

การพัฒนาระบบควบคุมค่าอิเล็กทรอนิกส์เพื่อการสร้างภาพจากสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์อัตโนมัติ



นางอำไพ อติโรจน์ปัญญา

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2547

ISBN 974-53-1127-8

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEVELOPMENT OF AN ELECTRON BEAM CONTROL SYSTEM FOR SECONDARY ELECTRON
SIGNAL IMAGING



Mrs. Ampai Attirojpunya

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Nuclear Technology

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2004

ISBN 974-53-1127-8

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาระบบควบคุมลำอิเล็กตรอนเพื่อการสร้างภาพจากสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิ
โดย	นางอำไพ อติโรจน์ปัญญา
สาขาวิชา	นิเวศลิษฐ์เทคโนโลยี
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุวิทย์ ปุณณชัยยะ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์เดโช ทองอร่าม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์สมยศ ศรีสถิตย์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุวิทย์ ปุณณชัยยะ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(อาจารย์เดโช ทองอร่าม)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์นเรศร์ จันทน์ขาว)

อ่าไฟ อติโรจนปัญหา : การพัฒนาระบบควบคุมลำอิเล็กตรอนเพื่อการสร้างภาพจาก
สัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิ. (DEVELOPMENT OF AN ELECTRON BEAM
CONTROL SYSTEM FOR SECONDARY ELECTRON SIGNAL IMAGING)
อ.ที่ปรึกษา: ผศ. สุวิทย์ ปุณณชัยยะ, อ.ที่ปรึกษาร่วม: อ.เดโช ทองอร่าม, 83 หน้า.
ISBN 974-53-1127-8

วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบควบคุมลำอิเล็กตรอนและระบบสร้างภาพ
จากสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิ สำหรับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน เพื่อปรับการทำงาน
ของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนรุ่น T20 ของบริษัท JEOL ในโหมดโทรทัศน์ดั้งเดิมมา
เป็นการสร้างภาพบนจอไมโครคอมพิวเตอร์ งานวิจัยนี้เลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F84A
สำหรับกำเนิดสัญญาณควบคุมการสแกนลำอิเล็กตรอน ให้มีอัตราสแกนตามมาตรฐานระบบ
โทรทัศน์ 625 เส้น พร้อมทั้งพัฒนาหัววัดสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิแบบ เอเวอร์ฮาร์ท ทอร์นเลย์
(Everhart-Thornley) เพื่อกำเนิดสัญญาณภาพและนำไปมอดูเลต (Modulate) กับสัญญาณเข้าจังหวะ
ในการสร้างสัญญาณภาพคอมโพสิต (Composite video) ส่งผ่านแผ่นวงจรจับสัญญาณภาพ (Video
capture card) เข้าสู่ไมโครคอมพิวเตอร์ ผลทดสอบการทำงานของระบบพบว่า สามารถควบคุมการ
สแกนของลำอิเล็กตรอนบนพื้นผิวตัวอย่าง แสดงภาพจุลทรรศน์อิเล็กตรอนบนจอภาพด้วยความ
ละเอียด 320x240 จุดภาพ โดยความไม่เป็นเชิงเส้นของภาพในแนวแกนนอนและแกนตั้งน้อยกว่า
16.13% และ 21.05% ตามลำดับ ภาพจุลทรรศน์อิเล็กตรอนจากสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิให้ความ
คมชัดและความเปรียบต่างภาพที่ดีเยี่ยมระบบแสดงผลเดิม แต่ยังมีสัญญาณรบกวนในสัญญาณภาพ
เล็กน้อย อย่างไรก็ตามสามารถใช้เทคนิคการปรับปรุงคุณภาพของสัญญาณภาพเสริมความชัดเจน
ของภาพได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา นิเวศวิทยเทคโนโลยี
สาขาวิชา นิเวศวิทยเทคโนโลยี
ปีการศึกษา 2547

ลายมือชื่อนิติ.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4470662421 : MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY

KEY WORD: ET DETECTOR / SCANNING ELECTRON BEAM CONTROL / SECONDARY ELECTRON IMAGING

AMPAI ATTIROJPUNYA : DEVELOPMENT OF AN ELECTRON BEAM CONTROL SYSTEM FOR SECONDARY ELECTRON SIGNAL IMAGING. THESIS ADVISOR: ASST. PROF. SUVIT PUNNACHAIYA, THESIS CO – ADVISOR: DECHO THONG – ARAM, 83 pp. ISBN 974 – 53 –1127 – 8

This thesis aimed to develop an electron beam control system and a secondary electron signal imaging system for scanning electron microscope. The systems were applied for upgrading a conventional TV mode of JEOL SEM model T20 to the microcomputer TV-system. The PIC16F84A microcontroller was employed for scanning signal generation at 625 lines standard TV scan rate. The Everhart-Thornley secondary electron detector was also developed to generate a video signal and modulated with synchronized signals to form a composite video signal. The secondary electron image signal was sent to display on a microcomputer monitor via a video capture card. The image resolution of 320x240 pixels was displayed for electron beam scan testing on specimen surface. The image quality of both nonlinear horizontal and vertical scanning were less than 16.13% and 21.05% respectively. The sharpness and the contrast of secondary electron images were compatible to the old version but they have little interference noise in the video signal. However, by using an image processing technique can be improved the image quality of this system.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department Nuclear Technology

Field of study Nuclear Technology

Academic year 2004

Student's signature.....

Advisor's signature.....

Co-Advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์สุวิทย์ ปุณณชัยยะ อาจารย์ที่ปรึกษาและอาจารย์เค โฆทองอร่าม อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่คอยให้คำปรึกษา ข้อเสนอแนะและร่วมแก้ปัญหาต่างๆในระหว่างการทำวิจัย

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่สนับสนุนเงินทุนวิจัย และขอขอบคุณคุณเสนีย์ มณีเพชร ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ ที่จัดทำชุดคู่มือนิยมสำหรับใช้ประกอบหัวข้อวิจัยคุณอิเล็กทรอนิกส์ในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณศูนย์เชี่ยวชาญนิวเคลียร์เทคโนโลยีสำหรับวิเคราะห์และทดสอบวัสดุ ที่อำนวยความสะดวกเรื่องอุปกรณ์และเครื่องมือในการทำวิจัย

ขอขอบคุณคุณรุจิพร ประทีปเสน ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่ให้คำแนะนำเรื่องวัสดุทดสอบ ตลอดจนจัดเตรียมตัวอย่างวิเคราะห์ให้

ขอขอบคุณคุณเอกรัฐ ฤทธิเนียม, คุณจิรยุทธ ชำรงพุทธิกุล, คุณสิริยาภรณ์ แสงอรุณ, คุณกมลทิพย์ พลอยกระจำง และคุณมานิตย์ จิตรภักดี ที่ให้การช่วยเหลือในงานวิจัย ตลอดจนการทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

และขอขอบคุณพ่อแม่, คุณอัมพร สหพัฒนา, ค.ช.อเนชา อติโรจน์ปัญญาและทุกๆคนในครอบครัว ที่สนับสนุนและให้กำลังใจจนทำวิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ญ

บทที่

1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนและวิธีการในการดำเนินงานวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้.....	2
1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2. ทฤษฎี.....	4
2.1 หลักการของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน.....	4
2.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน.....	9
2.3 การวัดสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิ.....	13
2.4 หัววัดสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิแบบ Everhart-Thornley (E-T).....	21
2.5 การควบคุมการสแกนของลำอิเล็กตรอน.....	27
2.6 มาตรฐานสัญญาณคอมโพสิตวิดีโอ.....	29
3. การออกแบบระบบควบคุมลำอิเล็กตรอนและแสดงภาพ.....	32
3.1 ข้อมูลพื้นฐานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน.....	32
3.2 การออกแบบหัววัดสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิ.....	35
3.3 การออกแบบวงจรขยายสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิเพื่อสร้างสัญญาณภาพ.....	40
3.4 การออกแบบวงจรควบคุมการสแกนของลำอิเล็กตรอน.....	42
3.5 การพัฒนาโปรแกรมเพื่อเก็บภาพจากแคปเจอร์บอร์ด.....	44

บทที่	หน้า
4. การทดสอบและผลการทดสอบ	49
4.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทดสอบ.....	49
4.2 การทดสอบส่วนควบคุมการสแกนลำอิเล็กตรอน.....	49
4.3 การทดสอบคุณภาพของสัญญาณภาพคอมโพสิต.....	55
4.4 การทดสอบคุณภาพของภาพจุลทรรศน์อิเล็กตรอน.....	58
5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	64
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	64
5.2 วิเคราะห์ผลการวิจัย.....	65
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	65
รายการอ้างอิง.....	67
บรรณานุกรม.....	68
ภาคผนวก ก.....	70
ภาคผนวก ข.....	72
ภาคผนวก ค.....	77
ภาคผนวก ง.....	78
ภาคผนวก จ.....	79
ภาคผนวก ฉ.....	80
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	83

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่างกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนและกล้องจุลทรรศน์แบบแสง	4
ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของ P47, YAG และ YAP	16
ตารางที่ 2.3 ความสัมพันธ์ของกำลังขยายและระยะสแกนบนชิ้นตัวอย่าง	28
ตารางที่ 3.1 โหมดการสแกนของ T20	33
ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบความไม่เป็นเชิงเส้นในแนวตั้งและแนวนอน	56
ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบความไม่เป็นเชิงเส้นในแนวตั้งและแนวนอนเมื่อ จ่ายสัญญาณควบคุมแนวตั้งเป็นสัญญาณเข้าจังหวะ	57

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงส่วนประกอบเปรียบเทียบของกล้องจุลทรรศน์แบบแสง กล้องจุลทรรศน์แบบ TEM และกล้องจุลทรรศน์แบบ SEM.....	6
รูปที่ 2.2 แสดงชั้นความลึกของการเกิดสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ.....	8
รูปที่ 2.3 โครงสร้างของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน.....	9
รูปที่ 2.4 ระบบอิเล็กทรอนิกส์ออฟติก และระบบสร้างภาพ และบันทึกภาพของ SEM.....	10
รูปที่ 2.5 ภาพฉายแนวเคลื่อนตัวของลำอิเล็กตรอนในระบบอิเล็กทรอนิกส์ออฟติก.....	11
รูปที่ 2.6 เลนส์ออฟเจคทีฟแบบ Conical lens และแบบ Immersion lens.....	12
รูปที่ 2.7 ระบบแสดงภาพของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน.....	13
รูปที่ 2.8 แสดงส่วนประกอบของหัววัดรังสีชนิดซินทิลเลชัน.....	13
รูปที่ 2.9 ซินทิลเลเตอร์ที่ใช้ใน SEM.....	15
รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแสงและศักดาไฟฟ้าเร่งที่ขั้วสนามไฟฟ้าจุดอิเล็กตรอนของ P47, YAG และ YAP.....	16
รูปที่ 2.11 แสดงส่วนประกอบของหลอดทวิคูณอิเล็กตรอน.....	17
รูปที่ 2.12 ขนาดมุมตกกระทบและมุมวิกฤต.....	19
รูปที่ 2.13 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงพัลส์และความยาวของตัวนำแสงชนิด Lucite โดยใช้วัสดุสะท้อนต่าง ๆ.....	20
รูปที่ 2.14 แสดงส่วนประกอบของหัววัดสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิแบบ Everhart – Thornley.....	21
รูปที่ 2.15 ทิศทางของอิเล็กตรอนทุติยภูมิเมื่อไบอัสศักดาไฟฟ้าบวก.....	22
รูปที่ 2.16 ทิศทางของอิเล็กตรอนทุติยภูมิเมื่อไม่ไบอัสศักดาไฟฟ้า.....	23
รูปที่ 2.17 อนุภาคต่าง ๆ ที่ส่งผลกระทบต่อสัญญาณภาพของอิเล็กตรอนทุติยภูมิ.....	23
รูปที่ 2.18 ความสัมพันธ์ระหว่าง δ กับพลังงานของอิเล็กตรอนปฐมภูมิ.....	24
รูปที่ 2.19 ลักษณะของการกำเนิดสัญญาณบนผิวชิ้นงานที่ขรุขระ.....	25
รูปที่ 2.20 บริเวณชั้นความลึกของโอกาสเกิดอันตรกิริยาซึ่งขึ้นกับเลขอะตอมของชิ้นงาน.....	26
รูปที่ 2.21 แสดงการสแกนปลายลำอิเล็กตรอนบนพื้นผิวชิ้นตัวอย่าง.....	27
รูปที่ 2.22 สัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิและสัญญาณภาพ.....	28
รูปที่ 2.23 สัญญาณพื้นเลื่อยและสัญญาณภาพ.....	29
รูปที่ 2.24 สัญญาณภาพและสัญญาณซิงก์แวนอน.....	31

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 2.25 สัญญาณภาพและสัญญาณซิงค์แนวตั้ง.....	31
รูปที่ 3.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนรุ่น T20 ของ JEOL.....	32
รูปที่ 3.2 ระบบควบคุมการสแกนของ T20.....	33
รูปที่ 3.3 ระบบสร้างภาพในโหมด TV ของ T20.....	34
รูปที่ 3.4 โครงสร้างหัววัดอิเล็กตรอนที่พัฒนาขึ้น.....	35
รูปที่ 3.5 ก. ซินทิลเลเตอร์วางอยู่บนวัสดุรองรับ.....	36
รูปที่ 3.5 ข. ซินทิลเลเตอร์ที่ผิวหน้าได้รับความเสียหายจากรอยขีดข่วน.....	36
รูปที่ 3.6 อุปกรณ์แท่งควอทซ์.....	37
รูปที่ 3.7 เครื่องขัดแท่งควอทซ์.....	37
รูปที่ 3.8 ภาพถ่ายของหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ Dumont 6935.....	38
รูปที่ 3.9 การจัดวงจรแบบวัดสัญญาณกระแสต่อเนื่องของหลอด PMT Dumont 6935.....	38
รูปที่ 3.10 รูปถ่ายของ Secondary electron collector ประกอบกับ Port ของ SEM.....	39
รูปที่ 3.11 รูปถ่ายของ PMT ที่ประกอบเสร็จเรียบร้อยแล้ว.....	39
รูปที่ 3.12 รูปถ่ายของหัววัดสัญญาณอิเล็กตรอนที่พัฒนาขึ้น.....	40
รูปที่ 3.13 วงจรขยายสัญญาณอิเล็กตรอน.....	41
รูปที่ 3.14 วงจรสร้างสัญญาณภาพแบบรวมสัญญาณ.....	41
รูปที่ 3.15 แผนผังโฟลว์ชาร์ตการทำงานของ PIC16F84A ในการกำเนิดสัญญาณเข้าจังหวะ.....	42
รูปที่ 3.16 วงจรควบคุมสัญญาณสแกนลำอิเล็กตรอน.....	43
รูปที่ 3.17 การดัดแปลง T20 สำหรับระบบสแกนที่พัฒนาขึ้น.....	44
รูปที่ 3.18 ภาพถ่ายของแคปเจอร์บอร์ดรุ่น Fly Video '98 EZ.....	44
รูปที่ 3.19 แสดงขั้นตอนการบันทึกภาพ.....	46
รูปที่ 3.20 กล้องควบคุมการสแกนลำอิเล็กตรอนและสร้างสัญญาณภาพคอมพิวเตอร์.....	46
รูปที่ 3.21 แสดงวงจรภายในกล่องควบคุม.....	47
รูปที่ 3.22 แสดงการต่อกล่องควบคุมเข้ากับ T20.....	47
รูปที่ 3.23 แสดงส่วนประกอบของระบบที่พัฒนาขึ้นทั้งหมด.....	48
รูปที่ 4.1 แสดงตำแหน่งทดสอบรูปสัญญาณ.....	50
รูปที่ 4.2 เปรียบเทียบสัญญาณอินพุท Hor ของ T20 และ ระบบที่พัฒนา.....	51
รูปที่ 4.3 สัญญาณอินพุทและเอาต์พุท Hor ของ T20.....	51

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 4.4 สัญญาณอินพุตและเอาต์พุต Hor ของระบบที่พัฒนา	51
รูปที่ 4.5 สัญญาณอินพุตและเอาต์พุต Ver ของ T20	52
รูปที่ 4.6 สัญญาณอินพุตและเอาต์พุต Ver ของระบบที่พัฒนา	52
รูปที่ 4.7 แผนภาพการจัดวงจรทดสอบ	53
รูปที่ 4.8 เส้นกราฟทดสอบการตอบสนองความถี่ของวงจรถ่ายสัญญาณภาพ	53
รูปที่ 4.9 สัญญาณภาพคอมโพสิตจากระบบกำเนิดสัญญาณภาพของ T20	54
รูปที่ 4.10 สัญญาณภาพคอมโพสิตจากระบบกำเนิดสัญญาณภาพที่พัฒนาขึ้น	54
รูปที่ 4.11 ซีนตัวอย่างมาตรฐาน SIRA สำหรับเปรียบเทียบความเป็นเชิงเส้นของภาพ	55
รูปที่ 4.12 ภาพเส้นตารางรูปจตุรัสจากซีนตัวอย่างมาตรฐานหลังเปรียบเทียบ ที่กำลังขยาย 200 เท่า	56
รูปที่ 4.13 แสดงจุดจ่ายสัญญาณควบคุมการสแกนลำอิเล็กตรอนด้วยสัญญาณเข้าจังหวะ	57
รูปที่ 4.14 ภาพ Mask กำลังขยาย 200 เท่าของระบบที่พัฒนาขึ้น	59
รูปที่ 4.15 ภาพ Mask กำลังขยาย 200 เท่าของระบบดั้งเดิม	59
รูปที่ 4.16 ภาพ Mask กำลังขยาย 500 เท่าของระบบที่พัฒนาขึ้น	59
รูปที่ 4.17 ภาพ Mask กำลังขยาย 500 เท่าของระบบดั้งเดิม	59
รูปที่ 4.18 ภาพ Pollen กำลังขยาย 1500 เท่าของระบบที่พัฒนาขึ้น	60
รูปที่ 4.19 ภาพ Pollen กำลังขยาย 1500 เท่าของระบบดั้งเดิม	60
รูปที่ 4.20 ภาพ Pollen กำลังขยาย 3500 เท่าของระบบที่พัฒนาขึ้น	60
รูปที่ 4.21 ภาพ Pollen กำลังขยาย 3500 เท่าของระบบดั้งเดิม	60
รูปที่ 4.22 Line scan ของภาพจากระบบที่พัฒนาขึ้น	61
รูปที่ 4.23 Line scan ของภาพจากระบบดั้งเดิม	61
รูปที่ 4.24 ค่า ESF ของภาพจากระบบที่พัฒนาขึ้น	62
รูปที่ 4.25 ค่า ESF ของภาพจากระบบดั้งเดิม	63

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนเป็นประดิษฐกรรมทางวิทยาศาสตร์ ซึ่งเกิดจากความเพียรพยายามของนักวิทยาศาสตร์ที่ต้องการจะศึกษาค้นคว้าสิ่งเร้นลับทางชีวภาพและกายภาพที่ลึกลับซับซ้อนภายในโครงสร้างขนาดเล็กระดับนาโน ซึ่งไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า และจากการพัฒนาอย่างต่อเนื่องมาหลายทศวรรษเพื่อเพิ่มสมรรถนะของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนให้มีขีดความสามารถมากขึ้น ทำให้ในปัจจุบันกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนเป็นเครื่องมือวิจัยหลักที่จำเป็นและมีบทบาทสำคัญต่อการศึกษาวิจัยและพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีขั้นสูงเป็นอย่างมาก เนื่องจากความสามารถในการแสดงรายละเอียดของชิ้นงานดีกว่ากล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง เพราะความยาวคลื่นของอิเล็กตรอนที่ใช้สั้นกว่าความยาวคลื่นของแสงในช่วงที่ตามองเห็น อีกทั้งอันตรกิริยาต่างๆที่เกิดจากการตกกระทบของอิเล็กตรอนพลังงานสูงบนชิ้นงาน ยังสามารถใช้บ่งชี้ถึงคุณสมบัติต่างๆเช่น รูปร่างทั่วชั้นความลึกบริเวณพื้นผิว ความหนาของวัสดุและธาตุองค์ประกอบของวัสดุ ตลอดจนโครงสร้างผลึกในวัสดุ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับทางเลือกระบบวัดสัญญาณอิเล็กตรอนและเทคนิคในการวัดที่เหมาะสม นอกจากนี้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนยังมีระบบสแกนลำอิเล็กตรอนเพื่อเจาะจงจุดตรวจวิเคราะห์เฉพาะที่ และระบบสร้างภาพจากปริมาณสัญญาณของอันตรกิริยาต่างๆที่เกิดขึ้น พร้อมถ่ายโอนข้อมูลเข้าสู่ไมโครคอมพิวเตอร์ เพื่อประมวลผลและวิเคราะห์ภาพจุลทรรศน์อิเล็กตรอนต่อไปได้

จากประโยชน์ดังกล่าวข้างต้น ทำให้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนมีความซับซ้อนจึงจำเป็นต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ยังผลให้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนมีราคาสูง จึงมีแนวคิดที่จะเริ่มพัฒนากล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนขนาดเล็กขึ้น เพื่อใช้ในการเรียนการสอน และ ฝึกประสบการณ์ของนักวิจัย ตลอดจนการหาประสบการณ์เพื่อพัฒนาต่อในขั้นใช้งานจริงต่อไป เนื่องจากส่วนสำคัญของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนอยู่ที่ระบบสแกนลำอิเล็กตรอนและระบบสร้างภาพ งานวิจัยนี้จึงเลือกพัฒนาระบบสแกนลำอิเล็กตรอน ระบบสร้างภาพและเก็บข้อมูล โดยทดสอบการทำงานกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนที่มีอยู่ บนเงื่อนไขและข้อมูลเทคนิคของระบบอิเล็กตรอนออปติก (Electron optics system) และขดลวดสแกน (Scanning coils) ตลอดจนชุดขับกระแสของขดลวดสแกน (Current driving unit) ของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อพัฒนาระบบควบคุมการสแกนของลำอเล็กตรอนและระบบสร้างภาพจากสัญญาณอเล็กตรอนทุติยภูมิ สำหรับกล้องจุลทรรศน์อเล็กตรอนแบบสแกน

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาและพัฒนาระบบควบคุมการสแกนลำอเล็กตรอนและระบบรับสัญญาณอเล็กตรอนทุติยภูมิเพื่อสร้างภาพจากสัญญาณอเล็กตรอนทุติยภูมิ
2. ออกแบบและพัฒนาโปรแกรมควบคุมการสแกนลำอเล็กตรอนและการสร้างภาพบนจอมอนิเตอร์
3. เปรียบเทียบคุณภาพของภาพที่ได้กับภาพที่ได้จากระบบควบคุมและสร้างภาพแบบเดิม เช่น ความเปรียบเทียบ ความสามารถในการแจกแจงรายละเอียด เป็นต้น

1.4 ขั้นตอนและวิธีการในการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาค้นคว้าเอกสาร คู่มือเทคนิคและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. ออกแบบและพัฒนาระบบควบคุมการสแกนลำอเล็กตรอน และระบบรับสัญญาณอเล็กตรอนทุติยภูมิเพื่อสร้างภาพจากอเล็กตรอนทุติยภูมิ
3. เขียนโปรแกรมควบคุมการสแกนลำอเล็กตรอนและสร้างภาพบนจอมอนิเตอร์
4. เปรียบเทียบคุณภาพของภาพที่ได้กับภาพที่ได้จากระบบควบคุมและสร้างภาพแบบเดิม และปรับปรุงคุณภาพของภาพ
5. สรุปผลการวิจัยและเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้

ได้ระบบควบคุมลำอเล็กตรอนเพื่อการสร้างภาพจากอเล็กตรอนทุติยภูมิ สำหรับกล้องจุลทรรศน์อเล็กตรอนแบบสแกน ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับระบบสร้างภาพถ่ายจากอันตรกิริยาของรังสีอื่นๆได้

1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. สุกสิทธิ์ คะวีรัตน์ [1] ทำการวิจัยเรื่อง การพัฒนาระบบสแกนรังสีกระเจิงกลับเพื่อแสดงภาพสองมิติ โดยได้พัฒนาการใช้เทคนิคการกระเจิงกลับของรังสี ประกอบด้วย ระบบขับเคลื่อนควบคุมการทำงานด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ระบบวัดรังสี ระบบเก็บข้อมูลภาพขนาด 400x300 ความเปรียบต่าง 256 ระดับ และระบบแสดงผลทางจอโทรทัศน์ โดยสามารถส่งข้อมูลภาพเข้าไมโครคอมพิวเตอร์ ตามมาตรฐาน RS-232C สามารถแจกแจงความละเอียดของชิ้นงานได้ 2 มม.
2. Hiroyoshi Kazumori [2] ทำวิจัยเรื่อง New Secondary Electron Detection System Permit Observation of Non-Conductive Materials งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาวิธีวัดอิเล็กตรอนทุติยภูมิสำหรับ FE SEM รุ่น JSM-7400F ขึ้น 2 วิธี ได้แก่ R-Filter และ Gentle Beam โดยเพิ่ม Cylindrical Electrode ภายใน SEM Column เพื่อจ่ายศักดาไฟฟ้าและจ่ายไฟลบแก่ชิ้นงาน (เฉพาะวิธี Gentle Beam) ซึ่งส่งผลให้เกิดการเบี่ยงเบนของอิเล็กตรอนทุติยภูมิพลังงานต่ำไปชน Cylindrical Electrode จึงจัดผลของการ Charge up ใน Non-Conductive Materials ทำให้ได้ภาพที่มีความละเอียดดีขึ้น เมื่อใช้ Accelerating Voltage ต่ำลง โดยวิธี R-Filter จะให้รายละเอียดส่วนประกอบของพื้นผิวชิ้นงาน ในขณะที่ Gentle Beam ให้รายละเอียดของลักษณะพื้นผิว
3. M.Akahori และ H.Kawamoto [3] ทำวิจัยเรื่อง Secondary Electron Detection for Applying to Instrumental Scanning Electron Microscope โดยได้หาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิ และ ตำแหน่งของ Detector เทียบกับ Objective Lens (แบบ Large Hole) โดยวาง Detector ไว้บนและล่าง Objective Lens และปรับศักดาไฟฟ้าที่ Grid เหนือชิ้นงานจาก 0 ถึง -20 Volt พบว่าเมื่อปรับไฟลบมากขึ้น ปริมาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิจะต่ำลงจนคงที่ ณ -20 Volt
4. B.C. Breton [4] ทำวิจัยเรื่อง Scanning Electron Microscopy in the Next Millennium งานวิจัยนี้เป็นการคาดคะเนแนวโน้มของ SEM ในอนาคตว่ายังคงเป็นเครื่องมือที่จำเป็นต่อการพัฒนาวิทยาศาสตร์ขั้นสูง โดยจะเปลี่ยนรูปแบบเป็น Remote and Intelligence SEM สามารถทำงานอัตโนมัติ ผู้ใช้เพียงกำหนดชิ้นงาน ชนิดหัววัดสัญญาณ และกำลังขยายที่ต้องการ ส่วนประกอบใน SEM จะพัฒนาเพื่อให้ได้ Resolution และ S/N ที่ดีขึ้น และมีแนวโน้มจะนำ Voice control มาใช้กับ SEM

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 หลักการของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

2.1.1 กล้องจุลทรรศน์แบบแสงและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน [5]

โครงสร้างพื้นฐานของกล้องจุลทรรศน์แบบแสง และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน มีองค์ประกอบที่ทำให้เกิดการมองเห็นภาพคล้ายคลึงกัน สามารถเปรียบเทียบหน้าที่การทำงานของส่วนประกอบต่าง ๆ ได้ ดังตารางที่ 2.1 แต่ในเรื่องของกลไกการทำงานแล้ว กล้องจุลทรรศน์ทั้งสองชนิดแตกต่างกันอย่างมาก เนื่องจากแหล่งกำเนิดของสื่อกลางในการเกิดภาพของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงใช้หลอดไฟฟ้า ซึ่งให้ลำแสงผ่านระบบเลนส์แก้วในคอลัมน์ที่มีอากาศได้ การปรับเปลี่ยนกำลังขยายและความคมชัดต้องอาศัยระบบกลไกในการควบคุมทั้งหมด

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่างกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนและกล้องจุลทรรศน์แบบแสง [5]

คุณสมบัติ	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน	กล้องจุลทรรศน์แบบแสง
แหล่งกำเนิดแสง	ลำอิเล็กตรอน	ลำแสงสว่าง
ความยาวคลื่น	0.0859 \AA (20 kV) $\sim 0.0251 \text{ \AA}$ (200 kV)	7500 \AA (Visible) $\sim 20000 \text{ \AA}$ (ultraviolet)
ตัวกลาง	สุญญากาศ	บรรยากาศปกติ
เลนส์	เลนส์อิเล็กตรอน	เลนส์แก้ว
มุมอเพอเจอร์ (Aperture)	$\sim 35'$	$\sim 70^\circ$
ความสามารถในการแจกแจง	จุดต่อจุด 3.5 \AA	Visible 2000 \AA
กำลังขยาย	100x-450000x	10x-2000x
โฟกัส	ปรับได้ต่อเนื่อง, ใช้ระบบไฟฟ้า	ปรับระบบกล, เปลี่ยนเลนส์ทีละชุด
คอนทราสต์	การกระเจิง, การเลี้ยวเบนและเฟสของคลื่นอิเล็กตรอน	การดูดกลืนและการสะท้อนแสง

สำหรับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนจะต้องทำงานในคอลัมน์สุญญากาศ โดยอิเล็กตรอนจะถูกบังคับด้วยสนามไฟฟ้าศักดาสูง เพื่อเร่งให้อิเล็กตรอนมีพลังงานสูงและมีพฤติกรรมคล้ายคลื่นแสง การปรับเปลี่ยนกำลังขยายและโฟกัสอาศัยการปรับปริมาณไฟฟ้าในขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้าที่ออกแบบเฉพาะ เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กซึ่งทำหน้าที่

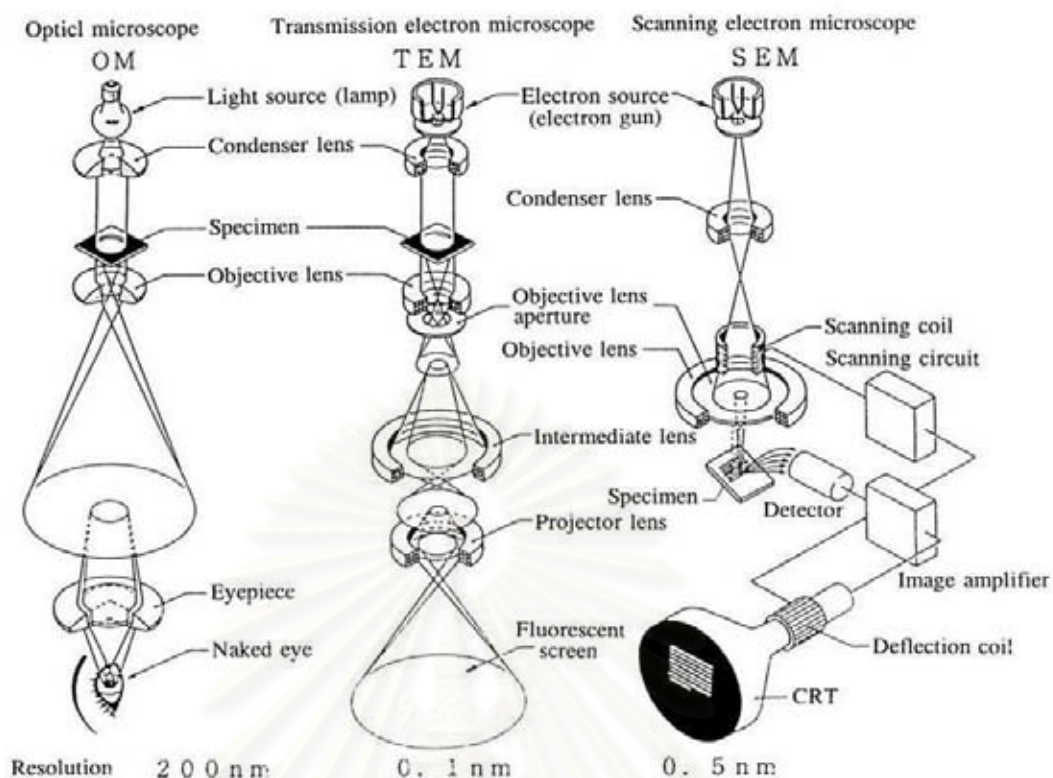
เสมือนเลนส์เรียกว่า “เลนส์อิเล็กตรอน” การมองเห็นภาพต้องอาศัยตัวกลางในการเปลี่ยนสัญญาณอิเล็กตรอนที่เกิดจากอันตรกิริยาในโครงสร้างไมโครของชิ้นตัวอย่างให้เป็นสัญญาณภาพ ด้วยเหตุนี้ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนจึงประกอบด้วยระบบต่าง ๆ มากมาย เช่น ระบบสุญญากาศ ระบบกำเนิดไฟฟ้าศักดาสูง ระบบควบคุมอิเล็กตรอนิกส์ ระบบเลนส์อิเล็กตรอน เป็นต้น จึงทำให้มีขนาดใหญ่กว่ากล้องจุลทรรศน์แบบแสง และมีการใช้งานยุ่งยากซับซ้อนกว่า

2.1.2 โครงสร้างของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน [5]

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ กล้องจุลทรรศน์ที่จัดระบบเลนส์แบบลำอิเล็กตรอนส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope: TEM) และกล้องจุลทรรศน์ที่จัดระบบเลนส์แบบลำอิเล็กตรอนสแกน (Scanning Electron Microscope: SEM) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนทั้งสองแบบจะมีโครงสร้างภายนอกคล้ายกัน ประกอบด้วยส่วนที่สำคัญ 5 ส่วน คือ

1. ระบบอิเล็กตรอนออปติก (Electron optics system)
2. ระบบสุญญากาศ (Vacuum system)
3. ระบบระบายความร้อน (Cooling system)
4. ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า (Power supply system)
5. ระบบสร้างภาพและบันทึกภาพ (Image translating and photo recording)

ระบบสุญญากาศทำหน้าที่สร้างสภาพสุญญากาศภายในคอลัมน์ ซึ่งเป็นที่บรรจุระบบอิเล็กตรอนออปติกให้ได้ระดับความดันสุญญากาศตั้งแต่ $10^{-5} - 10^{-8}$ torr ขึ้นกับขนาดศักดาไฟฟ้าสูงและชนิดฟิลาเมนต์ (Filament) ที่ใช้สำหรับกล้องนั้นๆ ก่อน จากนั้นระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าหลัก 2 ส่วน คือ แหล่งจ่ายศักดาไฟฟ้าสูงและแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าเพื่อสร้างเลนส์อิเล็กตรอนจึงทำงานได้ แหล่งจ่ายศักดาไฟฟ้าสูงทำหน้าที่สร้างสนามไฟฟ้าเร่ง ให้กับระบบอิเล็กตรอนออปติกเพื่อสร้างลำอิเล็กตรอนความเร็วสูงและแหล่งจ่ายไฟสำหรับฟิลาเมนต์ซึ่งใช้ในการสร้างอิเล็กตรอน ส่วนแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าจะควบคุมการทำงานของระบบเลนส์ในระบบอิเล็กตรอนออปติกเพื่อสร้างกำลังขยายภาพและปรับความคมชัดของภาพ ทั้งระบบสุญญากาศและแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าให้เลนส์อิเล็กตรอนจะมีการใช้กำลังไฟฟ้ามาก ทำให้เกิดความร้อนสูงจึงต้องมีระบบระบายความร้อนโดยการหล่อเย็นด้วยน้ำแบบวงจรปิด เพื่อรักษาอุณหภูมิของการทำงานให้อยู่ที่อุณหภูมิห้อง ภาพสัญญาณอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นในระบบอิเล็กตรอนออปติกต้องอาศัยระบบการสร้างภาพเพื่อให้สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า และสามารถบันทึกภาพหรือสัญญาณภาพในสื่อกลาง เช่น จอ CRT หรือ ฉากเรืองแสง ที่ต้องการได้



รูปที่ 2.1 แสดงส่วนประกอบเปรียบเทียบของกล้องจุลทรรศน์แบบแสง กล้องจุลทรรศน์แบบ TEM และกล้องจุลทรรศน์แบบ SEM [5]

จากรูปที่ 2.1 เมื่อพิจารณาระบบเลนส์อิเล็กตรอนและระบบสร้างภาพระหว่างกล้องจุลทรรศน์แบบ TEM และแบบ SEM จะแตกต่างกัน โดยกล้องจุลทรรศน์แบบ TEM ขึ้นตัวอย่างจะอยู่ที่เลนส์คอนเดนเซอร์ (Condenser lens) กำจัดขยายของภาพจะเกิดโดยระบบเลนส์ออฟเฟกตีฟ (Objective lens) เลนส์อินเตอร์มีเดียท (Intermediate lens) และฉายภาพขยายลงบนฉากเรืองแสง ในขณะที่กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ SEM ขึ้นตัวอย่างจะอยู่ที่เลนส์ออฟเฟกตีฟ ถ้าอิเล็กตรอนจะถูกโฟกัสลงบนผิวของชิ้นตัวอย่างด้วยเลนส์ออฟเฟกตีฟและถูกควบคุมให้เคลื่อนที่ตามบริเวณที่ต้องการศึกษา โครงสร้างด้วยระบบสแกน และสร้างสัญญาณภาพขยายอิเล็กตรอนบนจอภาพ การบันทึกภาพจะบันทึกจากจอภาพแคโทดเรย์ด้วยกล้องถ่ายภาพ

2.1.3 สัญญาณอิเล็กตรอนภายในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน [5]

ถ้าอิเล็กตรอนพลังงานสูงที่ตกกระทบชิ้นตัวอย่าง (อิเล็กตรอนปฐมภูมิ) จะทำอันตรกิริยากับโครงสร้างอะตอมในชิ้นตัวอย่าง ทำให้เกิดการปล่อยอนุภาคและคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ตาม

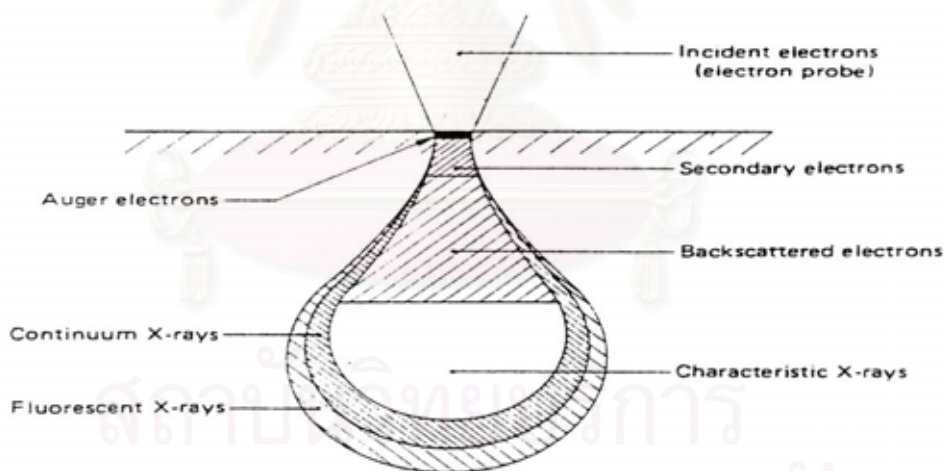
คุณสมบัติทางกายภาพของชั้นตัวอย่าง อนุภาคและคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมักนิยมเรียกว่า สัญญาณอิเล็กตรอน (Electron signal) มีรูปแบบต่าง ๆ ดังนี้

1. อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electrons) เกิดจากการชนแบบไม่ยืดหยุ่นระหว่างลำอิเล็กตรอน กับ อะตอมบริเวณพื้นผิวของชิ้นงาน และเกิดไอออไนเซชัน อิเล็กตรอนที่รับพลังงานเพิ่มขึ้นสูงกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของพื้นผิวชิ้นงาน (Work function) จะถูกปลดปล่อยออกมาในสุญญากาศ เกิดเป็นกระแสของอิเล็กตรอนทุติยภูมิ ปกติอิเล็กตรอนทุติยภูมิจะมีพลังงานต่ำ (< 50 eV) จึงสูญเสียพลังงานได้ง่าย
2. อิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Backscattered electrons) เกิดจากการชนแบบยืดหยุ่นระหว่างลำอิเล็กตรอนและอะตอมของชิ้นงาน เกิดการกระเจิงในชั้นของชิ้นงาน โดยสูญเสียพลังงานไปบางส่วนและสะท้อนกลับออกจากชิ้นงาน อิเล็กตรอนกระเจิงกลับจะมีระดับพลังงานตั้งแต่ระดับพลังงานของลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิไปจนถึงระดับพลังงานของอิเล็กตรอนทุติยภูมิ โดยปริมาณอิเล็กตรอนกระเจิงกลับจะสัมพันธ์กับเลขอะตอมของธาตุ กล่าวคือจะมีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อเลขอะตอมมีค่าสูงขึ้น
3. อิเล็กตรอนทะลุผ่าน (Transmitted electrons) เป็นส่วนของอิเล็กตรอนที่เหลือจากการดูดกลืนพลังงานของชั้นตัวอย่าง ปริมาณของอิเล็กตรอนนี้จะขึ้นกับความหนา ความหนาแน่นและภาคตัดขวางการดูดกลืนพลังงานของธาตุนั้นประกอบในชั้นตัวอย่าง
4. อิเล็กตรอนที่ถูกดูดกลืนในชั้นตัวอย่าง (Absorbed electrons) เป็นส่วนของอิเล็กตรอนที่สูญเสียพลังงานให้กับอะตอมในชั้นตัวอย่างหมด และพลังงานที่สูญเสียจะเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนซึ่งมีผลให้ตัวอย่างใหม่เกรียมได้
5. รังสีเอกซ์ (X-ray) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ปลดปล่อยออกมาหลังจากเกิดอันตรกิริยาระหว่างอะตอมบนชั้นตัวอย่างกับอิเล็กตรอนพลังงานสูง แบ่งเป็น 2 ชนิด
 - 5.1. รังสีเอกซ์ต่อเนื่อง (Continuums x-rays) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นกระจายในช่วงกว้าง (Broad spectrum) เกิดจากการที่อิเล็กตรอนพลังงานสูงเคลื่อนเข้าสู่สนามไฟฟ้าที่มีความหนาแน่นสูงระหว่างนิวเคลียสกับวงโคจรชั้นในของอะตอมทำให้อิเล็กตรอนพลังงานสูงสูญเสียพลังงานและปลดปล่อยพลังงานในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทันที
 - 5.2. รังสีเอกซ์เรืองเฉพาะธาตุ (Characteristic x-rays) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นเฉพาะอะตอมของธาตุที่ถูกกระตุ้น เกิดจากการที่อิเล็กตรอนพลังงานสูงชนกับอิเล็กตรอนในชั้นโคจร K, L หรือ M แล้วอิเล็กตรอนของชั้นโคจรใดโคจรหนึ่งหลุดออกมา อิเล็กตรอนชั้นถัดไปเข้ามาแทนที่และจะต้องลดพลังงานด้วยการปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาให้อิเล็กตรอนนี้มีระดับพลังงานเท่ากับอิเล็กตรอนชั้นที่เข้าแทนที่ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ปล่อยออกมาจะ

มีค่าเฉพาะตัวของธาตุนั้น ๆ สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณและคุณภาพได้

6. โอลิเจอร์อิเล็กตรอน (Auger electrons) เป็นอิเล็กตรอนที่หลุดจากวงโคจรจากการกระตุ้นของรังสีเอกซ์ที่เกิดจากชั้นตัวอย่าง ให้ประโยชน์มากในการวิเคราะห์ปริมาณธาตุเบาและการวิเคราะห์สารบนพื้นผิวชั้นตัวอย่าง
7. แสงเรืองจากชั้นตัวอย่าง (Cathodoluminescence) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นในช่วงที่ตามองเห็น เกิดจากอะตอมของชั้นตัวอย่างได้รับพลังงานจากลำอิเล็กตรอนและอิเล็กตรอนในวงโคจรชั้นนอกอยู่ในสถานะที่ถูกกระตุ้นและกลับเข้าสู่สถานะปกติ (Ground) พร้อมทั้งปล่อยพลังงานส่วนเกินในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า
8. แรงเคลื่อนไฟฟ้า (Electromotive force) เป็นปริมาณของไฟฟ้าที่เกิดจากความแตกต่างของประจุระหว่างด้านหน้าและด้านหลังของชั้นตัวอย่าง

สัญญาณอิเล็กตรอนแต่ละชนิดมีคุณสมบัติเฉพาะตัวที่ต่างกัน และเกิดจากชั้นความลึกของชั้นตัวอย่างต่างกันขึ้นอยู่กับพลังงานของลำอิเล็กตรอนซึ่งบังคับได้ด้วยศักดาไฟฟ้าเร่ง ถ้าศักดาไฟฟ้ายิ่งสูงอันตรกิริยาที่จะเกิดในความลึกมากขึ้น และถ้าเลขอะตอมของธาตุสูงขึ้น อันตรกิริยาที่จะเกิดบริเวณกว้างขึ้น



รูปที่ 2.2 แสดงชั้นความลึกของการเกิดสัญญาณอิเล็กตรอนชนิดต่าง ๆ [5]

การเปลี่ยนสัญญาณอิเล็กตรอนต่าง ๆ เป็นสัญญาณภาพที่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่าในระบบจุลทรรศน์อิเล็กตรอนมีอยู่ 2 วิธี คือ

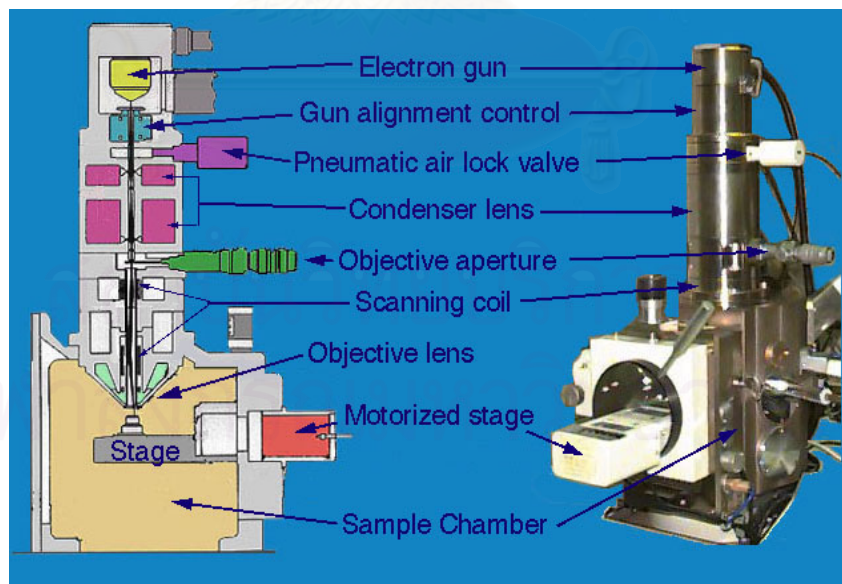
1. การเปลี่ยนสัญญาณอิเล็กตรอนเป็นสัญญาณภาพโดยอาศัยการเรืองแสงของสารเรืองแสง ประเภท ZnS โดยความสว่างของแสงจะขึ้นกับปริมาณความเข้มของคลื่นอิเล็กตรอนที่เกิดจากอันตรกิริยาของชิ้นตัวอย่าง วิธีนี้เหมาะกับการจัดระบบเลนส์แบบลำอิเล็กตรอนส่องผ่าน

2. การเปลี่ยนสัญญาณอิเล็กตรอนเป็นสัญญาณภาพโดยอาศัยหัววัดรังสี (Radiation detector) ที่เหมาะสมกับสัญญาณอิเล็กตรอนนั้น ๆ แปลงสัญญาณอิเล็กตรอนเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า และนำไปเข้าจังหวะ (Modulate) กับสัญญาณควบคุมการสแกนของลำอิเล็กตรอนเกิดเป็นสัญญาณภาพขยายของชิ้นตัวอย่างที่มีความสว่างแต่ละจุดของภาพ ตามปริมาณสัญญาณอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นแต่ละจุดบนชิ้นตัวอย่าง วิธีนี้เหมาะกับการจัดระบบเลนส์แบบลำอิเล็กตรอนสแกน

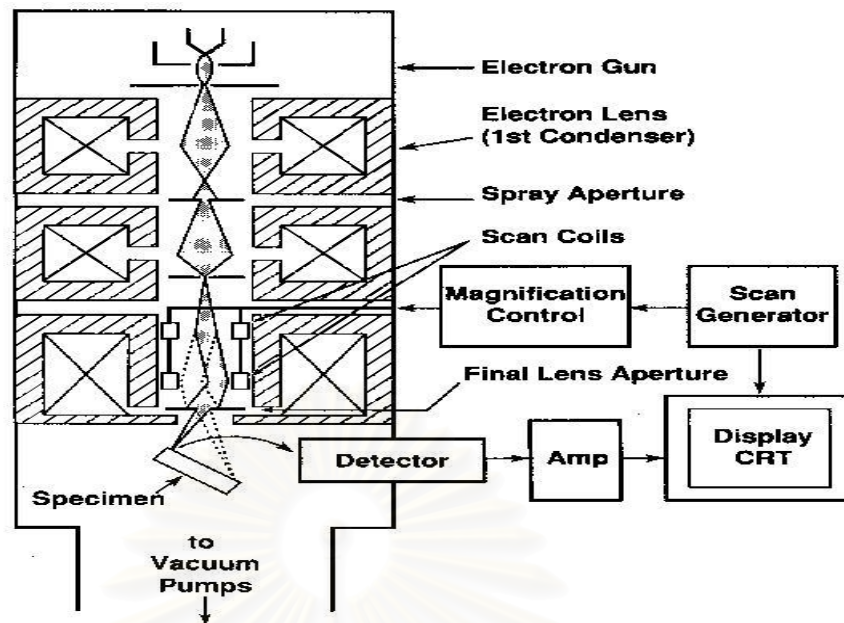
2.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน

2.2.1 โครงสร้างและการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนมีโครงสร้างที่ประกอบด้วยระบบสุญญากาศ ระบบระบายความร้อน และระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า ลักษณะเดียวกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน ส่วนระบบอิเล็กตรอนออปติกและระบบสร้างภาพและบันทึกภาพ จะมีเทคนิคและการทำงานแตกต่างไปดังแสดงในรูปที่ 2.3 และ 2.4



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน [6]

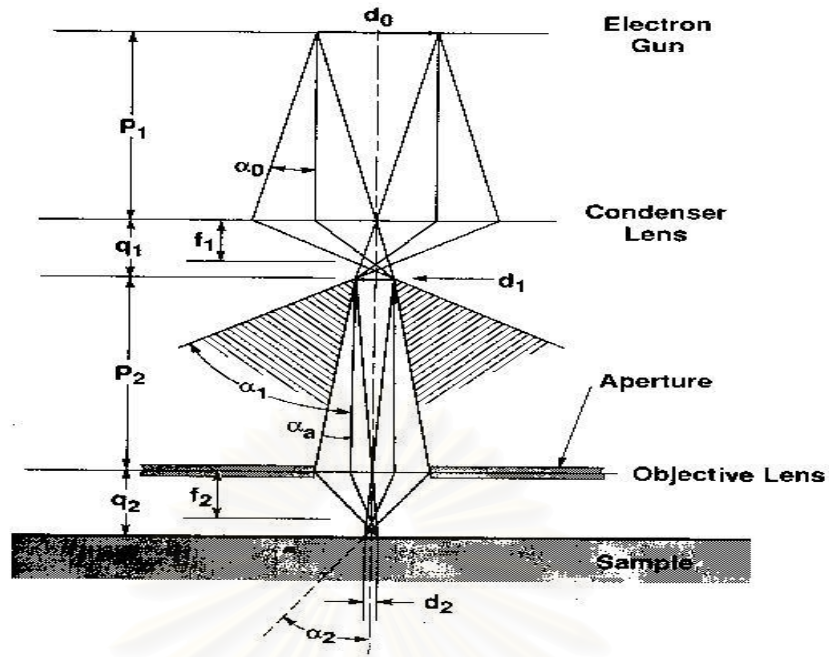


รูปที่ 2.4 ระบบอิเล็กตรอนออปติกและระบบสร้างภาพและบันทึกภาพของ SEM [7]

เมื่อลำอิเล็กตรอนจากแคโทดเคลื่อนที่ผ่านเลนส์อิเล็กตรอน ได้รับการสแกนด้วยขดลวดสแกนให้เบี่ยงเบนบริเวณพื้นที่ควบคุมบนชิ้นงาน จะก่อให้เกิดสัญญาณอิเล็กตรอนจากอันตรกิริยาของลำอิเล็กตรอน และถูกวัดด้วยหัววัดสัญญาณอิเล็กตรอนและแปลงเป็นสัญญาณภาพที่มีการเข้าจังหวะกับการสแกนของลำอิเล็กตรอนในหลอดแคโทดเรย์ ทำให้เกิดการแสดงผลภาพของพื้นผิวชิ้นงานบนจอแคโทดเรย์

2.2.2 ระบบอิเล็กตรอนออปติก

ระบบอิเล็กตรอนออปติกของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนประกอบด้วยปืนอิเล็กตรอนและชุดเลนส์อิเล็กตรอนทำงานในระบบสุญญากาศ ปืนอิเล็กตรอนทำหน้าที่สร้างลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิและเร่งให้มีพลังงาน 1-40 keV ลำอิเล็กตรอนที่สร้างขึ้นจะถูกควบคุมให้มีวิถีการเคลื่อนที่เสมือนการรวมแสงด้วยเลนส์อิเล็กตรอน เพื่อลดขนาดลำอิเล็กตรอนและโฟกัสลงบนชิ้นงาน สร้างภาพที่มีความละเอียดสูง ดังแสดงในรูปที่ 2.5

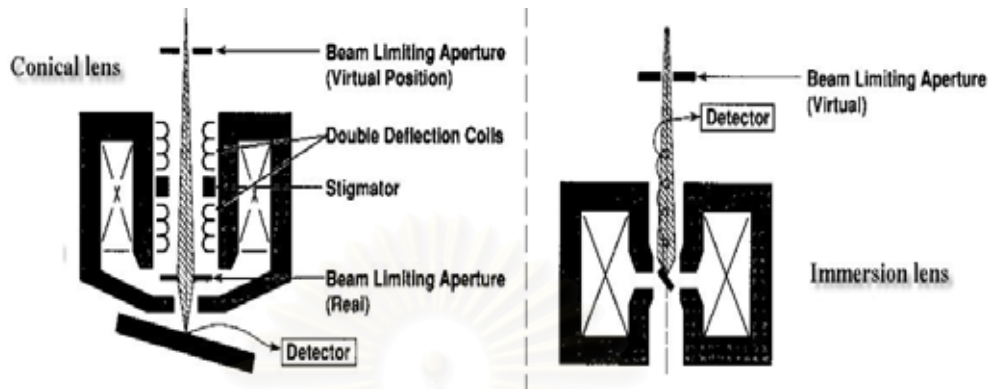


รูปที่ 2.5 ภาพฉายแนวเคลื่อนตัวของลำอิเล็กตรอนในระบบอิเล็กตรอนออปติก [7]

ชุดเลนส์อิเล็กตรอนของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนจะประกอบด้วย เลนส์คอนเดนเซอร์และเลนส์ออฟเฟคทีฟ ซึ่งมีโครงสร้างเป็นขดลวดและแกนเหล็กอ่อน สำหรับสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เลนส์คอนเดนเซอร์ทำหน้าที่ควบคุมขนาดและความเข้มของลำอิเล็กตรอนบนชิ้นงาน การปรับค่ากระแสที่จ่ายให้กับเลนส์คอนเดนเซอร์เป็นการปรับขนาดของปลายลำอิเล็กตรอน (Spot size) บนชิ้นงาน ส่วนเลนส์ออฟเฟคทีฟจะทำหน้าที่โฟกัสลำอิเล็กตรอนลงบนชิ้นงาน โดยการปรับเปลี่ยนจุด Cross over ไปตามแนวแกน Z ของคอลัมน์ ด้วยการปรับกระแสที่จ่ายเข้าเลนส์ออฟเฟคทีฟ เลนส์ออฟเฟคทีฟจะเป็นเลนส์ที่มีความเข้มสนามแม่เหล็กสูงสุด (Strongest Lens) เนื่องจากใช้ควบคุมลำอิเล็กตรอนที่มีความเร็วสูง นอกจากนี้ภายในจะบรรจุขดลวดสแกน ซึ่งทำหน้าที่เบี่ยงเบนลำอิเล็กตรอน และขดลวดปรับแก้ความบิดเบี้ยวของภาพ (Stigmator) พร้อมอเพอเจอร์ (Aperture) รูปแบบของเลนส์ออฟเฟคทีฟแบ่งได้ 2 ประเภท ได้แก่ Conical lens หรือ Asymmetrical pinhole lens และ Immersion lens

- ก. Conical lens จะมี Aperture ภายในเลนส์ออฟเฟคทีฟ หัววัดสัญญาณจะวางไว้ใต้เลนส์ออฟเฟคทีฟ อิเล็กตรอนทุติยภูมิจะไม่ถูกเบี่ยงเบนด้วยสนามแม่เหล็ก ชิ้นงานจะวางภายนอกเลนส์ทำให้สามารถใช้กับชิ้นงานใหญ่ได้ และสามารถปรับ Working distance ได้กว้างโดยที่ Depth of field ยังดีอยู่
- ข. Immersion lens ชิ้นงานจะวางไว้ใน Lens gap หัววัดสัญญาณจะวางไว้เหนือออฟเฟคทีฟเลนส์ สัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่วัดได้จะไม่มีอิเล็กตรอนกระเจิงกลับปนมามา

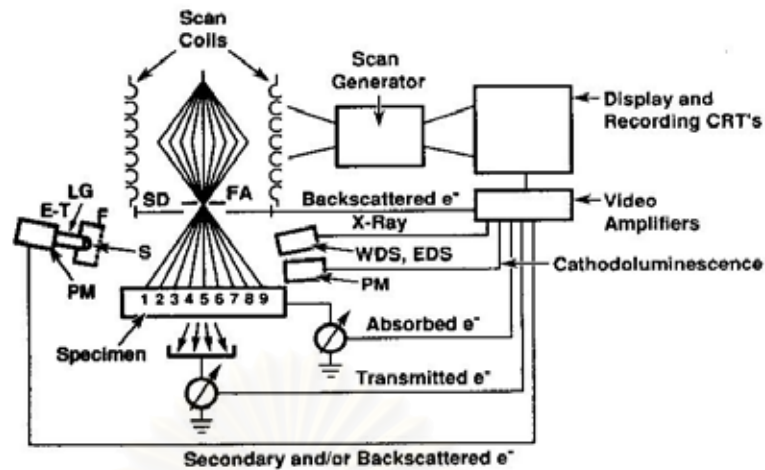
เนื่องจากถูกสนามแม่เหล็กเบี่ยงเบนให้ชนกับผนังเลนส์ ส่วน Aperture จะอยู่นอกเลนส์ เลนส์ออฟเฟคทีฟชนิดนี้จะให้ Resolution ที่ดี และมี Lens aberration ต่ำ



รูปที่ 2.6 เลนส์ออฟเฟคทีฟแบบ Conical lens และแบบ Immersion lens [7]

2.2.3 ระบบแสดงภาพของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน

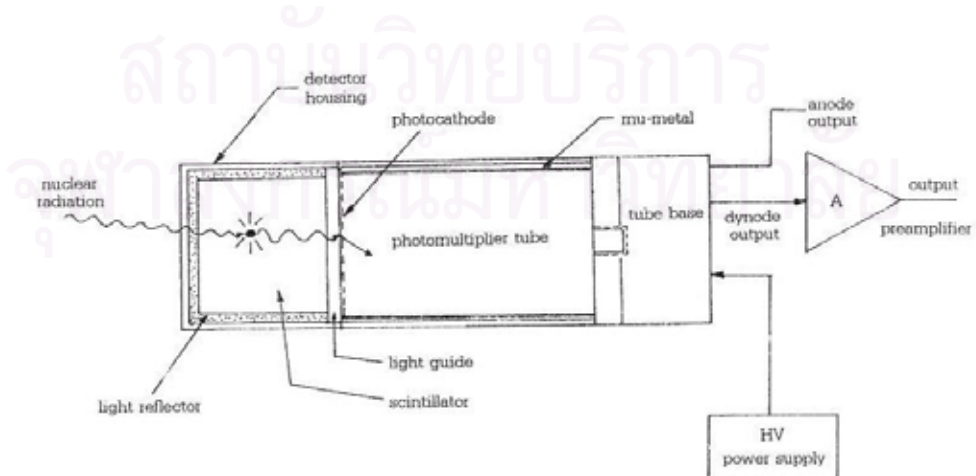
ระบบแสดงภาพของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนประกอบด้วยหัววัดสัญญาณอิเล็กตรอน ตัวกำเนิดสัญญาณสแกน (Scan generator) และส่วนแสดงภาพบนจอแคโทดเรย์ ดังแสดงในรูปที่ 2.7 เมื่อลำอิเล็กตรอนถูกโฟกัสลงบนชิ้นงานจะเกิดอันตรกิริยากับชิ้นงานเป็นสัญญาณอิเล็กตรอนต่างๆ ซึ่งสามารถวัดด้วยหัววัดสัญญาณอิเล็กตรอนที่เหมาะสม และสัญญาณอิเล็กตรอนที่มีปริมาณสอดคล้องกับคุณลักษณะของชิ้นงาน เช่น ลักษณะพื้นผิว ชาติของประกอบ จุดตกกระทบของปลายลำอิเล็กตรอนบนชิ้นงาน จะถูกแปลงเป็นสัญญาณจุดภาพ การจะเห็นภาพคุณลักษณะผิวชิ้นงานและนำมาสร้างเป็นภาพ จะต้องควบคุมการเบี่ยงเบนลำอิเล็กตรอนด้วยขดลวดสแกน ซึ่งถูกควบคุมด้วยตัวกำเนิดสัญญาณ เบี่ยงเบนตามขนาดพื้นที่ควบคุม และเข้าจังหวะกับขดลวดสแกนของหลอดแคโทดเรย์ ทำให้ปรากฏเป็นสัญญาณภาพบนจอแคโทดเรย์ ในปัจจุบันมีการแปลงสัญญาณภาพบนจอแคโทดเรย์ เป็นสัญญาณดิจิทัล ที่มีความละเอียดตั้งแต่ 8 บิต ถึง 16 บิต ขึ้นอยู่กับความละเอียดของระดับสัญญาณ ความเปรียบต่าง (Grey scale) ที่ต้องการ เก็บลงในหน่วยความจำ และแสดงผลทางจอมอนิเตอร์ ข้อมูลภาพที่ได้สามารถนำมาประมวลผลและวิเคราะห์ได้ภายหลัง



รูปที่ 2.7 ระบบแสดงภาพของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน [7]

2.3 การวัดสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิ

การวัดสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิอาศัยกระบวนการวัดรังสี ซึ่งใช้โครงสร้างของหัววัดรังสีชนิดซินทิลเลชัน (Scintillation detector) [8] หัววัดรังสีชนิดซินทิลเลชันเป็นหัววัดรังสีที่มีกระบวนการวัดรังสีทางอ้อม มีโครงสร้างที่ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน คือ ส่วนที่รับอันตรกิริยาและเกิดประกายแสง (Scintillator) ต่อเชื่อมกับส่วนที่ทำหน้าที่เปลี่ยนประกายแสงเป็นสัญญาณอิเล็กตรอนและทวีปริมาณอิเล็กตรอน (Photomultiplier tube) ซึ่งห่อหุ้มด้วยแผ่นกั้นสนามแม่เหล็ก (Mu-metal) เพื่อป้องกันการรบกวนของสนามแม่เหล็กจากภายนอก ซึ่งจะทำให้กลุ่มโฟโตอิเล็กตรอนเบี่ยงเบนจากบริเวณไดโนด (Dynode) เป็นการสูญเสียสัญญาณที่วัด หรือเกิดเป็นสัญญาณรบกวน (Noise) ขึ้นกับระบบ โดยโครงสร้างการทำงานแสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แสดงส่วนประกอบของหัววัดรังสีชนิดซินทิลเลชัน [8]

สำหรับขั้นตอนการทำงานของหัววัดรังสีชนิดซินทิลเลชัน สามารถสรุปเป็นข้อๆ ได้ดังนี้

1. เมื่ออนุภาคอิเล็กตรอนตกกระทบซินทิลเลเตอร์ จะเกิดการถ่ายโอนพลังงานในภาวะการดูดกลืนพลังงาน (Absorption) และซินทิลเลเตอร์จะคายพลังงานจากการลดระดับพลังงานด้วยการเปล่งประกายแสงออกมา (Emission) เรียกว่า การเรืองแสง (Fluorescence)

2. แสงที่เกิดขึ้นจะสะท้อนกลับโดยตัวสะท้อน (Reflector) และส่วนหนึ่งจะตรงไปยังตัวนำแสง (Light guide) ผ่านไปยังโฟโตแคโทด (Photocathode) ภายในหลอดทวีคูณอิเล็กตรอน

3. โฟโตอิเล็กตรอน (Photoelectrons) จะถูกปลดปล่อยจากโฟโตแคโทดตรงไปยังไดโนด และถูกทวีคูณด้วยส่วนทวีคูณอิเล็กตรอน (Electron multiplier)

4. ปริมาณอิเล็กตรอนที่ถูกรวบรวมบนแอโนดจะสร้างพัลส์ของกระแสขึ้นที่อินพุทของภาคขยายสัญญาณส่วนหน้า (Preamplifier)

ปริมาณประจุ Q ที่ปรากฏบนแอโนดหรือไดโนดตัวสุดท้ายของหลอดทวีคูณอิเล็กตรอนจะเป็นสัดส่วนกับพลังงานของอนุภาคนิวเคลียร์ เนื่องจากความเข้มของประกายแสงแต่ละครั้งขึ้นกับพลังงานที่ถ่ายโอนให้ซินทิลเลเตอร์ ดังนั้นถ้าให้ n_c เป็นจำนวนโฟโตอิเล็กตรอนที่ปล่อยจากโฟโตแคโทด และ M เป็นค่าทวีคูณอิเล็กตรอนของหลอดทวีคูณอิเล็กตรอน ในการวัดรังสีแต่ละครั้ง Q จะมีค่าเท่ากับ

$$Q = M q_e n_c \quad (2.1)$$

q_e = ประจุของอิเล็กตรอน

n_c = จำนวนโฟโตอิเล็กตรอน

สารที่ใช้เป็นซินทิลเลเตอร์ที่ดีในงานวัดรังสีทั่วไป จะต้องมีความสมบัติดังนี้

1. มีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานของอนุภาคนิวเคลียร์เป็นประกายแสงได้สูง
2. ประกายแสงที่เกิดจากกระบวนการซินทิลเลชันจะต้องเป็นสัดส่วนกับพลังงาน
3. ความยาวคลื่นของประกายแสงจะต้องเหมาะสมกับความไวของหลอดทวีคูณอิเล็กตรอน
4. จะต้องยอมให้ประกายแสงที่ความยาวคลื่นของตัวเองผ่านได้ดี
5. มีเวลาในการสลายประกายแสง (Decay time) สั้น เพื่อกำเนิดพัลส์ได้รวดเร็ว
6. จะต้องเป็นวัสดุที่ขึ้นรูปได้ง่ายและไม่ลดคุณสมบัติของการนำแสง
7. มีดัชนีหักเหของแสงใกล้เคียงกับแก้ว (~ 1.5) เพื่อการส่งผ่านแสงได้ดี

2.3.1 สารเรืองรังสีที่ใช้ในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน [9]

สารเรืองรังสีที่ใช้กับหัววัดสัญญาณอิเล็กตรอนในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนมี
3 ชนิด ได้แก่

1. P47 Powder scintillator
2. YAG Single crystal scintillator
3. YAP Single crystal scintillator

P47 Powder scintillator (Y_2SiO_5 activated Ce^{3+}) เป็นซินทิลเลเตอร์ที่นิยมใช้ทั่วไป ประกอบด้วย ผง P47 Phosphor เคลือบบาง 5-10 μm บนฐานแก้ว (Glass substrate) ยึดเกาะด้วย โพลีเมอร์ไบเดอร์ (Polymeric binder) แสงที่ปลดปล่อยอยู่ในช่วง 400 nm แสงที่เกิดจาก P47 จะสะท้อนภายใน Particle หลายครั้งก่อนออกจาก Particle ทำให้ปริมาณแสงเพิ่มขึ้น ความไวของ P47 จะขึ้นกับขนาดของ Particle

YAG (Yttrium Aluminum Garnet: $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ activated Ce^{3+}) และ YAP (Yttrium Aluminum Perovskite: YAIO_3 activated Ce^{3+}) มีโครงสร้างเป็นผลึกเดี่ยว ทนทานต่อรังสีและทน อุณหภูมิดีกว่า P47 มีลักษณะเป็นแผ่นวงกลมหนา 0.5-1 mm ด้านหนึ่งจะขัดและเคลือบด้วย อลูมิเนียม อีกด้านไม่ขัด (Matt ground) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งผ่านแสงไปยังท่อนำแสง แสงเรืองที่ปลดปล่อยอยู่ในย่านสเปกตรัมแสง (Emission spectrum) แคบๆจึงช่วยลด Chromatic aberration สำหรับ YAG จะปลดปล่อยแสงที่มีความยาวคลื่นตำแหน่งฟิค 560 nm ซึ่งทำให้ต้อง เปลี่ยน PMT จากชนิดโฟโตแคโทดแบบ S11 (SbCs) ซึ่งใช้ทั่วไปใน SEM เป็นชนิดโฟโตแคโทด แบบ S20 (Na-K-Sb-Cs) ส่วน YAP จะปลดปล่อยแสงที่มีความยาวคลื่นตำแหน่งฟิค 378 nm ดังตารางเปรียบเทียบที่ 2.2

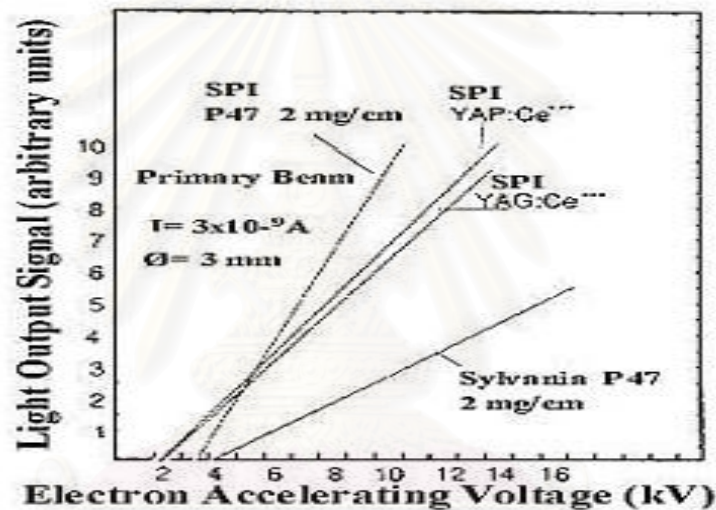


รูปที่ 2.9 ซินทิลเลเตอร์ที่ใช้ใน SEM [9]

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของ P47, YAG และ YAP [9]

Property	P47	YAG	YAP
Max. Output at (nm)	400	560	378
Decay time (ns)	80	70	25
Index of refraction	-	1.82	1.95
Crystal structure	-	Cubic	Rhombic
Baked out Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	400	1970 (uncoated Al) ¹	1875 (uncoated Al) ¹

Note 1: ที่อุณหภูมิมากกว่า 100°C ในบรรยากาศปกติ อลูมิเนียมจะเริ่มออกซิไดซ์ (Oxidized)



รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแสงและศักดาไฟฟ้าเร่งที่ขั้วสนามไฟฟ้าจุดอิเล็กตรอนของ P47, YAG และ YAP [9]

2.3.2 หลอดทวีคูณอิเล็กตรอน (Photomultiplier tube: PMT) [8]

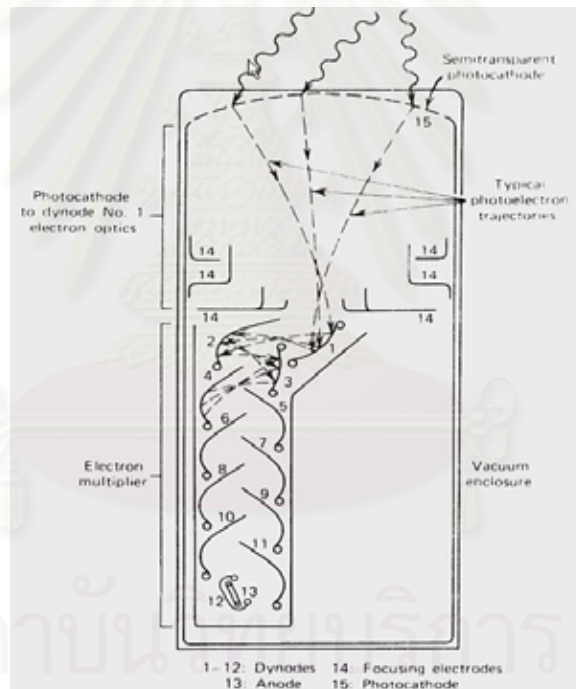
หลอดทวีคูณอิเล็กตรอน (Photomultiplier tube: PMT) ทำหน้าที่เปลี่ยนประกายแสงให้เป็นอิเล็กตรอน และขยายปริมาณอิเล็กตรอนให้สูงพอจะสร้างสัญญาณพัลส์ PMT ที่ใช้กับหัววัดรังสีซินทิลเลชัน จะเป็นแบบแสงเข้าทางด้านปลายของหลอด (End-on type) มีโครงสร้างดังรูปที่ 2.11 มีส่วนประกอบที่สำคัญได้แก่

1. โฟโตแคโทดแบบกึ่งแสงผ่าน (Semitransparent photocathode) เป็นสารไวแสงประเภทไบอัลคาไล (Bialkali) ได้แก่ Sb-Rb-Cs และ Sb-K-Cs เป็นต้น เมื่อแสงตกกระทบสารไวแสงจะปลดปล่อยอิเล็กตรอน (Photoelectron)

2. โฟกัส (Focusing electrode) เป็นแผ่นขั้วไฟฟ้าที่ทำหน้าที่สร้างเลนส์ไฟฟ้าสถิตควบคุมลำอิเล็กตรอนให้รวมกันสู่ไดโนดตัวแรก (1st dynode)

3. ไดโนด (Dynode) เป็นแผ่นขั้วไฟฟ้าเคลือบสารที่ไวต่อการเกิดเชกกันดารีอิมิตชัน (Secondary emission) จัดเรียงทำมุมกันทำให้เกิดการทวีปริมาณอิเล็กตรอน วัสดุที่ใช้ทำไดโนด ได้แก่ Cs₃Sb, AgMg, CuBe เป็นต้น

4. แอโนด (Anode) เป็นแผ่นขั้วไฟฟ้ารวมประจุอิเล็กตรอนจากการทวีปริมาณของชุดไดโนด (Dynode chain) เพื่อสร้างสัญญาณพัลส์ โดยชุดแผ่นขั้วไฟฟ้าไดโนดและแอโนดนี้รวมเรียกว่า "ส่วนทวีปริมาณอิเล็กตรอน (Electron multiplier) "



รูปที่ 2.11 แสดงส่วนประกอบของหลอดทวีคูณอิเล็กตรอน [10]

ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนประกายแสงที่ตกกระทบแคโทด จะเปลี่ยนแปลงตามความยาวคลื่นของแสงที่ปลดปล่อยจากผลึกซินทิลเลเตอร์ที่ใช้ ในการเลือก PMT จึงต้องคำนึงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความไวแสงของแคโทดและความยาวคลื่นแสง (Spectral response characteristic) ให้สอดคล้องกับประกายแสงของผลึกตัวรังสี

หลอด PMT ที่ใช้กับซินทิลเลเตอร์ จะมีขนาดและรูปร่างแตกต่างกันไป สามารถเลือกให้เหมาะสมกับขนาดของผลึกซินทิลเลเตอร์ สิ่งสำคัญของการใช้งานคืออัตราขยาย (Gain) ซึ่งขึ้นกับศักดาไฟฟ้าสูงและจำนวนไดโนด ดังสมการ

$$G = kV^{\alpha n} \quad (2.2)$$

k = ค่าคงที่ขึ้นกับชนิดของ PMT

V = ศักดาไฟฟ้าระหว่างไดโนดแต่ละชุด

α = สัมประสิทธิ์การทวีปริมาณอิเล็กตรอนของวัสดุที่ทำไดโนด

n = จำนวนไดโนด

หลอดทิว์คูณอิเล็กตรอนที่ได้รับการไบอัสขณะที่ยังไม่ได้รับแสง (อยู่ในความมืด) จะมีกระแสแอมป์เกิดขึ้นเล็กน้อยเสมอ เรียกว่า Dark current ซึ่งมีผลกระทบต่อขีดจำกัดต่ำสุดในการวัดปริมาณแสง (Lower limit of light detection) Dark current จะสูงเมื่ออยู่ในอุณหภูมิสูง การทำให้ PMT เย็นลงจะลด Dark current ได้

เนื่องจากปริมาณแสงที่ PMT ได้รับมีผลต่อสัญญาณพัลส์โดยตรง ดังนั้นปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณแสงที่ไปถึง PMT จึงเป็นสิ่งสำคัญในการสร้างสัญญาณภาพในระบบสร้างภาพของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน องค์ประกอบที่สำคัญในการนำปริมาณแสงจากซินทิลเลเตอร์มายังผิวหน้าของหลอด PMT ได้แก่

1. ความสม่ำเสมอของการรวบรวมแสง (Uniformity of light collection)
2. ตัวนำแสง (Light guide)

2.3.2.1 ความสม่ำเสมอของการรวบรวมแสง [10]

ในหัววัดซินทิลเลชันทั่วไป ย่อมต้องการให้แสงที่เกิดในซินทิลเลเตอร์ได้รับการรวบรวมมากที่สุด แต่ในทางปฏิบัติมีสาเหตุ 2 ประการ ที่ทำให้แสงถูกรวบรวมได้น้อยลง ได้แก่

1. การดูดกลืนปริมาณแสงของตัวซินทิลเลเตอร์เอง (Self absorption)
2. การสูญเสียบริเวณผิวของซินทิลเลเตอร์ (Losses at surface)

สำหรับซินทิลเลเตอร์โดยทั่วไป (ยกเว้นซินทิลเลเตอร์ขนาดใหญ่หลายเซนติเมตร หรือ ZnS) จะเกิดการสูญเสียแสงบริเวณผิวซินทิลเลเตอร์และตัวบรรจุเป็นหลัก ซึ่งการสูญเสียดังกล่าวมีผลต่อความไวและความสามารถในการแจกแจงพลังงานของซินทิลเลเตอร์ดังนี้

1. จำนวนโฟตอนที่รวบรวมได้จะน้อยลงส่งผลให้ค่าทางสถิติไม่ดี (Statistical broadening worse)

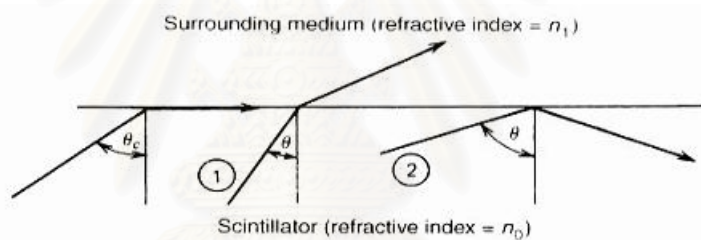
- การสูญเสียของโฟตอนในตัวซินทิลเลเตอร์ ทำให้รังสีพลังงานเดียวกันแต่ตกกระทบที่ตำแหน่งต่างกัน มีขนาดสัญญาณพัลส์ต่างกัน (Nonuniformity of light collection) แต่สำหรับซินทิลเลเตอร์ขนาดเล็ก ไม่มีผลเป็นนัยสำคัญต่อการแจกแจงพลังงานโดยรวม

แม้ว่าการปลดปล่อยแสงภายในซินทิลเลเตอร์จะเป็นแบบทิศทางรอบตัว แต่แสงที่จะเดินทางพุ่งตรงไปถึง PMT จะมีแค่บางส่วนเท่านั้น ในขณะที่แสงที่เหลือจะตกกระทบที่ผิวภายในของซินทิลเลเตอร์ และเกิดปรากฏการณ์ 2 ลักษณะ ขึ้นกับมุมตกกระทบที่ผิวของซินทิลเลเตอร์ ตามสมการการสะท้อนของ Fresnel [10]

$$\text{Critical Angle} = \sin^{-1} \frac{n_1}{n_0} \quad (2.3)$$

n_1 = ดัชนีหักเหของสิ่งแวดลอมรอบซินทิลเลเตอร์

n_0 = ดัชนีหักเหของซินทิลเลเตอร์



รูปที่ 2.12 ขนาดมุมตกกระทบและมุมวิกฤต [10]

จากรูปที่ 2.12 ถ้ามุมตกกระทบมากกว่ามุมวิกฤต จะเกิดการสะท้อนกลับภายในเนื้อของซินทิลเลเตอร์ แต่ถ้ามุมตกกระทบน้อยกว่ามุมวิกฤต แสงจะส่งผ่านออกจากซินทิลเลเตอร์ ในการที่จะรวบรวมแสงที่ออกจากซินทิลเลเตอร์ จะต้องหุ้มซินทิลเลเตอร์ด้วยวัสดุสะท้อนในทุกด้าน ยกเว้นด้านที่ต่อกับ PMT วัสดุสะท้อนอาจเป็น Specular reflector หรือ Diffuse reflector แผ่นโลหะขัดมันจะเป็น Specular reflector โดยมุมสะท้อนเท่ากับมุมตกกระทบ แต่การใช้ Diffuse reflector เช่น แมกนีเซียมออกไซด์ หรือ อลูมิเนียมออกไซด์ จะได้ผลดีกว่า

สำหรับวิธีการลดการสูญเสียของแสงที่รอยต่อมีดังนี้

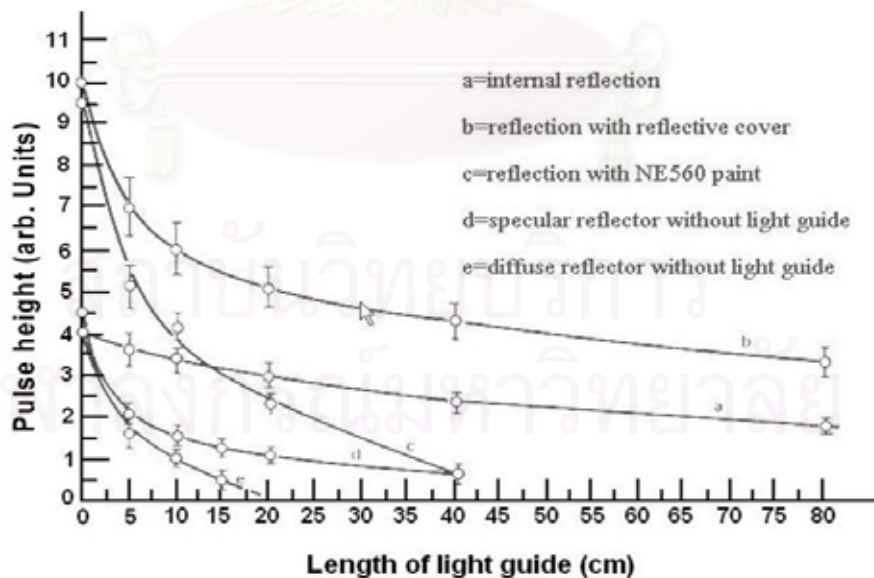
- ใช้ซินทิลเลเตอร์ที่มีดัชนีหักเหใกล้เคียงกับหน้าต่างของ PMT (ประมาณ 1.5)
- ใช้ Coupling fluid ที่มีดัชนีหักเหใกล้เคียงกัน ก่อนประกอบซินทิลเลเตอร์กับ PMT โดย Coupling fluid ที่นิยมใช้กันมี 2 ชนิดได้แก่ ซิลิโคนออยล์ ซึ่งใช้กับ

- งานทั่วไป และ Transparent epoxy cement ใช้กับงานที่มีการสั่นสะเทือนหรือ มีอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงอย่างรุนแรง (Severe vibration or temperature cycling)
3. การประกอบซินทิลเลเตอร์กับ PMT ต้องมีการห่อหุ้มด้วยวัสดุทึบแสง เพื่อป้องกันแสงรบกวนจากภายนอก

2.3.2.2 ตัวนำแสง (Light guide) [10]

ในทางปฏิบัติซินทิลเลเตอร์กับ PMT อาจไม่สามารถประกอบกันโดยตรง เนื่องจากสาเหตุหลายประการ เช่น

1. รูปร่างและขนาดระหว่างซินทิลเลเตอร์และ PMT ไม่เหมาะสมกัน
2. ความจำเป็นในการเพิ่มระยะทางระหว่างซินทิลเลเตอร์และ PMT อาจเนื่องจากสภาพแวดล้อมที่วัดไม่เหมาะสมสำหรับ PMT เช่น มีสนามแม่เหล็กและความร้อนสูง เป็นต้น
3. สำหรับซินทิลเลเตอร์ที่บางจะไม่ตรงกับ PMT เพื่อหลีกเลี่ยงความแปรปรวนของระดับสัญญาณพัลส์ เนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของโฟโตแคโทด ตัวนำแสงจะทำหน้าที่กระจายแสง (Diffusion) ให้ตกทั่วโฟโตแคโทด เพื่อเฉลี่ยให้แสงตกกระทบบสม่ำเสมอ



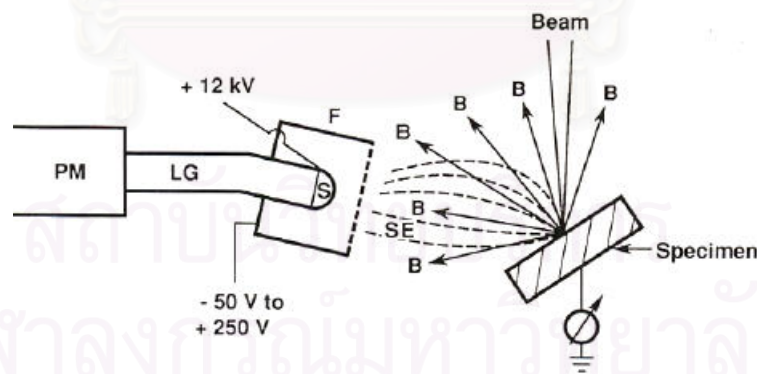
รูปที่ 2.13 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงพัลส์และความยาวของตัวนำแสงชนิด Lucite โดยใช้วัสดุสะท้อนต่างๆ [10]

ตัวนำแสงทำจากวัสดุโปร่งแสงที่มีดัชนีหักเหสูง เพื่อให้มุมวิกฤต (θ_c) มีขนาดเล็ก ผิวของตัวนำแสงจะถูกขัดและหุ้มด้วยตัวสะท้อน Lucite ซึ่งมีดัชนีหักเห 1.49 -1.51 จะนิยมนำมาทำตัวนำแสงเนื่องจากขึ้นรูปเป็นรูปร่างต่างๆ ได้ง่าย

2.4 หัววัดสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์แบบ Everhart-Thornley (E-T) [7]

2.4.1 การทำงานของหัววัดสัญญาณแบบ E-T

เนื่องจากอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่เกิดจากอันตรกิริยาของลำอิเล็กตรอนและผิวหน้าของชิ้นตัวอย่างมีพลังงานต่ำ และเคลื่อนตัวออกจากผิวหน้าชิ้นตัวอย่างด้วยพลังงานจลน์น้อยกว่า 50 eV โดยส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 3-5eV จึงไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ในระยะไกล อิเล็กตรอนทุติยภูมิที่เกิดขึ้นจึงอยู่ใกล้พื้นผิวเท่านั้น การที่จะวัดปริมาณสัญญาณอิเล็กตรอนที่ได้ จึงต้องเพิ่มพลังงานของอิเล็กตรอนให้มีพลังงานสูงขึ้นเพียงพอที่จะทำอันตรกิริยากับสารซินทิลเลเตอร์ จึงได้มีการออกแบบหัววัดสัญญาณอิเล็กตรอนแบบ Everhart-Thornley ขึ้นตั้งแต่ปี 1960 หัววัดสัญญาณอิเล็กตรอนแบบ E-T เป็นหัววัดรังสีที่มีโครงสร้างเป็นหัววัดซินทิลเลชัน ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนรับอันตรกิริยาและเกิดประกายแสง (Scintillator) ต่อเชื่อมหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ (PMT) ด้วยตัวนำแสง (Light Guide) และขั้วสนามไฟฟ้าในการดึงอิเล็กตรอนทุติยภูมิ ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 แสดงส่วนประกอบของหัววัดสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิแบบ Everhart-Thornley [7]

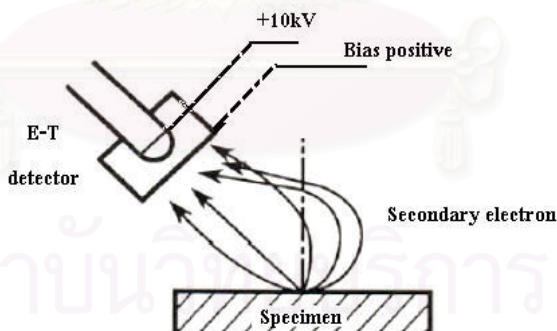
ส่วนรับอันตรกิริยาและเกิดประกายแสง (Scintillator) จะประกอบด้วยแผ่นแก้วหรือพลาสติกใส มีดัชนีหักเหสูง เคลือบสาร Phosphor ทำหน้าที่เปลี่ยนอิเล็กตรอนทุติยภูมิเป็นแสงอัลตราไวโอเล็ต ความยาวคลื่น 400 nm และมีเวลาในการสลายประกายแสงเร็ว เพื่อกำเนิดพัลส์ได้

รวดเร็ว ผิวด้านนอกของ Phosphor จะเคลือบด้วยอลูมิเนียมบางๆ (10-50 nm) และจ่ายศักดาไฟฟ้าสูง เพื่อเร่งอิเล็กตรอนให้เข้าสู่ซินทิลเลเตอร์ นอกจากนั้นชั้นอลูมิเนียมยังทำหน้าที่เหมือนกระจกสะท้อนกลับโฟตอนให้ไปที่ตัวนำแสง ซึ่งทำจาก Plexiglass หรือ Polished quartz pipe โฟตอนที่ผ่านตัวนำแสงเหล่านี้จะถูกแปลงเป็นอิเล็กตรอน โดยโฟโตแคโทดของหลอด PMT และเคลื่อนที่ไปยังไดโนด ซึ่งทำจากวัสดุที่มี Working function ต่ำ เมื่ออิเล็กตรอนชนไดโนดจะปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกมาอีกเป็นทวีคูณ ส่งต่อไปยังไดโนดถัดไปเรื่อยๆจนได้สัญญาณที่มีขนาดใหญ่ขึ้น

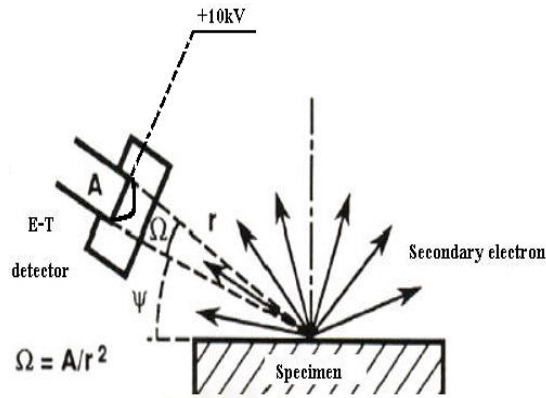
หัววัดสัญญาณอิเล็กตรอนแบบ E-T บางตัวจะพัฒนาให้มี Faraday cage หรือกริด (Grid) ประกอบอยู่หน้า Scintillator ซึ่งทำจากโลหะรูปทรงต่างๆ เมื่อจ่ายศักดาไฟฟ้า จะเกิดสนามไฟฟ้าดึงดูดหรือผลักอิเล็กตรอนทุติยภูมิ การแปรเปลี่ยนค่าไบอัสศักดาไฟฟ้าให้ขั้วไฟฟ้าจะมีผลดังนี้ [7]

- ก. ไบอัสบวก อิเล็กตรอนทุติยภูมิทั้งในและนอกมุมทรงตัน และอิเล็กตรอนกระเจิงกลับเฉพาะมุมทรงตันจะเข้าหัววัดสัญญาณอิเล็กตรอน
- ข. ไบอัสลบ อิเล็กตรอนกระเจิงกลับเฉพาะมุมทรงตันเท่านั้นที่เข้าหัววัดสัญญาณอิเล็กตรอน ส่วนอิเล็กตรอนทุติยภูมิจะถูกผลักออกไป
- ค. ไมไบอัส อิเล็กตรอนทุติยภูมิและอิเล็กตรอนกระเจิงกลับเฉพาะมุมทรงตัน จะเข้าหัววัดสัญญาณอิเล็กตรอน

ผลของศักดาไฟฟ้าที่ไบอัสให้กับกริดหรือ Faraday cage ของหัววัดอิเล็กตรอนแบบ E-T แสดงให้เห็นในแผนภาพในรูปที่ 2.15 และ 2.16 ตามลำดับ

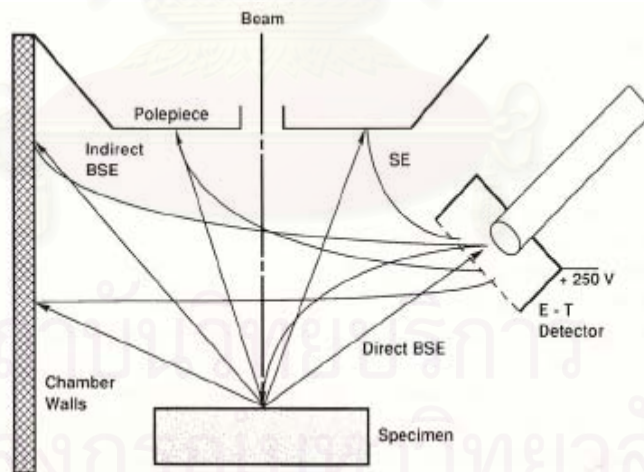


รูปที่ 2.15 ทิศทางของอิเล็กตรอนทุติยภูมิเมื่อไบอัสศักดาไฟฟ้าบวก [7]



รูปที่ 2.16 ทิศทางของอิเล็กตรอนทุติยภูมิเมื่อไม่ไบอัสศักดาไฟฟ้า [7]

จากข้อมูลข้างต้น จะเห็นว่าหัววัดสัญญาณอิเล็กตรอนแบบ E-T ใช้ในการวัดทั้งอิเล็กตรอนทุติยภูมิและอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ แม้ว่าในปัจจุบันจะมีการพัฒนาหัววัดสัญญาณอิเล็กตรอนในรูปแบบต่างๆ ให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการวัดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ แต่อิเล็กตรอนกระเจิงกลับซึ่งมีพลังงานจลน์ใกล้เคียงกับลำอิเล็กตรอน ก็ยังสามารถเข้าสู่หัววัดสัญญาณอิเล็กตรอนแบบ E-T ได้ นอกจากอิเล็กตรอนกระเจิงกลับแล้ว ยังมีอนุภาคต่างๆ ที่ส่งผลกระทบต่อสัญญาณภาพของอิเล็กตรอนทุติยภูมิดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 อนุภาคต่างๆ ที่ส่งผลกระทบต่อสัญญาณภาพของอิเล็กตรอนทุติยภูมิ [7]

2.4.2 ปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิ

2.4.2.1 พลังงานของอิเล็กตรอนปฐมภูมิ

ปริมาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิจะพิจารณาจากค่า δ ซึ่งเป็นสัดส่วนของจำนวนอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่ปลดปล่อยจากชั้นตัวอย่างต่อจำนวนอิเล็กตรอนปฐมภูมิ ปริมาณอิเล็กตรอนที่ปลดปล่อยจะประกอบด้วย จำนวนอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่เกิดจากอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ และจำนวนอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่เกิดจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิจริง ขนาดของ δ มีความสัมพันธ์กับพลังงานของอิเล็กตรอนปฐมภูมิ และ Work function ดังสมการที่ 2.4 [11]

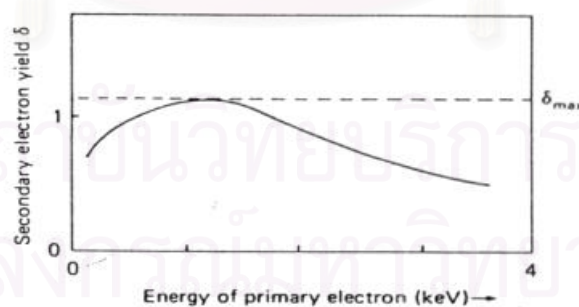
$$\delta = \eta e^{-E_w / E_s} \quad (2.4)$$

η = Constant

E_w = Work function

E_s = Primary electron energy

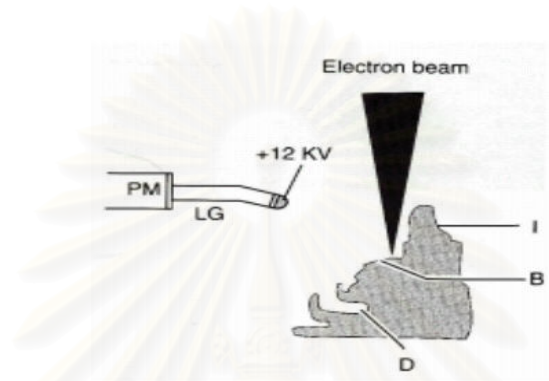
ขนาดของ δ สูงสุดจะแตกต่างกันไปตามชนิดของสารองค์ประกอบของชั้นตัวอย่าง สำหรับสารบริสุทธิ์ δ จะน้อยกว่า 2 แต่จะมากกว่า 10 สำหรับสารประกอบ พลังงานของอิเล็กตรอนปฐมภูมิที่เกิด δ สูงสุด จะอยู่ในช่วง 1 keV ในช่วงพลังงานต่ำปริมาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิจะเพิ่มตามพลังงานอิเล็กตรอนปฐมภูมิที่จ่าย ส่วนในช่วงพลังงานสูงอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่เกิดจะอยู่ลึกลงไปในชั้นงานตามพลังงานที่จ่ายและไม่สามารถออกจากชั้นงานได้ ค่า δ จึงลดลง



รูปที่ 2.18 ความสัมพันธ์ระหว่าง δ กับพลังงานของอิเล็กตรอนปฐมภูมิ [7]

2.4.2.2 พื้นผิวของชิ้นงานและตำแหน่งของหัววัดสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์

จากรูปที่ 2.19 ถ้าลำอิเล็กตรอนสแกนจากซ้ายไปขวา บริเวณ B จะเป็นส่วนที่สว่าง เนื่องจากถูกสแกนและอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่เกิดสามารถเข้าหัววัดสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ได้ ส่วนบริเวณ I จะสว่างปานกลางเนื่องจากอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่เกิดเข้าหัววัดสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ได้บางส่วน ส่วนบริเวณ D จะมีค เนื่องจากไม่ถูกสแกนด้วยลำอิเล็กตรอนเลย

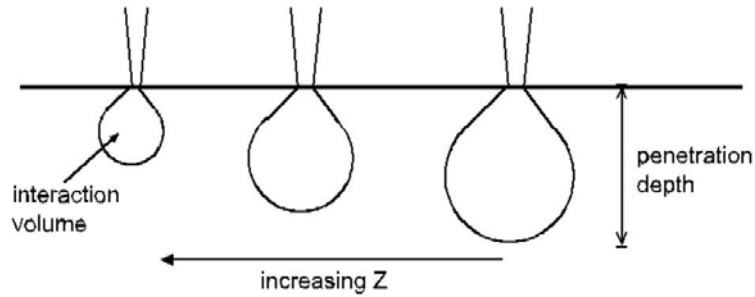


รูปที่ 2.19 ลักษณะของการกำเนิดสัญญาณบนผิวชิ้นงานที่ขรุขระ

ดังนั้นการเอียงชิ้นงานหรือหัววัดสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ จึงสามารถเปลี่ยนแปลงปริมาณสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ที่เข้าสู่หัววัดสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ได้ ถ้าพื้นผิวเอียงจะมีอิเล็กตรอนทุติยภูมิหลุดจากพื้นผิวมากกว่าพื้นผิวเรียบ เนื่องจากมีพื้นที่ที่เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิและสามารถหลุดจากชิ้นงานได้มากกว่า ในขณะที่บริเวณขอบหรือส่วนที่ยื่นออกมาจากพื้นผิวก็จะมีปริมาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิมากยิ่งขึ้น เนื่องจากไม่ถูกจับโดยอะตอมข้างเคียง

2.4.2.3 เลขอะตอมของชิ้นงาน

เนื่องจากโอกาสการเกิดอันตรกิริยาของอิเล็กตรอนทุติยภูมิและอิเล็กตรอนกระเจิงกลับจะแปรผันตรงกับเลขอะตอมของชิ้นงาน เมื่อเลขอะตอมสูง โอกาสเกิดอันตรกิริยาจะมากขึ้น ทำให้ลำอิเล็กตรอนส่วนใหญ่เกิดอันตรกิริยาบริเวณพื้นผิว ปริมาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิและอิเล็กตรอนกระเจิงกลับจึงมากกว่าชิ้นงานที่มีเลขอะตอมต่ำ



รูปที่ 2.20 บริเวณชั้นความลึกของโอกาสเกิดอันตรกิริยาซึ่งขึ้นกับเลขอะตอมของชิ้นงาน

2.4.2.4 ความนำไฟฟ้าของชิ้นงาน

เมื่อปลายลำอิเล็กตรอนตกกระทบชิ้นงานจะเกิดการเพิ่มของศักย์ไฟฟ้าบนพื้นผิวชิ้นงาน และมีพฤติกรรมคล้ายตัวเก็บประจุ ซึ่งต้องถ่ายเทประจุบนผิวชิ้นงานออกในทางใดทางหนึ่ง ถ้าชิ้นงานนำไฟฟ้าจะส่งผ่านอิเล็กตรอนและกระจายศักย์ไฟฟ้าได้ดี ถ้าชิ้นงานไม่นำไฟฟ้าจะเกิดการจับอิเล็กตรอนและก่อตัวเป็นกลุ่มประจุลบ (Charge up) ส่งผลต่อการเบี่ยงเบนลำอิเล็กตรอนและอิเล็กตรอนทุติยภูมิ ทำให้ภาพอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่ได้รับมีคุณภาพลดลง วิธีลดประจุไฟฟ้าบนชิ้นงานสามารถทำได้ดังนี้

1. เคลือบสารนำไฟฟ้า (Coating) ทำให้ชิ้นงานนำไฟฟ้า
2. เอียงชิ้นงาน (Specimen tilt) เพื่อเพิ่ม Yield ของอิเล็กตรอนทุติยภูมิ ถ้าเอียงชิ้นงานจากระนาบที่ตั้งฉากกับลำอิเล็กตรอนจะเกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิมากขึ้น ช่วยลดประจุบนชิ้นงาน
3. ลดปริมาณกระแสนของลำอิเล็กตรอน ทำให้ประจุบนชิ้นงานลดลง
4. การสแกนลำอิเล็กตรอนเร็วจะเกิดประจุตกค้างบนชิ้นงานน้อยกว่าการสแกนช้า
5. ลดศักย์ไฟฟ้าเร่ง (Accelerating voltage) ทำให้ปริมาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิเพิ่ม ประจุบนชิ้นงานจะลดลง

ในการเคลือบสารนำไฟฟ้านอกจากจะทำให้ชิ้นงานนำไฟฟ้าแล้ว ยังมีจุดประสงค์อื่นๆ ดังนี้

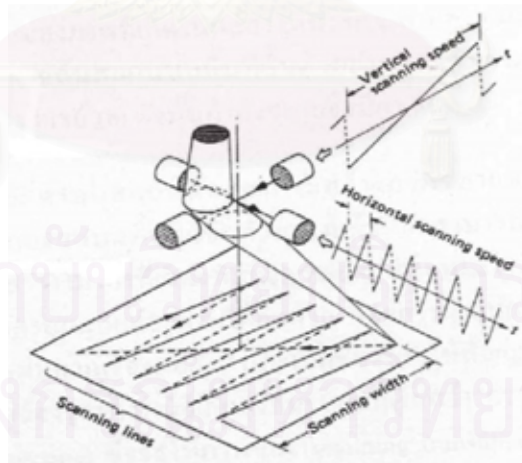
- ก. ลดความสูญเสียจากความร้อน สารเคลือบยังทำหน้าที่กระจายความร้อนจากจุดที่ลำอิเล็กตรอนชนไปบริเวณอื่นๆ ด้วยการกระจายอิเล็กตรอนจากจุดที่ถูกสแกน
- ข. เพิ่มการปลดปล่อยของอิเล็กตรอนทุติยภูมิและอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ

ค. เพิ่มความแข็งแรงแก่ชิ้นงาน

2.5 การควบคุมการสแกนของลำอิเล็กตรอน

เมื่อปลายลำอิเล็กตรอนที่ถูกโฟกัสด้วยเลนส์ออฟเฟกตีฟกระทบชิ้นงาน จะเป็นเพียงจุดโฟกัสเล็กๆที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานและเกิดสัญญาณจุดภาพเท่านั้น การสร้างภาพ 2 มิติ ต้องมีการบังคับลำอิเล็กตรอนให้มีการเบี่ยงเบนบนระนาบชิ้นงาน โดยเบี่ยงเบนทั้งแนวนอนและแนวตั้งตามสัดส่วนกรอบภาพ ซึ่งในแต่ละตำแหน่งของการเบี่ยงเบนต้องแน่นอนทุกครั้ง เรียกการควบคุมนี้ว่าการสแกนลำอิเล็กตรอน ในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ภาพมีลักษณะเป็นภาพนิ่ง การสแกนจึงเป็นแบบ Non interlace scan

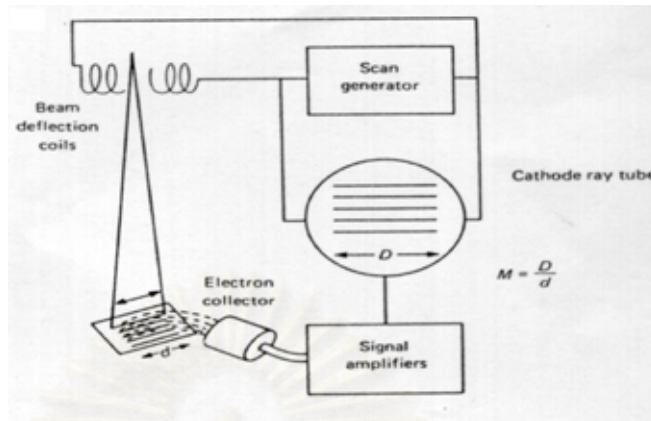
การควบคุมลำอิเล็กตรอนให้เบี่ยงเบนอาศัยขดลวดสแกน (Scanning Coils) ซึ่งประกอบด้วย ขดลวดแนวนอนและขดลวดแนวตั้ง ติดตั้งบริเวณคอลัมน์ที่ลำอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่มายังชิ้นงานบริเวณใต้เลนส์ออฟเฟกตีฟ เมื่อปล่อยกระแสไฟฟ้าเข้าขดลวดจะเกิดสนามแม่เหล็ก มีผลให้ลำอิเล็กตรอนเบี่ยงเบนตามกฎ $F_e = -qV \times B$ โดยขดลวดแนวนอนจะถูวางในแนวตั้งเพื่อให้เกิดสนามแม่เหล็กเบี่ยงเบนลำอิเล็กตรอนในแนวนอน และขดลวดแนวตั้งจะถูวางในแนวนอนเพื่อให้เกิดสนามแม่เหล็กเบี่ยงเบนลำอิเล็กตรอนในแนวตั้ง ทิศทางการพันขดลวดแต่ละชุด จะพันในแนวเดียวกัน เพื่อให้เกิดสนามแม่เหล็กในทิศเดียวกัน และจ่ายศักดาไฟฟ้ากลับขั้ว เมื่อต้องการกลับทิศทางของสนามแม่เหล็ก ดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 แสดงการสแกนปลายลำอิเล็กตรอนบนพื้นผิวชิ้นตัวอย่าง

สัญญาณควบคุมการสแกนของลำอิเล็กตรอนในคอลัมน์สุญญากาศและในระบบกำเนิดภาพจะเบี่ยงเบนพร้อมกัน (Synchronization) ดังนั้นสัญญาณอิเล็กตรอนที่เกิดในขณะที่ลำอิเล็กตรอนเคลื่อนไปบนผิวชิ้นตัวอย่างจะถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าด้วยอุปกรณ์วัด ปรากฏ

เป็นสัญญาณภาพทางจอภาพจุดต่อจุดตามแนวสแกนทั้งแนวนอนและแนวตั้ง ประกอบกันเป็นภาพขยายดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 สัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ภูมิและสัญญาณภาพ [7]

กำลังขยายของภาพ (Magnification) [7] จะเท่ากับขนาดของภาพ (D)หารด้วยขนาดของชิ้นตัวอย่าง (d) โดยทั่วไปพื้นที่บนจอภาพจะอยู่ระหว่าง 10x10 cm และ 20x20 cm ดังนั้นสามารถคำนวณระยะสแกนบนชิ้นตัวอย่างได้ดังตารางที่ 2.3 (จอภาพขนาด 10x10 cm)

ตารางที่ 2.3 ความสัมพันธ์ของกำลังขยายและระยะสแกนบนชิ้นตัวอย่าง

กำลังขยาย	ระยะสแกน
10x	1 cm
100x	1 mm
1000x	100 μm
10000x	10 μm

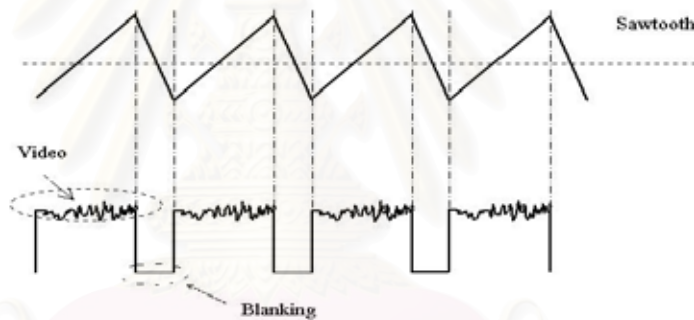
เนื่องจากขนาดของปลายลำอิเล็กตรอนบนชิ้นตัวอย่างมีผลต่อคุณภาพของสัญญาณที่ใช้สร้างภาพ ถ้าใช้ปลายลำอิเล็กตรอนใหญ่เกินไป จะทำให้เกิดภาพขาดความคมชัด เนื่องจากเกิดการเกยทับกันของลำอิเล็กตรอนบนชิ้นงาน ถ้าใช้ขนาดเล็กไปสัญญาณจะต่ำ โดยเฉพาะเมื่อใช้กำลังขยาย 1000 เท่าขึ้นไป ดังนั้นการใช้ลำอิเล็กตรอนให้ใกล้เคียงกับค่าของขนาดลำอิเล็กตรอนใหญ่สุดที่ใช้ได้ (Maximum probe diameter allowable) ที่กำลังขยายนั้นๆจะทำให้ได้สัญญาณภาพที่มี Signal to noise ratio สูง ค่าสูงสุดของขนาดลำอิเล็กตรอนที่สามารถใช้ได้ สามารถคำนวณโดยหาขนาดของอิเล็กตรอนบนจอภาพ แล้วคำนวณกลับไปเป็นค่าขนาดของอิเล็กตรอนบนชิ้นตัวอย่างที่

กำลังขยายนั้นๆ เช่น จอภาพขนาด 10x10 cm มีจำนวนเส้นสแกน 1000 เส้นต่อ 1 ภาพ ขนาดของอิเล็คตรอนบนจอภาพจะเท่ากับ 100 μm ดังนั้นค่าสูงสุดของขนาดลำอิเล็คตรอนใหญ่สุดที่สามารถใช้ได้ (d_{max}) จะหาได้จากสมการ

$$d_{\text{max}} = \frac{100\mu\text{m}}{M} \quad (2.5)$$

โดย M คือกำลังขยายของภาพ

สัญญาณควบคุมการสแกนจะมีรูปแบบเป็นสัญญาณฟันเลื่อย (Sawtooth) ที่มีความถี่ทางแนวนอนสูงและความถี่ในแนวตั้งต่ำ เมื่อต้องการให้เกิดภาพบนจอแคโทดเรย์ต้องป้อนสัญญาณฟันเลื่อยเข้าที่ขดลวดสแกน เพื่อให้เกิดการสแกนจากมุมบนซ้ายไปมุมล่างขวาของหน้าจอ โดยที่สัญญาณเข้าจิ้งหะจากระบบกำเนิดสัญญาณสแกนลำอิเล็คตรอน มาควบคุมให้เกิดการทำงานพร้อมกัน และสัญญาณภาพ (Video signal) จากหัววัดสัญญาณอิเล็คตรอนส่งไปควบคุมปริมาณอิเล็คตรอนบนจอแคโทดเรย์ ดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 สัญญาณฟันเลื่อยและสัญญาณภาพ

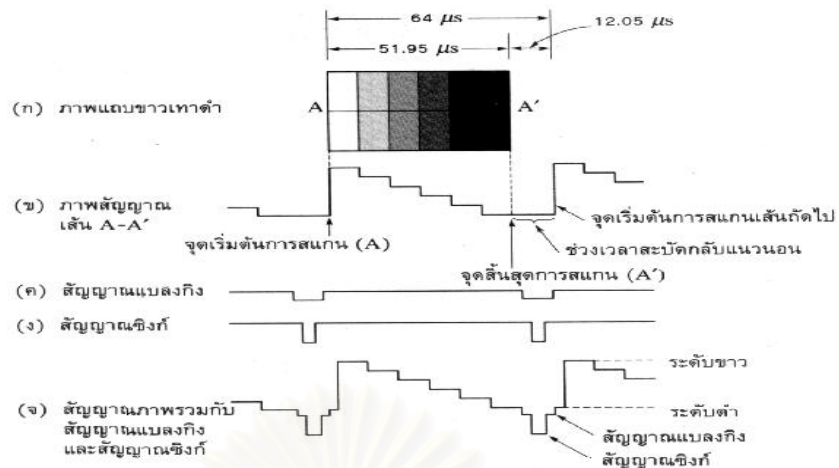
2.6 มาตรฐานสัญญาณคอมโพสิตวิดีโอ (Composite video) [12]

ระบบแสดงภาพของกล้องจุลทรรศน์อิเล็คตรอนในโหมดโทรทัศน์จะมีการสร้างสัญญาณภาพแบบรวมสัญญาณ ทั้งสัญญาณเข้าจิ้งหะ สัญญาณแบลนคิง (Blanking) และสัญญาณภาพเข้าด้วยกันบนสายส่งเดียว เรียกว่าสัญญาณคอมโพสิตวิดีโอ

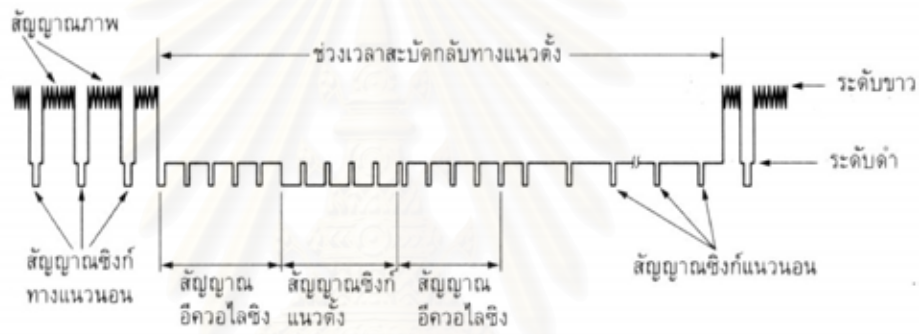
ระบบสัญญาณคอมโพสิตวิดีโอสำหรับโทรทัศน์ขาวดำ มี 2 ระบบได้แก่ 625 เส้นสแกน (ระบบยุโรป) และ 525 เส้นสแกน (ระบบอเมริกัน) ในประเทศไทยจะใช้ระบบ 625 เส้น ซึ่งสอดคล้องกับระบบโทรทัศน์สีแบบ PAL โดยมีรายละเอียดของสัญญาณ ดังนี้

1. สัญญาณภาพ คือสัญญาณที่แสดงระดับความสว่างของภาพตั้งแต่ 0-100%

2. สัญญาณแบลนค์กึ่งแนวนอน (Horizontal blanking) เป็นสัญญาณลบเส้นสับกลับแนวนอน ในระบบ 625 เส้น ลำโวลีเก็ตรอนของหลอดภาพมีเวลาสแกนแนวนอน 1 เส้น (1H) 64 μs เวลาสับกลับ 12.05 μs ดังนั้นเวลาสแกนอ็เล็กรอนจากขอบซ้ายไปขอบขวาของจอจึงเท่ากับ 51.95 μs สัญญาณภาพจึงต้องผสมกับสัญญาณพัลส์สี่เหลี่ยมไว้ในระดับดำเป็นเวลา 12.05 μs เพื่อให้หลอดภาพคั้ตออฟ ในช่วงลำโวลีเก็ตรอนสับกลับจากขอบขวาไปขอบซ้ายของจอ
3. สัญญาณแบลนค์กึ่งแนวตั้ง (Vertical blanking) เป็นสัญญาณลบเส้นสับกลับแนวตั้ง ในระบบ 625 เส้น การสับกลับแนวตั้ง 1 ครั้งจะเสียเวลาการสแกนแนวนอนไป 25 เส้น ใน 1 ภาพจะมีการสแกน 2 ฟิลด์คือฟิลด์เส้นคู่และฟิลด์เส้นคี่ สัญญาณภาพจึงต้องผสมกับสัญญาณพัลส์สี่เหลี่ยมไว้ในระดับดำมีความกว้าง 25H ห่างกันทุกๆ 312.5 เส้น เพื่อให้หลอดภาพคั้ตออฟ ในช่วงลำโวลีเก็ตรอนสับกลับจากขอบล่างไปขอบบนของจอ
4. สัญญาณซิงก์แนวนอน (Horizontal sync) เป็นสัญญาณพัลส์ขนาดประมาณ 4.7 μs สำหรับใช้เป็นสัญญาณอ้างอิงเพื่อควบคุมความถี่ในการเบี่ยงเบนแนวนอนของเครื่องรับให้ตรงจ้งหะกับเครื่องส่ง สัญญาณซิงก์จะผสมอยู่บนยอดของสัญญาณแบลนค์กึ่งดำกว่าระดับดำ ยอดซิงก์แนวนอนจะห่างกัน 64 μs
5. สัญญาณซิงก์แนวตั้ง (Vertical sync) เป็นสัญญาณพัลส์ที่มีระดับเดียวกับยอดซิงก์แนวนอน มี 5 พัลส์ติดกัน ยอดกว้างประมาณ 29 μs ห่างกัน 4.7 μs สำหรับใช้เป็นสัญญาณอ้างอิงเพื่อควบคุมความถี่ในการเบี่ยงเบนแนวตั้งของเครื่องรับให้ตรงจ้งหะกับเครื่องส่ง
6. สัญญาณอีควอลไลซิง (Equalizing pulse) เป็นสัญญาณขนาด 2.35 μs จำนวน 2 ชุด ชุดละ 5 พัลส์ มีระดับแรงดันเท่ากับยอดซิงก์แนวนอน โดยชุดแรกเติมลงหน้าซิงก์แนวตั้งและชุดหลังเติมข้างหลังซิงก์แนวตั้ง เพื่อให้สามารถแยกซิงก์แนวตั้งออกจากสัญญาณภาพและซิงก์แนวนอนได้ถูกต้อง



รูปที่ 2.24 สัญญาณภาพและสัญญาณซิงค์แนวอน [12]



รูปที่ 2.25 สัญญาณภาพและสัญญาณซิงค์แนวตั้ง [12]

บทที่ 3

การออกแบบระบบควบคุมลำอิเล็กตรอนและแสดงภาพ

3.1 ข้อมูลพื้นฐานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน [13]

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน รุ่น T20 ของบริษัท JEOL ทำงานด้วยระบบควบคุมอิเล็กตรอนิกส์แบบดั้งเดิมอนาล็อก (Analog SEM) ประกอบด้วยเลนส์อิเล็กตรอน 3 ชุด คือ เลนส์คอนเดนเซอร์ 2 ชุด และ เลนส์ออฟเฟกตีฟ 1 ชุด ทำงานภายใต้ความดันสุญญากาศ 1×10^{-6} torr ใช้แคโทดชนิดทังสเตน (Tungsten, W) มีศักดาไฟฟ้าเร่ง (Accelerating voltage) 20 kV มีกำลังขยาย 35 ถึง 30,000 เท่า และมีความสามารถในการแจกแจง 15 nm เฉพาะในโหมดโทรทรรศน์สามารถทำงานที่กำลังขยาย 35 ถึง 10,000 เท่า ใช้หัววัดสัญญาณอิเล็กตรอนชนิด E-T ในการวัดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ และอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ แสดงผลทางหลอดแคโทดเรย์ขนาด 9" และสามารถตรวจวัดชิ้นงานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 10 mm และความสูงไม่เกิน 10 mm ดังแสดงโครงสร้างในรูปที่ 3.1



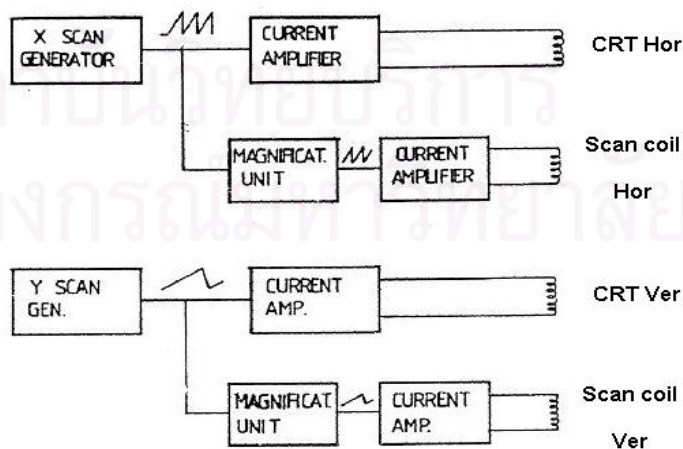
รูปที่ 3.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนรุ่น T20 ของ JEOL

3.1.1 ข้อมูลพื้นฐานของระบบควบคุมลำอิเล็กตรอนของ T20

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนรุ่น T20 มีการสแกน 3 แบบ ได้แก่ การสแกนแบบเส้น (Line Scanning) การสแกนผืนภาพ (Plane Scanning) และสแกนแบบมอดูเลตทางแกนวาย (Y-axis modulation) โดยสามารถเลือกความเร็วสแกนได้ตามตารางที่ 3.1 การสแกนแบบมอดูเลตใช้สำหรับภาพที่มี Contrast ต่ำ โดยจะนำค่า Contrast ซึ่งอาจไม่ชัดเจนเมื่อดูด้วยภาพ มอดูเลตเพื่อให้เห็นระดับ Contrast ของสัญญาณ แทนระดับ Contrast ของภาพ

ตารางที่ 3.1 โหมดการสแกนของ T20

Scanning mode	Scanning speed (sec/frame)
Line Scanning	0.2
	0.33
	1.6
Plane Scanning	0.2
	0.33
	1.6
	0.016 (TV mode/NTSC)
	60 (for photographing)

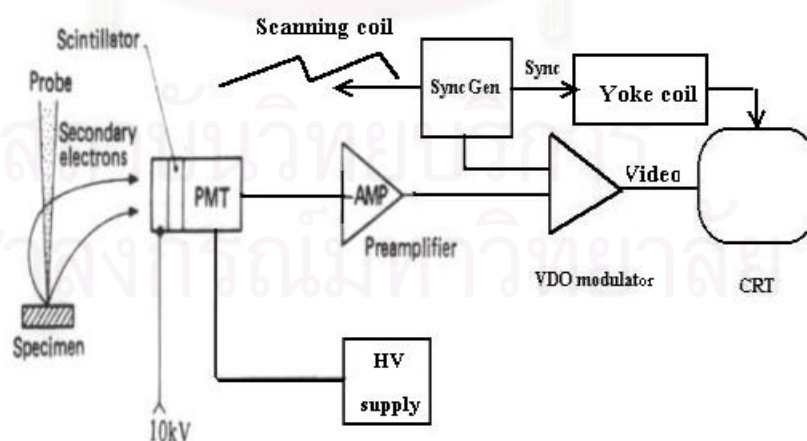


รูปที่ 3.2 ระบบควบคุมการสแกนของ T20

จากรูปที่ 3.2 ความเร็วในการสแกนขึ้นกับสัญญาณควบคุมการสแกนจากวงจร “X SCAN GEN” และ “Y SCAN GEN” ซึ่งแบ่งการควบคุมเป็น 2 โหมดได้แก่ Slow mode และ TV mode โดย Slow mode จะกำเนิดสัญญาณควบคุมจากวงจรอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งใช้ IC 555 เป็นตัวกำเนิดสัญญาณ เพื่อควบคุมสัญญาณในแนวนอนและแนวตั้ง ส่วน TV mode จะกำเนิดสัญญาณจาก วงจรทรานซิสเตอร์ชนิดออสซิลเลเตอร์ (Self oscillate) ซึ่งมีมาตรฐานและสัดส่วนของสัญญาณสแกนตามมาตรฐาน TV ของ USA/NTSC จากนั้นสัญญาณควบคุมการสแกนจะถูกส่งไปยัง Magnification unit เพื่อปรับขนาดสัญญาณให้ได้สัดส่วนกับกำลังขยายต่างๆ แล้วขยายกระแส และส่งต่อไปยังขดลวดสแกนลำอิเล็กตรอนของคอดัมภ์กึ่งจลทรรศน์อิเล็กตรอน และขดลวดเบี่ยงเบน (Deflection yoke) ของจอ CRT ตามลำดับ

3.1.2 ข้อมูลพื้นฐานของการสร้างภาพจากอิเล็กตรอนทุติยภูมิของ T20

ในโหมด TV ของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนรุ่น T20 หัววัดสัญญาณอิเล็กตรอนจะเป็นชนิด E-T ในการรับสัญญาณอิเล็กตรอนมาออกคู่เดียวกับสัญญาณเข้าจังหวะ ซึ่งเข้าจังหวะกับสัญญาณควบคุมการสแกนของลำอิเล็กตรอนเกิดเป็นสัญญาณวิดีโอ เพื่อนำไปแสดงผลด้วยหลอดแคโทดเรย์ ขนาดจอภาพ 9” โดยเลือกรับสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิด้วยการจ่ายศักดาไฟฟ้าสูง 10 kV ที่ขั้วไฟฟ้าบนผิวชั้นทิลเลชันของหัววัดสัญญาณเพื่อเร่งอิเล็กตรอนทุติยภูมิให้เข้าสู่หัววัดสัญญาณ ส่วนการรับสัญญาณอิเล็กตรอนกระเจิงกลับนั้นไม่ต้องจ่ายศักดาไฟฟ้าสูง เนื่องจากอิเล็กตรอนกระเจิงกลับมีพลังงานสูง สามารถเคลื่อนที่มาถึงหัววัดสัญญาณได้เอง

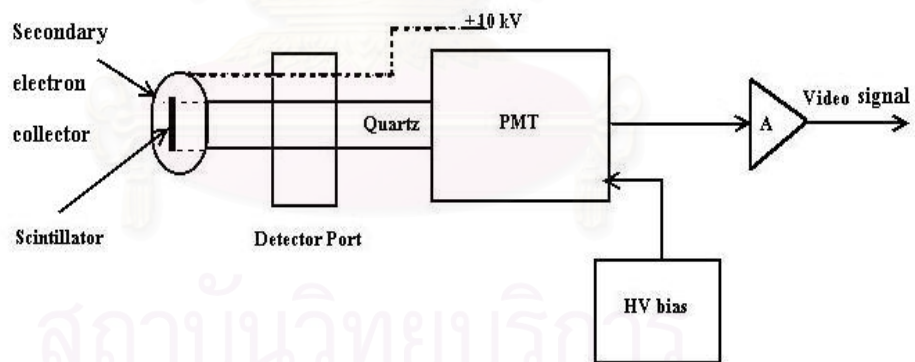


รูปที่ 3.3 ระบบสร้างภาพในโหมด TV ของ T20

จากรูปที่ 3.3 สัญญาณอิเล็กทรอนิกส์จากเซ็นเซอร์จะเปลี่ยนเป็นสัญญาณไฟฟ้าและมอดูเลตกับสัญญาณเข้าจังหวะ ซึ่งเข้าจังหวะกับสัญญาณควบคุมการสแกนลำอิเล็กตรอน เกิดเป็นสัญญาณคอมพิวเตอร์วิดีโอส่งไปแสดงภาพที่หลอดแคโทดเรย์ การบันทึกภาพสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์จากเซ็นเซอร์งานสามารถทำได้โดยเลือกความเร็วในการสแกนในโหมด Slow scan (60 sec/frame) และปรับระดับความสว่างและความเปรียบต่างให้ดีที่สุด จากนั้นบันทึกภาพหน้าจอของหลอดแคโทดเรย์ด้วยกล้องถ่ายรูปจากภายนอก ซึ่งต้องปรับความไวแสงของกล้องให้เหมาะสม ในระบบจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ Analog SEM นั้น ภาพที่บันทึกได้ไม่สามารถปรับความสว่าง ความเปรียบต่างหรือกระบวนการปรับปรุงภาพ (Image processing) ได้ กล้องจุลทรรศน์รุ่นใหม่จึงออกแบบให้ทำงานในระบบดิจิทัล (Digital SEM) เพื่อเชื่อมโยงการทำงานกับไมโครคอมพิวเตอร์

3.2 การออกแบบหัววัดสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์

หัววัดสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในระบบจุลทรรศน์อิเล็กตรอนทั่วไปจะเป็นแบบ Everhart-Thornley (E-T) ประกอบด้วยซินทิลเลเตอร์ ตัวนำแสง และโฟโตมัลติพลายเออร์ งานวิจัยนี้จึงได้ออกแบบ โครงสร้างของหัววัดสัญญาณเป็นแบบ E-T เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะการทำงานกับของระบบเดิม โดยมีโครงสร้างดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 โครงสร้างหัววัดสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ที่พัฒนาขึ้น

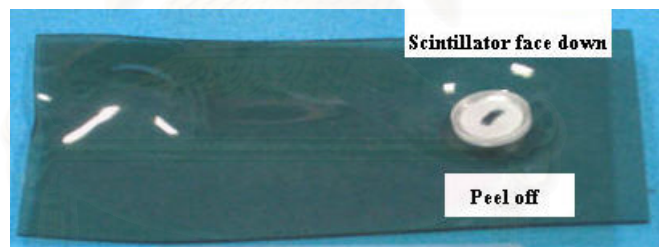
จากรูปที่ 3.4 รายละเอียดของส่วนประกอบต่าง ๆ มีดังนี้

1. ซินทิลเลเตอร์ สำหรับงานวิจัยนี้จะใช้ซินทิลเลเตอร์ชนิด P47 ซึ่งประกอบด้วย Yttrium silicate activated ด้วย Cerium ($Y_2SiO_5: Ce^{3+}$) เคลือบบาง 5-10 μm ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 mm โดยมีฟิล์มอลูมิเนียมเคลือบผิวหน้าเพื่อให้นำไฟฟ้าอีกชั้นหนึ่ง P47 มีเวลาสลายตัว (Decay time) น้อยกว่า 80 nS เปล่งแสงสูงสุดในช่วง 400 nm มี

ขนาดเกรน (Grain size) 1-10 μm อายุการใช้งานขึ้นกับปริมาณรังสีไอออไนซ์ (Ionizing radiation) ที่เกิดขึ้นในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ถ้ามีปริมาณรังสีไอออไนซ์มาก อายุการใช้งานของซินทิลเลเตอร์จะสั้น นอกจากนี้ยังขึ้นกับความเป็นสusyutakasa ในคอลลิมน์ และส่วนประกอบของ P47 ที่ใช้เคลือบบนฐานด้วย เนื่องจากฟอสเฟอร์บนซินทิลเลเตอร์บาง หลุดลอกง่าย การประกอบซินทิลเลเตอร์กับตัวนำแสงจะต้องใช้แผ่นวัสดุรองรับที่เป็นหลุมกลม เพื่อคว่ำหน้าซินทิลเลเตอร์ลง รอบประกอบกับตัวนำแสง ป้องกันไม่ให้ฟอสเฟอร์ถูกขีดข่วนหลุดลอก ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ก. และในรูปที่ 3.5 ข.



รูปที่ 3.5 ก. ซินทิลเลเตอร์วางอยู่บนวัสดุรองรับ



รูปที่ 3.5 ข. ซินทิลเลเตอร์ที่ผิวหน้าได้รับความเสียหายจากรอยขีดข่วน

2. ตัวนำแสง งานวิจัยนี้ใช้แท่งควอทซ์ (Quartz) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 mm ยาว 50 mm เพื่อรับแสงจากซินทิลเลเตอร์ส่งไปยัง PMT ที่อยู่นอกคอลลิมน์สุญญากาศ แท่งควอทซ์ที่ใช้เป็นชนิดฟิวส์ซิลิกา (Fused silica) เป็นแก้วที่มีความเป็นฉนวนทางไฟฟ้า มีการส่งผ่านของแสงดีในช่วง 400 nm ซึ่งเป็นความยาวคลื่นของแสงย่านที่ซินทิลเลเตอร์เปล่งออกมา มีดัชนีหักเห 1.4585 เพื่อลดการสูญเสียของแสงระหว่างรอยต่อและเกิดการสะท้อนภายในแท่งไม่ส่งผ่านออกมาภายนอก แท่งควอทซ์ที่นำมาใช้หน้าตัดจะต้องผ่านการขัดให้ใสเพื่อไม่ให้ลดทอนการส่งผ่านของแสงด้วยผงซิลิกอนคาร์ไบด์ (Silicon carbide, SiC) โดยเริ่มจากเบอร์หยาบ(เลขน้อย) ไปเบอร์ละเอียด (เลขมาก)

จากนั้นขัดตามด้วยผงซีเรียมออกไซด์ (CeO_2) และผงไดมอนด์ (Diamond powder) ตามลำดับ การขัดทำบนฝ้ากำมะหยี่และต้องมีตัวยึดเพื่อให้หน้าตัดของควอทซ์ได้ ระบาย ดังแสดงในรูปที่ 3.6 และ 3.7

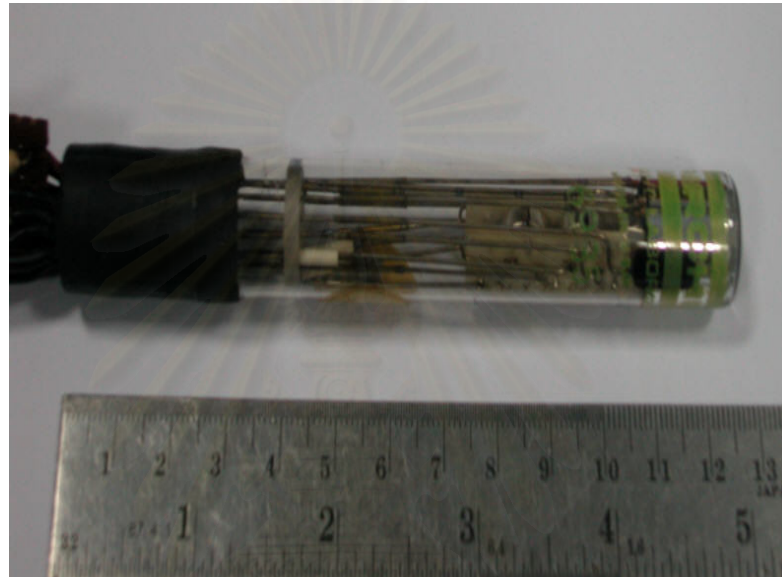


รูปที่ 3.6 อุปกรณ์ขัดแท่งควอทซ์

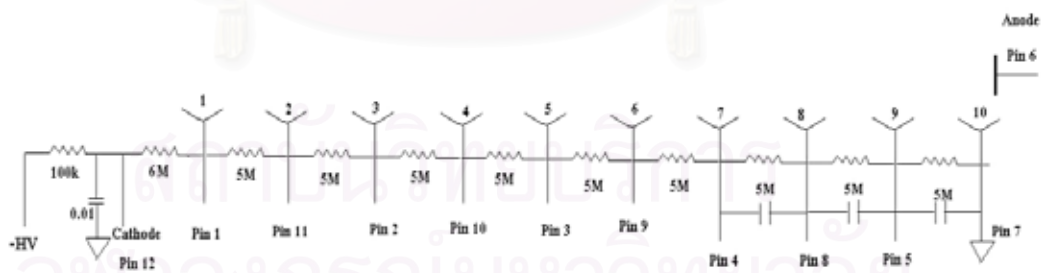


รูปที่ 3.7 เครื่องขัดแท่งควอทซ์

- โฟโตมัลติพลายเออร์ เลือกใช้โฟโตมัลติพลายเออร์รุ่น Dumont 6935 ของบริษัท Fairchild มีหน้าตางานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3/4 “ ให้กำลังขยาย 3×10^7 เท่า ใช้โฟโตแคโทดชนิด S11 (SbCs) มีการตอบสนองต่อสเปกตรัมแสงตั้งแต่ย่านเหนือม่วง (Ultraviolet) ถึงช่วงที่ตามองเห็น (Visible) จ่ายไบอัสจาก HV power supply ORTEC รุ่น 478 จัดวงจร PMT แบบวัตต์สัญญาณต่อเนื่อง ด้วยการแปลงสัญญาณกระแส Anode เป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้า



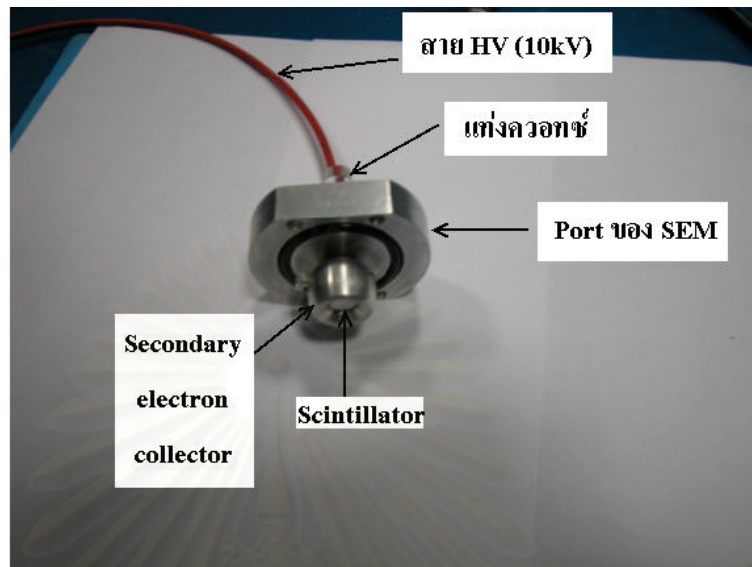
รูปที่ 3.8 ภาพถ่ายของหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ Dumont 6935



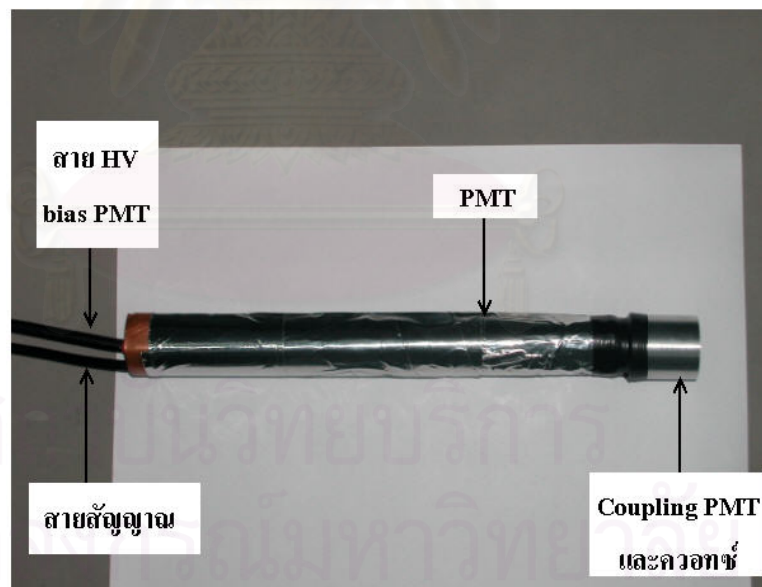
รูปที่ 3.9 การจัดวงจรแบบวัตต์สัญญาณกระแสต่อเนื่องของหลอด PMT Dumont 6935

เนื่องจาก PMT เป็นอุปกรณ์ที่ไวต่อแสง จึงต้องป้องกันแสงจากภายนอกไม่ให้เข้าไปรบกวนระบบ แท่งควอทซ์และรอยต่อต่างๆต้องปิดด้วยวัสดุทึบแสงทั้งภายในและภายนอก SEM

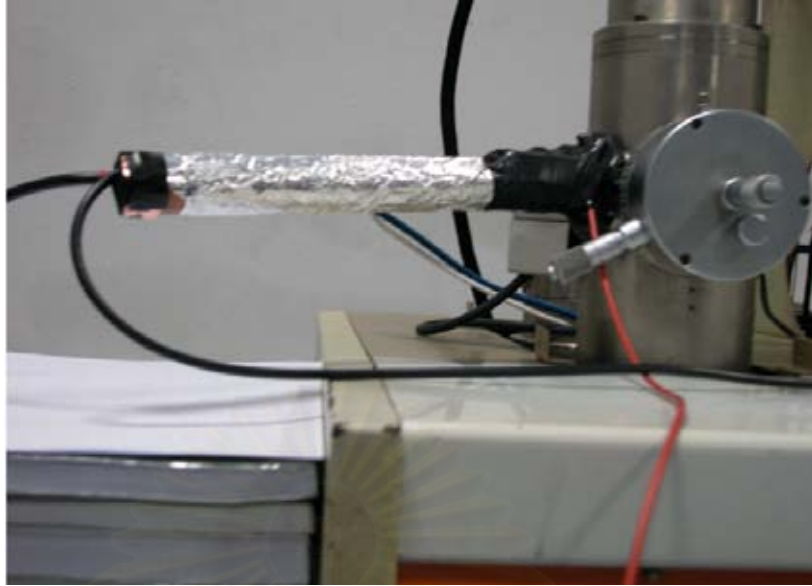
นอกจากนี้จะต้องทดสอบการรั่วของอากาศระหว่างหัววัดที่พัฒนาขึ้นกับ Port ของ SEM ก่อนนำไป
ไบอัสไฟ หากระดับสุญญากาศไม่ได้ตามที่กำหนดจะไม่สามารถใช้งาน SEM ได้



รูปที่ 3.10 รูปถ่ายของ Secondary electron collector ประกอบกับ Port ของ SEM



รูปที่ 3.11 รูปถ่ายของ PMT ที่ประกอบเสร็จเรียบร้อยแล้ว



รูปที่ 3.12 รูปถ่ายของหัววัดสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ที่พัฒนาขึ้น

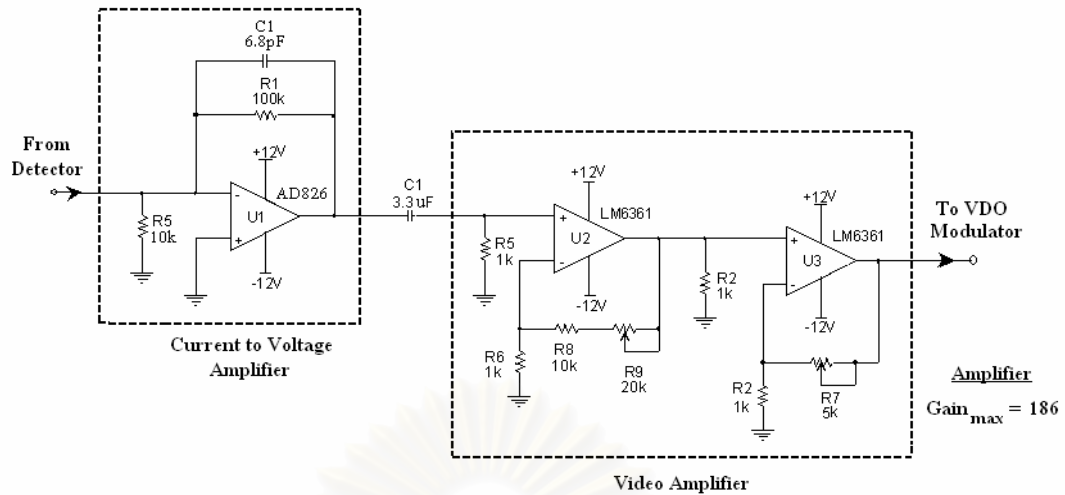
3.3 การออกแบบวงจรขยายสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์เพื่อสร้างสัญญาณภาพ

วงจรขยายสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์เพื่อสร้างสัญญาณภาพ แบ่งเป็น 2 ส่วน ได้แก่ วงจรขยายสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ และ วงจรสร้างสัญญาณภาพแบบรวมสัญญาณ

3.3.1 วงจรขยายสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์

วงจรขยายสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์เลือกใช้ไอซีเบอร์ AD826 จัดวงจรแบบแปลงสัญญาณกระแสจาก PMT เป็นแรงดันไฟฟ้า แล้วจึงขยายแรงดันเพื่อให้ได้ระดับสัญญาณที่พอเพียงสำหรับนำไปสร้างสัญญาณภาพ ด้วยวงจร Non-inverting Amp 2 ชุด เลือกใช้ไอซีเบอร์ LM6361 จัดวงจรให้มีกำลังขยายแรงดันรวม 186 เท่า ดังแสดงวงจรในรูปที่ 3.13

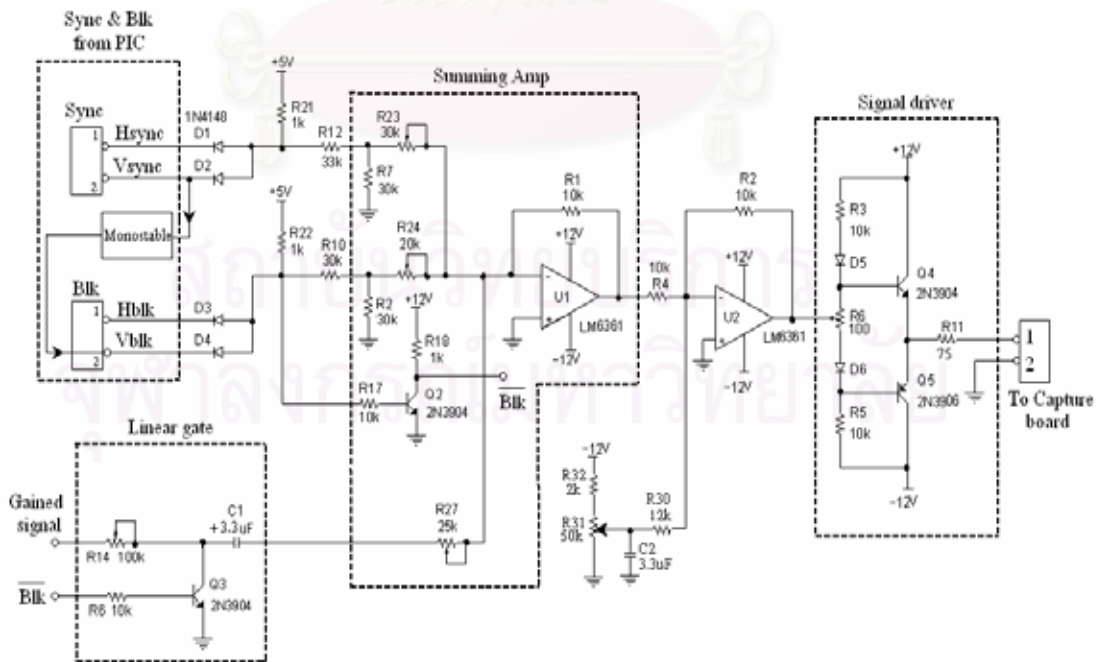
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.13 วงจรขยายสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์

3.3.2 วงจรสร้างสัญญาณภาพแบบรวมสัญญาณ

วงจรสร้างสัญญาณภาพแบบรวมสัญญาณออกแบบให้รับสัญญาณ Sync และ Blanking จาก PIC16F84A รวมสัญญาณกับสัญญาณจากวงจรขยายสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ ด้วยวงจร Summing amp ซึ่งเลือกใช้ไอซีเบอร์ LM6361 จากนั้นส่งผ่านวงจร Signal driver เพื่อขยายกระแสและจัดสภาพ Impedance matching เพื่อให้ได้สัญญาณคอมโพสิตวิดีโอพร้อมส่งไปยังบันทึกภาพด้วยแคปเจอร์บอร์ด ดังแสดงวงจรในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 วงจรสร้างสัญญาณภาพแบบรวมสัญญาณ

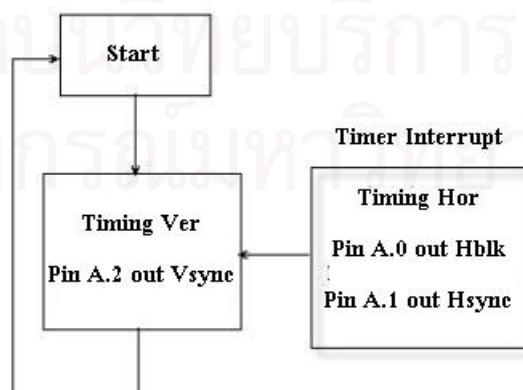
ไอซี Operational amplifier (Op Amp) ที่เลือกใช้ในวงจรขยายสัญญาณและวงจรสร้างสัญญาณภาพแบบรวมสัญญาณ จะต้องสามารถตอบสนองต่อสัญญาณความถี่ (Bandwidth) กว้างได้ไม่น้อยกว่า 5 MHz ซึ่งครอบคลุมย่านความถี่สัญญาณภาพ การใช้ไอซีที่มีการตอบสนองสัญญาณในย่านแคบจะทำให้เกิดการสูญเสียรายละเอียดของสัญญาณภาพอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิวติวิตี ซึ่งส่งผลต่อคุณภาพของภาพจุลทรรศน์อิเล็กทรอนิกส์

3.4 การออกแบบวงจรควบคุมการสแกนของลำอิเล็กตรอน

ในส่วนของวงจรควบคุมการสแกน เลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC เป็นตัวกำเนิดสัญญาณและใช้แคปเจอร์บอร์ดที่มีขีดจำกัดความเร็วในการสแกนเฉพาะทีวีโหมด ในการแสดงภาพบนจอไมโครคอมพิวเตอร์ วงจรที่พัฒนาขึ้นจะใช้ระบบสัญญาณวิดีโอแบบ EU/PAL ตามมาตรฐานสัญญาณวิดีโอที่ใช้ในประเทศไทย ส่วน T20 เดิมจะใช้ระบบสัญญาณวิดีโอแบบ USA/NTSC

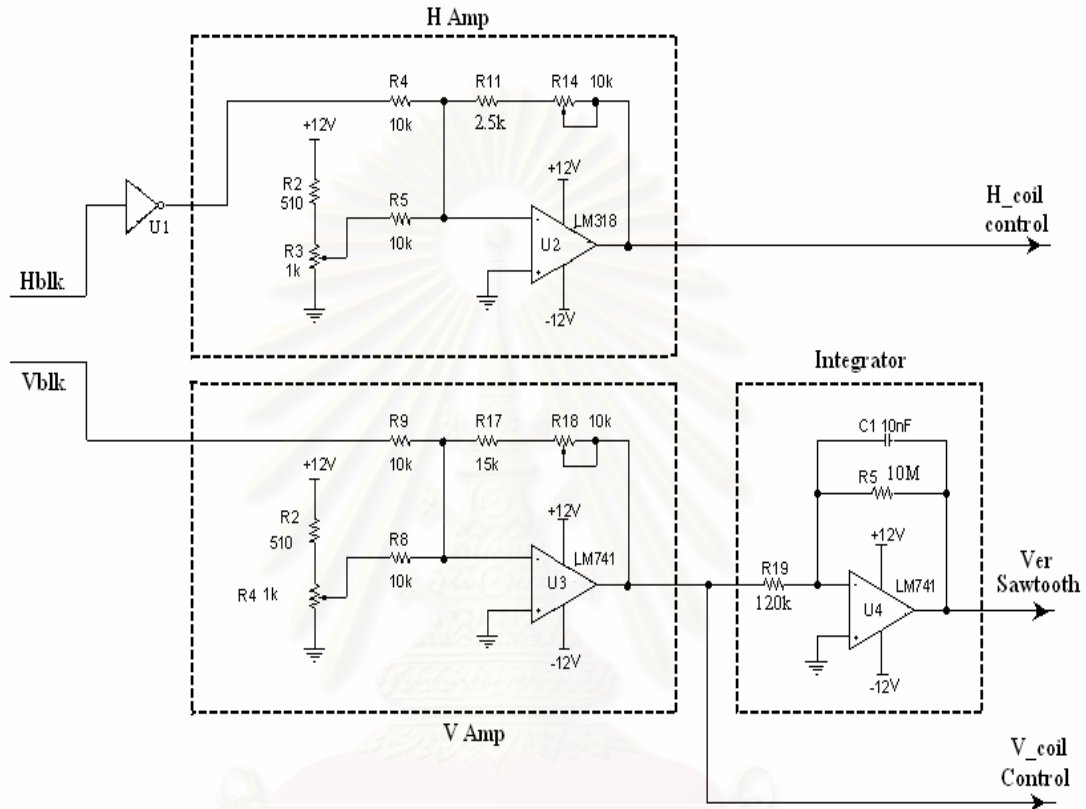
การควบคุมลำอิเล็กตรอนในแนวนอน (Horizontal) ในงานวิจัยนี้ยังต้องอาศัยวงจรจับที่ง่าย แรงดันและกระแสสูงของ Scanning coil เดิมของ T20 โดยกำเนิดสัญญาณสแกนในแนวนอนและแนวตั้ง สัญญาณในแนวนอนเป็นสัญญาณสี่เหลี่ยมมีคาบเวลาเท่ากับ $64 \mu\text{s}$ ส่วนสัญญาณในแนวตั้ง (Vertical) เป็นสัญญาณฟันเลื่อยมีคาบเวลาเท่ากับ 20 ms ช่วงสลับกลับ 2 ms สามารถส่งไปควบคุมวงจรจับขดลวดสแกนได้โดยตรง

วงจรกำเนิดสัญญาณเลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F84A มาออกแบบคาบเวลายกกำเนิดสัญญาณที่กล่าวข้างต้น เพื่อมีความยืดหยุ่นในการปรับแก้สัดส่วนของสัญญาณตามต้องการ การทำงานของวงจรกำเนิดสัญญาณควบคุมการสแกนลำอิเล็กตรอนแสดงในโฟลว์ชาร์ตรูปที่ 3.15 และโปรแกรมในภาคผนวก



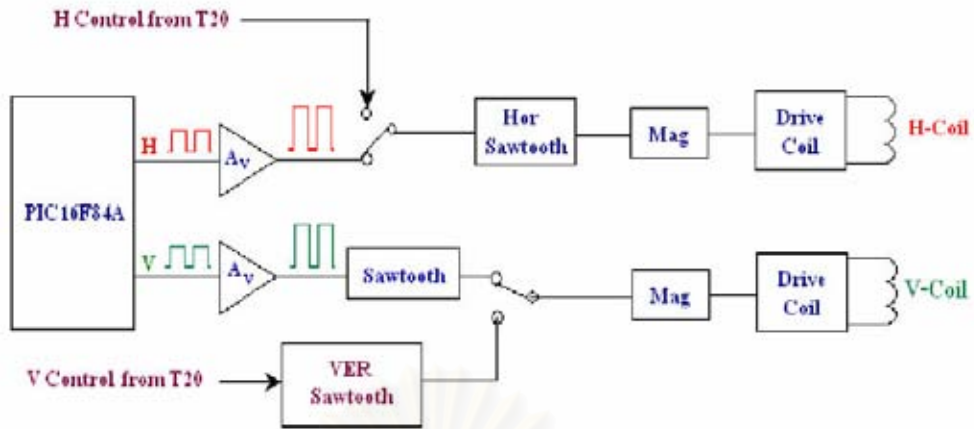
รูปที่ 3.15 แผนผังโฟลว์ชาร์ตการทำงานของ PIC16F84A ในการกำเนิดสัญญาณเข้าจังหวะ

สัญญาณรูปสี่เหลี่ยมจาก PIC16F84A จะส่งต่อไปยังวงจรรขยายแรงดันไอซี U2 และ U3 เพื่อให้ได้ขนาดแรงดันและระดับแรงดันตามความต้องการของวงจรขับสัญญาณใน T20 สำหรับสัญญาณควบคุมแนวตั้งจะต้องผ่านวงจรอินทิเกรตไอซี U4 เพื่อเปลี่ยนรูปสัญญาณเป็นสัญญาณฟันเลื่อย ส่วนสัญญาณควบคุมในแนวนอนสามารถขับวงจรได้โดยตรง วงจรรขยายทั้งแนวนอนและแนวตั้งออกแบบให้สามารถปรับแรงดันออฟเซต (Offset) และอัตราขยายได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 วงจรควบคุมสัญญาณสแกนลำอิเล็กตรอน

เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบคุณภาพของสัญญาณภาพจากระบบสแกนเดิมและระบบสแกนที่พัฒนาขึ้น จึงได้ดัดแปลงวงจรใน T20 ให้สามารถปรับการทำงานจากการทำงานเดิมแบบ Analog SEM มาทำงานในระบบใหม่ที่พัฒนาขึ้นเป็น Digital SEM ด้วยสวิทช์เลือกผังแผนภาพในรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 การตัดแปลง T20 สำหรับระบบสแกนที่พัฒนาขึ้น

3.5 การพัฒนาโปรแกรมเพื่อเก็บภาพจากแคปเจอร์บอร์ด

3.5.1 แคปเจอร์บอร์ด

การแสดงภาพบนจอไมโครคอมพิวเตอร์ในงานวิจัยนี้เลือกแคปเจอร์บอร์ดรุ่น FlyVideo'98 EZ เพื่อแปลงสัญญาณวิดีโอเป็นสัญญาณดิจิทัลและสร้างภาพบนจอคอมพิวเตอร์ FlyVideo'98 EZ ติดต่อกับคอมพิวเตอร์ผ่านทางพีซีไอ (PCI slot) มีวิดีโออินพุต 3 ทาง (AV 2 ทาง, SVDO 1 ทาง) สามารถจับภาพได้สูงสุด 30 เฟรมต่อวินาที ใช้ได้ทั้งระบบ EU/PAL และ USA/NTSC ภาพที่บันทึกมีขนาด 320x240 จุดภาพ



รูปที่ 3.18 ภาพถ่ายของแคปเจอร์บอร์ดรุ่น FlyVideo'98 EZ

3.5.2 การพัฒนาโปรแกรมบันทึกข้อมูลภาพ [14]

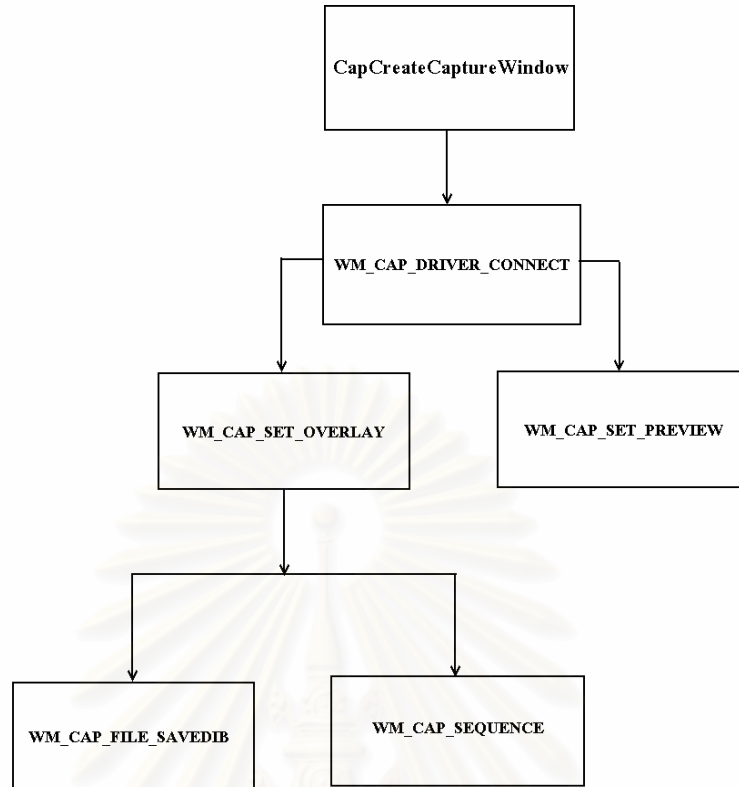
การพัฒนาโปรแกรมบันทึกข้อมูลภาพผ่านวิดีโอแคปเจอร์บอร์ด จะดำเนินการผ่านวินโดว์คลาส AVICap (AVICap Window Class) ซึ่งทำหน้าที่อินเตอร์เฟสระหว่างโปรแกรมควบคุมการจับภาพและแคปเจอร์บอร์ด และใช้ฟังก์ชันและชุดคำสั่งในลักษณะข้อความ (Message) เพื่อติดต่อ AVICap ซึ่งสนับสนุนการบันทึกข้อมูลทั้งแบบภาพต่อเนื่อง (Streaming video) และ ภาพนิ่ง (Single frame capture) ด้วยขนาดของภาพและความเร็วที่แคปเจอร์บอร์ดที่ใช้สามารถทำได้

การพัฒนาโปรแกรมบันทึกข้อมูลภาพผ่าน AVICap จะต้องทำความเข้าใจข้อกำหนดและวิธีการเลือกใช้ฟังก์ชันในการทำงานต่างๆดังนี้

1. แคปเจอร์เรท (Capture rate) คือจำนวนเฟรมต่อเวลา 1 วินาที
2. Preview mode เป็นการแสดงภาพโดยผ่านการควบคุมของซีพียู (CPU) ของคอมพิวเตอร์ สามารถย่อ, ขยายภาพได้
3. Overlay mode เป็นการแสดงภาพโดยติดต่อกับหน่วยความจำโดยตรง ใช้สำหรับบันทึกภาพ
4. ฟังก์ชัน CapCreateCaptureWindow เป็นฟังก์ชันที่ใช้สร้างหน้าต่างแสดงภาพ โดยจะส่งค่าวินโดว์แฮนเดิลเพื่อใช้ติดต่อกับ AVICap กลับมา
5. ฟังก์ชัน CapGetDriverDescription เป็นฟังก์ชันที่ใช้อ่านข้อมูลของดีไวซ์ไดรฟ์เวอร์ของแคปเจอร์การ์ด โดยจะให้ค่าชื่อและคำอธิบายประกอบของแคปเจอร์การ์ดที่ใช้
6. แมสเสจควบคุมการทำงาน AVICap กำหนดให้ใช้แมสเสจในการสื่อสารและควบคุมการทำงานของแคปเจอร์การ์ด 55 แมสเสจ ต่อจาก WM_USER

ขั้นตอนการบันทึกภาพดังแสดงในรูปที่ 3.19

1. สร้างหน้าต่างสำหรับแสดงผลด้วยฟังก์ชัน CapCreateCaptureWindow
2. ติดต่อกับไดรฟ์เวอร์เพื่อขอใช้บริการด้วยแมสเสจ WM_CAP_DRIVER_CONNECT
3. แสดงภาพแบบ Preview mode ด้วยแมสเสจ WM_CAP_SET_PREVIEW
4. เข้าสู่โหมดแสดงภาพแบบ Overlay mode เพื่อบันทึกภาพด้วย แมสเสจ WM_CAP_SET_OVERLAY
5. บันทึกภาพ BMP File ด้วยแมสเสจ WM_CAP_FILE_SAVEDIB
6. บันทึกเฟรมด้วยแมสเสจ WM_CAP_SEQUENCE โดยกำหนด Capture rate ด้วยแมสเสจ WM_CAP_SET_PREVIEWRATE และสร้าง AVI File ก่อนการบันทึกด้วยแมสเสจ WM_CAP_FILE_SET_CAPTURE_FILE

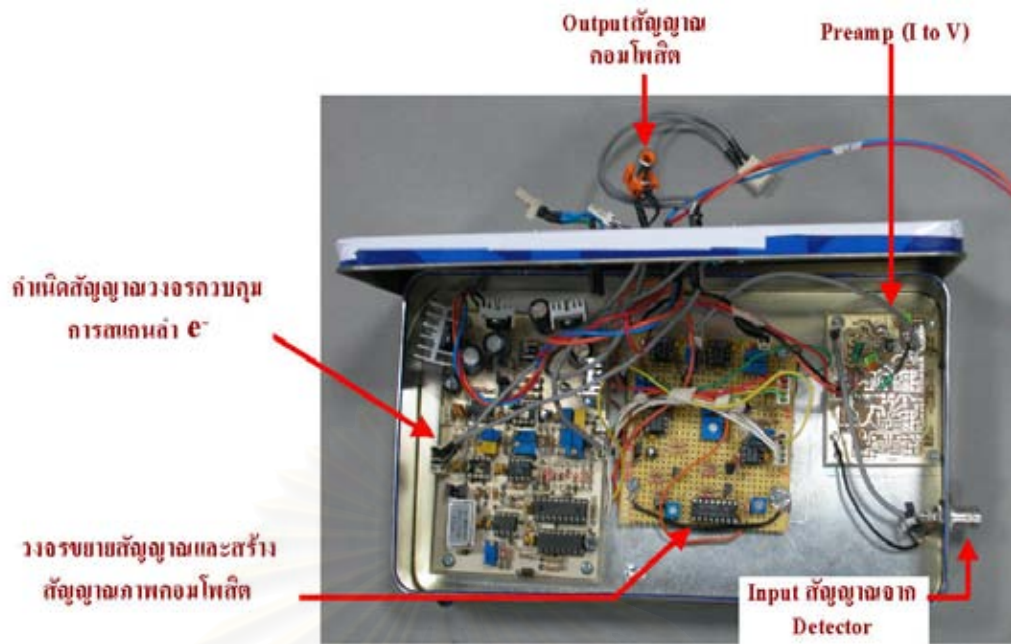


รูปที่ 3.19 แสดงขั้นตอนการบันทึกภาพ

ระบบควบคุมลำอิเล็กตรอนเพื่อการสร้างภาพจากสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่พัฒนาขึ้น
 จะมีส่วนประกอบดังแสดงในรูปที่ 3.20 ถึง 3.23



รูปที่ 3.20 กล่องควบคุมการสแกนลำอิเล็กตรอนและสร้างสัญญาณภาพคอมโพสิต



รูปที่ 3.21 แสดงวงจรภายในกล่องควบคุม



รูปที่ 3.22 แสดงการต่อกล่องควบคุมเข้ากับ T20



รูปที่ 3.23 แสดงส่วนประกอบของระบบที่พัฒนาขึ้นทั้งหมด

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

การทดสอบและผลการทดสอบ

การทดสอบการทำงานของระบบควบคุมการสแกนของลำอิเล็กตรอนเพื่อการสร้างภาพจากสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่พัฒนาขึ้นจะแบ่งเป็น 3 ส่วน คือ การทดสอบการทำงานของส่วนควบคุมการสแกนลำอิเล็กตรอน การทดสอบคุณภาพของสัญญาณภาพคอมพิวเตอร์ และ การทดสอบคุณภาพของภาพจุลทรรศน์อิเล็กตรอน โดยจะทดสอบและเปรียบเทียบคุณภาพของภาพกับระบบเดิมของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน รุ่น T20

4.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทดสอบ

1. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนของบริษัท JEOL รุ่น T20
2. ออสซิลโลสโคป Tektronix รุ่น TDS360
3. ไมโครคอมพิวเตอร์
4. วิดีโอแคปเจอร์การ์ด LifeView รุ่น Flyvideo 98 EZ
5. ชุดควบคุมการสแกนของลำอิเล็กตรอนและสร้างสัญญาณภาพที่พัฒนาขึ้น
6. ชุดหัววัดสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่พัฒนาขึ้น
7. โปรแกรมที่พัฒนาขึ้น

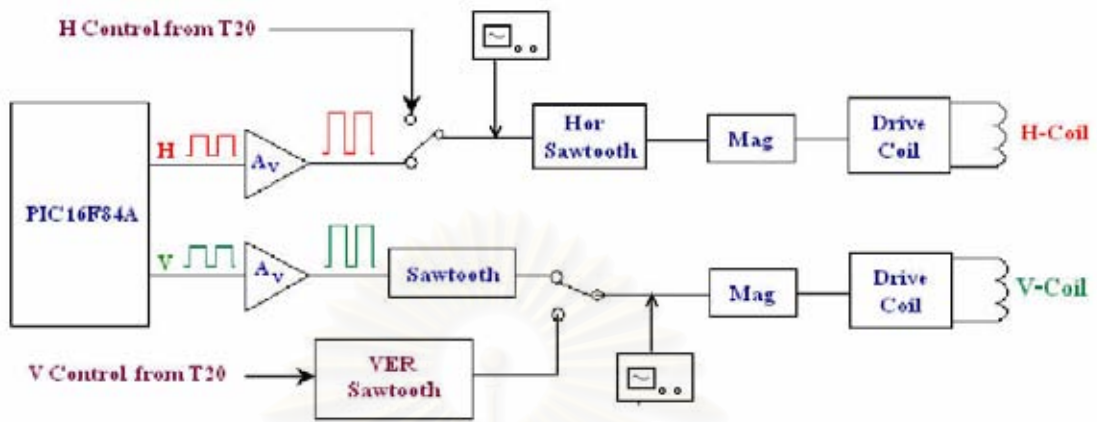
4.2 การทดสอบส่วนควบคุมการสแกนลำอิเล็กตรอน

การทดสอบส่วนควบคุมลำอิเล็กตรอนจะแบ่งเป็น 2 ส่วน ได้แก่ การทดสอบรูปสัญญาณของวงจรกำเนิดสัญญาณและการทดสอบวงจรกำเนิดสัญญาณภาพคอมพิวเตอร์

4.2.1 การทดสอบรูปสัญญาณของวงจรกำเนิดสัญญาณ

เนื่องจากงานวิจัยนี้ออกแบบชุดควบคุมการสแกนของลำอิเล็กตรอนบนพื้นฐานการใช้ขดลวดสแกนและชุดขับกระแสขดลวดของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนรุ่น T20 ดังนั้นการทดสอบชุดควบคุมลำอิเล็กตรอน จะทดสอบโดยจ่ายสัญญาณควบคุมลำอิเล็กตรอนจากระบบที่พัฒนาขึ้นแทนส่วนกำเนิดสัญญาณควบคุมของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนและวัดสัญญาณควบคุม

ที่เกิดขึ้น ที่ตำแหน่งก่อนเข้าสู่ชุดขับกระแสขดลวด และ เปรียบเทียบรูปแบบสัญญาณกับระบบเดิม ดังแสดงในรูปที่ 4.1

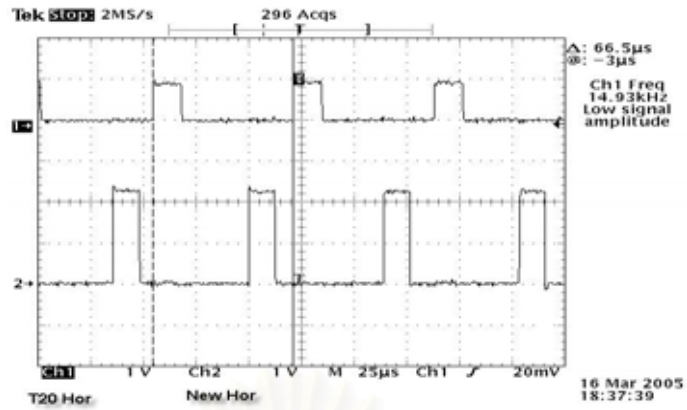


รูปที่ 4.1 แสดงตำแหน่งทดสอบรูปสัญญาณ

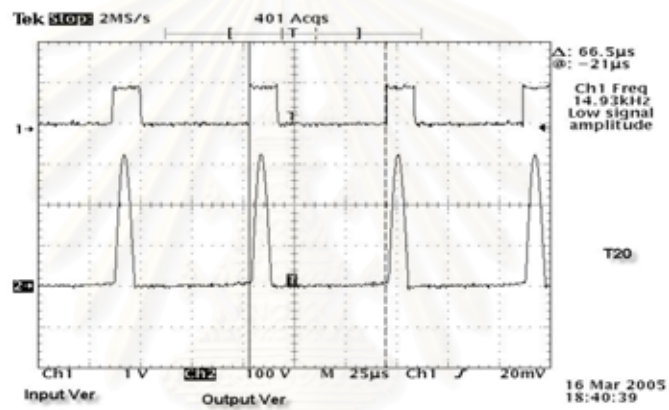
ผลทดสอบรูปสัญญาณของวงจรกำเนิดสัญญาณได้แก่

1. ผลทดสอบรูปสัญญาณ Sync ทางแนวนอน (Hor sync) แสดงในรูปที่ 4.2 พบว่า ความถี่สัญญาณของระบบเดิมเท่ากับ 14.93 kHz ขณะที่ระบบที่พัฒนาขึ้นมีความถี่ 15.57 kHz
2. ผลเปรียบเทียบรูปสัญญาณอินพุตและสัญญาณขับวงจรทางออกในแนวนอน แสดงในรูปที่ 4.3 และ 4.4
3. ผลเปรียบเทียบรูปสัญญาณอินพุตและสัญญาณขับวงจรทางออกในแนวตั้ง แสดงในรูปที่ 4.5 และ 4.6

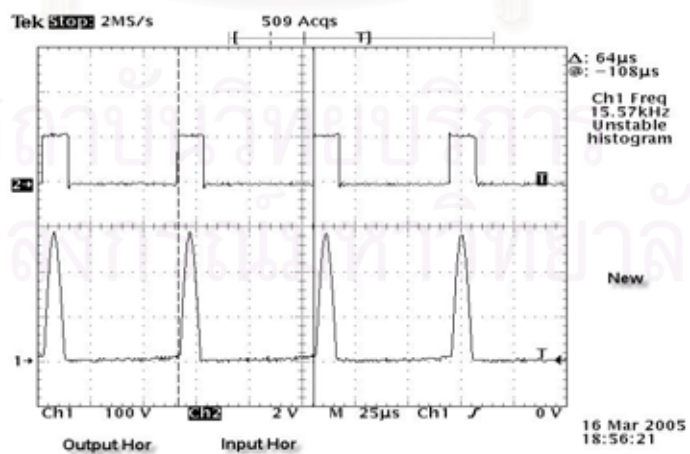
เมื่อเปรียบเทียบสัญญาณอินพุตของระบบที่พัฒนาขึ้นกับระบบเดิม พบว่าสัญญาณควบคุมของระบบที่พัฒนาขึ้นมีคาบเวลาต่างจากระบบเดิม ทั้งนี้เนื่องจากระบบที่พัฒนาขึ้นอ้างอิงกับระบบสัญญาณวิดีโอแบบ EU/PAL ส่วนระบบเดิมเป็นแบบ US/NTSC สัญญาณควบคุมลำโเล็กตรอนแนวนอนของระบบที่พัฒนาขึ้นมีขนาดสูงกว่าระบบเดิม เนื่องจากอัตราขยายโดยรวมสูงกว่าเดิม ส่วนสัญญาณควบคุมลำโเล็กตรอนแนวตั้งของระบบที่พัฒนาขึ้น ต้องปรับให้เหมาะสมกับการทำงานของ Scanning coil จากผลการทดสอบข้างต้นสรุปว่าส่วนควบคุมการสแกนของลำโเล็กตรอนสามารถกำเนิดสัญญาณควบคุมการสแกนของลำโเล็กตรอนได้ใกล้เคียงกับระบบเดิม



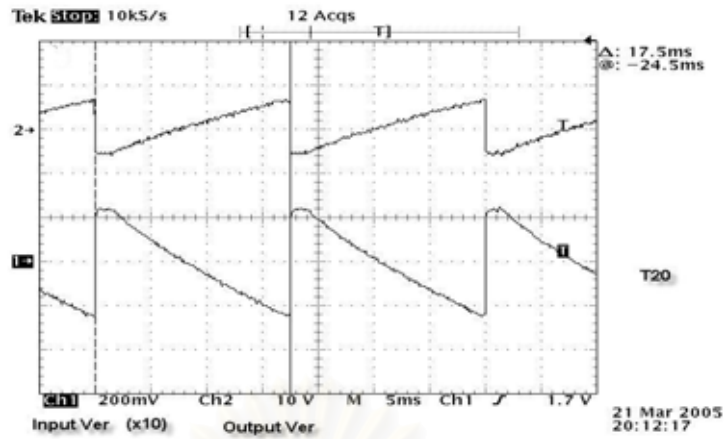
รูปที่ 4.2 เปรียบเทียบสัญญาณอินพุท Hor ของ T20 และ ระบบที่พัฒนา



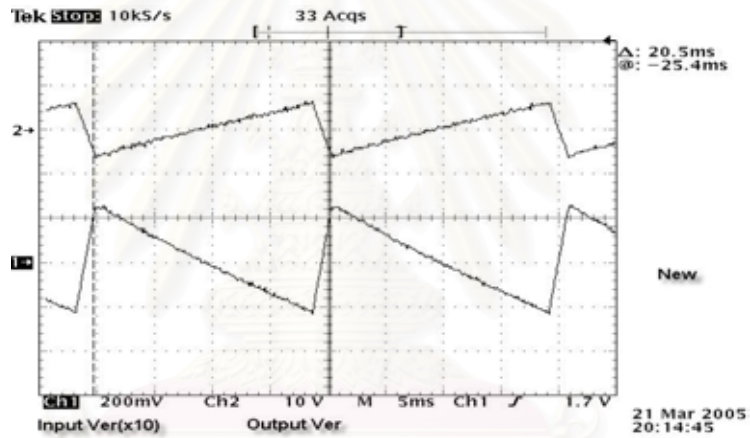
รูปที่ 4.3 สัญญาณอินพุทและเอาต์พุท Hor ของ T20



รูปที่ 4.4 สัญญาณอินพุทและเอาต์พุท Hor ของระบบที่พัฒนา



รูปที่ 4.5 สัญญาณอินพุตและเอาต์พุต Ver ของ T20

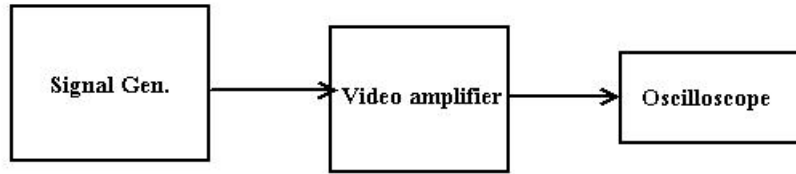


รูปที่ 4.6 สัญญาณอินพุตและเอาต์พุต Ver ของระบบที่พัฒนา

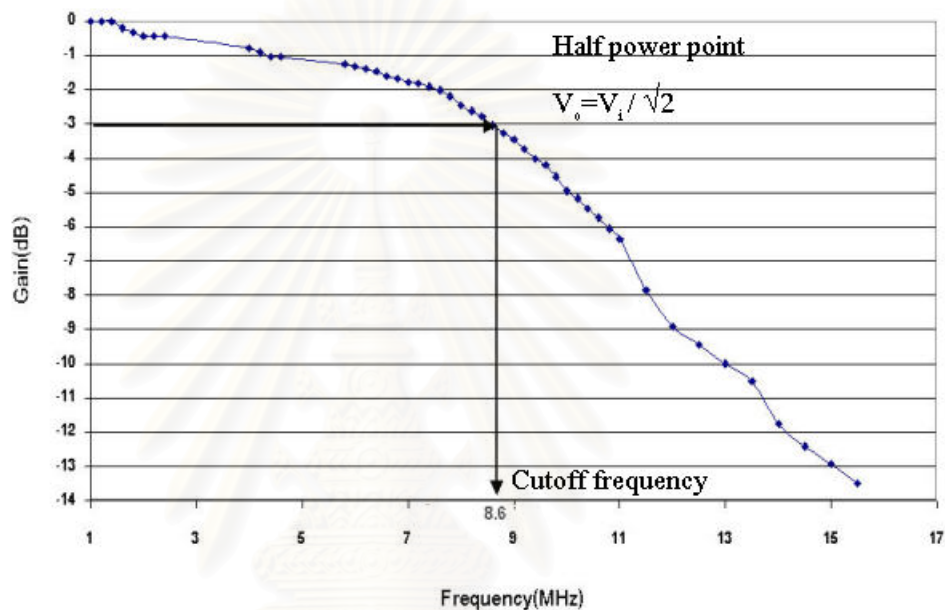
4.2.2 การทดสอบวงจรกำเนิดสัญญาณภาพคอมพิวเตอร์

4.2.2.1 การตอบสนองของวงจรมายสัญญาณภาพ

เนื่องจากวงจรมายสัญญาณวิดีโอต้องการแบนด์วิดท์ที่กว้าง โดยเฉพาะด้านความถี่สูงจะต้องตอบสนองได้ 4-5 MHz การออกแบบวงจรมายสัญญาณจะต้องควบคุม Gain bandwidth product ให้วงจรมายรักษาค่าผลของการตอบสนองความถี่สูงไว้ได้ โดยจัดวงจรดังรูปที่ 4.7 จำยสัญญาณอินพุตขนาด 1 V วัตถุประสงค์สัญญาณเอาต์พุต และคำนวณอัตราขยายที่ความถี่ต่างๆ เป็น dB ให้ผลการทดสอบดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.7 แผนภาพการจับวงจรทดสอบ

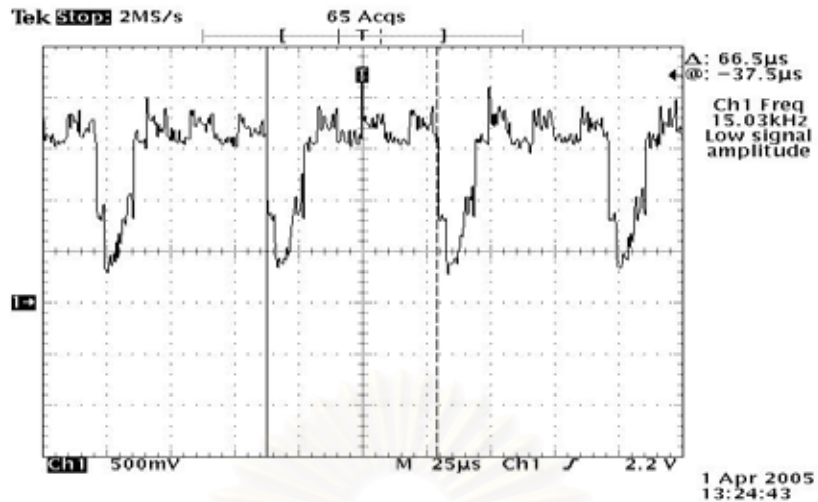


รูปที่ 4.8 เส้นกราฟทดสอบการตอบสนองความถี่ของวงจรขยายสัญญาณภาพ

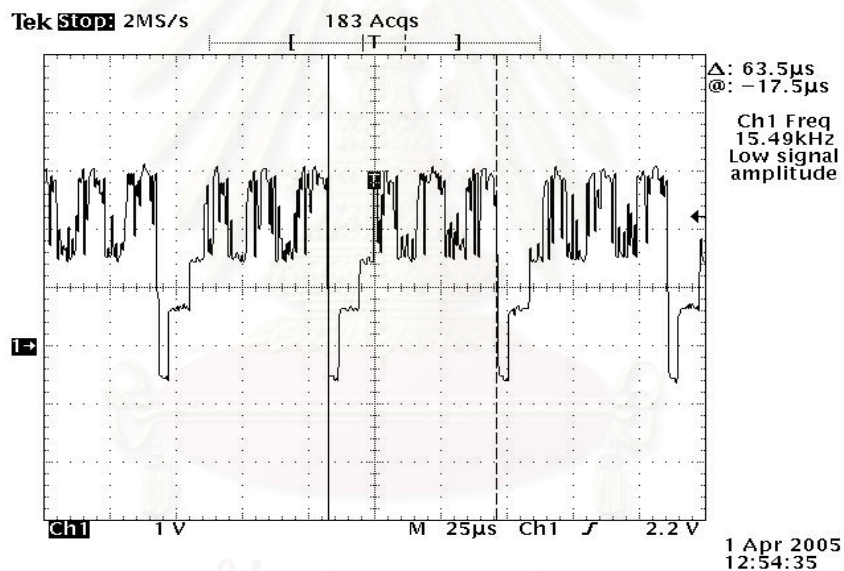
จากผลการทดสอบการตอบสนองความถี่ของวงจรขยายสัญญาณภาพ พบว่าวงจรขยายสัญญาณภาพตอบสนองต่อความถี่ในช่วง 0-8.6 MHz สามารถใช้ขยายสัญญาณภาพตามความต้องการของวงจรที่กล่าวไว้ในข้อ 3.3.2 ได้

4.2.2.2 การทดสอบวงจรกำเนิดสัญญาณภาพ

การกำเนิดสัญญาณภาพคอมโพสิตจะต้องปรับระดับสัญญาณองค์ประกอบได้แก่ สัญญาณเข้าจังหวะทางแนวนอนและแนวตั้ง สัญญาณแบล็ก และสัญญาณภาพให้ได้สัดส่วน ไม่เกิดการรบกวนกัน ตามมาตรฐานของสัญญาณภาพ และทำการทดสอบสัญญาณผลเปรียบเทียบสัญญาณภาพคอมโพสิตระหว่างวงจรกำเนิดสัญญาณภาพของ T20 และระบบที่พัฒนาขึ้นแสดงในรูปที่ 4.9 และ 4.10



รูปที่ 4.9 สัญญาณภาพคอมโพสิตจากระบบกำเนิดสัญญาณภาพของ T20



รูปที่ 4.10 สัญญาณภาพคอมโพสิตจากระบบกำเนิดสัญญาณภาพที่พัฒนาขึ้น

จากผลเปรียบเทียบสัญญาณภาพคอมโพสิตระหว่างวงจรกำเนิดสัญญาณภาพของ T20 และระบบที่พัฒนาขึ้น พบว่าสัดส่วนสัญญาณองค์ประกอบได้แก่สัญญาณซิงค์ทางแนวนอน สัญญาณแบล็คทางแนวนอนและสัญญาณภาพของระบบที่พัฒนาขึ้น มีค่าใกล้เคียงกับระบบเดิม แต่ความถี่ทางแนวนอนจะต่างกัน เนื่องจากมาตรฐานของระบบโทรทัศน์และขนาดสัญญาณของระบบที่พัฒนาขึ้นสูงกว่าเนื่องจากต้องจ่ายสัญญาณตามข้อกำหนดแคปเจอร์บอร์ดให้สามารถทำงานได้

4.3 การทดสอบคุณภาพของสัญญาณภาพคอมโพสิต

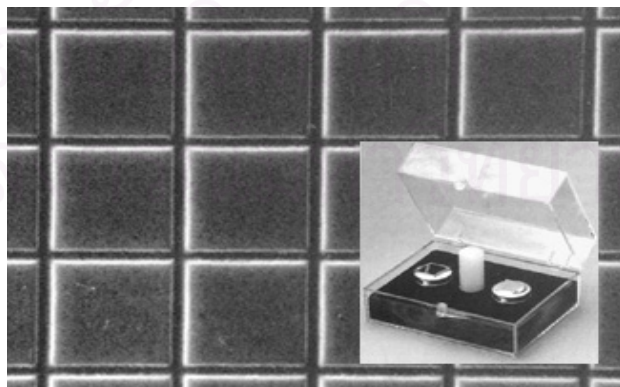
ส่วนควบคุมการสแกนของลำอิเล็กตรอนที่สามารถทำงานร่วมกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนรุ่น T20 ได้ จะต้องให้สัญญาณภาพที่เข้าจังหวะ และมีความเป็นเชิงเส้น (Linearity)

1. การทดสอบว่าสัญญาณภาพเข้าจังหวะ ทำโดยดูภาพวิดีโอที่เกิดบนจอมอนิเตอร์ ซึ่งจะต้องเป็นภาพนิ่ง ไม่เลื่อนหรือล้า
2. การทดสอบความเป็นเชิงเส้นของสัดส่วนภาพในแนวนอนและแนวตั้งจากจอแคโทดเรย์เดิมเปรียบเทียบกับจอมอนิเตอร์ โดยใช้ชิ้นตัวอย่างมาตรฐาน SIRA ที่มีลักษณะเป็นตารางสี่เหลี่ยมจัตุรัส มีระยะระหว่างเส้นตาราง เท่ากัน มีขนาด 19.7 เส้น/mm สำหรับสอบเทียบในกำลังขยายต่ำ ดังรูปที่ 4.11 นำมาวัดสัญญาณอิเล็กตรอนทุกขุมิด้วยหัววัดสัญญาณอิเล็กตรอนทุกขุมิของ T20 และใช้ส่วนควบคุมการสแกนลำอิเล็กตรอนและส่วนสร้างสัญญาณภาพคอมโพสิตของระบบที่พัฒนาขึ้น บันทึกภาพที่ได้แล้วนำไปหาระยะระหว่างเส้นตารางทั้งในแนวตั้งและแนวนอน และคำนวณค่าความไม่เป็นเชิงเส้นด้วยสมการ 4.1

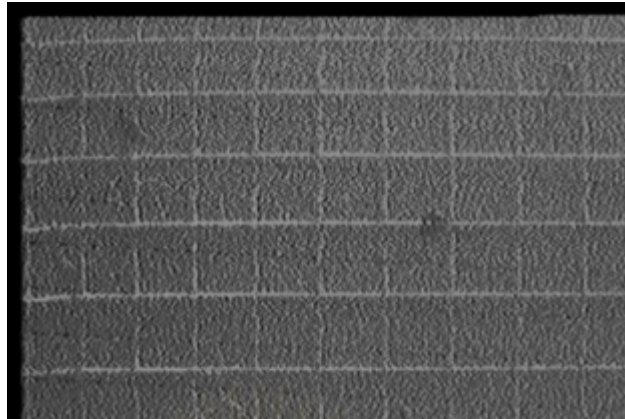
$$\text{ความไม่เป็นเชิงเส้น (\%)} = \frac{(D-C) * 100}{C} \quad (4.1)$$

D = ระยะระหว่างเส้นตาราง (จุดภาพ)

C = ระยะระหว่างเส้นตารางของกึ่งกลางจอ (จุดภาพ) เนื่องจากถูกเบี่ยงเบนโดยสนามแม่เหล็กจากขดลวดสแกนน้อยที่สุด



รูปที่ 4.11 ชิ้นตัวอย่างมาตรฐาน SIRA สำหรับปรับเทียบความเป็นเชิงเส้นของภาพ [9]



รูปที่ 4.12 ภาพเส้นตารางรูปจตุรัสจากจีนตัวอย่างมาตรฐานหลังเปรียบเทียบที่กำล้งขยาย 200 เท่า

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบความไม่เป็นเชิงเส้นในแนวตั้งและแนวนอน

New system

Vertical (From bottom to top)

Position	Space (pixels)	Nonlinear (%)
1	42	10.53
2	41	7.89
3	38	0.00
4	35	-7.89
5	30	-21.05

T20

Vertical (From bottom to top)

Position	Space (pixels)	Nonlinear (%)
1	36	10.77
2	33	0.00
3	32	-3.08
4	33	0.00
5	31	-6.15
6	33	1.54

New system

Horizontal (From left to right)

Position	Space (pixels)	Nonlinear (%)
1	31	0.00
2	26	-16.13
3	29	-6.45
4	32	3.23
5	31	0.00
6	32	3.23
7	33	6.45
8	34	9.68
9	32	3.23

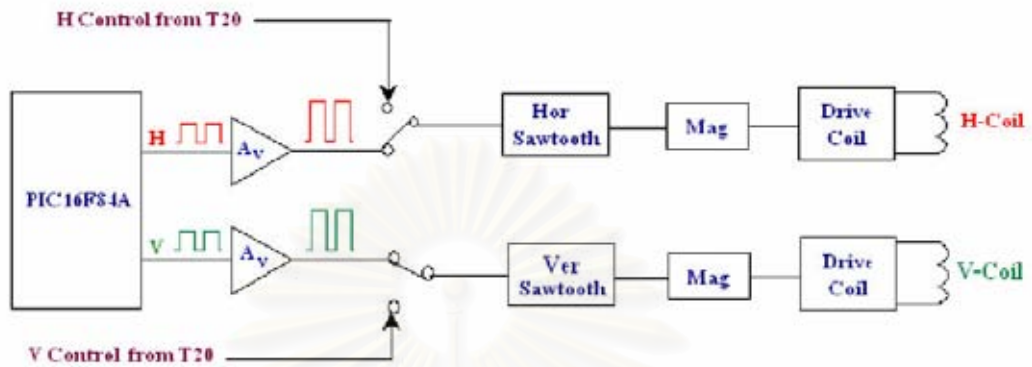
T20

Horizontal (From left to right)

Position	Space (pixels)	Nonlinear (%)
1	30	7.14
2	30	7.14
3	29	3.57
4	28	-1.79
5	28	0.00
6	27	-3.57
7	28	0.00
8	29	1.79
9	32	14.29

จากการคุณภาพจุดทอรรสน์อิเล็กทรอนิกส์ที่เกิดบนจอมอนิเตอร์ ภาพไม่เลื่อนหรือลัมแสดงถึงสัญญาณเข้าจังหวะทำงานได้สมบูรณ์ จากผลการทดสอบในตารางที่ 4.1 พบว่าระบบควบคุมการสแกนลำอิเล็กตรอนมีความเป็นไม่เชิงเส้นในแนวตั้งและแนวนอน 21.05%, 16.13% ตามลำดับ โดย

ลักษณะของภาพในแนวตั้งด้านบนจะบีบเข้า ในขณะที่ด้านล่างจะห่างออก จึงทำการทดสอบความไม่เป็นเชิงเส้นเพิ่มเติมโดยจ่ายสัญญาณควบคุมการสแกนลำอิเล็กตรอนในแนวตั้งเป็นสัญญาณเข้าจิ้งหะ ดังแสดงจุดจ่ายสัญญาณในรูปที่ 4.13 และผลการทดสอบดังตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.13 แสดงจุดจ่ายสัญญาณควบคุมการสแกนลำอิเล็กตรอนด้วยสัญญาณเข้าจิ้งหะ

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบความไม่เป็นเชิงเส้นในแนวตั้งและแนวนอนเมื่อจ่ายสัญญาณควบคุมแนวตั้งเป็นสัญญาณเข้าจิ้งหะ

New system
Vertical (From bottom to top)

Position	Space (pixels)	Nonlinear (%)
1	33	17.86
2	32	14.29
3	30	7.14
4	28	0.00
5	25	-10.71
6	24	-14.29
7	19	-32.14

T20
Vertical (From bottom to top)

Position	Space (pixels)	Nonlinear (%)
1	36	10.77
2	33	0.00
3	32	-3.08
4	33	0.00
5	31	-6.15
6	33	1.54

New system
Horizontal (From left to right)

Position	Space (pixels)	Nonlinear (%)
1	23	-25.81
2	28	-9.68
3	28	-9.68
4	31	0.00
5	31	0.00
6	32	3.23
7	33	6.45
8	30	-3.23
9	32	3.23

T20
Horizontal (From left to right)

Position	Space (pixels)	Nonlinear (%)
1	30	7.14
2	30	7.14
3	29	3.57
4	28	-1.79
5	28	0.00
6	27	-3.57
7	28	0.00
8	29	1.79
9	32	14.29

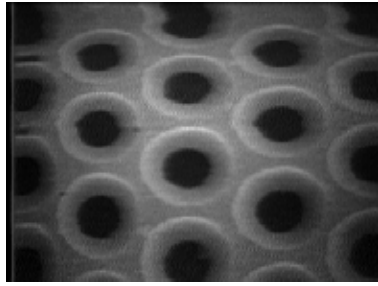
จากผลการทดสอบในตารางที่ 4.2 พบว่าลักษณะของภาพแนวตั้งยังคงบีบเข้าในด้านบน และห่างออกในด้านล่าง ซึ่งความไม่เป็นเชิงเส้นดังกล่าวเป็นผลมาจากการสแกนในโหมดโทรมที่ที่มีอัตราสแกนสูง สนามแม่เหล็กตกค้างในขดลวดสแกนจะรบกวนสัญญาณขับเคลื่อนที่ควบคุมการสแกนลำอิเล็กตรอนที่จ่ายมาต่อเนื่อง ทำให้สูญเสียความเป็นเชิงเส้น ซึ่งพบความไม่เป็นเชิงเส้นในแนวตั้งลักษณะเดียวกันนี้ในภาพบนจอแคโทดเรย์เมื่อใช้ระบบควบคุมการสแกนลำอิเล็กตรอนของ T20 เช่นกัน

4.4 การทดสอบคุณภาพของภาพจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

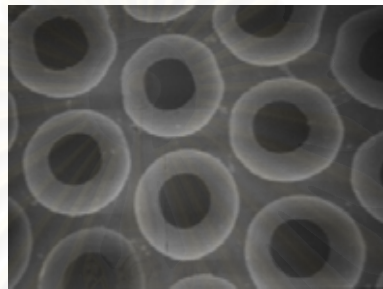
การทดสอบคุณภาพของภาพจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของระบบที่พัฒนาขึ้น จะทดสอบโดยใช้ชิ้นตัวอย่างนำมาวิเคราะห์ด้วยระบบควบคุมการสแกนลำอิเล็กตรอนและหัววัดสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่พัฒนาขึ้น ปรับ Spot size และ Contrast จนได้ภาพที่คมชัดที่สุด เปรียบเทียบคุณภาพของภาพเทียบกับระบบดั้งเดิมของ T20 ที่กำลังขยายเดียวกัน ในแง่ความคมชัด ความเปรียบต่าง และความสามารถในการแจกแจงรายละเอียดของภาพ

4.4.1 ความคมชัดของภาพ

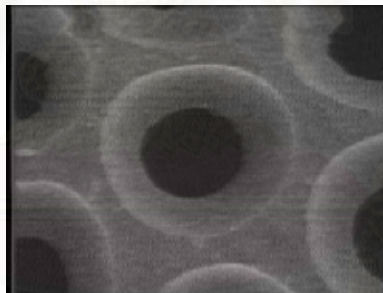
การทดสอบความคมชัดของภาพทดสอบ โดยเปรียบเทียบภาพจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่ได้จากระบบควบคุมการสแกนลำอิเล็กตรอนและสร้างภาพสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่พัฒนาขึ้นกับระบบดั้งเดิมของ T20 ด้วยตาเปล่า โดยใช้ชิ้นตัวอย่างเป็นตะแกรง Mask ของจอมอนิเตอร์ เปรียบเทียบภาพจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่กำลังขยาย 200 และ 500 เท่า และชิ้นตัวอย่างเป็นเกสรดอกไม้ (Pollen) เปรียบเทียบภาพจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่กำลังขยาย 1500 และ 3500 เท่า ดังแสดงภาพจุลทรรศน์อิเล็กตรอนเปรียบเทียบในรูปที่ 4.14 ถึง 4.21



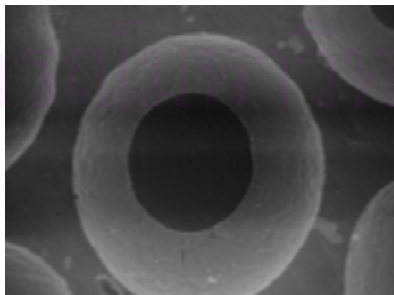
รูปที่ 4.14 ภาพ Mask กำลังขยาย 200 เท่าของระบบที่พัฒนาขึ้น



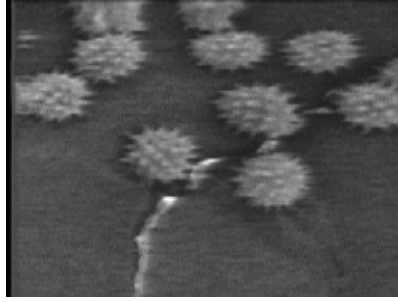
รูปที่ 4.15 ภาพ Mask กำลังขยาย 200 เท่าของระบบดั้งเดิม



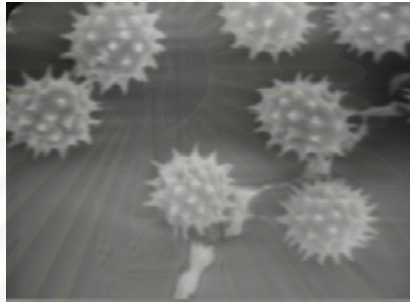
รูปที่ 4.16 ภาพ Mask กำลังขยาย 500 เท่าของระบบที่พัฒนาขึ้น



รูปที่ 4.17 ภาพ Mask กำลังขยาย 500 เท่าของระบบดั้งเดิม



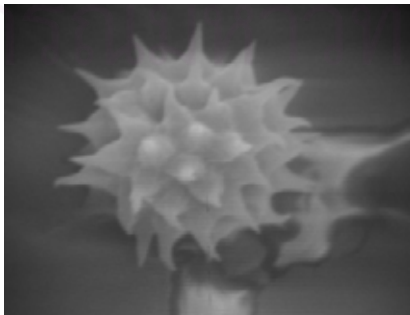
รูปที่ 4.18 ภาพ Pollen กำลังขยาย 1500 เท่าของระบบที่พัฒนาขึ้น



รูปที่ 4.19 ภาพ Pollen กำลังขยาย 1500 เท่าของระบบดั้งเดิม



รูปที่ 4.20 ภาพ Pollen กำลังขยาย 3500 เท่าของระบบที่พัฒนาขึ้น



รูปที่ 4.21 ภาพ Pollen กำลังขยาย 3500 เท่าของระบบดั้งเดิม

ผลการทดสอบความคมชัดพบว่า ภาพจากระบบที่พัฒนาขึ้นมีความคมชัดน้อยกว่ากับระบบดั้งเดิมเนื่องจากมีสัญญาณรบกวนในภาพ

4.4.2 ความเปรียบเทียบของภาพ

การทดสอบความเปรียบเทียบของภาพทดสอบโดยนำข้อมูลภาพเกสรดอกไม้ที่กำลังขยาย 3500 เท่าที่ตำแหน่งเส้นสแกน (Line scan) เดียวกันมา Plot graph แล้วเปรียบเทียบค่าความเปรียบต่างจาก Line scan นั้น ระหว่างระบบที่พัฒนาขึ้นและระบบดั้งเดิม โดย

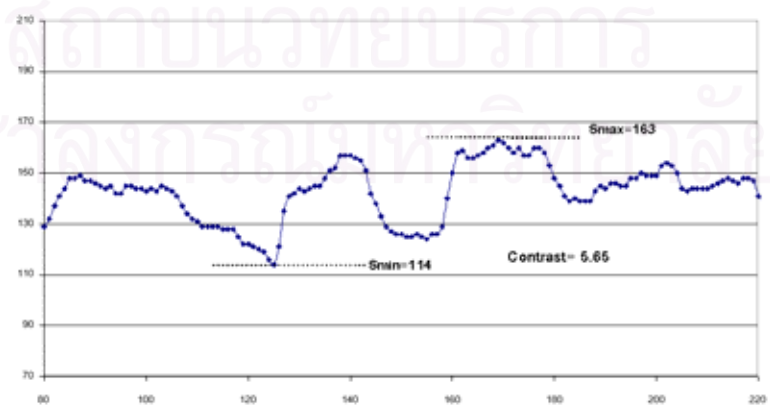
$$\text{ความเปรียบเทียบของภาพ} = \frac{S_{\max} - S_{\min}}{S_{\max} + S_{\min}} \quad (4.2)$$

S_{\max} = ระดับสัญญาณภาพสูงสุดของเส้นสแกนนั้น

S_{\min} = ระดับสัญญาณภาพต่ำสุดของเส้นสแกนนั้น



รูปที่ 4.22 Line scan ของภาพจากที่พัฒนาขึ้น

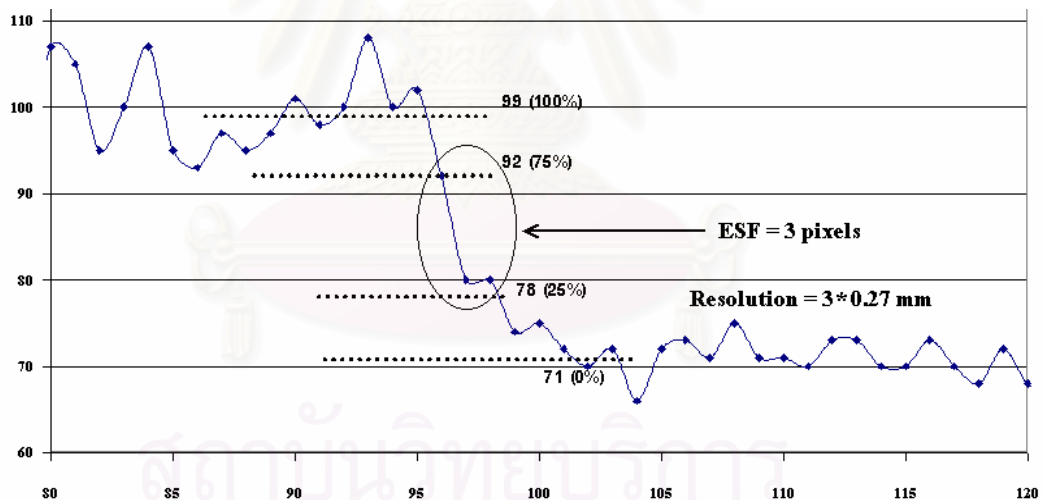


รูปที่ 4.23 Line scan ของภาพจากระบบระบบดั้งเดิม

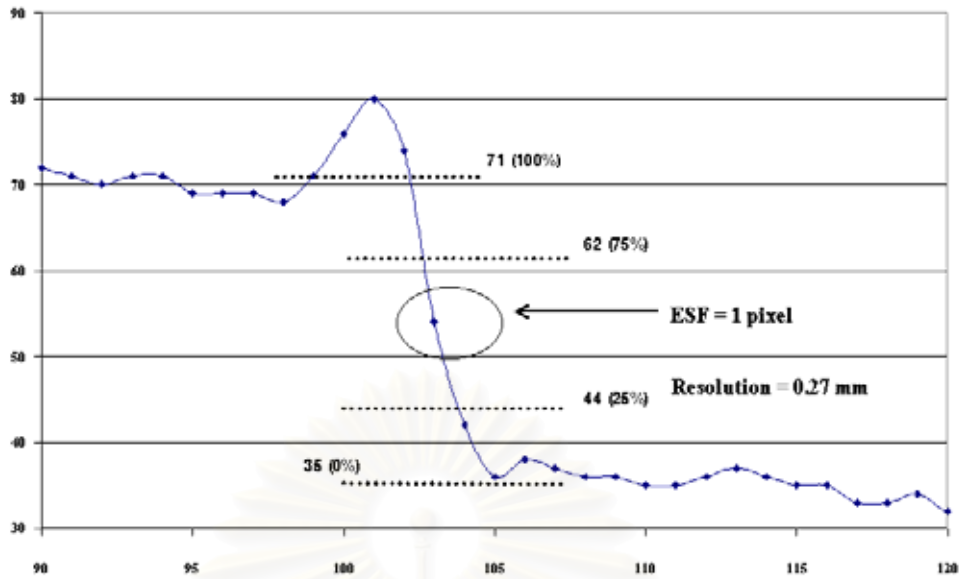
จากผลการทดสอบความเปรียบต่างของภาพ พบว่าค่าความเปรียบต่างของภาพของระบบที่พัฒนาขึ้นมีค่า 2.75 น้อยกว่าระบบดั้งเดิมซึ่งมีค่า 5.65 เนื่องจากสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในภาพ จุลทรรศน์อิเล็กตรอน

4.2.3 ความสามารถในการแจกแจงรายละเอียดของภาพ

ความสามารถในการแจกแจงรายละเอียดของภาพทดสอบโดยนำข้อมูลภาพจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่ได้มาวิเคราะห์หาค่า Edge spread function (ESF) ของรอยต่อวัสดุในชิ้นตัวอย่าง ในทางอุดมคติที่รอยต่อวัสดุในชิ้นตัวอย่าง โปรไฟล์ของภาพจะมีความชันในแนวตั้งสูง แต่ในทางปฏิบัติ โปรไฟล์ของภาพจะมีความชันตามแต่คุณภาพของภาพนั้นๆ โดยค่า ESF กำหนดจากระยะจุดภาพเมื่อความชันโปรไฟล์ของภาพลดลงจาก 75% เป็น 25% จากค่า ESF ที่ได้นำมาคูณกับขนาดของจุดภาพ(ในการทดสอบนี้ใช้จ้อมอนิเตอร์ที่มีขนาดจุดภาพ 0.27 mm) จะได้ค่าการแจกแจงรายละเอียดของภาพ ดังแสดงค่า ESF ของภาพจากระบบที่พัฒนาขึ้นในรูปที่ 4.24 และค่า ESF ของภาพจากระบบดั้งเดิมในรูปที่ 4.25



รูปที่ 4.24 ค่า ESF ของภาพจากระบบที่พัฒนาขึ้น



รูปที่ 4.25 ค่า ESF ของภาพจากระบบดั้งเดิม

จากผลการทดสอบการแจกแจงรายละเอียดของภาพในรูปที่ 4.24 และ 4.25 พบว่าการแจกแจงรายละเอียดของภาพจุลทรรศน์อิเล็กตรอนจากระบบที่พัฒนาขึ้นมีค่าด้อยกว่าระบบดั้งเดิม โดยพิจารณาได้จากค่า ESF ของภาพจากระบบที่พัฒนาขึ้นมีค่า 3 จุคภาพ ซึ่งมากกว่าระบบดั้งเดิมซึ่งมีค่าเพียง 1 จุคภาพ

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการพัฒนาระบบสแกนลำอิเล็กตรอนเพื่อสร้างภาพอิเล็กตรอนทิวติงกูมิและทดสอบการทำงานกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนรุ่น T20 ของบริษัท JEOL ทั้งในด้านการสร้างสัญญาณสแกนเพื่อควบคุมลำอิเล็กตรอน การสร้างสัญญาณภาพคอมโพสิต การสร้างหัววัดสัญญาณอิเล็กตรอน และการแสดงภาพสัญญาณอิเล็กตรอนบนจอไมโครคอมพิวเตอร์ สรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

- 5.1.1 ผลการออกแบบและสร้างระบบกำเนิดสัญญาณควบคุมการสแกน สามารถประยุกต์ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์กำเนิดสัญญาณเข้าจังหวะได้ ซึ่งทำให้วงจรมีขนาดเล็ก มีความยืดหยุ่นในการปรับความถี่มาตรฐานในการสแกนของระบบโทรทัศน์โดยไม่ต้องปรับเปลี่ยนส่วนของฮาร์ดแวร์ (Hardware) จากผลการเปรียบเทียบรูปสัญญาณ (Waveform) พบว่าระบบกำเนิดสัญญาณควบคุมการสแกนสามารถกำเนิดสัญญาณควบคุมการสแกนของลำอิเล็กตรอนได้ใกล้เคียงกับระบบเดิม
- 5.1.2 ผลการออกแบบและสร้างระบบกำเนิดสัญญาณภาพคอมโพสิต สามารถใช้วงจรปรับระดับและรวมสัญญาณอย่างง่าย จัดระดับสัญญาณให้เข้ากับระบบมาตรฐานได้ โดยสัดส่วนองค์ประกอบของสัญญาณใกล้เคียงกับระบบเดิม ปัญหาของระบบอยู่ที่การเลือก Op amp เพื่อนำมาจัดวงจรขยายในอัตราขยายที่ต้องการและต้องตอบสนองความถี่ในย่าน 4-5 MHz ซึ่งเป็นย่านความถี่ตอบสนองของสัญญาณภาพสำหรับอุปกรณ์ที่สำคัญคือสัญญาณรบกวนที่มีผลต่อคุณภาพของภาพ
- 5.1.3 การสร้างหัววัดสัญญาณอิเล็กตรอนทิวติงกูมิจะมีปัญหาหลักอยู่ 3 ส่วนได้แก่ การจ่ายไฟฟ้าสูงให้กับขั้วไฟฟ้า (+10kV) สำหรับเหนี่ยวนำอิเล็กตรอนทิวติงกูมิ จะต้องคำนึงถึงการ Discharge การตอบสนองสัญญาณของ PMT ซึ่งมีวงจรสำเร็จรูปอยู่ภายใน อาจไม่เหมาะสม ดังนั้นการเลือก PMT เดี่ยวและออกแบบวงจรสนับสนุนการทำงานในลักษณะการวัดกระแสและตอบสนองสัญญาณความถี่สูง จะให้ผลที่ดีกว่า รวมทั้งการสร้าง Vacuum feed-through port สำหรับติดตั้งหัววัดสัญญาณอิเล็กตรอนกับคอลัมน์ของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนจะต้องระวังเรื่องการรั่วของสุญญากาศ

- 5.1.4 ผลทดสอบคุณภาพของสัญญาณภาพร่วมกับแคปเจอร์บอร์ด และโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น พบว่าสัญญาณเข้าจังหวะได้สมบูรณ์ การแสดงผลภาพมีความละเอียดภาพ 320x240 จุดภาพ จากการใช้ชิ้นตัวอย่างมาตรฐาน ปรับเทียบสเกลขนาดภาพ พบว่าความเป็นเชิงเส้นในแนวนอนและแนวตั้ง มีความคลาดเคลื่อน 16.13 % และ 21.05 % ตามลำดับ ความคลาดเคลื่อนนี้เกิดจากการสูญเสียรูปสัญญาณสแกนจากผลของสนามแม่เหล็กที่ตกค้างในคอยล์ในลำดับสแกนถัดมา เนื่องจากความถี่สัญญาณสแกนในระบบโทรทัศน์ที่ส่งไปควบคุมคอยล์สแกนลำอิเล็กตรอน มีความถี่สูง ซึ่งเป็นปัญหาหลักในการปรับความเป็นเชิงเส้นของภาพจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนในโหมดโทรทัศน์
- 5.1.5 ผลทดสอบคุณภาพของภาพจากสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิ เปรียบเทียบกับระบบดั้งเดิมของกล้องจุลทรรศน์ T20 พบว่า ภาพจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของระบบที่พัฒนาขึ้นมีความเปรียบต่างและความคมชัดทัดเทียมกัน แต่ยังมีสัญญาณรบกวน (Noise) ปรากฏอยู่ในสัญญาณภาพที่ทำการกรองความถี่แล้ว เนื่องจากระบบกราวนด์ ของวงจรที่พัฒนาขึ้นยังไม่รวมกับระบบกราวนด์ของเครื่อง SEM อย่างสมบูรณ์

5.2 วิจัยผลการวิจัย

- 5.2.1 การออกแบบและสร้างวงจรขยายสัญญาณภาพ และ หัววัดสัญญาณอิเล็กตรอน จะต้องคำนึงถึงเรื่องสัญญาณรบกวน ทั้งจากแหล่งจ่ายไฟฟ้า ระบบกราวนด์ของแผ่นวงจร สายส่งสัญญาณ และการจัด Housing ของวงจร ตลอดจนตำแหน่งของการติดตั้งวงจรจะต้องมีการป้องกันสัญญาณรบกวนจากภายนอก รวมทั้งการกรองสัญญาณรบกวนจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าอย่างละเอียด
- 5.2.2 เนื่องจากการสแกนในโหมดโทรทัศน์ มีความเร็วในการสแกนสูง ทำให้สัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่มายังหัววัดสัญญาณน้อย ต้องปรับอัตราขยายของ PMT มาก ทำให้สัญญาณรบกวนภาพมีสูง
- 5.2.3 จากผลการพัฒนาระบบสแกนลำอิเล็กตรอน เพื่อสร้างสัญญาณภาพอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้ แสดงให้เห็นถึงความเป็นได้ในการปรับสมรรถนะของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนระบบดั้งเดิมที่ทำงานแบบ Analog SEM ให้สามารถทำงานในระบบ Digital SEM ซึ่งจะช่วยให้สามารถปรับปรุงคุณภาพของภาพด้วยเทคนิคกรรมวิธีสัญญาณ (DSP) และการจัดเก็บบันทึกภาพทำได้สะดวกและทันสมัย

5.2.4 ในการสแกนแบบโทมดโทรทัศน์ จะมีข้อจำกัดด้านความเป็นเชิงเส้นของภาพในแนวตั้งและแนวนอน จากผลของสนามแม่เหล็กตกค้าง (Residual magnetism) ในสแกนคอยล์ และยังจำกัดที่ความชัดเจนของภาพที่กำลังขยายสูงเกิน 10,000 เท่า

5.3 ข้อเสนอแนะ

- 5.3.1 ระบบควบคุมลำอิเล็กตรอนที่พัฒนาขึ้นมีความเร็วในการสแกนเพียงโทมดโทรทัศน์ ซึ่งสัญญาณภาพที่ได้จะไม่ละเอียดพอ การเพิ่มระบบการควบคุมการสแกนให้สามารถสแกนแบบซ้ำได้ จะทำให้คุณภาพของภาพจุลทรรศน์อิเล็กตรอนดีขึ้น
- 5.3.2 การศึกษาตำแหน่ง ระยะจากชิ้นตัวอย่าง ตลอดจนความเอียงของชิ้นตัวอย่างมีผลต่อปริมาณสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่วัดได้ด้วยหัววัดสัญญาณ มีผลต่อการจัดอัตราขยายสัญญาณภาพ จึงควรทดสอบตัวแปรเหล่านี้เพิ่มเติมจนได้สภาวะที่เหมาะสม
- 5.3.3 ควรมีการศึกษาวงจรอื่นๆที่มีความสำคัญต่อการสแกนลำอิเล็กตรอน เช่น วงจรขับสแกนคอยล์ วงจรปรับความเป็นเชิงเส้นในการสแกน และหัววัดสัญญาณอิเล็กตรอนที่มีความไวสูง และสัญญาณรบกวนต่ำ เพื่อให้ได้คุณภาพของภาพจุลทรรศน์อิเล็กตรอนสูง

รายการอ้างอิง

1. สุกสิทธิ์ คะวีรัตน์. การพัฒนาระบบสแกนรังสีกระเจิงกลับเพื่อแสดงภาพสองมิติ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาเทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.
2. Hiroyoshi Kazumori. New Secondary Electron Detection System Permit Observation of Non-Conductive Materials. Jeol News. Volume 37E, 2002
3. M.Akahori and H.Kawamoto. Secondary Electron Detection for Applying to Instrumentational Scanning Electron Microscope. Jeol News. Volume 37E, 2002
4. B.C.Berton. Scanning Electron Microscopy in the Next Millennium. Scanning Microscopy Volume 13, 1999
5. ศูนย์เชี่ยวชาญเทคโนโลยีสำหรับวิเคราะห์และทดสอบวัสดุ. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน. เอกสารประกอบการฝึกอบรม, กันยายน 2545
6. Iowa State University. Understanding how the SEM works . Available from :
<http://mse.iastate.edu/microscopy/path.html>
7. Joseph I. Goldstein and others. Scanning Electron Microscope and X-Ray Microanalysis. 2nd edition. : Plenum Press
8. สุวิทย์ ปุณณชัยยะ. Nuclear Radiation Detection and Instrumentation. เอกสารการสอนวิชา 2111606 นิเวศวิทยาระบบเทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538
9. SPI Supplies. Scintillators for TEM and SEM. Available from :
<http://www.2spi.com/catalog/scintill/scintill.html>
10. Knoll Glenn F. Radiation Detection and Measurement. New York: McGraw-Hill Book Company, 1983
11. Lawrence Eugene Murr. Electron Optical Applications in Materials Science. University of Southern California: McGraw-Hill Book Company, 1970
12. บุญชาติ เนติศักดิ์. ทฤษฎีและปฏิบัติเครื่องรับโทรทัศน์. เล่มที่ 1. ซีเอ็ดดูเคชั่น, 2541
13. Instructions for T20 Scanning Microscope : Jeol Tokyo Japan
14. ประพนธ์ อัสวภาณวัฒน์. เทคนิคการพัฒนาโปรแกรมมัลติมีเดีย : VDO Capture. MICROCOMPUTER. , ธันวาคม 2544 : หน้า 154.

บรรณานุกรม

1. Ian M.Watt. The Principles and Practice of Electron Microscope. 2nd edition. : Cambridge University Press, 1997
2. I.C.H. Phang and D.S.H. Chan. Scanning Electron Microscope Theory and Applications. Department of Electrical Engineering, National University of Singapore.
3. Bernard Grob. Basic Television Principles and servicing. 4th edition. : Kosaido Printing Co., Ltd. Japan, 1975



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

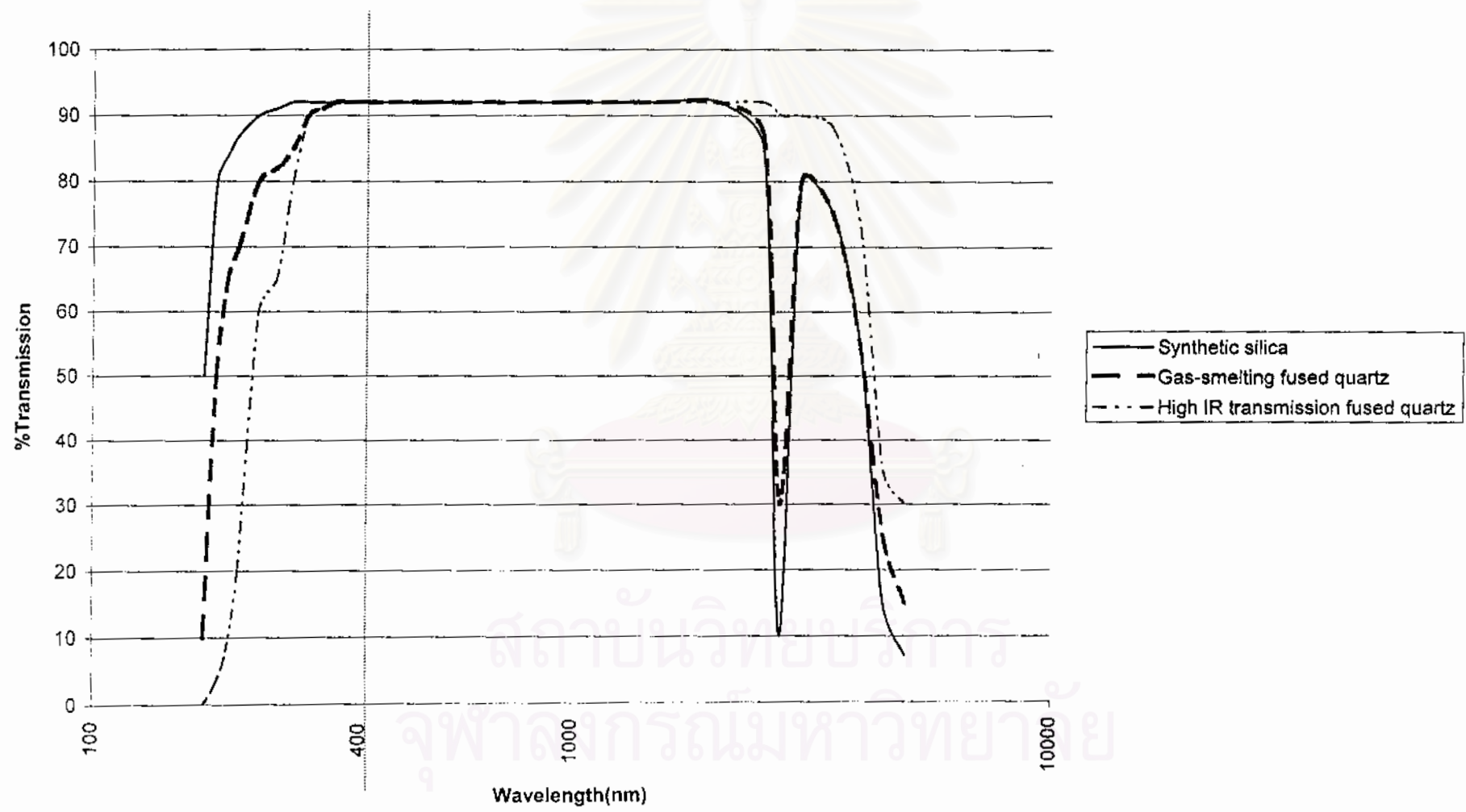
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก. ข้อมูลเทคนิคของแท่งควอทซ์

Quartz Rod property

Property	Typical Values
Density	2.2x10 ³ kg/m ³
Hardness	5.5 - 6.5 Mohs' Scale 570 KHN 100
Design Tensile Strength	4.8x10 ⁷ Pa (N/m ²) (7000 psi)
Design Compressive Strength	Greater than 1.1 x 10 ⁹ Pa (160,000 psi)
Bulk Modulus	3.7x10 ¹⁰ Pa (5.3x10 ⁶ psi)
Rigidity Modulus	3.1x10 ¹⁰ Pa (4.5x10 ⁶ psi)
Young's Modulus	7.2x10 ¹⁰ Pa (10.5x10 ⁶ psi)
Poisson's Ratio	0.17
Coefficient of Thermal Expansion	5.5x10 ⁻⁷ cm/cm . Celsius (20 Celsius-320 Celsius)
Thermal Conductivity	1.4 W/m . Celsius
Specific Heat	670 J/kg . Celsius
Softening Point	1683 Celsius
Annealing Point	1215 Celsius
Strain Point	1120 Celsius
Electrical Resistivity	7x10 ⁷ ohm cm (350 Celsius)
Dielectric Properties	(20°C and 1 MHz)
Constant	3.75
Strength	5x10 ⁷ V/m
Loss Factor	Less than 4x10 ⁻⁴
Dissipation Factor	Less than 1x10 ⁻⁴
Index of Refraction	1.4585

Wavelength and %Transmission



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข. โปรแกรมกำเนิดสัญญาณควบคุมและข้อมูลเทคนิคของ PIC16F84A

```
#include <16f84a.h>
```

```
#fuses HS,NOWDT
```

```
#use delay (clock=20000000)
```

```
#define Hor 143
```

```
int16 j;
```

```
#INT_TIMER0
```

```
void timer0_interrupt() {
```

```
    output_low(pin_a1);
```

```
    output_low(pin_a0);
```

```
    delay_us(3);
```

```
    output_high(pin_a0);
```

```
    delay_us(7);
```

```
    output_high(pin_a1);
```

```
    set_timer0(Hor);
```

```
    j++; }
```

```
void main() {
```

```
    j=0;
```

```
    set_timer0(Hor);
```

```
    setup_timer_0( RTCC_INTERNAL| RTCC_DIV_2);
```

```
    enable_interrupts(GLOBAL);
```

```
    enable_interrupts(INT_TIMER0);
```

```
    for(;;) {
```

```
        if(j<312) {
```

```
            output_low(pin_a2);
```

```
            delay_us(80); }
```

```
        else {
```

```
            output_high(pin_a2);
```

```
            j=0; } } }
```



PIC16F84A

18-pin *Enhanced* FLASH/EEPROM 8-Bit Microcontroller

High Performance RISC CPU Features:

- Only 35 single word instructions to learn
- All instructions single-cycle except for program branches which are two-cycle
- Operating speed: DC - 20 MHz clock input
DC - 200 ns instruction cycle
- 1024 words of program memory
- 68 bytes of Data RAM
- 64 bytes of Data EEPROM
- 14-bit wide instruction words
- 8-bit wide data bytes
- 15 Special Function Hardware registers
- Eight-level deep hardware stack
- Direct, indirect and relative addressing modes
- Four interrupt sources:
 - External RB0/INT pin
 - TMR0 timer overflow
 - PORTB<7:4> interrupt-on-change
 - Data EEPROM write complete

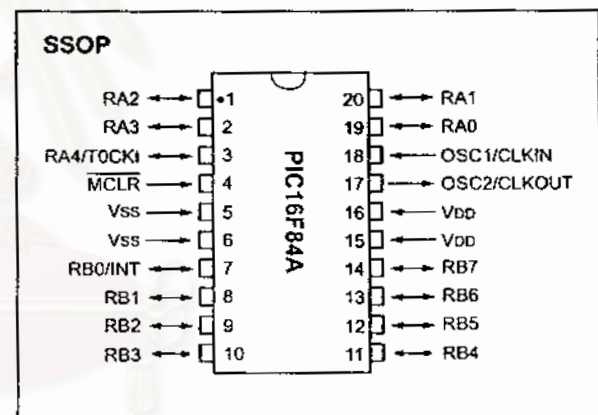
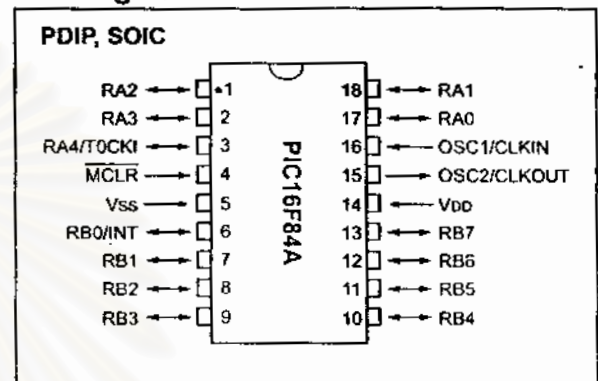
Peripheral Features:

- 13 I/O pins with individual direction control
- High current sink/source for direct LED drive
 - 25 mA sink max. per pin
 - 25 mA source max. per pin
- TMR0: 8-bit timer/counter with 8-bit programmable prescaler

Special Microcontroller Features:

- 10,000 erase/write cycles *Enhanced* FLASH Program memory typical
- 10,000,000 typical erase/write cycles EEPROM Data memory typical
- EEPROM Data Retention > 40 years
- In-Circuit Serial Programming™ (ICSP™) - via two pins
- Power-on Reset (POR), Power-up Timer (PWRT), Oscillator Start-up Timer (OST)
- Watchdog Timer (WDT) with its own On-Chip RC Oscillator for reliable operation
- Code protection
- Power saving SLEEP mode
- Selectable oscillator options

Pin Diagrams



CMOS *Enhanced* FLASH/EEPROM Technology:

- Low power, high speed technology
- Fully static design
- Wide operating voltage range:
 - Commercial: 2.0V to 5.5V
 - Industrial: 2.0V to 5.5V
- Low power consumption:
 - < 2 mA typical @ 5V, 4 MHz
 - 15 μ A typical @ 2V, 32 kHz
 - < 0.5 μ A typical standby current @ 2V

TABLE 1-1: PIC16F84A PINOUT DESCRIPTION

Pin Name	PDIP No.	SOIC No.	SSOP No.	I/O/P Type	Buffer Type	Description
OSC1/CLKIN	16	16	18	I	ST/CMOS ⁽³⁾	Oscillator crystal input/external clock source input.
OSC2/CLKOUT	15	15	19	O	—	Oscillator crystal output. Connects to crystal or resonator in Crystal Oscillator mode. In RC mode, OSC2 pin outputs CLKOUT, which has 1/4 the frequency of OSC1 and denotes the instruction cycle rate.
MCLR	4	4	4	I/P	ST	Master Clear (Reset) input/programming voltage input. This pin is an active low RESET to the device.
RA0	17	17	19	I/O	TTL	PORTA is a bi-directional I/O port. Can also be selected to be the clock input to the TMR0 timer/counter. Output is open drain type.
RA1	18	18	20	I/O	TTL	
RA2	1	1	1	I/O	TTL	
RA3	2	2	2	I/O	TTL	
RA4/T0CKI	3	3	3	I/O	ST	
RB0/INT	6	6	7	I/O	TTL/ST ⁽¹⁾	PORTB is a bi-directional I/O port. PORTB can be software programmed for internal weak pull-up on all inputs. RB0/INT can also be selected as an external interrupt pin.
RB1	7	7	8	I/O	TTL	Interrupt-on-change pin. Interrupt-on-change pin. Interrupt-on-change pin. Serial programming clock. Interrupt-on-change pin. Serial programming data.
RB2	8	8	9	I/O	TTL	
RB3	9	9	10	I/O	TTL	
RB4	10	10	11	I/O	TTL	
RB5	11	11	12	I/O	TTL	
RB6	12	12	13	I/O	TTL/ST ⁽²⁾	
RB7	13	13	14	I/O	TTL/ST ⁽²⁾	
Vss	5	5	5,6	P	—	Ground reference for logic and I/O pins.
VDD	14	14	15,16	P	—	Positive supply for logic and I/O pins.

Legend: I = input O = Output I/O = Input/Output P = Power
 — = Not used TTL = TTL input ST = Schmitt Trigger input

- Note 1:** This buffer is a Schmitt Trigger input when configured as the external interrupt.
Note 2: This buffer is a Schmitt Trigger input when used in Serial Programming mode.
Note 3: This buffer is a Schmitt Trigger input when configured in RC oscillator mode and a CMOS input otherwise.

2.3 Special Function Registers

The Special Function Registers (Figure 2-2 and Table 2-1) are used by the CPU and Peripheral functions to control the device operation. These registers are static RAM.

The special function registers can be classified into two sets, core and peripheral. Those associated with the core functions are described in this section. Those related to the operation of the peripheral features are described in the section for that specific feature.

TABLE 2-1: SPECIAL FUNCTION REGISTER FILE SUMMARY

Addr	Name	Bit 7	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0	Value on Power-on RESET	Details on page	
Bank 0												
00h	INDF	Uses contents of FSR to address Data Memory (not a physical register)								----	----	11
01h	TMR0	8-bit Real-Time Clock/Counter								xxxx	xxxx	20
02h	PCL	Low Order 8 bits of the Program Counter (PC)								0000	0000	11
03h	STATUS ⁽²⁾	IRP	RP1	RP0	\overline{TO}	PD	Z	DC	C	0001	1xxx	8
04h	FSR	Indirect Data Memory Address Pointer 0								xxxx	xxxx	11
05h	PORTA ⁽⁴⁾	—	—	—	RA4/T0CKI	RA3	RA2	RA1	RA0	---x	xxxx	16
06h	PORTB ⁽⁵⁾	RB7	RB6	RB5	RB4	RB3	RB2	RB1	RB0/INT	xxxx	xxxx	18
07h	—	Unimplemented location, read as '0'								—	—	—
08h	EEDATA	EEPROM Data Register								xxxx	xxxx	13,14
09h	EEADR	EEPROM Address Register								xxxx	xxxx	13,14
0Ah	PCLATH	—	—	—	Write Buffer for upper 5 bits of the PC ⁽¹⁾				---	0000	11	
0Bh	INTCON	GIE	EEIE	TOIE	INTE	RBIE	TOIF	INTF	RBIF	0000	000x	10
Bank 1												
80h	INDF	Uses Contents of FSR to address Data Memory (not a physical register)								----	----	11
81h	OPTION_REG	RBPU	INTEDG	T0CS	T0SE	PSA	PS2	PS1	PS0	1111	1111	9
82h	PCL	Low order 8 bits of Program Counter (PC)								0000	0000	11
83h	STATUS ⁽²⁾	IRP	RP1	RP0	\overline{TO}	\overline{PD}	Z	DC	C	0001	1xxx	8
84h	FSR	Indirect data memory address pointer 0								xxxx	xxxx	11
85h	TRISA	—	—	—	PORTA Data Direction Register				---	1111	16	
86h	TRISB	PORTB Data Direction Register								1111	1111	18
87h	—	Unimplemented location, read as '0'								—	—	—
88h	EECON1	—	—	—	EEIF	WRERR	WREN	WR	RD	---0	x000	13
89h	EECON2	EEPROM Control Register 2 (not a physical register)								----	----	14
0Ah	PCLATH	—	—	—	Write buffer for upper 5 bits of the PC ⁽¹⁾				---	0000	11	
0Bh	INTCON	GIE	EEIE	TOIE	INTE	RBIE	TOIF	INTF	RBIF	0000	000x	10

Legend: x = unknown, u = unchanged, - = unimplemented, read as '0', q = value depends on condition

Note 1: The upper byte of the program counter is not directly accessible. PCLATH is a slave register for PC<12:8>. The contents of PCLATH can be transferred to the upper byte of the program counter, but the contents of PC<12:8> are never transferred to PCLATH.

2: The \overline{TO} and \overline{PD} status bits in the STATUS register are not affected by a MCLR Reset.

3: Other (non power-up) RESETS include: external RESET through MCLR and the Watchdog Timer Reset.

4: On any device RESET, these pins are configured as inputs.

5: This is the value that will be in the port output latch.

6.8 Interrupts

The PIC16F84A has 4 sources of interrupt:

- External interrupt RB0/INT pin
- TMR0 overflow interrupt
- PORTB change interrupts (pins RB7:RB4)
- Data EEPROM write complete interrupt

The interrupt control register (INTCON) records individual interrupt requests in flag bits. It also contains the individual and global interrupt enable bits.

The global interrupt enable bit, GIE (INTCON<7>), enables (if set) all unmasked interrupts or disables (if cleared) all interrupts. Individual interrupts can be disabled through their corresponding enable bits in INTCON register. Bit GIE is cleared on RESET.

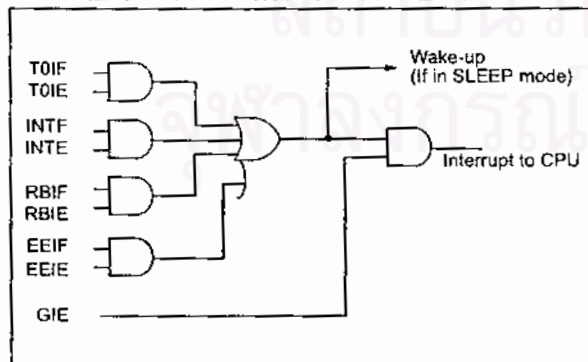
The "return from interrupt" instruction, RETFIE, exits interrupt routine as well as sets the GIE bit, which re-enables interrupts.

The RB0/INT pin interrupt, the RB port change interrupt and the TMR0 overflow interrupt flags are contained in the INTCON register.

When an interrupt is responded to, the GIE bit is cleared to disable any further interrupt, the return address is pushed onto the stack and the PC is loaded with 0004h. For external interrupt events, such as the RB0/INT pin or PORTB change interrupt, the interrupt latency will be three to four instruction cycles. The exact latency depends when the interrupt event occurs. The latency is the same for both one and two cycle instructions. Once in the Interrupt Service Routine, the source(s) of the interrupt can be determined by polling the interrupt flag bits. The interrupt flag bit(s) must be cleared in software before re-enabling interrupts to avoid infinite interrupt requests.

Note: Individual interrupt flag bits are set regardless of the status of their corresponding mask bit or the GIE bit.

FIGURE 6-10: INTERRUPT LOGIC



6.8.1 INT INTERRUPT

External interrupt on RB0/INT pin is edge triggered: either rising if INTEDG bit (OPTION_REG<6>) is set, or falling if INTEDG bit is clear. When a valid edge appears on the RB0/INT pin, the INTF bit (INTCON<1>) is set. This interrupt can be disabled by clearing control bit INTE (INTCON<4>). Flag bit INTF must be cleared in software via the Interrupt Service Routine before re-enabling this interrupt. The INT interrupt can wake the processor from SLEEP (Section 6.11) only if the INTE bit was set prior to going into SLEEP. The status of the GIE bit decides whether the processor branches to the interrupt vector following wake-up.

6.8.2 TMR0 INTERRUPT

An overflow (FFh → 00h) in TMR0 will set flag bit TOIF (INTCON<2>). The interrupt can be enabled/disabled by setting/clearing enable bit TOIE (INTCON<5>) (Section 5.0).

6.8.3 PORTB INTERRUPT

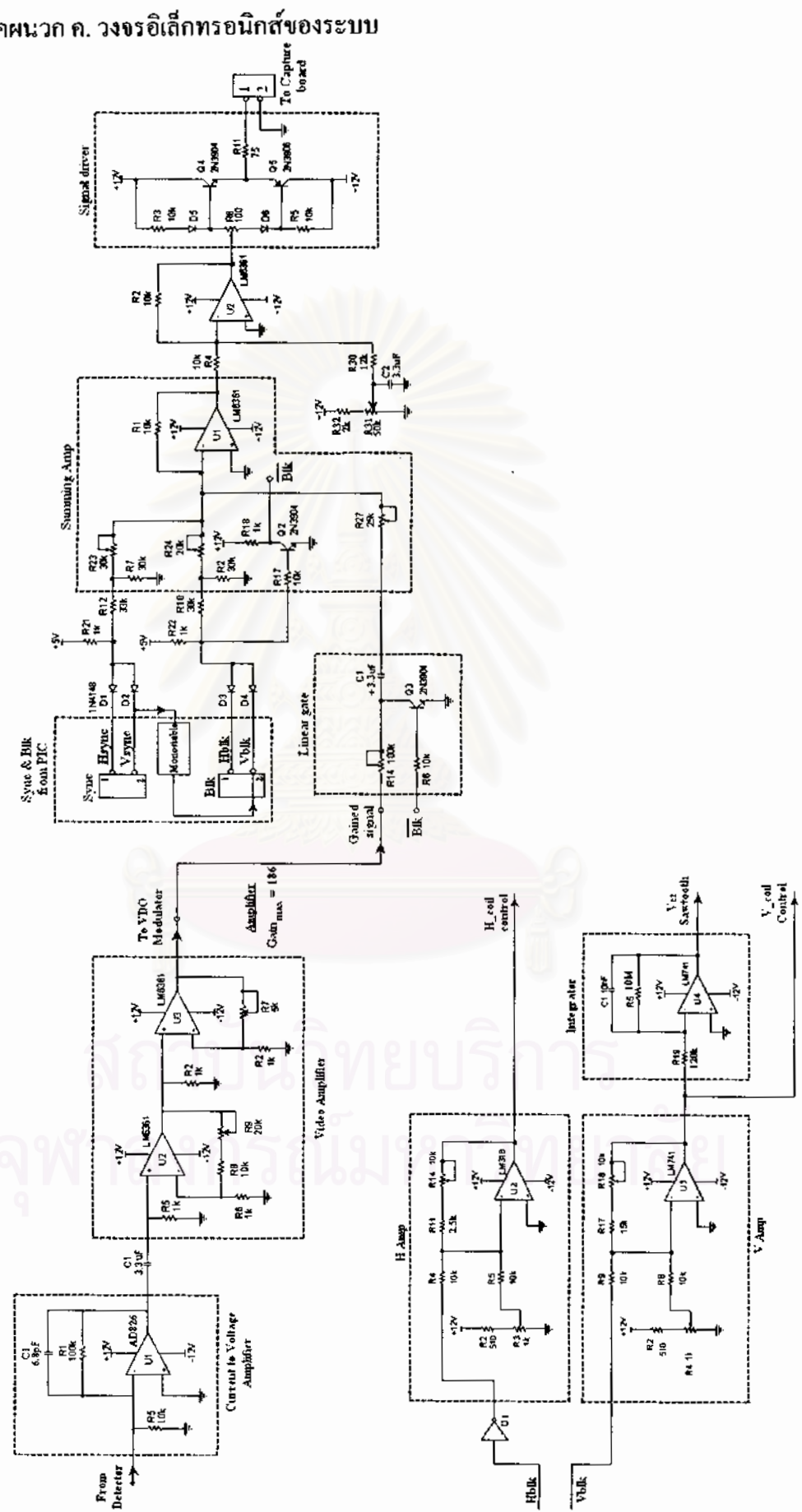
An input change on PORTB<7:4> sets flag bit RBIF (INTCON<0>). The interrupt can be enabled/disabled by setting/clearing enable bit RBIE (INTCON<3>) (Section 4.2).

Note: For a change on the I/O pin to be recognized, the pulse width must be at least T_{CY} wide.

6.8.4 DATA EEPROM INTERRUPT

At the completion of a data EEPROM write cycle, flag bit EEIF (EECON1<4>) will be set. The interrupt can be enabled/disabled by setting/clearing enable bit EEIE (INTCON<6>) (Section 3.0).

ภาคผนวก ค. วงจรอิเล็กทรอนิกส์ของระบบ



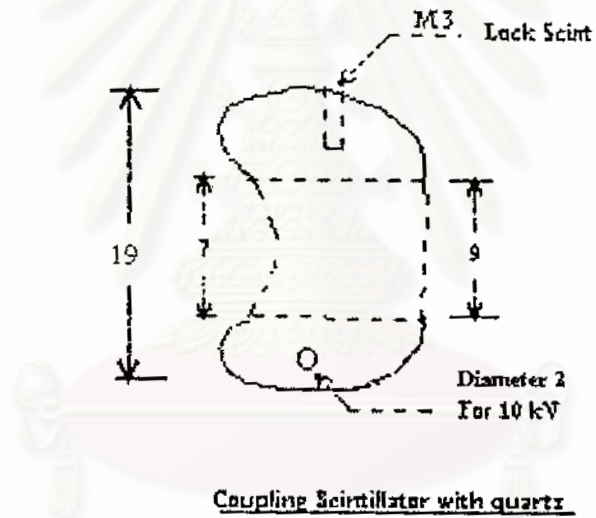
ภาคผนวก จ. ตารางระบบสัญญาณคอมโพสิตวิดีโอแบบต่างๆ [11]

	NORTH AND SOUTH AMERICA; INCLUDES U.S., CANADA, MEX- ICO, AND JAPAN	WESTERN EUROPE; IN- CLUDES GER- MANY, ITALY, AND SPAIN	ENGLAND*	FRANCE†	U.S.S.R.
Lines per frame	525	625	625	625	625
Frames per second	30	25	25	25	25
Field fre- quency, Hz	60	50	50	50	50
Line fre- quency, Hz	15.750	15.625	15.625	15.625	15.625
Video band- width, MHz	4.2	5 or 6	5.5	6	6
Channel width, MHz	6	7 or 8	8	8	8
Video modulation	Negative	Negative	Negative	Positive	Negative
Sound signal	FM	FM	FM	AM	FM
Color system	NTSC	PAL	PAL	SECAM	SECAM
Color sub- carrier, MHz	3.58	4.43	4.43	4.43	4.43

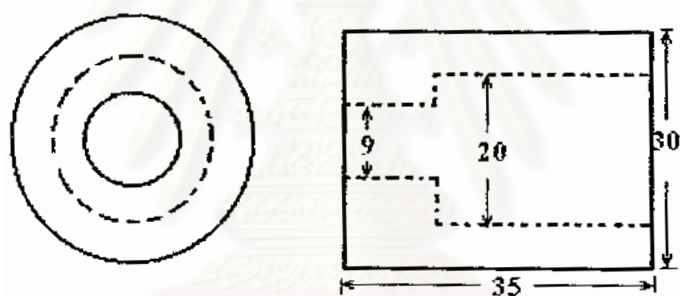
*England also uses 405-line system in 5-MHz channel.
†France also uses 819-line system in 14-MHz channel.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ฉ. แบบ โครงสร้างชิ้นส่วนประกอบหัววัดสัญญาณ

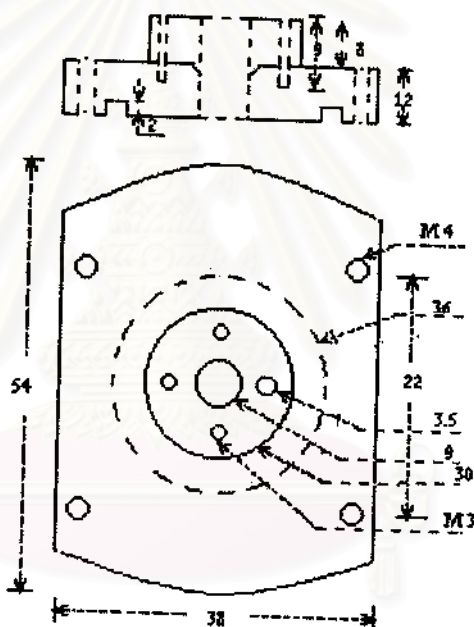


สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



Coupling Quartz with PMT

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางอำไพ อติโรจน์ปัญญา เกิดวันที่ 22 สิงหาคม พ.ศ. 2519 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต จากภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เมื่อปีการศึกษา 2540 และเข้าศึกษาระดับปริญญาโท สาขาภาควิชาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตที่ภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2544



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย