

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ทุนวิจัย

กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช

รายงานผลการวิจัย

การพัฒนาหัววัดรังสีสารกึ่งตัวนำแกลเลียมอาร์เซไนด์

โดย

ชุมพล อันตรเสน

สุวิทย์ ปุณณชัยยะ

ศุภโชค ไทยน้อย

กรกฎาคม 2547

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยชิ้นนี้ได้รับการสนับสนุนเงินทุนวิจัยจาก กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช ปีการเงิน 2544 (ครั้งที่ 2) คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปิณฑญาแก้ว รองศาสตราจารย์ ดร. มนตรี สวัสดิ์ศฤงฆาร รองศาสตราจารย์ ดร. สมชัย รัตนธรรมพันธ์ ที่ให้คำแนะนำในงานวิจัยนี้ และขอขอบคุณ คุณพรชัย ช่างม่วง คุณอนิวรรณน์ ดันเดชานุรัตน์ ที่ช่วยเหลือในการวัดผลตอบ สอนองทางรังสี



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เลขหมู่	๑๗ ๑๕ 1๖
เลขทะเบียน	012 735
วัน, เดือน, ปี	2๗ ก.ค. 49

ชื่อโครงการวิจัย	การพัฒนาหัววัดรังสีสารกึ่งตัวนำแกลเลียมอาร์เซไนด์
ชื่อผู้วิจัย	ชุมพล อันตรเสน สุวิทย์ ปุณณชัยยะ ศุภโชค ไทยน้อย
เดือนและปีที่ทำวิจัยเสร็จ	กรกฎาคม 2547

บทคัดย่อ

หัววัดรังสีสารกึ่งตัวนำของแกลเลียมอาร์เซไนด์ ได้รับการออกแบบ ประดิษฐ์ และทดสอบ คุณสมบัติ โครงสร้างที่ออกแบบมี 2 รูปแบบ แบ่งตามชนิดของแวนผลึกฐานเริ่มต้น แบบแรกเริ่มต้นจากแวนผลึกแกลเลียมอาร์เซไนด์ชนิดกึ่งฉนวน ส่วนแบบหลังเริ่มต้นจากแวนผลึกแกลเลียมอาร์เซไนด์ชนิดเอ็นบวก ในกรณีของกลุ่มแรกมีทั้งโครงสร้างชนิด ซ็อคเก็ต และโครงสร้างชนิดพีไอเอ็น (pin) ส่วนกลุ่มหลังมีเฉพาะโครงสร้าง $p^+n^-n^+$ โดยเฉพาะชั้นทำงาน n^- จะถูกปลูกด้วยเทคโนโลยีเอพิแทกซีสถานะของเหลว ซึ่งมีกระบวนการในการปลูกผลึกต่างกัน 4 แบบ ตามจำนวนหลุมสารละลาย GaAs (n^-) ทั้งนี้เพื่อปรับปรุงคุณภาพผลึกชั้น n^- ให้ดีขึ้น หลังจากนั้นสมรรถนะของสิ่งประดิษฐ์ได้รับการตรวจสอบโดยการวัดลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า และความสามารถในการตอบสนองรังสี พบว่า โครงสร้างซ็อคเก็ตมีแรงดันพังทลายสูงถึง 200 โวลต์ แต่กระแสมีคอยู่ในช่วง 0.5 mA ในกรณีของโครงสร้าง pin และ $p^+n^-n^+$ นั้น ทั้งสองแสดงค่าแรงดันพังทลาย 25 โวลต์ และค่ากระแสมีคอยู่ในช่วง 10 μ A สำหรับการทดสอบความสามารถในการวัดรังสี หัววัดรังสีที่ผลิตทุกโครงสร้างไม่มีผลตอบสนองต่อรังสี สาเหตุเนื่องจากในโครงสร้างซ็อคเก็ตมีกระแสรั่วค่อนข้างสูง ในขณะที่โครงสร้าง $p^+n^-n^+$ ชั้นผลึก n^- มีคุณภาพผลึกดี

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Project Title	Development of GaAs Semiconductor Radiation Detectors
Name of the Investigators	Choopol ANTARASENA Suvit PUNNACHAIYA Supachok THAINOI
Year	July 2004

Abstract

Semiconductor radiation detectors of GaAs have been designed, fabricated and tested. There are two types of designed structures classified following the types of starting substrate. The semi-insulating GaAs (SI-GaAs) is used for the first, meanwhile n^+ -GaAs for the second. In the first group, both schottky and pin structures have been realized whereas the second have only $p^+ n^- n^+$ structure. The n^- -GaAs active layer of the latter have been grown by the liquid phase epitaxy (LPE) technique. Four LPE processes according to different numbers of GaAs (n^-) solution are applied to improved the quality of n^- -GaAs active layer. After that the device performances have been tested by measuring the electrical characteristics and the radiation responsibility. We find that the schottky structures have the breakdown voltage up to 200 Volts, but the dark current around the range of 0.5 mA. In case of pin and $p^+ n^- n^+$ structures, both exhibit the breakdown voltage of 25 volts and the dark current of 10 μ A. As for the radiation responsibility, all structures do not function at all. This is due to the high leakage current of schottky structure and the low quality GaAs active layer of $p^+ n^- n^+$.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ii
บทคัดย่อภาษาไทย	iii
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	iv
สารบัญ	v
รายการรูปภาพประกอบ	vii
รายการตารางประกอบ	x
1. บทนำ	1
2. ทฤษฎีของรังสีเอกซ์และการทำงานของหัววัดรังสีสารกึ่งตัวนำ	2
2.1 รังสีเอกซ์ (X-rays)	2
2.2 อันตรกิริยาของรังสีเอกซ์กับสสาร (Interaction of X-rays Radiation with Matter)	4
2.2.1 ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric Effect)	4
2.2.2 ปรากฏการณ์คอมป์ตัน (Compton Effect)	5
2.2.3 การเกิดคู่อิเล็กตรอน-โพสิตรอน หรือเพร์โปรดักชัน (Pair Production)	6
2.3 การดูดกลืนและการลดปริมาณรังสีเอกซ์ (Attenuation of X-rays Radiation)	7
2.4 การเกิดไอออนในเซชันและการรวบรวมประจุ (Ionization and Charges Collection) ...	9
2.5 หลักการทำงานของโฟโตไดโอดซี-เอ็น	10
2.6 การวัดพลังงานรังสีเอกซ์	15
2.6.1 ลักษณะสัญญาณพัลส์	16
2.6.2 กระบวนการวัดพลังงานของรังสี	17
3. การปลูกผลึกโดยวิธีอพิแทกซ์ในสถานะของเหลว	20
4. การผลิตตั้งประดิษฐ์	22
4.1 โครงสร้างที่ใช้แวนผลึกของ GaAs ชนิด Semi-insulating (SI) เป็นผลึกเริ่มต้น	22
4.1.1 โครงสร้างที่ใช้แวนผลึกของ GaAs ชนิด Semi-insulating (SI) เป็นผลึกเริ่มต้น.	22
4.1.2 โครงสร้างที่ใช้แวนผลึกของ GaAs (n') เป็นผลึกเริ่มต้น	23
4.2 การเตรียมผลึกแผ่นฐานก่อนปลูกผลึก	24
4.3 การเตรียมวัสดุของสารละลาย	24
4.4 การกำหนดโปรไฟล์ (อุณหภูมิ-เวลา) [Profile (Temp, Time)]	25
4.4.1 โครงสร้างที่ใช้แวนผลึกของ GaAs ชนิด Semi-insulating (SI) เป็นผลึกเริ่มต้น.	25
4.4.2 โครงสร้างที่ใช้แวนผลึกของ GaAs (n') เป็นผลึกเริ่มต้น	27

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.5 การกำหนดขอบเขตหรือเนื้อที่ทำงานของห้ววัด	29
5. ผลการวิจัย	30
5.1 สมบัติทางไฟฟ้าของห้ววัดรังสี	30
5.2 การทดสอบทางด้านการวัดรังสี	32
5.2.1 ขั้นตอนการทดสอบ	32
5.2.2 ผลจากการทดสอบรังสี	33
6. สรุปและวิจารณ์ผล	34
7. เอกสารอ้างอิง	36
8. ภาคผนวก 1	37
9. ภาคผนวก 2	39



 ศูนย์วิทยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการรูปภาพประกอบ

		หน้า
รูปที่ 1	ลักษณะการเกิดรังสีเอกซ์	3
รูปที่ 2	แผนภาพลักษณะการเกิดปรากฏการณ์ Photoelectric Effect	4
รูปที่ 3	แผนภาพลักษณะการเกิดปรากฏการณ์ Compton Effect	5
รูปที่ 4	ลักษณะการเกิด Pair Production	6
รูปที่ 5	ความสัมพันธ์ของพลังงานและโอกาสในการเกิดปรากฏการณ์ของอันตรกิริยาจากโฟตอนใน NaI	7
รูปที่ 6	ภาพแสดงลักษณะทางกายภาพของหัววัดรังสี	9
รูปที่ 7	การจ่ายแรงดันเมื่อใช้งาน โฟโตไดโอดและกราฟลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ...	11
รูปที่ 8	การดูดกลืนแสงและการเกิดพาหะใน โฟโตไดโอดในขณะที่ไบแอสย้อนด้วยแรงดัน V_R	13
รูปที่ 9	แสดงการเกิดสัญญาณพัลส์นิวเคลียร์ (ก) วงจรของหัววัดรังสี (ข) วงจรสมมูลของหัววัดรังสี และ (ค) สัญญาณพัลส์ของหัววัดรังสี	16
รูปที่ 10	แผนภาพแสดงขั้นตอนการวัดพลังงานของรังสี	17
รูปที่ 11	สัญญาณที่ออกจากภาคขยายส่วนหน้า	18
รูปที่ 12	ลักษณะของสัญญาณที่ออกจากภาคขยายสัญญาณ ซึ่งมีค่า shaping time ต่างกันเปรียบเทียบกัน	19
รูปที่ 13	ภาพแสดงสเปกตรัมจากหัววัดชนิดต่างๆ ของรังสีเอกซ์	19
รูปที่ 14 (ก)	เตาเอพิแทกซี	21
รูปที่ 14 (ข)	แสดงรายละเอียดของเบ้ารองรับสารละลาย	21
รูปที่ 15	ภาพสเก็ตตัดขวางของหัววัดรังสีเอกซ์โครงสร้าง Schottky ที่ใช้ Semi-insulating GaAs เป็นผลึกเริ่มต้น	23
รูปที่ 16	ภาพสเก็ตตัดขวางของหัววัดรังสีเอกซ์โครงสร้าง PIN ที่ใช้ Semi-insulating GaAs เป็นผลึกเริ่มต้น	23
รูปที่ 17	ภาพสเก็ตตัดขวางของหัววัดรังสีเอกซ์โครงสร้าง $p^+ n^- n^+$ ที่ใช้ GaAs (n^-) เป็นผลึกเริ่มต้น	23
รูปที่ 18 (ก)	กราฟแสดงอุณหภูมิและช่วงเวลา, Profile (Temp, Time) ในการปลูกผลึกชั้น n^- บนผิวด้านหลังของโครงสร้าง Schottky ที่ใช้ Semi-insulating GaAs เป็นผลึกเริ่มต้น	26

รายการรูปภาพประกอบ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 18 (ข) กราฟแสดงอุณหภูมิและช่วงเวลา, Profile (Temp, Time) ในการปลูกผลึกชั้น p^+ บนผิวด้านหน้าของแวนผลึก Semi-insulating	26
รูปที่ 19 กราฟแสดงอุณหภูมิและช่วงเวลาในการปลูกผลึกของกระบวนการ 1G โดยใช้ แวนผลึกเริ่มต้น 2 แผ่น (A และ B) สารละลายหลุมที่ 1 และ 2 สำหรับ Etching ผิวแวนผลึกพร้อมปลูกผลึกในช่วงเวลา ๑ ส่วนสารละลายหลุมที่ 3 และ 4 สำหรับ ปลูกผลึก GaAs (p)	27
รูปที่ 20 กราฟแสดงอุณหภูมิและช่วงเวลาในการปลูกผลึกของกระบวนการ 2G (Saturated 6 ชั่วโมง) และ 3G (Saturated 8 ชั่วโมง) โดยมีหลุมปลูกผลึก GaAs (n) ของตัวเองในหลุมที่ 3 และ 4 เพิ่มจากกรณี 1G	28
รูปที่ 21 กราฟแสดงอุณหภูมิและช่วงเวลาในการปลูกผลึกของกระบวนการ 4G โดยมีสารละลายหลุมที่ 5 และ 6 เพิ่มขึ้นจากกรณีกระบวนการ 2G และ 3G	28
รูปที่ 22 ภาพตัดขวางของหัววัดรังสีเอกซ์โครงสร้าง PIN ที่ผลิตจากแวนผลึก GaAs (n^+) แสดงปริมาณของชั้นทำงานที่มีขนาดแน่นอน	29
รูปที่ 23 ลักษณะหัววัดรังสีที่สร้าง PIN ที่สร้างขึ้นจริง	29
รูปที่ 24 กราฟลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันในที่มืดของหัววัดรังสีเอกซ์ชนิด Schottky โดยใช้ผลึกเริ่มต้นจาก GaAs (SI)	30
รูปที่ 25 กราฟลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันในที่มืดของหัววัดรังสีเอกซ์ โครงสร้าง PIN จากแวนผลึกเริ่มต้น GaAs (SI)	30
รูปที่ 26 กราฟลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันในที่มืดของหัววัดรังสีเอกซ์ โครงสร้าง $p^+ n^+ n^+$ จากแวนผลึกเริ่มต้น GaAs (n^+)	31
รูปที่ 27 แสดงการติดตั้งหัววัดรังสีกับแท่นยึดภายในภาชนะหุ้มหัววัดรังสี	32
รูปที่ 28 แสดงส่วนประกอบต่าง ๆ ของเครื่องมือวัดรังสี	33
รูปที่ 29 แสดงผลการวัดการตอบสนองต่อรังสีอัลฟาของหัววัดรังสีจากเครื่อง MCA	33
รูปที่ 30 แสดงสัญญาณผลการตอบสนองต่อรังสีอัลฟาของหัววัดรังสีที่ได้จาก Oscilloscope ..	34
รูปที่ 31 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันหัวต่อคอลเล็กเตอร์-เบส ของทรานซิสเตอร์ที่ผลิตจากอุปกรณ์ปลูกผลึกชุดเดียวกัน หัวต่อคอลเล็กเตอร์-เบส มีแรงดันพังทลายสูงถึง 150 Volt	35

รายการรูปภาพประกอบ (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ A.1	กราฟจำนวนเศษส่วนอะตอมของอาร์เซนิกในสารละลายอิมิตัว GaAs ที่อุณหภูมิ ต่าง ๆ	37
รูปที่ A.2	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของพาหะกับเศษส่วนอะตอมของสาร เจือปนชนิดต่างๆใน GaAs ที่ 800 องศาเซลเซียส	38
รูปที่ A.3	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของพาหะกับเศษส่วนอะตอมของสาร เจือปนชนิดต่างๆใน GaAs	38
รูปที่ B.1	Mask ที่ใช้ทำ contact ด้าน p (ก) และทำ Mesa (ข) ขนาดแสดงในหน่วย μm ...	39
รูปที่ B.2	แสดงภาพด้านหน้าของหัววัดรังสีโครงสร้าง Mesa ที่ผลิตได้ ถ่ายด้วย Optical Microscope	40

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการตารางประกอบ

	หน้า
ตารางที่ 1	18
ตารางที่ 2	27
ตารางที่ 3	31
ตารางที่ 4	35



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1. บทนำ

การวัดการแผ่รังสีจากแหล่งกำเนิดรังสี ได้แก่ รังสีอัลฟา รังสีเบตา รังสีแกมมา รังสีนิวตรอน และอนุภาคนิวเคลียร์อื่นๆ เป็นต้น ไม่ว่าจะเป็นการวัดความเข้มรังสีแบบนับรวม (integral counting) หรือจะวัดรังสีเฉพาะพลังงาน (differential counting) จะต้องอาศัยระบบวัดอิเล็กทรอนิกส์มาใช้ในการวัดรังสีทั้งสิ้น หัววัดรังสี (radiation detector) เป็นอุปกรณ์วัดส่วนหน้าที่ทำหน้าที่ตรวจวัดรังสีด้วยการเปลี่ยนพลังงานเป็นสัญญาณพัลส์ จากทฤษฎีของการตรวจวัดรังสีพบว่า โครงสร้างไดโอดสารกึ่งตัวนำสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการวัดรังสีได้^[1] วัสดุสารกึ่งตัวนำที่ใช้สร้างหัววัดรังสีอาจจะอยู่ในรูปธาตุเดี่ยว (single element) หรือในรูปสารประกอบกึ่งตัวนำ (compound semiconductors) เช่น ซิลิกอน (Si) เจอร์เมเนียม (Ge) แกลเลียมอาร์เซไนด์ (GaAs) เป็นต้น

ปัจจุบันหัววัดรังสีสารกึ่งตัวนำที่ใช้แล้วต้องสั่งซื้อจากต่างประเทศและมีราคาสูงมาก ดังนั้นเพื่อเป็นการเริ่มงานด้านการพัฒนาหัววัดรังสีสารกึ่งตัวนำสำหรับวัดโฟตอนในประเทศ ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี จึงได้ร่วมมือกับห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ (semiconductor device research laboratory) ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าพัฒนาหัววัดรังสีประเภทอนุภาคของรังสีอัลฟา โดยใช้วัสดุซิลิกอนและผลที่ได้เป็นที่น่าพอใจ^[2]

อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบระหว่างธาตุซิลิกอน เจอร์เมเนียมกับสารประกอบแกลเลียมอาร์เซไนด์ (GaAs) GaAs มีคุณสมบัติที่เด่นกว่าหลาย ๆ ประการ เมื่อประยุกต์ใช้เป็นหัววัดรังสี เนื่องจากมีสัมประสิทธิ์ในการดูดกลืนสูงกว่า^[3] การดูดกลืนพลังงานของสารกึ่งตัวนำโดยเฉพาะกับรังสีเอกซ์ และรังสีแกมมา จะเกิดจากกระบวนการโฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric Process) ซึ่งประสิทธิภาพในการดูดกลืนจะเป็นปฏิภาคกับเลขอะตอมของสารกึ่งตัวนำยกกำลังสี่ถึงห้า (Z^{4-5}) โดยจะขึ้นกับธาตุที่มีเลขอะตอมสูงสุดในสารประกอบนั้น Si มีเลขอะตอมเพียง 14 ในขณะที่ Ge Ga/As มีเลขอะตอม 32 และ 31/33 ผลก็คือขนาดปริมาตรของหัววัดรังสีของสาร Ge และ GaAs จึงสามารถลดขนาดลง 20 เท่าตัว เมื่อเทียบกับของซิลิกอนเมื่อต้องการประสิทธิภาพในการดูดกลืนพลังงานเท่ากัน^[4] ที่สำคัญคือหัววัดรังสีประเภทนี้สามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิห้อง ขณะที่หัววัดโฟตอนแบบซิลิกอนหรือเจอร์เมเนียมจะทำงานที่อุณหภูมิของไนโตรเจนเหลว

กระแสมืด (Dark Current) ของหัววัดรังสีเป็นพารามิเตอร์สำคัญอีกค่าหนึ่งที่จะกำหนดประสิทธิภาพของหัววัด กระแสมืดมีค่านาน้อยเป็นสัดส่วนกับช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ (E_g) ตามสมการ $e^{-(E_g/kT)}$ โดยที่ k คือ Boltzman's constant และ T คือ อุณหภูมิในหน่วย kelvin ($^{\circ}K$) Ge มี E_g เท่ากับ 0.72 eV ในขณะที่ Si และ GaAs มีช่องว่างพลังงาน 1.12 และ 1.424 eV ตามลำดับ ดังนั้นหัววัดที่ทำจาก Ge จะต้องทำงานที่อุณหภูมิต่ำเพื่อลดกระแสมืด จึงไม่สามารถทำงานที่อุณหภูมิห้อง (Room Temperature) ได้ ในขณะที่ Si มีปัญหาน้อยกว่า ส่วน GaAs ถือได้ว่า E_g มีค่าอยู่ในช่วงที่เหมาะสม อย่างไรก็ตามสารกึ่งตัวนำ GaAs ก็ยังคงมีพาหะอิสระที่มีผลต่อกระแสมืดอยู่พอสมควร จึงต้องทำการพัฒนาสารกึ่งตัวนำ GaAs เพื่อลดค่าพาหะอิสระ ซึ่งสามารถกระทำได้โดย

ทำให้เกิดการชดเชยระหว่าง “Native midgap donors” (EL2) กับสารเจือคดค้างประเภท Shallow Impurity Levels^[5] ทำให้ได้สารกึ่งตัวนำประเภท Semi-insulating (SI) ซึ่งมีค่าความต้านทานจำเพาะสูงอยู่ในช่วง 10^7 - 10^8 Ω -cm แต่ก็มีผลเสียอย่างเลวร้ายต่อประสิทธิภาพในการรวบรวมพาหะ (Charge Collection Efficiency) เพราะ EL2 มีพฤติกรรมจับพาหะ (Deep Trap) อีกแนวทางหนึ่งซึ่งพัฒนามาก็คือการปลูกผลึกโดยเทคโนโลยีการปลูกผลึกเอพิแทกซ์ (Epitaxy) ให้ได้ผลึกคุณภาพสูง EL2 จะลดลง แต่ก็ยังมีผลการทดลองไม่อยู่ในระดับที่น่าพอใจ สำหรับโครงสร้างของหัววัดรังสีมีทั้งที่ใช้โครงสร้างชอตตี้ (Schottky Diodes) และ โครงสร้าง PIN diodes^[6, 7, 8, 9] แต่ไม่ว่าจะใช้โครงสร้างใดในการผลิต สิ่งประดิษฐ์นี้จะต้องมีกระแสรั่ว (Leakage Current) ต่ำเพื่อลดสัญญาณรบกวน และต้องทำงานที่แรงดันกลับทางสูงมาก ๆ เพื่อเพิ่มขนาดสนามไฟฟ้าอันเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการรวบรวมพาหะ

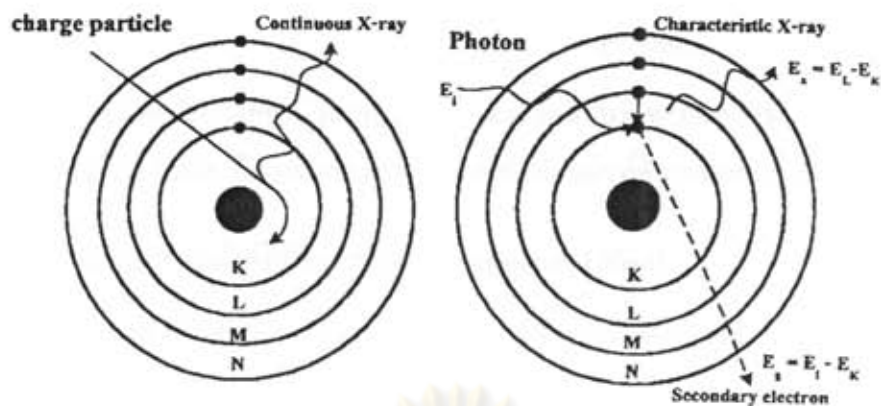
ในรายงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจะกล่าวถึงทฤษฎีของรังสีเอกซ์ การทำงานของหัววัดรังสีสารกึ่งตัวนำ การวัดพลังงานรังสีเอกซ์ การปลูกผลึกสารกึ่งตัวนำ จากนั้นจะกล่าวถึงขั้นตอนการออกแบบและผลิตสิ่งประดิษฐ์ การวัดผล การอภิปรายผล และสรุปผล

2. ทฤษฎีของรังสีเอกซ์และการทำงานของหัววัดรังสีสารกึ่งตัวนำ^[10]

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดของรังสีเอกซ์ อันตรกิริยาของรังสีเอกซ์กับสสาร การดูดกลืนรังสีเอกซ์ การเกิดไอออไนเซชันและการรวบรวมประจุ หลักการทำงานของโฟโตไดโอดพี-เอ็น และสุดท้ายจะกล่าวถึงการวัดพลังงานรังสีเอกซ์

2.1. รังสีเอกซ์ (X-rays)

รังสีเอกซ์เกิดจากการแผ่รังสีประเภทคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า จากบริเวณชั้นโคจรของอิเล็กตรอนรอบๆ นิวเคลียส อันตรกิริยาที่ก่อให้เกิดการแผ่รังสีเอกซ์สามารถเกิดได้ 2 รูปแบบ ได้แก่ รังสีเอกซ์ที่เกิดจากกระตุ้น (excited) หรือการแทนที่ของอิเล็กตรอนในวงโคจรของอะตอมที่หลุดออกไปด้วยอันตรกิริยาใดๆ กับอนุภาคนิวเคลียร์จากภายนอกหรือการจับอิเล็กตรอนโดยนิวเคลียส (electron capture) ทำให้เกิดที่ว่างในตำแหน่งนั้น อิเล็กตรอนอื่นๆ ในวงนอกจะลดระดับพลังงานลงเข้ามาแทนที่ด้วยการคายพลังงานส่วนหนึ่งที่เกินออกมา ในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีพลังงานเฉพาะตัวของธาตุแต่ละชนิด เราเรียกรังสีเอกซ์แบบนี้ว่ารังสีเอกซ์เฉพาะตัว (characteristic x-ray) รังสีเอกซ์อีกประเภทหนึ่งได้จากการยิงธาตุหนักด้วยอิเล็กตรอนหรือโปรตอนพลังงานสูงเมื่อเข้าใกล้นิวเคลียสของเป้า (target) แล้วจะเบนทิศทางไป ทำให้อนุภาคดังกล่าวสูญเสียพลังงานไปส่วนหนึ่งในรูปรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเราก็เรียกรังสีเอกซ์เช่นกัน เนื่องจากการเข้าชนของอิเล็กตรอนเป็นแบบสุ่ม (random) ทำให้ทิศทางที่เบนไปและการสูญเสียพลังงานไม่แน่นอน ค่าพลังงานของรังสีเอกซ์ที่ได้



รูปที่ 1 ลักษณะการเกิดรังสีเอกซ์

จึงมีหลายค่าที่ต่อเนื่องกัน ตั้งแต่ศูนย์จนถึงค่าสูงสุดของพลังงานของอนุภาคที่ทำอันตรกิริยา เราจึงเรียกรังสีเอกซ์แบบนี้ว่า รังสีเอกซ์แบบต่อเนื่อง (continuous x-ray) รูปที่ 1 แสดงถึงลักษณะการเกิดรังสีเอกซ์แบบต่อเนื่องและรังสีเอกซ์เฉพาะตัวซึ่งมีคุณสมบัติเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านี้มีคุณสมบัติเป็นได้ทั้งคลื่นและอนุภาค (wave particle duality) แล้วแต่กรณี สำหรับคุณสมบัติที่เป็นอนุภาค จะเรียกว่า “โฟตอน (photon)” ดังนั้นบางครั้งจึงเรียกรังสีเอกซ์ว่าโฟตอน รังสีเอกซ์ (x-ray photon) ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานโฟตอนของรังสีเอกซ์กับความถี่ (ν) สามารถหาได้จากสมการ (1)

$$E = h\nu \quad (1)$$

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

ν คือ ความถี่ ซึ่งมีค่าเท่ากับ c/λ

ดังนั้นจากสมการที่ (1) ถ้าแทนค่า ν จะได้สมการความสัมพันธ์ของพลังงานและความยาวคลื่น (λ)

$$E = hc / \lambda \quad (2)$$

เมื่อ c คือ ความเร็วในการเคลื่อนที่ของแสงมีค่าเท่ากับ 2.99×10^8 เมตรต่อวินาที

λ คือ ความยาวคลื่น มีหน่วยเป็นเมตร

จากสมการที่ (2) เมื่อแทนค่าคงที่ (hc) และแปลงหน่วยความยาวคลื่นเป็นอังสตรอม ($1 \text{ \AA} = 10^{-8} \text{ cm} = 0.0001 \mu\text{m}$) พลังงานในหน่วยของกิโลอิเล็กตรอน โวลต์ (keV) สามารถเขียนความสัมพันธ์ของพลังงานและความยาวคลื่นได้ ดังนี้

$$E(\text{keV}) = 12.4 / \lambda (\text{\AA}) \quad (3)$$

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

รังสีเอกซ์มีพฤติกรรมเป็นโฟตอน เมื่อโฟตอนเคลื่อนที่เข้าชนสสารหรือตัวกลางใดๆ ทำให้เกิดปรากฏการณ์ขึ้น 3 แบบ คือ โฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟกต์ คอมป์ตันเอฟเฟกต์ และแพร่โปรัดักชัน

2.2.1 ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric Effect)

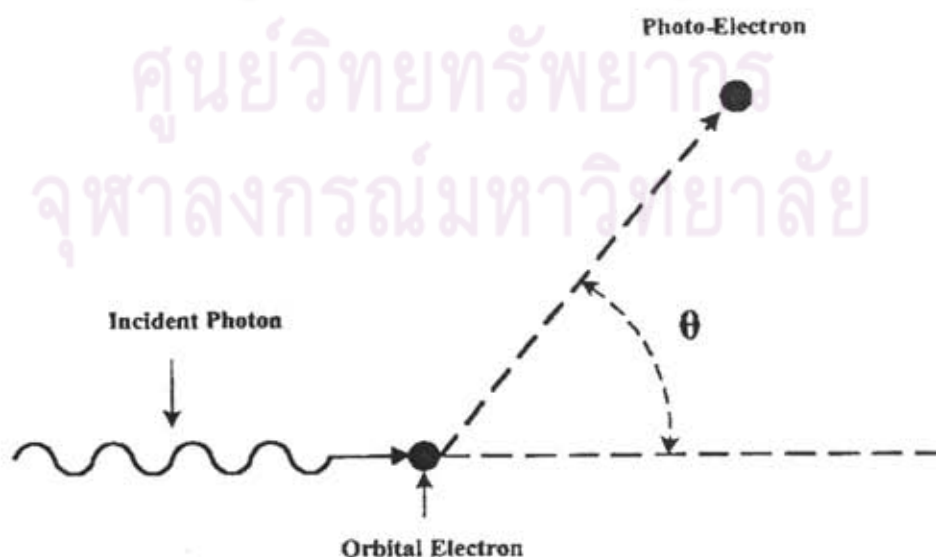
ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก เกิดกับโฟตอนที่มีพลังงานต่ำ เมื่อโฟตอนที่มีพลังงานมากกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในวงโคจร (orbital electron) วิ่งเข้าชนอะตอม จะถ่ายเทพลังงานทั้งหมดให้กับอิเล็กตรอนในวงโคจร ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอมดังแสดงในแผนภาพรูปที่ 2 ซึ่งอิเล็กตรอนที่หลุดจากวงโคจรนี้เรียกว่าโฟโตอิเล็กตรอน พลังงานของโฟโตอิเล็กตรอนหาได้จากสมการ (4) กระบวนการนี้โฟตอนจะเสียพลังงานทั้งหมดให้กับอิเล็กตรอน และโฟโตอิเล็กตรอนจะเป็นตัวทำให้เกิดกระบวนการไอออไนซ์เมื่อเคลื่อนผ่านอะตอมของสสาร โฟโตอิเล็กตรอนจะมีโอกาสเกิดขึ้นมากหรือน้อยขึ้นกับพลังงานของโฟตอน และเลขอะตอมของธาตุที่รับอันตรกิริยา กล่าวคือกระบวนการนี้จะมีโอกาสเกิดมากขึ้นเมื่อเลขอะตอมของตัวดูดกลืนเพิ่มขึ้น และพลังงานโฟตอนมีช่วงพลังงานน้อยกว่า 100 keV

$$E_e = E_\gamma - E_b \quad (4)$$

เมื่อ E_e คือ พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนที่ส่งออกมา

E_γ คือ พลังงานทั้งหมดของโฟตอน

E_b คือ พลังงานที่ใช้ในการทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอม (พลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอน)



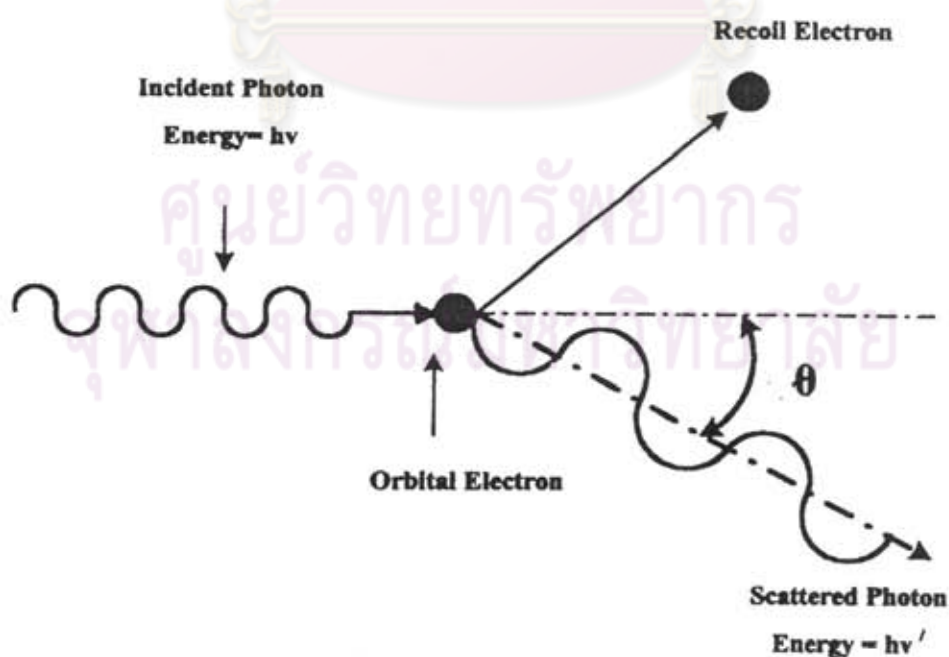
รูปที่ 2 แผนภาพลักษณะการเกิดปรากฏการณ์ Photoelectric Effect

2.2.2 ปรากฏการณ์คอมป์ตัน (Compton Effect)

เมื่อโฟตอนเข้าชนอะตอมของสาร จะทำอันตรกิริยากับอิเล็กตรอนที่อยู่ในวงโคจร โฟตอนจะเสียพลังงานบางส่วนให้กับอิเล็กตรอนทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาจากวงโคจร มีพลังงานจลน์ค่าหนึ่ง คือ $E_e = E_\gamma - E'_\gamma - E_b$ คล้ายกับการเกิดโฟโตอิเล็กทริก เมื่อ E'_γ คือ พลังงานของโฟตอนที่กระเจิง ดังแสดงในแผนภาพรูปที่ 3 โฟตอนที่เคลื่อนออกมาในทิศทางทำมุม θ กับทิศทางเดิม จะมีความยาวคลื่นมากขึ้น ($E'_\gamma < E_\gamma$) และอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาเรียกว่าอิเล็กตรอน (recoil electron)

เนื่องจากคอมป์ตันเอฟเฟกต์ เกิดขึ้นจากการกระทัระหว่างโฟตอนและอิเล็กตรอน ดังนั้นโอกาสของการเกิดคอมป์ตันเอฟเฟกต์จึงขึ้นกับจำนวนอิเล็กตรอนที่อยู่รอบนอก (orbital electrons) เลขอะตอมของสารที่รับอันตรกิริยา จึงเกิดได้ดีกับสารคูคกลินที่มีเลขอะตอมสูง และอันตรกิริยาคอมป์ตัน (compton interaction) จะลดลงเมื่อพลังงานของโฟตอนสูงชันกว่า 1.02 MeV

ข้อแตกต่างระหว่างปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก และปรากฏการณ์คอมป์ตัน คือปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก เป็นการคูคกลินพลังงานโฟตอนทั้งหมดที่คกกระทบ แต่ในกระบวนการของคอมป์ตันนั้น เพียงแต่ลดขนาดของพลังงานเดิมของโฟตอน และโฟตอนที่กระเจิงออกมาจะมีพลังงานลดลง โดยอิเล็กตรอนรับพลังงานไปค่าหนึ่ง หลังจากการเกิดกระบวนการคอมป์ตันแล้วโฟตอนอาจจะทำอันตรกิริยากับสสารเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกอีกและทำให้เกิดโฟโตอิเล็กตรอนขึ้นได้



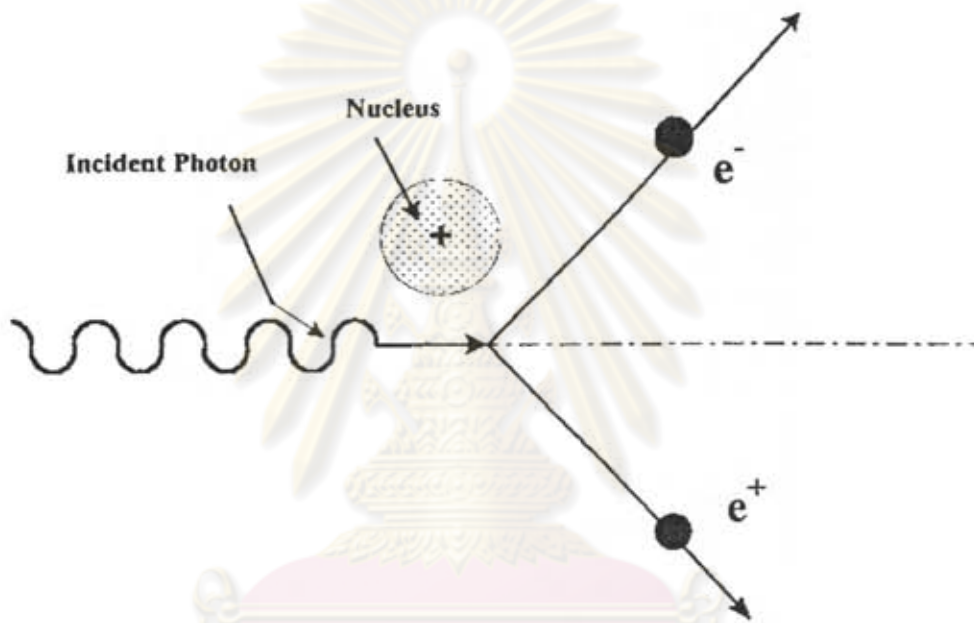
รูปที่ 3 แผนภาพลักษณะการเกิดปรากฏการณ์ Compton Effect

2.2.3 การเกิดคู่อิเล็กตรอน-โพซิตรอน หรือแพร์โปรดักชัน (Pair Production)

แพร์โปรดักชันเป็นแบบหนึ่งของกระบวนการดูดกลืนโฟตอน เกิดขึ้นเมื่อโฟตอนมีพลังงานอย่างน้อย 1.02 MeV และจะเกิดขึ้นมากเมื่อโฟตอนมีพลังงานสูงขึ้นกว่า 1.02 MeV ดังในแผนภาพรูปที่ 4

$$h\nu \rightarrow e^+ + e^- + 2E_k \quad (5)$$

$2E_k$ คือ พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอน และโพซิตรอน



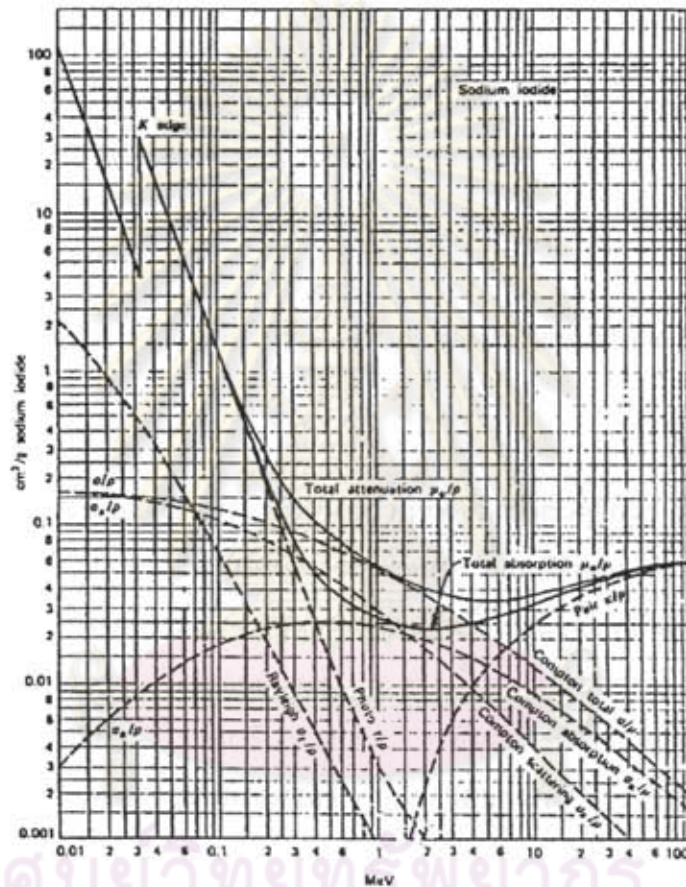
รูปที่ 4 ลักษณะการเกิด Pair Production

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

$$e^+ + e^- \rightarrow 2h\nu \quad (6)$$

โฟตอนที่เกิดขึ้นมาจากมวลของโพซิตรอน และอิเล็กตรอน แต่ละอนุภาคมีพลังงาน 0.511 MeV ($E = mc^2$) จึงทำให้แต่ละโฟตอน จึงมีพลังงาน 0.511 MeV และเคลื่อนไปในทิศทางตรงข้าม

ดังนั้นสรุปได้ว่าปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก เกิดขึ้นเมื่อโฟตอนมีพลังงานต่ำ เมื่อโฟตอนมีพลังงานสูงขึ้นจะมีปริมาณลดลง ปรากฏการณ์คอมป์ตันจะเพิ่มขึ้นและเมื่อพลังงานโฟตอนสูงขึ้นต่อจากช่วงแรกเมื่อพลังงานเริ่มสูงกว่า 1.02 MeV จะเริ่มเกิดเพอร์โปรดักชันมากขึ้น และปรากฏการณ์คอมป์ตันจะลดลง ดังตัวอย่างของโอกาสในการเกิดปรากฏการณ์ต่างๆ ในโซเดียมไอโอไดด์ ในรูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ของพลังงานและโอกาสในการเกิดปรากฏการณ์ของอันตรกิริยาจากโฟตอนใน NaI



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ของพลังงานและ โอกาสในการเกิดปรากฏการณ์ของอันตรกิริยาจากโฟตอนใน NaI

2.3 การดูดกลืนและการลดปริมาณรังเอ็กซ์ (Attenuation of X-rays Radiation)

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

$$\frac{dI}{I} = -\alpha dx \quad (7)$$

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

$$\alpha_m (\text{cm}^2 / \text{gm}) = \alpha (\text{cm}^{-1}) / \rho (\text{g} / \text{cm}^3) \quad (8)$$

ในที่นี้ ρ เป็นความหนาแน่นของวัสดุมีหน่วยเป็น gm/cm^3 ทำให้ α_m มีหน่วยเป็น cm^2/gm จากสมการที่ 7 สามารถเขียนใหม่เป็น

$$\frac{dI}{I} = -\alpha_m \rho dx \quad (9)$$

จากสมการที่ 9 สามารถเขียนในรูปสมการลดทอนความเข้มรังสีได้เป็น

$$I = I_0 e^{(-\alpha_m \rho x)} \quad (10)$$

ความเข้มของรังสีเอกซ์ลดลง เนื่องจากรังสีเอกซ์มาทำอันตรกิริยากับวัสดุตัวกลาง และเกิดอันตรกิริยาหลักทั้งสาม คือ โฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟกต์ คอมป์ตันเอฟเฟกต์ และแพร์โปรดักชัน ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนที่กล่าวถึง จึงเป็นค่าสัมประสิทธิ์รวมเนื่องจากอันตรกิริยาทั้งสาม ถ้า α_e , α_c และ α_p หมายถึงสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงเส้น อันเนื่องมาจากอันตรกิริยาโฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟกต์ คอมป์ตันเอฟเฟกต์ และแพร์โปรดักชัน ตามลำดับ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงเส้นรวม และค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลรวมสามารถ แสดงได้ดังสมการที่ (11) และ (12)

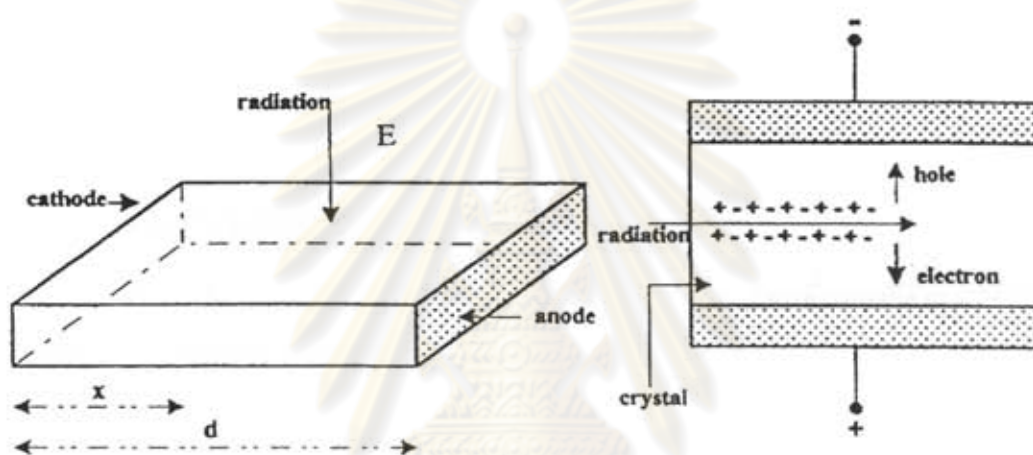
$$\alpha = \alpha_e + \alpha_c + \alpha_p \quad (11)$$

$$\alpha_m = \frac{\alpha_e}{\rho} + \frac{\alpha_c}{\rho} + \frac{\alpha_p}{\rho} \quad (12)$$

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

2.4 การเกิดไอออนในเซชันและการรวบรวมประจุ (Ionization and Charges Collection)

การอธิบายถึงกระบวนการทางกายภาพของหัววัดรังสีแบบสารกึ่งตัวนำ ให้สมมุติว่าหัววัดรังสีเป็นวัตถุเนื้อเดียวกันตลอด มีสนามไฟฟ้าคงที่ตลอดปริมาตรดังรูปที่ 6 กล่าวคือขั้วอิเล็กโทรดอยู่ห่างกันด้วยระยะทาง d และสนามไฟฟ้า E ในทุกๆ ตำแหน่งมีค่าเท่ากับ V/d เมื่อ V คือความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วทั้งสอง รังสีมีพลังงาน E ตกกระทบหัววัดรังสี ก่อให้เกิดจำนวนอิเล็กตรอน-โฮลจำนวน N ($N = \frac{E}{W}$) คู่ที่ระยะห่าง x ห่างจากขั้วลบ ($W =$ พลังงานที่ใช้ในการสร้างคู่อิเล็กตรอน-โฮล 1 คู่ (ionization-energy))



รูปที่ 6 ภาพแสดงลักษณะทางกายภาพของหัววัดรังสี

พลังงานที่ทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลควรมีค่าน้อย จะเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลจำนวนมาก การเคลื่อนที่ของพาหะ ไม่ว่าจะเป็นอิเล็กตรอนหรือโฮลควรมีการเคลื่อนที่ได้รอบทิศทางและเป็นอิสระ การเคลื่อนที่ภายใต้สนามไฟฟ้า จะขึ้นกับค่าผลคูณของค่าความคล่องตัวกับสนามไฟฟ้า การเคลื่อนที่บางครั้งจะมีการชนกับผลึกสารกึ่งตัวนำทำให้การเคลื่อนที่ไม่เป็นระเบียบ บางครั้งเกิดการรวมตัวกับพาหะชนิดตรงข้าม เกิดการสูญเสียพาหะ ดังนั้นเวลาชีวิต (life time) ของพาหะที่เกิดขึ้นจะนับตั้งแต่เวลาที่เกิดจนกระทั่งจนถูกดูดกลืนไปในตัวกลางในรูปของการรวมตัว (recombination) ค่าเวลาขึ้นอยู่กับชนิดของสารกึ่งตัวนำและความสมบูรณ์ของผลึกที่นำมาทำเป็นหัววัดรังสี พาหะจะเคลื่อนที่ผ่านถึงอิเล็กโทรดหรือไม่นั้นก็ขึ้นอยู่กับระยะทางที่มันสามารถเคลื่อนไปถึงอิเล็กโทรดก่อนเกิดการรวมตัว ถ้าระยะทางนี้มากกว่าระยะห่างของขั้วอิเล็กโทรด โอกาสที่พาหะจะเคลื่อนถึงขั้วอิเล็กโทรดจะมีมากขึ้น ดังนั้นเมื่อทราบค่าเวลาชีวิตของพาหะและความคล่องตัวของพาหะ ก็สามารถทราบระยะทางเคลื่อนที่ของพาหะได้จากสมการ

$$S_e = \mu_e \xi \tau_e \quad (13)$$

$$S_p = \mu_p \xi \tau_p \quad (14)$$

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 ดังนั้นสารกึ่งตัวนำที่จะสร้างเป็นหัววัดรังสีที่ดีควรมีค่าผลคูณที่สูง

2.5 หลักการทำงานของโฟโตไดโอดพี-เอ็น^[11, 12]

หลักการทำงานของหัววัดรังสี GaAs ชนิดรอยต่อ pin โดยพื้นฐานก็คือการทำงานของโฟโตไดโอด เมื่อโฟโตไดโอดถูกไบแอสกลับทาง กระแสที่ไหลจะไม่ขึ้นกับค่าแรงดันที่ไบแอส แต่จะขึ้นกับอัตราการเกิดทางแสง (Optical Generation Rate) ของคู่พาหะอิเล็กตรอน-โฮล (Electron-Hole Pairs, EHPs) ที่เกิดจากแสงตกกระทบ โดยแสงนั้นจะต้องมีพลังงานของโฟตอน (Photon Energy) เท่ากับหรือมากกว่าช่องว่างแถบพลังงาน (Energy Band Gap) ของสารกึ่งตัวนำที่ใช้ทำเป็นชั้นทำงานของโฟโตไดโอด โดยทั่วไปโฟโตไดโอดที่ดีจะถูกออกแบบให้พลังงานแสงถูกดูดกลืนมากที่สุดที่บริเวณย่านปลอดพาหะ หรือย่านทำงาน

เนื่องจากแรงดันที่ใส่เข้าไปเกือบทั้งหมดจะตกคร่อมย่านทำงาน ทำให้คู่อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดขึ้นในบริเวณนี้ถูกพัดพา (Drift) โดยสนามไฟฟ้าที่ตกคร่อม โดยจะพัดพาอิเล็กตรอนและโฮลไปยังย่าน N^+ และ P^+ ตามลำดับ ส่วนพาหะข้างน้อยที่เกิดขึ้นในย่านเป็นกลาง กล่าวคือ อิเล็กตรอนในชั้น p^+ และโฮลในชั้น n^+ ภายในระยะแพร่ซึม (Diffusion Length) จะอาศัยการแพร่ซึม (Diffusion) ของพาหะมายังบริเวณหัวต่อ จากนั้นจึงถูกสนามไฟฟ้าในย่านปลอดพาหะพัดพาไปยังอีกด้านหนึ่ง ผลของการเคลื่อนที่ของพาหะทำให้เกิดกระแสไหลในทิศทางย้อนกลับของไดโอด (ออกทางขั้ว P^+) และเมื่อรวมกระแสมืด (Dark Current) สามารถแสดงเป็นสมการได้ดังนี้

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] - I_p \quad (15)$$

เมื่อ I_0 คือกระแสอิ่มตัวย้อนกลับ (Saturation Current) หรือกระแสมืด (Dark Current) ของไดโอดเมื่อแรงดันไบแอสเท่ากับศูนย์

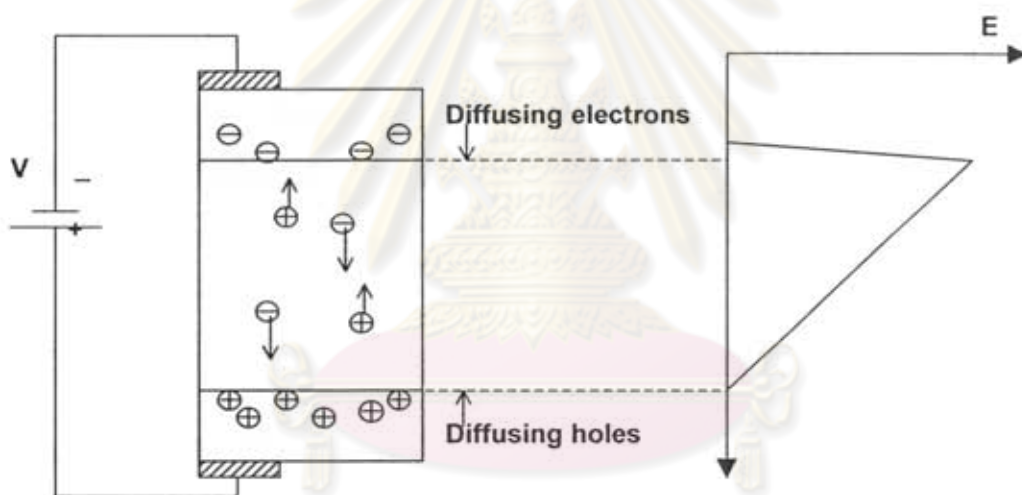
V คือแรงดันที่บริเวณหัวต่อ

- n คือ Ideality Factor ซึ่งมีค่าระหว่าง 1 กับ 2
- k คือค่าคงที่ของ Boltzmann
- T คืออุณหภูมิในหน่วยของศาเคลวิน
- I_p คือ Photocurrent ที่ถูกกระตุ้นจากแสง

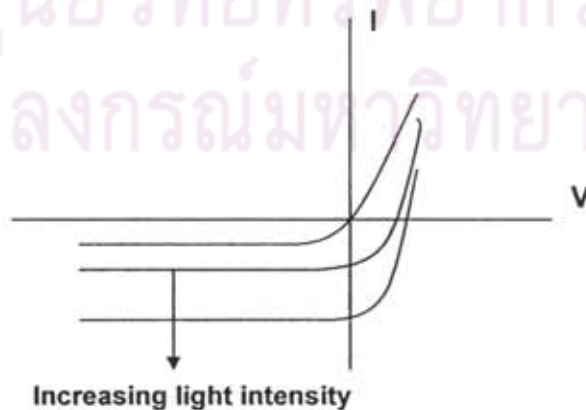
เนื่องจากในการใช้งานโฟโตไดโอดนั้นเราจะไบแอสกลับทางด้วยแรงดันที่มีค่ามากพอที่จะทำให้ $\exp\left(\frac{qV}{nkt}\right) \leq 1$ จึงทำให้กระแสรวมของโฟโตไดโอด จะมีค่าเท่ากับ

$$I = -(I_0 + I_p) \tag{16}$$

นั่นคือกระแสรวมที่ได้จะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับความเข้มแสง เราจึงสามารถใช้โฟโตไดโอดในการตรวจจับแสง โดยทำการแปลงสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้า



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 7 การจ่ายแรงดันเมื่อใช้งานโฟโตไดโอดและกราฟลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน

เมื่อพิจารณาค่าประสิทธิภาพเชิงควอนตัม (Quantum Efficiency) โดยพิจารณาการทำงานของโฟโตไดโอดแสดงในรูปที่ 8 พบว่าพาหะที่เกิดขึ้นในส่วนของย่านปลอดพาหะหรือในระยทางแพร่ซึมจากบริเวณย่านปลอดพาหะนั้น จะถูกพัฒนาโดยสนามไฟฟ้าและจากการเคลื่อนที่ของพาหะเหล่านี้ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลออกไปสู่วงจรภายนอก เนื่องจากพาหะที่เกิดขึ้นจากแสงนั้น จะเคลื่อนที่โดยอาศัยการพัฒนาและการแพร่ซึม ดังนั้นความหนาแน่นของกระแสภายใต้การไบแอสกลับทางจะเท่ากับ

$$\begin{aligned} J &= J_{dr} + J_{diff} \\ &= \text{ความหนาแน่นกระแสส่วนพัฒนา} + \text{ความหนาแน่นกระแสส่วนแพร่ซึม} \end{aligned} \quad (17)$$

เราเขียนสมการของ J โดยจะละเลขผลของ Thermal Generation ในส่วนของย่านแปรเปลี่ยน และการดูดกลืนในชั้น P^+ ที่อยู่บนสุด ซึ่งประเด็นหลังนั้นความหนาแน่นของชั้นบนสุดต้องน้อยกว่า α^{-1} มากๆ โดยที่ α คือ Absorption Coefficient และ/หรือมี "Window Effect" ที่ความยาวคลื่นนั้นๆ

ถ้าระยะทาง x เริ่มนับจากบริเวณหัวต่อ $P^+ - N^-$ (ดูรูปที่ 8) อัตราการเกิดคู่ EHPs $G(x)$ เมื่อกำหนดให้ค่า Internal Quantum Efficiency, $\eta_i = 1$ จะเท่ากับ

$$\begin{aligned} G(x) &= \phi_0 \alpha e^{-\alpha x} \\ &= \frac{P_{inc}(1 - \Theta_R)}{Ah\nu} \alpha e^{-\alpha x} \end{aligned} \quad (18)$$

โดย ϕ_0 คือ Incident Photon Flux (photon/sec/cm²)

P_{inc} คือ กำลังแสงตกกระทบ (Incident Optical Power)

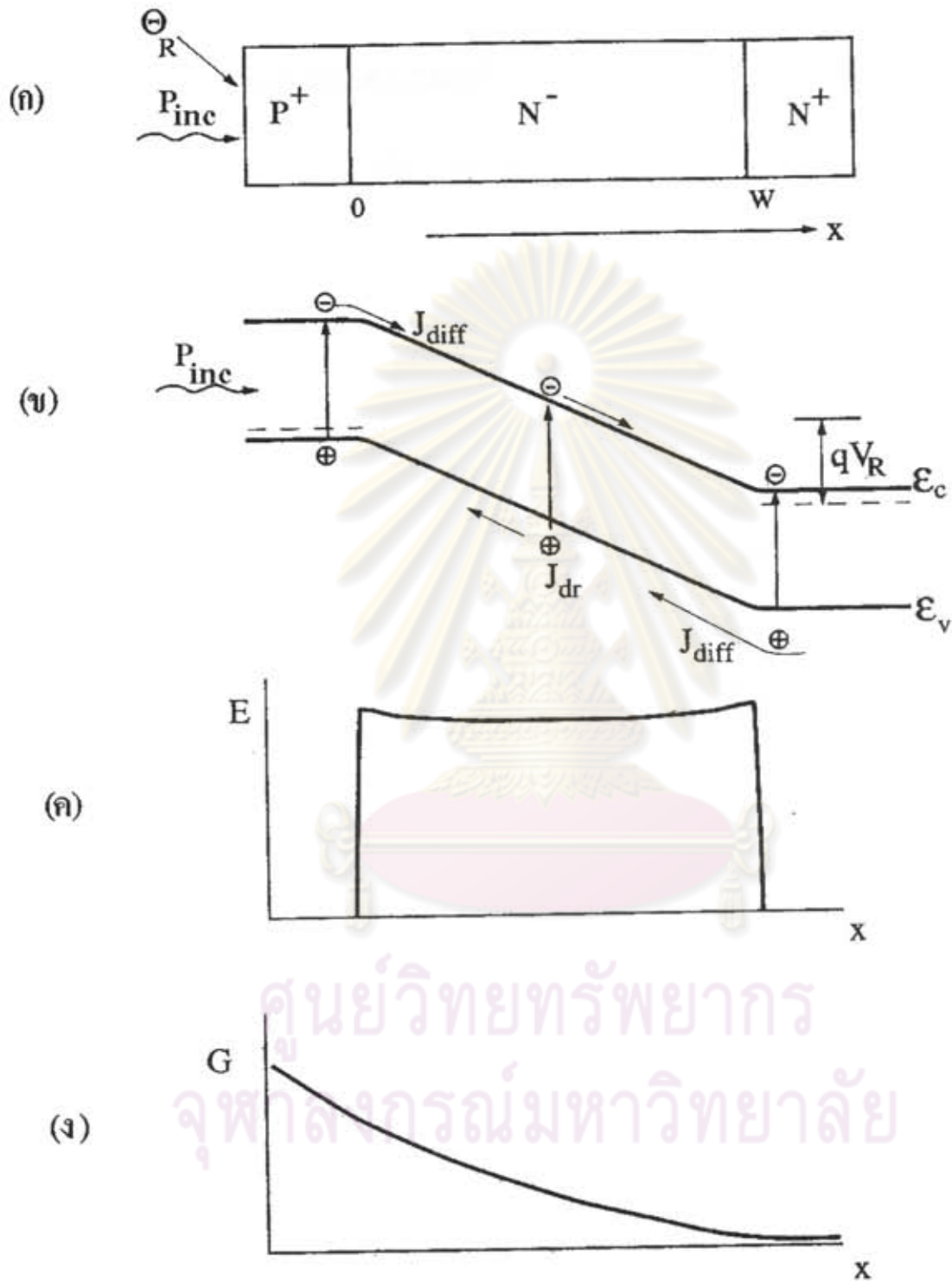
Θ_R คือ ค่า Reflectivity ของผิวด้านบน

A คือ พื้นที่หน้าตัดของโฟโตไดโอด

ในทางปฏิบัติ ค่า Θ_R สามารถทำให้มีค่าน้อยตามต้องการได้โดยการเคลือบสารกันการสะท้อน (Antireflection) บนผิวด้านบน ค่ากระแสพัฒนาจึงเขียนได้ดังนี้

$$\begin{aligned} J_{dr} &= -q \int_0^W G(x) dx \\ &= -q\phi_0(1 - e^{-\alpha W}) \end{aligned} \quad (19)$$

โดยที่ W คือความกว้างของชั้น N^-



รูปที่ 8 การดูดกลืนแสงและการเกิดพาหะในโฟโตนิกไดโอดในขณะไบแอสย้อนด้วยแรงดัน V_R

เราจะพิจารณากระแสแสงในส่วนของกระแสแพร่ซึม เนื่องจากเราละเลยการดูดกลืนแสง และพาหะที่เกิดขึ้นในชั้น P⁺ บนสุด เราจึงสนใจเฉพาะการแพร่ซึมของโฮลที่เกิดขึ้นในชั้น N⁺ ดังนั้นสมการต่อเนื่อง (Continuity Equation) ของโฮล (p_n) ที่สภาวะอยู่ตัวซึ่งรวมการเกิด (Generation) และการรวมตัว (Recombination) จะเขียนได้ดังนี้

$$D_h \frac{\partial^2 p_n}{\partial x^2} - \frac{p_n - p_{n0}}{\tau_h} + G(x) = 0 \quad (20)$$

สามารถแก้สมการนี้ได้โดยมีค่าเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions) ดังนี้

$$\begin{aligned} p_n &= p_{n0} & \text{ที่} & \quad x = \infty \\ p_n &= 0 & \text{ที่} & \quad x = W \end{aligned} \quad (21)$$

ความหมายของเงื่อนไขที่ 2 ก็คือ ความหนาแน่นของพาหะข้างน้อย จะเป็นศูนย์ที่บริเวณขอบของย่านแปรเปลี่ยน เมื่อทำการไบแอสกลับทาง ดังนั้นผลเฉลยของสมการ (20) จึงอยู่ในรูปของ

$$p_n = p_{n0} - (p_{n0} + Ce^{-\alpha W}) e^{(W-x)/L_h} + Ce^{-\alpha x} \quad (22)$$

โดยที่

$$L_h = \sqrt{D_h \tau_h} \quad (23)$$

และ

$$C = \frac{\phi_0 \alpha L_h^2}{D_h (1 - \alpha^2 L_h^2)} \quad (24)$$

กระแสแพร่ซึมหาได้จาก

$$\begin{aligned} J_{diff} &= -qD_h \left(\frac{\partial p_n}{\partial x} \right)_{x=W} \\ &= -q\phi_0 \frac{\alpha L_h}{1 + \alpha L_h} e^{-\alpha W} - p_{n0} \frac{D_h}{L_h} \end{aligned} \quad (25)$$

รวมสมการ (19) และ (25) เข้าด้วยกันจะได้กระแสรวมสุทธิเป็น

$$J = -q\phi_0 \left(1 - \frac{e^{-\alpha W}}{1 + \alpha L_h} \right) - qp_{n0} \frac{D_h}{L_h} \quad (26)$$

ภายใต้เงื่อนไขการใช้งานปกติ พจน์ที่ 2 ในสมการ (26) จะมีค่าน้อยมากพอๆ กับค่า P_{no} ภายใต้เงื่อนไขเหล่านี้ค่ากระแสรวมสุทธิจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณแสงที่ตกกระทบ ซึ่งเป็นผลตามที่คาดไว้ ค่าประสิทธิภาพเชิงควอนตัมภายนอก (External Quantum Efficiency) ของโฟโตไดโอดสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\eta_{ext} &= \frac{|J/q|}{P_{inc}/Ah\nu} \\ &= (1 - \Theta_R) \left(1 - \frac{e^{-\alpha W}}{1 + \alpha L_n} \right)\end{aligned}\quad (27)$$

ดังนั้นถ้าต้องการให้โฟโตไดโอดมีค่าประสิทธิภาพเชิงควอนตัมสูงๆ แล้ว ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง (Reflection Coefficient) ที่ผิวด้านบนควรมีค่าน้อยๆ เช่น เคลือบด้วยสารไดอิเล็กทริกชนิดที่มีค่า $\Theta_R \approx 0$ นอกจากนั้นเพื่อให้ค่า η_{ext} มีค่าสูง ยังต้องมีเงื่อนไขอื่นอีกคือ

$$\alpha W \gg 1 \quad (28)$$

ค่า α หรือ W มีค่ามากๆ เป็นเงื่อนไขที่ทำให้แน่ใจว่าโฟตอนที่ตกกระทบเกือบทั้งหมดถูกดูดกลืน อย่างไรก็ตาม ถ้า W กว้างมากๆ แล้วค่าเวลาพัชพาของพาหะข้ามบริเวณย่านปลอดพาหะก็จะมีความเร็วในการตอบสนองลดลง จึงต้องอาศัยค่า α สูงซึ่งในความเป็นจริงแล้ว ค่า α ที่บริเวณขอบพลังงานจะขึ้นกับลักษณะของแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำทำให้เราไม่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้ สุดท้ายถ้าเราให้ค่าความยาวแห่งการแพร่ซึม (Diffusion Length) L_n มีค่าน้อยมากๆ และ $\eta_i < 1$ แล้วจะได้ว่า

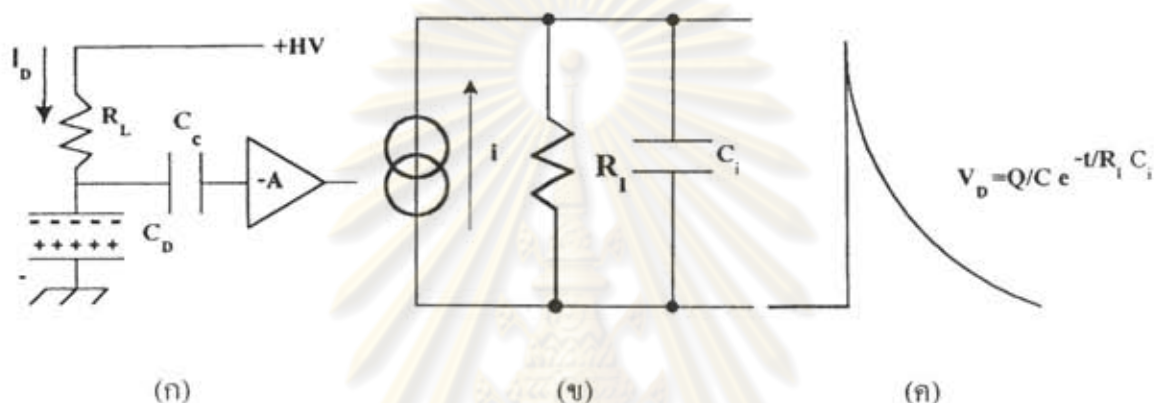
$$\eta_{ext} = \eta_i (1 - \Theta_R) (1 - e^{-\alpha W}) \quad (29)$$

2.6 การวัดพลังงานรังสีเอกซ์

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

2.6.1 ลักษณะสัญญาณพัลส์

สัญญาณพัลส์เกิดจากการสะสมปริมาณประจุไฟฟ้าที่เกิดหลังจากเกิดอันตรกิริยาระหว่างพลังงานรังสีกับหัววัดรังสีบนค่าความจุของหัววัดรังสี^[13] อันเป็นกลไกของการเปลี่ยนพลังงานของอนุภาครังสี (ในที่นี้คือโฟตอน) เป็นสัญญาณพัลส์ของหัววัดรังสี ดังรูปที่ 9 (ก) (ข) และ (ค) แสดงการเกิดสัญญาณพัลส์นิวเคลียร์ รูปที่ 9 (ก) วงจรของหัววัดรังสี รูปที่ 9 (ข) วงจร สมมูลของหัววัดรังสี และรูปที่ 9 (ค) สัญญาณพัลส์ของหัววัดรังสี จากรูปที่ 9 (ข) แสดง ให้ทราบว่าหัววัดรังสีทุกชนิดมีโครงสร้างเทียบเท่าตัวเก็บประจุ มีขั้วอิเล็กโตรดประกอบสองด้านเหมือนคาโทดและแอนโอด



รูปที่ 9 แสดงการเกิดสัญญาณพัลส์นิวเคลียร์ (ก) วงจรของหัววัดรังสี
(ข) วงจรสมมูลของหัววัดรังสี และ (ค) สัญญาณพัลส์ของหัววัดรังสี

หลังการไบอัสจะมีสนามไฟฟ้าอยู่ เมื่อหัววัดเกิดอันตรกิริยากับรังสีทำให้หัววัดรังสีเหมือนแหล่งจ่ายกระแส ปริมาณประจุที่สะสมบนค่าความจุจะทำให้เกิดสัญญาณพัลส์ศักย์ไฟฟ้าตลอดรอดตัวด้านทานที่ขนานในวงจรสมมูล ซึ่งเป็นไปตามสมการ

$$V_D = \frac{Q}{C_i} \exp^{-t/R_i C_i} \quad (30)$$

ในที่นี้ Q คือ ประจุที่เกิดหลังอันตรกิริยารังสี

C_i คือ ค่าความจุในวงจรสมมูล

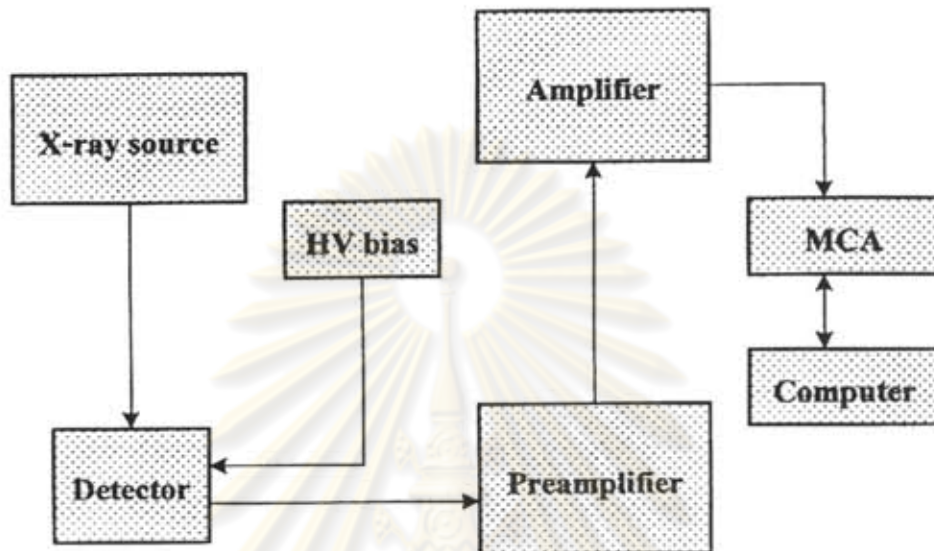
R_i คือ ค่าความต้านทานในวงจรสมมูล

t คือ เวลา

สัญญาณพัลส์จากหัววัดรังสีก่อนจะเข้าสู่ระบบวิเคราะห์ความสูงพัลส์ เพื่อหาสเปกตรัมของพลังงานจะต้องมีการปรับเปลี่ยนสัญญาณ ซึ่งจะได้อธิบายในส่วนของขั้นตอนการวัดพลังงานรังสี

2.6.2 กระบวนการวัดพลังงานของรังสี

ขั้นตอนในการวัดพลังงานรังสีประกอบไปด้วยอุปกรณ์ต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 10 เป็นแผนภาพแสดงส่วนประกอบในการวัดรังสี ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ 10 แผนภาพแสดงขั้นตอนการวัดพลังงานของรังสี

หัววัดรังสี หัววัดที่ใช้เป็นหัววัดที่สร้างจากวัสดุสารกึ่งตัวนำ ประเภทสารประกอบกึ่งตัวนำของแกลเลียมอาร์เซไนด์ชนิดรอยต่อ p-i-n ซึ่งเป็นโครงสร้างของไดโอด การใช้งานหัววัดรังสีจะทำงานในสภาวะไบอัสย้อนกลับ (Reverse bias) ดังนั้นจำเป็นต้องรู้ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่สามารถป้อนให้กับหัววัดรังสี โดยไม่ทำให้หัววัดรังสีเสียหาย และเป็นตัวกำหนดพิกัดสูงสุดของความเข้มสนามไฟฟ้า และความกว้างของเขตปลอดพาหะ แรงดันพังทลาย (breakdown voltage) ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ (31)^[14]

$$V_{BD} = E_{BD} X_i \quad (31)$$

ในที่นี้ x_i คือ ความหนาของชั้น i

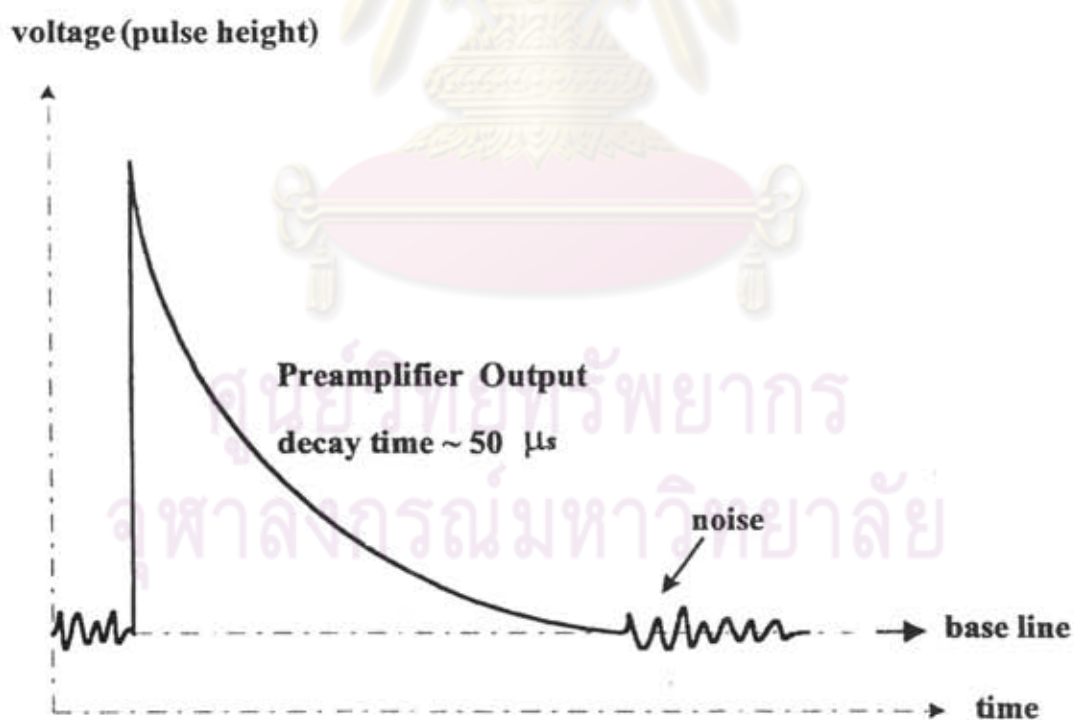
E_{BD} คือ ความเข้มสนามไฟฟ้า หรือค่า break down field สำหรับ GaAs มีค่า $= 4 \times 10^5$ V/cm

แหล่งจ่ายศักดาไฟฟ้าสูง (high voltage power supply) เป็นอุปกรณ์ที่ให้ศักดาไฟฟ้าแก่หัววัดรังสี โดยป้อนแรงดันในลักษณะ reverse bias เพื่อให้เกิดสนามไฟฟ้าบริเวณที่เกิดอันตรกิริยากับพลังงานรังสี สนามไฟฟ้าจะทำหน้าที่กวาดคู่อิเล็กตรอน-โฮล ทำให้เกิดเป็นสัญญาณพัลส์ จากตารางที่ 1 เป็นตัวอย่างค่าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหัววัดรังสีชนิดต่างๆ ที่มีใช้งานอยู่ในปัจจุบัน

ตารางที่ 1 แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหัววัดรังสี

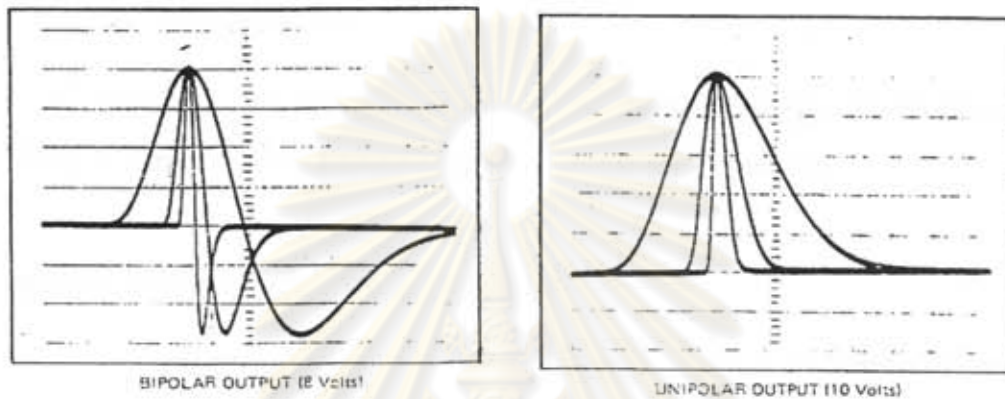
ชนิดหัววัด	แรงดันไฟฟ้า (V)
Ionization counters	HV < 1000
Proportional counters	500 < HV < 1500
GM counters	800 < HV < 2400
Semiconductors detectors	
Surface-barrier	HV < 100
Li-drifted	100 < HV < 3000

ภาคขยายส่วนหน้า (preamplifier) สัญญาณพัลส์ที่เกิดจากหัววัดรังสีบางชนิดจะมีขนาดเล็กและมีสัญญาณรบกวนแฝงมาด้วย preamplifier จะขยายสัญญาณให้มีขนาดความสูงของพัลส์ให้ได้มาตรฐาน และขจัดสัญญาณรบกวน แล้วจึงส่งสัญญาณไปยังส่วนอื่นๆ ที่อยู่ห่างจากหัววัดรังสี จากรูปที่ 11 แสดงให้เห็นถึงสัญญาณที่ออกจากภาคขยายส่วนหน้า



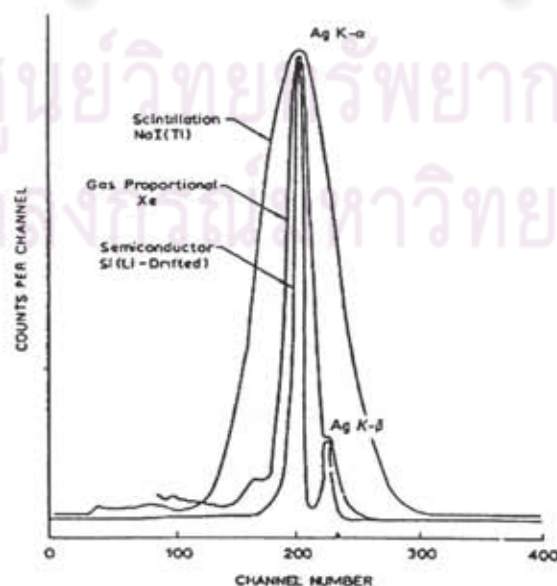
รูปที่ 11 สัญญาณที่ออกจากภาคขยายส่วนหน้า

ภาคขยายสัญญาณ (amplifier) จะทำหน้าที่ขยายสัญญาณจากภาคขยายสัญญาณส่วนหน้าให้สูงขึ้นอีก ซึ่งสัญญาณจะแรงพอที่จะวิเคราะห์ความสูงพัลส์ ในมาตรฐาน NIM (nuclear instrument modules) สัญญาณเชิงเส้นกำหนดไว้ที่ 0-10 โวลต์ พร้อมทั้งแต่งรูปสัญญาณให้เหมาะสม โดยผ่านกระบวนการกรองความถี่เพื่อให้ได้ S/N สูง ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพการวิเคราะห์สัญญาณพัลส์ที่เกิดจากหัววัดรังสีดีขึ้น ลักษณะของสัญญาณที่ออกจากภาคขยายสัญญาณมีหลายรูปแบบแสดงไว้ที่รูปที่ 12



รูปที่ 12 ลักษณะของสัญญาณที่ออกจากภาคขยายสัญญาณ ซึ่งมีค่า shaping time ต่างกันเปรียบเทียบกัน

เครื่องวิเคราะห์พลังงานแบบหลายช่อง (multichannel analyzer) เรียกทั่วไปว่า MCA ทำหน้าที่แจกแจงความสูงของพัลส์ที่เป็นสัดส่วนกับพลังงานของรังสีเอกซ์จากแหล่งกำเนิดรังสี รูปที่ 13 ภาพแสดงสเปกตรัมจากหัววัดชนิดต่างๆ ของรังสีเอกซ์



รูปที่ 13 ภาพแสดงสเปกตรัมจากหัววัดชนิดต่างๆ ของรังสีเอกซ์

จากรูปที่ 13 ตำแหน่งพีคของสเปกตรัมสามารถอ่านค่าพลังงานของอนุภาคนิวเคลียร์ได้บนแกน x ซึ่งเป็นช่องวิเคราะห์ (channel number) ซึ่งปรับเทียบกับค่าพลังงานของคันทันแกมมามาตรฐาน และความสามารถในการแจกแจงพลังงานของระบบวิเคราะห์ (R) สามารถคำนวณได้ว่า

$$R = \frac{FWHM}{E} \quad (32)$$

เมื่อ $FWHM$ = ความกว้างของพีคพลังงานบริเวณค่าครึ่งหนึ่งของอัตรานับรังสี
 E = พลังงานที่อ่านค่า

หวัคครึ่งสีที่มีค่า $FWHM$ แคบหมายถึงการเบี่ยงเบนของขนาดสัญญาณพัลส์จากการตรวจวัดครึ่งสีมีค่าน้อย ซึ่งทำให้มีความสามารถในการแจกแจงพลังงานมีค่าสูงนั่นเอง

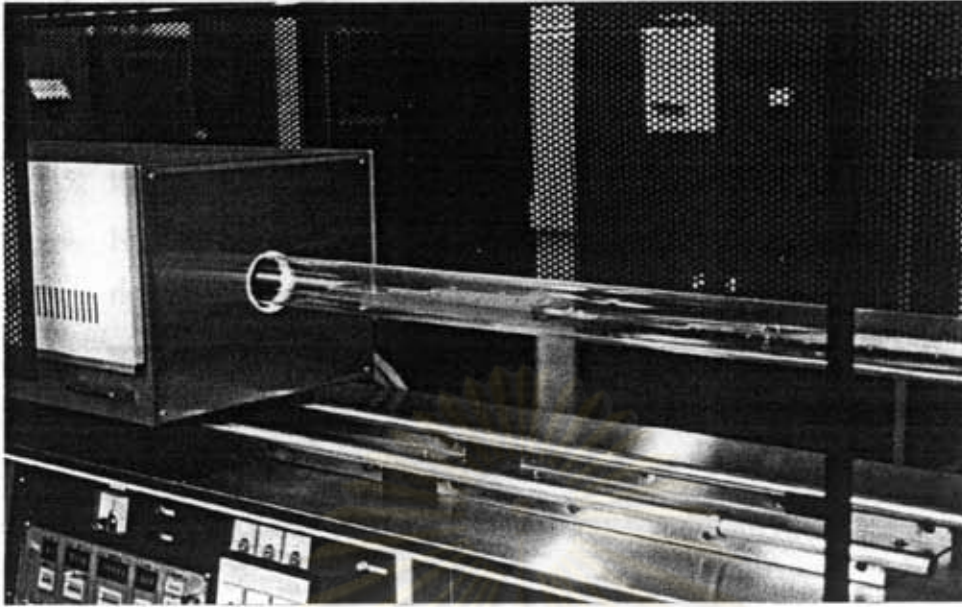
3. การปลูกผลึกโดยวิธีอพิแทกซีในสถานะของเหลว^[12]

Epitaxy คือเทคโนโลยีที่ใช้ในการปลูกผลึกชั้นบางๆ ซึ่งสามารถปลูกซ้อนทับกันหลายๆ ชั้นในกระบวนการเดียวกัน และในแต่ละชั้นยังสามารถกำหนดชนิดของสารกึ่งตัวนำและชนิดของสารเจือปนได้ด้วย โดยมีข้อแม้เพียงข้อเดียวก็คือ ชั้นผลึกที่อยู่ประชิดกันจะต้องมีขนาดของโครงผลึก (Lattice Constant) ใกล้เคียงกันเพื่อไม่ให้ Lattice Mismatch มีค่ามากเกินไป Lattice Mismatch มีผลต่อประสิทธิภาพของสิ่งประดิษฐ์เป็นอย่างมาก

Epitaxy มีหลายชนิด เช่น Vapor Phase Epitaxy (VPE), Liquid Phase Epitaxy (LPE), Molecular Beam Epitaxy (MBE) ฯลฯ แต่ละชนิดมีทั้งข้อเด่นและข้อด้อย ในงานวิจัยชิ้นนี้ เราใช้ Liquid Phase Epitaxy (LPE) เป็นเทคโนโลยีในการผลิตโครงสร้างหลายๆ ชั้น (Multilayer Structure) ของสิ่งประดิษฐ์ด้วยเหตุผลที่ว่า LPE มีราคาถูก ระบบไม่ยุ่งยาก และที่สำคัญคุณภาพของชั้นผลึกที่ปลูกได้ดีกว่าที่ได้จากวิธีการอื่นๆ เพราะการปลูกชั้นผลึกจาก LPE เป็นการปลูกภายใต้จุดสมดุลอุณหภูมิต่ำ (Thermal Equilibrium) ข้อเสียก็คือ ไม่สามารถปลูกชั้นผลึกบางมากๆ ได้ (น้อยกว่า 0.1 ไมครอน)

รูปที่ 14 (ก) แสดงส่วนต่าง ๆ ของเตา Horizontal Liquid Phase Epitaxy ซึ่งติดตั้งที่ห้องวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งประกอบด้วยส่วนที่สำคัญๆ ดังนี้

1. เครื่องควบคุมอุณหภูมิแบบโปรแกรมได้ (Programmable Temperature Controller) ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิไม่เกิน 0.05°C และสามารถลดหรือเพิ่มอุณหภูมิด้วยความชันที่กำหนดให้ (0 ถึง $9.99^{\circ}\text{C}/\text{Min}$)
2. เตาความดันทานซึ่งสามารถเคลื่อนที่ได้ และมีช่วงอุณหภูมิสม่ำเสมอ (Uniform Heated Length) 200 mm.



รูปที่ 14 (ก) เต้าอพิแทกซ์



รูปที่ 14 (ข) แสดงรายละเอียดของเบ้ารองรับสารละลาย

3. ท่อควอทซ์ยาว 2400 mm. และมีเส้นผ่าศูนย์กลางภายในประมาณ 74 mm.
4. ระบบก๊าซ และ Hydrogen Purifier ที่สามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนที่มีความบริสุทธิ์ถึง 99.999999 %
5. เครื่องวัดความชื้น (Hygrometer) ซึ่งสามารถวัดได้ละเอียดถึง 0.1 ppm.
6. Nitrogen Hood เพื่อป้องกันฝุ่นละออง และหลีกเลี่ยงการเกิดออกไซด์กับวัสดุต่างๆ ก่อนเริ่มทำงาน
7. เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) สำหรับวัดอุณหภูมิ และเครื่องบันทึกอุณหภูมิ
8. เมา์รองรับสารละลาย (Graphite Boat) ซึ่งสามารถสร้างชั้นของผลึก 9 ชั้น ในกระบวนการ 1 ครั้ง ดังรูปที่ 14 (ข)
9. ก้านแก้ว (Quartz Rod) สำหรับเลื่อน (Slide) แวนผลึกไปได้หลุมของสารละลาย Ga+Al+As

สำหรับขั้นตอนในการปลูกผลึกนั้น นอกจากความพร้อมของระบบ LPE ที่กล่าวแล้ว การเตรียมวัสดุ และสารเจือต่างๆ อย่างพิถีพิถันก็มีส่วนต่อคุณภาพของผลึก ซึ่งรายละเอียดจะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

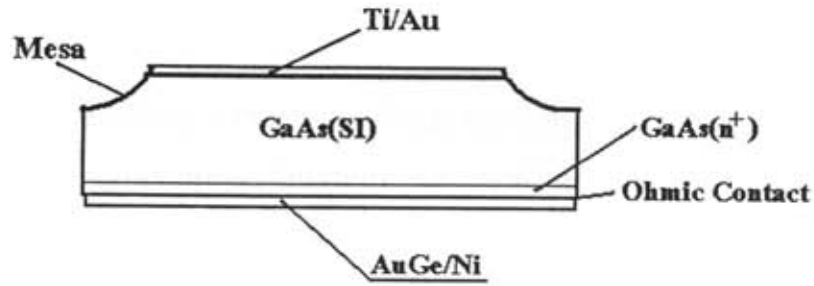
4. การผลิตสิ่งประดิษฐ์

จะเริ่มจากการออกแบบโครงสร้างของหัววัดรังสี การเตรียมแวนผลึกฐานและวัสดุต่างๆ ของสารละลาย การกำหนด Profile (Temperature, time) การปลูกผลึกของแต่ละโครงสร้าง และการกำหนดขอบเขตหรือเนื้อที่ทำงานของหัววัด

4.1 การออกแบบโครงสร้างของหัววัดรังสี

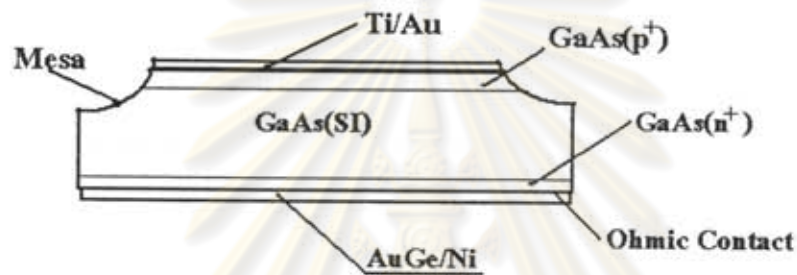
4.1.1 โครงสร้างที่ใช้แวนผลึกของ GaAs ชนิด Semi-insulating (SI) เป็นผลึกเริ่มต้น

ในกรณีนี้เริ่มจากแวนผลึก (Substrate) GaAs ชนิด Intrinsic ซึ่งมีผิวขั้วมันทั้ง 2 ด้าน และมีความหนาประมาณ 350 μm ต้องปลูกผลึกชนิด GaAs (n^+) บนผิวหน้าด้านล่างด้วยเทคนิคเอพิแทกซีจากสถานะของเหลวเพื่อทำขั้วผิวสัมผัสโอห์มมิก ในขณะที่ผิวหน้าด้านบนจะถูกฉาบด้วยโลหะ Ti/Au โดยตรงกรณีโครงสร้าง Skottky ในขณะที่ผิวหน้าด้านบนจะถูกปลูกด้วยชั้นผลึก GaAs (p^+) กรณีโครงสร้าง PIN ภาพสเก็ทของทั้ง 2 โครงสร้างแสดงไว้ในรูปที่ 15 และ 16 ตามลำดับ



Schottky Diode Structure

รูปที่ 15 ภาพสเก็ตตัดขวางของหัวขั้วครึ่งสี่เอกซ์โครงสร้าง Schottky ที่ใช้ Semi-insulating GaAs เป็นผลึกเริ่มต้น



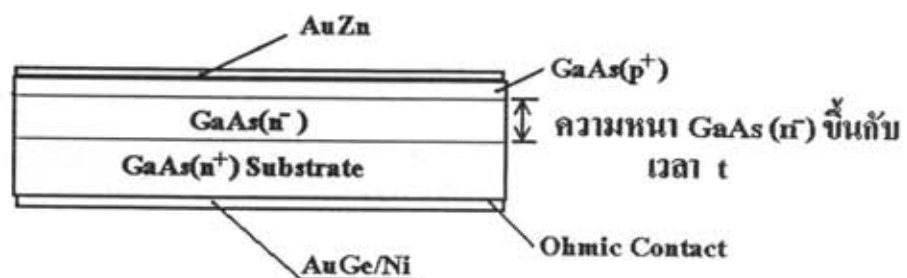
PIN Diode Structure I

ใช้ชั้น GaAs(SI) Substrate เป็นชั้น Intrinsic

รูปที่ 16 ภาพสเก็ตตัดขวางของหัวขั้วครึ่งสี่เอกซ์โครงสร้าง PIN ที่ใช้ Semi-insulating GaAs เป็นผลึกเริ่มต้น

4.1.2 โครงสร้างที่ใช้แวนผลึกของ GaAs (n^-) เป็นผลึกเริ่มต้น

สำหรับโครงสร้างนี้ ทั้งชั้น n^- และชั้น p^+ จะถูกปลูกผลึก ดังนั้นคุณภาพของชั้น n^- จะขึ้นกับกระบวนการปลูกผลึกโดยตรง ภาพสเก็ตโครงสร้างที่ออกแบบแสดงไว้ในรูปที่ 17



รูปที่ 17 ภาพสเก็ตตัดขวางของหัวขั้วครึ่งสี่เอกซ์โครงสร้าง $p^+n^-n^+$ ที่ใช้ GaAs (n^-) เป็นผลึกเริ่มต้น

4.2 การเตรียมผลึกแผ่นฐานก่อนปลูกผลึก

ตัดแผ่นผลึกให้มีขนาด $11 \times 11 \text{ mm}^2$ จำนวน 2 แผ่นเพื่อใช้เป็นแผ่นผลึกฐานของสิ่งประดิษฐ์ที่จะผลิต นำแผ่นผลึกฐานทั้งสองมาทำความสะอาดทางเคมีโดยมีขั้นตอนดังนี้

1. ล้างด้วย Trichloethylene แล้วทำ Ultrasonic 5 นาที เพื่อล้างคราบไขมัน
2. ล้างด้วย Acetone แล้วไปทำ Ultrasonic 5 นาที เพื่อล้าง Trichloethylene และคราบไขมันที่เหลือ
3. ล้างด้วย DI-Water ให้สะอาด เป่า N_2 จนแห้ง
4. ถัดออกใช้ด่างที่ผิวออกและกัดผิวให้มันด้วยสารละลาย $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O}$ (4:1:1 ผสมแล้วตั้งทิ้งไว้เพื่อให้ได้อุณหภูมิประมาณ 75 องศาเซลเซียส)
5. ล้างด้วย DI-Water ให้สะอาด เป่า N_2 จนแห้ง
6. ล้างด้วย HCl (50 %) มากกว่า 5 นาที เพื่อกัดออกใช้ด่างที่เหลือ
7. ล้างด้วย DI-Water ให้สะอาด เป่า N_2 จนแห้ง

ในขั้นตอนนี้ต้องเตรียมแผ่นผลึก GaAs (Non-doped) ขนาด $6 \times 11 \text{ mm}^2$ เพื่อเป็นตัวซัดเซบ As ให้สารละลายทุกหลุม โดยใช้กระบวนการทำความสะอาดเช่นเดียวกับแผ่นผลึกฐาน

4.3 การเตรียมวัสดุของสารละลาย

สารละลายเตรียมอยู่ในรูปของของแข็งซึ่งมีแกเลียม (Ga) เป็นตัวทำละลาย ตัวถูกละลายมีอาร์เซนิก (As) อลูมิเนียม (Al) และสารเจือปนที่ต้องการ โดยสารเจือปนชนิด p จะใช้เจอร์เมเนียม (Ge) สารเจือปนชนิด n ใช้ดีบุก (Sn) และชนิด n^+ ใช้เทลลูเรียม (Te) ในหัวข้อนี้แสดงถึงการคำนวณน้ำหนักของตัวถูกละลายในตัวทำละลายในชั้นต่างของหัววัดรังสีโครงสร้างต่างๆ

ให้ X เป็นเศษส่วนอะตอมของสารใดๆ ในสารละลายจะได้

$$X_{\text{Ge}} + X_{\text{As}} + X_{\text{Al}} + X_{\text{im}} = 1$$

เมื่อเทียบกับแกเลียมจะได้น้ำหนักของอาร์เซนิกเป็น

$$W_{\text{As}} = (X_{\text{As}} / X_{\text{Ga}})(M_{\text{As}} / M_{\text{Ga}}) \cdot W_{\text{Ga}}$$

และได้น้ำหนักของอลูมิเนียมเป็น

$$W_{\text{Al}} = (X_{\text{Al}} / X_{\text{Ga}})(M_{\text{Al}} / M_{\text{Ga}}) \cdot W_{\text{Ga}}$$

น้ำหนักของสารเจือปนเป็น

$$W_{im} = (X_{im} / X_{Ga})(M_{im} / M_{Ga}) \cdot W_{Ga}$$

โดยที่อาร์เซนิกจะต้องเตรียมในรูปของแกเลียมอาร์เซไนด์ จะได้น้ำหนักของแกเลียมอาร์เซไนด์เป็น

$$W_{GaAs} = (X_{GaAs} / X_{Ga})(M_{GaAs} / M_{Ga}) \cdot W_{Ga}$$

โดยที่	$M_{Ga} = 69.72$	$M_{As} = 74.92$
	$M_{Al} = 26.98$	$M_{Ge} = 72.59$
	$M_{Sn} = 118.69$	$M_{Te} = 127.60$
	$M_{GaAs} = 144.64$	

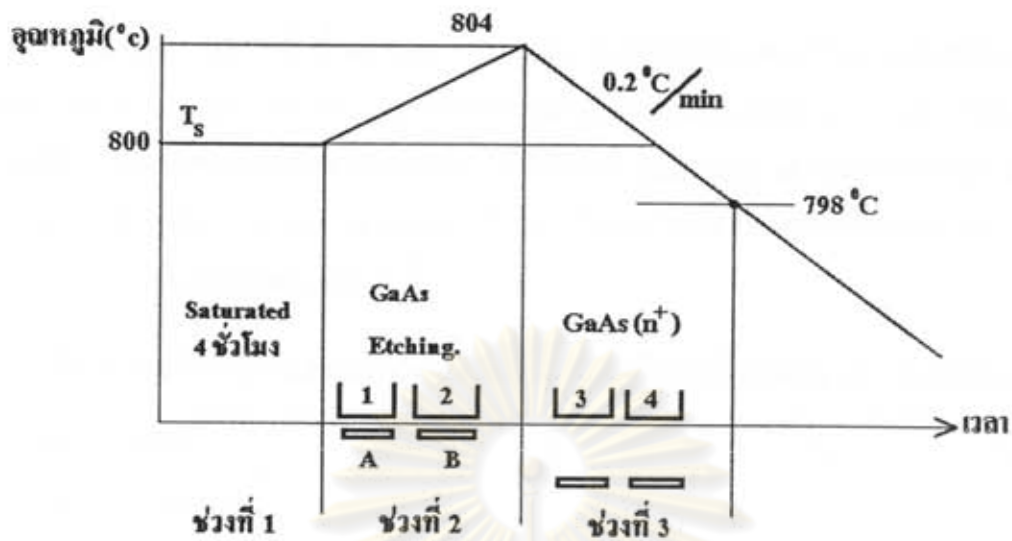
ดูตัวอย่างการคำนวณในภาคผนวก 1

4.4 การกำหนดโปรไฟล์ (อุณหภูมิ-เวลา) [Profile (Temp, Time)]

4.4.1 โครงสร้างที่ใช้แวนผลึกของ GaAs ชนิด Semi-insulating (SI) เป็นผลึกเริ่มต้น

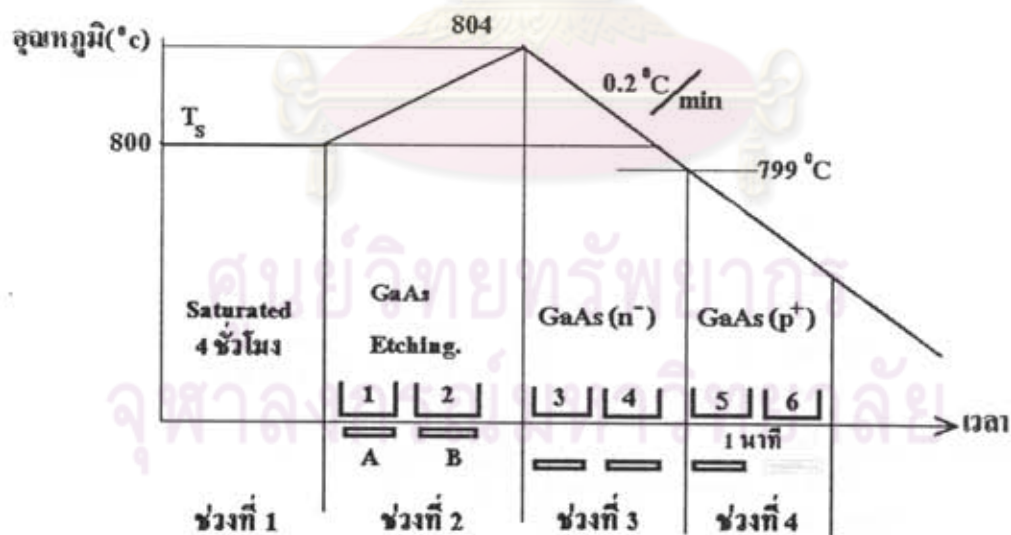
Profile (Temp, Time) ของการปลูกผลึกผิวด้านหลังถูกกำหนดให้เป็นไปตามรูปที่ 18 ก. โดยช่วงเวลาในการปลูกผลึกแบ่งได้เป็น 3 ช่วง ช่วงแรก จะเป็นการเตรียมสารละลายให้อิ่มตัวที่อุณหภูมิ T_s (Saturation Temperature) ซึ่งมีค่าประมาณ $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลานาน 4 ชั่วโมง ช่วงที่สอง จะเพิ่มอุณหภูมิของเตาปลูกผลึกขึ้นอีก 4 องศาเซลเซียส เพื่อให้สารละลายเกิดสภาวะ Under saturated ช่วงนี้แวนผลึกจะถูกกัดผิว (etching) ด้วยสารละลาย จุดประสงค์เพื่อทำความสะอาดผิวแวนผลึกก่อนการปลูกผลึก ช่วงที่สาม แวนผลึกทั้งสอง (A และ B) จะถูกเลื่อนเข้าให้สารละลาย GaAs (n^+) พร้อมลดอุณหภูมิของเตาลงด้วยอัตรา $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ตอนแรกของช่วงที่สาม ผิวแวนผลึกอาจถูกกัด (Etch) ซ้ำ แต่เมื่อสารละลายของ GaAs (n^+) เข้าสู่สภาวะอยู่ตัว จะเกิดการปลูกผลึก GaAs (n^+) ขึ้นบนแวนผลึก ทั้งไว้จนอุณหภูมิประมาณ $798\text{ }^{\circ}\text{C}$ จะได้ชั้นผลึก GaAs (n^+) หนาประมาณ 2 ไมครอน⁽¹²⁾

สำหรับ Profile (Temp, Time) การปลูกผลึกชั้น p^+ บนผิวด้านหน้าของ PIN Diode เป็นไปตามรูปที่ 18 ข.



A และ B เป็นแผ่นสลิค Semi-insulating ชนิดผิวมันทั้ง 2 ด้าน ปูโลหะพาดผิวด้านหลัง

รูปที่ 18 ก. กราฟแสดงอุณหภูมิและช่วงเวลา, Profile (Temp, Time) ในการปลูกสลิคชั้น n^+ บนผิวด้านหลังของโครงสร้าง Schottky ที่ใช้ Semi-insulating GaAs เป็นสลิคเริ่มต้น



A และ B เป็นแผ่นสลิค Semi-insulating ชนิดผิวมันทั้ง 2 ด้าน ปูโลหะพาดผิวด้านหน้า

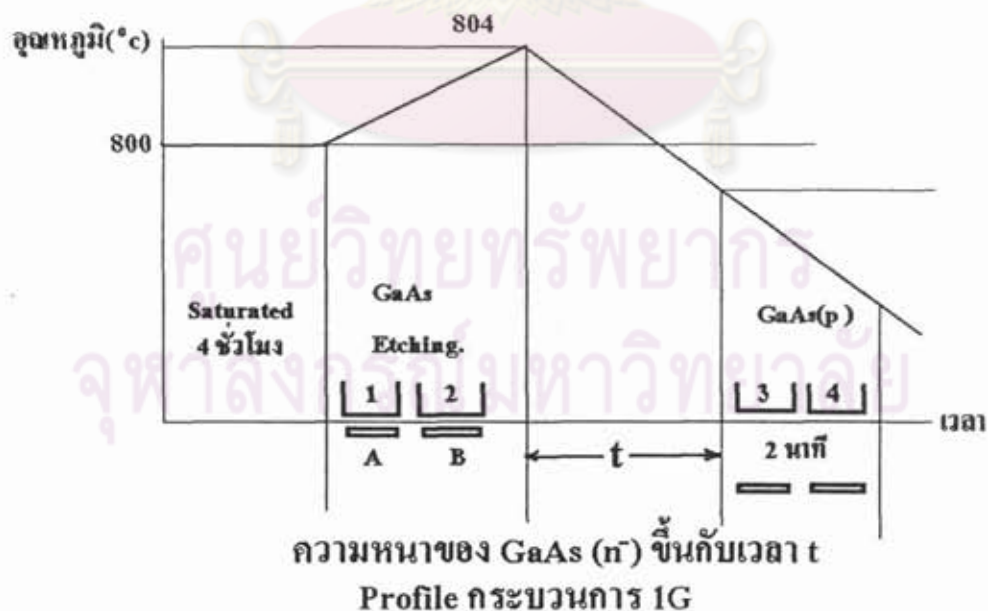
รูปที่ 18 ข. กราฟแสดงอุณหภูมิและช่วงเวลา, Profile (Temp, Time) ในการปลูกสลิคชั้น p^+ บนผิวด้านหน้าของแผ่นสลิค Semi-insulating

4.4.2 โครงสร้างที่ใช้แวนต์ผลึกของ GaAs (n^+) เป็นผลึกเริ่มต้น

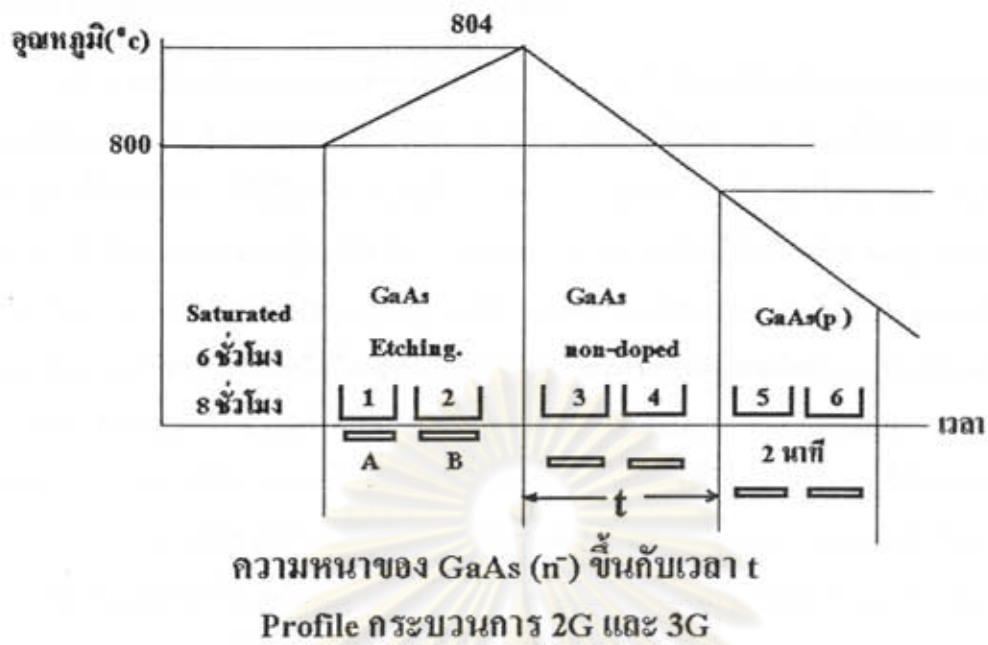
สำหรับโครงสร้างนี้ ชั้นผลึก n^+ ของ GaAs จะถูกปลูกด้วยกระบวนการปลูกผลึกต่างกัน 4 แบบ (เรียกว่า 1G, 2G, 3G และ 4G) ตามจำนวนหลุมสารละลาย GaAs (n) โดยคาดว่าคุณภาพผลึกจะดีขึ้น ถ้าแยกหลุมสารละลาย GaAs (n) ที่ใช้กัดผิว (Etch Back in situ) กับหลุมสารละลาย GaAs (n) ที่ใช้ปลูกผลึก GaAs (n) ออกจากกันโดยเด็ดขาด สำหรับรายละเอียดของกระบวนการผลิตต่างๆ แสดงไว้ในตารางที่ 2 และรูปที่ 19, 20 และ 21

ตารางที่ 2 รายละเอียดกระบวนการผลิตหัววัดรังสีชนิดที่ใช้แวนต์ผลึก GaAs (n^+) เป็นผลึกเริ่มต้น

กระบวนการ	1G	2G	3G	4G
ช่วงเวลาในการ Saturation สารละลาย (ชม.)	4	6	8	8
Etch-back in situ	มี	มี	มี	มี
สารละลาย GaAs (n^+) สำหรับปลูกชั้น n^+	ใช้สารละลายของ Etch back in situ	มีของตัวเอง 1 หลุม	มีของตัวเอง 1 หลุม	มีของตัวเอง 2 หลุม
Profile (Temp, time) ในการผลิต	รูปที่ 19	รูปที่ 20	รูปที่ 20	รูปที่ 21



รูปที่ 19 กราฟแสดงอุณหภูมิและช่วงเวลาในการปลูกผลึกของกระบวนการ 1G โดยใช้แวนต์ผลึกเริ่มต้น 2 แผ่น (A และ B) สารละลายหลุมที่ 1 และ 2 สำหรับ Etching ผิวแวนต์ผลึกพร้อมปลูกผลึกในช่วงเวลา t ส่วนสารละลายหลุมที่ 3 และ 4 สำหรับปลูกผลึก GaAs (p)



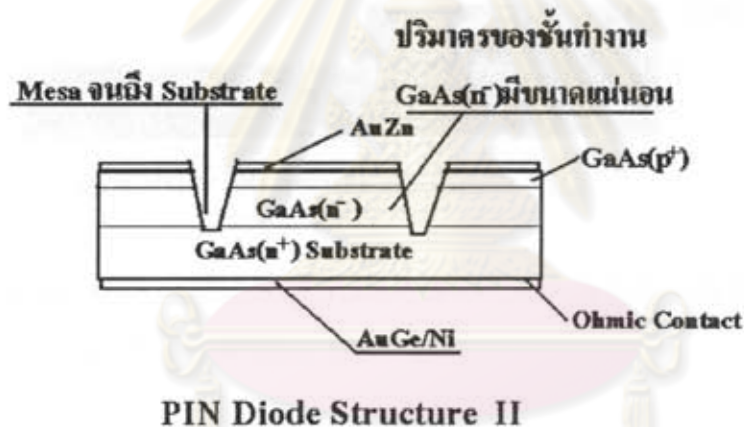
รูปที่ 20 กราฟแสดงอุณหภูมิและช่วงเวลาในการปลูกผลึกของกระบวนการ 2G (Saturated 6 ชั่วโมง) และ 3G (Saturated 8 ชั่วโมง) โดยมีหลุมปลูกผลึก GaAs (n^-) ของตัวเองในหลุมที่ 3 และ 4 เพิ่มจากกรณี 1G



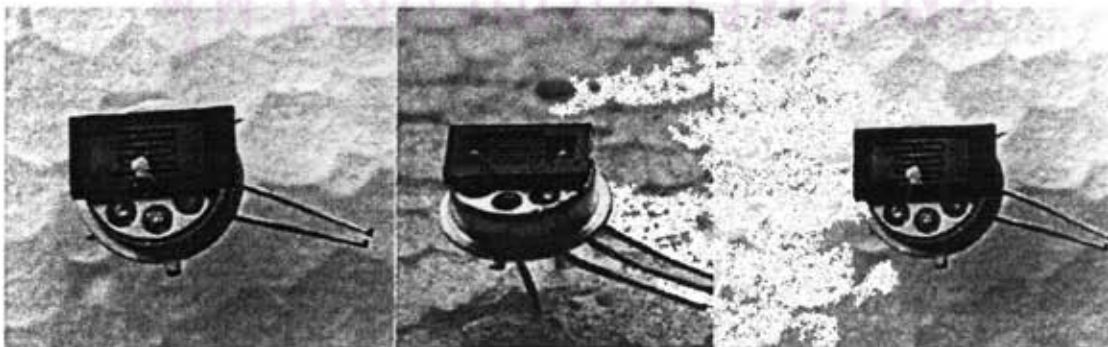
รูปที่ 21 กราฟแสดงอุณหภูมิและช่วงเวลาในการปลูกผลึกของกระบวนการ 4G โดยมีสารละลาย หลุมที่ 5 และ 6 เพิ่มขึ้นจากกรณีกระบวนการ 2G และ 3G

4.5 การกำหนดขอบเขตหรือเนื้อที่ทำงานของหัววัด

ลักษณะการกำหนดขอบเขตหรือเนื้อที่ทำงานของหัววัดจะมีผลโดยตรงกับค่ากระแสอิ่มตัว และค่าแรงดันพังทลาย ในกรณีของโครงสร้าง PIN จากแวนผลึกเวมิตัน GaAs (n^+) ชั้นทำงาน GaAs (n) มีความหนาขึ้นกับเวลา t ที่ใช้ในการปลูกผลึก โดยทั่ว ๆ ไปหนาไม่เกิน 50 ไมครอน การกำหนดเนื้อที่ทำงานให้มีความคมชัดอยู่ในวิสัยที่จะกระทำได้ โดยการกัดให้มีโครงสร้าง Mesa ดังแสดงในรูปที่ 22 ด้วยสารเคมี ปริมาตรทำงานจะมีขนาดที่แน่นอน และมีขนาดตามหน้ากาก (Mask) ที่ใช้ในการผลิต (ดูภาคผนวก 2) อย่างไรก็ตามสำหรับโครงสร้างที่ใช้แวนผลึกชนิด Semi-insulating เนื่องจากความหนาของชั้นทำงานถูกกำหนดด้วยความหนาของแวนผลึก ≈ 350 ไมครอน) การกำหนดพื้นที่ทำงานโดยโครงสร้าง Mesa จึงไม่สามารถกระทำได้ ต้องใช้วิธีการ Cleave ให้แตกตามแนวผลึก ขนาดของหัววัดโครงสร้างนี้จึงมีขนาดใหญ่มากกว่า $200 \times 200 \text{ mm}^2$ ลักษณะหัววัดรังสีที่ได้จากการ Cleave แสดงไว้ในรูปที่ 23 ส่วนรายละเอียดการทำขั้วโลหะ การทำโครงสร้าง Mesa และการติดตั้งหัววัดรังสีแสดงไว้ในภาคผนวก 2



รูปที่ 22 ภาพตัดขวางของหัววัดรังสีเอกซ์โครงสร้าง PIN ที่ผลิตจากแวนผลึก GaAs (n^+) แสดงปริมาตรของชั้นทำงานที่มีขนาดแน่นอน

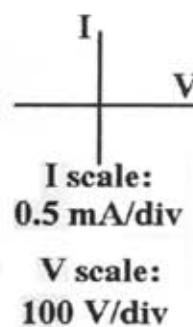


รูปที่ 23 ลักษณะหัววัดรังสีโครงสร้าง PIN ที่สร้างขึ้นจริง

5. ผลการวิจัย

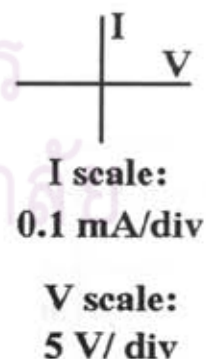
5.1 สมบัติทางไฟฟ้าของหัววัดรังสี

ทำการวัดลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของหัววัดรังสีทุกโครงสร้างด้วยเครื่อง Curve-Tracer ผลการวัดแสดงไว้ดังรูปที่ 24, 25 และ 26 จากกราฟของลักษณะสมบัติ ทำให้ทราบค่าช่วงสเกลของกระแสและแรงดันพิกัด ค่าทั้งสองแสดงไว้ในตารางที่ 3



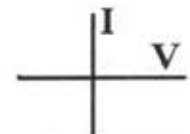
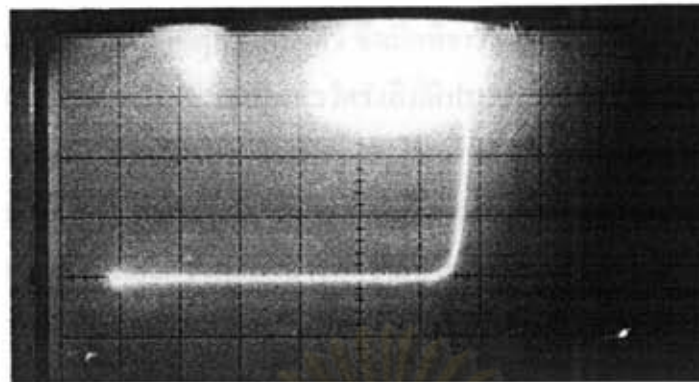
Schottky Structure by GaAs (SI)

รูปที่ 24 กราฟลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันในที่มีคของหัววัดรังสีเอกซ์ชนิด Schottky โดยใช้ผลึกเริ่มต้นจาก GaAs (SI)



PIN Structure by GaAs (SI)

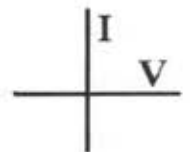
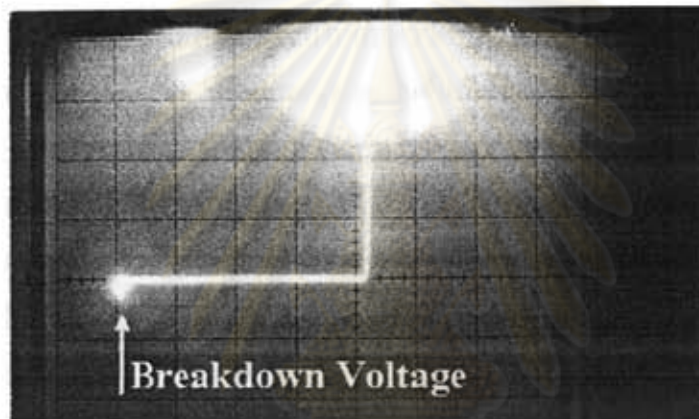
รูปที่ 25 กราฟลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันในที่มีคของหัววัดรังสีเอกซ์ โครงสร้าง PIN จากแวนผลึกเริ่มต้น GaAs (SI)



I scale:
10 $\mu\text{A}/\text{div}$

V scale:
0.5 V/div

$p^+n^-n^+$ Structure



I scale:
0.2 mA/div

V scale:
5 V/div

$p^+n^-n^+$ Structure

รูปที่ 26 กราฟลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันในที่มีคของหัววัดรังสีเอกซ์ โครงสร้าง $p^+n^-n^+$ จากแวนสลิคเริ่มต้น GaAs (n^+)

ตารางที่ 3 แสดงค่ากระแสมีคและค่าแรงดันพังทลาย

โครงสร้าง	Schottky SI Substrate	PIN SI Substrate	$p^+n^-n^+$ 1G	$p^+n^-n^+$ 2G	$p^+n^-n^+$ 4G
กระแสมีค	อยู่ในช่วงสเกล 0.5 mA	อยู่ในช่วงสเกล 0.1 mA	อยู่ในช่วงสเกล 10 μA	อยู่ในช่วงสเกล 10 μA	อยู่ในช่วงสเกล 10 μA
แรงดันพังทลาย (Volt)	200	20	20-25	25	12

*เมื่อวัดที่ Sensitivity สูงกว่าช่วงสเกลที่วัดจะมี Hysteresis Loop Effect จึงไม่สามารถวัดค่าที่ถูกต้องได้

5.2 การทดสอบทางด้านการวัดรังสี

ทำการเลือกหัววัดที่ดีที่สุดมาหนึ่งตัว ซึ่งเมื่อพิจารณาจากสมบัติทางไฟฟ้าแล้ว จะเห็นได้ว่า หัววัดรังสีจากกระบวนการ 2G น่าจะเป็นหัววัดรังสีที่มีประสิทธิภาพที่สุดในหัววัดรังสีที่สร้างได้ทั้งหมด แม้ว่าค่าแรงดันพักทลายมีค่าสูงที่สุดเพียง 25 โวลต์ แต่มีกระแสมีอยู่ในช่วงสเกล 10 μA นำหัววัดรังสีที่เลือกได้มาทำการทดสอบการตอบสนองรังสีทั้งรังสีประเภทอนุภาค คือรังสีอัลฟา และรังสีประเภทโฟตอน คือรังสีเอกซ์ เพื่อศึกษาขีดความสามารถของหัววัด

5.2.1 ขั้นตอนการทดสอบ

1. นำหัววัดรังสีที่จะทำการทดสอบติดตั้งบนแท่นยึดที่อยู่ภายในภาชนะหุ้มหัววัดรังสีที่ติดตั้งบน Preamplifier ดังแสดงในรูปที่ 27
2. วางต้นกำเนิดรังสีในตำแหน่งขนานกับหัววัด โดยห่างจากหัววัดประมาณ 1-1.5 เซนติเมตร โดยจะใช้ Am-241 ประเภทอนุภาคเป็นต้นกำเนิดรังสีในกรณีทำการวัดผลตอบสนองรังสีอัลฟา และใช้ Am-241 ประเภทโฟตอน เป็นต้นกำเนิดรังสีในกรณีทำการวัดผลตอบสนองรังสีเอกซ์
3. ไบแอสฮ้อนหัววัดรังสีด้วยค่าแรงดันที่เหมาะสม
4. ปรับอัตราขยายสัญญาณต่าง ๆ เพื่อให้ได้คุณภาพของพัลส์เหมาะสมกับระบบวัดรังสี
5. ปรับค่าต่าง ๆ จาก MCA เช่น LLD, memory group, ADC gain, preset time เป็นต้น ให้เหมาะกับการวิเคราะห์สเปกตรัมของต้นกำเนิดรังสี

รูปที่ 28 แสดงภาพถ่ายส่วนประกอบต่าง ๆ ของหัววัดรังสี



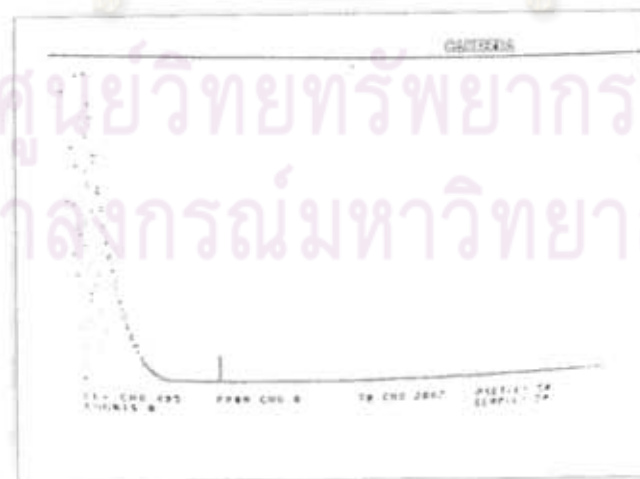
รูปที่ 27 แสดงการติดตั้งหัววัดรังสีกับแท่นยึดภายในภาชนะหุ้มหัววัดรังสี



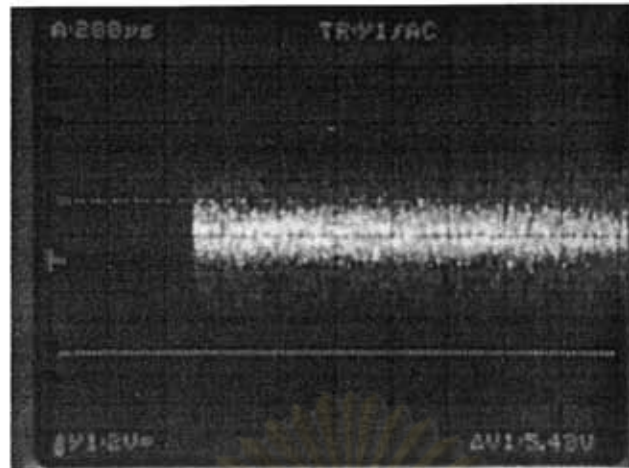
รูปที่ 28 แสดงส่วนประกอบต่าง ๆ ของเครื่องมือวัดรังสี

5.2.2 ผลจากการทดสอบรังสี

ผลจากการทดสอบการตอบสนองของหัววัดรังสีกระบวนกร 2G ต่อรังสีอัลฟา พบว่า หัววัดรังสีไม่ตอบสนองต่อรังสีอัลฟาเลย ดังแสดงในรูปที่ 29 จะเห็นได้ว่าสัญญาณที่วัดได้มีแค่สัญญาณรบกวน ในบริเวณ Channel จะไม่มีพีคเกิดขึ้นเลย ไม่ว่าจะทำการปรับค่าอุปกรณ์ต่าง ๆ ไปเป็นเท่าไร



รูปที่ 29 แสดงผลการวัดการตอบสนองต่อรังสีอัลฟาของหัววัดรังสีจากเครื่อง MCA



รูปที่ 30 แสดงสัญญาณผลการตอบสนองต่อรังสีอัลฟาของหัววัดรังสีที่ได้จาก Oscilloscope

ก็ตาม ได้พยายามเพิ่มค่าแรงดันไบแอสย้อนให้แก่รอยต่อ แต่ผลยังคงเป็นเช่นเดิม จึงลองทำการวัดขนาดสัญญาณด้วยเครื่อง Oscilloscope พบว่าเครื่องสามารถอ่านได้เฉพาะสัญญาณรบกวน โดยไม่ปรากฏสัญญาณที่น่าจะเกิดขึ้นจากการตอบสนองต่อรังสีอัลฟาเลย ดังแสดงในรูปที่ 30

เนื่องจากหัววัดรังสีกระบวนการ 2 G ไม่สามารถตอบสนองต่อรังสีอัลฟาได้เลย ดังนั้นจึงไม่ทำการวัดการตอบสนองต่อรังสีเอกซ์ของหัววัดรังสีต่อไปอีก เนื่องจากถ้าหัววัดรังสีไม่สามารถตอบสนองต่อรังสีอัลฟา ก็จะไม่สามารถตอบสนองต่อรังสีเอกซ์ได้เช่นกัน

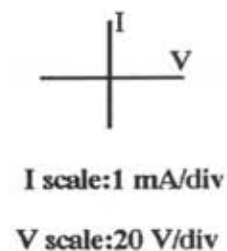
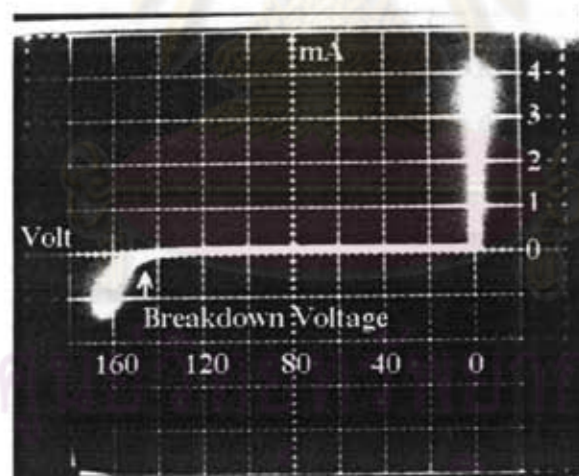
6. สรุปและวิจารณ์ผล

จากแนวทางปรับปรุงหัววัดรังสีให้มีสมรรถนะดีขึ้น โดยเน้นปรับปรุงคุณภาพผลึกของชั้นทำงาน (Active Region) ด้วยกระบวนการปลูกผลึก 1G ถึง 4G พบว่า หัววัดรังสีทุกตัวอย่างมีผลตอบสนองต่อแสง แต่ไม่มีผลตอบสนองต่อรังสี เมื่อพิจารณาถึงข้อมูลค่าแรงดันพังทลายของตัวอย่างที่ชั้นทำงานปลูกจากกระบวนการปลูกผลึก 1G มีค่าใกล้เคียงกับของ 2G (ประมาณ 25 Volts) ยิ่งกว่านั้นแรงดันพังทลายของ 4G กลับมีค่าลดลงเหลือเพียง 12 Volts ซึ่งขัดแย้งกับทิศทางที่ควรจะเป็น ผู้วิจัยได้ตรวจสอบคุณภาพผลึกชั้นทำงานของกระบวนการปลูกผลึก 1G กับของ 2G ด้วยการวัดค่าความคล่องตัวของพาหะ (Carrier Mobility) และค่าความเข้มข้นพาหะ (Carrier Concentration) โดยอาศัยปรากฏการณ์ของฮอลล์ (Hall Effect) พบว่า ค่าทั้งสองของทั้ง 2 กรณี มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก ดังแสดงในตารางที่ 4 โดยประสิทธิภาพของผู้วิจัย กระบวนการปลูกผลึกแบบ 2G น่าจะส่งผลให้ชั้นทำงานมีความเข้มข้นพาหะไม่เกิน 10^{15} cm^{-3} แรงดันพังทลายของหัววัดสูงมากกว่า 100 Volts ดังแสดงในรูปที่ 31 ซึ่งเป็นผลการทดลองของแรงดันพังทลายของหัววัดคอลเล็กเตอร์-เบสของทรานซิสเตอร์ ซึ่งสามารถผลิตได้เมื่อประมาณ 14 ปี ที่แล้ว (ปี 2533) จากชุดอุปกรณ์ปลูกผลึก

ชุดเดียวกัน^[15] ผู้วิจัยจึงตรวจสอบระบบปลูกผลึกในจุดที่น่าจะสร้างปัญหาพบว่า เครื่องทำก๊าซไฮโดรเจนบริสุทธิ์ (Hydrogen Purifier) เสีย ไม่สามารถใช้งานได้ เนื่องจาก Palladium Membrane ภายในฉีกขาด คุณภาพของก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้จึงมีคุณภาพที่ไม่ดีพอ ก๊าซไฮโดรเจนบริสุทธิ์ที่ต้องการในระบบการปลูกผลึกต้องมีความบริสุทธิ์ระดับ 99.999999 % ผู้วิจัยจึงต้องยุติการวิจัย และรายงานผลงานวิจัยเท่าที่ได้ดำเนินการมา อย่างไรก็ตามแนวทางการออกแบบหัววัดรังสี และแนวทางของเทคโนโลยีที่ใช้ในการผลิตที่ผู้วิจัยนำเสนอ สามารถใช้เป็นบรรทัดฐานในการวิจัยสร้างหัววัดรังสีชนิดต่าง ๆ จากสารประกอบกึ่งตัวนำในอนาคตต่อไป

ตารางที่ 4 ค่าความคล่องตัวและความเข้มข้นพาหะของชั้นทำงาน

ชั้นผลึก GaAs (n)	ความคล่องตัว (cm ² /V.S)	ความเข้มข้น (cm ⁻³)
แบบ 1G	2411.11	2.24×10 ¹⁶
แบบ 2G	3196.49	1.40×10 ¹⁶



รูปที่ 31 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันหัวคอคอลเล็กเตอร์-เบส ของทรานซิสเตอร์ที่ผลิตจากอุปกรณ์ปลูกผลึกชุดเดียวกัน หัวคอคอลเล็กเตอร์-เบส มีแรงดันพังทลายสูงถึง 150 Volt

โดยสรุปคุณภาพผลึกของชั้นทำงานที่ค่อนข้างต่ำ พาหะไฟฟ้าที่ถูกกระตุ้นโดยรังสีจึงมีจำนวนน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับพาหะกระแสมีค ยิ่งกว่านั้นประสิทธิภาพการรวบรวมพาหะก็ไม่สามารถเพิ่มขึ้นได้ เนื่องจากถูกจำกัดด้วยแรงดันพังทลายของหัวคอค ส่งผลให้หัววัดรังสีไม่ตอบสนองต่อรังสีใดๆ

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] บรรยง โตประเสริฐพงศ์ และมนตรี สวัสดิ์ศฤงฆาร, “รายงานผลการวิจัยการสร้างและวิเคราะห์ผลของโฟโตไดโอด”, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, ทุนวิจัยรัชดาภิเษกสมโภช, พฤษภาคม 2526.
- [2] พรพิทักษ์ โพธิเวชกุล, “การออกแบบและสร้างตัวตรวจจับแบบสารกึ่งตัวนำชนิดหัวต่อพี-เอ็น”, วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, พ.ศ. 2524.
- [3] D.S. McGregor and H. Hermon, “Room-temperature compound semiconductor radiation detectors”, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A, 395, (1997), pp. 101-124.
- [4] G. Bertuccio et al, “Schottky junction on semi-insulating LEC gallium arsenide for X- and γ -Ray spectrometers operated at and below room temperature”, IEEE Transaction on Nuclear Science, Vol. 44, No. 2, April 1997, pp. 117-124.
- [5] R. Baldini et al, “Influence of substrate on the performances of semi-insulating GaAs detectors”, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A, 449 (2000), pp. 268-276.
- [6] E. Bertolucci et al, “Evidence of charge gain mechanism in SI-GaAs detectors with epitaxial junction”, IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol 47, No. 3, June 2000, pp. 780-783.
- [7] P. Russo and G. Mettivier, “Characterization of 600- μ m-thick SI-GaAs detectors for medical imaging”, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A 466 (2001), pp. 79-86.
- [8] G.I. Ayzenshtat et al, “GaAs structure for X-ray imaging detectors”, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A 466 (2001), pp. 25-32.
- [9] D.L. Budnitsky et al, “Epitaxial structures base on compensated GaAs for γ - and X-ray detectors”, Nucl. Instr. and Meth. in Phy. Pes. A 466 (2001), pp. 33-38.
- [10] ศุภโชค ไทน้อย, “การพัฒนาหัวตรวจจับชนิด GaAs p-i-n สำหรับตรวจจับรังสีเอกซ์”, วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, พ.ศ. 2542.
- [11] Pallab Bhattacharya, “Semiconductor Optoelectronic Devices”,(n.p.) : Prentice-Hall, Inc. 1994.
- [12] ชุมพล อันตรเสน และคณะ, “ไดโอดรับแสงชนิด Graded Band Gap GaAlAs/GaAs”, รายงานผลการวิจัย กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, ธันวาคม 2543.
- [13] Glenn F. Knoll, “Radiation Detection and Measurement”, 2nd ed. New York : John Wiley & Sons, 1989.
- [14] Kwok K. Ng, “Complete Guide To Semiconductor Devices”, (n.p.) : McGraw-Hill, 1995.
- [15] ชุมพล อันตรเสน และคณะ, “โครงการออปโตอิเล็กทรอนิกส์”, รายงานวิจัยและพัฒนา, NECTEC, พ.ศ. 2533.

8. ภาคผนวก 1

ตัวอย่างการคำนวณปริมาณวัสดุที่ใช้ทำสารละลายเพื่อปลูกผลึกชั้นผลึก GaAs (n)

ชั้นผลึก GaAs (n⁻)

พิจารณากราฟรูปที่ A.1 ที่ อุณหภูมิ 800 °C ของเส้นกราฟ GaAs จะได้

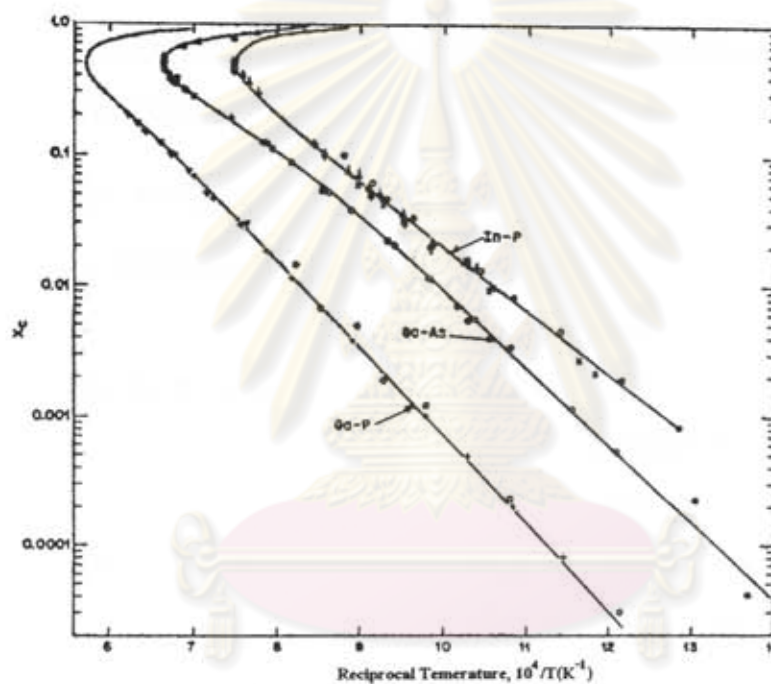
$$X_{As} = 0.022$$

จะได้

$$X_{Ga} = 1 - X_{As} = 0.978$$

ใช้แก๊สเลียม 3.0 กรัม จะได้

$$W_{GaAs} = 46.67 \text{ mg}$$



รูปที่ A.1 กราฟจำนวนเศษส่วนอะตอมของอาร์เซนิกในสารละลายอิมิตัว GaAs ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

ชั้นผลึก GaAs (n⁻) : 10^{19} cm^{-3} (Te)

สารเจือปนที่ใช้คือ Te

พิจารณากราฟรูปที่ A.2

$$X_{Te} = 0.0002$$

พิจารณากราฟรูปที่ A.1 จะได้

$$X_{As} = 0.022$$

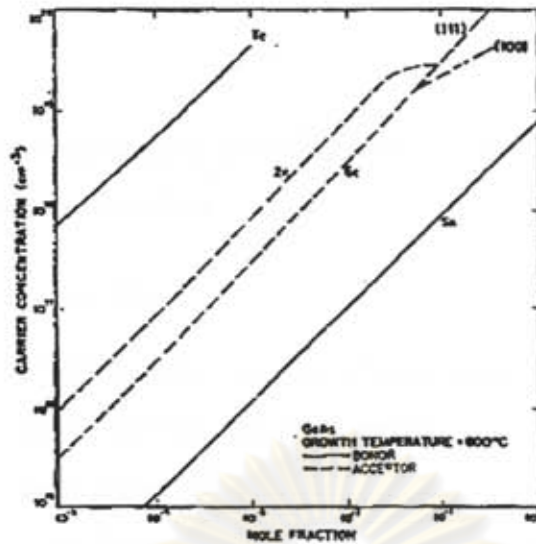
จะได้

$$X_{Ga} = 1 - X_{As} - X_{Te} = 0.9778$$

ใช้แก๊สเลียม 3.0 กรัม จะได้

$$W_{GaAs} = 140.05 \text{ mg}$$

$$W_{Te} = 1.123 \text{ mg}$$



รูปที่ A.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของพาหะกับเศษส่วนอะตอมของสารเจือปนชนิดต่างๆใน GaAs ที่ 800 องศาเซลเซียส

ชั้นผลึก GaAs (p') : $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ (Ge)

สารเจือปนที่ใช้เป็น Ge พิจารณากราฟรูปที่ A.3 จะได้

$$X_{\text{Ge}} = 0.03$$

พิจารณากราฟรูปที่ A.1 จะได้

$$X_{\text{As}} = 0.022$$

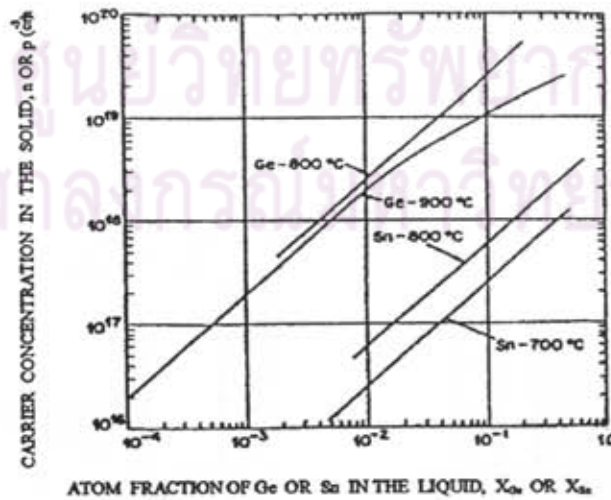
ดังนั้นได้

$$X_{\text{Ga}} = 1 - 0.022 - 0.03 = 0.948$$

ใช้แก๊สเลียม 3.0 กรัม จะได้

$$W_{\text{GaAs}} = 144.46 \text{ mg}$$

$$W_{\text{Ge}} = 98.84 \text{ mg}$$



รูปที่ A.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของพาหะกับเศษส่วนอะตอมของสารเจือปนชนิดต่างๆใน GaAs

9. ภาคผนวก 2

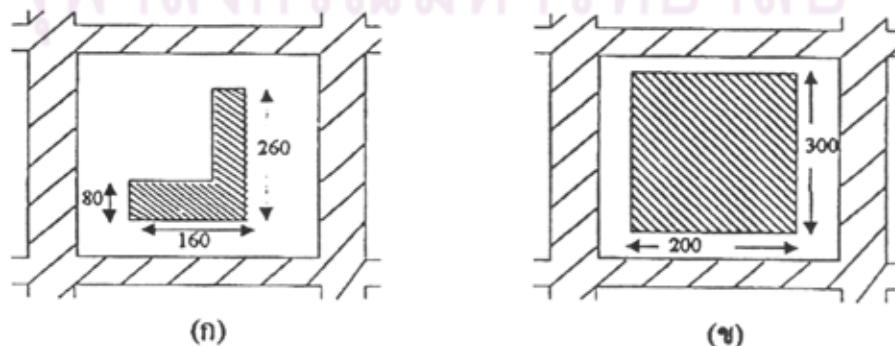
หลังจากทำการปลูกผลึกตามโครงสร้างที่ออกแบบแล้วเสร็จ นำเวเน่ผลึกไปผ่านขั้นตอนต่างๆ เพื่อให้ได้ตัวหัววัดรังสีดังต่อไปนี้

ขั้นตอนทำขั้วโลหะด้าน p และด้าน n

1. ด้าน n ฉาบผิวโลหะด้วย AuGe หนา 2500 Å และฉาบผิวด้วย Ni หนา 500 Å
2. ด้าน p ฉาบผิวโลหะด้วย AuZn หนา 2500 Å
3. ทำ Photolithography ที่ด้าน p ดังนี้
 - 1) อบไล่ความชื้นที่ 90 °C 3 นาที แล้ว spin coat positive photoresist และอบที่อุณหภูมิ 90 °C 7 นาที
 - 2) ฉายแสงผ่าน mask ดังรูปที่ B.1 ก. นาน 30 วินาที
 - 3) ล้างด้วย Positive Developer +DI water (1:1) ประมาณ 30 วินาที แล้วล้างด้วย DI Water และอบที่ 90 °C 30 นาที
 - 4) ทา WAX ที่ด้านหลังแผ่นชิ้นงาน รอกจนแห้ง
 - 5) กัด AuZn ด้วย KI + I₂ แล้วล้างด้วย DI-Water
 - 6) ล้าง WAX และ Positive resist ด้วย Trichloethylene และ Acetone ตามลำดับ แล้วล้างด้วย DI-Water
4. ทำ Anneal ที่ 450-500 90 °C 2 นาทีภายใต้บรรยากาศของ Forming Gas 10 % H₂+ 90 % N₂

ขั้นตอนทำโครงสร้าง Mesa

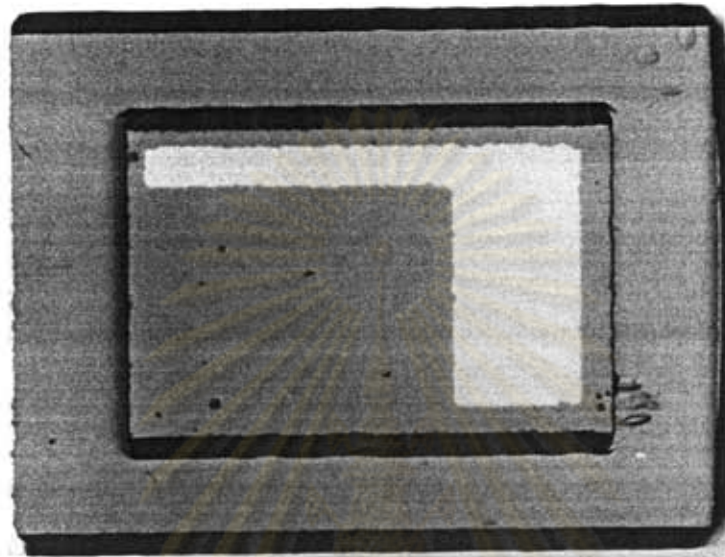
โดยการทำ Photolithography โดยใช้ mask ดังรูปที่ B.1 ข. และกัดด้วย H₂SO₄+ H₂O + H₂O₂ ที่ 35-40 °C 3 นาที รูปที่ B.2 แสดงภาพด้านบนของหัววัดรังสีโครงสร้าง p⁺ n⁻ n⁺ ที่ได้หลังจากการกัด Mesa



รูปที่ B.1 Mask ที่ใช้ทำ contact ด้าน p (ก) และทำ Mesa (ข) ขนาดแสดงในหน่วย μm

ขั้นตอนติดตั้งหัววัดรังสี

นำหัววัดรังสีมาตัดแบ่งและติดชิปบนฐานโลหะเพื่อให้เกิดผิวสัมผัสทางไฟฟ้าระหว่าง
จัมสเตอร์ดัมกับขาหนึ่งของ package และต่อสายเพื่อเชื่อมด้าน p^+ กับอีกขาหนึ่งของ package



รูปที่ B.2 แสดงภาพด้านหน้าของหัววัดรังสีโครงสร้าง Mesa ที่ผลิตได้
ถ่ายด้วย Optical Microscope

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

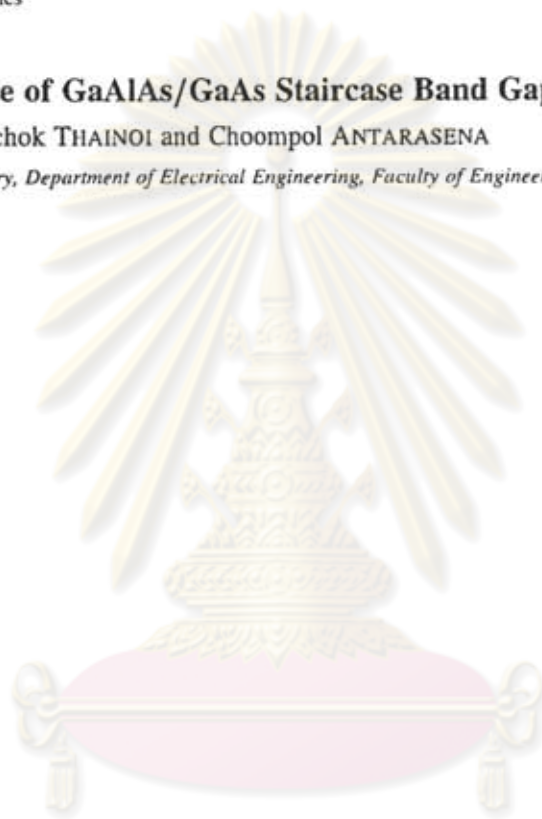
Reprinted from

Japanese Journal of Applied Physics
Vol. 43, No. 11A, 2004, pp. 7460–7461
©2004 The Japan Society of Applied Physics

Study on Spectral Response of GaAlAs/GaAs Staircase Band Gap Photodiodes

Pakhawat WISETLAKHORN, Supachok THAINOI and Choopol ANTARASENA

Semiconductor Device Research Laboratory, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Study on Spectral Response of GaAlAs/GaAs Staircase Band Gap Photodiodes

Pakhawat WISETLAKHORN, Supachok THAINOI and Choopol ANTARASENA*

Semiconductor Device Research Laboratory, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand

(Received May 10, 2004; revised July 7, 2004; accepted August 16, 2004; published November 10, 2004)

Three structures of a GaAlAs/GaAs staircase band gap photodiode have been fabricated and their spectral responses have been measured. The experimental results are almost consistent with the theoretical results except that the short-wavelength range expands more due to the electron diffusion current. Moreover, the spectral response of the three structures can be resolved into several peaks corresponding to the band gap of each GaAlAs active layer. [DOI: 10.1143/JJAP.43.7460]

KEYWORDS: GaAlAs/GaAs heterojunction, photodiode, window effect, staircase band gap, spectral response, band gap engineering, quasi-electric field, diffusion current

The spectral response of a GaAlAs/GaAs photodiode can be optimized using the band gap engineering concept described as follows: (1) Employ the window effect of the top $\text{Ga}_{0.6}\text{Al}_{0.4}\text{As}$ (P^+) layer to pass through the photons of energy less than its band gap into the active layer. (2) Apply staircase band gap tailoring particularly in the active region to produce a quasi-electric field. To realize these, three structures of a staircase band gap photodiode in which the band gap energy of the active layer varied from that of the $\text{Ga}_{0.6}\text{Al}_{0.4}\text{As}$ window layer (1.942 eV) to that of the GaAs (n^-) active layer (1.425 eV), as shown in Fig. 1, were designed and fabricated. Structures I and II were grown by LPE, while structure III, whose pn junction was formed by Zn diffusion, was grown by MBE. For structure III, the staircase band gap layers are rather thin and junction depth depends on diffusion conditions. For this reason, the metallurgical pn junction of structure III can be established in the region of the staircase band gap structure.

A comparison between the experimental and theoretical spectral responses of structure I is shown in Fig. 2(a). In the case of the experimental spectral response, it gradually increases at a wavelength of approximately 520 nm up to approximately 640 nm which corresponds to the band gap of the $\text{Ga}_{0.6}\text{Al}_{0.4}\text{As}$ window layer. It then fluctuates in a short range and a small peak at approximately 700 nm appears before slowly increasing up to the peak at approximately 750 nm. These two peaks, as indicated by arrows a and b, correspond to the band gaps of $\text{Ga}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}$ and $\text{Ga}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{As}$ active layers, respectively. As for cutoff wavelength, both correspond to approximately 800 nm,

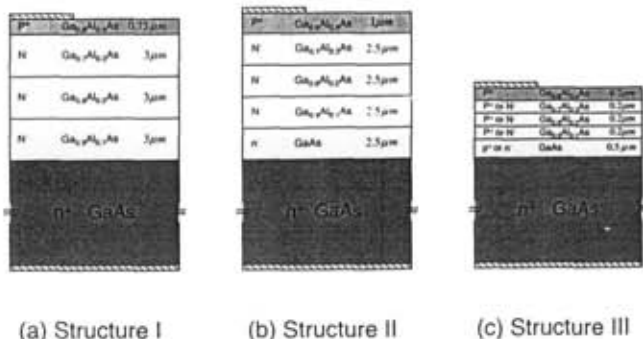


Fig. 1. Fabricated structures.

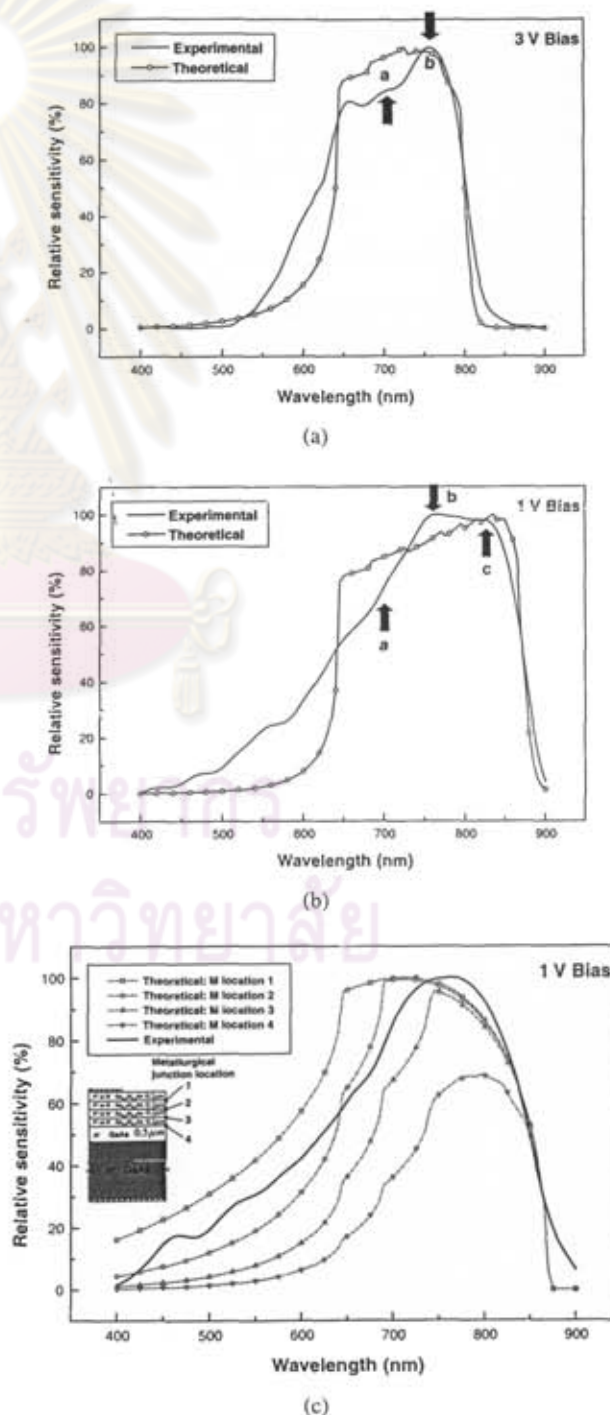


Fig. 2. Comparison between experimental and theoretical spectral responses of structures I, II and III.

*E-mail address: Choopol.A@Chula.ac.th

which is the cutoff wavelength of $\text{Ga}_{0.9}\text{Al}_{0.1}\text{As}$. It is clear that the experimental spectral result is not very consistent with the theoretical one in that it expands more broadly particularly at the short-wavelength edge. This is because of the electron diffusion current from the window layer that was neglected in the calculation.^{1,2)}

A comparison between the experimental and theoretical spectral responses of structure II is depicted in Fig. 2(b). The experimental spectral response gradually increases from 400 nm to its peak at approximately 750 nm and subsequently tapers at approximately 870 nm, which correspond to the cutoff wavelength of GaAs. The spectral response can be resolved into 3 peaks at 700, 750 and 800 nm, which correspond to the band gaps of $\text{Ga}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}$, $\text{Ga}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{As}$ and $\text{Ga}_{0.9}\text{Al}_{0.1}\text{As}$ respectively. In the same manner, the spectral response of short wavelengths expands more broadly than the theoretical response due to the electron diffusion current.

For structure III, the theoretical spectral response calculated with different pn metallurgical junction (M) locations are compared to the experimental result, as shown in Fig. 2(c). It is clear that the experimental spectral response agrees with one of the metallurgical pn junction locations between the $\text{Ga}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}$ and $\text{Ga}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{As}$ regions. Our experimental result is also strongly supported by a research on the spectral response of GaAs photodiodes fabricated by the RTD (rapid thermal diffusion) of Zn.³⁾ Since pn junction

depth is controlled by heating temperature as well as diffusion time, the deeper the pn junction, the weaker the spectral response at short wavelengths. The problem of the electron diffusion current and the small peaks originating from each active layer are not clearly evident.

In conclusion, the measured spectral responses are almost consistent with the theoretical ones except that the fabricated structures have short-wavelength spectral responses expanding more broadly than those of theoretical calculation. This is because of the electron diffusion current from the top window layer. In addition, such spectral responses can be resolved into several peaks corresponding to the band gap of each GaAlAs active layer. As for the pn junction forming by Zn diffusion, the spectral response between 400 and 750 nm also depends on junction depth. The deeper the junction, the weaker the spectral response at short wavelengths.

The authors wish to acknowledge the Rachadapiseksom-poch Research Fund from Chulalongkorn University and National Electronics and Computer Technology Center (NECTEC) for financial support.

- 1) P. Bhattacharya: (Prentice Hall International, New Jersey, 1997) 2nd ed., Chap. 8, p. 344.
- 2) F. Kobayashi and Y. Sekiguchi: Jpn. J. Appl. Phys. **31** (1992) L 850.
- 3) A. Usami, A. Kitagawa, T. Wada, M. Suzuki, Y. Tokuda and H. Kan: IEEE Electron Device Lett. **13** (1992) 59.



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย