
3.17	56
3.18	56
3.19	57
3.20	57
4.1	60

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	แสดงพลังงานที่ใช้ในการเกิดไอออนในชั้นของสารประกอบกึ่งตัวนำบางชนิด พร้อมธาตุ Si และ Ge	13
2.2	แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหัววัดรังสี	33
3.1	ชนิดของสารเจือปนที่ใช้ในระบบ LPE	42
3.2	ขั้นตอนการเตรียมแผ่นผลึก GaAs	42
3.3	การเตรียมสารเจือด้วยการล้างด้วยสารเคมี	43
3.4	น้ำหนักของสารต่างๆ ที่ใช้ในโครงสร้างที่ 1 (ก)	53
3.5	น้ำหนักของสารต่างๆ ที่ใช้ในโครงสร้างที่ 1 (ข)	53
3.6	น้ำหนักของสารต่างๆ ที่ใช้ในโครงสร้างที่ 1 (ค)	53
4.1	คุณสมบัติทางกายภาพของหัววัดรังสีสร้างจากระบบ LPE	58
4.2	คุณสมบัติทางกายภาพของหัววัดรังสีสร้างจากระบบ LPE ปลูกผลึก 2 หน้า ...	59
4.3	คุณสมบัติทางกายภาพของหัววัดรังสีสร้างจากระบบ LPE ปลูกผลึก 2 หน้า ...	59
4.4	คุณสมบัติทางกายภาพของหัววัดรังสีสร้างจากเทคนิคการแพร่ซึม	60
4.5	คุณสมบัติทางไฟฟ้าของหัววัดรังสีสร้างจากเทคนิค LPE และเทคนิคการ แพร่ซึม	62
4.6	ต้นกำเนิดรังสีที่ใช้ในการทดสอบกับหัววัดรังสี	63
4.7	ผลการวัดการตอบสนองต่อรังสีของหัววัดรังสี (เทคนิค LPE)	64

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
4.2	ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของหัววัดรังสีสร้างจากโครงสร้างที่ 1 (จ)	61
4.3	ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของหัววัดรังสีสร้างจากโครงสร้างที่ 1 (ค)	61
4.4	ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของหัววัดรังสีสร้างจากเทคนิคการแพร์ซิม	62
4.5	แผนภาพการจัดเครื่องมือที่ทำการทดสอบการวัดรังสีของหัววัดรังสีที่พัฒนาขึ้น .	63
4.6	ผลการวัดการตอบสนองโฟตอนจาก Am-241 (60 keV)	65
4.7	สัญญาณที่ได้จากอุปกรณ์ขยายสัญญาณขณะวัดโฟตอนมีขนาดสูงถึงรบกวนสูงมาก	66
4.8	ผลการวัดการตอบสนองอนุภาคอัลฟาจาก Am-241 (5.48 MeV)	67
4.9	เปรียบเทียบผลการวัดสเปกตรัมของอนุภาคเบตาจาก Sr-90/Y-90	68
4.10	เปรียบเทียบผลการวัดสเปกตรัมของอนุภาคเบตาจาก Cl-36	69
4.11	แสดงสัญญาณพัลส์จากอุปกรณ์ขยายรูปสัญญาณขณะวัดรังสีเบตา	70
4.12	ผลการวัดสเปกตรัมจากต้นกำเนิดรังสี Cs-137	71
5.1	ลักษณะของผลึกที่ปลูกจากเทคนิคเอพิแทกซ์เฟสของเหลว	74
5.2	เครื่องปลูกผลึกแบบ Molecular Beam Epitaxy (MBE)	76



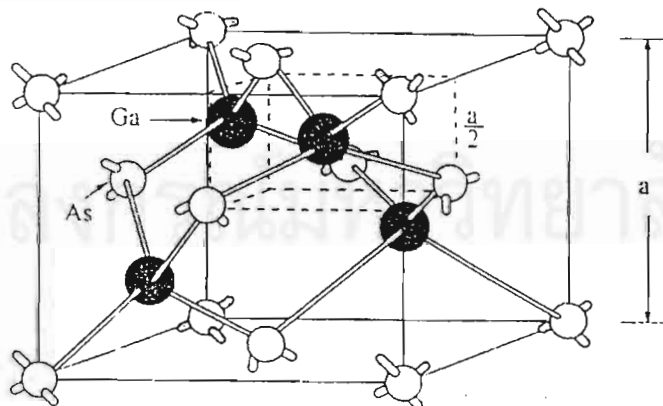
บทที่ 1

บทนำ



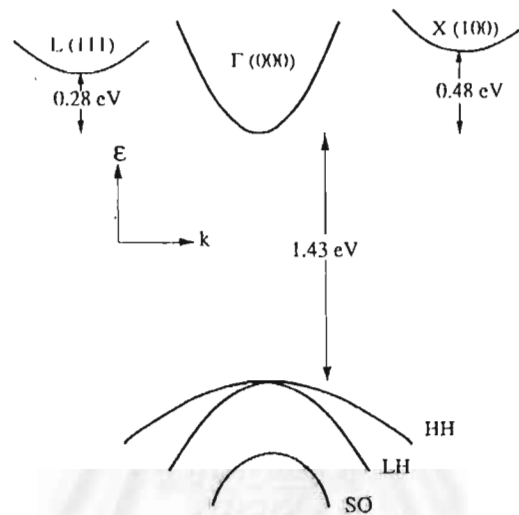
ปัจจุบันได้มีการค้นคว้าวิจัยเพื่อประยุกต์ใช้สารกึ่งตัวนำกันอย่างกว้างขวางทั้งในรูปของธาตุ สารประกอบ (compound) และอัตรลอย (alloy) แต่สารกึ่งตัวนำซึ่งมีการประยุกต์ใช้งานอย่างแพร่หลาย คงเป็นเจอร์เมเนียม (Ge) ซิลิคอน (Si) และแกเลียมอาร์เซไนด์ (GaAs) โดยเฉพาะแกเลียมอาร์เซไนด์กำลังมีบทบาทอย่างมากในการนำมาสร้างสิ่งประดิษฐ์กึ่งตัวนำต่างๆ ในส่วนของงานวิจัยนี้ได้้นำแกเลียมอาร์เซไนด์มาประยุกต์ใช้สร้างหัวเว็ดตรงสี่ ในเบื้องต้นจะกล่าวถึงคุณสมบัติของแกเลียมอาร์เซไนด์ เพื่อเปรียบเทียบกับสารกึ่งตัวนำอื่นๆ

แกเลียมอาร์เซไนด์เป็นสารประกอบตัวหนึ่งในตระกูล III-V ที่มีโครงสร้างผลึกแบบ Zinc blende ดังรูปที่ 1.1 [1] ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับโครงสร้างของเพชรเพียงแต่มีอะตอมสองชนิดอยู่ร่วมกัน แต่ละอะตอมของแกเลียมจะถูกล้อมรอบไปด้วยอาร์เซนิก 4 อะตอมและแต่ละอะตอมของอาร์เซนิกก็ถูกล้อมรอบไปด้วยแกเลียม 4 อะตอมอยู่ตรงมุมของรูปเหลี่ยม tetrahedral อะตอมของแกเลียมทั้งหมดเรียงรายประจำตำแหน่ง lattice points ของโครงสร้างแบบ face-centred cubic ชุดหนึ่ง และเหล่าอะตอมของอาร์เซนิกก็ครอบครองโครงสร้างแบบเดียวกันนั้นอีกชุดหนึ่ง ระยะห่างระหว่างอะตอมถูกกำหนดโดยพลังงานพันธะ



รูปที่ 1.1 โครงสร้างผลึกแบบ Zinc blende ของแกเลียมอาร์เซไนด์

ความรู้เกี่ยวกับ โครงสร้างแถบพลังงานนับว่าเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งต่อการทำความเข้าใจ คุณสมบัติทางโฟตอนและไฟฟ้าของผลึกแกลเลียมอาร์เซไนด์ ในรูปที่ 1.2 แสดงลักษณะแถบพลังงานของแกลเลียมอาร์เซไนด์ ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีแถบพลังงานแบบตรง (direct bandgap) จึงทำให้มีคุณสมบัติทางโฟตอนและไฟฟ้าที่ดี ระดับพลังงาน (ในรูปของ wave function k) ที่บริเวณ $k = 0$ มีรูปร่างค่อนข้างสมมาตร



รูปที่ 1.2 แถบพลังงานของแกลเลียมอาร์เซไนด์ GaAs

การที่มีช่องว่างแถบพลังงานแบบตรงนี้เองทำให้ค่าช่วงชีวิต (lifetime) ของพาหะมีค่าต่ำมากและทำให้ทนต่อการทำลายของกัมมันตภาพรังสีในกลุ่มที่เป็นอิเล็กทรอนิกส์หรือโปรตอนได้ดี [6] นอกจากนี้ใช้สร้างไดโอดไวแสงแล้วเรายังสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานแสงอย่างมีประสิทธิภาพ เช่น ในการทำไดโอดเปล่งแสง (light emitting diode) ตลอดจนเลเซอร์ไดโอด (laser diodes) เป็นต้น และเนื่องจากการมีแถบพลังงานกว้าง ทำให้สิ่งประดิษฐ์ซึ่งทำจากแกลเลียมอาร์เซไนด์ สามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิสูงกว่าสิ่งประดิษฐ์ที่ทำจากซิลิกอน และที่เหนือว่าซิลิกอนคือการที่สามารถทำแกลเลียมอาร์เซไนด์ที่อยู่ในรูปสารกึ่งฉนวน (semi-insulating substrate) ซึ่งมีสภาพความต้านทานมากกว่า 10^{16} โอห์มเซนติเมตร นอกจากนี้การผสมผสานกันได้อย่างกลมกลืนกับสารอื่นส่วนใหญ่ในตระกูล III-V ด้วยกัน ในรูปของอัลลอยด์ก็ทำให้สามารถปรับแต่งช่องว่างแถบพลังงานได้ตามบริเวณหรือชั้นต่างๆ ในโครงสร้าง สิ่งประดิษฐ์ขึ้นเดียวกันอีกด้วย แกลเลียมอาร์เซไนด์จึงเป็นสารกึ่งตัวนำที่น่าสนใจนำมาประยุกต์สร้างหัวเวียงส์ทางด้านนิวเคลียร์เทคโนโลยี

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การวัดการแผ่รังสีจากแหล่งกำเนิดรังสี ได้แก่ รังสีอัลฟา รังสีบีตา รังสีแกมมา รังสีนิวตรอน และอนุภาคนิวเคลียร์อื่นๆ เป็นต้น การวัดรังสีดังกล่าวไม่ว่าจะเป็น การวัดความแรงรังสีแบบนับรวม (integral counting) หรือจะวัดรังสีเฉพาะพลังงาน (differential counting) จะต้องอาศัยระบบวัดอิเล็กทรอนิกส์มาใช้ในการวัดรังสีทั้งสิ้น หัววัดรังสี (radiation detector) เป็นอุปกรณ์วัดส่วนหน้าที่ทำหน้าที่ตรวจวัดรังสีด้วยหลักการเปลี่ยนพลังงานเป็นสัญญาณพัลส์ จากทฤษฎีของการตรวจวัดรังสีจะเห็นว่าบริเวณรอยต่อของโครงสร้างโคโอดสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการวัดรังสีได้ และหัววัดรังสีนี้จัดอยู่ในหัววัดรังสีประเภทสารกึ่งตัวนำ วัสดุสารกึ่งตัวนำที่ใช้สร้างหัววัดรังสีอาจจะอยู่ในรูปผลึกเดี่ยว (single crystal) หรือในรูปสารประกอบกึ่งตัวนำ (compounds semiconductor) เช่น ซิลิกอน (Si) เจอร์เมเนียม (Ge) แกลเลียมอาร์เซไนด์ (GaAs) เป็นต้น

หัววัดรังสีกึ่งตัวนำที่ใช้อยู่ตามเครื่องวัดต่างๆ ในประเทศ ล้วนแล้วต้องสั่งซื้อจากต่างประเทศและมีราคาสูงมาก ดังนั้นเพื่อเป็นการเริ่มงานด้านการพัฒนาหัววัดรังสีสารกึ่งตัวนำสำหรับวัดโฟตอน ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี จึงร่วมมือกับห้องวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ (semiconductor device research laboratory) ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าซึ่งเป็นห้องวิจัยที่ศึกษาคุณสมบัติและการใช้งานของสารกึ่งตัวนำ ไม่ว่าจะเป็นสารกึ่งตัวนำประเภทผลึกเดี่ยว และประเภทสารประกอบกึ่งตัวนำ และในช่วงหลายปีที่ผ่านมา ทางภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยีได้ร่วมมือกับห้องวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ สร้างหัววัดรังสีประเภทอนุภาคของรังสีอัลฟาโดยใช้วัสดุซิลิกอนผลึกเดี่ยวที่น่าพอใจ จึงมีความเป็นไปได้ในการที่จะพัฒนาหัววัดรังสีประเภทโฟตอนซึ่งสามารถทำงานที่อุณหภูมิห้องมาใช้งาน โดยเลือกวัสดุกลุ่มสารประกอบกึ่งตัวนำ แกลเลียมอาร์เซไนด์ (gallium arsenide) และใช้เทคโนโลยีรวมทั้งเครื่องมือที่เหมาะสมที่มีอยู่พัฒนาหัววัดรังสีประเภทโฟตอนพลังงานต่ำ (low energy photon) ช่วงพลังงานไม่เกิน 100 keV หัววัดรังสีดังกล่าวจะมีโครงสร้างเป็นโคโอดชนิดรอยต่อ p-i-n

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาและพัฒนาหัววัดรังสีที่ผลิตจากสารประกอบกึ่งตัวนำ GaAs (gallium arsenide) ซึ่งมีโครงสร้างเป็นโคโอด ชนิดรอยต่อ p-i-n ทำงานที่อุณหภูมิห้อง
- 1.2.2 เพื่อทดสอบคุณสมบัติในการตอบสนองที่เหมาะสม กับรังสีประเภท Low Energy Photon

1.3 ขอบเขตการวิจัย

- 1.3.1 ออกแบบและสร้างหัววัดที่มีโครงสร้างเป็นไดโอดชนิดรอยต่อ p-i-n โดยใช้วัสดุเป็นสารประกอบกึ่งตัวนำตระกูล III-V คือ แกลเลียมอาร์เซไนด์ (gallium arsenide) ให้สามารถวัดรังสีเอกซ์และรังสีแกมมาพลังงานต่ำในช่วงไม่เกิน 100 keV
- 1.3.2 ทดสอบคุณลักษณะทางไฟฟ้าของโครงสร้างไดโอดที่พัฒนาขึ้น
- 1.3.3 ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิต่อคุณสมบัติในการวัดรังสีที่พัฒนาขึ้น
- 1.3.4 ทดสอบความสามารถในการแจกแจงพลังงานของรังสีเอกซ์ที่อุณหภูมิห้อง เปรียบเทียบกับหัววัดรังสีพรอพอร์ชันแนลและหัววัดรังสี HPGe

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย

- 1.4.1 ศึกษาค้นคว้าทฤษฎีจากเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 1.4.2 ออกแบบและประดิษฐ์หัววัดรังสีที่มีโครงสร้างเป็นไดโอดชนิดรอยต่อ p-i-n จากวัสดุสารประกอบกึ่งตัวนำแกลเลียมอาร์เซไนด์ โดยใช้เทคนิคการปลูกชั้นผลึกสารประกอบกึ่งตัวนำจากกระบวนการ LPE และการแพร์ซึม
- 1.4.3 ทดสอบหัววัดรังสีที่มีโครงสร้างเป็นไดโอดชนิดรอยต่อ p-i-n ทางไฟฟ้า
- 1.4.4 ทดสอบการตอบสนองหัววัดรังสีที่มีโครงสร้างเป็นไดโอดชนิดรอยต่อ p-i-n โดยการวัดรังสีเอกซ์
- 1.4.5 ออกแบบโครงบรรจุ (packaging) ที่เหมาะสม
- 1.4.6 ทดสอบความสามารถในการแจกแจงพลังงาน และประสิทธิภาพในการวัดรังสีเอกซ์
- 1.4.7 สรุปผลการวิจัย และเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้หัววัดรังสีสารกึ่งตัวนำต้นแบบสำหรับวัดรังสีเอกซ์และเป็นแนวทางในการพัฒนาหัววัดรังสีสารกึ่งตัวนำสำหรับวัดโฟตอนให้ดียิ่งขึ้น

บทที่ 2

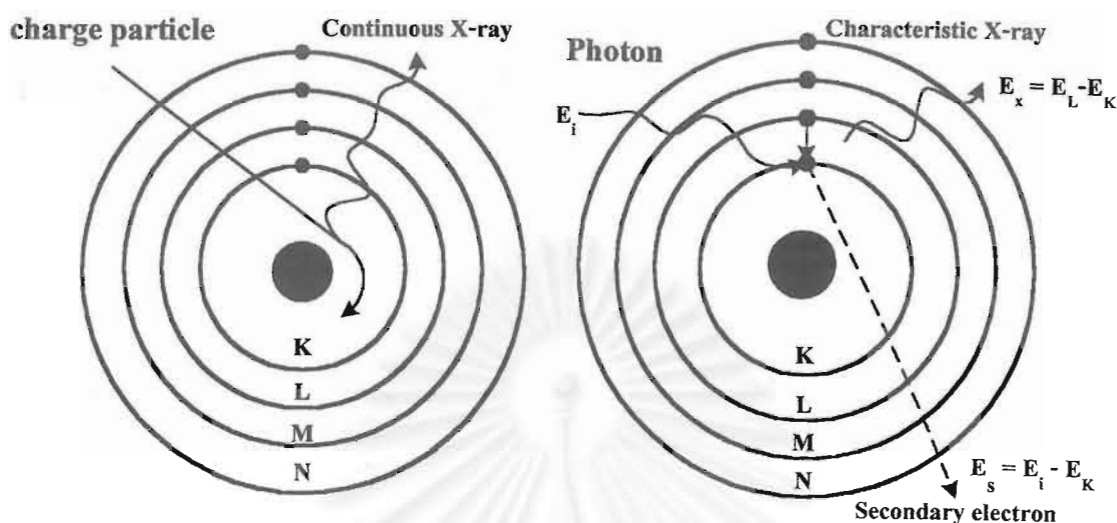
ทฤษฎี

2.1 รังสีนิวเคลียร์ (Nuclear Radiation)

รังสีนิวเคลียร์หมายถึงอนุภาคและโฟตอนที่แผ่กระจายจากต้นกำเนิด ได้แก่ รังสีเอกซ์ รังสีแกมมา ซึ่งอยู่ในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และรวมไปถึงอนุภาคที่มีความเร็วสูงเช่น รังสีอัลฟา รังสีเบตา และรังสีนิวตรอน รังสีสามารถจำแนกตามคุณสมบัติทางกายภาพได้ 2 กลุ่ม คือ กลุ่มหนึ่งเป็นรังสีที่ไม่ก่อให้เกิดไอออน (non-ionizing radiation) ซึ่งได้แก่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าประเภท ความร้อน แสง เสียง คลื่นวิทยุไมโครเวฟ และอีกกลุ่มหนึ่งเป็นรังสีที่ก่อให้เกิดไอออน (ionizing radiation) ซึ่งได้แก่ รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ประเภท รังสีเอกซ์ รังสีแกมมา รวมทั้งอนุภาคต่างๆ เช่น รังสีเบตา รังสีอัลฟา และรังสีนิวตรอน ในที่นี้จะกล่าวถึงคุณสมบัติของรังสีเอกซ์เท่านั้น

2.1.1 รังสีเอกซ์ (X-rays)

รังสีเอกซ์เกิดจากการแผ่รังสีประเภทคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า จากบริเวณชั้น โคจรของ อิเล็กตรอนรอบๆ นิวเคลียส อันตรกิริยาที่ก่อให้เกิดการแผ่รังสีเอกซ์สามารถเกิดได้ใน 2 รูปแบบ ได้แก่ รังสีเอกซ์ที่เกิดจากกระตุ้น (excited) หรือการแทนที่ของอิเล็กตรอนในวงโคจรของอะตอม ที่หลุดออกไปด้วยอันตรกิริยาใดๆ กับอนุภาคนิวเคลียร์จากภายนอกหรือการจับอิเล็กตรอนโดย นิวเคลียส (electron capture) ทำให้เกิดที่ว่างในตำแหน่งนั้น อิเล็กตรอนอื่นๆ ในวงนอกจะ ลดระดับพลังงานลงเข้ามาแทนที่ด้วยการคายพลังงานส่วนหนึ่งที่เกินออกมา ในรูปคลื่นแม่เหล็ก ไฟฟ้าที่มีพลังงานเฉพาะตัวของธาตุแต่ละชนิด เราเรียกรังสีเอกซ์แบบนี้ว่ารังสีเอกซ์เฉพาะตัว (characteristic x-ray) รังสีเอกซ์อีกประเภทหนึ่งได้จากการยิงธาตุหนักด้วยอิเล็กตรอนหรือโปรตอน พลังงานสูงเมื่อเข้าใกล้นิวเคลียสของเป้า (target) แล้วจะเบนทิศทางไป ทำให้อนุภาคดังกล่าว สูญเสียพลังงานไปส่วนหนึ่งในรูปรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเราก็มเรียกรังสีเอกซ์เช่นกัน เนื่องจากการเข้าชนของอิเล็กตรอนเป็นแบบสุ่ม (random) ทำให้ทิศทางที่เบนไปและการสูญเสียพลังงาน ไม่แน่นอน ค่าพลังงานของรังสีเอกซ์ที่ได้จึงมีหลายค่าที่ต่อเนื่องกัน ตั้งแต่ศูนย์จนถึงค่าสูงสุด ของพลังงานของอนุภาคที่ทำอันตรกิริยา เราจึงเรียกรังสีเอกซ์แบบนี้ว่า รังสีเอกซ์แบบต่อเนื่อง (continuous x-ray) รูปที่ 2.1 แสดงถึงลักษณะการเกิดรังสีเอกซ์แบบต่อเนื่องและรังสีเอกซ์



รูปที่ 2.1 ลักษณะการเกิดรังสีเอกซ์

เฉพาะตัวซึ่งมีคุณสมบัติเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านี้มีคุณสมบัติเป็นได้ทั้งคลื่นและอนุภาค (wave particle duality) แล้วแต่กรณี สำหรับคุณสมบัติที่เป็นอนุภาค จะเรียกว่า "โฟตอน (photon)" ดังนั้นบางครั้งจึงเรียกรังสีเอกซ์ว่าโฟตอนรังสีเอกซ์ (x-ray photon) ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานโฟตอนของรังสีเอกซ์กับความถี่ (ν) สามารถหาได้จากสมการ 2.1

$$E = h\nu \quad (2.1)$$

เมื่อ h คือ ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's constant = 6.62×10^{-34} จูล-วินาที หรือ 6.62×10^{-27} เอิร์ก-วินาที)

ν คือ ความถี่ ซึ่งมีค่าเท่ากับ c/λ

ดังนั้นจากสมการที่ 2.1 ถ้าแทนค่า ν จะได้สมการความสัมพันธ์ของพลังงานและความยาวคลื่น (λ)

$$E = hc / \lambda \quad (2.2)$$

เมื่อ c คือ ความเร็วในการเคลื่อนที่ของแสงมีค่าเท่ากับ 2.99×10^8 เมตรต่อวินาที

λ คือ ความยาวคลื่น มีหน่วยเป็นเมตร

จากสมการที่ 2.2 เมื่อแทนค่าคงที่ (hc) และแปลงหน่วยความยาวคลื่นเป็นอังสตรอม ($1\text{\AA} = 10^{-8}\text{ cm} = 0.0001\text{ }\mu\text{m}$) พลังงานในหน่วยของกิโลอิเล็กตรอนโวลต์ (keV) สามารถเขียนความสัมพันธ์ของพลังงานและความยาวคลื่นได้ ดังนี้

$$E(\text{keV}) = 12.4 / \lambda (\text{\AA}) \quad (2.3)$$

2.1.2 อันตรกิริยาของรังสีเอกซ์กับสสาร (Interaction of X-rays Radiation with Matter)

รังสีเอกซ์มีพฤติกรรมเป็นโฟตอน เมื่อโฟตอนเคลื่อนที่เข้าชนสสารหรือตัวกลางใดๆ ทำให้เกิดปรากฏการณ์ขึ้น 3 แบบ คือ โฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟกต์ คอมพ์ตันเอฟเฟกต์ และแพร์โปรดักชัน [2]-[3]

2.1.2.1 ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric Effect)

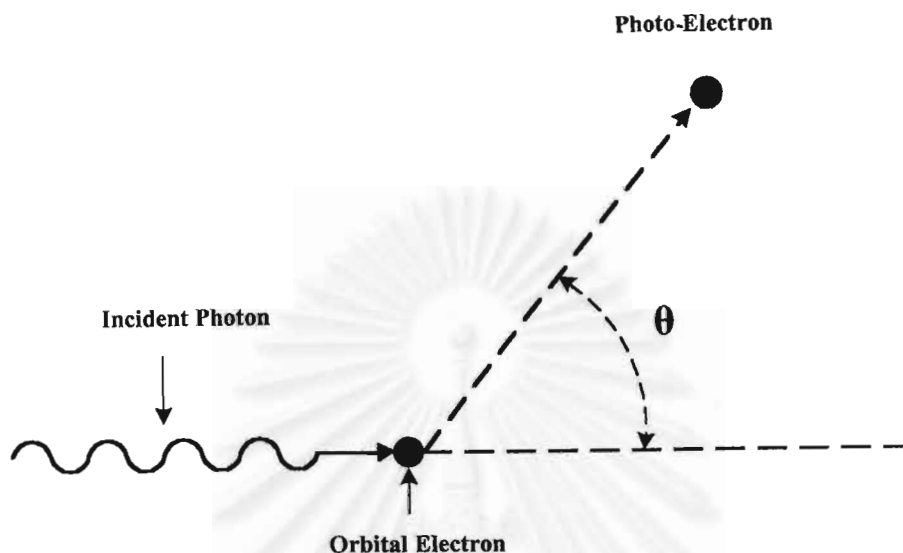
ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก เกิดกับโฟตอนที่มีพลังงานต่ำ เมื่อโฟตอนที่มีพลังงานมากกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในวงโคจร (orbital electron) วิ่งเข้าชนอะตอม จะถ่ายเทพลังงานทั้งหมดให้กับอิเล็กตรอนในวงโคจร ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอมดังแสดงในแผนภาพรูปที่ 2.2 ซึ่งอิเล็กตรอนที่หลุดจากวงโคจรนี้เรียกว่าโฟโตอิเล็กตรอน พลังงานของโฟโตอิเล็กตรอนหาได้จากสมการ (2.4) กระบวนการนี้โฟตอนจะเสียพลังงานทั้งหมดให้กับอิเล็กตรอน และโฟโตอิเล็กตรอนจะเป็นตัวทำให้เกิดกระบวนการไอออไนซ์เมื่อเคลื่อนผ่านอะตอมของสสาร โฟโตอิเล็กตรอนจะมีโอกาสเกิดขึ้นมากหรือน้อยขึ้นกับพลังงานของโฟตอน และเลขอะตอมของธาตุที่รับอันตรกิริยา กล่าวคือกระบวนการนี้จะมีโอกาสเกิดมากขึ้นเมื่อเลขอะตอมของตัวดูคลิ่นเพิ่มขึ้น และพลังงานโฟตอนมีช่วงพลังงานน้อยกว่า 100 keV

$$E_e = E_\gamma - E_b \quad (2.4)$$

เมื่อ E_e คือ พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนที่ส่งออกมา

E_γ คือ พลังงานทั้งหมดของโฟตอน

E_b คือ พลังงานที่ใช้ในการทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอม (พลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอน)

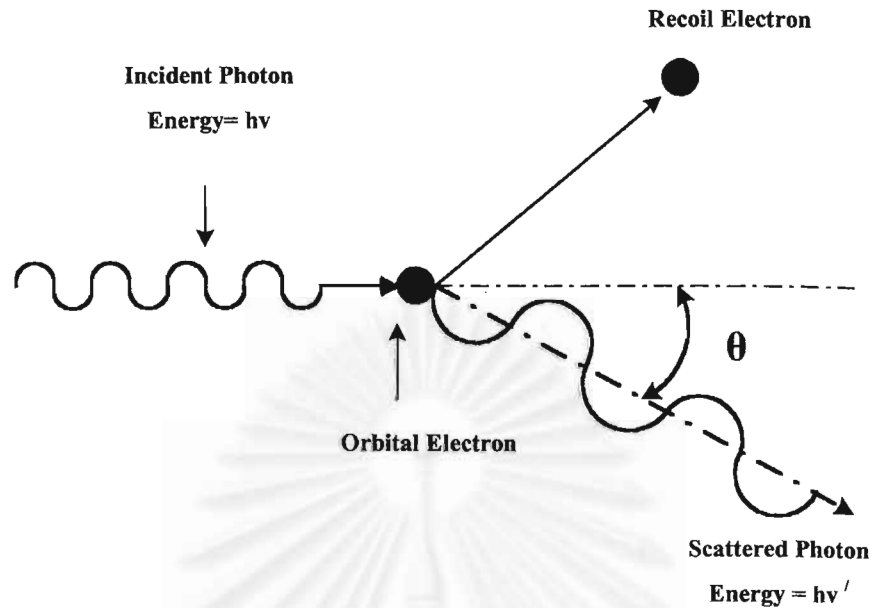


รูปที่ 2.2 แผนภาพลักษณะการเกิดปรากฏการณ์ Photoelectric Effect

2.1.2.2 ปรากฏการณ์คอมป์ตัน (Compton Effect)

เมื่อโฟตอนเข้าชนอะตอมของสาร จะทำอันตรกิริยากับอิเล็กตรอนที่อยู่ในวงโคจร โฟตอนจะเสียพลังงานบางส่วนให้กับอิเล็กตรอนทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาจากวงโคจร มีพลังงานจลน์ค่าหนึ่ง คือ $E_e = E_\gamma - E'_\gamma - E_b$ คล้ายกับการเกิดโฟโตอิเล็กทริก เมื่อ E'_γ คือ พลังงานของโฟตอนที่กระเจิง ดังแสดงในแผนภาพรูปที่ 2.3 โฟตอนที่เคลื่อนออกมาในทิศทางทำมุม θ กับทิศทางเดิม จะมีความยาวคลื่นมากขึ้น ($E'_\gamma < E_\gamma$) และอิเล็กตรอนที่หลุดออกมานี้เรียกรู้คืออิเล็กตรอน (recoil electron)

เนื่องจากคอมป์ตันเอฟเฟกต์ เกิดขึ้นจากการกระทำระหว่างโฟตอนและอิเล็กตรอนดังนั้นโอกาสของการเกิดคอมป์ตันเอฟเฟกต์จึงขึ้นกับจำนวนอิเล็กตรอนที่อยู่รอบนอก (orbital electrons) เลขอะตอมของสารที่รับอันตรกิริยา จึงเกิดได้คึกับสารคู่คี่ที่มีเลขอะตอมสูง และอันตรกิริยาคอมป์ตัน (compton interaction) จะลดลงเมื่อพลังงานของโฟตอนสูงขึ้นกว่า 1.02 MeV



รูปที่ 2.3 แผนภาพลักษณะการเกิดปรากฏการณ์ Compton Effect

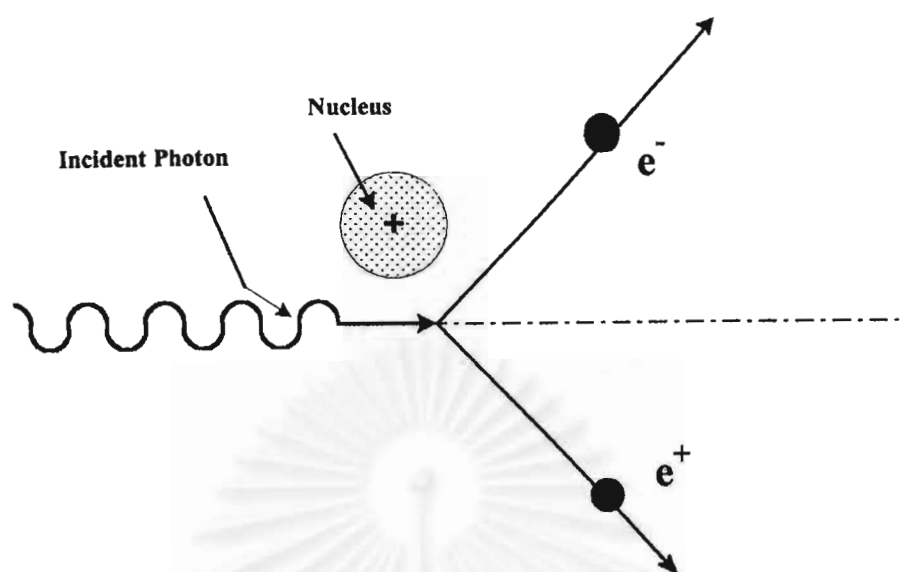
ข้อแตกต่างระหว่างปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตริก และปรากฏการณ์คอมป์ตัน คือ ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตริก เป็นการดูดกลืนพลังงานโฟตอนทั้งหมดที่ตกกระทบ แต่ในกระบวนการของคอมป์ตันนั้น เพียงแต่ลดขนาดของพลังงานเดิมของโฟตอน และโฟตอนที่กระเจิงออกมาจะมีพลังงานลดลง โดยอิเล็กตรอนรับพลังงานไปค่าหนึ่ง หลังจากการเกิดกระบวนการคอมป์ตันแล้ว โฟตอนอาจจะทำอันตรกิริยากับสสารเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตริกอีกและทำให้เกิดโฟโตอิเล็กตรอนขึ้นได้

2.1.2.3 การเกิดคู่อิเล็กตรอน-โพสิตรอน (Pair Production)

แรงแปรดักชันเป็นแบบหนึ่งของกระบวนการดูดกลืนโฟตอน เกิดขึ้นเมื่อโฟตอนมีพลังงานอย่างน้อย 1.02 MeV และจะเกิดขึ้นมากเมื่อโฟตอนมีพลังงานสูงขึ้นไปกว่า 1.02 MeV ดังในแผนภาพรูปที่ 2.4

$$h\nu \rightarrow e^+ + e^- + 2E_k \quad (2.5)$$

$2E_k$ คือ พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอน และโพสิตรอน

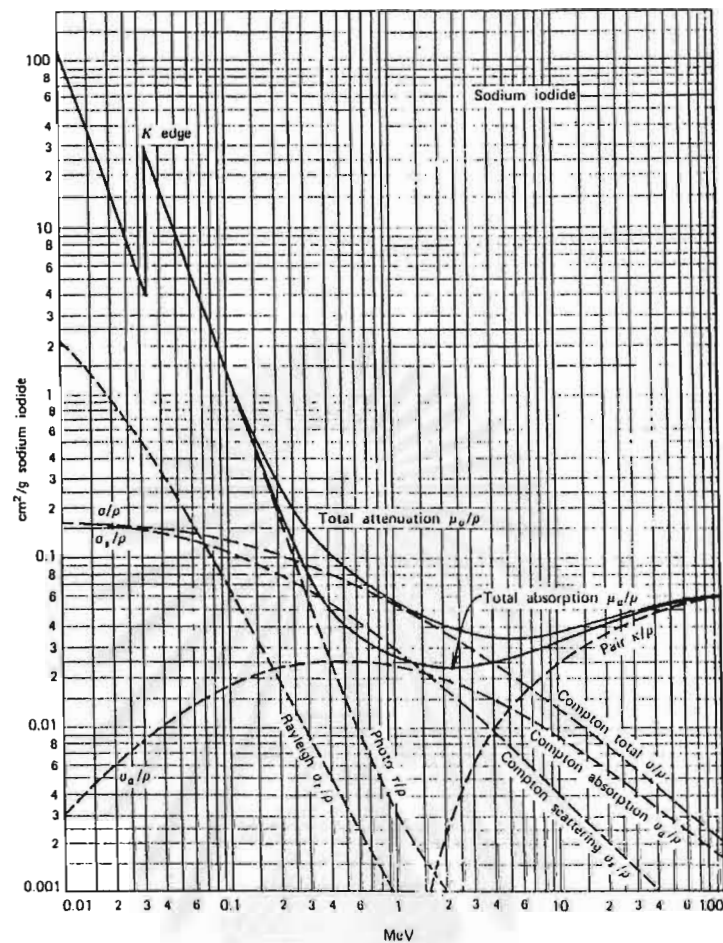


รูปที่ 2.4 ลักษณะการเกิด Pair Production

เมื่อโฟตอนเคลื่อนเข้ามาในสนามไฟฟ้าที่มีความหนาแน่นสูงบริเวณใกล้นิวเคลียส โฟตอนจะสูญเสียพลังงานในสนามนิวเคลียสเกิดคู่ของโพซิตรอน-อิเล็กตรอน ขึ้นมาคู่หนึ่ง ปรากฏการณ์นี้จะเกิดขึ้นเมื่อโฟตอนมีพลังงานมากกว่า 1.02 MeV โพซิตรอนและอิเล็กตรอนจะรับการถ่ายโอนพลังงานไป มีบางส่วนเท่านั้น ที่เหลือจะถ่ายโอนให้กับนิวเคลียส หลังจากนั้นอิเล็กตรอน และโพซิตรอนจะสูญเสียพลังงานโดยการไอออไนซ์สาร เมื่อโพซิตรอนมีพลังงานต่ำลงจะรวมกับอิเล็กตรอนและสลายมวล เกิดเป็นสองโฟตอน เรียกรังสีจากการสลายมวล (annihilation radiation)



โฟตอนที่เกิดขึ้นมาจากมวลของโพซิตรอน และอิเล็กตรอน แต่ละอนุภาคมีพลังงาน 0.511 MeV ($E = mc^2$) จึงทำให้แต่ละโฟตอน จึงมีพลังงาน 0.511 MeV และเคลื่อนไปในทิศทางตรงข้าม ดังนั้นสรุปได้ว่าปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตริก เกิดขึ้นเมื่อโฟตอนมีพลังงานต่ำ เมื่อโฟตอนมีพลังงานสูงขึ้นจะมีปริมาณลดลง ปรากฏการณ์คอมป์ตันจะเพิ่มขึ้นและเมื่อพลังงานโฟตอนสูงขึ้นต่อจากช่วงแรกเมื่อพลังงานเริ่มสูงกว่า 1.02 MeV จะเริ่มเกิดแฟร์โปรดักชันมากขึ้น และปรากฏการณ์คอมป์ตันจะลดลง ดังตัวอย่างของโอกาสในการเกิดปรากฏการณ์ต่างๆ ในโซเดียมไอโอไดด์ ดังในรูป 2.5 แสดงความสัมพันธ์ของพลังงานและโอกาสในการเกิดปรากฏการณ์ของอันตรกิริยาจากโฟตอนใน NaI



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ของพลังงานและโอกาสในการเกิดปรากฏการณ์ของอันตรกิริยาจากโฟตอนใน NaI

2.1.3 การดูดกลืนและการลดปริมาณรังเอกซ์ (Attenuation of X-rays Radiation)

เมื่อพิจารณากลุ่มรังสีเอกซ์หรือโฟตอนพลังงานเดี่ยว (monochromatic) และถูกบังคับทิศทางผ่านช่องบังคับ (collimated beam) มีความเข้ม I_0 ตกกระทบบนวัสดุซึ่งมีความหนา x cm มีความหนาแน่น ρ gm/cm³ ปริมาณความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ทะลุผ่านวัสดุนั้นออกมา มีความเข้มเป็น I ปริมาณรังสีทางเข้าจะมีโอกาสเกิดอันตรกิริยาสูญเสียพลังงาน และถูกดูดกลืนหรือลดค่าความเข้มลงเมื่อเดินทางผ่านวัสดุ โดยอัตราการเปลี่ยนความเข้มของลำรังสีเป็นไปตามสมการต่อไปนี้

$$\frac{dI}{I} = -\mu dx \quad (2.7)$$

โดย μ เป็นค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงเส้นมีหน่วยเป็นส่วนกลับของความหนา เช่น $1/\text{cm}$ และขึ้นกับความหนาแน่นของวัสดุนั้น ดังนั้นจึงกำหนดให้ μ_m เป็นสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวล (mass attenuation coefficient) ซึ่งเป็นค่าคงที่ที่ไม่ขึ้นกับคุณสมบัติของวัสดุ และสัมพันธ์กับค่า μ ดังนี้

$$\mu_m (\text{cm}^2 / \text{gm}) = \mu (\text{cm}^{-1}) / \rho (\text{g} / \text{cm}^3) \quad (2.8)$$

ในที่นี้ ρ เป็นความหนาแน่นของวัสดุมีหน่วยเป็น gm/cm^3 ทำให้ μ_m มีหน่วยเป็น cm^2/gm จากสมการที่ 2.7 สามารถเขียนใหม่เป็น

$$\frac{dI}{I} = -\mu_m \rho dx \quad (2.9)$$

จากสมการที่ 2.9 สามารถเขียนในรูปสมการลดทอนความเข้มรังสีได้เป็น

$$I = I_0 e^{(-\mu_m \rho x)} \quad (2.10)$$

ความเข้มของรังสีเอกซ์ลดลง เนื่องจากรังสีเอกซ์มาทำอันตรกิริยากับวัสดุตัวกลาง และเกิดอันตรกิริยาหลักทั้งสาม คือ โฟโตอิเล็กตริกเอฟเฟกต์ คอมป์ตันเอฟเฟกต์ และแพร์โปรดักชัน นั้นค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนที่กล่าวถึง จึงเป็นค่าสัมประสิทธิ์รวมเนื่องจากอันตรกิริยาทั้งสาม ถ้า μ_e , μ_c และ μ_p หมายถึงสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงเส้น อันเนื่องมาจากอันตรกิริยาโฟโตอิเล็กตริก เอฟเฟกต์ คอมป์ตันเอฟเฟกต์ และแพร์โปรดักชัน ตามลำดับ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงเส้นรวม และค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลรวมสามารถ แสดงได้ดังสมการที่ 2.11 และ 2.12

$$\mu = \mu_e + \mu_c + \mu_p \quad (2.11)$$

$$\mu_m = \frac{\mu_e}{\rho} + \frac{\mu_c}{\rho} + \frac{\mu_p}{\rho} \quad (2.12)$$

จะเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์แต่ละค่าขึ้นอยู่กับค่าความแตกต่างของพลังงานรังสีเอกซ์ และคุณสมบัติการลดทอนความเข้มรังสีของตัวกลาง สำหรับการวัดรังสีอาศัยกระบวนการที่รังสีทำอันตรกิริยาภายในตัวกลาง และทำให้เกิดกระบวนการไอออไนเซชัน (ionization) และเอกซ์ไซเตชัน (excitation) สร้างคู่ของอิเล็กตรอน-โฮล หรือการเรืองแสงในกระบวนการตรวจวัดรังสีของหัววัดรังสีขึ้น

2.2 คุณสมบัติทางกายภาพของหัววัดรังสีแบบสารกึ่งตัวนำ

เมื่ออนุภาคนิวเคลียร์เคลื่อนเข้าสู่หัววัดรังสี พลังงานของรังสีก็จะถูกดูดกลืนในตัวกลางซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำบริเวณไวต่อรังสี แล้วทำให้เกิดปรากฏการณ์ไอออไนซ์ และเอกไซเตชันเกิดปริมาณคู่อิเล็กตรอน-โฮลขึ้น เนื่องจากพลังงานที่เข้ามาทำให้พันธะระหว่างอะตอมขาดออกจากกัน ถ้าประจุสามารถเคลื่อนที่ออกจากขั้วโลหะของหัววัดได้จะทำให้เกิดเป็นสัญญาณไฟฟ้าขึ้น ลักษณะและประสิทธิภาพของสัญญาณที่ได้ขึ้นอยู่กับคุณภาพของผลึก กล่าวคือ [5]-[6]

1. โครงสร้างของสารกึ่งตัวนำจะต้องมีความนำจำเพาะ (conductivity) คงที่ที่ค่าใดค่าหนึ่งเมื่อป้อนสนามไฟฟ้าให้กับหัววัด จะทำให้มีกระแสไหลผ่านหัววัดอย่างสม่ำเสมอ แต่ถ้าความนำจำเพาะมีค่าไม่คงที่ จะมีผลทำให้ประสิทธิภาพของหัววัดเสื่อมลง โดยการก่อให้เกิด noise หรือมีผลต่อประสิทธิภาพในการรวบรวมประจุ

2. สารกึ่งตัวนำที่มีบริเวณดักจับ (trap) และตำแหน่งที่ว่าง (localized sites) อื่นๆ อาจมีผลทำให้ประจุอิสระถูกจับหรือมีการสูญเสียพลังงานในระหว่างที่วิ่งผ่านรอยต่อของหัววัดได้ นั่นหมายความว่าขนาดของสัญญาณที่ได้ออกมาจะมีค่าลดลง

3. ความสม่ำเสมอและความสมบูรณ์ของผลึก ถือได้ว่าควรเป็นคุณสมบัติขั้นพื้นฐานของสารกึ่งตัวนำ แต่ส่วนใหญ่แล้วมีทางเป็นไปได้ยากมาก

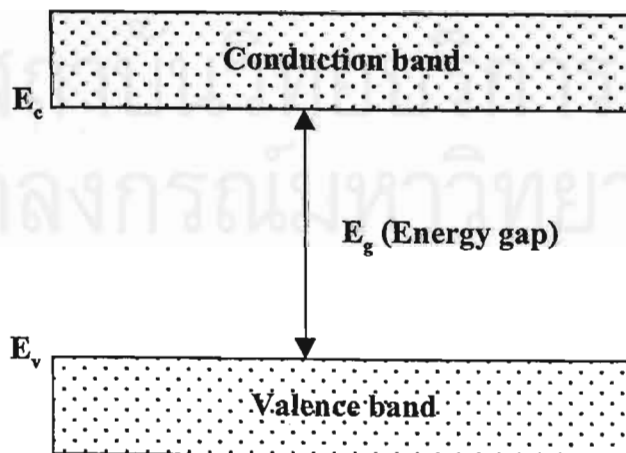
ตารางที่ 2.1 แสดงให้เห็นถึงพลังงานที่สูญเสียในการทำให้เกิดการไอออไนซ์ของอนุภาคนิวเคลียร์ ในสารประกอบกึ่งตัวนำบางชนิดรวมถึงค่าคุณสมบัติต่างๆ ที่เกี่ยวข้องเปรียบเทียบกับธาตุซิลิกอน (Si) และเจอร์เมเนียม (Ge)

ตารางที่ 2.1 แสดงพลังงานที่ใช้ในการเกิดไอออไนซ์ของสารประกอบกึ่งตัวนำบางชนิด พร้อมธาตุ Si และ Ge

สารประกอบหรือธาตุ	หมายเลขอะตอม	ช่องว่างพลังงาน (eV)	พลังงาน/ [*] อิเล็กตรอน-โฮล (eV)	ความหนาแน่น (g/cm ³)
GaAs	31, 33	1.42	4.2	5.35
Bi ₂ S ₃	83, 16	1.3	-	6.73
PbI ₂	82, 53	2.6	7.68	6.16
GaSe	31, 34	2.03	6.3	4.55
AlSb	13, 51	1.62	5.05	4.26
CdSe	48, 34	1.75	-	5.74
Si	14	1.115	3.62	2.33
Ge	32	0.75	2.98	5.32

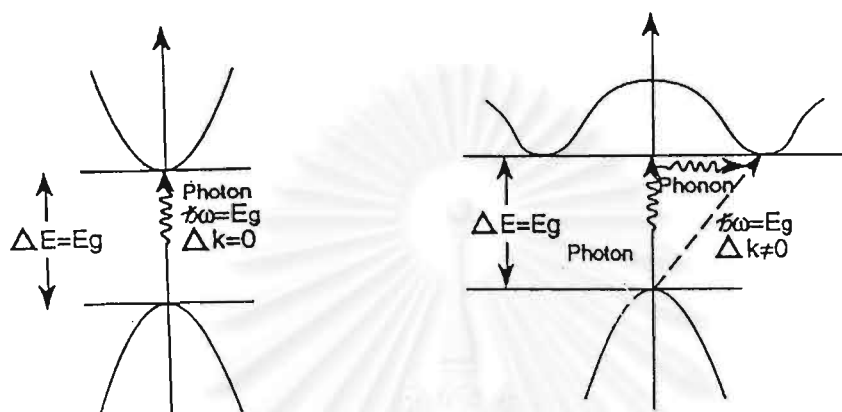
2.2.1 แถบพลังงาน (Energy gap)

แถบพลังงานในสารกึ่งตัวนำเกิดขึ้นจากระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในอะตอมแต่ละตัวรวมตัวกันเป็นผลึก ในอะตอมที่แยกกันระดับพลังงานของอิเล็กตรอนมีค่าแน่นอนโดยดูจากผลสเปกตรัมของอะตอมเกี่ยวกับการปลดปล่อยและการดูดกลืนช่วงพลังงานที่แคบ จากกฎของ Pauli (Pauli's principle) [4] แสดงให้เห็นว่าอิเล็กตรอนแต่ละตัวมีค่าควันตัมนับเบอว์ (quantum number) ไม่เท่ากันทำให้ระดับพลังงานของอะตอมมีการเปลี่ยนแปลง จึงทำให้ระดับพลังงานของแต่ละอะตอมในผลึกเรียงตัวกันเป็นแถบพลังงานขึ้นทั่วไปในผลึกนั้น แถบพลังงาน E_g (energy gap) หรือเรียกแถบพลังงานต้องห้าม (forbidden energy gap) ดังแผนผังแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่แสดงไว้ใน รูปที่ 2.6 แสดงถึงแถบพลังงานสูงสุดของอะตอมที่มีอิเล็กตรอนบรรจุอยู่เรียกว่า แถบวาเลนซ์ (valence band) และแถบพลังงานต่ำสุดที่ไม่มีอิเล็กตรอนอยู่เลยเรียกว่า แถบคอนดักชัน (conduction band) ทั้งสองแยกจากกันด้วยพลังงาน E_g นอกจากนั้นแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำมีทั้งแถบพลังงานแบบตรง (direct band gap) และแถบพลังงานแบบไม่ตรง (indirect band gap) ดังแสดงลักษณะแถบพลังงานแบบตรงและแบบไม่ตรงของสารกึ่งตัวนำ ในรูป 2.7 (ก) และรูป 2.7 (ข) ตามลำดับ [4] เมื่อให้ระดับพลังงานของอิเล็กตรอนเป็นฟังก์ชันของเลขคลื่น (wave number) ของอิเล็กตรอน ด้วยย่อว่า k จากรูปแกนนอนคือเลขคลื่น k และแกนตั้งคือพลังงานของอิเล็กตรอน โดยทั่วไปจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ของสารกึ่งตัวนำแถบทุกชนิดอยู่ที่ตำแหน่ง $k = 0$ ส่วนจุดต่ำสุดของแถบคอนดักชันจะอยู่ที่ $k = 0$ หรือไม่เท่ากับ 0 ก็ได้ ดังนั้นถ้าแถบวาเลนซ์และแถบคอนดักชันอยู่ที่ตำแหน่ง k เดียวกันจะเป็นแถบพลังงานแบบตรง ถ้า k คนละตำแหน่งจะเป็นแถบพลังงานแบบไม่ตรง



รูปที่ 2.6 ลักษณะแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ

สารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิ 0 K จะไม่เกิดการนำไฟฟ้า เนื่องจากในกรณีนี้ไม่มีอิเล็กตรอนอยู่ในแถบคอนดักชันส่วนในแถบวาเลนซ์มีอิเล็กตรอนอยู่เต็ม เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ผลจากความร้อนทำให้เกิดการกระตุ้นอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ขึ้นไปอยู่ในแถบคอนดักชัน สารกึ่งตัวนำจึงมีพาหะในการนำกระแสได้



(ก) ลักษณะแถบพลังงานแบบตรง
ของสารกึ่งตัวนำ

(ข) ลักษณะแถบพลังงานแบบไม่ตรง
ของสารกึ่งตัวนำ

รูปที่ 2.7 แสดงลักษณะแถบพลังงานแบบตรงและแบบไม่ตรงของสารกึ่งตัวนำ

2.2.2 การเคลื่อนที่ของประจุ (Charge Transport)

ที่อุณหภูมิห้อง (300 K) ในกรณีสารกึ่งตัวนำชนิดบริสุทธิ์ (intrinsic) จะมีอิเล็กตรอนเข้าไปอยู่ในแถบคอนดักชันมีจำนวนเท่ากับโฮลในแถบวาเลนซ์ เมื่อมีสนามไฟฟ้าอิเล็กตรอนและโฮล จะเคลื่อนที่ไปตามอิทธิพลของสนามไฟฟ้า ทำให้เกิดกระแสขึ้น ดังสมการที่ 2.13 ความหนาแน่นกระแสที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและการเคลื่อนที่ของโฮลจะมีค่า [5]

$$J = \xi q (n\mu_n + p\mu_p) \quad (2.13)$$

- ในที่นี้ μ_n คือ ความคล่องตัวของอิเล็กตรอนในแถบคอนดักชัน
 μ_p คือ ความคล่องตัวของโฮลในแถบวาเลนซ์
 n คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในแถบคอนดักชัน
 p คือ ความหนาแน่นของโฮลในแถบวาเลนซ์
 q คือ ค่าประจุไฟฟ้า

2.2.3 สิ่งเจือปนและความไม่สมบูรณ์ของโครงสร้างของสสาร (Impurities and Lattice Defects)

สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (intrinsic semiconductor) หมายถึงสารกึ่งตัวนำที่ยังไม่มีการเติมสารเจือปนจะมีจำนวนโฮลและอิเล็กตรอนเท่ากัน (โดยประมาณ) ส่วนสารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์ (extrinsic semiconductor) จะมีจำนวนโฮลและอิเล็กตรอนไม่เท่ากัน ทั้งนี้เนื่องมาจากมีการเติมสารเจือปน เพื่อให้เป็นสารกึ่งตัวนำมีภาวะเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี หรือชนิดเอ็น สารเจือปนเหล่านี้จะเข้าไปแทรกหรือแทนที่อะตอมสารกึ่งตัวนำ ทำให้ผลึกเปลี่ยนโครงสร้างไปบ้าง มีผลทำให้เกิด localized energy levels ขึ้นในช่องว่างพลังงาน localized centers อาจจะทำให้อิเล็กตรอนแก่แถบคอนดักชันหรือรับอิเล็กตรอนมาจากแถบวาเลนซ์ก็ได้ และพลังงานที่ใช้ก็มีค่าน้อยกว่าช่องว่างพลังงาน นอกจากนี้ยังส่งผลเสียต่อการเคลื่อนตัวของอิเล็กตรอน โฮลจะตกค้างระหว่างเคลื่อนที่เข้าหาอิเล็กโตรด มีผลต่อประสิทธิภาพของกึ่งตัวนำที่ใช้เป็นตัวกลางของหัววัตรง์

2.2.4 การปรับตัวเข้าสู่ภาวะสมดุล (Equilibrium Condition)

เมื่อรังสีกระทบสารกึ่งตัวนำแล้วมีการดูดกลืนพลังงาน ทำให้เกิดพาหะส่วนเกินทำให้สถานะสมดุลเสียไป หลังจากนั้นพาหะส่วนเกินจะเข้าสู่ภาวะสมดุลใหม่โดยการรวมตัวกับพาหะชนิดตรงข้าม ถ้าให้ Δn_0 เป็นจำนวนอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นเนื่องจากการดูดกลืนพลังงานที่เวลา $t = 0$ จำนวนอิเล็กตรอนที่เวลา t ใดๆ หลังจากสิ้นสุดการถ่ายโอนพลังงานของรังสี แล้วสามารถหาได้จากสมการ [6]

$$\Delta n = \Delta n_0 \exp(-t / \tau_r) \quad (2.14)$$

ในที่นี้ τ_r คือ เวลาของการรวมตัว (recombination time)

การปรับตัวของพาหะในสารกึ่งตัวนำจะปรับตัวภายใต้เงื่อนไขที่ต่างกันไป กรณีการปรับตัวของพาหะภายใต้สนามไฟฟ้า พาหะจะเคลื่อนตัวเข้าหาขั้วอิเล็กโตรด ดังนั้นการลดจำนวนพาหะจะเป็นแบบเอ็กโปเนนเชียล เวลาที่ใช้ไปนี้เรียกว่า dielectric relaxation time (τ_0) ซึ่งเป็นไปตามสมการ 2.15 2.16 และ 2.17

$$\tau_0 = CR \quad (2.15)$$

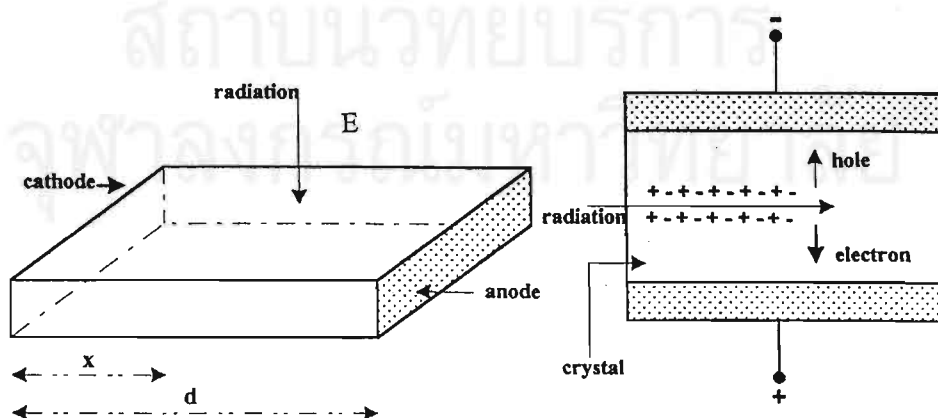
$$= \frac{\epsilon A}{d} \cdot \frac{\rho d}{A} \quad (2.16)$$

$$\tau_0 = \rho\epsilon \quad (2.17)$$

- ในที่นี้ C คือ ความจุของสารกึ่งตัวนำ
 R คือ ความต้านทานของสารกึ่งตัวนำ
 ρ คือ ความต้านทานจำเพาะ
 A คือ พื้นที่ภาคตัดขวาง
 d คือ ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโตรด
- ส่วน τ_0 คือ dielectric relaxation time
 ϵ คือ ค่าคงที่ dielectric

2.2.5 การเกิดไอออไนเซชันและการรวบรวมประจุ (Ionization and Charges Collection)

การอธิบายถึงกระบวนการทางกายภาพของหัววัดรังสีแบบสารกึ่งตัวนำ ให้สมมุติว่าหัววัดรังสีเป็นวัสดุเนื้อเดียวกันตลอด มีสนามไฟฟ้าคงที่ตลอดปริมาตรดังรูปที่ 2.8 กล่าวคือขั้วอิเล็กโตรดอยู่ห่างกันด้วยระยะทาง d และสนามไฟฟ้า ξ ในทุกๆ ตำแหน่งมีค่าเท่ากับ V/d เมื่อ V คือความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วทั้งสอง รังสีมีพลังงาน E



รูปที่ 2.8 ภาพแสดงลักษณะทางกายภาพของหัววัดรังสี

ตกกระทบหัววอร์ริงส์ ก่อให้เกิดจำนวนอิเล็กตรอน-โฮลจำนวน N ($N = \frac{E}{W}$) คู่ที่ระยะห่าง x ห่างจากขั้วลบ ($W =$ พลังงานที่ใช้ในการสร้างคู่อิเล็กตรอน-โฮล 1 คู่ (ionization-energy)) [6]

พลังงานที่ทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลควรมีค่าน้อย จะได้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลจำนวนมาก การเคลื่อนที่ของพาหะไม่ว่าจะเป็นอิเล็กตรอนหรือโฮลควรเคลื่อนที่ได้รอบทิศทางและเป็นอิสระ การเคลื่อนที่ภายใต้สนามไฟฟ้า จะขึ้นกับค่าผลคูณของค่าความคล่องตัวกับสนามไฟฟ้า การเคลื่อนที่บางครั้งจะมีการชนกับผลึกสารกึ่งตัวนำทำให้การเคลื่อนที่ไม่เป็นระเบียบ บางครั้งเกิดการรวมตัวกับพาหะชนิดตรงข้าม เกิดการสูญเสียพาหะ ดังนั้นเวลาชีวิต (life time) ของพาหะที่เกิดขึ้นจะนับตั้งแต่เวลาที่เกิดจนกระทั่งจนถูกดูดกลืนไปในตัวกลางในรูปของการรวมตัว (recombination) ค่าเวลาขึ้นอยู่กับชนิดของสารกึ่งตัวนำและความสมบูรณ์ของผลึกที่นำมาทำเป็นหัววอร์ริงส์ พาหะจะเคลื่อนที่ผ่านถึงอิเล็กโตรดหรือไม่นั้นก็ขึ้นอยู่กับระยะทางที่มันสามารถเคลื่อนไปถึงอิเล็กโตรดก่อนเกิดการรวมตัว ถ้าระยะทางนี้มากกว่าระยะห่างของขั้วอิเล็กโตรด โอกาสที่พาหะจะเคลื่อนถึงขั้วอิเล็กโตรดจะมีมากขึ้น ดังนั้นเมื่อทราบค่าเวลาชีวิตของพาหะและความคล่องตัวของพาหะ ก็สามารถทราบระยะทางเคลื่อนที่ของพาหะได้จากสมการ

$$S_e = \mu_e \xi \tau_e \quad (2.18)$$

$$S_p = \mu_p \xi \tau_p \quad (2.19)$$

ในที่นี้ S คือ ระยะทางเคลื่อนที่ของพาหะ

μ_e คือ ความคล่องตัวของอิเล็กตรอน

μ_p คือ ความคล่องตัวของโฮล

τ_e คือ ค่าเวลาชีวิตของอิเล็กตรอน

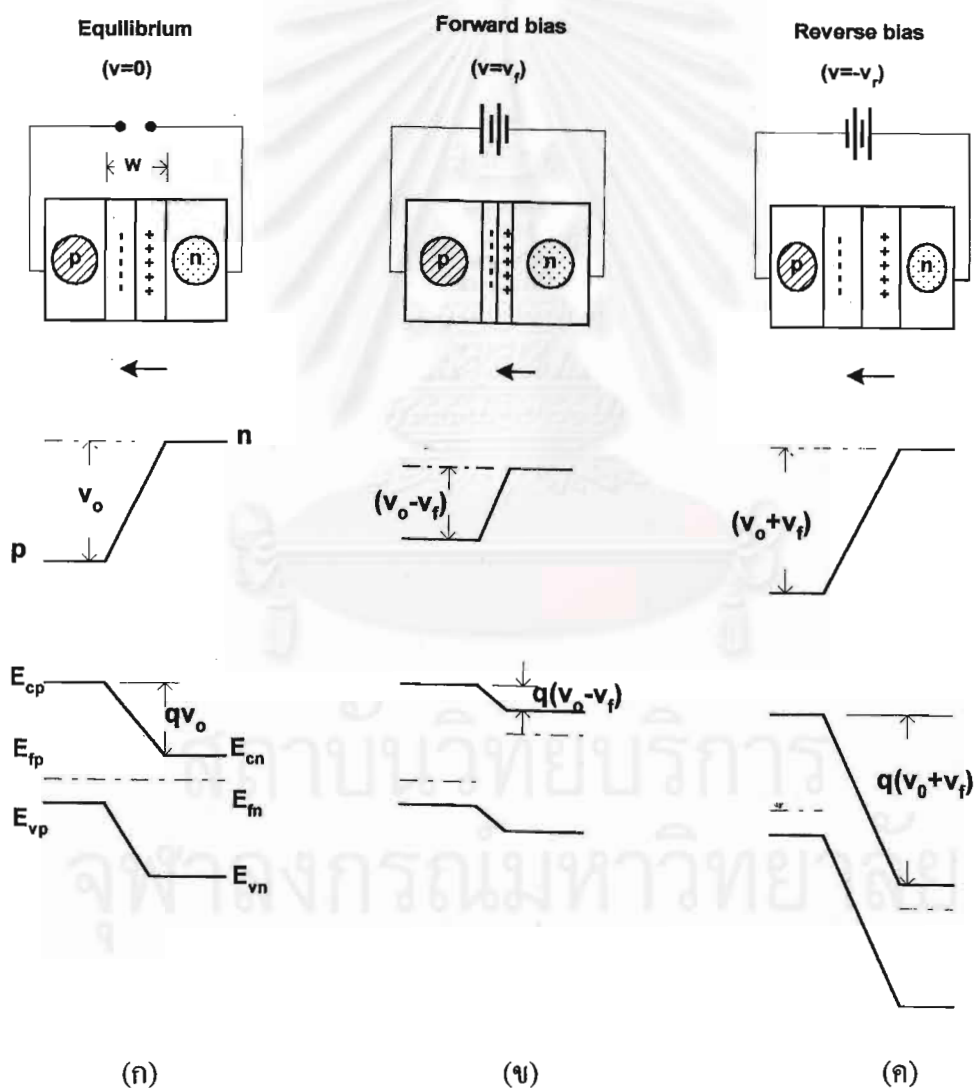
τ_p คือ ค่าเวลาชีวิตของโฮล

ξ คือ สนามไฟฟ้า

ระยะทางเคลื่อนที่ของพาหะเป็นผลคูณของค่าความคล่องตัว และเวลาชีวิตของพาหะที่เคลื่อนที่ภายใต้สนามไฟฟ้าที่คงที่ ดังนั้นสารกึ่งตัวนำที่จะสร้างเป็นหัววอร์ริงส์ที่ดีควรมีค่าผลคูณที่สูง

2.2.6 หลักการทำงานของรอยต่อ p-i-n

หลักการทำงานของหัววัดรังสี GaAs ชนิดรอยต่อ p-i-n ในแง่การทำงานถือว่าเป็นโฟโตดีเทคเตอร์ (photodetector) หรืออาจจะกล่าวได้ว่า หัววัดรังสีนี้มีโครงสร้างเป็นโฟโตไดโอด (photodiode) ซึ่งสามารถอธิบายด้วยทฤษฎีของรอยต่อ p-n ทั่วไป [5]-[7] โดยพิจารณาจากรูปที่ 2.9 (ก) (ข) และ (ค) เป็นการอธิบายลักษณะของรอยต่อ p-n คือ (ก) ที่สภาวะสมดุล (equilibrium) (ข) ไบอัสตาม (forward bias) และ (ค) ไบอัสย้อน (reverse bias)



รูปที่ 2.9 ลักษณะรอยต่อพี-เอ็น (ก) ที่สภาวะสมดุล (ข) ไบอัสตาม และ(ค) ไบอัสย้อน

โดยรอยต่อ p-n เกิดจากชั้นสารพีและสารเอ็นมาเชื่อมกัน ทำให้เกิดความแตกต่างของความหนาแน่นของพาหะประจุไฟฟ้า โสลมีความหนาแน่นสูงในสารพีก็จะแพร่ซึมผ่านรอยต่อเข้าสู่สารเอ็น อิเล็กตรอนมีความหนาแน่นสูงในสารเอ็นก็จะแพร่ซึมผ่านรอยต่อเข้าสู่สารพีเช่นกัน โสลและอิเล็กตรอนที่แพร่ซึมจะรวมตัวกับพาหะข้างมาก (majority carriers) ซึ่งมีในสารกึ่งตัวนำนั้น เป็นเหตุให้ความหนาแน่นของพาหะข้างมาก ในสารพีและสารเอ็นที่บริเวณใกล้ขั้วรอยต่อลดลงต่ำกว่าค่าความหนาแน่นสมดุล ในสารพีที่บริเวณรอยต่อจึงมีโซลหนาแน่นน้อยกว่าไอออนแอกเซพเตอร์ (acceptor ions) และกลายเป็นบริเวณที่มีประจุไฟฟ้าลบ ส่วนในสารเอ็นที่บริเวณหัวต่อก็มีอิเล็กตรอนหนาแน่นน้อยกว่าไอออนโดเนอร์ (donor ions) และกลายเป็นบริเวณที่มีประจุไฟฟ้าบวก ในเนื้อสารกึ่งตัวนำบริเวณหัวต่อจึงมีประจุบวกและประจุลบค้างอยู่เช่นที่แสดงในรูปที่ 2.9 (ก) ซึ่งบริเวณย่านที่มีประจุนี้เรียกชื่อว่า บริเวณประจุค้าง (space-charge region) บริเวณย่านแปรเปลี่ยน (transition region) หรือบริเวณปลดคพาหะ (depletion region)

ประจุค้าง (space-charges) ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นที่บริเวณรอยต่อ สนามไฟฟ้านี้มีทิศทางพุ่งผ่านหัวต่อจากสารเอ็นสู่สารพี ดังนั้นจึงก่อให้เกิดกระแสพัดพา (drift current) ของโซลและอิเล็กตรอนขึ้น โสลจะถูกสนามไฟฟ้าพัดพาให้ไหลผ่านรอยต่อจากสารเอ็นสู่สารพี ส่วนอิเล็กตรอนจะถูกพัดพาไปในทิศทางตรงกันข้าม โสลและอิเล็กตรอนที่ถูกพัดพานี้จึงไหลผ่านรอยต่อสวนทางกันกับโซลและอิเล็กตรอนที่แพร่ซึมผ่านรอยต่อ ปริมาณสุทธิของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านรอยต่อจึงเป็นผลรวมทางพีชคณิตของกระแสพัดพาและกระแสแพร่ซึมภายใต้ภาวะสมดุลความร้อน (thermal equilibrium) **ปริมาณสุทธิของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านรอยต่อย่อมต้องเป็นศูนย์** สมการของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจึงมีค่า

$$J_p + J_n = 0 \quad (2.20)$$

ในที่นี้ J_p คือ ความหนาแน่นของกระแสโซล

J_n คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน

จากสมการ 2.20 สามารถเขียนได้เป็นสมการความหนาแน่นพาหะประจุนี้

$$J_p = q(\mu_p p \xi - D_p \frac{dp}{dx}) = 0 \quad (2.21)$$

$$J_n = q(\mu_n n \xi - D_n \frac{dn}{dx}) = 0 \quad (2.22)$$

- ในที่นี้ μ_p คือ ความคล่องตัวของโฮล
 μ_n คือ ความคล่องตัวของอิเล็กตรอน
 D_p คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ซึมของโฮล
 D_n คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ซึมของอิเล็กตรอน
 ξ คือ สนามไฟฟ้า
 n คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในแถบคอนดักชัน
 p คือ ความหนาแน่นของโฮลในแถบวาเลนซ์

การพิจารณาค่าศักย์ไฟฟ้า (contact potential) [5] ในสภาวะสมดุลที่ผิวสัมผัสของรอยต่อ p-n ที่เกิดจากสนามไฟฟ้าตลอดบริเวณประจุค้างหรือบริเวณปลอดพาหะ เมื่อพิจารณาการแพร่ซึมของอิเล็กตรอนจากด้านเอ็นไปด้านพีทั้งอออนแบบผู้ให้ (donor ions) ในขณะเดียวกัน การแพร่ซึมของโฮลก็จะทั้งอออนแบบผู้รับ (acceptor ions) ไว้ จึงทำให้เกิดย่านประจุค้างแบบลบทางด้านพีและย่านประจุค้างแบบบวกทางด้านเอ็น สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่มีทิศทางจากประจุบวกไปประจุลบมีทิศทางด้านกระแสแพร่ และทำให้เกิดกระแสศักพาดังแสดงในรูปที่ 2.9 (ก) ซึ่งมีทิศทางจากด้านเอ็นไปด้านพี สนามไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นจนทำให้กระแสสุทธิเป็นศูนย์ที่สภาวะสมดุลคือผลบวกของกระแสศักพาและกระแสแพร่ซึมเท่ากับศูนย์ ทำให้สนามไฟฟ้าเกิดขึ้นที่ย่านแปรเปลี่ยนคือบริเวณ W และมีศักย์ไฟฟ้า V_0 คร่อม W เมื่อ V_0 คือศักย์ไฟฟ้า หรือค่าแรงดันภายใน (built in voltage) ขณะเดียวกัน V_0 จะแยกแถบพลังงานดังรูปที่ 2.9 (ก) โดยด้านพีจะสูงกว่าด้านเอ็นเป็นจำนวน qV_0 การที่แถบพลังงานถูกแยกออกก็เพื่อรักษาระดับเฟอร์มิให้คงที่เพื่อทำให้กระแสสุทธิเป็นศูนย์ ดังนั้นศักย์ไฟฟ้าที่ผิวสัมผัสที่สภาวะสมดุลได้จากสมการ 2.23

$$V_0 = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_a N_d}{n_i^2} \quad (2.23)$$

ขณะเดียวกันสามารถหาความกว้างบริเวณปลอดพาหะได้จากสมการ

$$W = \left[\frac{2\varepsilon V_0}{q} \left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.24)$$

- ในที่นี้ V_0 คือ ศักย์ไฟฟ้าที่ผิวสัมผัส
 W คือ ความกว้างเขตปลอดพาหะ
 q คือ ประจุไฟฟ้า
 ε คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก
 N_a คือ ความหนาแน่นของแอกเซพเตอร์
 N_d คือ ความหนาแน่นของโดเนอร์
 K คือ ค่าคงตัวโบลต์ซมันน์
 T คือ อุณหภูมิ K

จากความกว้างเขตปลอดพาหะสามารถหาค่าความลึกของบริเวณเขตปลอดพาหะในแต่ละด้านของเขตปลอดพาหะของรอยต่อได้จากสมการ

$$X_p = \frac{W}{1 + N_a/N_d} \quad (2.25)$$

$$X_n = \frac{W}{1 + N_d/N_a} \quad (2.26)$$

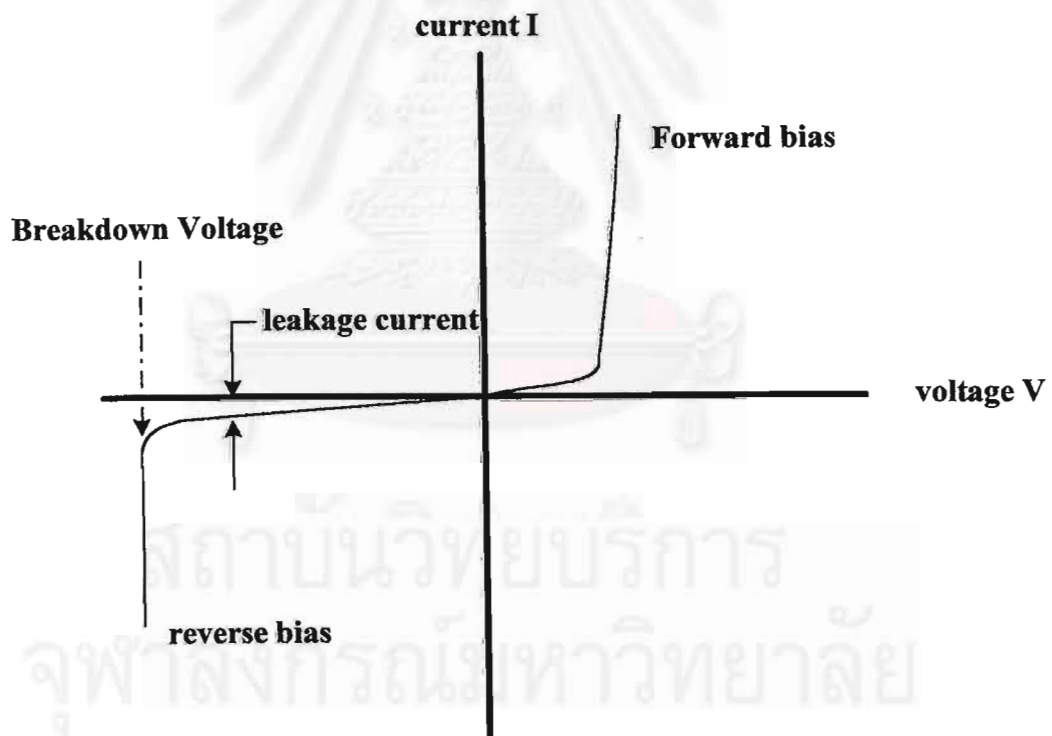
- ในที่นี้ X_p คือ ความลึกสู่ด้าน p
 X_n คือ ความลึกสู่ด้าน n

เมื่อพิจารณารอยต่อในสภาวะไบอัสตาม (V_p) โดยด้านพีจะมีศักย์ไฟฟ้าเป็นบวก ส่วนด้านเอ็นมีศักย์ไฟฟ้าเป็นลบ ดังรูปที่ 2.9 (ก) ส่วนไบอัสย้อน (V_r) นั้นด้านพีมีศักย์ไฟฟ้าเป็นลบ ส่วนด้านเอ็นมีศักย์ไฟฟ้าเป็นบวก ดังรูปที่ 2.9 (ค) พบว่า ศักย์ไฟฟ้าที่ผิวสัมผัสขณะไบอัสตามจะลดลงเท่ากับ $V_0 - V_f$ เป็นผลทำให้สนามไฟฟ้าย่อยต่อลดลง ส่วนศักย์ไฟฟ้าที่ผิวสัมผัสขณะไบอัสย้อนจะเพิ่มขึ้นเท่ากับ $V_0 + V_f$ เป็นผลทำให้สนามไฟฟ้าย่อยต่อเพิ่มขึ้น

จากการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความกว้างของเขตปลอดพาหะ เนื่องจากสนามไฟฟ้าสัมพันธ์กับปริมาณประจุบริเวณเขตปลอดพาหะ ทำให้ค่า W ลดเมื่อไบอัสตาม W เพิ่มเมื่อไบอัสย้อน ดังนั้นจากสมการ 2.24 2.25 และ 2.26 เมื่อแทนค่าศักย์ไฟฟ้าที่ผิวสัมผัสของไบอัสตาม ($V_0 - V_p$) และไบอัสย้อน ($V_0 + V_p$) สามารถหาค่า W , X_p และ X_n ได้

พิจารณาการไหลของกระแสเมื่อรอยต่อถูกไบอัสตามจะเกิดกระแสจากพาหะข้างมาก โดยไหลจากด้านพีแพร์สู่ด้านเอ็น และอิเล็กตรอนจากด้านเอ็นแพร์สู่ด้านพี ส่วนกรณีไบอัสย้อนจะเกิดกระแสจากพาหะข้างน้อยไหลผ่านรอยต่อ และเมื่อพิจารณาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของรอยต่อแสดงดังรูป 2.10 โดยพิจารณาจากสมการ 2.27 ซึ่งเป็นสมการไดโอดรอยต่อ p-n ทั่วไปคือ

$$I = I_0(e^{qV/kT} - 1) \quad (2.27)$$



รูปที่ 2.10 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน (IV Curve)

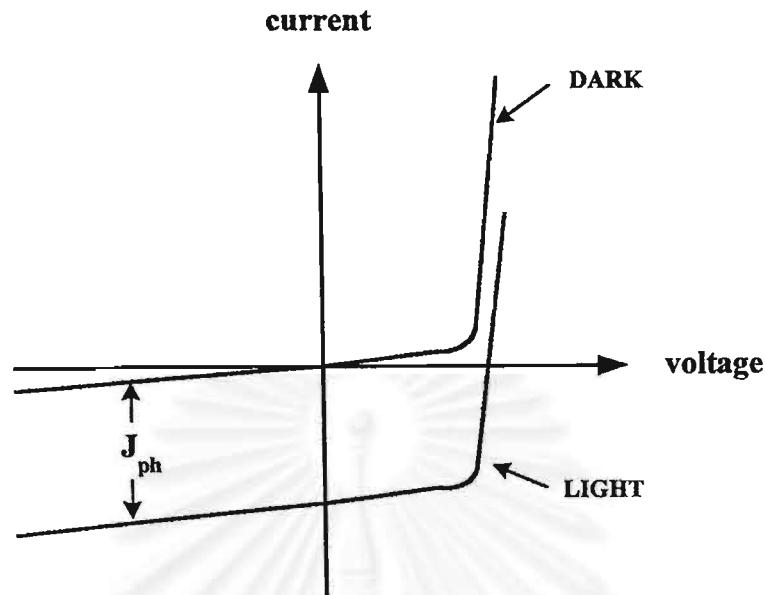
จากรูปที่ 2.10 แคนนอนคือค่าแรงดัน ไบอัสที่ตกคร่อมรอยต่อและแกนตั้งคือค่ากระแสที่ไหลผ่านรอยต่อ จากสมการที่ (2.24) V คือค่าแรงดันที่ไบอัส อาจเป็นไบอัสตามหรือไบอัสย้อนแล้วแต่กรณี และสามารถหาค่า I_0 จากสมการ 2.28 คือ

$$I_0 = Aqn_i^2 \left(\frac{D_h}{L_h n_n} + \frac{D_e}{L_e P_p} \right) \quad (2.28)$$

ในที่นี้ I_0	คือ กระแสอิ่มตัวย้อนกลับ
A	คือ พื้นที่รอยต่อ
n_i	คือ ความหนาแน่นของพาหะภายในชั้น intrinsic
D_h	คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของโฮล
D_e	คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของอิเล็กตรอน
n_n	คือ ความหนาแน่นอิเล็กตรอนด้านเอ็น
p_p	คือ ความหนาแน่นโฮลที่ด้านพี
L_e	คือ ระยะการแพร่ของอิเล็กตรอน
L_h	คือ ระยะการแพร่ของโฮล

เมื่อพิจารณารอยต่อ p-n ในสภาวะถูกฉายด้วยโฟตอนแสงในขณะไบอัสย้อน เฉพาะบริเวณชั้นปลอดพาหะจะเกิดกระแสพาหะอิเล็กตรอนและโฮลซึ่งเป็นพาหะข้างน้อย ขณะเดียวกันพาหะข้างน้อยที่เกิดขึ้นที่ด้านพีคืออิเล็กตรอน และที่ด้านเอ็นคือโฮล จะแพร่ซึ่งมายังบริเวณปลอดพาหะ แล้วถูกกวาดด้วยสนามไฟฟ้า กระแสที่เกิดจากโฟตอนแสงแสดงได้ดังรูปที่ 2.11 ลักษณะกระแส-แรงดันขณะรับแสง ไม่ขึ้นกับแรงดัน V_f ที่ป้อนให้กับรอยต่อ ที่กล่าวมาเป็นพื้นฐานการทำงานของโฟโตไดโอดรอยต่อ p-n โดยทั่วไป โดยเน้นการทำงานที่มีการป้อนแรงดันในลักษณะไบอัสย้อน

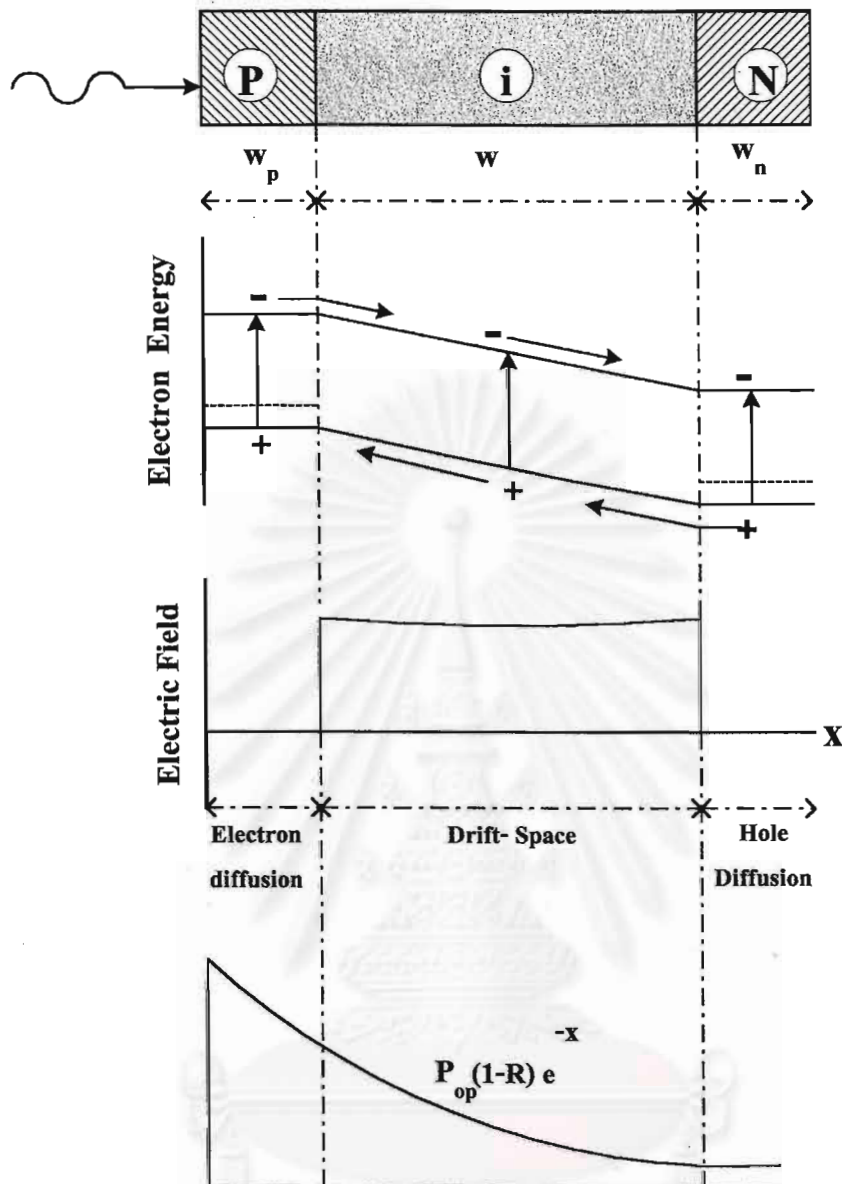
เมื่อพิจารณาลักษณะการทำงานของโฟโตไดโอดที่มีรอยต่อ p-i-n ขณะรอยต่อได้รับพลังงานจากโฟตอนจะเกิดกระบวนการเปลี่ยนพลังงานโฟตอนเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า ทั้งนี้เพื่อให้พลังงานของโฟตอนถูกกลืนภายในบริเวณปลอดพาหะของรอยต่อให้มากที่สุด จึงเพิ่มส่วนของชั้น i (intrinsic) ให้อยู่ระหว่างชั้นพีและชั้นเอ็น โดยชั้น i สามารถปรับเปลี่ยนความหนาให้เหมาะสมได้ ทำให้ทราบค่า w (ความกว้างบริเวณปลอดพาหะ) ซึ่งลักษณะของชั้น i ในทางทฤษฎีเป็นชั้นผลึกที่



รูปที่ 2.11 ลักษณะกระแส-แรงดันขณะรับแสงของรอยต่อ p-n

มีความบริสุทธิ์สูง คือเป็นบริเวณที่ไม่ควรมีสิ่งเจือปน ทำให้มีคุณสมบัติที่มีค่าความต้านทานจำเพาะสูง (high resistivity) แต่ในทางปฏิบัติทำได้ยาก ส่วนใหญ่จะเป็นชั้นผลึกชนิดเอ็นหรือชนิดพีที่มีสารเจือปนในจำนวนที่น้อยที่สุด เพื่อให้มีค่าความต้านทานจำเพาะสูง ขณะที่มีการแผ่รังสีแบบไบอัสย้อน จะต้องให้ศักย์ไฟฟ้าผิวสัมผัสหรือแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมบริเวณนี้ให้มากที่สุด ดังนั้นชั้นพีและชั้นเอ็นจะเป็นชั้นผลึกที่มีการเจือสารเจือปนในปริมาณสูง ทำให้มีค่าความต้านทานจำเพาะต่ำ มีสภาพเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี จึงมีแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมน้อยหรือแทบไม่มีเลย (โดยทั่วไปจะเขียนรอยต่อในลักษณะ $p^+ - i - n^+$) ลักษณะการทำงานอธิบายได้ดังรูปที่ 2.12 (ก) (ข) (ค) และ (ง) ซึ่งเป็นแผนภาพการทำงานของโฟโตไดโอด รอยต่อ p-i-n [7], [11] รูป 2.12 (ก) ภาพตัดขวางโครงสร้างรอยต่อ p-i-n รูป 2.12 (ข) ลักษณะแถบพลังงานของรอยต่อ p-i-n ขณะดูดกลืนโฟตอนภายใต้ไบอัสย้อน รูป 2.12 (ค) สนามไฟฟ้าบริเวณปลอดพาหะ (W) และรูป 2.12 (ง) การดูดกลืนโฟตอนที่ระยะต่างๆ ภายในรอยต่อ p-i-n

จากรูปที่ 2.12 (ข) เมื่อโฟตอนที่มีพลังงานมากกว่าหรือเท่ากับช่องว่างแถบพลังงาน E_g กระแทบพื้นโฟโตไดโอด (p-i-n photodiode) ทางด้านพี จะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอนโฮลขึ้นในชั้นต่างๆ ทั้งในชั้น p ชั้น i และชั้น n พาหะที่เกิดขึ้นจากโฟตอนแสงจะกลายเป็นกระแสไฟฟ้าด้วยกลไก 2 วิธีคือ



รูปที่ 2.12 แผนภาพแสดงการทำงานของโฟโตไดโอดรอยต่อ p-i-n

(ก) ภาพตัดขวางโครงสร้างรอยต่อ p-i-n

(ข) ลักษณะแถบพลังงานของรอยต่อ p-i-n ขณะดูดกลืนโฟตอนภายใต้ไบอัสย้อน

(ค) สนามไฟฟ้าบริเวณปลอดพาหะ (W)

(ง) การดูดกลืนโฟตอนที่ระยะต่างๆ ภายในรอยต่อ p-i-n

1) ถ้าพาหะอิสระเหล่านี้สามารถไหลออกสู่วงจรภายนอกได้ ก็จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหล พาหะอิสระที่เกิดในชั้น i จะมีบทบาทในการกลายเป็นกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตได้มากที่สุด โดยพาหะจากชั้น i จะถูกหักพาให้ไหลออกสู่วงจรภายนอกด้วยปรากฏการณ์พัดพาด้วยศักย์ไฟฟ้า

สัมผัสหรือสนามไฟฟ้า อิเล็กตรอนจะไหลออกทางชั้น n และโฮลจะไหลออกทางชั้น p กระแสไฟฟ้าที่ได้ในลักษณะเช่นนี้เรียกว่า "ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าพัดพา" J_{dr} (drift current) ชั้น i นี้เรียกว่าชั้นปลอดพาหะ

2) โฮลที่เกิดในชั้น n ถ้ามีระยะทางการแพร่ซึม (diffusion length) ที่ไกลเพียงพอ ก็จะแพร่ซึมจากชั้น n ผ่านเข้าสู่ชั้น i และไหลไปสู่ชั้น p ได้ และกลายเป็นความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าแพร่ซึม J_{diff} (diffusion current) ในทำนองเดียวกันอิเล็กตรอนที่เกิดในชั้น p ถ้ามีระยะทางการแพร่ซึมที่ไกลเพียงพอ ก็จะแพร่ซึมจากชั้น p เข้าสู่ชั้น n ได้ และจะกลายเป็นกระแสไฟฟ้าแพร่ซึมด้วย

ดังนั้นความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า J_{total} ที่เกิดขึ้นในพินโพโตไดโอดจึงเป็นผลรวมของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าพัดพา J_{dr} และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแพร่ซึม J_{diff} ดังสมการ

$$J_{total} = J_{dr} + J_{diff} \quad (2.29)$$

ถ้าพิจารณาให้โฟตอนถูกดูดกลืนน้อยที่สุดในชั้น p ความหนาแน่นของชั้น p จะต้องมีค่าน้อยกว่า ส่วนกลับของสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนแสงในชั้น p มาก ทำให้โฟตอนถูกดูดกลืนในชั้น i เป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นอัตราการเกิดคู่อิเล็กตรอนโฮลในชั้น i จะเป็นไปตามสมการ 2.30

$$G_{(x)} = \Phi_0 \alpha e^{-\alpha x} \quad (2.30)$$

ในที่นี้ $G_{(x)}$ คืออัตราการเกิดคู่อิเล็กตรอนโฮล
 Φ_0 คือโฟตอนฟลักซ์ที่ตกกระทบต่อหน่วยพื้นที่
 α คือสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง
 x คือระยะทางความลึกของการดูดกลืนโฟตอน

โดย
$$\Phi = \frac{P_{op}(1-R)}{Ah\nu} \quad (2.31)$$

ในที่นี้ P_{op} คือกำลังแสงขาเข้า
 R คือสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงที่ผิว
 A คือพื้นที่หน้าตัดของรอยต่อ p-i-n

ดังนั้นจากความสัมพันธ์ของสมการ 2.30 และ 2.31 สามารถหาค่าความหนาแน่นกระแส
 พัดพาได้จาก สมการที่ 2.32 ซึ่งเป็นกระแสพัดพาที่เกิดขึ้นในชั้น i

$$J_{dr} = -q \int_0^w G(x) dx \quad (2.32)$$

$$= q\Phi_0(1 - e^{-\alpha w}) \quad (2.33)$$

w คือความหนาของชั้น i

กรณีกระแสแพร่ซึม I_{diff} จะพิจารณากระแสแพร่ซึมของโฮลในชั้น n (ละเลยกระแสแพร่ซึม
 ที่เกิดขึ้นชั้น p ได้กล่าวไว้ในตอนต้น) ซึ่งหาได้จากสมการความต่อเนื่องของโฮลที่สภาวะสมดุล
 เกิดการเกิดพาหะด้วยแสงและการรวมตัวของคู่อิเล็กตรอน-โฮล ดังสมการ 2.34

$$D_h \frac{\partial^2 p_n}{\partial x^2} - \frac{p_n - p_{n0}}{\tau_h} + G(x) = 0 \quad (2.34)$$

ในที่นี้ D_h คือสัมประสิทธิ์การแพร่ซึมของโฮล

τ_h คือเวลาอายุของโฮล

p_{n0} คือความหนาแน่นของโฮลในสภาวะสมดุลอุณหภูมิตั้ง

สมการที่ 2.34 สามารถหาได้โดยกำหนดเงื่อนไขคือ

$$p_n = p_{n0} \quad \text{ที่} \quad x = \infty$$

$$p_n = 0 \quad \text{ที่} \quad x = w$$

จะได้
$$p_n(x) = p_{n0} - (p_{n0} + Ce^{-\alpha w})e^{(w-x)/L_h} + Ce^{-\alpha x} \quad (2.35)$$

โดย $L_p = \sqrt{D_h \tau_h}$ และ $C = \left(\frac{\Phi_0}{D_h} \right) \frac{\alpha L_h^2}{1 - \alpha^2 L_h^2}$

ดังนั้นความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแพร่ซึมของโฮลที่จะไหลจากชั้น n ไปทางด้านชั้น i จึงมีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned} J_{diff} &= -qD_h \left(\frac{\partial p_n}{\partial x} \right)_{x=w} \\ &= -q\Phi_0 \frac{\alpha L_h}{1 + \alpha L_h} e^{-\alpha w} - qP_{n0} \frac{D_h}{L_h} \end{aligned} \quad (2.36)$$

ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าทั้งหมดที่เกิดในพินโฟโตไดโอดจึงหาได้จากผลรวมของสมการที่ (2.33) และ (2.36) คือ

$$J_{tot} = -q\Phi_0 \left(1 - \frac{e^{-\alpha w}}{1 + \alpha L_h} \right) - qP_{n0} \frac{D_h}{L_h} \quad (2.37)$$

โดยทั่วไป P_{n0} มีค่าน้อย ทำให้เราสามารถตัดพจน์ที่สองทางขวามือออกได้ จึงทำให้เห็นได้ว่ากระแสไฟฟ้าของพินโฟโตไดโอดแปรผันตรงกับจำนวนของโฟตอนต่อพื้นที่ที่ตกกระทบพินโฟโตไดโอด และนิยามของประสิทธิภาพควอนตัม η (quantum efficiency) ของพินโฟโตไดโอดคือ อัตราส่วนของจำนวนประจุไฟฟ้าเอาต์พุตต่อจำนวนโฟตอนอินพุต นั่นคือ

$$\eta = \frac{J_{total} / q}{P_{op} / Ah\nu} = (1 - R) \left(1 - \frac{e^{-\alpha w}}{1 + \alpha L_h} \right) \quad (2.38)$$

จากสมการที่ 2.38 ถ้าต้องการให้โฟโตไดโอดมีค่า η สูงๆ ค่า R ต้องมีค่าน้อยๆ เพิ่มความหนาแน่นของ w ของชั้น i จะทำให้ $e^{-\alpha w}$ มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ถ้า w มีค่ามากเกินไปจะทำให้พาหะต้องใช้เวลาในการเดินทางมากขึ้นกว่าจะผ่านชั้น i ส่งผลให้ความเร็วในการตอบสนองลดลง เวลาของพาหะที่ใช้ในการเดินทางเรียกว่า transit time (t_t) หรือ drift time ภายใต้กระแสพัลส์ t_t มีค่าตามสมการ 2.39 ส่วนเวลาที่ใช้ในการแพร่ซึม (diffusion time) (t_d) มีค่าตามสมการ 2.40

$$t_t = \frac{x}{v_{sat}} \quad (2.39)$$

ในที่นี้ x คือ ระยะทางการเคลื่อนที่

v_{sat} คือ ความเร็วอิ่มตัว (saturation velocity) โดย $v_{sat} = \mu\xi$ และ $\xi = V/W$

$$t = \frac{x^2}{4D} \quad (2.40)$$

ในที่นี้ D คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ซึมของพาหะ

จากโครงสร้างของรอยต่อจะพบว่าความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ W หรือบริเวณชั้น i จะทำให้ความจุไฟฟ้า (junction capacitance) ของรอยต่อขณะไบอัสย้อนลดลง ขณะเดียวกันยังเพิ่มค่าแรงดันพังทลาย (breakdown voltage) สูงขึ้นกว่ารอยต่อ p-n ธรรมดา ซึ่งความจุไฟฟ้าจะแปรผกผันกับความกว้างบริเวณปลอดพาหะดังสมการที่ 2.41 [8]

$$C = \frac{\epsilon A}{W} \quad (2.41)$$

ในที่นี้ A คือ พื้นที่รอยต่อ

W คือ ความกว้างบริเวณปลอดพาหะ

ϵ คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของสารกึ่งตัวนำ

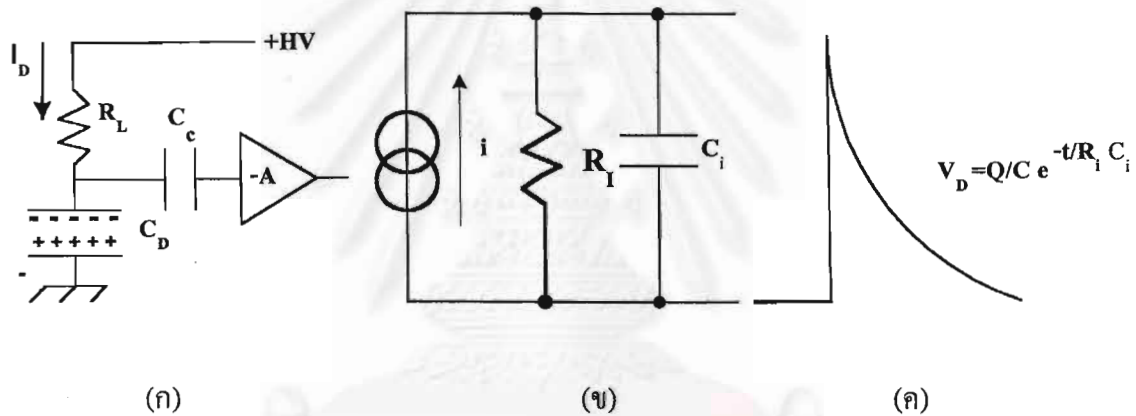
ที่กล่าวมาเป็นหลักการทำงานของหัววัดรังสีที่มีรอยต่อ p-i-n โดยหัววัดรังสีดังกล่าวจะสร้างจากวัสดุแกลเลียมอาร์เซไนด์ซึ่งเป็นสารประกอบกึ่งตัวนำ

2.3 การวัดพลังงานรังสีเอกซ์

พลังงานรังสีถูกดูดกลืนภายในตัวกลาง ตัวกลางในที่นี้คือสารกึ่งตัวนำ บริเวณชั้นปลอดพาหะเกิดกระบวนการไอออนไนเซชันสร้างคู่อิเล็กตรอน-โฮลขึ้น ซึ่งแปรผันโดยตรงกับพลังงานของรังสี จึงสามารถวัดพลังงานรังสีได้จากขนาดของสัญญาณไฟฟ้าในรูปสัญญาณพัลส์ ที่มีขนาดศักย์ไฟฟ้าหรือความสูงของพัลส์เป็นสัดส่วนกับพลังงาน ผ่านระบบวิเคราะห์ความสูงของพัลส์ ซึ่งจะคัดเลือกความสูงของพัลส์ด้วยการเปรียบเทียบศักย์ไฟฟ้าในแต่ละระดับพลังงานที่เวลาในการคัดเลือกเท่าๆ กันทุกระดับความสูง ทำให้ได้สเปกตรัมของพลังงานรังสี

2.3.1 ลักษณะสัญญาณพัลส์

สัญญาณพัลส์เกิดจากการสะสมปริมาณประจุไฟฟ้าที่เกิดหลังจากเกิดอันตรกิริยาระหว่างพลังงานรังสีกับหัววัดรังสีบนค่าความจุของหัววัดรังสี [12] อันเป็นกลไกของการเปลี่ยนพลังงานจลน์ของอนุภาครังสี (ในที่นี้คือโฟตอน) เป็นสัญญาณพัลส์ของหัววัดรังสี ดังรูปที่ 2.13 (ก) (ข) และ (ค) แสดงการเกิดสัญญาณพัลส์นิวเคลียร์ รูป 2.13 (ก) วงจรของหัววัดรังสี รูป 2.13 (ข) วงจรสมมูลของหัววัดรังสี และรูป 2.13 (ค) สัญญาณพัลส์ของหัววัดรังสี จากรูป 2.13 (ข) แสดงให้ทราบว่าหัววัดรังสีทุกชนิดมีโครงสร้างเทียบเท่าตัวเก็บประจุ มีขั้วอิเล็กโตรดประกอบสองด้านเหมือนคาโนดและคาโทด หลังการไบอัสจะมีสนามไฟฟ้าอยู่ เมื่อหัววัดเกิดอันตรกิริยากับรังสีทำ



รูปที่ 2.13 แสดงการเกิดสัญญาณพัลส์นิวเคลียร์ (ก) วงจรของหัววัดรังสี

(ข) วงจรสมมูลของหัววัดรังสี และ (ค) สัญญาณพัลส์ของหัววัดรังสี

ให้หัววัดรังสีเหมือนแหล่งจ่ายกระแส ปริมาณประจุที่สะสมบนค่าความจุจะทำให้เกิดสัญญาณพัลส์ศักย์ไฟฟ้าตกร้อมตัวต้านทานที่ขนานในวงจรสมมูล ซึ่งเป็นไปตามสมการ

$$V_D = \frac{Q}{C_i} \exp^{-t/R_i \cdot C_i} \quad (2.42)$$

ในที่นี้ Q คือ ประจุที่เกิดหลังอันตรกิริยารังสี

C_i คือ ค่าความจุในวงจรสมมูล

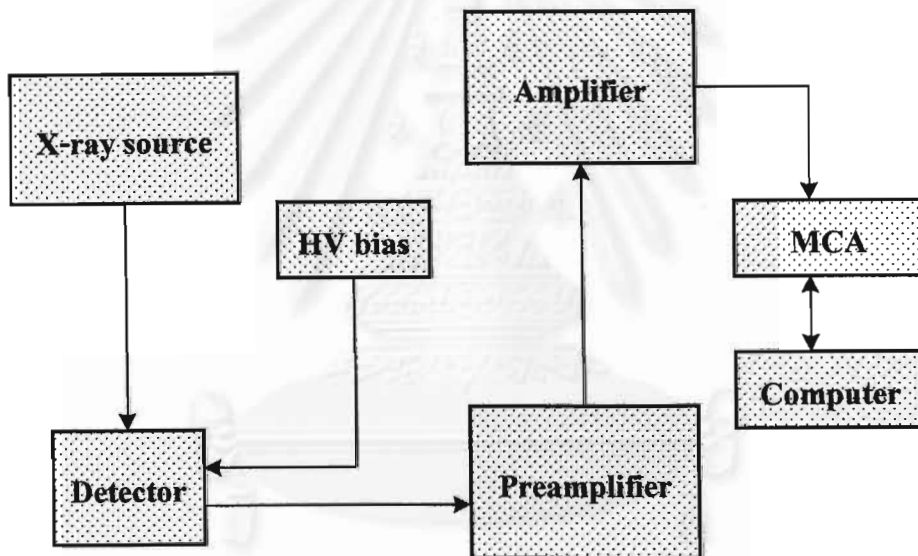
R_i คือ ค่าความต้านทานในวงจรสมมูล

t คือ เวลา

สัญญาณพัลส์จากหัววัดรังสีก่อนจะเข้าสู่ระบบวิเคราะห์ความสูงพัลส์ เพื่อหาสเปกตรัมของพลังงาน จะต้องมีการปรับเปลี่ยนสัญญาณ ซึ่งจะได้อธิบายในส่วนของขั้นตอนการวัดพลังงานรังสี

2.3.2 กระบวนการวัดพลังงานของรังสี

ขั้นตอนในการวัดพลังงานรังสีประกอบไปด้วยอุปกรณ์ต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.14 เป็นแผนภาพแสดงส่วนประกอบในการวัดรังสี ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.14 แผนภาพแสดงขั้นตอนการวัดพลังงานของรังสี

หัววัดรังสี หัววัดที่ใช้เป็นหัววัดที่สร้างจากวัสดุสารกึ่งตัวนำ ประเภทสารประกอบกึ่งตัวนำของแกลเลียมอาร์เซไนต์ชนิดรอยต่อ p-i-n ซึ่งเป็นโครงสร้างของไดโอด การใช้งานหัววัดรังสีจะทำงานในสถานะไบอัสย้อนกลับ (Reverse bias) ดังนั้นจำเป็นต้องรู้ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่สามารถป้อนให้กับหัววัดรังสี โดยไม่ทำให้หัววัดรังสีเสียหาย และเป็นตัวกำหนดพิกัดสูงสุดของความเข้มสนามไฟฟ้า และความกว้างของเขตปลอดพหะ แรงดันพังทลาย (breakdown voltage) ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ 2.43 [8]

$$V_{BD} = E_{BD} X_i \quad (2.43)$$

ในที่นี้ x_i คือ ความหนาของชั้น i

E_{BD} คือ ความเข้มสนามไฟฟ้า หรือค่า break down field สำหรับ GaAs มีค่า $= 4 \times 10^5$ V/cm

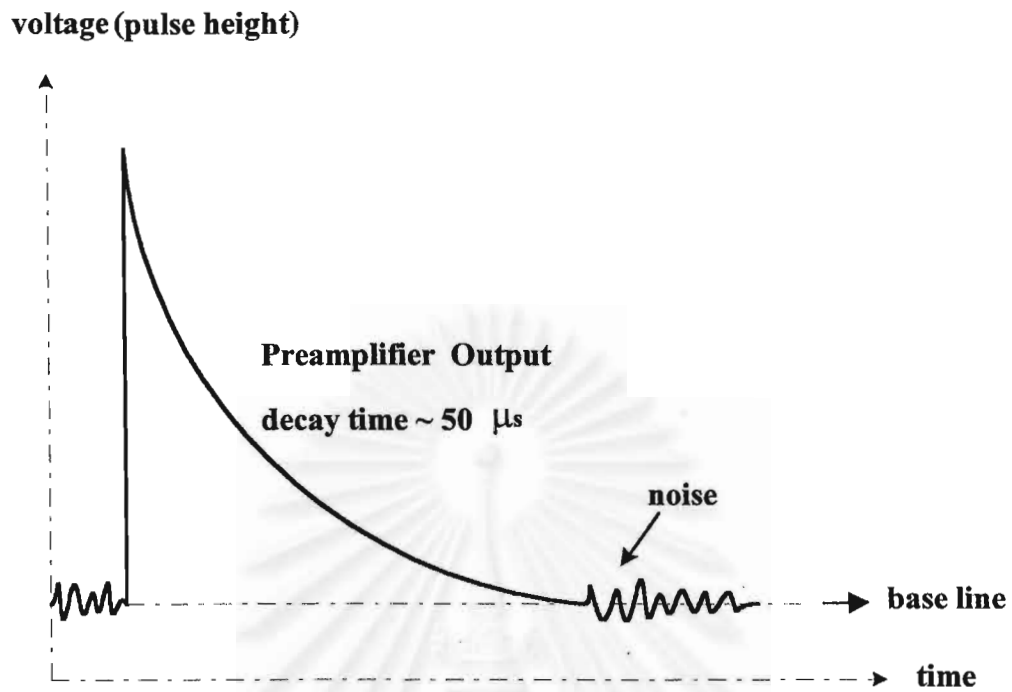
แหล่งจ่ายศักดาไฟฟ้าสูง (high voltage power supply) เป็นอุปกรณ์ที่ให้ศักดาไฟฟ้าแก่หัววัดรังสี โดยป้อนแรงดันในลักษณะ reverse bias เพื่อให้เกิดสนามไฟฟ้าบริเวณที่เกิดอันตรกิริยากับพลังงานรังสี สนามไฟฟ้าจะทำหน้าที่กวาดคู่อิเล็กตรอน-โฮล ทำให้เกิดเป็นสัญญาณพัลส์ จากตารางที่ 2.2 เป็นตัวอย่างค่าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหัววัดรังสีชนิดต่างๆ

ตารางที่ 2.2 แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหัววัดรังสี

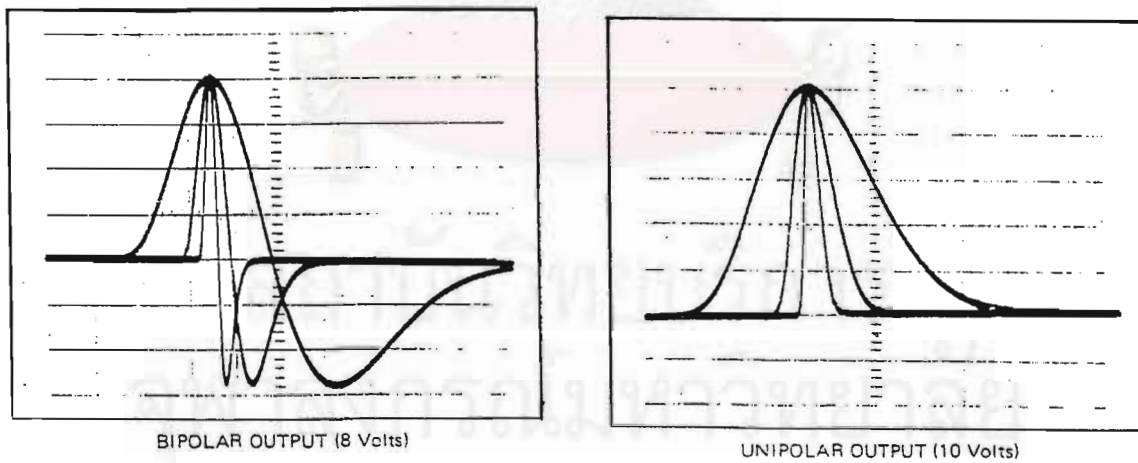
ชนิดหัววัด	แรงดันไฟฟ้า (V)
Ionization counters	HV < 1000
Proportional counters	500 < HV < 1500
GM counters	800 < HV < 2400
Semiconductors detectors	
Surface-barrier	HV < 100
Li-drifted	100 < HV < 3000

ภาคขยายส่วนหน้า (preamplifier) สัญญาณพัลส์ที่เกิดจากหัววัดรังสีบางชนิดจะมีขนาดเล็กและมีสัญญาณรบกวนแฝงมาด้วย preamplifier จะขยายสัญญาณให้มีขนาดความสูงของพัลส์ให้ได้มาตรฐาน และขจัดสัญญาณรบกวน แล้วจึงส่งสัญญาณไปยังส่วนอื่นๆ ที่อยู่ห่างจากหัววัดรังสี จากรูปที่ 2.15 แสดงให้เห็นถึงสัญญาณที่ออกจากภาคขยายส่วนหน้า

ภาคขยายสัญญาณ (amplifier) จะทำหน้าที่ขยายสัญญาณจากภาคขยายสัญญาณส่วนหน้าให้สูงขึ้นอีก ซึ่งสัญญาณจะแรงพอที่จะวิเคราะห์ความสูงพัลส์ ในมาตรฐาน NIM (nuclear instrument modules) สัญญาณเชิงเส้นกำหนดไว้ที่ 0-10 โวลต์ พร้อมทั้งแต่งรูปสัญญาณให้เหมาะสม โดยผ่านกระบวนการกรองความถี่เพื่อให้ได้ S/N สูง ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพการวิเคราะห์สัญญาณพัลส์ที่เกิดจากหัววัดรังสีดีขึ้น ลักษณะของสัญญาณที่ออกจากภาคขยายสัญญาณมีหลายรูปแบบแสดงไว้ที่รูป 2.16

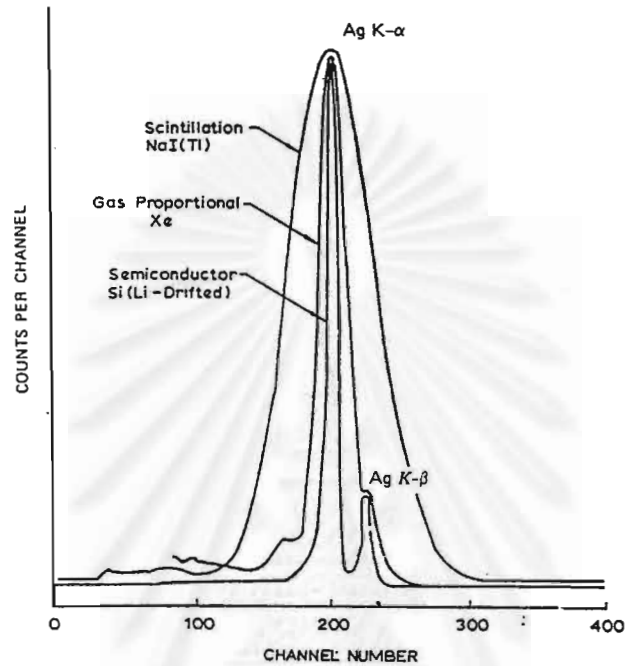


รูปที่ 2.15 สัญญาณที่ออกจากภาคขยายส่วนหน้า



รูปที่ 2.16 ลักษณะของสัญญาณที่ออกจากภาคขยายสัญญาณ ซึ่งมีค่า shaping time ต่างกัน
เปรียบเทียบกัน

เครื่องวิเคราะห์พลังงานแบบหลายช่อง (multichannel analyzer) เรียกทั่วไปว่า MCA ทำหน้าที่แจกแจงความสูงของพัลส์ที่เป็นสัดส่วนกับพลังงานของรังสีเอกซ์จากแหล่งกำเนิดรังสี รูปที่ 2.17 ภาพแสดงสเปกตรัมจากหัววัดชนิดต่างๆ ของรังสีเอกซ์



รูปที่ 2.17 ภาพแสดงสเปกตรัมจากหัววัดชนิดต่างๆ ของรังสีเอกซ์

จากรูปที่ 2.17 ตำแหน่งพีคของสเปกตรัมสามารถอ่านค่าพลังงานของอนุภาคนิวเคลียร์ได้บนแกน x ซึ่งเป็นช่องวิเคราะห์ (channel number) ซึ่งปรับเทียบกับค่าพลังงานของต้นกำเนิดรังสีมาตรฐาน และความสามารถในการแจกแจงพลังงานของระบบวิเคราะห์ (R) สามารถคำนวณได้ว่า

$$R = \frac{FWHM}{E} \quad (2.44)$$

เมื่อ FWHM = ความกว้างของพีคพลังงานบริเวณค่าครึ่งหนึ่งของอัตรานับรังสี
E = พลังงานที่อ่านค่า

หัววัดรังสีที่มีค่า FWHM แคบหมายถึงการเบี่ยงเบนของขนาดสัญญาณพัลส์จากการตรวจวัดรังสีมีค่าน้อย ซึ่งทำให้มีความสามารถในการแจกแจงพลังงานมีค่าสูงนั่นเอง

บทที่ 3

การสร้างหัวเว็ตรง์ลีชนิด GaAs p-i-n สำหรับเว็ตรง์ลีเอกซ์

ได้ทำการออกแบบหัวเว็ตรง์ลีที่มีโครงสร้างเป็นไดโอดชนิดรอยต่อ p-i-n จากวัสดุสารประกอบกึ่งตัวนำแกเลียมอาร์เซไนด์ โดยใช้เทคนิคการปลูกผลึกโดยวิธีเอพิแทกซีเฟสของเหลว [9]-[11] และเทคนิคการแพร์ซึม

3.1 การปลูกผลึกโดยวิธีเอพิแทกซีเฟสของเหลว (Liquid Phase Epitaxy)

การปลูกผลึกโดยใช้เตาเอพิแทกซีเฟสของเหลวแบบแนวนอนดังรูปที่ 3.1 ใช้เทคนิคการสไลด์ (sliding technique) เป็นระบบที่ประกอบด้วยเบ้าหลอม (Boat) แบบหลายเบ้า (multibin) ซึ่งทำจาก (graphite) ท่อแก้ว ระบบควบคุมอุณหภูมิ ชุดควบคุมความร้อนที่เคลื่อนที่ได้ ระบบเครื่องกรองก๊าซเพื่อให้ก๊าซมีความบริสุทธิ์ ระบบตรวจความชื้น (hygrometer) รูปที่ 3.2 แสดงลักษณะของเบ้าหลอมที่ทำจากวัสดุแกรไฟต์



รูปที่ 3.1 เตาปลูกผลึกโดยวิธีเอพิแทกซีเฟสของเหลวแบบแนวนอน
(Horizontal Liquid Phase Epitaxy)

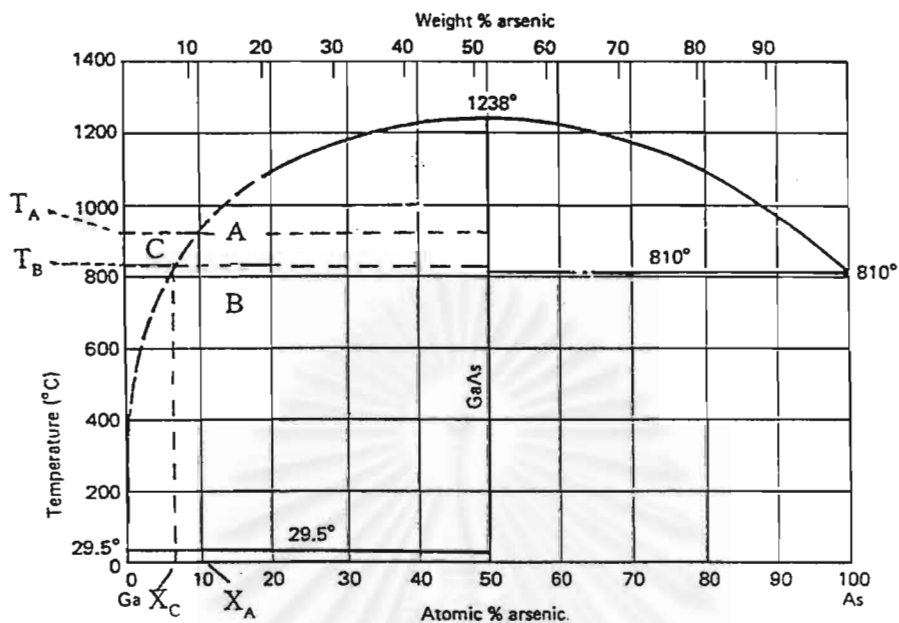


รูปที่ 3.2 เบบ้าหลอม (Boat) ที่ทำจากวัสดุแกร์ไฟต์

วิธีการปลูกผลึกเอพิแทกซ์เฟสของเหลวมี 2 วิธีคือ แบบทรานเซียนต์ (transient) และแบบสถานะอยู่ตัว (steady state)

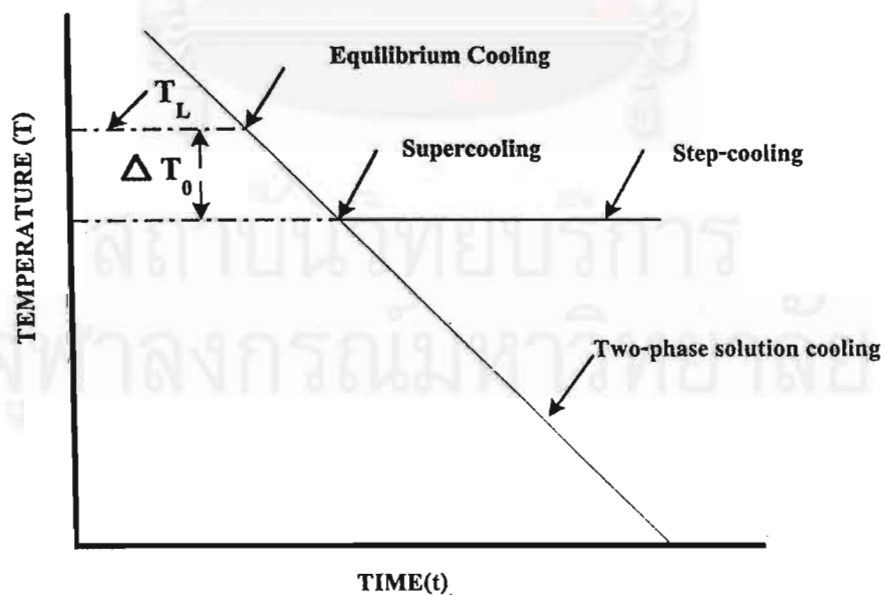
3.1.1 การปลูกผลึกแบบทรานเซียนต์

การปลูกผลึกแบบนี้ผลึกที่ต้องการจะปลูกเป็นผลึกจะถูกละลายในตัวทำละลาย เช่น การปลูกผลึก GaAs อาร์เซนิค (As) จะเป็นตัวถูกละลาย (solute) ขณะที่แกเลียม (Ga) เป็นตัวทำละลาย (solvent) สารละลายแกเลียม (Ga+As) จะถูกควบคุมให้มีอุณหภูมิต่ำลงในขั้นตอนการเกิดผลึกในกรณีของแกเลียมอาร์เซไนด์มีเฟสไดอะแกรมดังรูปที่ 3.3 ถ้าสารละลายซึ่งมีส่วนประกอบ X_A ที่อุณหภูมิ T_A ถูกนำมาสัมผัสกับผลึกฐาน (substrate) แกเลียมอาร์เซไนด์ซึ่งอยู่ที่อุณหภูมิ T_A ระบบจะไม่เปลี่ยนแปลง เนื่องจากจุด A อยู่เป็นเส้นโค้งของเฟสไดอะแกรมซึ่งสารละลายอิ่มตัวด้วยอาร์เซนิคพอดี แต่ถ้าอุณหภูมิต่ำลงไปที่จุด B สารละลายจะอิ่มตัวยิ่งยวด (supersaturate) เนื่องจากความสามารถในการละลาย (solubility) ของอาร์เซนิคลดลงตามอุณหภูมิ อาร์เซนิคส่วนเกินจะตกผลึก (precipitate) ในรูปของแกเลียมอาร์เซไนด์



รูปที่ 3.3 เฟสไดอะแกรมของแกเลียมอาร์เซไนด์ (Gallium Arsenide Phase Diagram)

การปลูกผลึกแบบทรานเซียนต์ยังแบ่งออกเป็น 4 วิธี ดังรูปที่ 3.4 จะแสดงแผนภูมิและเวลาในการปลูกผลึกเอพิแทกซ์ของวิธีต่างๆ



รูปที่ 3.4 แผนภูมิและเวลาในการปลูกผลึกเอพิแทกซ์ของวิธีต่างๆ

3.1.1.1 วิธี Equilibrium-Cooling

วิธีนี้เป็นวิธีการปลูกผลึกอีพิแทกซ์ด้วยการนำผลึกฐานเริ่มต้นไปสัมผัสกับสารละลายอิ่มตัว โดยสารละลายมีอุณหภูมิอิ่มตัวคงที่จากนั้นทำการลดอุณหภูมิของสารละลายลงด้วยอัตราคงที่ ซึ่งอัตราการเกิดผลึกของวิธีนี้สามารถคำนวณหาได้จากสมการ

$$d = \left(\frac{2}{C_s m} \right) \left(\frac{D_{As}}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} R t^{\frac{3}{2}} \quad (3.1)$$

- ในที่นี้ d คือ ความหนาของผลึก
 C_s คือ ความหนาแน่นของอะตอมของสารละลายอิ่มตัว
 m คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงของจำนวนอะตอมของสารละลาย
 D_{As} คือ ค่า Diffusivity ของ As ในสารละลาย Ga
 R คือ อัตราการลดลงของอุณหภูมิ
 t คือ เวลาที่ใช้ในการปลูกผลึก

3.1.1.2 วิธี Step-Cooling

วิธีนี้เป็นวิธีการปลูกผลึกอีพิแทกซ์ด้วยการนำผลึกฐานเริ่มต้นไปสัมผัสกับการละลายอิ่มตัวที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิอิ่มตัว ซึ่งเตรียมได้ด้วยการลดอุณหภูมิของสารละลายอิ่มตัวลงจากอุณหภูมิอิ่มตัว โดยมีอัตราการลดลงของอุณหภูมิตั้งจนถึงค่าอุณหภูมิที่ทำการปลูกผลึก จึงนำแผ่นผลึกฐานสัมผัสกับสารละลายนี้ ซึ่งอัตราการเกิดผลึกของวิธีนี้สามารถคำนวณหาได้จากสมการ

$$d = \left(\frac{2}{C_s m} \right) \left(\frac{D_{As}}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \Delta T t^{\frac{1}{2}} \quad (3.2)$$

โดยที่ $\Delta T = T_s - T_G$ ซึ่ง T_s คืออุณหภูมิอิ่มตัวของสารละลายและ T_G คืออุณหภูมิที่ปลูกผลึก

3.1.1.3 วิธี Supercooling

วิธีนี้เป็นการปลูกผลึกเอพิแทกซ์ที่มีลักษณะคล้ายคลึงกับวิธีของ Step cooling คือสารละลายจะถูกลดอุณหภูมิลงจากอุณหภูมิอิ่มตัวด้วยอัตราคงที่จนถึงอุณหภูมิที่ปลูกผลึก จึงนำผลึกฐานมาสัมผัสกับสารละลาย แต่ในการปลูกวิธีนี้อุณหภูมิต่ำลงยังคงดำเนินต่อไปเช่นเดียวกับวิธี Equilibrium Cooling ซึ่งจุดนี้เป็นข้อแตกต่างจากวิธี Step Cooling สำหรับอัตราการเกิดผลึกสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$d = \left(\frac{2}{C_s m} \right) \left(\frac{D_{As}}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\Delta T t^{\frac{1}{2}} + \frac{2}{3} R t^{\frac{3}{2}} \right) \quad (3.3)$$

3.1.1.4 วิธี Two-Phase-Solution Cooling

ด้วยวิธีการปลูกผลึกเอพิแทกซ์ของ LPE ที่ได้กล่าวมาแล้วนั้นมักมีปัญหาของการตกตะกอนผลึก (precipitates) ในเทคนิค Step Cooling และ Supercooling ในกรณีที่อุณหภูมิที่ปลูกผลึกมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิจึงได้มีการใส่ผลึก GaAs ที่มีปริมาณมากเกินพอในสารละลาย โดยปริมาณของ GaAs ที่เหลืออยู่นี้จะเป็นตัวควบคุมมิให้เกิดการตกตะกอน และอัตราการเกิดผลึกของเทคนิคนี้จะมีค่าต่ำที่สุด แต่ไม่สามารถที่คำนวณได้ทางทฤษฎี

จากสมการอัตราการเกิดผลึกของวิธี Supercooling นี้ แสดงให้เห็นว่าอัตราการเกิดผลึกของวิธี Supercooling เป็นผลรวมของอัตราการเกิดผลึกของวิธี Equilibrium Cooling และ Step Cooling ตามสมการข้างต้น ซึ่งวิธี Supercooling นี้จะมีข้อดีกว่าเทคนิคอื่นๆ คือคุณภาพของผลึกที่ปลูกนั้นมีคุณภาพดีเหมาะสำหรับใช้สร้างสิ่งประดิษฐ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีคุณภาพสูง รวมถึงสิ่งประดิษฐ์ทางแสง

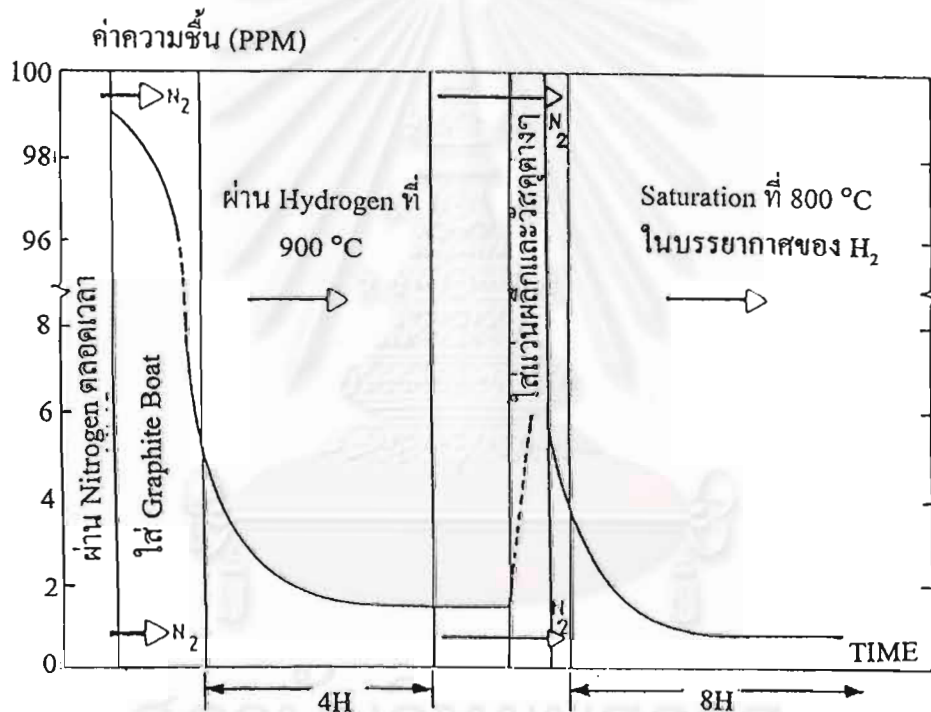
3.1.2 การปลูกผลึกแบบสถานะอยู่ตัว

พิจารณาจากรูป 3.3 ผลึกฐาน GaAs มีอุณหภูมิอยู่ที่ T_B และสารละลายของ Ga+As อยู่ที่ T_A (As อยู่ในรูปของก้อนผลึก GaAs) ซึ่งอุณหภูมิ T_A จะสูงกว่า T_B เนื่องจากความสามารถของการละลายลดลงตามอุณหภูมิ แกลเลียมจะละลายก้อนผลึก GaAs แพร่ไปยังผิวของผลึกฐานที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า เมื่อเข้าสู่สถานะอยู่ตัว

3.2 เงื่อนไขการปลูกผลึกโดยวิธีเอพิแทกซีเฟสของเหลว

3.2.1 ระดับความชื้นของก๊าซในระบบ

ค่าระดับความชื้นซึ่งวัดในหน่วยของ ppm (part per million) ควรมิต่ำกว่า 1 ppm เพื่อให้ได้ชั้นผลึกสารประกอบกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ ดังนั้นระบบจะต้องปิดสนิท มีก๊าซไนโตรเจนผ่านสู่ระบบตลอดเวลา และจะต้องเปลี่ยนเป็นก๊าซไฮโดรเจนที่บริสุทธิ์ตลอดช่วงการปลูกผลึก ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ระดับความชื้นในเตาเอพิแทกซีตลอดช่วงการปลูกผลึก

3.2.2 ชนิดของสารเจือปน

สารเจือปนที่ใช้อยู่มีทั้งสารเจือปนแบบผู้ให้ (donor) และสารเจือปนแบบผู้รับ (acceptor) โดยทั่วไปสารเจือปนที่ใช้จะต้องมีคุณสมบัติคือ มีค่า Vapor Pressure และ Distribution Coefficient ต่ำ เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิด Cross Contamination ระหว่างชั้นผลึก ตารางที่ 3.1 กล่าวถึงสารเจือปนที่ใช้ในการปลูกผลึกเอพิแทกซีเฟสของเหลว

ตารางที่ 3.1 ชนิดของสารเจือปนที่ใช้ในระบบ LPE

Dopant	S	Se	Te	Sn	C	Ge	Si	Be	Mg	Zn	Cr	Fe
Distribution coefficient k	0.3-0.5	0.1-0.3	0.059	0.08	0.2-0.8	0.01	0.14-2.0	3	0.1	0.4-1.9	5.7×10^{-4}	1×10^{-3}
Atomic weight	32.06	78.96	127.60	28.09	12.01	72.59	28.09	9.01	24.31	65.37	52	55.85
Type of dopant	n-type				n/p-type			p-type			Semi-insulating	

3.2.3 การเตรียมวัสดุ

ผลึกฐานแกลเลียมอาร์เซไนด์ก่อนจะทำการปลูกผลึกจำเป็นต้องเลือกแวนผลึกที่มี Critical Orientation ไม่เกิน 0.8° หรือมีค่าใกล้เคียง เพื่อให้ผิวของชั้นผลึกที่ปลูกเรียบปราศจากคลื่น (Terrace) ตลอดจนวัสดุต่างๆ ที่ใช้จะต้องมีการคำนวณน้ำหนักและล้างทำความสะอาดด้วยสารเคมีตามชนิดของวัสดุที่ใช้ ตารางที่ 3.2 และ 3.3 แสดงให้เห็นถึงชนิดของสารเคมีและขั้นตอนการเตรียมวัสดุต่างๆ และขั้นตอนการเตรียมสารเจือปนตามลำดับ

ตารางที่ 3.2 ขั้นตอนการเตรียมแวนผลึก GaAs

อันดับที่	ใช้สารละลาย	เวลา	จุดประสงค์
1	Trichloroethylene (เดือด)	5 นาที	ล้างคลาปโซมัน
2	Acetone (เดือด)	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-DI (75 °C)	20 วินาที	กัด oxide ที่ผิวและขจัดมันผิว
6	H ₂ O-DI		
7	HCl (50%)	> 5 นาที	กัด oxide ที่หลงเหลือ
8	H ₂ O-DI		
9	เป่าแห้งด้วยก๊าซ N ₂		

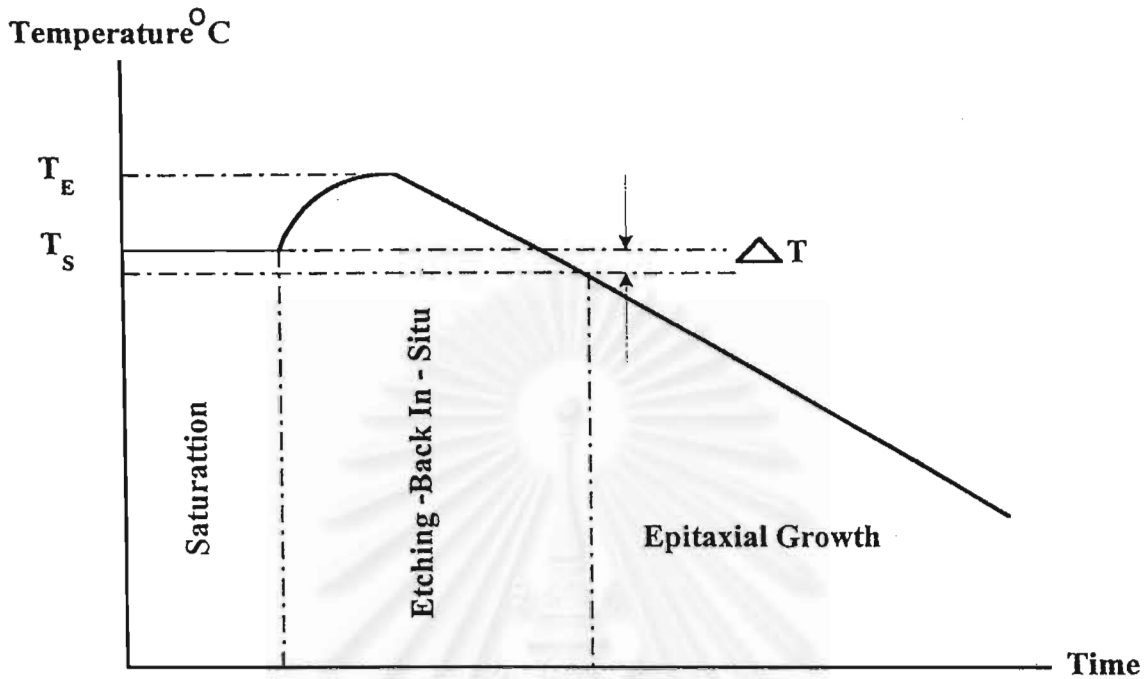
ตารางที่ 3.3 การเตรียมสารเจือด้วยการล้างด้วยสารเคมี

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

3.2.4 อุณหภูมิที่ใช้ในการปลูกผลึก

เอพิแทกซ์เฟสของเหลวเป็นรูปแบบหนึ่งของการปลูกผลึกด้วยสารละลาย หลักการก็คือ การควบคุมให้เกิดสภาวะอิ่มตัวยิ่งยวด (supersaturation) ในสารละลายที่อุณหภูมิหนึ่งๆ กล่าวคือ ทำให้ความเข้มข้นของตัวถูกละลาย (solute) (ซึ่งในกรณีของ GaAs ได้แก่ As) มีค่ามากกว่าความสามารถในการถูกละลาย (solubility) โดยตัวทำละลาย (solvent) ซึ่งในที่นี้ก็คือ Ga เมื่อในสารละลายมีผิวหน้าแว่นผลึกเคลื่อนที่เข้าไปสัมผัส ผิวหน้าแว่นผลึกนั้นจะเป็นแหล่งรองรับตัวถูกละลายส่วนเกิน ซึ่งสารละลายกำลังหาทางกำจัดเพื่อกลับคืนสู่สภาวะอิ่มตัวซึ่งเสถียรกว่า ในทางปฏิบัตินั้นสภาวะอิ่มตัวยิ่งยวดสามารถทำให้เกิดได้ โดยการทำให้สารละลายอยู่ในสภาวะอิ่มตัวก่อนที่อุณหภูมิใดอุณหภูมิหนึ่ง (T_s) หลังจากนั้นทำการลดอุณหภูมิลงอย่างสม่ำเสมอตามเส้นกราฟในรูปที่ 3.6 ตลอดช่วงเวลาการปลูกผลึก สำหรับการปลูกผลึกสามารถกระทำได้หลายวิธีการ ขึ้นกับความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิที่สารละลายอิ่มตัว (T_s) กับอุณหภูมิที่ผิวหน้าแว่นผลึกเริ่มสัมผัสกับสารละลาย (T) ($\Delta T = T_s - T$) ถ้า $\Delta T = 0$ และ $dT/dt < 0$ จะเรียกว่า supercooling ซึ่งเป็นวิธีที่เลือกใช้ในการปลูกผลึกครั้งนี้ เนื่องจากเป็นวิธีการที่ให้คุณภาพชั้นผลึกที่ดีที่สุด

ช่วงอุณหภูมิในรูปที่ 3.6 จะแบ่งเป็น 3 ช่วง ช่วงแรกเป็นการเตรียมสารละลายอิ่มตัวที่อุณหภูมิ T_s เวลาไม่ควรน้อยกว่า 4 ชม. ช่วงที่ 2 เรียกว่า etch-back in-situ ($dT/dt > 0$) เพื่อให้เกิดสภาวะ Undersaturation แก่สารละลาย คือ ตัวถูกละลายน้อยกว่าที่ควรจะเป็น ณ อุณหภูมินั้นๆ วัตถุประสงค์เพื่อใช้กัดแว่นผลึกก่อนทำการปลูกผลึกในช่วงที่ 3

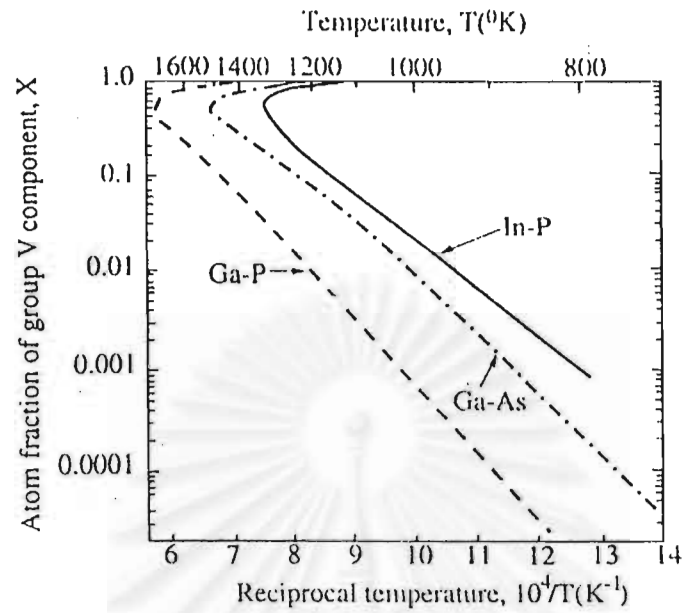


รูปที่ 3.6 เวลาที่ใช้ตลอดช่วงการปลูกผลึกเอพิแทกซ์สถานะของเหลว

3.2.5 การปลูกผลึกแกเลียมอาร์เซไนด์

โครงสร้างที่ออกแบบเพื่อการทดสอบทางรังสีเป็นโครงสร้างไดโอดรอยต่อ p-i-n ดังนั้นในการปลูกผลึกจึงต้องมีกระบวนการคำนวณหาปริมาณของสารต่างๆ ที่ใช้ในการปลูกชั้นผลึก GaAs ตามลักษณะโครงสร้างรอยต่อ p-i-n ที่ได้ออกแบบซึ่งจะได้กล่าวต่อไปสำหรับการคำนวณมีดังนี้

ชั้นผลึก GaAs (n) หรือชั้น i (ไม่มีสารเจือปน) การคำนวณในชั้นนี้จะไม่ต้องคำนวณหาปริมาณของสารเจือปนชนิดผู้ให้เนื่องจากการปลูกชั้นของ GaAs โดยเริ่มต้นจากชั้นสเตรตจะได้ชั้นของผลึกที่มีสารเจือปนชนิดผู้ให้โดยระดับของสารเจือขึ้นกับองค์ประกอบที่ใช้ในการปลูกผลึก ส่วนการคำนวณหาปริมาณของสารต่างๆ นั้นจะอาศัยกราฟในรูปที่ 3.7 ซึ่งเป็นกราฟของเศษส่วนอะตอม (atomic fraction) ของธาตุกลุ่มที่ 5 ของสารประกอบในหมู่ III-V พล็อตกับส่วนกลับของอุณหภูมิ สมมุติว่าอุณหภูมิของเตาที่ใช้ในการปลูกผลึกเป็น T (อุณหภูมิที่ใช้ในการปลูกผลึกในครั้งนี้อยู่ที่ 800 °C) จากกราฟจะได้เศษส่วนของอาร์เซนิค (As) เท่ากับ X_{As}



รูปที่ 3.7 กราฟแสดงเศษส่วนอะตอม (Atomic Fraction) ของธาตุกลุ่มที่ 5 ของสารประกอบในหมู่ III-V พล็อตกับส่วนกลับของอุณหภูมิ

ถ้าให้เศษส่วนของอะตอมของแกเลียม (Ga) เท่ากับ X_{Ga} จะได้

$$X_{Ga} = 1 - X_{As} \quad (3.4)$$

ถ้าให้ N_{As} = จำนวน โมลของอาร์เซนิก

N_{Ga} = จำนวน โมลของแกเลียม

จะได้
$$X_{As} = \frac{N_{As}}{N_{Ga} + N_{As}} \quad (3.5)$$

และ
$$X_{Ga} = \frac{N_{Ga}}{N_{Ga} + N_{As}} \quad (3.6)$$

ดังนั้น
$$\frac{N_{As}}{X_{As}} = \frac{N_{Ga}}{X_{Ga}} \quad (3.7)$$

และสามารถคำนวณจำนวน โมล ได้ดังนี้

$$N_{Ga} = \frac{W_{Gs}}{M_{Ga}} \quad (3.8)$$

$$N_{As} = \frac{W_{As}}{M_{As}} \quad (3.9)$$

โดยที่ W_{Ga} = น้ำหนักของแกเลียม

W_{As} = น้ำหนักของอาร์เซนิกที่ต้องใส่ลงใน โบตเพื่อทำให้แกเลียมอิ่มตัวที่อุณหภูมิที่ต้องการ โดยใส่รูปของโพสิแกเลียมอาร์เซไนด์

M_{Ga} = น้ำหนักอะตอมของแกเลียมเท่ากับ 69.72

M_{As} = น้ำหนักอะตอมของอาร์เซนิกเท่ากับ 74.92

โดยที่เรารู้น้ำหนักของแกเลียมซึ่งเป็นวัสดุเริ่มต้น เราสามารถคำนวณหาน้ำหนักของอาร์เซนิกที่ต้องการทำให้แกเลียมอิ่มตัวจาก

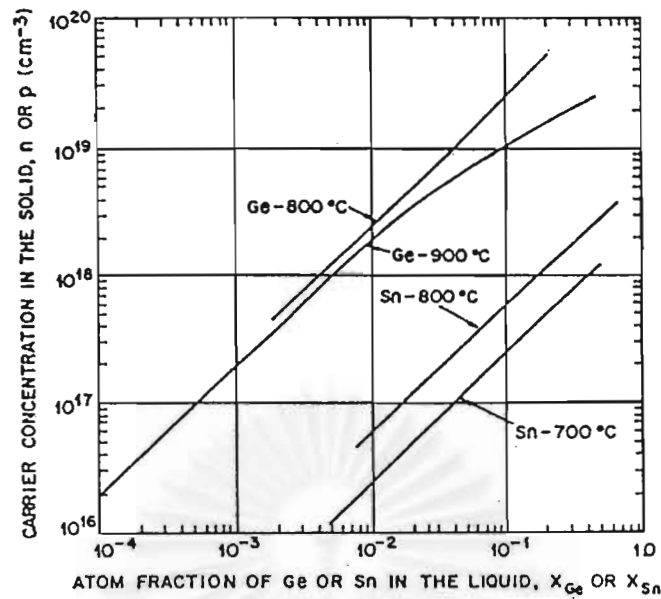
$$W_{As} = \frac{X_{As}}{X_{Ga}} * \frac{M_{As}}{M_{Ga}} * W_{Ga} \quad (3.10)$$

ซึ่งเราสามารถหาน้ำหนักของโพสิแกเลียมอาร์เซไนด์ที่ต้องใช้ได้

$$W_{GaAs} = \frac{M_{Ga} + M_{As}}{M_{As}} * W_{As} \quad (3.11)$$

เมื่อ W_{GaAs} = น้ำหนักของก้อน โพสิแกเลียมอาร์เซไนด์ที่จะให้อาร์เซนิกแก่สารละลายแกเลียม

ชั้นผลึก GaAs (p^+) ใส่สารเจือปน Ge (เจอร์เมเนียม) มีความเข้มข้นของสารเจือปน 1×10^{18} cm^{-3} การคำนวณหาปริมาณของสารต่างๆ โดยอาศัยหลักการเดียวกันกับการคำนวณในชั้น i โดยเริ่มจากการกำหนดระดับความเข้มข้นของสารเจือปน (Ge) แล้วอาศัยกราฟในรูปที่ 3.8 ซึ่งเป็นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเศษส่วนอะตอม (Atomic Fraction) ของสารเจือปน Ge และ Sn พล็อตกับระดับความเข้มข้นของสารเจือปนที่อุณหภูมิ (800 °C - 900 °C) จากกราฟจะได้เศษส่วนอะตอมของ Ge และจากกราฟรูปที่ 3.7 จะได้เศษส่วนอะตอมของ As



รูปที่ 3.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเศษส่วนอะตอมของสารเจือปน Ge และ Sn พล็อตกับระดับความเข้มข้นของสารเจือปนที่อุณหภูมิ (800 °C-900 °C)

จะได้

$$X_{Ga} = 1 - (X_{Ge} + X_{As}) \quad (3.12)$$

โดยอาศัยหลักการเช่นเดียวกันกับชั้นที่ i จะได้

$$\frac{N_{Ga}}{X_{Ga}} = \frac{N_{As}}{X_{As}} = \frac{N_{Ge}}{X_{Ge}} \quad (3.13)$$

และ

$$W_{As} = \frac{X_{As}}{X_{Ga}} * \frac{M_{As}}{M_{Ga}} * W_{Ga} \quad (3.14)$$

$$W_{GaAs} = \frac{M_{Ga} + M_{As}}{M_{As}} * W_{As} \quad (3.15)$$

$$W_{Ge} = \frac{X_{Ge}}{X_{Ga}} * \frac{M_{Ge}}{M_{Ga}} * W_{Ga} \quad (3.16)$$

โดยที่ W_{Ge} = น้ำหนักของเจอร์เมเนียมที่ใส่เพื่อให้ชั้นที่ปลูกมีระดับความเข้มข้นของสารเจือปนตามที่ต้องการ

M_{Ge} = น้ำหนักอะตอมของเจอร์เมเนียมเท่ากับ 72.59

ชั้นผลึก GaAs (N^+) ใส่สารเจือปน Sn (ดีบุก) มีความเข้มข้นของสารเจือปน $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ การคำนวณหาปริมาณของสารต่าง ๆ อาศัยหลักการเดียวกันกับการคำนวณในชั้น i โดยเริ่มจากการกำหนดระดับความเข้มข้นของสารเจือปน (Sn) แล้วอาศัยกราฟในรูปที่ 3.8 ซึ่งเป็นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเศษส่วนอะตอม (atomic fraction) ของสารเจือปน Ge และ Sn พล็อตกับระดับความเข้มข้นของสารเจือปนที่อุณหภูมิของการปลูกผลึก ($800^\circ - 900^\circ$) จากกราฟจะได้เศษส่วนอะตอมของ Ge และจากกราฟรูปที่ 3.7 จะได้เศษส่วนอะตอมของ As

$$\text{จะได้} \quad X_{Ga} = 1 - (X_{Sn} + X_{As}) \quad (3.17)$$

โดยอาศัยหลักการเช่นเดียวกันกับชั้นที่ 1 จะได้

$$\frac{N_{Ga}}{X_{Ga}} = \frac{N_{As}}{X_{As}} = \frac{N_{Sn}}{X_{Sn}} \quad (3.18)$$

$$W_{As} = \frac{X_{As}}{X_{Ga}} * \frac{M_{As}}{M_{Ga}} * W_{Ga} \quad (3.19)$$

$$W_{GaAs} = \frac{M_{Ga} + M_{As}}{M_{As}} * W_{As} \quad (3.20)$$

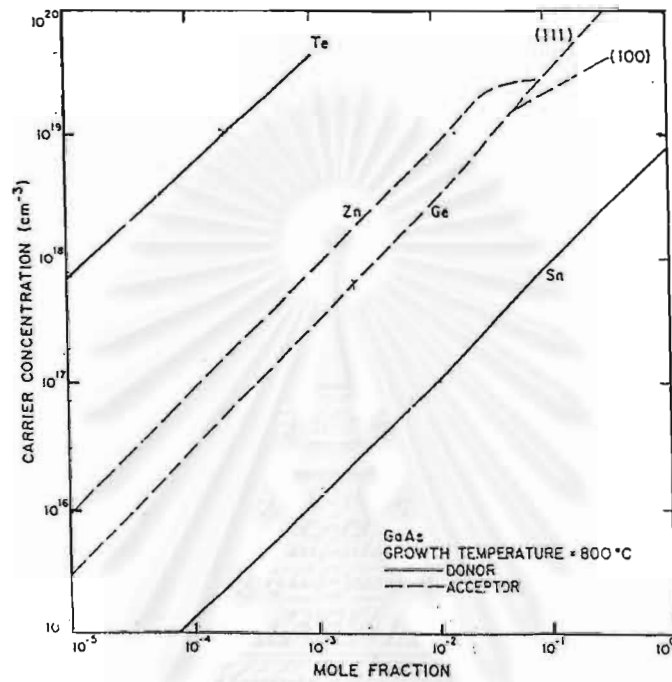
$$W_{Sn} = \frac{X_{Sn}}{X_{Ga}} * \frac{M_{Sn}}{M_{Ga}} * W_{Ga} \quad (3.21)$$

โดยที่ W_{sn} = น้ำหนักของดีบุกที่ใส่เพื่อให้ชั้นที่ปลูกมีระดับความเข้มข้นของสารเจือปนตามที่ต้องการ

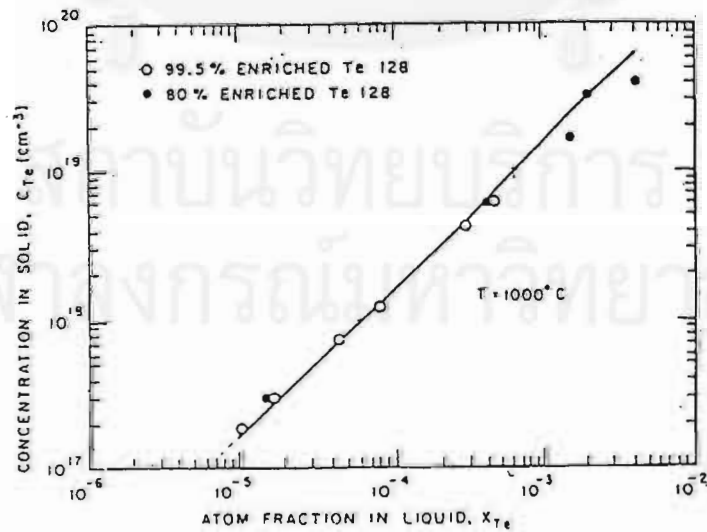
$$M_{sn} = \text{น้ำหนักอะตอมของดีบุกเท่ากับ } 127.60$$

ที่กล่าวมาเป็นการคำนวณปริมาณต่างๆ ที่ใช้ในการปลูกผลึกชั้นต่างๆ ในการปลูกชั้นผลึกของชั้น P^+ มีการใช้สารเจือปนนอกเหนือจาก Ge แล้วยังใช้ Zn เป็นสารเจือปนด้วย เช่นเดียวกับชั้น N^+ นอกจากจะใช้ Sn แล้วยังมีการใช้ Te เป็นสารเจือปนด้วย ในกรณีใช้ Te เป็นสารเจือปนจะใช้กราฟรูปที่ 3.9 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของพาหะกับเศษส่วนอะตอมของสารเจือปนที่อุณหภูมิ 800°C หรือจะใช้กราฟรูปที่ 3.10 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง

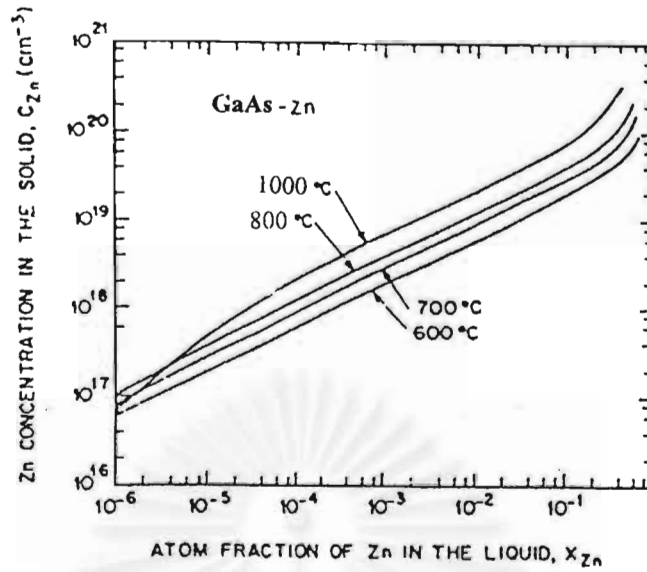
ความเข้มข้นของ Te กับเศษส่วนอะตอมของ Te ที่อุณหภูมิ 1000 °C เป็นกราฟเปรียบเทียบได้ กรณีใช้ Zn เป็นสารเจือปนจะใช้กราฟที่รูปที่ 3.11 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ Zn กับเศษส่วนอะตอมของ Zn ที่อุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 3.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของพาหะกับเศษส่วนอะตอมของสารเจือปนที่อุณหภูมิ 800 °C



รูปที่ 3.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ Te กับเศษส่วนอะตอมของ Te ที่ อุณหภูมิ 1000 °C



รูปที่ 3.11 เศษส่วนอะตอมของ Zn ที่อุณหภูมิต่างๆ โครงสร้างที่ออกแบบในการปลูกผลึกเพื่อสร้างหัววัดรังสี

โครงสร้างของหัววัดรังสีชนิดรอยต่อ p-i-n ที่ออกแบบขึ้นเพื่อทดลองปลูกผลึกแบบ LPE 3 แบบแสดงในแผนภาพรูปที่ 3.12 จากโครงสร้างที่ 1 (ก) มีรายละเอียดของชั้นสารที่ใช้ดังนี้ ใช้ N^+ -GaAs:Si (แกเลียมอาร์เซไนด์ที่เจือปนด้วยซิลิกอน) เป็นผลึกฐานเพื่อทำการปลูกชั้นผลึกชนิด i-GaAs ที่ไม่มีสารเจือปน และตามด้วยชั้นผลึก p^+ -GaAs:Ge ที่เติมสารเจือปนเจอร์เมเนียม คุณสมบัติของสารเริ่มต้น GaAs แสดงไว้ในภาคผนวก ข

โครงสร้าง 1 (ก)
p^+ - GaAs : Ge
i - GaAs (undoped)
n^+ - GaAs : Si (substrate)

โครงสร้าง 1 (ข)
p^+ - GaAs : Ge
n^- - GaAs (undoped, substrate)
n^+ - GaAs : Sn

โครงสร้าง 1 (ค)
p^+ - GaAs : Ge
SI - GaAs : Cr (substrate)
n^+ - GaAs : Sn

รูปที่ 3.12 แผนภาพ โครงสร้างหัววัดรังสีที่ทำจากเทคนิคการปลูกผลึกเอพิแทกซีเฟสของเหลว

รายละเอียดการคำนวณน้ำหนักต่างๆ ของสารที่ใช้ในโครงสร้างที่ 1 (ก) มีดังนี้

ชั้น i-GaAs จะใช้น้ำหนักของ Ga = 3 กรัมเป็นตัวทำละลาย ใช้ความสัมพันธ์จากกราฟรูปที่ 3.7 จะได้

$$X_{Ga} = 1 - X_{As}$$

ดังนั้น

$$X_{Ga} = 0.978$$

$$X_{As} = 2.2 \times 10^{-2}$$

ดังนั้นจาก

$$N_{Ga} = \frac{W_{Ga}}{M_{Ga}}$$

$$\frac{3}{69.72} = 0.0430$$

จาก

$$\frac{N_{Ga}}{X_{Ga}} = \frac{N_{As}}{X_{As}} = 0.0440$$

ดังนั้น

$$W_{As} = 0.0440 \cdot M_{As} \cdot X_{As}$$

ดังนั้น

$$W_{GaAs} = \frac{M_{GaAs}}{M_{As}} \cdot W_{As}$$

$$= 142.3 \text{ mg}$$

ชั้น p⁺-GaAs จะใช้น้ำหนัก Ga = 3 กรัม เช่นกัน และใช้ความสัมพันธ์จากกราฟรูปที่ 3.7 และรูปที่ 3.8

$$X_{Ga} = 1 - (X_{As} + X_{Ge})$$

ดังนั้น

$$X_{Ga} = 0.948$$

$$X_{As} = 2.2 \times 10^{-2}$$

$$X_{Ge} = 3 \times 10^{-2}$$

ดังนั้นจาก
$$N_{Ga} = \frac{W_{Ga}}{M_{Ga}}$$

$$\frac{3}{69.72} = 0.0430$$

จาก
$$\frac{N_{Ga}}{X_{Ga}} = \frac{N_{As}}{X_{As}} = \frac{N_{Ge}}{X_{Ge}} = 0.0454$$

ดังนั้น
$$W_{As} = 0.0454 \cdot M_{As} \cdot X_{As}$$

$$= 74.90 \text{ mg}$$

ดังนั้น
$$W_{GaAs} = \frac{M_{GaAs}}{M_{As}} \cdot W_{As}$$

$$= 142.90 \text{ mg}$$

ดังนั้น
$$W_{Ge} = 0.0454 \cdot M_{Ge} \cdot X_{Ge}$$

$$= 98.90 \text{ mg}$$

ดังนั้นสรุปน้ำหนักของสารที่ใช้ในการปลูกผลึกจากโครงสร้างที่ 1 (ก) แผนภาพรูปที่ 3.12 ในตารางที่ 3.4 สำหรับโครงสร้างที่ 1 (ข) ใช้ n^- -GaAs เป็นแผ่นผลึกเริ่มต้นทำการปลูกผลึก p^+ -GaAs doped Ge ด้านบน และ n^+ -GaAs Sn doped ด้านล่าง ในขณะที่โครงสร้างที่ 1 (ค) ใช้ SI-GaAs doped Cr เป็นผลึกเริ่มต้น ทำการปลูกผลึกเช่นเดียวกับโครงสร้างที่ 1 (ข) สำหรับ น้ำหนักของสารต่างๆ ที่ใช้ก็คำนวณได้ในทำนองเดียวกัน ดังแสดงในตารางที่ 3.5 และ 3.6 ตามลำดับ น้ำหนักที่ได้จากสารต่างๆ จะเข้าสู่ระบบการปลูกผลึกตามเงื่อนไขดังรูปที่ 3.13 เป็นแผนภาพแสดงเงื่อนไขการปลูกผลึกของเวลาและอุณหภูมิ หลังจากได้ผลึกที่มีโครงสร้างตามต้องการ จะนำผลึกดังกล่าวเข้าสู่ขบวนการสร้างหัววัดซึ่งมีขั้นตอนดังรูปที่ 3.14 เป็นแผนภูมิแสดงขั้นตอนการสร้างหัววัดรังสี รูปที่ 3.15 เป็นแบบจำลองหัววัดรังสีที่ผ่านขั้นตอนการสร้างจากระบบ LPE และรูปที่ 3.16 แสดงลักษณะหัววัดรังสีที่สร้างขึ้นจริง การทดสอบทางไฟฟ้าและทางรังสีจะรายงานในส่วนของผลการทดลองในบทที่ 4

ตารางที่ 3.4 น้ำหนักของสารต่าง ๆ ที่ใช้ในโครงสร้างที่ 1 (ก)

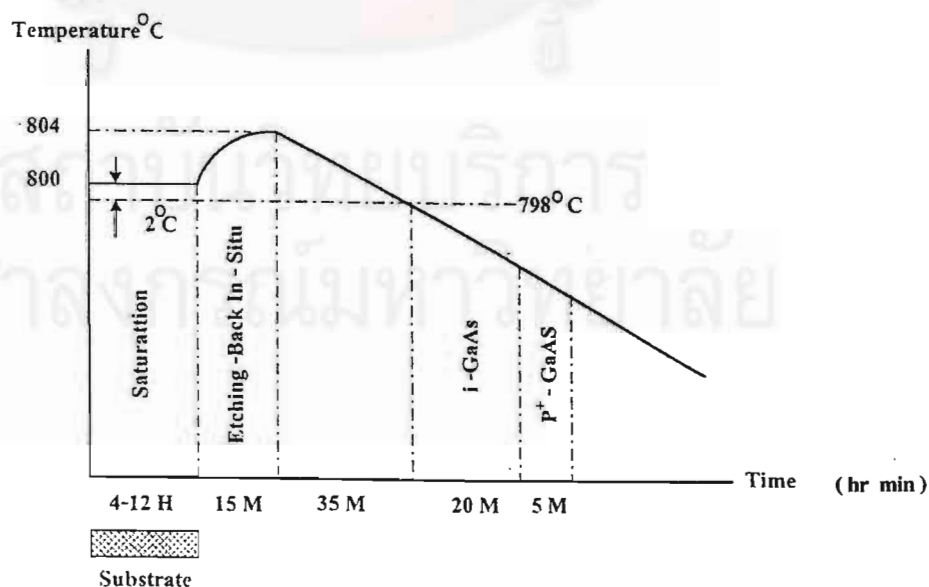
ชั้นผลึก	W_{Ga} (gm)	W_{GaAs} (mg)	W_{Ge} (mg)
i - GaAs	3	142.31	-
p^+ - GaAs	3	142.90	98.90

ตารางที่ 3.5 น้ำหนักของสารต่าง ๆ ที่ใช้ในโครงสร้างที่ 1 (ข)

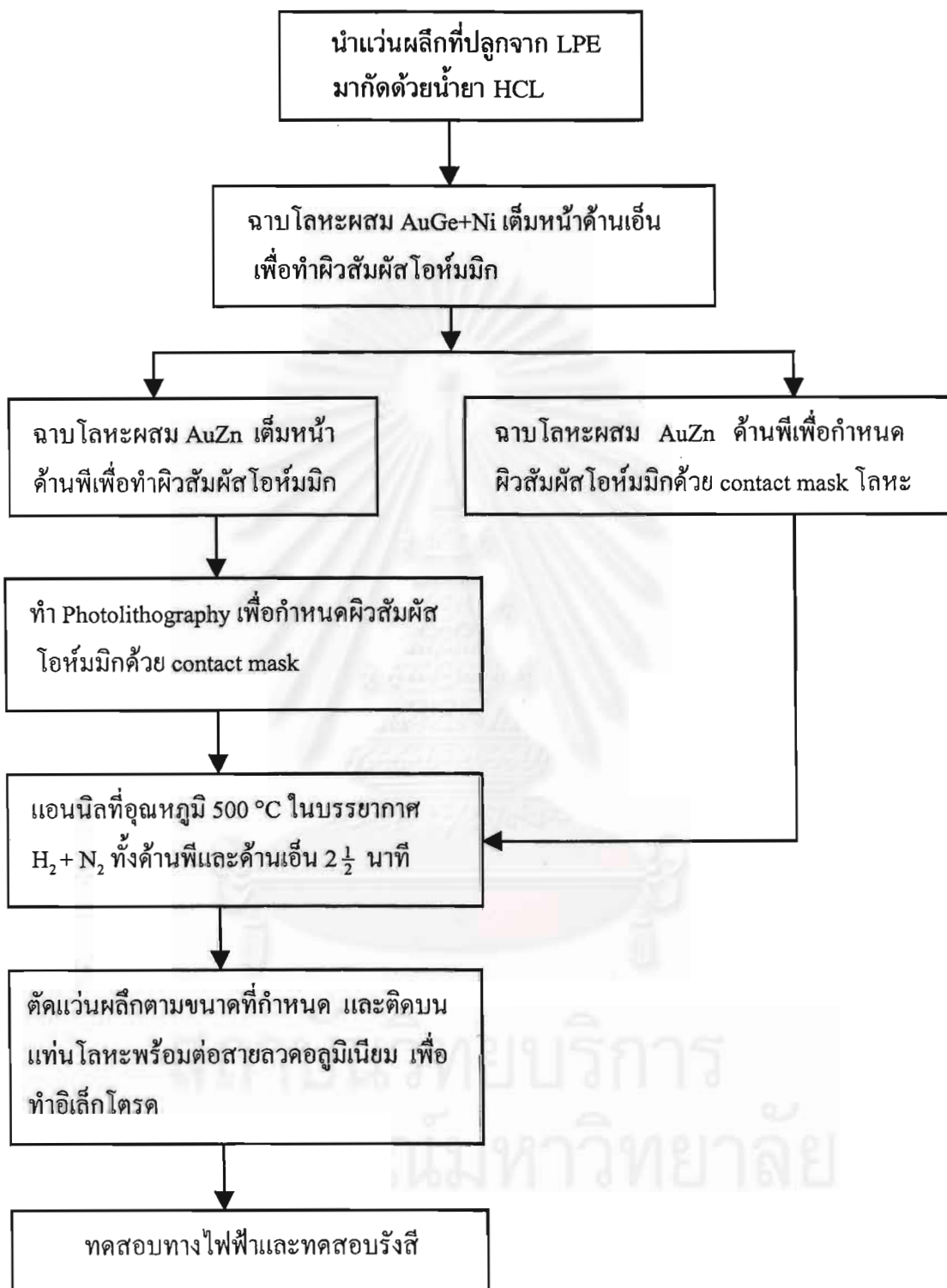
ชั้นผลึก	W_{Ga} (gm)	W_{GaAs} (mg)	W_{Ge} (mg)	W_{Sn} (gm)
P^+ - GaAs	3	142.90	98.90	-
N^+ - GaAs	2	107.81	-	1.6

ตารางที่ 3.6 น้ำหนักของสารต่าง ๆ ที่ใช้ในโครงสร้างที่ 1 (ค)

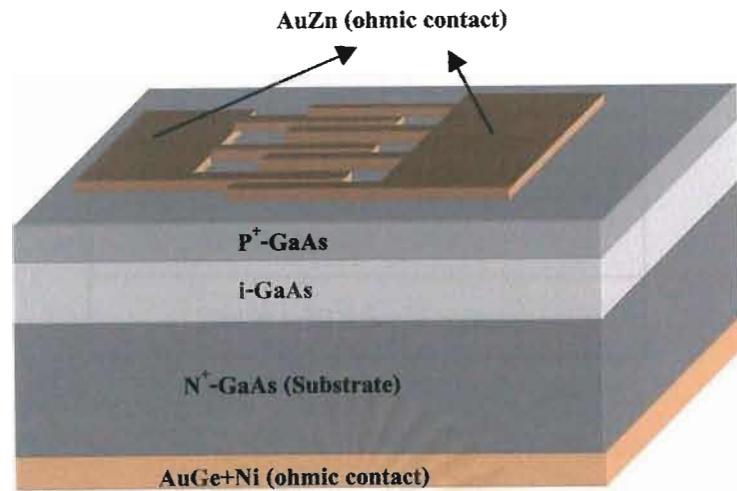
ชั้นผลึก	W_{Ga} (gm)	W_{GaAs} (mg)	W_{Ge} (mg)	W_{Sn} (gm)
P^+ - GaAs	3	142.90	98.90	-
N^+ - GaAs	2	107.81	-	1.6



รูปที่ 3.13 แผนภาพแสดงเงื่อนไขอุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการปลูกผลึก



รูปที่ 3.14 แผนภูมิแสดงขั้นตอนการสร้างหัววัดรังสี



รูปที่ 3.15 แบบจำลองหัววัดรังสีที่ผ่านขั้นตอนการสร้างจากระบบ LPE



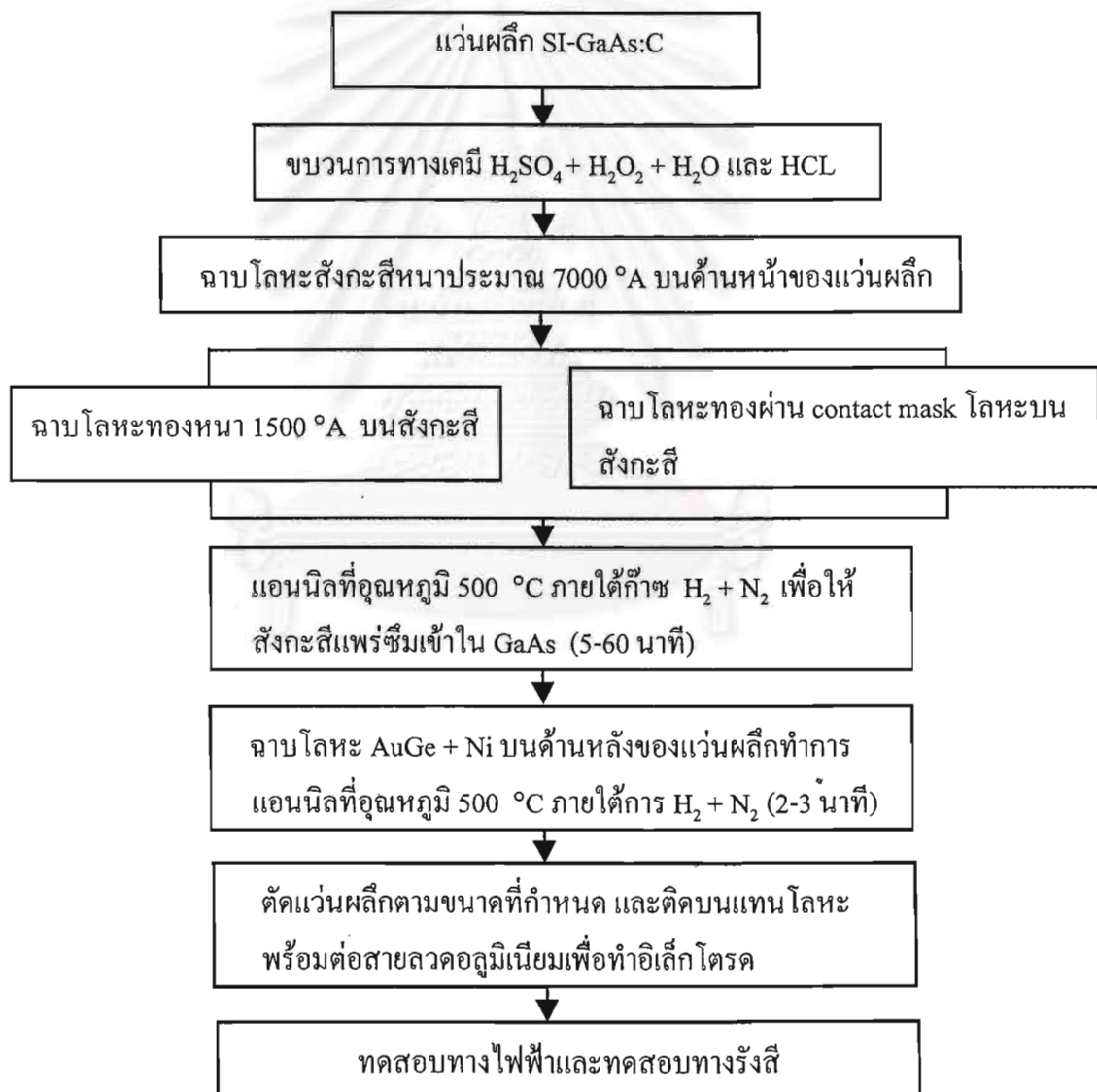
รูปที่ 3.16 ลักษณะหัววัดรังสีที่สร้างขึ้นจริง

3.3 การสร้างหัววัดรังสีโครงสร้าง p-i-n ด้วยเทคนิคการแพร่ซึม

นอกเหนือจากการสร้างหัววัดรังสีจากการปลูกผลึกโดยวิธีเอพิแทกซีเฟสของเหลวแล้ว ยังได้มีการทดลองสร้างหัววัดรังสีด้วยวิธีการแพร่ซึมด้วยสังกะสี (Zn) ดังแสดงในแผนภาพรูปที่ 3.17 ซึ่งแสดงโครงสร้างของหัววัดรังสีที่ทำจากเทคนิคการแพร่ซึมลงบนผลึกแกลเลียมอาร์เซไนด์ที่ได้ไปด้วยคาร์บอน (C) ด้วยเทคนิคการฉาบโลหะ (metalization) ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของขั้นตอนการสร้างหัววัดรังสีจากรูปที่ 3.14 คือกระบวนการทำผิวสัมผัสโอห์มมิก (ohmic contact) บนผลึกชนิดเอ็นและชนิดพีของแกลเลียมอาร์เซไนด์ สำหรับเทคนิคการฉาบโลหะ (metalization) จะอธิบายในส่วนของภาคผนวก รูปที่ 3.18 เป็นแผนภูมิขั้นตอนการสร้างหัววัดรังสีด้วยการแพร่ซึมสังกะสี

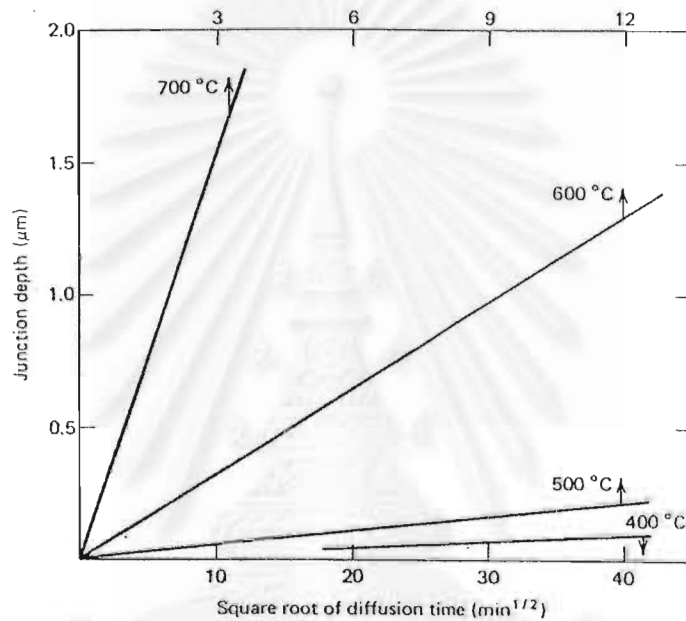
โครงสร้าง
p ⁺ - GaAs : Zn
SI - GaAs : C
AuGe + Ni (ohmic contact)

รูปที่ 3.17 แผนภาพโครงสร้างของหัววัดรังสีที่ทำจากเทคนิคการแพร่ซึม

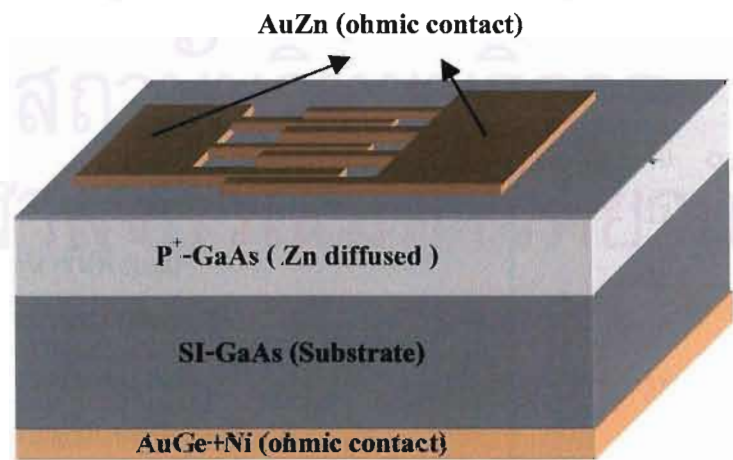


รูปที่ 3.18 แผนภูมิขั้นตอนการสร้างหัววัดรังสีด้วยวิธีแพร่ซึมสังกะสี

การแอนนัล (annealing) สังกะสีจะแพร่ซึมเข้าสู่แกลเลียมอาร์เซไนด์ทำให้เกิดชั้นพี และในส่วนชั้นเอ็นเจอร์เมเนียมจะแพร่ซึมเข้าสู่แกลเลียมอาร์เซไนด์ รูปที่ 3.19 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการแอนนัลกับความลึกของการแพร่ซึม และรูปที่ 3.20 แสดงแบบจำลองหัววัดรังสีที่ผ่านขั้นตอนการสร้างจากเทคนิคการแพร่ซึม หัววัดที่สร้างด้วยวิธีนี้ถือว่าเป็นหัววัดรังสีที่มีโครงสร้างเป็น p-i-n ซึ่งได้นำไปทดสอบทางไฟฟ้าและทดสอบทางรังสีโดยผลการทดสอบแสดงในบทที่ 4



รูปที่ 3.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการแอนนัลกับความลึกของการแพร่ซึมสังกะสี



รูปที่ 3.20 แบบจำลองหัววัดรังสีที่ผ่านขั้นตอนการสร้างจากเทคนิคการแพร่ซึม

บทที่ 4

ผลการทดลอง

ได้ทำการทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของหัววัดรังสีเอกซ์ที่สร้างขึ้นทางด้านกายภาพ ทางด้านคุณสมบัติทางไฟฟ้า และผลตอบสนองทางด้านการวัดรังสีดังนี้

4.1 คุณสมบัติทางด้านกายภาพ

4.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. Scanning Electron Microscope (SEM) JEOL model T200
2. Optical Microscope Nikon model 258901

โครงสร้างที่ 1 (ก) 1 (ข) และ 1 (ค) ตามแผนภาพรูปที่ 3.12 ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ได้จากการปลูกผลึกโดยวิธีเอพิแทกซีเฟสของเหลว ผลการตรวจสอบแสดงไว้ดังตารางที่ 4.1 ตารางที่ 4.2 และตารางที่ 4.3 ส่วนโครงสร้างตามแผนภาพรูปที่ 3.17 เป็นโครงสร้างของหัววัดรังสีที่ทำจากเทคนิคการแพร่ซึมผลการตรวจสอบแสดงไว้ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติทางกายภาพของหัววัดรังสีสร้างจากระบบ LPE

คุณสมบัติ	ค่าที่วัดได้
พื้นที่รอยต่อ (mm^2)	40
พื้นที่รับรังสี (mm^2)	40
พื้นที่ผิวสัมผัสไอทึมมิกด้านรับโฟตอน (mm^2)	12
ความหนาชั้นพี (μm)	3
ความหนาชั้น i (μm)	20
ความหนาชั้นเอ็น (μm)	350
ความหนาแน่นของพาหะด้านพี (cm^{-3})	$\sim 10^{18}$
ความหนาแน่นของพาหะด้านเอ็น (cm^{-3})	2×10^{18}

ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติทางกายภาพของหัววัดรังสีสร้างจากระบบ LPE ปลูกผลึก 2 หน้า

คุณสมบัติ	ค่าที่วัดได้
พื้นที่รอยต่อ (mm^2)	40
พื้นที่รับรังสี (mm^2)	40
พื้นที่ผิวสัมผัสโอห์มมิกด้านรับโฟตอน (mm^2)	12
ความหนาชั้นพี (μm)	~ 2
ความหนาชั้น i (μm)	320
ความหนาชั้นเอ็น (μm)	~ 3
ความหนาแน่นของพาหะด้านพี (cm^{-3})	$\sim 10^{18}$
ความหนาแน่นของพาหะด้านเอ็น (cm^{-3})	$\sim 10^{18}$

ตารางที่ 4.3 คุณสมบัติทางกายภาพของหัววัดรังสีสร้างจากระบบ LPE ปลูกผลึก 2 หน้า

คุณสมบัติ	ค่าที่วัดได้
พื้นที่รอยต่อ (mm^2)	40
พื้นที่รับรังสี (mm^2)	40
พื้นที่ผิวสัมผัสโอห์มมิกด้านรับโฟตอน (mm^2)	12
ความหนาชั้นพี (μm)	~ 2
ความหนาชั้น i (μm)	320
ความหนาชั้นเอ็น (μm)	~ 3
ความหนาแน่นของพาหะด้านพี (cm^{-3})	$\sim 10^{18}$
ความหนาแน่นของพาหะด้านเอ็น (cm^{-3})	$\sim 10^{18}$

ตารางที่ 4.4 คุณสมบัติทางกายภาพของหัววัดรังสีสร้างจากเทคนิคการแพร่ซึม

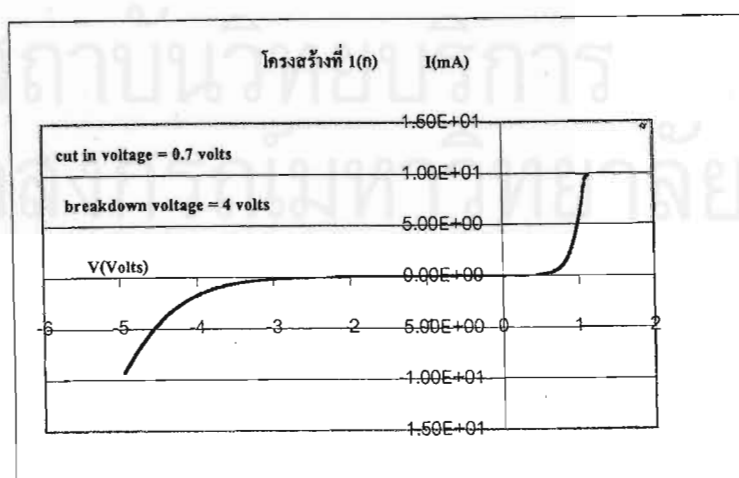
คุณสมบัติ	ค่าที่วัดได้
พื้นที่รอยต่อ (mm^2)	40
พื้นที่รับรังสี (mm^2)	40
พื้นที่ผิวสัมผัสไอหุ้มมีก้านรับโฟตอน (mm^2)	12
ความหนาชั้น i (μm)	600
ความหนาแน่นของพาหะด้านพี (cm^{-3})	$\sim 10^{18}$
ความหนาแน่นของพาหะด้านเอ็น (cm^{-3})	$\sim 10^{18}$

4.2 คุณสมบัติทางด้านไฟฟ้า

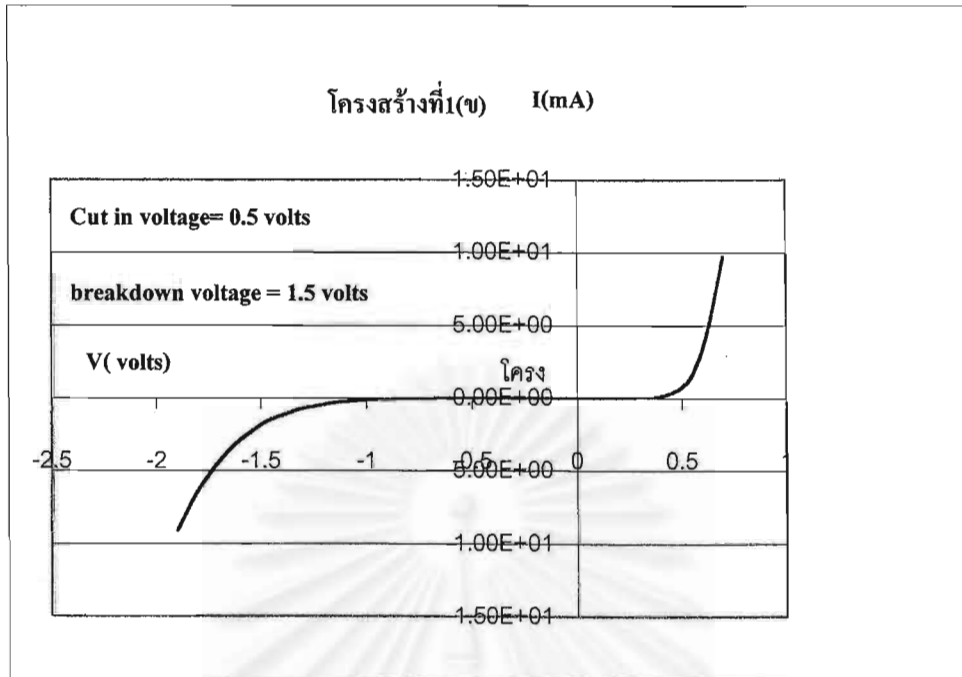
4.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. pA Meter/dc voltage source, HP model 4140B
2. curve-tracer TEKTRONIX model 577
3. probe KARL SUSS model PM5
4. Microcomputer

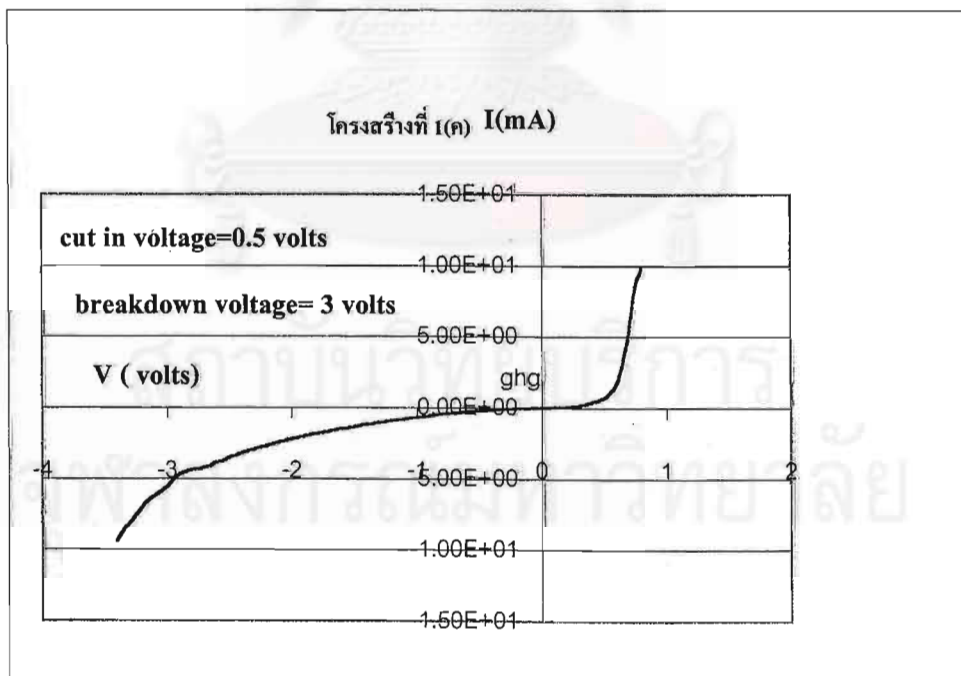
จากลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของทุกโครงสร้างรูปที่ 4.1 รูปที่ 4.2 รูปที่ 4.3 และรูปที่ 4.4 ทำให้ทราบค่าแรงดัน cut-in และแรงดันพังทลาย ผลการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของโครงสร้างหัววัดรังสีต่างๆ แสดงไว้ในตารางที่ 4.5



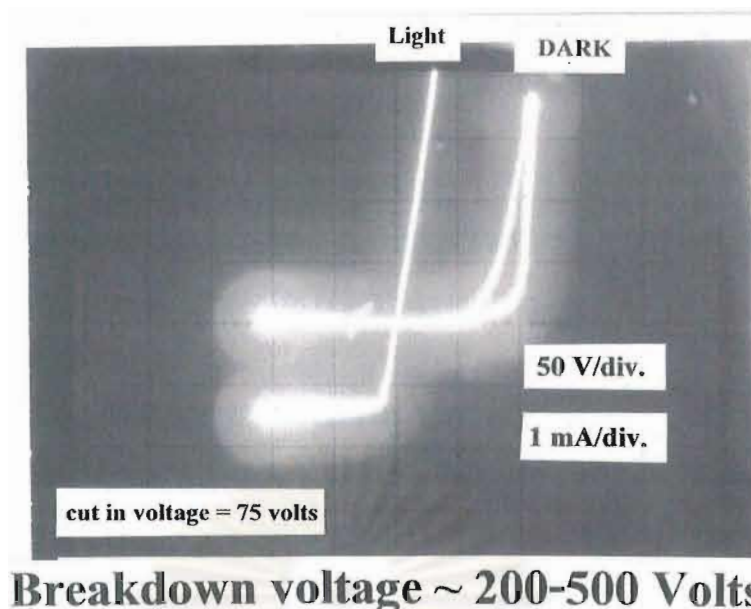
รูปที่ 4.1 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของหัววัดรังสีสร้างจากโครงสร้างที่ 1 (ก)



รูปที่ 4.2 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของหัววัดรังสีสร้างจากโครงสร้างที่ 1 (ข)



รูปที่ 4.3 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของหัววัดรังสีสร้างจากโครงสร้างที่ 1 (ค)



รูปที่ 4.4 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของหัววัดรังสีสร้างจากเทคนิคการแพร่ซึม

ตารางที่ 4.5 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของหัววัดรังสีสร้างจากเทคนิค LPE และเทคนิคการแพร่ซึม

โครงสร้าง	แรงดันพังทลาย (V)	แรงดัน cut-in (V)
1 (ก)	4	0.7
1 (ข)	1.5	0.5
1 (ค)	2.5	0.5
เทคนิคการแพร่ซึม	200-500	~75

4.3 การทดสอบทางด้านการวัดรังสี

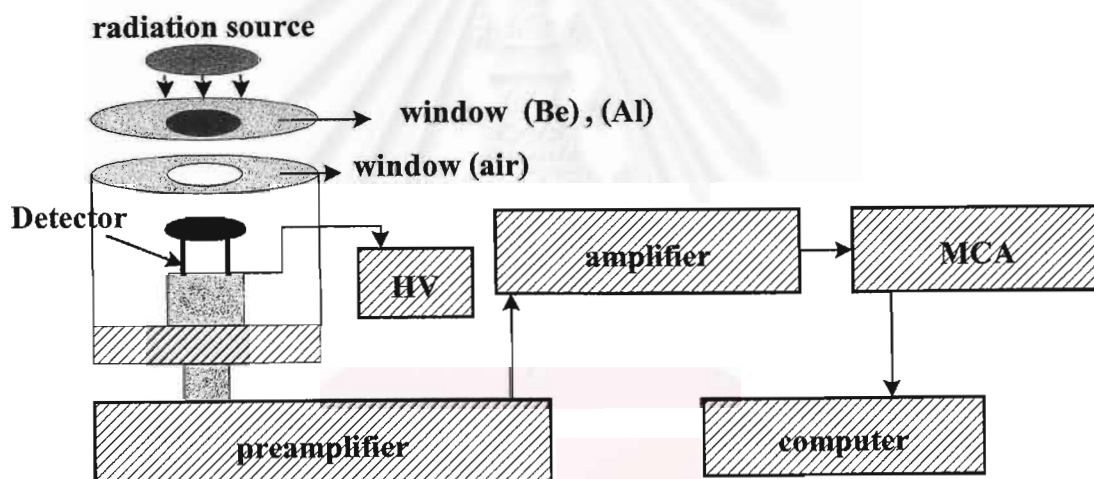
หัววัดรังสีที่สร้างขึ้นจากโครงสร้างตามแผนภาพรูปที่ 3.12 และแผนภาพรูปที่ 3.17 ได้นำมาทำการทดสอบการตอบสนองรังสี โดยจุดประสงค์เพื่อวัดพลังงานรังสีเอกซ์ และได้ทำการทดสอบการวัดรังสีประเภทอนุภาคได้แก่ รังสีเบตา และรังสีอัลฟาด้วย เพื่อศึกษาขีดความสามารถของหัววัดที่สร้างขึ้น รายละเอียดของการทดสอบประกอบด้วย

4.3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. หัววัดรังสีชนิดรอยต่อ p-i-n GaAs ที่สร้างขึ้น
2. High Voltage power supply ORTEC model 556

3. Amplifier CANBERRA model 2022
4. Preamplifier CANBERRA model 2004
5. Multichannel Analyzer CANBERRA SERIES 40
6. NIM bin and power supply ORTEC model 401B
7. Microcomputer
8. oscilloscope TEKTRONIX model TDS 360
9. ต้นกำเนิดรังสีมาตรฐาน (แสดงในตารางที่ 4.6)
10. ภาชนะหุ้มหัววัดรังสีชนิดถอดประกอบได้ หน้าต่าง (window) ทำจากวัสดุเบริลเลียม และอลูมิเนียม

รูปที่ 4.5 แผนภาพการจัดเครื่องมือที่ทำการทดสอบการวัดรังสีของหัววัดรังสีที่พัฒนาขึ้น และตารางที่ 4.6 แสดงต้นกำเนิดรังสีที่ใช้ในการทดสอบการทำงานของหัววัดรังสี [13]



รูปที่ 4.5 แผนภาพการจัดเครื่องมือที่ทำการทดสอบการวัดรังสีของหัววัดรังสีที่พัฒนาขึ้น

ตารางที่ 4.6 ต้นกำเนิดแหล่งรังสีที่ใช้ในการทดสอบกับหัววัดรังสี

แหล่งรังสี	ชนิดรังสี	พลังงาน	ความแรงรังสี	ค่าครึ่งชีวิต
Am-241	α	5.48 MeV	0.6 μ Ci	433 y
Am-241	γ	60 keV	10 mCi	433 y
Cs-137	β^- , γ	0.512 MeV, 662 keV	10 μ Ci	30.2 y
Sr-90/Y-90	β^-	0.546 MeV, 2.274 MeV	0.05 μ Ci	27.7 y/64 h
Cl-36	β^-	0.709 MeV		3×10^5 y

4.3.2 ขั้นตอนการทดสอบ

1. นำหัววัดรังสี GaAs ที่สร้างจากเทคนิค LPE และเทคนิคการแพร่ซึม ติดตั้งบนแท่นยึดภายในภาชนะหุ้มหัววัดรังสีที่ติดตั้งบน preamplifier
2. วางต้นกำเนิดรังสีในตำแหน่งขนานกับหัววัด โดยห่างจากหัววัดประมาณ 1-1.5 เซนติเมตร ในกรณีทดสอบจากรังสีอัลฟา ต้นกำเนิดรังสีใกล้หัววัดรังสี โดยรังสีอัลฟาไม่ผ่านหน้าต่าง สำหรับกรณีทดสอบรังสีเบตา และโพตอน รังสีจะเคลื่อนผ่านหน้าต่างป้องกันแสงสว่างรอบทวนก่อน
3. ไปอัสยอนหัววัดรังสีด้วยค่าแรงดันที่เหมาะสมจาก HV power supply
4. ปรับอัตราขยายสัญญาณจาก Amplifier โดยปรับค่า Coarse gain, Fine gain, Shaping time เป็นต้น ให้ได้คุณภาพของสัญญาณพัลส์เหมาะกับระบบวัดรังสี
5. ปรับค่าต่างๆ จาก MCA เช่น LLD, memory group, ADC gain, preset time เป็นต้น ให้เหมาะกับการวิเคราะห์สเปกตรัมของต้นกำเนิดรังสี

4.3.3 ผลจากการทดสอบรังสี

ก. ผลการทดสอบหัววัดรังสีที่สร้างจากเทคนิคการปลูกผลึก LPE

ผลการทดสอบการทำงานของหัววัดรังสีที่สร้างจากเทคนิคการปลูกผลึกเอพิแทกซีเฟสของเหลวได้ผลดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ผลการวัดการตอบสนองต่อรังสีของหัววัดรังสี (เทคนิค LPE)

ชนิดรังสี	ตอบสนอง	ไม่ตอบสนอง
รังสีอัลฟา	-	/
รังสีเบตา	-	/
รังสีเอกซ์ หรือแกมมา	-	/

ผลการทดลองพบว่า หัววัดรังสีที่สร้างจากเทคนิคเอพิแทกซีเฟสของเหลวไม่ตอบสนองต่อการวัดรังสีใดๆ ในแง่การทดสอบความไวแสงในย่านที่ตามองเห็น (visible light) โครงสร้างไดโอดของหัววัดรังสีนี้มีการตอบสนองต่อแสง แต่ไม่สามารถสร้างสัญญาณพัลส์จากการรวบรวมประจุขณะเกิดอันตรกิริยาภายในรอยต่อได้ เนื่องจากสนามไฟฟ้าระหว่างรอยต่อต่ำ (2.5-4.0 V)

ข. ผลการทดสอบหัววัดรังสีที่สร้างจากเทคนิคการแพร่ซึม

ขณะทำการทดลองปรับค่าอุปกรณ์ต่างๆ ดังนี้

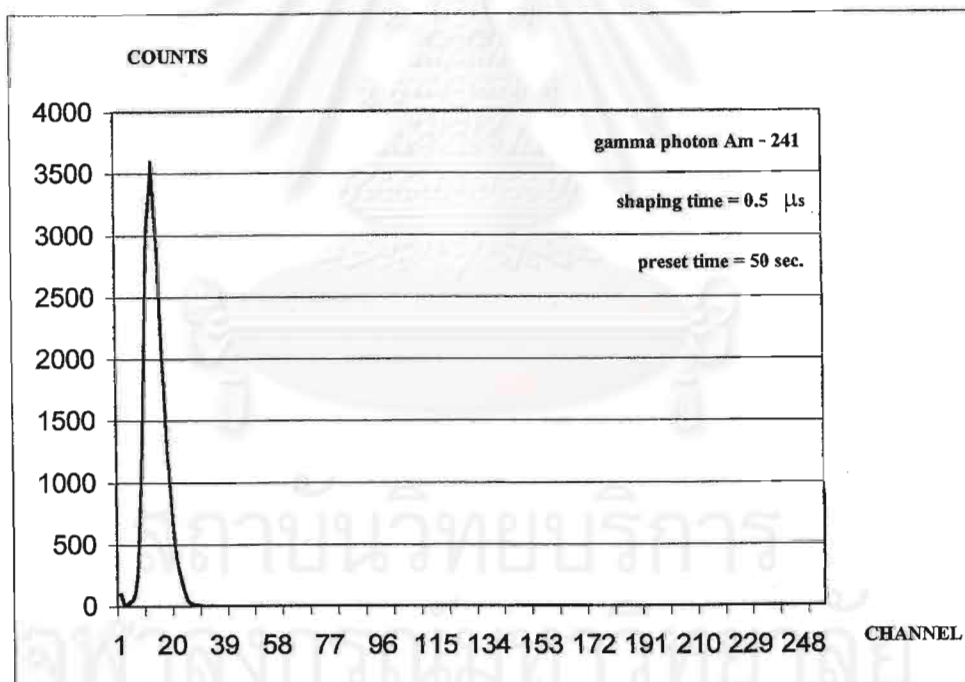
HV bias = 100-200 V (เริ่มต้น)

coarse gain = 30

fine gain = 0.3

ส่วนค่า shaping time และ preset time จะแสดงค่าไว้ในรูปของผลการทดลอง

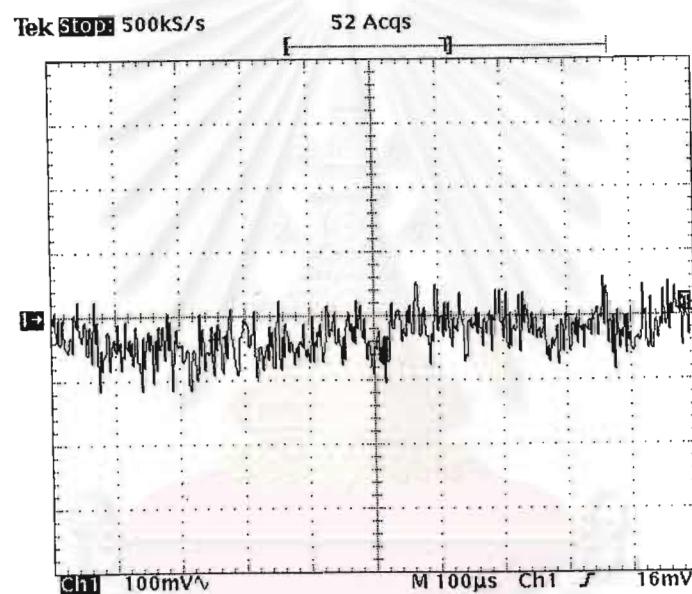
ข.1 ทดสอบการตอบสนองการวัดโฟตอนพลังงาน 60 keV (Am-241) โดยค่อยๆ เพิ่มค่า HV bias จนกระทั่งใกล้จุดแรงดันพังทลาย ปรับ shaping time ให้สิ่งรบกวน (noise) ต่ำที่สุดพบว่า ที่ 0.5-1.0 μ s เป็นค่าที่ดีที่สุด จากนั้นใช้ shaping time ที่ 0.5 μ s LLD ของ MCA ให้เหนือระดับสิ่งรบกวน (20 mV) ทดลองวัดสเปกตรัมโฟตอนพลังงาน 60 keV ของ Am-241 ได้สเปกตรัม ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ผลการวัดการตอบสนองโฟตอนจาก Am-241 (60 keV)

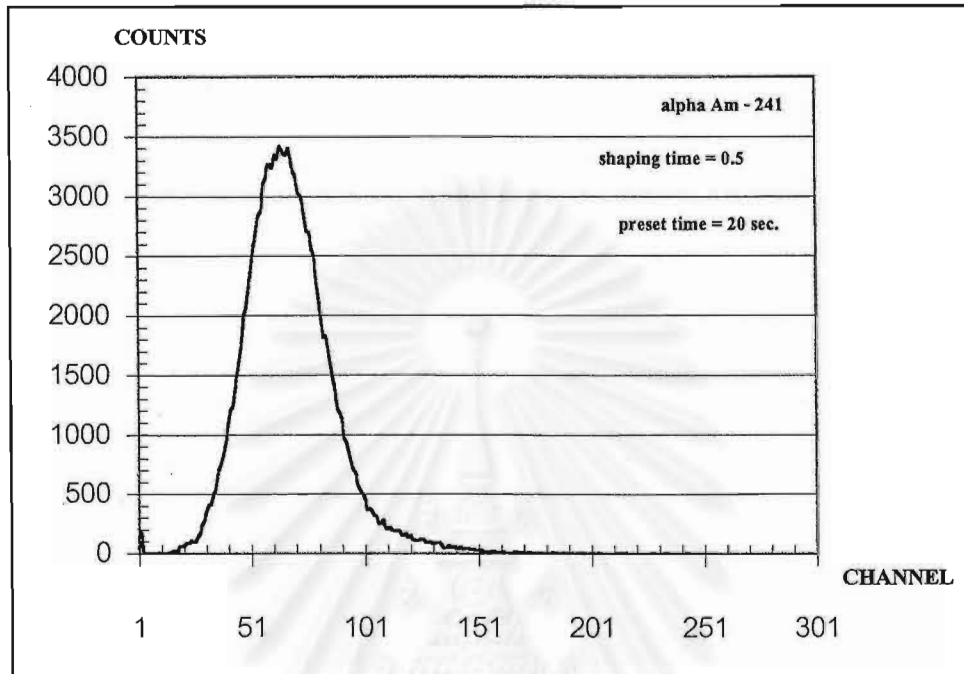
จะเห็นว่าสัญญาณพัลส์มีขนาดต่ำมาก ได้ทดลองปรับอัตราขยายเพื่อขยายสัญญาณพัลส์พบว่าสิ่งรบกวนสูงมาก จึงทำการวัดขนาดสัญญาณสิ่งรบกวนด้วยเครื่องอ่านรูปสัญญาณที่ป้อนมา

กับสัญญาณพบว่าขนาดสิ่งรบกวนสูงถึง 100 mV_{pp} และ base line ไม่คงที่ เมื่อวัดสัญญาณที่ได้จากการวัดโฟตอน พบว่ามีขนาดเล็กมาก ได้พยายามเพิ่มไบอัสให้เพิ่มขึ้นที่จุดแรงดันพังทลาย เพื่อให้สนามไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อสูง และรอยต่อไดโอดมีประสิทธิภาพในการรวบรวมประจุ (CCE) สูงขึ้น แต่ขนาดสัญญาณเพิ่มเพียงเล็กน้อย แต่จะเริ่มเกิดลักษณะการ discharge ระหว่างขอบกึ่งตัวนำเป็นระยะ จึงต้อง bias ให้ต่ำกว่าแรงดันพังทลายเล็กน้อย และวัดสัญญาณและสิ่งรบกวนขณะวัดโฟตอนได้ดังรูปที่ 4.7 ซึ่งสอดคล้องกับคุณสมบัติของรอยต่อที่มีกระแสรั่วไหลสูงจะเกิดสิ่งรบกวนสูง แม้ว่าหัววัดรังสีชนิดแพร่ซิมนี้มีการตอบสนองแสงไวกว่า LPE



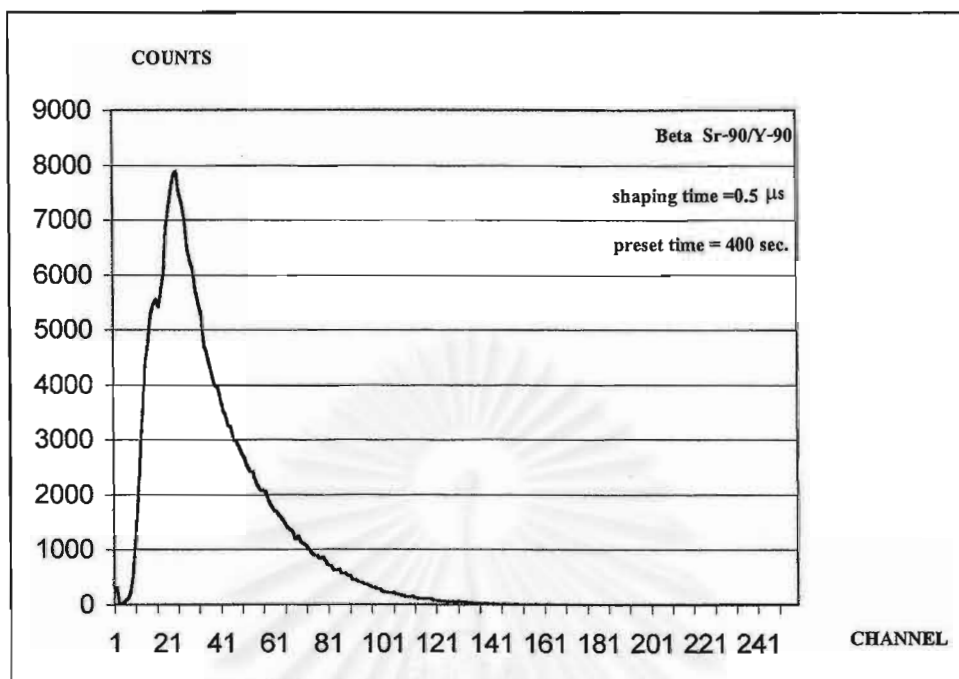
รูปที่ 4.7 สัญญาณที่ได้จากอุปกรณ์ขยายสัญญาณขณะวัดโฟตอนมีขนาดสิ่งรบกวนสูงมาก

ข.2 ทดสอบการตอบสนองการวัดอนุภาคมีประจุ ได้แก่ รังสีอัลฟา และเบตา จากเงื่อนไขการขยายสัญญาณและไบอัสในข้อ ข. 1 ซึ่งไม่สามารถวัดโฟตอนได้ขนาดสัญญาณสูงสิ่งรบกวนดังการทดลองในรูปที่ 4.6 จึงทดสอบการวัดรังสีอัลฟาจาก Am-241 (5.48 MeV) ซึ่งมีความสามารถในการไอออไนซ์บริเวณรอยต่อต่างๆ ได้ ผลการวัดสเปกตรัมแสดงในรูปที่ 4.8

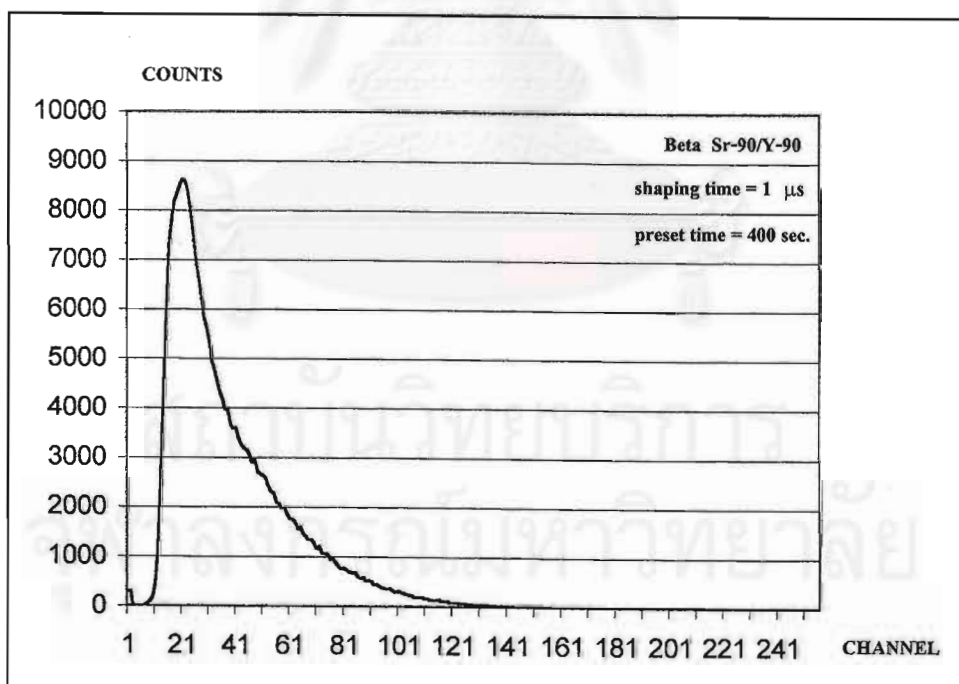


รูปที่ 4.8 ผลการวัดการตอบสนองของอนุภาคอัลฟาจาก Am-241 (5.48 MeV)

จะเห็นว่าขนาดสัญญาณที่ได้ในบริเวณส่วนต้นด้านหน้ารอยต่อ p-i-n มีขนาดสูงขึ้น แต่ไม่สามารถแจกแจงพลังงานของรังสีอัลฟาจาก Am-241 ได้ ซึ่งน่าจะเกิดจากมีความแปรปรวนของปริมาณคู่อิเล็กตรอน-โฮลในแต่ละพลังงานสูงจนไม่สามารถแจกแจงขนาดสัญญาณพัลส์ในแต่ละพลังงานได้เด่นชัด และได้เปลี่ยนมาทดสอบการตอบสนองพลังงานของอนุภาคเบตาจากต้นกำเนิดรังสี Sr-90/Y-90 (0.546 MeV, 2.274 MeV) และ Cl-36 (0.714 MeV) ผลการวัดแสดงในรูปที่ 4.9 (ก), (ข) และ 4.10 (ก) (ข) ตามลำดับ โดยใช้ shaping time 0.5 μ s และ 1.0 μ s เพื่อเปรียบเทียบการลดสิ่งรบกวนจากผลของกระแสรั่วไหลและความไม่สมบูรณ์ของรอยต่อ

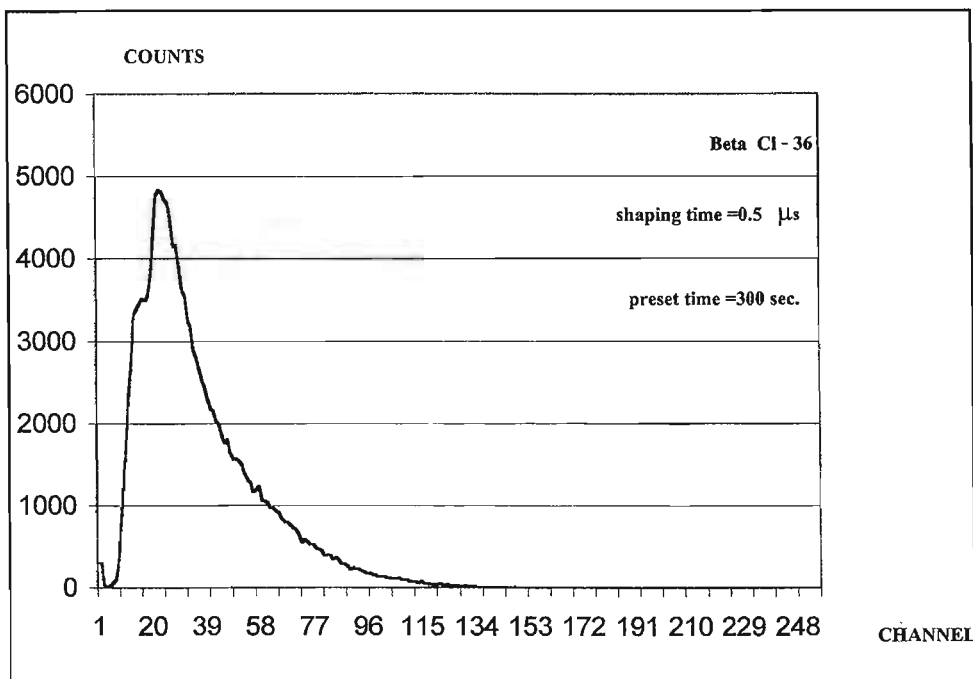


(ก) ผลการวัดสเปกตรัมอนุภาคเบตาจาก Sr-90/Y-90 ที่ shaping time 0.5 μ s

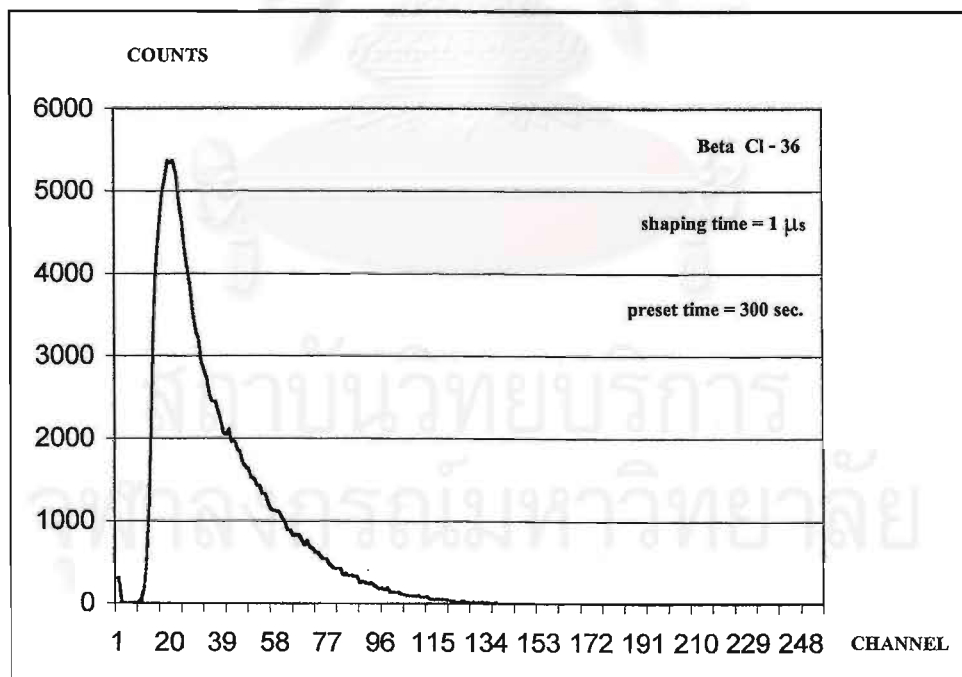


(ข) ผลการวัดสเปกตรัมอนุภาคเบตาจาก Sr-90/Y-90 ที่ shaping time 1.0 μ s

รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบผลการวัดสเปกตรัมของอนุภาคเบตาจาก Sr-90/Y-90



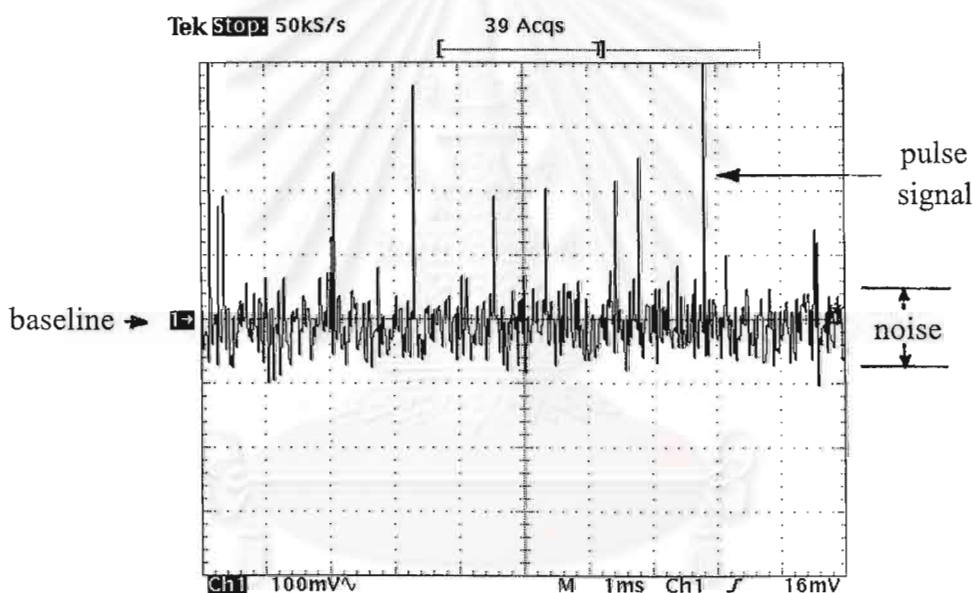
(ก) ผลการวัดสเปกตรัมอนุภาคเบตาจาก ¹³⁷Cs ที่ shaping time 0.5 μs



(ข) ผลการวัดสเปกตรัมอนุภาคเบตาจาก ¹³⁷Cs ที่ shaping time 1.0 μs

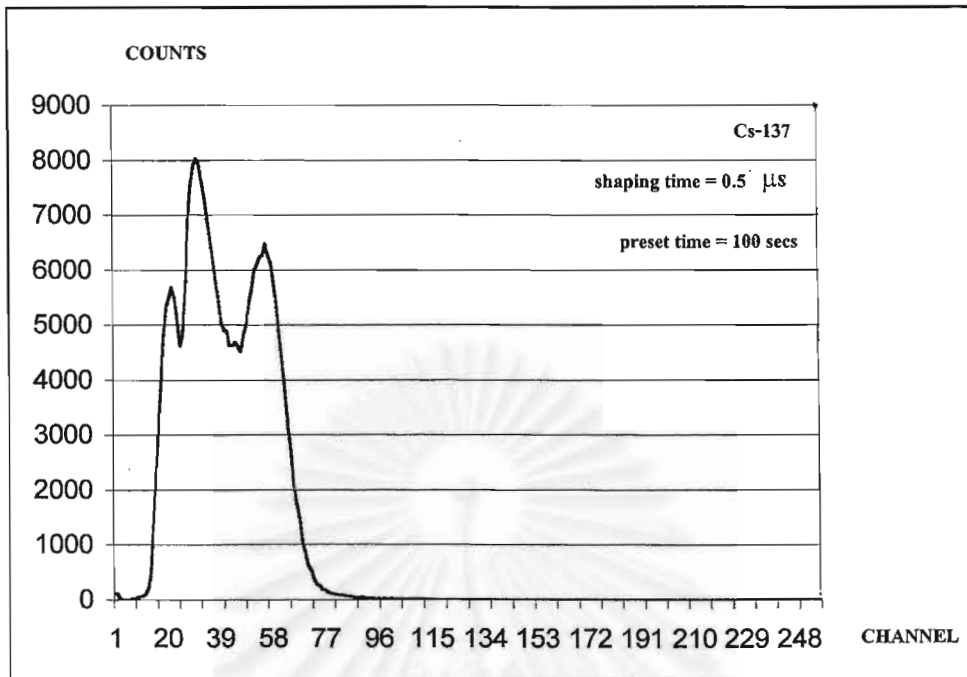
รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบผลการวัดสเปกตรัมของอนุภาคเบตาจาก ¹³⁷Cs

จากผลการวัดพบว่า ระหว่างการใช้ shaping time 0.5 μs และ 1.0 μs มีความแตกต่างกันที่ขนาดสัญญาณพัลส์และรูปสเปกตรัมด้านพลังงานต่ำ กล่าวคือ ขนาดสัญญาณพัลส์ขณะใช้ shaping time 1.0 μs จะมีขนาดสูงกว่าและมีการลดสิ่งรบกวนลง แต่รูปลักษณะโปรไฟล์ของสเปกตรัมจากการวัดพลังงานของรังสีเบตาจาก Sr-90/Y-90 และ Cl-36 ไม่แตกต่างกัน และมีขนาดความสูงของพัลส์สูงสุดเท่ากัน และใกล้เคียงกับขนาดของสัญญาณพัลส์สูงสุดของการวัดสเปกตรัมรังสีอัลฟาด้วย แสดงถึงการรวบรวมประจุของสัญญาณพัลส์อยู่ในบริเวณแถบต้น และมีความแปรปรวนสูงจึงทำให้รูปสเปกตรัมผิดเพี้ยนไปจาก broad spectrum ของรังสีเบตา ซึ่งผลที่มีต่อความแปรปรวนนี้ นอกจากการกระเพื่อมของฐานสัญญาณและขนาดของสิ่งรบกวนที่สูงแล้วดังรูปสัญญาณที่วัดได้ในรูปที่ 4.11 ปัญหาของการสูญเสียปริมาณประจุบริเวณความไม่สมบูรณ์ของรอยต่อน่าจะมีผลมาก

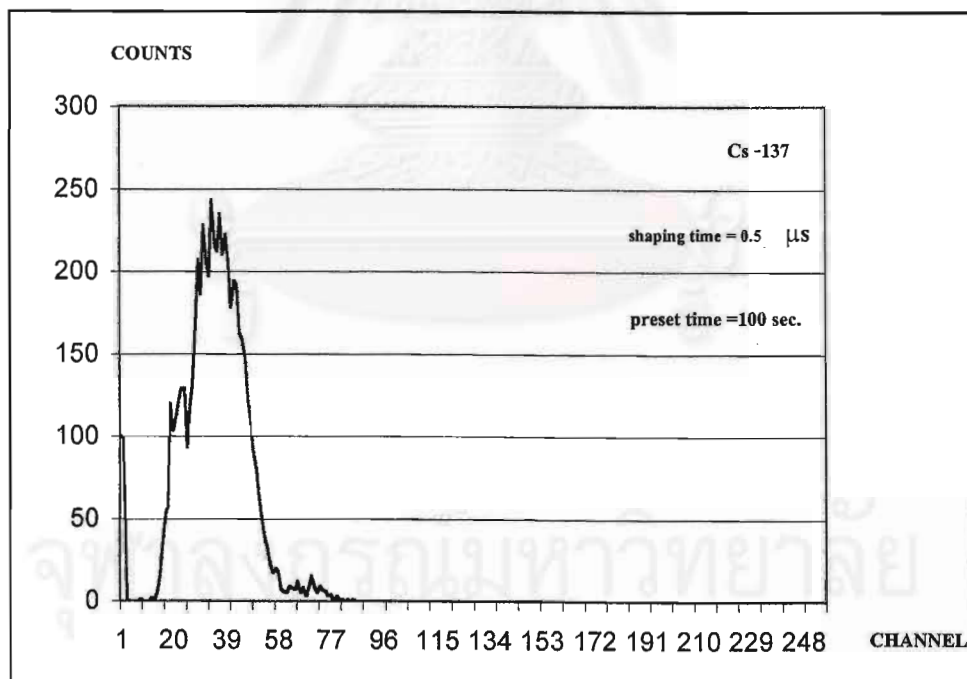


รูปที่ 4.11 แสดงสัญญาณพัลส์จากอุปกรณ์ขยายรูปสัญญาณขณะวัดรังสีเบตา

จากผลการตอบสนองสัญญาณที่ผ่านมา ทำให้เกิดข้อสงสัยในการตอบสนองการวัดโฟตอนและอนุภาคเบตา จึงได้ทำการทดลองวัดสเปกตรัมรังสีนี้จาก Cs-137 ซึ่งสลายตัวให้ทั้งรังสีเบตาและรังสีแกมมา (β , 0.512 MeV และ γ , 662 keV) ผลการวัดในรูปที่ 4.12 (ก) เป็นการวัดสเปกตรัมของรังสีเบตาและแกมมารวมกัน ส่วนผลการวัดในรูปที่ 4.12 (ข) ใช้แผ่นอลูมิเนียมหนา 1.5 mm กันรังสีเบตาแล้วจึงวัดสเปกตรัม



(ก) สเปกตรัมจากการวัดรวมทั้งรังสีเบตาและแกมมา



(ข) สเปกตรัมจากการวัดรังสีเมื่อใช้แผ่นกั้นรังสีเบตา

รูปที่ 4.12 ผลการวัดสเปกตรัมจากต้นกำเนิดรังสี Cs-137

จากผลการวัดแสดงถึงแนวโน้มที่วิเคราะห์ได้ว่าหัววัดรังสีชนิดแพร่ซึ่งที่พัฒนาได้สามารถตอบสนองรังสีประเภทอนุภาคมีประจุไฟฟ้าได้ดี และตอบสนองโฟตอนไม่ดีหรือไม่ได้ กล่าวคือ ในรูปที่ 4.12 (ก) แสดงให้เห็นถึงมีการวัดพลังงานเดี่ยวของการทำอันตรกิริยาภายใน ซึ่งน่าจะเป็นอิเล็กตรอนจากอันตรกิริยาของโฟตอนจาก Cs-137 กับภาชนะห่อหุ้มและถูกวัดรวมกับรังสีเบตา จึงเกิดพีคซ้อนอยู่บนสเปกตรัมการวัดรังสีเบตา ดังนั้นจึงทดลองกันรังสีเบตาและวัดเฉพาะโฟตอน พบว่าตำแหน่งของพีคที่ได้ในรูปที่ 4.12 (ข) ตรงกับส่วนของพีคที่ซ้อนอยู่บนสเปกตรัมในรูปที่ 4.12 (ก) จึงอาจเป็นไปได้ที่การวัดผลที่ได้นี้เป็นการวัดอิเล็กตรอนทุติยภูมิจากอันตรกิริยาของโฟตอน 662 keV กับภาชนะอลูมิเนียมที่ห่อหุ้ม มิได้เป็นอันตรกิริยาของโฟตอนในรอยต่อโดยตรง และเมื่อย้อนไปพิจารณาผลการวัดโฟตอนของ Am-241 ก็น่าจะเป็นการวัดผลทางอ้อมของหัววัดรังสี โดยเป็นการวัดโฟตอนที่เกิดจากการทำอันตรกิริยาของโฟตอนกับภาชนะห่อหุ้มก่อน การวัดโฟตอนจึงเป็นการวัดทางอ้อม หลังการทำอันตรกิริยาของโฟตอนกับภาชนะห่อหุ้ม



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

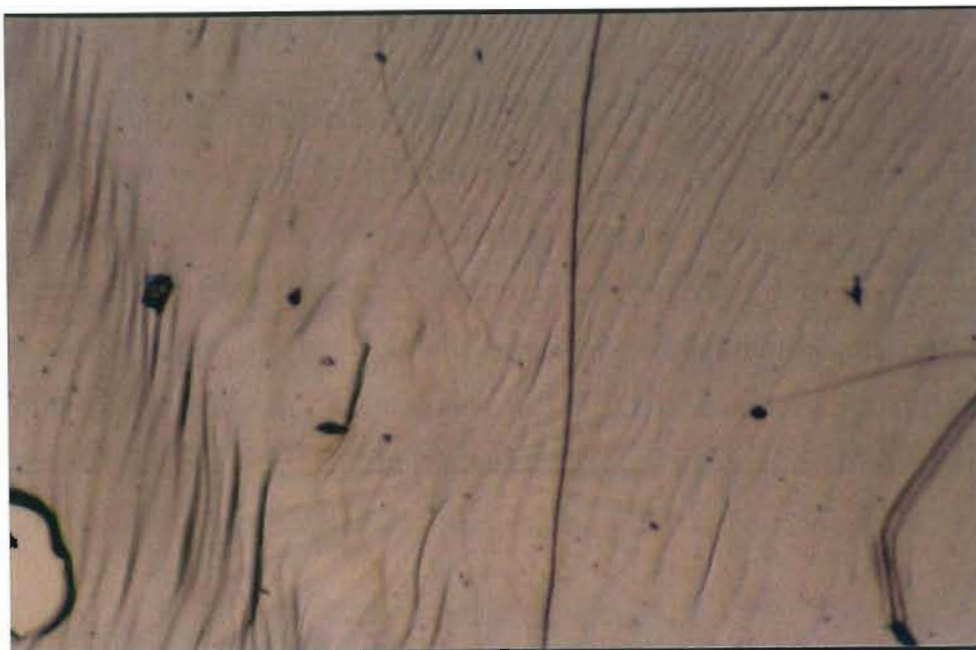
บทที่ 5

วิจารณ์ผลและเสนอแนะ

จากผลการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าและการตอบสนองการวัดรังสีของหัววัดรังสีที่สร้างจากสารประกอบกึ่งตัวนำ GaAs ที่มีโครงสร้างรอยต่อ p-i-n ด้วยเทคนิคการปลูกผลึกเอพิแทกซ์เฟสของเหลว และเทคนิคการแพร่ซึมสังกะสีพบว่า ค่าแรงดันพังทลายของรอยต่อที่สร้างด้วยเทคนิคการแพร่ซึมมีค่าสูงกว่าเทคนิคการปลูกผลึกเอพิแทกซ์มากที่ค่าประมาณ 200 โวลต์เทียบกับ 4 โวลต์ตามลำดับ และมีกระแสรั่วไหลค่อนข้างสูง ระดับ $8 \mu\text{A}$ ทำให้มีสิ่งรบกวน (noise) ขณะวัดรังสีสูง ขณะที่ผลการทดสอบการตอบสนองการวัดรังสีพบว่า หัววัดรังสีที่สร้างจากเทคนิคการปลูกผลึกเอพิแทกซ์เฟสของเหลวไม่ตอบสนองการวัดรังสีใดๆ ส่วนหัววัดรังสีที่สร้างจากเทคนิคการแพร่ซึมตอบสนองการวัดรังสีอัลฟา เบตา และในแง่การวัดแกมมาโฟตอน ผลของสเปกตรัมแสดงถึงการวัดรังสีที่รอยต่อเป็นการวัดทางอ้อมจากโฟโตอิเล็กตรอนของปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก หรือรีคอยล์อิเล็กตรอนจากปรากฏการณ์คอมป์ตัน แต่ไม่สามารถวิเคราะห์พลังงานได้เนื่องจากขนาดสัญญาณพัลส์เล็กมาก สิ่งรบกวนสูงมากและมีความแปรปรวนของขนาดสัญญาณพัลส์สูงมาก การที่สัญญาณพัลส์มีขนาดเล็ก เนื่องจากประสิทธิภาพในการรวบรวมประจุ (charge collection efficiency, CCE) บริเวณรอยต่อต่ำ สาเหตุที่เกิดขึ้นสามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

5.1 กระบวนการสร้างสิ่งประดิษฐ์กึ่งตัวนำ

การสร้างสิ่งประดิษฐ์กึ่งตัวนำจากแผ่นผลึกสารประกอบกึ่งตัวนำแกลเลียมอาร์เซไนด์นั้นจะต้องผ่านกระบวนการเตรียมแผ่นผลึก (wafer shaping operations) ซึ่งประกอบด้วย การปลูกผลึก (crystal growth) การตัดแผ่นผลึก (sawing) การขัดผิวแผ่นผลึก (lapping and polishing) จากนั้นอาจมีการทำชั้น epitaxial หรือการแพร่ซึมแล้วแต่กรณี ตามลำดับ การทำออกไซด์ (oxydation) ผิวสัมผัสโอห์มมิก และติดตั้งใช้งาน กระบวนการเหล่านี้มีผลต่อคุณภาพและคุณสมบัติของสิ่งประดิษฐ์กึ่งตัวนำที่สร้างขึ้น จึงถือว่ากระบวนการต่างๆ มีความสำคัญ สำหรับกระบวนการก่อนการปลูกผลึกอยู่นอกเหนือการควบคุมของผู้วิจัย เนื่องจากวัสดุเริ่มต้นสั่งซื้อจากผู้ผลิต จากการวิเคราะห์ผลที่อาจทำให้ CCE ต่ำในหัววัดรังสีที่สร้างจากปลูกผลึกเอพิแทกซ์เฟสของเหลวพบว่าสภาพผิวที่ได้จากการปลูกผลึกมีความบกพร่องของผลึก ในลักษณะเป็นจุด เป็นหลุม ดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 ลักษณะของผลึกที่ปลูกจากเทคนิคเอพิแทกซีเฟสของเหลว

ซึ่งมีผลต่อการทำงานของหัววัด รอยร้าวทำให้เกิดชั้นบางๆ ที่ผิวที่มีค่าช่วงชีวิต (life time) ต่ำ และเป็นแหล่งของการจับของพาหะทำให้จำนวนของอิเล็กตรอน-โฮลลดลงอย่างรวดเร็วที่ผิว จึงทำให้สัญญาณทางไฟฟ้าต่ำลง สาเหตุนี้จะมีผลต่อการทำงานของหัววัดที่มีการปลูกผลึกทุกโครงสร้าง

5.2 ระดับความบริสุทธิ์ของชั้นผลึก

นอกจากสภาพผิวของผลึก ระดับความบริสุทธิ์ของผลึกก็เป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่มีผลต่อการทำงานของหัววัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งหัววัดที่สร้างจากเทคนิคปลูกผลึกโครงสร้าง p-i-n ที่ชั้น i-GaAs ได้จากการปลูกผลึก จากลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันที่วัดได้ในรูปที่ 4.1 จะเห็นว่ามีความแรงดันพังทะลายเพียง 4 โวลต์ ด้วยความหนาของชั้น i-GaAs ที่ประเมินจากการปลูกผลึกประมาณ 20 μm ระดับสารเจือของ i-GaAs น่าจะอยู่ในระดับประมาณ 10^{16} cm^{-3} [8] รอยต่อ p-i-n ที่เป็นจริง จึงเป็นโครงสร้างของ $p^+ - n - n^+$ ชั้นผลึก n-GaAs ซึ่งเป็นชั้นที่รังสีตกกระทบ แม้ว่าจะมีคู่อิเล็กตรอน-โฮลเกิดขึ้น แต่ด้วยคุณภาพผลึกที่ด้อย มีสารเจือแปลกปลอมสูง ค่าชีวิตพาหะจึงต่ำ มีศูนย์รวมตัว (Recombination Centers) มาก พาหะไฟฟ้าที่เกิดจึงไม่สามารถถูกสนามไฟฟ้าพัดพาสู่ขั้วโตะภายนอกได้

5.3 กระแสรั่ว และแรงดันพังทลายที่หัวต่อ

จากสภาพผิวของผลึกในข้อ 5.1 และผิวที่ขอบรอบด้านของผลึกรวมทั้งคุณภาพของผลึก ในหัวข้อ 5.2 ผนวกกับโครงสร้างหัววัดรังสีขนาดพื้นที่หน้าตัด 40 mm^2 ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่า สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำทั่วไป ทำให้เกิดกระแสรั่วในระดับที่ค่อนข้างสูง กระแสรั่วไหลดังกล่าวจะสร้างสิ่งรบกวนบดบังสัญญาณที่ได้จากการกระตุ้นด้วยรังสี ในขณะที่ทำการวัดเรา ต้องไบอัสย้อนให้รอยต่อ การเพิ่มแรงดันไบอัสจุดประสงค์เพื่อเพิ่มย่านทำงานที่ตกคร่อมด้วย สนามไฟฟ้า (เพื่อลด Dead Zone) นอกจากกระแสรั่วที่มากขึ้น อาจมีการทวีคูณพาหะ เกิดการ พังทลายของหัวต่อ ชัดจำกัดนี้ทำให้เพิ่มค่าสนามไฟฟ้าแก่ย่านทำงานไม่ได้ ทำให้ค่าประสิทธิภาพ ในการรวบรวมพาหะ (charge collection efficiency) อยู่ในระดับต่ำไม่สามารถเพิ่มขึ้นได้ [15]

5.4 ผลกระทบจาก “Deep Level Traps” ในแวนผลึกเริ่มต้นชนิด SI-GaAs

ในกรณีของโครงสร้างหัววัดรังสี p-i-n ที่ใช้แวนผลึก SI-GaAs เป็นแวนผลึกเริ่มต้นนั้น ประสิทธิภาพในการรวบรวมพาหะในชั้นทำงานจะมีค่าต่ำลง เนื่องจากมี “Deep Level Traps” ในสถานะปกติที่อุณหภูมิห้อง “Deep Level Traps” ยังไม่โอ้ออในซ้หมด แต่เมื่อ p-i-n ไคโอคถูก ไอ้อัสกลับทาง ระดับพลังงานของ “Deep Level Traps” จะเบนเข้าใกล้ขอบของแถบนำไฟฟ้า ทำให้สามารถโอ้ออในซ้ได้เพิ่มขึ้น ผลก็คือ ทำให้สภาพความเป็น “intrinsic” ของชั้น i น้อยลง ส่งผลทำให้การกระจายของสนามไฟฟ้า (electric field distribution) ไม่สม่ำเสมอ [14] เกิดย่าน สนามไฟฟ้าค่าต่ำในย่านทำงานทำให้ไม่สามารถรวบรวมพาหะที่เกิดขึ้นในบริเวณนี้ได้ โดยเฉพาะ โฮลที่เกิดขึ้นในย่านนี้จะไม่สามารถวิ่งสู่ขั้วโลหะด้านหน้าได้ ดังนั้นการพัฒนาหัววัดรังสีจึงขึ้นกับ คุณภาพแวนผลึกเริ่มต้น SI-GaAs ค่อนข้างมากทีเดียว

5.5 ข้อเสนอแนะ

นอกเหนือจากจะต้องมีการปรับปรุงกระบวนการในการสร้างหัววัดรังสี ของการปลูกผลึก จากเอพิแทกซีเฟสของเหลว ซึ่งมีปัญหาเกี่ยวกับความบริสุทธิ์ของผลึก อันมีผลโดยตรงต่อการเกิด จำนวนของอิเล็กตรอน-โฮล เมื่อพลังงานรังสีถูกดูดกลืน ถ้าผลึกที่ปลูกได้ไม่มีความบริสุทธิ์หรือ ผลึกที่ปลูกไม่สมบูรณ์ จะเป็นผลต่อจำนวนอิเล็กตรอน-โฮล เกิดการสูญเสียไปในแง่ของการรวมตัว ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำเทคนิคใหม่ๆ มาใช้ในการปลูกผลึก เช่น เทคนิคการปลูกผลึกสาร ประกอบกึ่งตัวนำด้วยลำโมเลกุล (Molecular Beam Epitaxy) เป็นการปลูกผลึกภายใต้สุญญากาศ

ทำให้ผลึกที่ได้มีความบริสุทธิ์สูง ดังรูปที่ 5.2 แสดงเครื่องปลูกผลึกแบบ Molecular Beam Epitaxy (MBE) นอกจากนี้ควรมีการพัฒนา รูปแบบของโครงสร้างโดยการนำสารประกอบกึ่งตัวนำชนิดอื่น มาทดลองใช้เป็นหัววัดรังสี โดยการปรับเปลี่ยนส่วนที่เป็นผลึกชั้น i เช่น การปลูกผลึกชั้น i เป็นผลึกแบบควันตัมเวล (quantum well) เป็นต้น เพื่อสร้างความสมบูรณ์ของผลึกและความสม่ำเสมอ บริเวณรอยต่ออันนำไปสู่การลดกระแสรั่วไหลและเพิ่มประสิทธิภาพการรวบรวมปริมาณพาหะ ประจุ



รูปที่ 5.2 เครื่องปลูกผลึกแบบ Molecular Beam Epitaxy (MBE)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

1. Pallab Bhattacharya. Semiconductor Optoelectronic Devices. (n.p.) : Prentice-Hall, Inc. 1994.
2. C.F.G. Delaney and E.C. Finch. Radiation Detectors Physical Principles and Applications. (n.p.) : New York, 1992.
3. อุไรวรรณ จุณภาด. นิวเคลียร์ฟิสิกส์. หนังสือตำราวิชานิวเคลียร์ฟิสิกส์ (PH 424), พิมพ์ครั้งที่ 5, มหาวิทยาลัยรามคำแหง, 2543.
4. David Jiles. Introduction to the Electronic Properties. 1st ed. New York : CHAPMAN HALL, 1994.
5. ชุมพล อันตรเสน. อิเล็กทรอนิกส์กายภาพ. เอกสารคำสอนวิชา 162-380. ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
6. พรพิทักษ์ โพธิเวชกุล. “การออกแบบและสร้างตัวตรวจจับอัลฟาแบบสารกึ่งตัวนำชนิดหัวต่อพี-เอ็น” (วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิตปริญญาสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2524), หน้า 15-18.
7. บรรยง โตประเสริฐพงศ์ และ มนตรี สวัสดิ์ศฤงฆาร. รายงานผลการวิจัยการสร้างและวิเคราะห์ผลของโฟโตไดโอด. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. ทูนวิจัยรัชดาภิเษกสมโภช. พฤษภาคม 2526.
8. Kwok K. Ng. Complete Guide To Semiconductor Devices. (n.p.) : McGraw-Hill, 1995.
9. Sorab K. Ghandhi. VLSI Fabrication Principles Silicon and Gallium Arsenide. (n.p.) : John Wiley & Sons, 1983.
10. สมชัย รัตนธรรมพันธ์ และ ชุมพล อันตรเสน. การสร้างไดโอดเลเซอร์จากวัสดุ GaAs-GaAlAs แบบ Buried Heterostructure ด้วยวิธี Liquid Phase Epitaxy (LPE). จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. ทูนวิจัยรัชดาภิเษกสมโภช. มิถุนายน 2540.
11. David Wood. Optoelectronic Semiconductor Devices. (n.p.) : Prentice Hall, 1994.
12. Glenn F. Knoll. Radiation Detection and Measurement. 2nd ed. New York : John Wiley & Sons, 1989.
13. Glenn F. Knoll. Radiation Detection and Measurement. 3rd ed. New York : John Wiley & Sons, 2000.

14. D.S. McGregor, G.F. Knoll, Y. Eisen and R. Brake. Development of Bulk GaAs Room Temperature Radiation Detectors. IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. 39, No. 5. (October 1992) : 1226-1236.
15. P.J. Sellin, C.M. Buttar, S. Manolopoulos, K. Berwick, M.R. Brozel and M. Cowperthwaite. Charge collection response of SI GaAs p-i-n detectors. IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. 42, No. 4. (August 1995) : 247-253.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

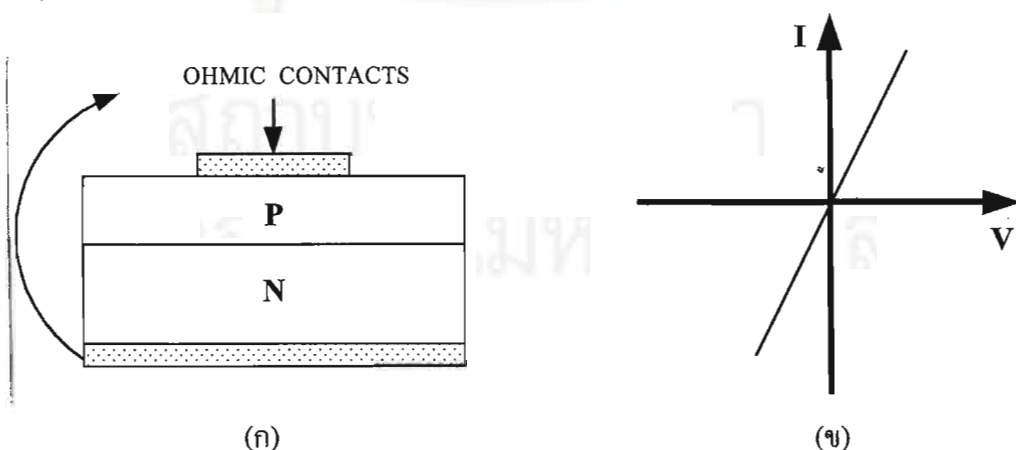
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

การสร้างผิวสัมผัสโอห์มิกบนผลึก GaAs ชนิดพี และชนิดเอ็น

จากข้อเด่นหลายประการของสารประกอบของสารประกอบกึ่งตัวนำตระกูล GaAs เช่น มีช่องว่างแถบพลังงานที่กว้าง มีความเร็วของพาหะสูง และที่สำคัญคือมีคุณสมบัติทางแสง ทำให้ความสนใจที่พัฒนาเทคนิคการผลิตสิ่งประดิษฐ์จากสารประกอบตระกูลนี้มีสูงขึ้น แต่อุปสรรคสำคัญในเรื่องต้นของการพัฒนาสิ่งประดิษฐ์สารประกอบกึ่งตัวนำ GaAs ก็คือความยากในการสร้างผิวสัมผัสโอห์มิก ทั้งนี้เนื่องจากการเกิดออกไซด์โดยธรรมชาติที่ผิวของแวนผลึก GaAs เอง

ในการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำนั้น คุณภาพของสิ่งประดิษฐ์จะขึ้นอยู่กับขั้นตอนพื้นฐาน 2 ขั้นตอน คือ การสร้างโครงสร้างหลัก สำหรับสารประกอบกึ่งตัวนำเราใช้ Epitaxy เป็นเทคโนโลยีในการสร้าง และการสร้างผิวสัมผัสโอห์มิก ซึ่งวิธีการนั้นทำได้โดยการสร้างชั้นโลหะบางๆ ลงบนผิวหน้าของชั้นของโครงสร้างหลักแล้วต่อเส้นโลหะเพื่อนำสัญญาณไฟฟ้าเข้าออก ดังรูปที่ 1 (ก) ถ้าลักษณะสมบัติของผิวสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำไม่มีผลกระทบต่อลักษณะสมบัติของโครงสร้างหลัก กล่าวคือ มีความเป็นเชิงเส้น ดังรูปที่ 1 (ข) ซึ่งแสดงลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของผิวสัมผัส ผิวสัมผัสนี้จะเรียกว่า ผิวสัมผัสโอห์มิก ซึ่งความเป็นผิวสัมผัสโอห์มิกจะมากหรือน้อยถูกกำหนดโดยชนิดของสารกึ่งตัวนำ ความเข้มข้นของสารเจือปน และชนิดของโลหะ ซึ่งแสดงในตารางที่ 1 โลหะที่ใช้สร้างผิวสัมผัสโอห์มิกสำหรับสารกึ่งตัวนำต่างๆ [8]



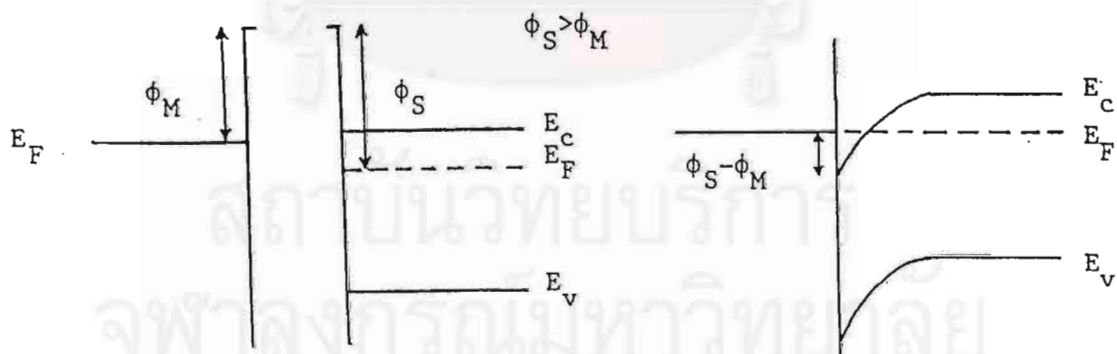
รูปที่ 1 (ก) แสดงตำแหน่งผิวสัมผัส โอห์มิกด้าน P⁺ และด้าน N⁺

(ข) ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของผิวสัมผัส โอห์มิก

ตารางที่ 1 ชนิดของโลหะที่ใช้ในการสร้างผิวสัมผัส โหมดัมมิกสำหรับสารกึ่งตัวนำ [8]

Semiconductor	Metal	Semiconductor	Metal
<i>n</i> -Ge	Ag-Al-Sb, Al, Al-Au-P, Au, Bi, Sb, Sn, Pb-Sn	<i>p</i> -Ge	Ag, Al, Au, Cu, Ga, Ga-In, In, Al-Pd, Ni, Pt, Sn
<i>n</i> -Si	Ag, Al, Al-Au, Ni, Sn, In, Ge-Sn, Sb, Au-Sb, Ti, TiN	<i>p</i> -Si	Ag, Al, Al-Au, Au, Ni, Pt, Sn, In, Pb, Ga, Ge, Ti, TiN
<i>n</i> -GaAs	Au(.88)Ge(.12)-Ni, Ag-Sn	<i>p</i> -GaAs	Au(.84)Zn(.16), Ag-In-Zn, Ag-Zn
<i>n</i> -GaP	Ag-Te-Ni, Al, Au-Si, Au-Sn, In-Sn	<i>p</i> -GaP	Au-In, Au-Zn, Ga, In-Zn, Zn, Ag-Zn
<i>n</i> -GaAsP	Au-Sn	<i>p</i> -GaAsP	Au-Zn
<i>n</i> -GaAlAs	Au-Ge-Ni	<i>p</i> -GaAlAs	Au-Zn
<i>n</i> -InAs	Au-Ge, Au-Sn-Ni, Sn	<i>p</i> -InAs	Al
<i>n</i> -InGaAs	Au-Ge, Ni	<i>p</i> -InGaAs	Au-Zn, Ni
<i>n</i> -InP	Au-Ge, In, Ni, Sn	<i>p</i> -InSb	Au-Ge
<i>n</i> -InSb	Au-Sn, Au-In, Ni, Sn	<i>p</i> -CdTe	Au, In-Ni, Indalloy 13, Pt, Rh
<i>n</i> -CdS	Ag, Al, Au, Au-In, Ga, In, Ga-In	<i>p</i> -SiC	Al-Si, Si, Ni
<i>n</i> -CdTe	In		
<i>n</i> -ZnSe	In, In-Ga, Pt, InHg		
<i>n</i> -SiC	W		

ทฤษฎีผิวสัมผัสโหมดัมมิกโดยทั่วไปแสดงด้วยแถบพลังงานในรูปที่ 2 และรูปที่ 3 พิจารณาในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น โดยรูปที่ 2 (ก) เป็นแถบพลังงานก่อนทำผิวสัมผัส ส่วนรูปที่ 2 (ข) เป็นแถบพลังงานหลังจากทำผิวสัมผัสแล้ว ผิวสัมผัสเป็นผิวสัมผัสโหมดัมมิกได้ก็ต่อเมื่อ $\phi_S > \phi_M$ โดย ϕ_S คือค่า work function ของสารกึ่งตัวนำ และ ϕ_M คือ work function ของโลหะ [8]-[9]

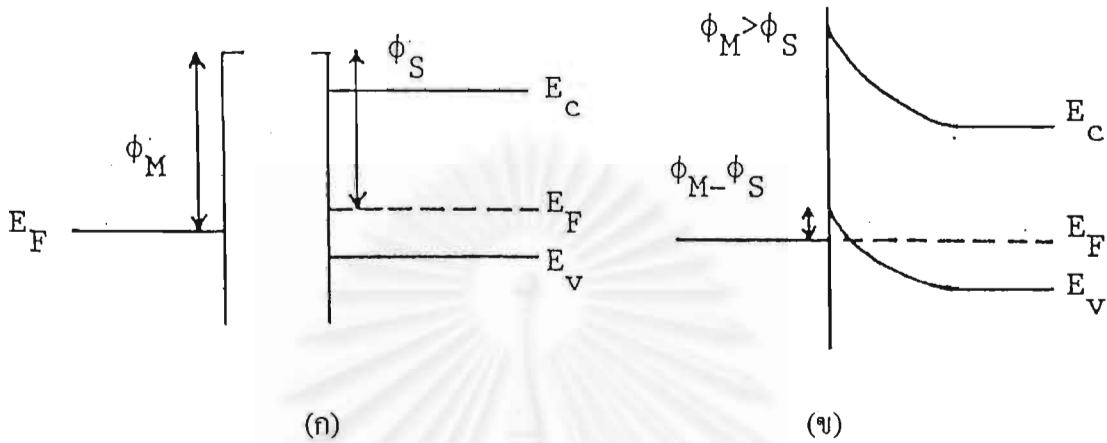


(ก) แถบพลังงานก่อนทำผิวสัมผัส

(ข) แถบพลังงานหลังทำผิวสัมผัส

รูปที่ 2 เส้นไขของผิวสัมผัสแบบโหมดัมมิกระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำแบบเอ็น

ในสารกึ่งตัวนำชนิดพี จะมีลักษณะแถบพลังงานตรงข้ามกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นคือ $\phi_M > \phi_S$ ดังแสดงในรูปที่ 3 (ก) และ (ข)



รูปที่ 3 เงื่อนไขของผิวสัมผัสแบบ โอห์มมิกระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดพี

เงื่อนไขที่เอื้ออำนวยการสร้างผิวสัมผัสโลหะ-สารกึ่งตัวนำในทางปฏิบัติ ให้ได้ตามความต้องการข้างต้นนั้น ขึ้นกับองค์ประกอบ 2 อย่าง กล่าวคือ

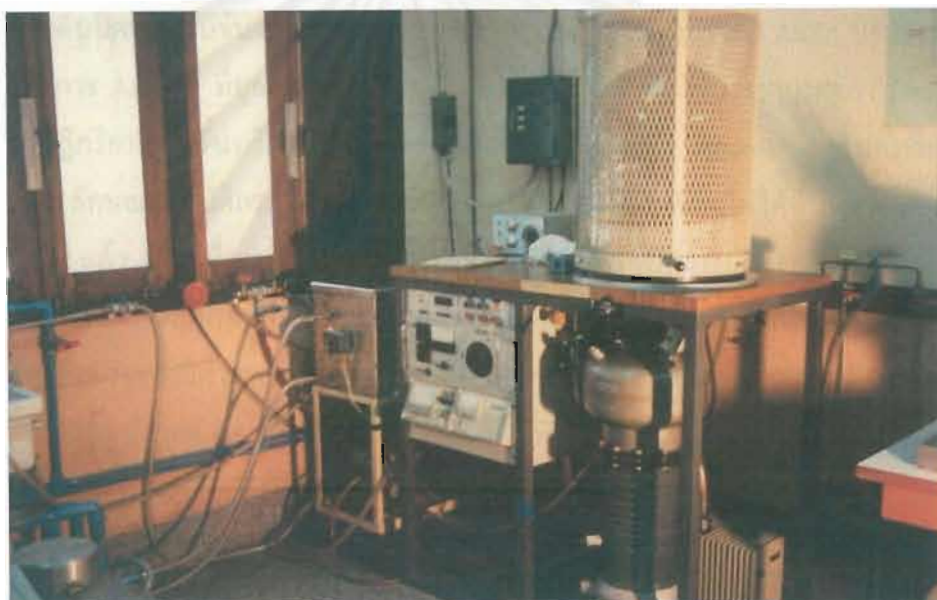
1. โลหะที่ใช้ และวิธีการฉาบผิว
2. ระดับความเข้มข้นของชั้นสารกึ่งตัวนำ

โลหะที่ใช้ และวิธีการฉาบผิว

โลหะที่ใช้ในการสร้างผิวสัมผัสโอห์มมิค (แสดงตารางที่ 1) จะเป็นโลหะผสมประกอบด้วย 2 ส่วน คือ โลหะที่เป็นตัวทำละลาย ร่วมกับโลหะที่ทำหน้าที่เป็นสารเจือปน โลหะที่เป็นตัวละลาย ตัวอย่างเช่น ทอง (Au) และเงิน (Ag) ส่วนโลหะที่เป็นสารเจือปนจะขึ้นกับชนิดของสารกึ่งตัวนำ ถ้าเป็นชนิดเอ็น โลหะที่ใช้จะเป็นสารเจือ Te, Se, Si, Ge หรือ Sn ส่วนชนิดพี โลหะที่ใช้จะเป็น Zn หรือ Be นอกจากนี้อัตราส่วนการผสมระหว่างโลหะหลักกับโลหะสารเจือปนก็เป็นองค์ประกอบหนึ่งที่สำคัญ สำหรับวิธีการฉาบผิวโลหะที่นิยมใช้กันมากที่สุดคือ Filament Evaporation ดังรูปที่ 4 ซึ่งเป็นระบบที่ใช้ในห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ส่วนวิธีการฉาบผิวโลหะแบบอื่นๆ ที่นิยมรองๆ ลงมาได้แก่ Electron Beam Evaporation และ Sputtering เป็นต้น วิธีการหลังๆ นี้ค่อนข้างจะแพงและยุ่งยาก

ระดับความเข้มข้นของชั้นสารกึ่งตัวนำ

ชั้นสารกึ่งตัวนำที่จะนำมาสร้างผิวสัมผัสโอห์มมิก ควรจะเลือกเฉพาะที่มีความเข้มข้นสารเจือปนสูงๆ เพื่อให้กำแพงพลังงานศักย์บางที่สุด แต่ในทางปฏิบัติสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำมักจะใช้ Active Layer ที่มีความเข้มข้นของสารเจือปนต่ำประมาณ 10^{16} - 10^{17} cm^{-3} ซึ่งไม่เพียงพอที่จะทำให้ผิวสัมผัสโอห์มมิกได้ ดังนั้นจึงต้องสร้างชั้นสารกึ่งตัวนำที่มีความเข้มข้นของสารเจือปนมากกว่า 10^{18} cm^{-3} ก่อนที่จะฉาบผิวด้วยโลหะ ส่วนวิธีการนั้นอาจจะใช้ Diffusion, Ion Implantation หรือ Epitaxy ก็ได้ แล้วแต่ความเหมาะสม หลังจากฉาบผิวโลหะลงบนชั้นสารกึ่งตัวนำที่สร้างขึ้นแล้ว ผิวสัมผัสจะต้องผ่านการ Anneal เพื่อให้เกิดชั้นสารกึ่งตัวนำที่ผิวสัมผัสมีความเข้มข้นของสารเจือปนมากกว่า 5×10^{18} cm^{-3} แล้วแต่ความเข้มข้นของสารเจือปน



รูปที่ 4 ระบบการฉาบผิวโลหะ (Metalization) ภายใต้ความดัน 10^{-6} Torr

ผิวสัมผัสโอห์มมิกของแวนผลึก GaAs ชนิดเอ็น โลหะที่ใช้คือ AuGe+Ni โดย AuGe มี Ge ผสม 12% แวนผลึกเริ่มต้นมีความเข้มข้นสารเจือปนประมาณ 10^{18} cm^{-3} ความหนาของ AuGe ประมาณ 3000 Å และ Ni 500 Å ทำการ Anneal ที่อุณหภูมิ 500 °C ใช้เวลา $2\frac{1}{2}$ นาที ภายใต้บรรยากาศของ forming gas ($\text{N}_2 + \text{H}_2$) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นบริเวณผิวหน้าแวนผลึก GaAs ขณะทำการ Anneal คือ ทอง (Au) ซึ่งเป็นตัวทำละลาย จะเริ่มทำการละลายผิวหน้าของ GaAs เปลี่ยนสถานะภาพของ GaAs จากของแข็งมาเป็นของเหลว Ga จะเริ่มแพร่ซึม (Diffusion) จากแวนผลึกวิ่งเข้าสู่ชั้นโลหะ ในขณะที่เดียวกัน Ge ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารเจือปนจะแพร่ซึมเข้ามาแทนที่ที่ของ Ga ทำให้

เกิดขึ้นของ GaAs ความเข้มข้นของสารเจือปนสูง (n^{++}) ในขณะที่ Ge แพร่ซึม As ก็แพร่ซึมแต่เลยหลุดลอยเป็นไอออกมา โดยสรุปจะเห็นว่าชั้น GaAs n^{++} เกิดจากการที่ Au ละลาย GaAs Ga และ As แพร่ซึมขึ้นข้างบน Ge แพร่ซึมเข้าแทนที่ที่ของ Ga ปฏิกิริยานี้จะต้องเกิดอย่างพอเหมาะพอเจาะ ถ้าเกิดปฏิกิริยาน้อยเกินไป ชั้น GaAs n^{++} ที่เกิดขึ้นจะมีความเข้มข้นของสารเจือปนไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดกำแพงพลังงานศักย์ที่บาง แต่ถ้าเกิดปฏิกิริยามากเกินไป จะเหลือที่ว่างของ Ga มากซึ่งทำให้เกิดชั้นความต้านทานสูงได้ผิวสัมผัส ทำให้ค่าสภาพต้านทานผิวสัมผัสโดยรวมมีค่าสูงขึ้น ดังนั้นปริมาณของ Au (ควบคุมโดยความหนา) จะช่วยควบคุมปริมาณของปฏิกิริยาได้อีกชั้นหนึ่ง นอกจากอุณหภูมิและเวลา หลังการ Anneal ได้ค่าสภาพต้านทานผิวสัมผัสมีค่าต่ำสุดประมาณ $2.9 \times 10^{-4} \Omega\text{-cm}^2$

ผิวสัมผัสโอห์มมิกของเว่นผลึก GaAs ชนิดพี โลหะที่ใช้คือ AuZn มี Zn ผสม 50 % เว่นผลึกเริ่มต้นมีความเข้มข้นสารเจือปนประมาณ 10^{18} cm^{-3} ความหนาของ AuZn ประมาณ 2000-3000 Å ทำการ Anneal ที่อุณหภูมิ 500 °C ใช้เวลา 2 นาที ภายใต้บรรยากาศของ forming gas ($\text{N}_2 + \text{H}_2$) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นบริเวณผิวหน้าเว่นผลึก GaAs ขณะทำ Anneal คือ ในกรณีเว่นผลึก GaAs ชนิดพี ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันมีคุณสมบัติโอห์มมิกทั้งที่ยังไม่ได้ทำการ Anneal และที่ทำการ Anneal แล้ว ทั้งนี้เนื่องจาก Zn มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ซึมสูง (High Diffusion Coefficient) สามารถแพร่ซึมได้ทันทีที่สัมผัสกับผิวหน้าเว่นผลึก GaAs และเมื่อทำการ Anneal ค่าสภาพต้านทานผิวสัมผัสจะยังมีค่าต่ำลงไปอีก ทั้งนี้เนื่องจากเกิดขึ้น p^{++} ขึ้น ด้วยเหตุผลที่ว่า Zn แพร่ซึมลงไปแทนที่ตำแหน่งของ Ga หลังการ Anneal ได้ค่าสภาพต้านทานผิวสัมผัสมีค่าต่ำสุดประมาณ $2.9 \times 10^{-4} \Omega\text{-cm}^2$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

คุณสมบัติของผลึก GaAs ที่ใช้เป็นผลึกฐานในการสร้างหัววัดรังสี

Item	Customer's Specifications	Guaranteed
GROWTH METHOD	HB METHOD	HB METHOD
CONDUCTION TYPE	N TYPE	N TYPE
DOPANT	Si	Si
CARRIER CONCENT.	$1.0 \times 10^{18} \sim 4.0 \times 10^{18} / \text{cm}^3$	$S: 2.1 \times 10^{18} \sim T: 2.3 \times 10^{18} / \text{cm}^3$
RESISTIVITY	$\text{ohm} \cdot \text{cm}$	$S: 1.5 \times 10^{-3} \sim T: 1.4 \times 10^{-3} \text{ ohm} \cdot \text{cm}$
MOBILITY	cm^2 / Vs	$S: 2.0 \times 10^3 \sim T: 1.9 \times 10^3 \text{ cm}^2 / \text{Vs}$
EPD	$2A: \leq 2.0 \times 10^3 / \text{cm}^2$	614 \sim 614 $/ \text{cm}^2$
THICKNESS-CENTER	350 (\pm 10) μm	351 \sim 354 μm
DIAMETER	50.00 (\pm 0.30) mm	50.02 \sim 50.04 mm
SURFACE FINISH	FRONT POLISHED BACK LAPPED & ETCHED (SC-E)	POLISHED (SC-E) LAPPED & ETCHED
ORIENTATION	(100) $\pm 0.10^\circ$	(100) $\pm 0.10^\circ$
GF (PRIMARY)	16.00 (\pm 1.00) mm	16.39 \sim 16.39 mm
IF (SECONDARY)	7.00 (\pm 1.00) mm	6.91 \sim 6.91 mm
EDGE ROUNDING	0.25 mm R	0.25 mm R
X/L		0.31 \sim 0.34
Package	WAFER TRAY	Wafer No. 1 \sim 10
Weight	3.6 \sim 3.6 g	Total Weight 36.0 g
Total Wafer	10 pcs	Total Area

Item	Customer's Specifications	Guaranteed
GROWTH METHOD	LEC METHOD	LEC METHOD
CONDUCTION TYPE	SEMI-INSULATOR TYPE	SEMI-INSULATOR TYPE
DOPANT	C - c o n t r o l l e d	C - c o n t r o l l e d
RESISTIVITY	$\geq 1.0 \times 10^7$ ohm-cm	S: $2.6 \times 10^7 \sim$ T: 1.0×10^7 ohm-cm
MOBILITY	$\geq 6.0 \times 10^3$ cm ² /Vs	S: $6.8 \times 10^3 \sim$ T: 6.6×10^3 cm ² /Vs
EPD	C : $\leq 1.0 \times 10^5$ /cm ²	C : $\leq 1.0 \times 10^5$ /cm ²
THICKNESS-CENTER	600 (± 10) μ m	601 ~ 605 μ m
DIAMETER	76.00 (± 0.30) mm	76.02 ~ 76.02 mm
SURFACE FINISH FRONT BACK	POLISHED (SC+) LAPPED & ETCHED	POLISHED (SC+) LAPPED & ETCHED
ORIENTATION	(100) $\pm 0.10^\circ$	(100) $\pm 0.10^\circ$
OF (PRIMARY)	22.00 (± 1.00) mm	21.89 ~ 21.89 mm
IF (SECONDARY)	12.00 (± 1.00) mm	11.79 ~ 11.79 mm
EDGE ROUNDING	0.25 mm R	0.25 mm R
X/L		0.69 ~ 0.72
Package	WAFER TRAY	Wafer No. 1 ~ 10
Weight	14.4 ~ 14.4 g	Total Weight 144.0 g
Total Wafer	10 pcs	Total Area

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Item	Customer's Specifications		Guaranteed	
GROWTH METHOD	HB METHOD		HB METHOD	
CONDUCTION TYPE	N TYPE		N TYPE	
DOPANT	None		None	
CARRIER CONCENT.	NO SPECIFICATION	/ cm ³	S:1.1X10 ¹⁵ ~ T:4.0X10 ¹⁴	/ cm ³
RESISTIVITY	NO SPECIFICATION	ohm-cm	S:1.0X10 ⁰ ~ T:2.7X10 ⁰	ohm-cm
MOBILITY	NO SPECIFICATION	cm ² /Vs	S:5.7X10 ³ ~ T:5.8X10 ³	cm ² /Vs
EPD	AB: ≤ 1.0 X 10 ⁴	/ cm ²	AB: ≤ 1.0 X 10 ⁴	/ cm ²
THICKNESS-CENTER	350 (± 10)	μm	341 ~ 353	μm
DIAMETER	50.00 (± 0.30)	mm	50.06 ~ 50.07	mm
SURFACE FINISH	FRONT POLISHED (SC-E) SLICED & ETCHED	BACK	POLISHED (SC-E) SLICED & ETCHED	
ORIENTATION	(100) ± 0.50°		(100) ± 0.50°	
OF(PRIMARY)	16.00 (± 1.00)	mm	15.98 ~ 16.10	mm
IF(SECONDARY)	7.00 (± 1.00)	mm	6.77 ~ 6.92	mm
EDGE ROUNDING	0.25	mm R	0.25	mm R
Package	WAFER TRAY		Wafer No.	1 ~ 19
Weight	3.5 ~ 3.5 g		Total Weight	66.5 g
Total Wafer	19 pos		Total Area	

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียน

นายศุภโชค ไทน้อย เกิดเมื่อวันที่ 12 ตุลาคม พ.ศ. 2499 ที่โรงพยาบาลจุฬาลงกรณ์ อำเภอปทุมวัน จังหวัดกรุงเทพมหานคร ได้รับปริญญาการศึกษาศาสตรบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์ทั่วไป จากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เมื่อปี พ.ศ. 2528 ปัจจุบันรับราชการในตำแหน่งครู (ชำนาญการ) ระดับ 8 สังกัดห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขานิวเคลียร์เทคโนโลยี เมื่อปี พ.ศ. 2539



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย