

การพัฒนาป็นอิเล็กทรอนิกส์แบบไมโครโฟกัสสำหรับการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์



นายกิตติพงษ์ เกษมสุข

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี ภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี

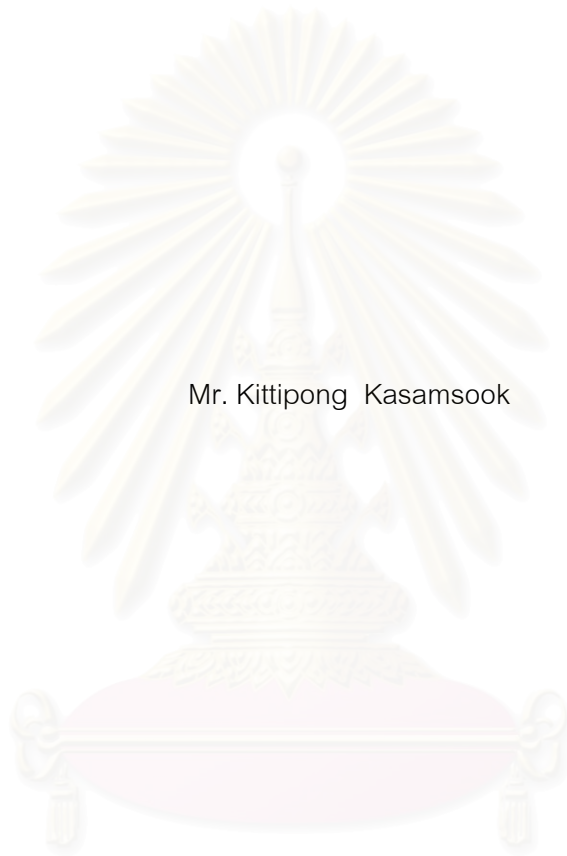
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2545

ISBN 974-17-9884-9

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEVELOPMENT OF A MICRO-FOCUSED ELECTRON GUN FOR X-RAY IMAGING



Mr. Kittipong Kasamsook

สถาบันวิทยบริการ

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 2002

ISBN 974-17-9884-9

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาปัญญาประดิษฐ์แบบไม่โครโฟกัสสำหรับการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์
โดย	นายกิตติพงษ์ เกษมสุข
สาขาวิชา	นิเวศวิทยาระบบนิเวศ
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุวิทย์ ปุณณชัยยะ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์เดโช ทองอร่าม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์วิรุฬห์ มังคละวิรัช)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุวิทย์ ปุณณชัยยะ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(อาจารย์เดโช ทองอร่าม)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ณรงค์ จันทน์ขาว)

กิตติพงษ์ เกษมสุข : การพัฒนาปืนอิเล็กตรอนแบบไมโครโฟกัสสำหรับการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ (DEVELOPMENT OF A MICRO-FOCUSED ELECTRON GUN FOR X-RAY IMAGING) อ. ที่ปรึกษา : ผศ.สุวิทย์ ปุณณชัยยะ, อ. ที่ปรึกษาร่วม : อ. เดโช ทองอร่าม ; 77 หน้า. ISBN 974-17-9884-9.

การพัฒนาปืนอิเล็กตรอนแบบไมโครโฟกัสนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้เป็นต้นกำเนิดรังสีเอกซ์ชนิดไมโครโฟกัสสำหรับประยุกต์ใช้ในการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ระดับไมโคร โดยแคโทดในการผลิตอิเล็กตรอนใช้ไส้ทั้งสแตนของกัลลียมเจอร์เมเนียมอิเล็กตรอน ควบคุมการโฟกัสลำอิเล็กตรอนด้วยเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าชุดเดียว ปืนอิเล็กตรอนที่พัฒนาขึ้นสามารถแปรเปลี่ยนค่าศักดาไฟฟ้าแรงได้ต่อเนื่องจาก 0-40 กิโลโวลต์ที่กระแสแอโนดสูงสุด 120 ไมโครแอมแปร์ และปรับเปลี่ยนกระแสโปรบอิเล็กตรอนได้ในช่วง 0.05-1.2 ไมโครแอมแปร์ ทำงานที่ระดับความดันสุญญากาศในห้องแอโนด 5×10^{-5} ทอร์ จากผลทดสอบการผลิตรังสีเอกซ์โดยใช้แผ่นเป้าทองคำความหนา 50 ไมครอน ที่กระแสโปรบอิเล็กตรอน 500 นาโนแอมแปร์ และพลังงานของลำอิเล็กตรอน 18 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ สามารถผลิตรังสีเอกซ์ได้ขนาดจุดโฟกัส 112.5 ไมโครเมตร ผลการทดลองถ่ายภาพชิ้นตัวอย่างทางชีวภาพที่กำลังขยาย 2 เท่า ใช้เวลาถ่ายภาพ 20 นาที พบว่า ภาพถ่ายให้ความคมชัดและความเปรียบต่างดีพอสมควร เปรียบเทียบกับภาพถ่ายชิ้นตัวอย่างชนิดเดียวกันซึ่งถ่ายด้วยระบบตัดแปลงกัลลียมเจอร์เมเนียมอิเล็กตรอนที่ผลิตจากต่างประเทศ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา	นิวเคลียร์เทคโนโลยี	ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา	นิวเคลียร์เทคโนโลยี	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา	2545	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4270221121 : MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY

KEY WORD: MICRO-FOCUS X-RAY / MICROSCOPY / ELECTRON LENS / ELECTRON GUN

KITTIPONG KASAMSOOK : DEVELOPMENT OF A MICRO-FOCUSED ELECTRON GUN FOR X-RAY IMAGING. THESIS ADVISOR : ASSIST. PROF. SUVIT PUNNACHAIYA, THESIS CO-ADVISER : DECHO THONG-ARAM , 77 pp. ISBN 974-17-9884-9.

A micro-focused electron gun was developed for producing a microfocus x-ray source and applying to x-ray microradiography. Tungsten hair-pin filament of the electron microscope was employed as the electron source. The electron beam was focused by a single stage electromagnetic lens under a variable accelerating voltage in range of 0-40 kV, continuously, with 120 μA maximum anode current. While electron probe current can be adjusted from 0.05 μA up to 1.2 μA at the operated condition of 5×10^{-5} torr, vacuum degree in an anode chamber. An x-ray beam of 112.5 μm focus diameter can be generated from the developed system by the use of Au target with a thickness of 50 μm at the probe current of 500 nA and 18 keV electron beam energy. In these setting, the radiographic biological specimen was done at 2 times magnification geometry with 20 minutes exposure time. The obtained image showed satisfactory image quality, both sharpness and contrast, comparing with the radiographic taken from a modified-commercial SEM system at the same specimen.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department Nuclear Technology

Field of study Nuclear Technology

Academic year 2002

Student's signature.....

Advisor's signature

Co-advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุวิทย์ ปุณณชัยยะ และอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมอาจารย์เดโช ทองอร่าม ที่คอยให้คำปรึกษา ข้อชี้แนะในการทำวิจัยและความช่วยเหลือต่าง ๆ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยทุนอุดหนุนการทำวิจัย/วิทยานิพนธ์จากมูลนิธิการศึกษาเขต 100 ปี ผู้วิจัยจึงขอขอบพระคุณอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่ให้การอุดหนุนทุนวิจัยบางส่วนในการทำวิจัยครั้งนี้ และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ส่วนงานจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในการอนุเคราะห์การใช้เครื่องมือและอำนวยความสะดวกในการดำเนินงานวิจัย

ขอขอบคุณ คุณรัฐภูมิ โคกศิริ เจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ช่วยเหลือในการสร้างอุปกรณ์สำหรับงานวิจัย

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ทุกคนที่ให้ความสนใจและช่วยเหลือในงานวิจัยมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ผู้ให้ความรัก สักสอน อบรม ให้การศึกษา และเป็นกำลังใจเสมอมารวมทั้งเป็นแบบอย่างที่ดีในการดำรงชีวิตของบุตร

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญรูป	ฎ

บทที่

1. บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์	2
1.4 ขั้นตอนและวิธีการในการดำเนินงานวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.6 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2. หลักการถ่ายภาพด้วยระบบจุลทรรศน์รังสีเอกซ์	4
2.1 การถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์	4
2.1.1 คุณสมบัติของรังสีเอกซ์	5
2.1.1.1 รังสีเอกซ์เฉพาะตัว	5
2.1.1.2 รังสีเอกซ์ต่อเนื่อง	7
2.1.1.3 ย่านพลังงานรังสีเอกซ์	8
2.1.2 คุณภาพของภาพถ่ายรังสีเอกซ์	10
2.1.2.1 คุณสมบัติของภาพถ่ายที่ดี	10
2.1.2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของภาพถ่ายรังสีเอกซ์	10
2.2 ระบบจุลทรรศน์รังสีเอกซ์	12

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.2.1 องค์ประกอบระบบจุลทรรศน์รังสีเอกซ์.....	12
2.2.2 ซีดจำกัดของรายละเอียดภาพถ่ายด้วยจุลทรรศน์รังสีเอกซ์.....	14
2.3 แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์แบบไมโครโฟกัส.....	16
2.3.1 ปีนีเอ็กตรอน.....	16
2.3.1.1 โครงสร้างและการทำงานของปนีเอ็กตรอน.....	16
2.3.1.2 การปลดปล่อยอิเล็กตรอนจากแคโทด.....	18
2.3.1.3 เลนส์สนามไฟฟ้าสถิต.....	20
2.3.2 เลนส์สนามแม่เหล็กไฟฟ้า.....	25
2.3.2.1 โครงสร้างของเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า.....	25
2.3.2.2 ความสามารถในการแจกแจงของเลนส์.....	29
2.3.2.3 ปัจจัยที่ส่งผลต่อความผิดเพี้ยนของเลนส์.....	35
2.3.3 เป้าผลิตรังสีเอกซ์.....	39
3. การพัฒนาปนีเอ็กตรอนแบบไมโครโฟกัส.....	42
3.1 การออกแบบและสร้างแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนแบบทั้งสแตนด์ออล.....	42
3.2 การออกแบบและสร้างแหล่งจ่ายไฟฟ้าค้ำดาสูง.....	45
3.2.1 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง.....	46
3.2.2 วงจรกำเนิดไฟฟ้าค้ำดาสูง.....	47
3.3 การออกแบบและสร้างเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า.....	47
3.4 การออกแบบและสร้างระบบสุญญากาศ.....	50
3.5 ห้องใส่ตัวอย่างและอุปกรณ์ฉายภาพรังสีเอกซ์.....	51
4. ผลทดสอบการทำงาน.....	54
4.1 ผลทดสอบการทำงานของระบบจ่ายไฟฟ้าค้ำดาสูง.....	54
4.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดสอบ.....	54
4.1.2 ทดสอบสมรรถนะของระบบจ่ายไฟฟ้าค้ำดาสูง.....	54

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2 ผลทดสอบระบบสูบสุญญากาศ.....	57
4.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดสอบ	57
4.2.2 ทดสอบการทำงานของระบบสูบสุญญากาศ	58
4.3 ผลทดสอบการกำเนิดลําอิเล็กตรอนของปืนอิเล็กตรอน.....	58
4.3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดสอบ	58
4.3.2 ทดสอบการกำเนิดลําอิเล็กตรอน.....	59
4.4 การทดสอบการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์.....	60
4.4.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดสอบ	60
4.4.2 ทดสอบการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์.....	61
5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	66
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	66
5.2 วิจารณ์ผลการทดลอง.....	67
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	68
รายการอ้างอิง	69
ภาคผนวก ก.	71
ภาคผนวก ข.	73
ภาคผนวก ค.	75
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	77

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ค่าคงที่ของธาตุต่างๆ สำหรับบ่งชี้คุณภาพในการปลดปล่อยอิเล็กตรอน	19
ตารางที่ 2.2 ความยาวคลื่นและพลังงานของรังสีเอกซ์เฉพาะตัวของธาตุที่เลือกใช้ทำเป้าผลิตรังสีเอกซ์ รวมทั้งค่าจุดหลอมเหลวและค่าการนำความร้อน	40
ตารางที่ 4.1 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายกับแรงดันไฟฟ้าสูง ขณะไม่มีโหลด ..	55
ตารางที่ 4.2 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าสูงขณะจ่ายโหลดที่กระแส 100 μA	56
ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบระบบสุบสุญญากาศ	58



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 แสดงการจัดวางอุปกรณ์การถ่ายภาพรังสีเอกซ์.....	4
รูปที่ 2.2 แสดงการเกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัว.....	6
รูปที่ 2.3 แสดงการเกิดรังสีเอกซ์ต่อเนื่อง.....	8
รูปที่ 2.4 สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและการแบ่งย่านรังสีเอกซ์สำหรับการถ่ายภาพไมโครด้วยรังสีเอกซ์.....	9
รูปที่ 2.5 การเกิดเงาซ้อนบนภาพถ่ายรังสีเอกซ์.....	11
รูปที่ 2.6 แผนภาพแสดงการเกิดเงาซ้อนเมื่อจุดโฟกัสมีขนาดใหญ่และเล็ก.....	11
รูปที่ 2.7 โครงสร้างของระบบจลทรรศน์รังสีเอกซ์แบบฉายภาพ.....	13
รูปที่ 2.8 แผนภาพการถ่ายภาพรังสีด้วยเทคนิคจลทรรศน์รังสีเอกซ์.....	14
รูปที่ 2.9 ขีดจำกัดของการแจกแจงรายละเอียดภาพ.....	15
รูปที่ 2.10 เปรียบเทียบความลึกของความชัดเมื่อจุดโฟกัสมีขนาดใหญ่และเล็ก.....	16
รูปที่ 2.11 แผนภาพการทำงานของต้นกำเนิดลำอิเล็กตรอนและ equipotential surface.....	18
รูปที่ 2.12 แผนภาพแสดงการกระจายตัวของเส้นสมคักย์ในเลนส์สนามไฟฟ้าสถิตแบบทรงกระบอกที่ขั้วไฟฟ้าจ่ายแรงดัน 100 V.....	21
รูปที่ 2.13 แสดงรูปเรขาคณิตของอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่เข้าสู่เลนส์สนามไฟฟ้าสถิตแบบทรงกระบอก.....	21
รูปที่ 2.14 แสดงการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนผ่านเลนส์สนามไฟฟ้าสถิตแบบ unipotential.....	22
รูปที่ 2.15 aperture lens.....	23
รูปที่ 2.16 เลนส์สนามไฟฟ้าแบบทรงกระบอก.....	24
รูปที่ 2.17 เลนส์สนามไฟฟ้าสถิตแบบยูนิโพเทนเชียล.....	24
รูปที่ 2.18 เลนส์สนามไฟฟ้าสถิตแบบแคโทด.....	25
รูปที่ 2.19 แสดงภาคตัดขวางของเลนส์อิเล็กตรอนแบบแม่เหล็กไฟฟ้า.....	26
รูปที่ 2.20 แสดงแนวเส้นแรงในสนามแม่เหล็กแกนสมมาตร.....	27
รูปที่ 2.21 แสดงเส้นกราฟความเข้มของสนามแม่เหล็กของทั้ง 2 แนวแกน.....	27
รูปที่ 2.22 แสดงวิธีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในการสร้างภาพด้วยเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า.....	28
รูปที่ 2.23. แสดงเส้นฉายของเลนส์อิเล็กตรอนตามวิธีการเคลื่อนที่.....	29
รูปที่ 2.24 แสดงการเกิดรูปวงแหวนและการพิจารณาความสามารถในการแจกแจง.....	30

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 2.25 แสดงความหมายของความสามารถในการแก้แฉง.....	31
รูปที่ 2.26 spherical aberration.....	35
รูปที่ 2.27 axial stigmatism.....	36
รูปที่ 2.28 diffraction aberration.....	37
รูปที่ 2.29 chromatic aberration.....	37
รูปที่ 2.30 เส้นกราฟแสดงสมมูลของการปรับแก้ความผิดเพี้ยนแบบ spherical และ diffraction.....	39
รูปที่ 2.31. แสดงการเกิดอันตรกิริยานิวเคลียร์ที่ชั้นความลึกต่างๆ.....	40
รูปที่ 2.32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนากับปริมาณการลดทอนรังสีเอกซ์เฉพาะตัวของเป้า ที่ทำด้วยธาตุต่างๆ.....	41
รูปที่ 3.1 แสดงไส้หลอดแบบทังสเตนแฮร์พิน.....	42
รูปที่ 3.2 wehnelt ที่ประกอบกับส่วนบนของปืนอิเล็กตรอน.....	43
รูปที่ 3.3 แอนโนด.....	43
รูปที่ 3.4 วงจรจ่ายแรงดันสำหรับจุดไส้หลอดปืนอิเล็กตรอน.....	44
รูปที่ 3.5 แสดงการไบอัสระหว่างไส้หลอดกับ wehnelt.....	45
รูปที่ 3.6 แผนภาพวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูง.....	45
รูปที่ 3.7 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง.....	46
รูปที่ 3.8 วงจรกำเนิดศักดาไฟฟ้าสูง.....	47
รูปที่ 3.9 แสดงตำแหน่งของเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า.....	48
รูปที่ 3.10 เลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น.....	49
รูปที่ 3.11 แสดงบอบบินและขดลวดที่ถูกพันไว้สำหรับสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้า.....	49
รูปที่ 3.12 แผนภาพของระบบทำสุญญากาศ.....	50
รูปที่ 3.13 ห้องใส่ตัวอย่างด้านหน้า.....	51
รูปที่ 3.14 แสดงห้องใส่ตัวอย่างด้านข้าง.....	51
รูปที่ 3.15 โครงสร้างอุปกรณ์ฉายภาพรังสีเอกซ์.....	52
รูปที่ 3.16 ระบบถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์แบบไมโครโฟกัส.....	53

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.1 การทดสอบการทำงานของระบบไฟฟ้าศักดาสูงและวงจรรจ่ายให้โหลด.....	55
รูปที่ 4.2 เส้นกราฟแสดงความเป็นเชิงเส้นของแรงดันไฟฟ้าสูงขณะไม่จ่ายโหลด.....	56
รูปที่ 4.3 เส้นกราฟแสดงความเป็นเชิงเส้นของแรงดันขณะจ่ายโหลดที่กระแส 100 μ A.....	57
รูปที่ 4.4 แผนภาพระบบสุบสูญญากาศ.....	57
รูปที่ 4.5 ระบบทดสอบการกำเนิดลำอิเล็กตรอนด้วยปืนอิเล็กตรอนแบบไมโครโฟกัส.....	59
รูปที่ 4.6 แสดงลำอิเล็กตรอนที่ศักดาไฟฟ้า 10 กิโลโวลต์.....	60
รูปที่ 4.7 แสดงการวัดกระแสที่ตัวอย่าง.....	60
รูปที่ 4.8 แสดงชิ้นส่วนตัวอย่าง.....	62
รูปที่ 4.9 แสดงอุปกรณ์ฉายภาพรังสีเอกซ์.....	62
รูปที่ 4.10 แสดงภาพถ่ายส่วนหางปลาหางนกยูงที่กำลังขยายภาพ 2 เท่า กำลังอัดขยายภาพ 3 เท่า กำลังขยายรวม 6 เท่า เปรียบเทียบกับระบบดัดแปลงของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของ JEOL รุ่น 35 CF.....	63
รูปที่ 4.11 แสดงภาพถ่ายส่วนหางปลาหางนกยูงที่กำลังขยายภาพ 2 เท่า กำลังอัดขยายภาพ 5 เท่า กำลังขยายรวม 10 เท่า เปรียบเทียบกับระบบดัดแปลงของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของ JEOL รุ่น 35 CF.....	63
รูปที่ 4.12 ภาพถ่ายช่องบังคับลำอิเล็กตรอน (aperture) ขนาดรู 1 mm.....	64
รูปที่ 4.13 แสดงผลการอ่านค่าความดำของแผ่นฟิล์มด้วยระบบสแกนอ่านค่าความดำ.....	65
รูปที่ 4.14 แสดงกราฟแสดงข้อมูลค่าความดำที่ขอบภาพ.....	65
รูปที่ 5.1 แสดงผลของการปรับโฟกัสเนื่องจากการเหลื่อมกันระหว่างต้นกำเนิดอิเล็กตรอนและช่องบังคับลำอิเล็กตรอน.....	67

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของการวิจัย

การตรวจสอบแบบไม่ทำลายซึ่งใช้เทคนิคการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์เป็นวิธีการตรวจสอบสิ่งบกพร่องภายในชิ้นงานที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย ในปัจจุบันมีความต้องการให้สมรรถนะของเทคนิคสามารถแจกแจงรายละเอียดของสิ่งบกพร่องภายในชิ้นงานระดับไมโคร เพื่อประยุกต์ใช้กับงานด้านอุตสาหกรรมและงานด้านเทคโนโลยีชีวภาพ เช่น การตรวจจุดต่อเชื่อมในไมโครชิพและการศึกษาโครงสร้างของเซลล์สิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก เป็นต้น การถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์จะให้รายละเอียดในระดับไมโครได้จำเป็นต้องจัดกระบวนการถ่ายภาพที่มีกำลังขยายวัตถุซึ่งให้ความคมชัด โดยปัจจัยสำคัญที่จะทำให้สามารถถ่ายภาพรังสีเอกซ์ให้มีกำลังขยายสูงและมีขอบภาพคมชัดได้นั้น ต้นกำเนิดรังสีเอกซ์จะต้องมีขนาดจุดโฟกัสขนาดเล็กมาก ซึ่งหลอดรังสีเอกซ์ที่ใช้งานทั่วไปไม่สามารถจัดระบบถ่ายภาพให้เกิดกำลังขยายภาพได้ เนื่องจากจุดโฟกัสที่มีขนาดโต ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อต้องการภาพขยายด้วยการจัดระบบการถ่ายภาพให้มีระยะระหว่างวัตถุกับฟิล์มเพิ่มขึ้น จะเกิดปัญหาเงาขอบภาพถ่ายรังสีขึ้นมามีผลให้ภาพไม่คมชัด

จากการศึกษาถึงเทคนิคการผลิตรังสีเอกซ์แบบไมโครโฟกัสพบว่าอาศัยหลักการของกล่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน [1] ซึ่งมีราคาสูงมาก จนกระทั่งในปีพ.ศ. 2533 Prof. H. Hashimoto และ Prof. K. Yada ศาสตราจารย์ด้านจุลทรรศน์อิเล็กตรอนประเทศญี่ปุ่นได้ให้แนวทางในการพัฒนาอุปกรณ์ฉายภาพรังสีเอกซ์สำหรับกล่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน [1] แก่คณะผู้วิจัยของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทำให้มีการศึกษาพัฒนากระบวนการด้านจุลทรรศน์รังสีเอกซ์ขึ้น จนเกิดแนวคิดในการพัฒนาเทคนิคในการถ่ายภาพรังสีเอกซ์ที่ให้กำลังขยายภาพเพื่อใช้ในงานอุตสาหกรรม โดยได้เริ่มประยุกต์ใช้ปืนอิเล็กตรอนของหลอดแคโทดเรย์ ในการกำเนิดลำอิเล็กตรอน [2] เพื่อผลิตรังสีเอกซ์ในการถ่ายภาพจุลทรรศน์รังสีเอกซ์ แต่มีอุปสรรคในการควบคุมการโฟกัสลำอิเล็กตรอน โดยพบว่าโครงสร้างและวิธีการโฟกัสลำอิเล็กตรอนด้วยเลนส์สนามไฟฟ้ารวมทั้งหมดของใส่หลอดแคโทดเรย์มีข้อจำกัด จึงทำให้เกิดความสนใจในการพัฒนาปืนอิเล็กตรอนที่โฟกัสลำอิเล็กตรอนด้วยเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อนำไปสู่การสร้างต้นกำเนิดรังสีเอกซ์แบบไมโครโฟกัสสำหรับใช้ในงานด้านการถ่ายภาพรังสีเอกซ์ซึ่งให้กำลังขยายภาพที่มีคุณภาพสูง

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อพัฒนาปืนอิเล็กตรอนชนิดแคโทดร้อน (hot cathode) และโฟกัสลำอิเล็กตรอนด้วยเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic lens) สำหรับกำเนิดลำอิเล็กตรอนที่มีจุดโฟกัสขนาดเล็กมากในการผลิตรังสีเอกซ์แบบไมโครโฟกัส

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1. ออกแบบและสร้างต้นกำเนิดอิเล็กตรอนแบบทังสเตนแฮร์พิน (tungsten hair pin) ขนาด 40 kV กระแสอิมิสชัน (emission current) 100 μA
2. ออกแบบและสร้างเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า สำหรับควบคุมโฟกัสของลำอิเล็กตรอน
3. ออกแบบและสร้างระบบสุญญากาศระดับ 10^{-6} torr
4. เปรียบเทียบความคมชัดของภาพถ่ายรังสีเอกซ์ที่ได้ กับระบบถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ชนิดไมโครโฟกัสที่ผลิตจากต่างประเทศ

1.4 ขั้นตอนและวิธีการในการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาโครงสร้างและการทำงานของปืนอิเล็กตรอนในกล้องจุลทรรศน์แบบสแกน (SEM) รวมทั้งสร้างเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับโฟกัสลำอิเล็กตรอน
2. ออกแบบและสร้างระบบทำสุญญากาศและระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าศักดาสูง
3. ออกแบบสร้างปืนอิเล็กตรอน และอุปกรณ์ทดสอบการทำงาน
4. ทดสอบการทำงานของปืนอิเล็กตรอนในการผลิตรังสีเอกซ์
5. เปรียบเทียบความคมชัดของภาพถ่ายรังสีเอกซ์จากเครื่องต้นแบบกับระบบถ่ายภาพที่ผลิตจากต่างประเทศ
6. สรุปและวิเคราะห์ผลการวิจัย รวมทั้งเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ปืนอิเล็กตรอนชนิดไมโครโฟกัสเพื่อผลิตรังสีเอกซ์สำหรับนำไปใช้ในการถ่ายภาพชิ้นตัวอย่าง ซึ่งต้องการตรวจสอบโครงสร้างภายในที่มีขนาดเล็กระดับไมโคร

1.6 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

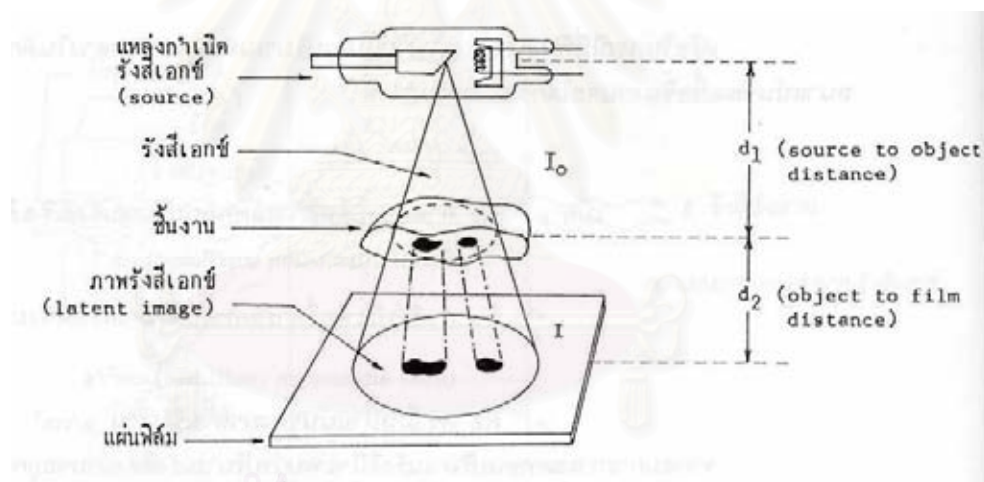
1. ปี 2487 E. Ruska ขณะศึกษาที่ Technical College in Berlin ได้ทำการทดลองผลของรูปทรงของหัวแม่เหล็กที่เลนส์วัตถุ ซึ่งส่งผลต่อการกระจายตัวของความเข้มสนามแม่เหล็ก พบว่าถ้าเลนส์มีระยะห่างระหว่างหัวแม่เหล็กและขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางหัวแม่เหล็กกว้างจะให้ความเข้มสนามแม่เหล็กที่อ่อน ซึ่งจะส่งผลให้ความยาวโฟกัสยาว ส่วนเลนส์ที่มีระยะห่างระหว่างหัวแม่เหล็กและเส้นผ่าศูนย์กลางหัวแม่เหล็กแคบจะมีความเข้มสนามแม่เหล็กสูงและให้ความยาวโฟกัสสั้น
2. ปี 2532 Keiji Yada และ Shoichi Takahashi จาก Research Institute for Scientific Measurements, Tohoku University ได้ทำการทดลองหาเป้าโลหะตัวอย่างที่ดีกว่า Ti เพื่อปรับปรุงความแปรปรวนของภาพถ่ายรังสีเอกซ์ จากการทดลองเป้าโลหะหลายชนิด ซึ่งพิจารณาคคุณสมบัติด้านต่างๆ เช่น จุดหลอมเหลว การนำความร้อน ปริมาณการดูดกลืนรังสีเอกซ์ และคำนวณความหนาที่เหมาะสมของเป้าผลิตรังสีเอกซ์ พบว่า Au, Ta, และ Ge มีความเหมาะสมที่จะนำมาเป็นเป้าผลิตรังสีเอกซ์เมื่อใช้ลำอิเล็กตรอนพลังงานต่ำในการกระตุ้น
3. ปี 2535 วิรุพห์ มังคละวิรัช, สุวิทย์ ปุณณชัยยะ, นฤปวัจก์ เงินวิจิตร และ เดโช ทองอร่าม ภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้พัฒนาอุปกรณ์เสริมสมรรถนะการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (SEM) ที่มีระดับฐานใส่ตัวอย่างกว้างให้สามารถทำงานเป็นกล้องจุลทรรศน์รังสีเอกซ์แบบฉายภาพโดยไม่ต้องดัดแปลงอุปกรณ์ภายในห้องใส่ตัวอย่าง ผลการทดสอบนำไปใช้งานพบว่าอุปกรณ์ฉายภาพต้นแบบที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้ได้ในห้องสุญญากาศของห้องใส่ตัวอย่างกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แต่ระบบกลในการปรับระยะชิ้นส่วนตัวอย่างเพื่อเลือกกำลังขยายและระบบกลในการบรรจุฟิล์ม ยังใช้งานไม่สะดวกต้องมีการปรับปรุงระบบชิ้นส่วนกลเพิ่มเติมให้สามารถใช้งานได้อย่างสมบูรณ์
4. ปี 2541 วิมล ทวีพย์สังสุข, สุวิทย์ ปุณณชัยยะ และ เดโช ทองอร่าม ภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้ดัดแปรหลอดรังสีแคโทดโดยนำเฉพาะส่วนปืนอิเล็กตรอนมาเป็นต้นกำเนิดลำอิเล็กตรอนเพื่อผลิตรังสีเอกซ์พลังงานต่ำแบบประหยัด ภายในห้องสุญญากาศซึ่งให้กำลังขยายภาพ 2 เท่า

บทที่ 2

หลักการถ่ายภาพด้วยระบบจุลทรรศน์รังสีเอกซ์

2.1 การถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์

การถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์เป็นการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย (Non-Destructive Testing; NDT) อีกวิธีหนึ่งที่ใช้ในปัจจุบัน อาศัยคุณสมบัติในการทะลุทะลวงของรังสีเอกซ์และอันตรกิริยาของรังสีเอกซ์ต่อชนิดของตัวกลางหรือความหนาของชิ้นงานเพื่อตรวจสอบรอยบกพร่องหรือสิ่งผิดปกติภายในชิ้นงาน รังสีที่ทะลุผ่านชิ้นงานออกมาจะทำปฏิกิริยากับแผ่นฟิล์มเกิดเป็นภาพแฝง (latent image) โดยความดำที่ปรากฏบนแผ่นฟิล์มจะขึ้นอยู่กับปริมาณรังสีที่สามารถส่งผ่านออกมาได้ดังแสดงการจัดวางอุปกรณ์ได้ดังรูปที่ 2.1 รายละเอียดของภาพแฝงที่ปรากฏบนแผ่นฟิล์มเป็นการบันทึกปริมาณรังสีส่งผ่านซึ่งมีความสัมพันธ์ตามสมการ [1]



รูปที่ 2.1 แสดงการจัดวางอุปกรณ์การถ่ายภาพรังสีเอกซ์ [1]

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (1)$$

เมื่อ I = ความเข้มรังสีที่ทะลุผ่านชิ้นงาน

I_0 = ความเข้มรังสีที่ตกกระทบชิ้นงาน

μ = สัมประสิทธิ์การลดทอนปริมาณรังสีของชิ้นงาน

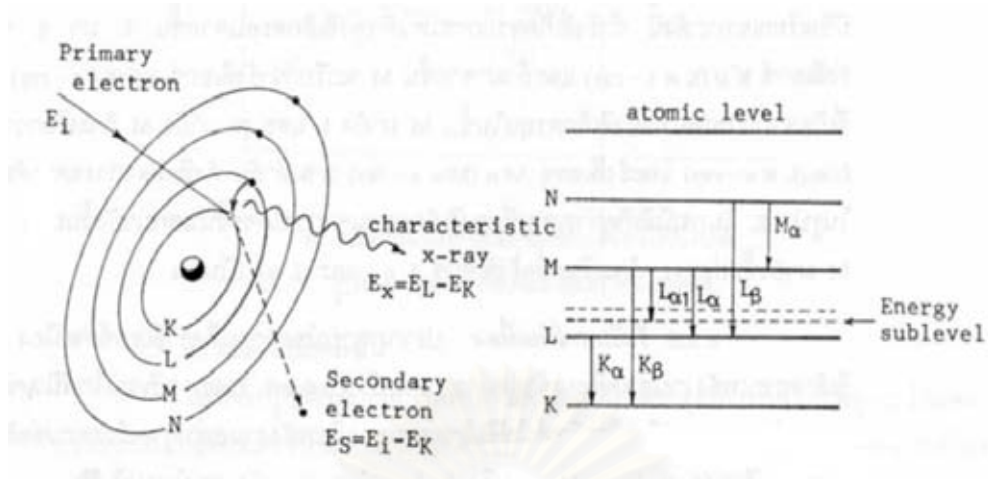
x = ความหนาของชิ้นงาน

2.1.1 คุณสมบัติของรังสีเอกซ์

รังสีเอกซ์ ถูกค้นพบโดยบังเอิญในปี พ.ศ. 2438 โดยศาสตราจารย์ด้านฟิสิกส์ชาวเยอรมันชื่อ Wilhem Conrad Roentgen ขณะที่เขากำลังทำการทดลองเกี่ยวกับหลอดรังสีแคโทดในห้องปฏิบัติการได้สังเกตเห็นก้อนแร่แบเรียมแพลทินไฮยาไรต์ที่วางอยู่ห่างไปไม่กี่ฟุตเกิดเรืองแสงขึ้นในสมัยนั้นทราบกันว่าแร่นี้จะเรืองแสงเมื่อได้รับรังสีอุลตราไวโอเล็ตเท่านั้น ดังนั้นในการทดลองจะต้องมีการแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไปยังก้อนแร่ซึ่งเรินเกนต์เรียกรังสีนี้ว่า “รังสีเอกซ์” จึงถือได้ว่าการค้นพบรังสีเอกซ์ตั้งแต่บัดนั้นเป็นต้นมา รังสีเอกซ์มีคุณสมบัติเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 10^{-5} nm – 10 nm เกิดจากการเปลี่ยนสถานะของระดับพลังงานบริเวณชั้นโคจร (electron shell) ของอะตอมเมื่ออะตอมนั้นได้รับพลังงานมากกระตุ้น (excite) ให้เกิดการเปลี่ยนระดับพลังงานบริเวณนอกนิวเคลียส อะตอมที่ได้รับพลังงานกระตุ้นจะปลดปล่อยพลังงานส่วนเกินเพื่อลดระดับพลังงานลงให้กลับสู่สถานะพื้น (ground state) ซึ่งพลังงานส่วนเกินจะปลดปล่อยออกมาในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านความถี่ของรังสีเอกซ์โดยที่มวลของอะตอมนั้นไม่มีการเปลี่ยนแปลง รังสีเอกซ์แบ่งออกได้ 2 ชนิด ตามกระบวนการปลดปล่อยพลังงานส่วนเกินจากอะตอมบริเวณชั้นโคจรของอิเล็กตรอน ได้แก่ รังสีเอกซ์เฉพาะตัวและรังสีเอกซ์แบบต่อเนื่อง

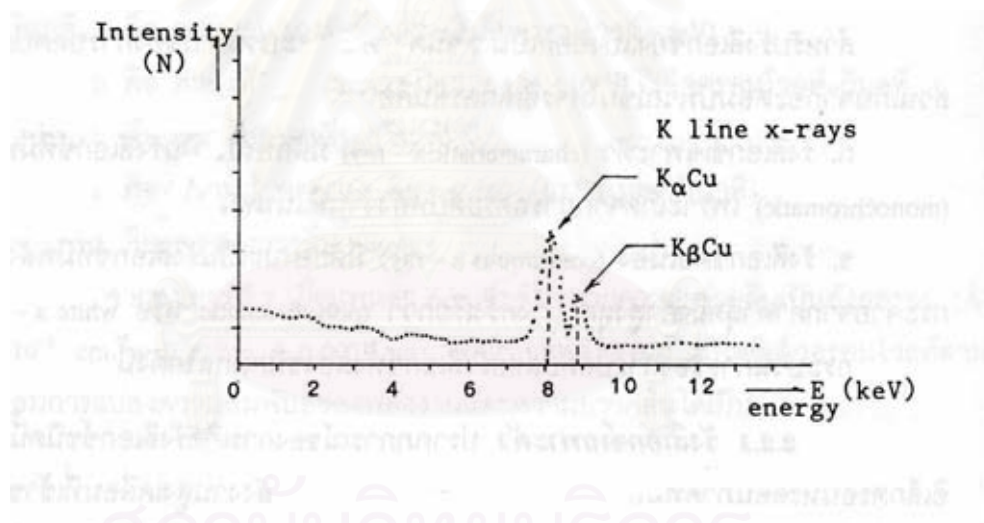
2.1.1.1 รังสีเอกซ์เฉพาะตัว

รังสีเอกซ์เฉพาะตัวจะเกิดขึ้นเมื่ออนุภาคที่มีประจุหรือโฟตอน ซึ่งมีพลังงานสูงเคลื่อนที่เข้าไปในวัสดุและถ่ายโอนพลังงานให้อิเล็กตรอนที่โคจรรอบนิวเคลียสในชั้น K หรือ L เมื่ออิเล็กตรอนได้รับพลังงานเพิ่มขึ้นเกินพลังงานยึดเหนี่ยวของวงโคจร (binding energy) วงโคจรหนึ่งก็จะหลุดจากวงโคจรทำให้เกิดที่ว่างในวงโคจรนั้น เมื่ออะตอมอยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นจึงพยายามลดระดับพลังงานลงมาโดยอิเล็กตรอนที่อยู่ในระดับพลังงานสูงขึ้นไปจากตำแหน่งชั้นโคจรที่ว่างลงจะคายพลังงานออกมาเท่ากับผลต่างของพลังงานยึดเหนี่ยวในสองวงโคจรเพื่อเข้ามาแทนที่ตำแหน่งอิเล็กตรอนที่ว่าง พลังงานที่ปลดปล่อยออกมาจะอยู่ในรูปของรังสีเอกซ์ โดยธาตุแต่ละชนิดจะมีค่าผลต่างของพลังงานเป็นค่าเฉพาะตัวจึงทำให้รังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นมีค่าเฉพาะตัวด้วย ขึ้นอยู่กับว่าปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นกับอะตอมของธาตุชนิดใด รังสีเอกซ์ชนิดนี้จึงมีชื่อเรียกว่า “รังสีเอกซ์เฉพาะตัว (characteristic x-ray)” ดังแสดงกลไกการเกิดในรูปที่ 2.2



ก. อันตรกิริยาของอะตอม

ข. การเกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัวที่ระดับพลังงานของวงโคจรต่างๆ



ค. สเปกตรัมของรังสีเอกซ์เฉพาะตัวของทองแดง

รูปที่ 2.2 แสดงการเกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัว [1]

จากรูป 2.2 ก. เมื่ออิเล็กตรอนปฐมภูมิมีพลังงาน E_i เคลื่อนเข้าชนอิเล็กตรอนในวงโคจรชั้น K ที่มีค่าพลังงานยึดเหนี่ยวเท่ากับ E_K พลังงานของอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่กระเด็นหลุดออกมาจะมีค่าเป็น E_s คือ

$$E_s = E_i - E_K \quad (2)$$

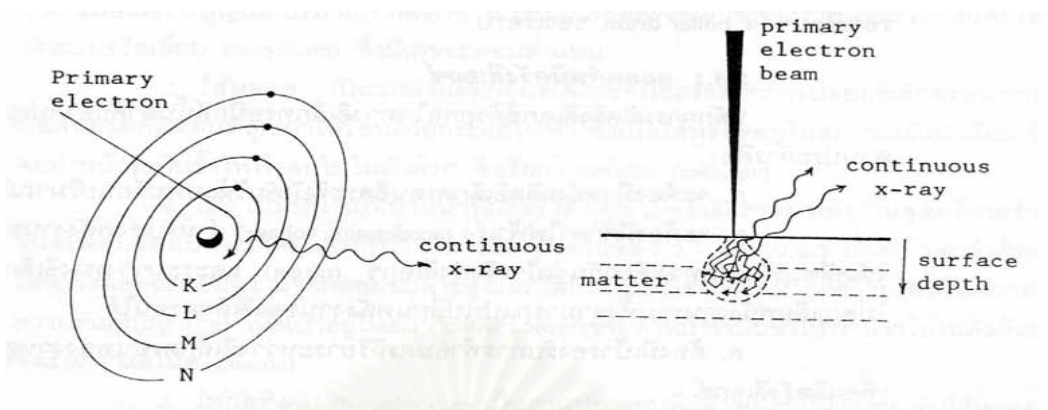
ถ้าอิเล็กตรอนในวงโคจร L ซึ่งมีพลังงานที่วงโคจรเท่ากับ E_L ลดระดับพลังงานลงมาในวงโคจรชั้น K พลังงานรังสีเอกซ์เฉพาะตัว E_x จะมีค่าเป็น

$$E_x = E_L - E_K \quad (3)$$

นอกจากวงโคจรหลักคือ K, L, M, \dots แล้วยังมีวงโคจรย่อยหรือเรียกว่า subshell อีกซึ่งการลดระดับพลังงานของอะตอมใน subshell นั้นอธิบายได้ด้วยกลศาสตร์ควอนตัม (quantum mechanics) รังสีเอกซ์เฉพาะตัวที่เกิดขึ้นจากการที่อิเล็กตรอนวงนอกคายพลังงานและเข้าไปแทนที่อิเล็กตรอนในวงโคจร K, L, M ยังมีชื่อเรียกเฉพาะอีกดังเช่น อิเล็กตรอนในชั้น L คายพลังงานลงมาแทนที่ว่างในชั้น K เรียกว่า รังสีเอกซ์ K_α และหากอิเล็กตรอนคายพลังงานจากชั้น M ลงมาก็จะเรียกว่ารังสีเอกซ์ K_β ส่วนรังสีเอกซ์ที่เกิดจากการคายพลังงานจากชั้น M ลงมา L และจากชั้น N ลงมา M จะเรียกว่า รังสีเอกซ์ L_α และรังสีเอกซ์ M_α ตามลำดับ หรือถ้าเป็นการคายพลังงานจากวงโคจรชั้นนอกลงมายังชั้นย่อยเช่น จากชั้น M ลงมาชั้นย่อยของ L ก็จะมีชื่อเรียกว่ารังสีเอกซ์ L_{α_1} และ L_{α_2} เป็นต้น ดังแสดงในรูป 2.2 ข. การแทนที่ของวงโคจรของอิเล็กตรอนชั้นถัดออกไปจะเป็นไปตามลำดับชั้นจนเกิดสมดุลของอะตอมในสภาวะพื้น

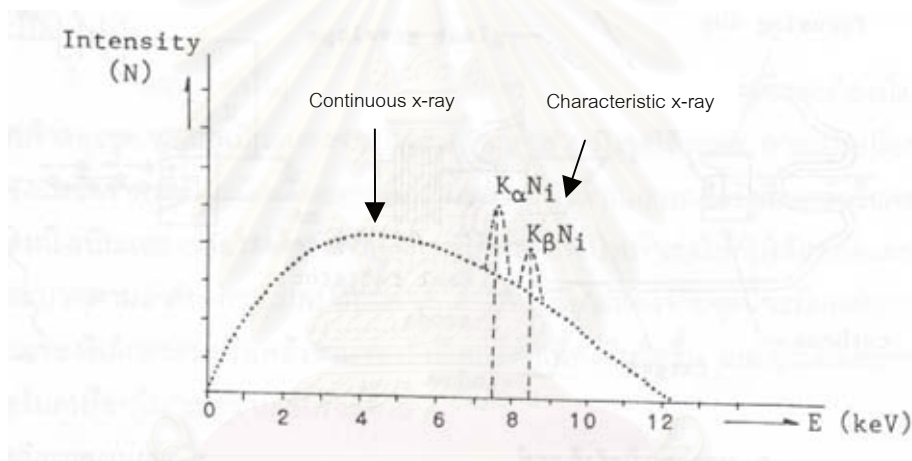
2.1.1.2 รังสีเอกซ์ต่อเนื่อง

เกิดจากอนุภาคที่มีประจุพลังงานสูงเคลื่อนเข้าสู่บริเวณที่มีความเข้มสนามคูลอมบ์ (coulomb field) สูงซึ่งอยู่บริเวณใกล้นิวเคลียสของอะตอมแล้วเกิดการสูญเสียพลังงานอย่างรวดเร็วในสนามคูลอมบ์โดยการปลดปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในรูปรังสีเอกซ์ออกมาเรียกปรากฏการณ์นี้ว่าการเกิด bremsstrahlung หรือ braking radiation ดังแสดงกลไกในรูป 2.3 ก. เช่นในกรณีที่มีอิเล็กตรอนปฐมภูมิเคลื่อนที่เข้าชนพื้นผิวของเป้าโลหะแล้วเกิดการกระเจิงของอิเล็กตรอนลงไปภายในโลหะนั้นที่ความลึกต่างๆ พลังงานของรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นก็จะมีการกระจายอย่างต่อเนื่องโดยมีค่าต่ำสุดไปถึงค่าสูงสุดของอิเล็กตรอนปฐมภูมิที่เคลื่อนเข้าชนจึงได้รังสีเอกซ์ที่เป็นรังสีเอกซ์แบบต่อเนื่อง (continuous x-ray) ดังแสดงในรูป 2.3 ข. ถ้าหากอิเล็กตรอนปฐมภูมิมีพลังงานมากพอที่จะชนแล้วทำให้อิเล็กตรอนในวงโคจรหลุดออกไปได้ ก็จะมีรังสีเอกซ์เฉพาะตัวเกิดขึ้นซ้อนกันด้วยซึ่งแสดงได้ดังสเปกตรัมในรูป 2.3 ค.



ก. อันตรกิริยาของอะตอม

ข. การกระเจิงของอิเล็กตรอนปฐมภูมิก่อน
เกิดอันตรกิริยากับอะตอม



ค. สเปกตรัมของรังสีเอกซ์ต่อเนื่องจากเป้าหมายเกิด

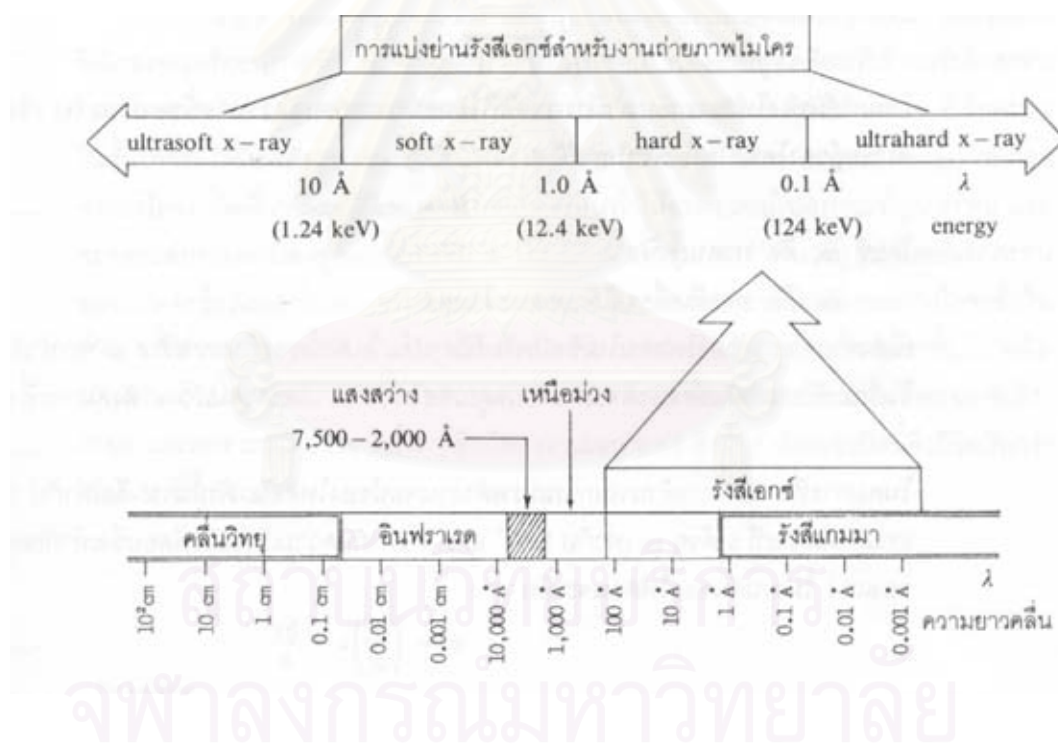
รูปที่ 2.3 แสดงการเกิดรังสีเอกซ์ต่อเนื่อง [1]

2.1.1.3 ย่านพลังงานรังสีเอกซ์

ในการใช้งานรังสีเอกซ์นั้นจะต้องคำนึงถึงคุณสมบัติของวัสดุตัวกลางและพลังงานของรังสีด้วย เนื่องจากสัมประสิทธิ์การลดทอนปริมาณรังสีของวัสดุขึ้นกับพลังงาน $[\mu(E)]$ ดังนั้นพลังงานของรังสีเอกซ์จึงมีผลต่อความเปรียบต่างของภาพ โดยรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานที่ต่ำกว่าจะให้ผลความเปรียบต่างของภาพสูงกว่ารังสีเอกซ์ที่มีพลังงานสูงในวัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำ ดังนั้นนักวิทยาศาสตร์

ศาสตร์จึงได้แบ่งย่านของรังสีเอกซ์จากความสามารถในการทะลุทะลวง หรือระดับพลังงานที่ใช้ในการถ่ายภาพทางไมโครไว์ดังนี้ [1]

- ก. รังสีเอกซ์พลังงานสูงมาก (ultrahard x-ray) มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 0.1 \AA (124 keV) ลงมา
- ข. รังสีเอกซ์พลังงานสูง (hard x-ray) มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงระหว่าง 1.0 \AA ถึง 0.1 \AA (12.4 keV ถึง 124 keV)
- ค. รังสีเอกซ์พลังงานต่ำ (soft x-ray) มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงระหว่าง 10 \AA ถึง 1.0 \AA (1.24 keV ถึง 12.4 keV)
- ง. รังสีเอกซ์พลังงานต่ำมาก (ultrasoft x-ray) มีความยาวคลื่นตั้งแต่ 10 \AA (1.24 keV) ขึ้นไป



รูปที่ 2.4 สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและการแบ่งย่านรังสีเอกซ์สำหรับการถ่ายภาพไมโครด้วยรังสีเอกซ์ [1]

2.1.2 คุณภาพของภาพถ่ายรังสีเอกซ์

2.1.2.1 คุณสมบัติของภาพถ่ายที่ดี

การถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์นั้นมิ่วัตถุประสงค์ที่จะตรวจสอบโครงสร้างภายในของวัตถุตัวอย่าง ดังนั้นภาพถ่ายที่ได้จึงควรมีความไวความเปรียบต่าง (contrast sensitivity) สูง เพื่อที่จะสามารถตรวจหารอยบกพร่องขนาดเล็กหรือศึกษาโครงสร้างขนาดเล็กได้ ดังนั้นภาพถ่ายที่ดีจึงควรมีคุณสมบัติ 4 ประการคือ [3]

ก. มีความคมชัด (sharpness definition) หมายถึงภาพต้องมีขอบเงามัวหรือไม่คมชัด (penumbra) น้อยที่สุด

ข. มีความเปรียบต่างสูง (high contrast) หมายถึงภาพต้องมีความแตกต่างของความดำที่เกิดขึ้นบนฟิล์มสูง

ค. มีความดำพอเหมาะ (adequate density) หมายถึงภาพที่ได้ต้องไม่ดำหรือจางเกินไป

ง. เกิดความบิดเบือนน้อยที่สุด (minimum distortion) หมายถึงภาพถ่ายด้วยรังสีเอกซ์ที่ได้ต้องมีลักษณะเหมือนชิ้นงานจริงหรือมีความใกล้เคียงกับชิ้นงานจริงมากที่สุด

2.1.2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของภาพถ่ายรังสีเอกซ์

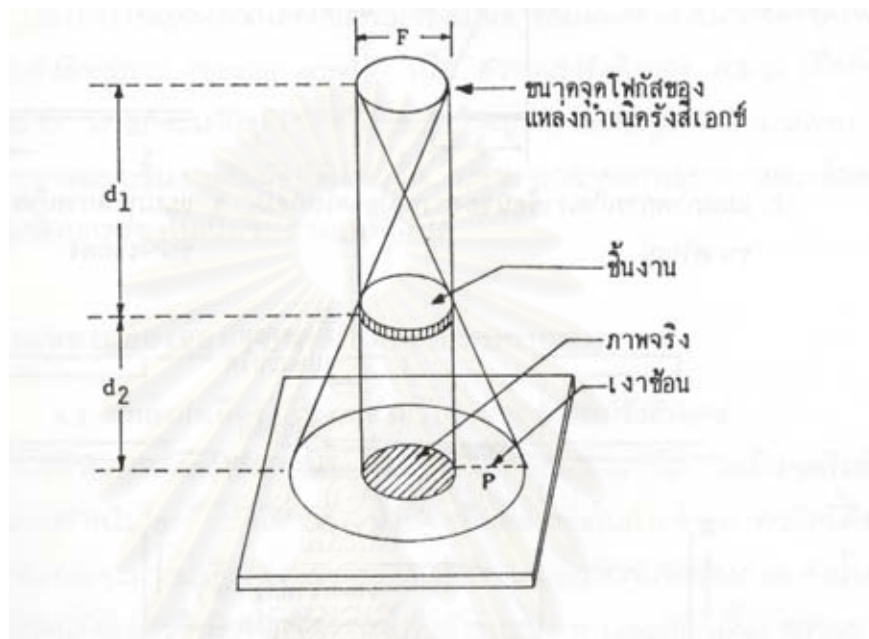
ในทางปฏิบัติคุณภาพของภาพถ่ายจะคำนึงถึงความเปรียบต่างของรายละเอียดภาพ (contrast) และความคมชัดของภาพ (sharpness) เป็นสำคัญ องค์ประกอบที่ส่งผลต่อความคมชัดของภาพได้แก่ ขนาดของจุดโฟกัสของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ (F) ระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดรังสีกับชิ้นงาน (d_1) และระยะห่างระหว่างชิ้นงานกับฟิล์ม (d_2) กล่าวคือ การถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์นั้นเมื่อจุดโฟกัสมีขนาดใหญ่ เปรียบเสมือนมีจุดกำเนิดรังสี (point source) กระจายอยู่บนพื้นที่ของโฟกัสนั้น ถ้ารังสีเอกซ์ที่กระจายจากจุดต่างๆจะฉายลงมาตัดกันบนชิ้นงานทำให้เกิดเงาซ้อนคล้ายปรากฏการณ์ที่เกิดพระอาทิตย์ทรงกลด (penumbra) ซึ่งขนาดความไม่คมชัดของภาพที่เกิดจากความมัวของเงาซ้อน เรียกว่า penumbra width (P) จากภาพฉายเรขาคณิตรูปที่ 2.5 สามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างขนาดจุดโฟกัส (F) ระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดรังสีกับชิ้นงาน (d_1) และระยะห่างระหว่างชิ้นงานกับฟิล์ม (d_2) ได้ดังสมการที่ 4 [1,3] คือ

$$P = F(d_2/d_1) \quad (4)$$

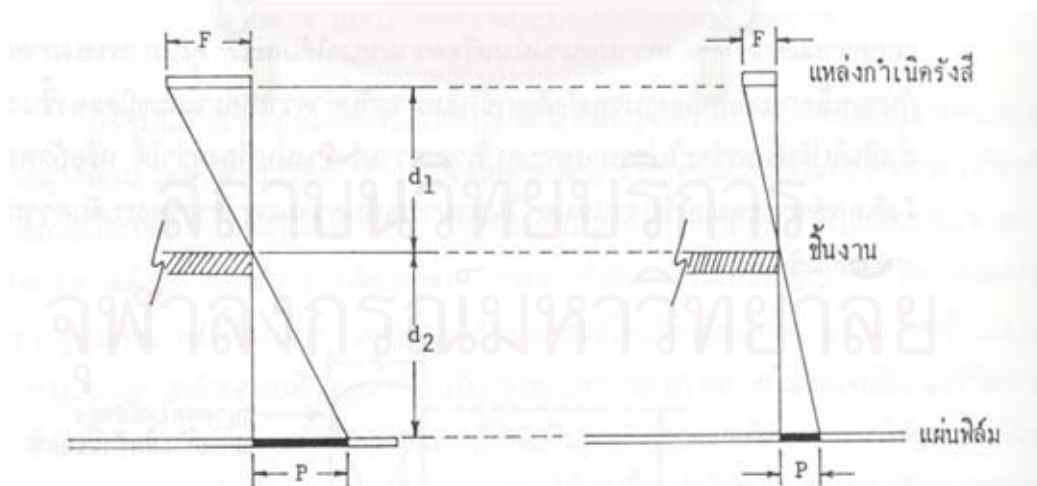
เมื่อ F คือ ขนาดของจุดโฟกัสแหล่งกำเนิด

d_1 คือ ระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดรังสีกับชิ้นงาน

d_2 คือ ระยะห่างระหว่างชิ้นงานกับฟิล์ม



รูปที่ 2.5 การเกิดเงาซ้อนบนภาพถ่ายรังสีเอกซ์



ก. แผนภาพการเกิดเงาซ้อนของภาพ

ข. แผนภาพการเกิดเงาซ้อนของภาพ

เมื่อมีจุดโฟกัสขนาดใหญ่

เมื่อมีจุดโฟกัสขนาดเล็ก

รูปที่ 2.6 แผนภาพแสดงการเกิดเงาซ้อนเมื่อจุดโฟกัสมีขนาดใหญ่และเล็ก [1]

ภาพเปรียบเทียบรูปที่ 2.6 ก. และรูปที่ 2.6 ข. ขณะที่ระยะ d_1 และระยะ d_2 เท่ากัน จะเห็นได้ว่าเมื่อจุดโฟกัสมีขนาดเล็กกลางการเกิดเงาซ้อนของภาพก็จะมีขนาดเล็กด้วย นั่นคือภาพถ่ายที่ได้จะมีความคมชัดที่ดีกว่า จากสมการที่ 2 การลดขนาดของเงาซ้อน P นั้นสามารถทำได้โดย 3 วิธีการดังนี้

ก. การลดระยะห่างระหว่างชิ้นงานกับแผ่นฟิล์มลง (d_2) ซึ่งสามารถทำได้ต่ำที่สุดโดยการวางชิ้นงานสัมผัสกับแผ่นฟิล์ม ขนาดภาพถ่ายที่ได้จะมีขนาดเท่ากับของจริงเป็นการลดความผิดเพี้ยนของขนาดสิ่งบ่งชี้ในชิ้นงานลง

ข. การเพิ่มระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดรังสีกับชิ้นงาน (d_1) ให้มากขึ้น ซึ่งสามารถทำได้แต่จะมีผลกระทบตามมาคือต้องใช้เวลาในการถ่ายภาพนานมากขึ้นเนื่องจากปริมาณรังสีปฐมภูมิบนชิ้นงานจะลดลงตามกฎกำลังสองผกผันของความเข้มรังสีและระยะทาง (inverse square law)

ค. การลดขนาดของจุดโฟกัสแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ให้มีขนาดเล็กลง ในกรณีหลอดรังสีเอกซ์จะทำได้ต่อเมื่อโครงสร้างของหลอดรังสีเอกซ์สามารถควบคุมขนาดของปลายลำอิเล็กตรอนให้มีขนาดเล็กมากโดยขึ้นอยู่กับการออกแบบโครงสร้างของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์

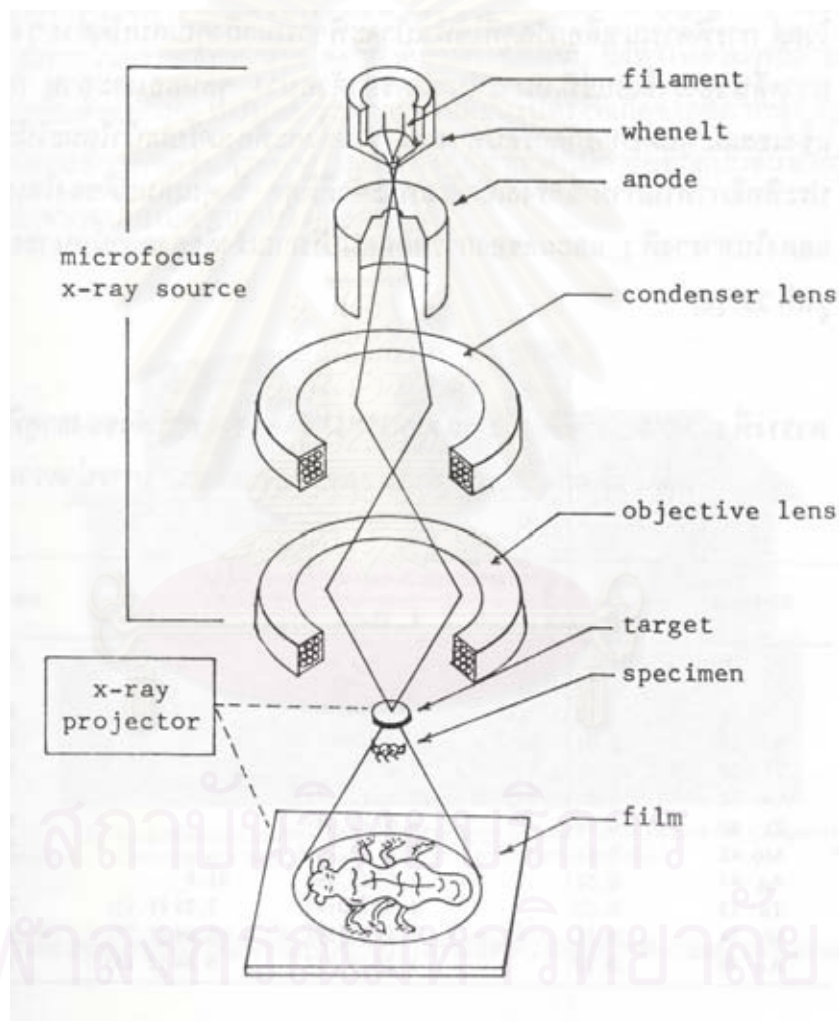
2.2 ระบบจุลทรรศน์รังสีเอกซ์

ในระบบจุลทรรศน์รังสีเอกซ์นั้นสิ่งที่จำเป็นอย่างยิ่งคือความสามารถในการแจกแจงรายละเอียดของสิ่งบ่งชี้หรือชิ้นงานขนาดเล็กที่ต้องการจะตรวจสอบรวมทั้งภาพที่ได้ต้องมีความคมชัดมองเห็นด้วยตาเปล่าได้ ดังนั้น ระบบถ่ายภาพแบบจุลทรรศน์รังสีเอกซ์จึงมีความต้องการภาพที่มีกำลังขยาย (magnification) ที่เกิดจากความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ที่พอเหมาะและต้องการจุดโฟกัสของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีขนาดเล็ก ซึ่งต้องอาศัยระบบอิเล็กทรอนิกส์ช่วยในการบังคับลำอิเล็กตรอนให้มีขนาดเล็กก่อนที่จะถูกโฟกัสลงบนเป้าหมายผลิตรังสีเอกซ์

2.2.1 องค์ประกอบของระบบจุลทรรศน์รังสีเอกซ์

ส่วนประกอบหลักของระบบจุลทรรศน์รังสีเอกซ์แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ชนิดไมโครกัส และอุปกรณ์ฉายภาพถ่ายรังสีเอกซ์ โดยแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์แบบไมโครโฟกัสนั้นจะอาศัยระบบอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งทำงานภายใต้สภาวะสุญญากาศ อิเล็กตรอนจะถูกปลดปล่อยออกมาจากไส้หลอดทั้งสแตนด์บาย (hair pin type) จากการเผาให้ร้อนด้วยกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับไส้หลอดทั้งสแตนด์บาย หลังจากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยออกมาจะถูกควบคุม

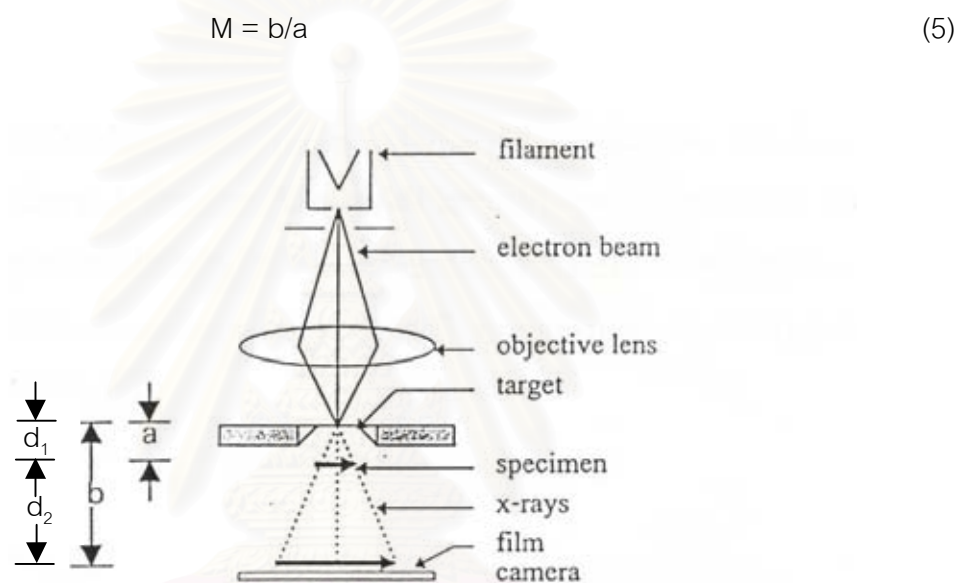
โดยการไบอัสระหว่างไส้หลอดและ wehnelt cup เพื่อให้อิเล็กตรอนไปรวมกันที่จุดๆหนึ่ง (cross over point) ซึ่งอยู่ระหว่าง wehnelt cup กับ แอโนด ก่อนที่ลำอิเล็กตรอนจะถูกเร่งด้วย ศักดาไฟฟ้าสูงให้ผ่านช่องแอโนดผ่านระบบเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งทำหน้าที่บังคับขนาดลำอิเล็กตรอนให้มีขนาดเล็กก่อนจะถูกโฟกัสลงบนเป้าผลิตรังสีเอกซ์เพื่อสร้างรังสีเอกซ์ในการนำไปใช้งาน ส่วนการสร้างภาพขยายนั้นจะขึ้นอยู่กับการจัดระบบถ่ายภาพของส่วนฉายภาพโดยอาศัยการจัดระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ ชิ้นงานที่ต้องการถ่ายภาพ และแผ่นฟิล์ม ดังแสดงโครงสร้างในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของระบบจุลทรรศน์รังสีเอกซ์แบบฉายภาพ [1]

2.2.2 ขีดจำกัดของรายละเอียดภาพถ่ายด้วยจุลทรรศน์รังสีเอกซ์

หลักการกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีโฟกัสขนาดเล็กมากอาศัยการโฟกัสลำอิเล็กตรอนลงบนเป้าโลหะกระตุ้นให้เกิดการปลดปล่อยรังสีเอกซ์ดังแผนภาพในรูปที่ 2.8 ซึ่งมีโครงสร้างคล้ายกับการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ซึ่งอาศัยเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าในการบังคับจุดโฟกัสให้มีขนาดเล็ก เมื่อจัดระยะห่างของชิ้นงานกับต้นกำเนิดรังสีและต้นกำเนิดรังสีกับฟิล์มเท่ากับ a และ b ตามลำดับจะได้กำลังขยายภาพตามสมการที่ 5.



รูปที่ 2.8 แผนภาพการถ่ายภาพรังสีด้วยเทคนิคจุลทรรศน์รังสีเอกซ์ [2]

หากกำหนดระยะระหว่างต้นกำเนิดรังสีกับฟิล์ม (b) ให้คงที่สามารถจัดกำลังขยายของภาพถ่ายได้ด้วยการแปรเปลี่ยนระยะ d_1 และ d_2 ได้โดยยังคงรักษาความคมชัดของภาพไว้ ในระบบจุลทรรศน์รังสีเอกซ์นั้นขีดจำกัดของรายละเอียดภาพถ่ายจะขึ้นอยู่กับขนาดของจุดโฟกัส (F) ของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์และ ขนาดของ diffraction fringe ดังแผนภาพประกอบของขีดจำกัดในการแจกแจงรายละเอียดภาพซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดของจุดโฟกัสแหล่งกำเนิด และ การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ดังรูปที่ 2.9 จากทฤษฎีเรขาคณิตและผลการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์สามารถวิเคราะห์สมการความสามารถในการแจกแจงรายละเอียดภาพได้ดังสมการที่ 5.1 และ 5.2 [1]

$$\delta \approx F \quad (\text{เมื่อพิจารณาขนาดจุดโฟกัสแหล่งกำเนิด}) \quad (5.1)$$

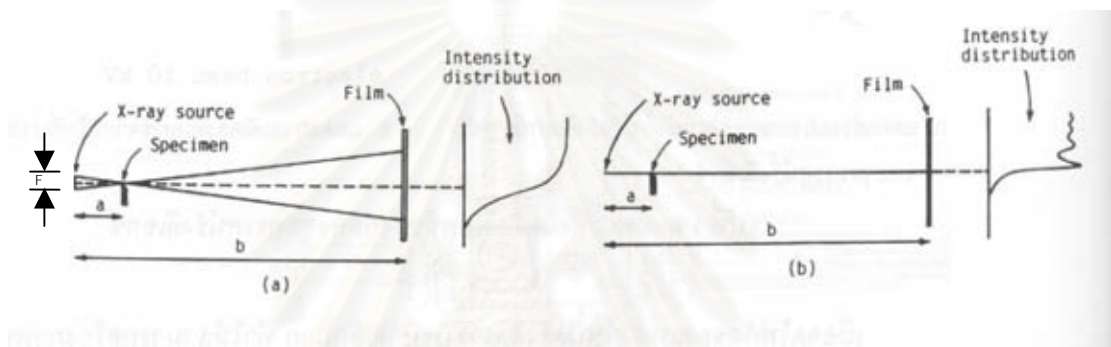
$$\delta \approx \sqrt{a\lambda} \quad (\text{เมื่อพิจารณาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์}) \quad (5.2)$$

เมื่อ δ คือ ความสามารถในการแจกแจงรายละเอียดภาพ

F คือ เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของจุดโฟกัส

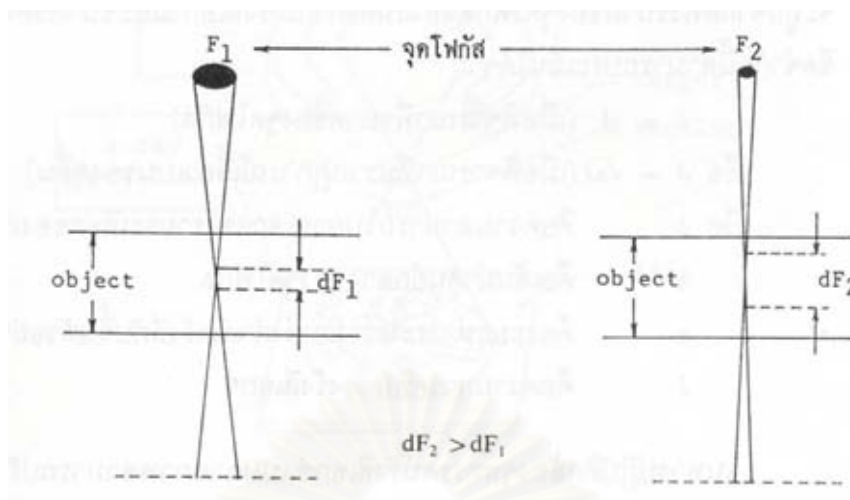
a คือ ระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดกับชิ้นงานตัวอย่าง

λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์



รูปที่ 2.9 ขีดจำกัดของการแจกแจงรายละเอียดภาพ [1]

โดยในทางปฏิบัติแล้วกล้องจุลทรรศน์รังสีเอกซ์สามารถปรับเปลี่ยนกำลังขยายได้ตั้งแต่ 20 ถึง 200 เท่า และมีความสามารถที่จะแจกแจงรายละเอียดของภาพถ่ายได้ในช่วง 0.1 ถึง 1.0 μm ขึ้นอยู่กับเป้าโลหะที่เลือกใช้ในการผลิตรังสีเอกซ์ด้วย นอกจากนี้หากพิจารณาถึงขนาดของจุดโฟกัสของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์แล้วจะพบว่าแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีขนาดจุดโฟกัสที่เล็กกว่าจะมีผลให้ความลึกของความคมชัด (depth of focus: dF) ที่สูงกว่าด้วย ในกรณีนี้ระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์กับชิ้นงานตัวอย่างและระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์กับแผ่นฟิล์มของทั้ง 2 กรณีนี้มีระยะเท่ากัน ดังแสดงภาพเปรียบเทียบในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 เปรียบเทียบความลึกของความชัดเมื่อจุดโฟกัสมีขนาดใหญ่และเล็ก [1]

2.3 แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์แบบไมโครโฟกัส

การกำเนิดรังสีเอกซ์ให้มีจุดโฟกัสขนาดเล็ก ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน คือ ปืนอิเล็กตรอนพร้อมระบบอิเล็กทรอนิกส์อพติค และเป้าผลิตรังสีเอกซ์ ซึ่งการทำงานของระบบจะทำงานในสภาวะสุญญากาศ โดยมีโครงสร้างและคุณลักษณะที่จะกล่าวต่อไปนี้

2.3.1 ปืนอิเล็กตรอน (electron gun)

2.3.1.1 โครงสร้างและการทำงานของปืนอิเล็กตรอน

ปืนอิเล็กตรอนจะต้องทำงานในสภาพที่มีความดันสุญญากาศสูงเพื่อป้องกันไม่ให้ผิวของแคโทดซึ่งมีอุณหภูมิสูงทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของอากาศที่หลงเหลืออยู่ในรูปที่ 2.11 ก. และ 2.11 ข. ปืนอิเล็กตรอนนั้นประกอบด้วยไส้ทั้งสแตน (tungsten filament : F) ซึ่งมีรูปตัว V ทำหน้าที่ปล่อยอิเล็กตรอนออกมาจากส่วนปลาย เมื่อมีความร้อนจากการที่กระแสไหลผ่าน (thermionic emission) โดยแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาต่ำ (V_F) สำหรับจุดไส้ความร้อน ซึ่งส่วนนี้จะทำหน้าที่เป็นแคโทดไปในตัว อีกส่วนจะเป็นโลหะที่ครอบไส้ทั้งสแตนอยู่เรียกว่า "wehnelt : G" ทำหน้าที่ในการควบคุมลำอิเล็กตรอนที่จะออกไปยังแอโนด (A) คล้ายการทำงานของหลอดสุญญากาศแบบไตรโอด (triode electron tube) การไบอัสวงจรประกอบด้วยแหล่งจ่ายศักดาไฟฟ้าสูง (V_A) ที่จ่าย

ระหว่างแอโนดกับแคโทดซึ่งจะจ่ายผ่านตัวต้านทานของวงจรรีด (R_c) ไปยังไส้แคโทด สร้างความต่างศักย์ขึ้นระหว่างแอโนดเพดกับแคโทดทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลในวงจรรีด (I_p) ในขณะที่มีกระแสไฟฟ้าไหลในวงจรรีดนั้นจะมีกระแสไหลผ่านความต้านทานวงจรรีด เกิด self bias ขึ้นที่วงจรรีด โดยศักดาไฟฟ้าลบที่กริดจะทำหน้าที่ควบคุมกระแสในวงจรรีดไปในตัวด้วย กล่าวคือในขณะที่มีการปรับค่าให้ความต้านทานของวงจรรีดให้คงที่ที่ค่าใดๆแล้ว เมื่อกระแสของวงจรรีดมีค่าสูงกว่าที่ต้องการ กระแสที่ไหลผ่านความต้านทานวงจรรีดก็จะสูงขึ้นตามไปด้วย ทำให้เกิดการไบอัสกริดสูงขึ้น จะส่งผลตามมาก็คือทำให้กระแสในวงจรรีดลดลงอย่างอัตโนมัติ เป็นการควบคุมกระแสของอิเล็กตรอนให้คงที่

สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างฟิลาเมนต์ wehnelt และแอโนดจะมีพฤติกรรมเสมือนเลนส์สนามไฟฟ้าสถิต (electrostatic Lens) ซึ่งจะเกิดลักษณะการกระจายของศักดาไฟฟ้าแบบ Equipotential Surface ระบบเลนส์ที่เกิดขึ้นนี้จะบังคับให้กลุ่มอิเล็กตรอนเคลื่อนที่เป็นลำอิเล็กตรอนมีจุดตัด (crossover point) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง d_0 ซึ่งสามารถปรับขนาดได้ด้วยการปรับค่าความต้านทานวงจรรีด แผนภาพการทำงานของต้นกำเนิดอิเล็กตรอน และ ลักษณะ equipotential surface แสดงในรูปที่ 2.11 ก. และรูปที่ 2.11 ข. [5,10] ตามลำดับ ส่วนความหนาแน่นของกระแสที่จุดตัดนั้นสามารถคำนวณได้ในรูปของกระแสต่อพื้นที่ตามสมการที่ 7 [5]

$$J_c = \frac{i_c}{\pi \left(\frac{d}{2}\right)^2} \quad \text{A/cm}^2 \quad (7)$$

เมื่อ J_c = ความหนาแน่นของกระแสบริเวณจุดตัดของกลุ่มอิเล็กตรอน (A/cm^2)

i_c = กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านบริเวณจุดตัดของกลุ่มอิเล็กตรอน (A)

d = เส้นผ่านศูนย์กลางของลำอิเล็กตรอนบริเวณจุดตัดที่เกิดขึ้นจริง (effective diameter of beam) (cm)

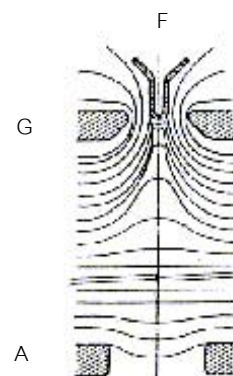
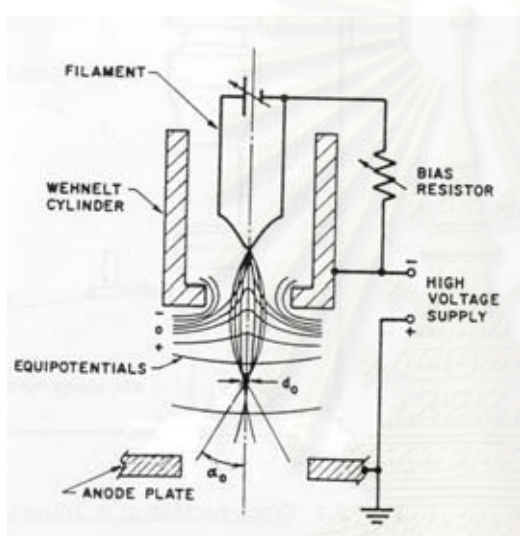
ในทางปฏิบัติแล้วสามารถคำนวณหาความสว่าง (brightness) ของลำอิเล็กตรอนได้จากกระแสไฟฟ้าที่บริเวณมุมกรวยตัน (solid angle) ซึ่งเกิดจากแนวเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนผ่านช่องแอโนด ดังนี้

$$B = \frac{i}{\pi^2 \left(\frac{d}{2}\right)^2 \alpha^2} \quad \text{A/cm}^2 \cdot \text{Sr} \quad (8)$$

เมื่อ B = ความสว่างของลำอิเล็กตรอน ($\text{A/cm}^2 \cdot \text{Sr}$)

α = ค่าครึ่งหนึ่งของมุมกรวยตัน (semi-angular aperture) (Sr)

i = กระแสในมุมกรวยตัน (A)



ก.แผนภาพการทำงานของต้นกำเนิด
ลำอิเล็กตรอน

ข. equipotential surface

รูปที่ 2.11 แผนภาพการทำงานของต้นกำเนิดลำอิเล็กตรอน และ equipotential surface [5,10]

2.3.1.2 การปลดปล่อยอิเล็กตรอนจากแคโทด

อิเล็กตรอนเป็นอนุภาคเล็กที่สุดที่ยึดเหนี่ยวกันด้วยแรงทางประจุไฟฟ้า (coulomb force) กับโครงสร้างอะตอม โดยอิเล็กตรอนที่อยู่ในวงโคจรชั้นนอกจะมีบทบาทสำคัญในการยึดเกาะระหว่างอะตอมเป็นมวลวัตถุ การที่จะทำให้อิเล็กตรอนหลุดจากพันธะโครงสร้างมวลวัตุนั้น จะต้องเพิ่มพลังงานแก่อิเล็กตรอนเพียงพอที่จะหนีจากสภาวะพันธะของอิเล็กตรอน และพลังงานที่ต้องเพิ่มให้อิเล็กตรอนจะมากขึ้นอยู่กับระดับพลังงานที่อิเล็กตรอนนั้นแฝงอยู่ ซึ่งพลังงานของอะตอมที่ยึดเกาะกันอยู่จะเรียกว่า "binding energy"

ในกรณีของโลหะที่จะพิจารณาใช้ทำเป็นแคโทดนั้นจะต้องมีการปลดปล่อยอิเล็กตรอนได้ดี โดยโลหะที่มีการปลดปล่อยอิเล็กตรอนได้ดีนั้นจะต้องมีค่าเวอริคฟังก์ชัน (work function) ที่ต่ำ แต่ไม่ได้หมายความว่าโลหะที่มีเวอริคฟังก์ชันต่ำทุกชนิดจะสามารถนำมาใช้ทำเป็นแคโทดได้ ซึ่งการพิจารณานำโลหะมาใช้ทำเป็นแคโทดนั้นจะต้องคำนึงถึงคุณสมบัติเฉพาะทางฟิสิกส์และเคมีของโลหะชนิดนั้นๆด้วย ในทางปฏิบัติโลหะผสมหลายชนิดมีค่าเวอริคฟังก์ชันต่ำกว่าโลหะเนื้อเดียว ปัจจุบันแคโทดจึงมีการผลิตด้วยวัสดุต่างๆ กันไป ตารางที่ 2.1 แสดงค่าคงที่ของธาตุชนิดต่างๆ สำหรับบ่งชี้คุณภาพในการปลดปล่อยอิเล็กตรอน

ตารางที่ 2.1 ค่าคงที่ของธาตุต่างๆ สำหรับบ่งชี้คุณภาพในการปลดปล่อยอิเล็กตรอน [4]

VALUE OF THE EMISSION CONSTANTS*

Element	A_0 ($A/m^2/deg^2$)	b_0 ($^{\circ}K^{-1}$)	$e\phi$ (eV)	Melting Point ($^{\circ}K$)
Calcium	60.2×10^4	37,100	3.2	1083
Carbon	60.2×10^4	54,400	4.7
Cesium	16.2×10^4	21,000	1.81	299
Copper	65×10^4	47,600	4.1	1356
Molybdenum	60.2×10^4	49,900	4.3	2895
Nickel	26.8×10^4	58,000	5.0	1725
Tantalum	60.2×10^4	47,600	4.1	3123
Thorium	60.2×10^4	39,400	3.4	2118
Tungsten	60.2×10^4	52,400	4.52	3643

* J.A. Beeker, *Rev. Mod. Phys.*, Vol. 7, p. 95 (1935).

วิธีการถ่ายโอนพลังงานให้อิเล็กตรอนอิสระในแถบนำกระแสให้สามารถมีพลังงานเพิ่มขึ้นจนเอาชนะเวอริคฟังก์ชันของผิวโลหะและหลุดจากผิวโลหะได้นั้น กระทำได้ 4 วิธี ดังนี้

ก. เทอร์มิออนิกอิมิสชัน (thermionic emission) เป็นวิธีที่ทำให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนโดยการให้ความร้อนแก่โลหะ อุณหภูมิที่สูงขึ้นจะถูกถ่ายโอนให้กับอิเล็กตรอนทำให้อิเล็กตรอนมีพลังงานจลน์สูงเพียงพอที่จะเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวที่ผิวโลหะได้ ซึ่งวิธีการนี้จะใช้กับแคโทดของหลอดสุญญากาศ หลอดแคโทดเรย์ และหลอดรังสีเอกซ์ เป็นต้น

ข. โฟโตอิมิสชัน (photoemission) เป็นวิธีที่ทำให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนด้วยพลังงานแสง โฟตอนที่ตกกระทบผิวโลหะจะถ่ายโอนพลังงานให้อิเล็กตรอนมีพลัง

งานจลน์สูงกว่าแรงยึดเหนี่ยวที่ผิวของโลหะ วิธีนี้ใช้กับแคโทดของหลอดไวแสง (phototube) หลอดไวแสงชนิดทวิคูณอิเล็กตรอน (PMT) เป็นต้น

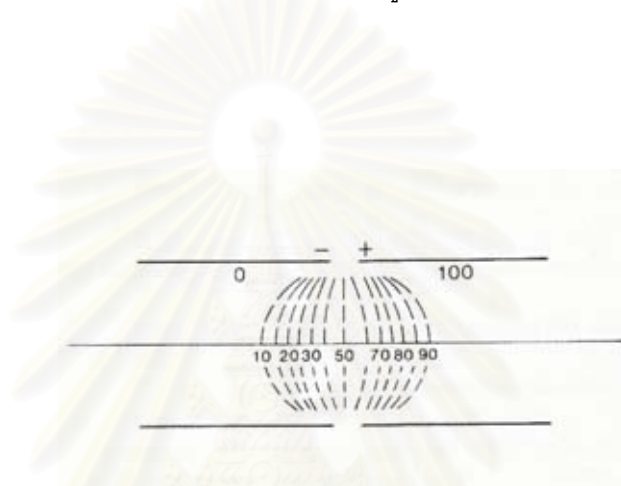
ค. เซ็กกันดารีอิมิสชัน (secondary emission) เป็นวิธีการทำให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนโดยการถ่ายโอนพลังงานจากการชนของอนุภาคปฐมภูมิ อิเล็กตรอนที่ได้รับพลังงานสูงกว่าแรงยึดเหนี่ยวที่ผิวโลหะจะหลุดออกมา วิธีนี้ใช้กับไดโอดของหลอดทวิคูณอิเล็กตรอน และแคโทดของหัววัดพลังงานของอนุภาคในเครื่องมือวิทยาศาสตร์

ง. ฟิลด์อิมิสชัน (field emission) เป็นการทำให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนด้วยการเหนี่ยวนำของสนามไฟฟ้าความเข้มสูง การเหนี่ยวนำด้วยแรงกระทำทางสนามไฟฟ้ามีผลทำให้พลังงานยึดเหนี่ยวที่ผิวโลหะลดลง และอิเล็กตรอนถูกเร่งให้หลุดจากผิวโลหะ วิธีนี้ใช้กับแคโทดของแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนในเครื่องมือวิทยาศาสตร์

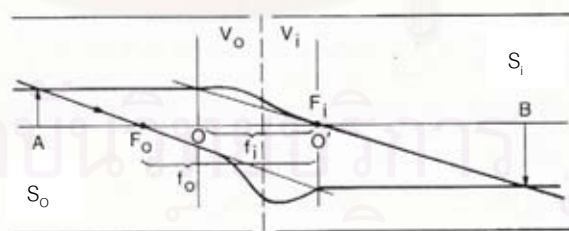
2.3.1.3 เลนส์สนามไฟฟ้าสถิต (electrostatic lens)

เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีศักดาไฟฟ้าค่าหนึ่งไปสู่บริเวณที่มีศักดาไฟฟ้าอีกค่าหนึ่ง อิเล็กตรอนจะเกิดการหักเหคล้ายการเคลื่อนที่ของแสงผ่านเลนส์แก้ว ซึ่งความแตกต่างของศักดาไฟฟ้านั้นจะเปรียบเสมือนดรรชนีหักเหของแสงที่ผ่านเลนส์แก้ว ลักษณะการกระจายของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่เข้ามาในสนามไฟฟ้าเนื่องจากอิเล็กตรอนจะมีทิศทางการเคลื่อนที่ตั้งฉากกับเส้นสมศักย์ (equipotential line) เสมอ การวิเคราะห์สมการการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจะต้องใช้คณิตศาสตร์ที่ค่อนข้างซับซ้อนเนื่องจากลักษณะการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าที่ส่งผลต่อทิศทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจะขึ้นอยู่กับรูปทรงของขั้วไฟฟ้า เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่เข้าสู่สนามไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงของดรรชนีหักเหที่ไม่ต่อเนื่องซึ่งหมายถึงเส้นสมศักย์ที่มีศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจะเปรียบเสมือนการเคลื่อนที่ของแสงผ่านกลุ่มของเลนส์แก้วที่มีผิวความโค้งเพิ่มขึ้นหรือลดลงอย่างต่อเนื่อง ดังแสดงการกระจายของสนามไฟฟ้าที่มีขั้วไฟฟ้าแบบทรงกระบอกขนาดรัศมีเท่ากันในรูปที่ 2.12 เส้นสมศักย์แทนด้วยเส้นประ และมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นทีละน้อย เมื่ออิเล็กตรอนแต่ละตัวเคลื่อนที่เข้าสู่เลนส์ตามผิวโค้งนูนต่างๆของเส้นสมศักย์ทางด้านซ้ายซึ่งมีศักดาไฟฟ้าต่ำสุด อิเล็กตรอนจะเกิดการหักเหเข้าหาเส้นแนวแกนแล้วผ่านกึ่งกลางของเลนส์และเคลื่อนที่ออกจากเส้นแนวแกนของเลนส์ไปทางขวา ในทางกลับกันเมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่เข้าสู่เลนส์สนามไฟฟ้าสถิตด้านที่มีศักดาไฟฟ้าสูงกว่าคือด้านขวาไปสู่บริเวณที่มีศักดาไฟฟ้าต่ำกว่าด้านซ้าย อิเล็กตรอนจะเกิดการหักเหออกจากเส้นแนวแกนของเลนส์ที่ผิวโค้งนูนของแต่ละเส้นสมศักย์ ผ่านกึ่งกลางเลนส์ แล้วผ่านผิวเว้าของเส้นสมศักย์ อิเล็กตรอนจึงเกิดการหักเหเข้าสู่เส้นแนวแกนของเลนส์ก่อนจะออกจากเลนส์ ซึ่งจะเห็นได้ว่า

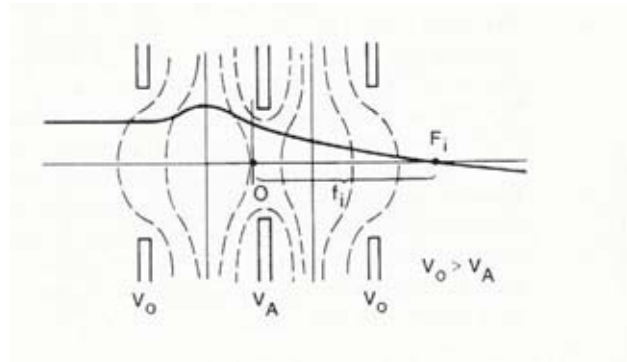
พฤติกรรมของกลุ่มอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ผ่านสนามไฟฟ้าสถิตจะประพฤติตัวเป็นเลนส์เกิดการบีบตัว (converge) ของลำอิเล็กตรอนที่ถูกเร่งด้วยศักดาไฟฟ้าสูงเมื่อเคลื่อนที่เข้าสู่เลนส์ในบริเวณที่มีศักดาไฟฟ้าต่ำกว่าไปหาบริเวณที่มีศักดาไฟฟ้าสูงกว่า และจะถูกหน่วงเมื่อเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีศักดาสูงกว่าไปสู่บริเวณที่มีศักดาไฟฟ้าต่ำกว่า หลักการพื้นฐานในการวิเคราะห์เรขาคณิตของเลนส์สนามไฟฟ้านั้นจะคล้ายกับการเคลื่อนที่ของแสงผ่านเลนส์แก้วดังแสดงแผนภาพในรูปที่ 2.13 ซึ่งเป็นการแสดงการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนผ่านเลนส์สนามไฟฟ้าสถิตแบบทรงกระบอก และรูปที่ 2.14 แสดงแผนภาพการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนเข้าสู่เลนส์สนามไฟฟ้าสถิตแบบ unipotential lens



รูปที่ 2.12 แผนภาพแสดงการกระจายตัวของเส้นสมศักย์ในเลนส์สนามไฟฟ้าสถิตแบบทรงกระบอกที่ขั้วไฟฟ้าจ่ายแรงดันไฟฟ้า 100 V [6]



รูปที่ 2.13 แสดงรูปเรขาคณิตของอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่เข้าสู่เลนส์สนามไฟฟ้าสถิตแบบทรงกระบอก [6]



รูปที่ 2.14 แสดงการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนผ่านเลนส์สนามไฟฟ้าสถิตแบบ unipotential [6]

จากแผนภาพในรูปที่ 2.13 สามารถแสดงความสัมพันธ์ของสมการในการหาความยาวโฟกัสและกำลังขยายของเลนส์ได้ดังสมการที่ 9 และ 10 [6]

$$\frac{f_o}{S_o} + \frac{f_i}{S_i} = 1 \quad (9)$$

$$\frac{Y_i}{Y_o} = -\frac{f_o}{f_i} \frac{S_i}{S_o} \quad (10)$$

เมื่อ f_o คือ ความยาวโฟกัสวัตถุของเลนส์

f_i คือ ความยาวโฟกัสภาพของเลนส์

S_o คือ ระยะวัตถุ

S_i คือ ระยะภาพ

Y_o คือ ขนาดวัตถุ

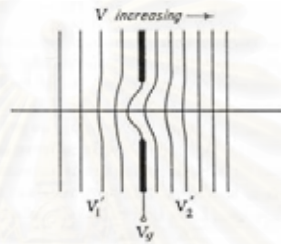
Y_i คือ ขนาดภาพ

ศูนย์วิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตัวอย่างของเลนส์สนามไฟฟ้าสถิตบางชนิด

ก. เลนส์สนามไฟฟ้าสถิตแบบออเพอร์เจอร์ (aperture lens)

ถ้ามีช่องรูวงกลมของแผ่นบังค้ำลำอิเล็กตรอน (aperture) ขึ้นอยู่ระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 ขั้วที่มีศักดาไฟฟ้าต่างกัน การกระจายตัวของเส้นสมศักย์รอบช่องรูวงกลมจะมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.15 เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ขนานกับแกน Z เข้าสู่บริเวณสนามไฟฟ้าดังกล่าว จะสามารถหาระยะโฟกัสของอิเล็กตรอนได้ดังสมการ 11 [7]



รูปที่ 2.15 aperture lens

$$f = \frac{4V_g}{V'_2 - V'_1} \text{ cm} \quad (11)$$

เมื่อ V'_1 = ศักดาไฟฟ้าเกรเดียนท์ (voltage gradients) ด้านที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่เข้าสู่สนามไฟฟ้า (V/cm)

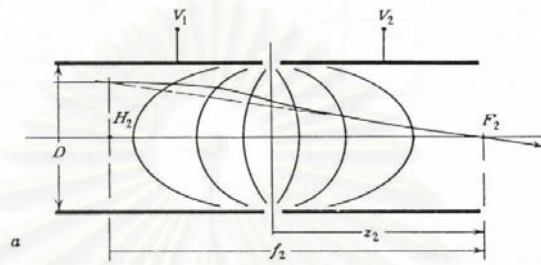
V'_2 = ศักดาไฟฟ้าเกรเดียนท์ (voltage gradients) ด้านที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ออกจากสนามไฟฟ้า (V/cm)

V_g = ศักดาไฟฟ้าที่ช่องวงกลม (V)

ข. เลนส์สนามไฟฟ้าสถิตแบบทรงกระบอก (cylinder lens)

เมื่อพิจารณาสนามไฟฟ้าที่ประกอบขึ้นด้วยขั้วไฟฟ้าทรงกระบอก 2 ขั้วที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากันและมีศักดาไฟฟ้าเท่ากับ V_1 และ V_2 ตามลำดับ จะพบว่า การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะได้ดังรูปที่ 2.16 เลนส์สนามไฟฟ้านี้จะมีคุณสมบัติเป็นเลนส์รวมลำอิเล็กตรอน (convergent lens) ทั้ง 2 กรณีคือ $V_1 > V_2$ และ $V_2 > V_1$ และถ้าให้ Z เป็นระยะจากปากกระบอกขั้วไฟฟ้าหนึ่งถึงจุดกึ่งกลางของระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าทรงกระบอกทั้ง

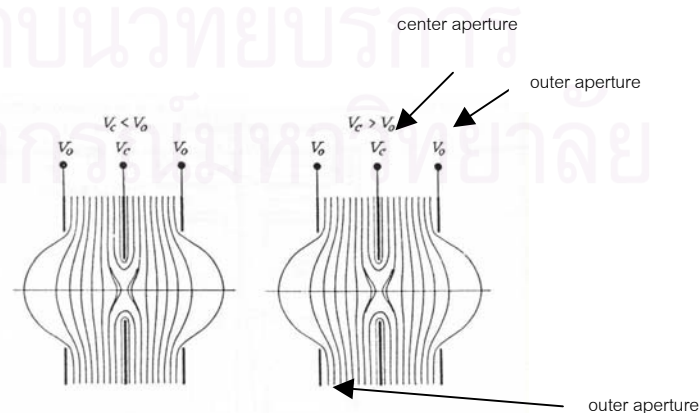
สอง เมื่อ $V_2 > V_1$ ลำอิเล็กตรอนจะบรรจบกันในพื้นที่ส่วน $Z < 0$ ซึ่งเป็นขั้วไฟฟ้าอันแรก และอิเล็กตรอนจะบานออก (diverge) ในส่วนพื้นที่ $Z > 0$ เมื่อพิจารณาในส่วนของคุณภาพจะพบว่าความเร็วของอิเล็กตรอนที่ $Z < 0$ จะช้ากว่า ส่วน $Z > 0$ ในทางกลับกัน เมื่อ $V_1 > V_2$ อิเล็กตรอนจะบานออกที่บริเวณ $Z < 0$ และจะบรรจบกันที่บริเวณ $Z > 0$ ในกรณีนี้ความเร็วของอิเล็กตรอนที่ $Z > 0$ จะถูกหน่วงให้ช้าลงเป็นลำดับเมื่อเทียบกับบริเวณ $Z < 0$ จนอิเล็กตรอนเกิดการบรรจบกันมากที่สุด



รูปที่ 2.16 เลนส์สนามไฟฟ้าแบบทรงกระบอก [7]

ค. เลนส์สนามไฟฟ้าสถิตแบบยูนิโพเทนเชียล (unipotential lens)

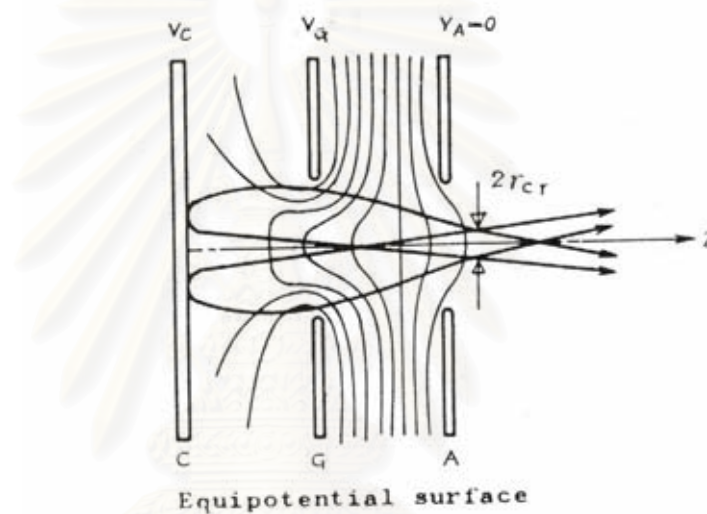
เลนส์สนามไฟฟ้าสถิตแบบยูนิโพเทนเชียลจะประกอบไปด้วยขั้วไฟฟ้าซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นบังคับลำอิเล็กตรอนแบบมีช่องกลม (aperture) 3 ชั้นวางอยู่ในแนวแกนเดียวกัน โดยศักดาไฟฟ้าที่ขั้วไฟฟ้าด้านนอกทั้งสองขั้วจะเท่ากันและห่างจากขั้วไฟฟ้าตรงกลางเป็นระยะทางเท่ากัน ดังแสดงในรูปที่ 2.17 เลนส์สนามไฟฟ้าแบบยูนิโพเทนเชียลจะเป็นเลนส์แบบรวมลำอิเล็กตรอนเสมอไม่ว่าศักดาไฟฟ้าที่ขั้วไฟฟ้าด้านนอก (outer aperture) จะมากหรือน้อยกว่าศักดาไฟฟ้าที่ขั้วไฟฟ้าตำแหน่งกลาง (center aperture)



รูปที่ 2.17 เลนส์สนามไฟฟ้าสถิตแบบยูนิโพเทนเชียล [7]

ง. เลนส์สนามไฟฟ้าสถิตแบบแคโทด (cathode lens)

เมื่ออิเล็กตรอนถูกปลดปล่อยจากไส้หลอด (cathode) แล้วถูกโฟกัสโดยสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นรอบๆแคโทดเนื่องจากการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างไส้หลอด กริดซึ่งทำหน้าที่ควบคุมปริมาณอิเล็กตรอน และส่วนที่เป็นแอโนดเพื่อก่อกำเนิดลำอิเล็กตรอน โดยลำอิเล็กตรอนจะถูกโฟกัสให้ไปตัดกันที่จุดๆหนึ่งซึ่งเรียกว่าจุด cross-over ตัวอย่างของเลนส์สนามไฟฟ้าสถิตแบบแคโทดที่เห็นได้ชัดนี้คือปืนอิเล็กตรอนของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (electron microscope) ดังแสดงในรูปที่ 2.18



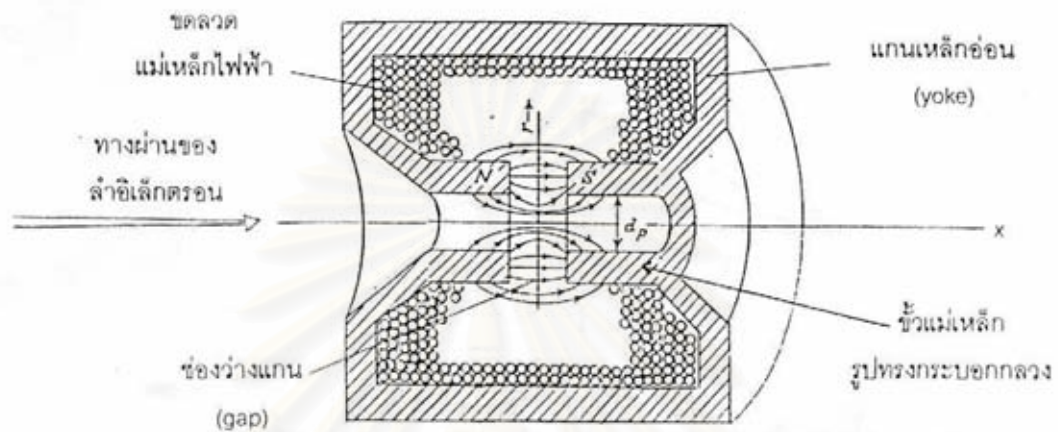
รูปที่ 2.18 เลนส์สนามไฟฟ้าสถิตแบบแคโทด [8]

2.3.2 เลนส์สนามแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic lens)

2.3.2.1 โครงสร้างของเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า

เลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าเป็นเลนส์ที่ทำหน้าที่บีบลำอิเล็กตรอนให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความเข้มของปริมาณอิเล็กตรอนเหมาะสมกับกำลังขยายเพื่อให้ได้ภาพชัดแจ้งซึ่งขึ้นอยู่กับ การออกแบบเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าให้สามารถโฟกัสลำอิเล็กตรอนให้มีขนาดเล็กที่สุด หากพิจารณา โครงสร้างของเลนส์อิเล็กตรอนแล้วจะมีลักษณะเหมือนขั้วแม่เหล็กไฟฟ้า รูปทรงกระบอกเจาะรูตรง กลางสำหรับให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ผ่าน ซึ่งบริเวณตรงกลางของทรงกระบอกนั้นจะเปิดเป็นขั้วแม่เหล็ก (pole pieces) ส่วนบริเวณรอบนอกที่เป็นทรงกระบอกจะเป็นแกนเหล็กอ่อน (yoke) ด้านใน

มีขดลวดพันอยู่ซึ่งจำนวนและขนาดของขดลวดจะขึ้นอยู่กับความเข้มสนามแม่เหล็กที่ต้องการ นอกจากนี้ปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อความเข้มสนามแม่เหล็กคือ อัตราส่วนระหว่างความกว้างของช่องว่างของขั้วแม่เหล็ก (gap length, S) ต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูที่จะให้ลำอิเล็กตรอนผ่านของขั้วแม่เหล็ก (d_p) โดยภาคตัดขวางของเลนส์อิเล็กตรอนแบบแม่เหล็กไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 2.19.



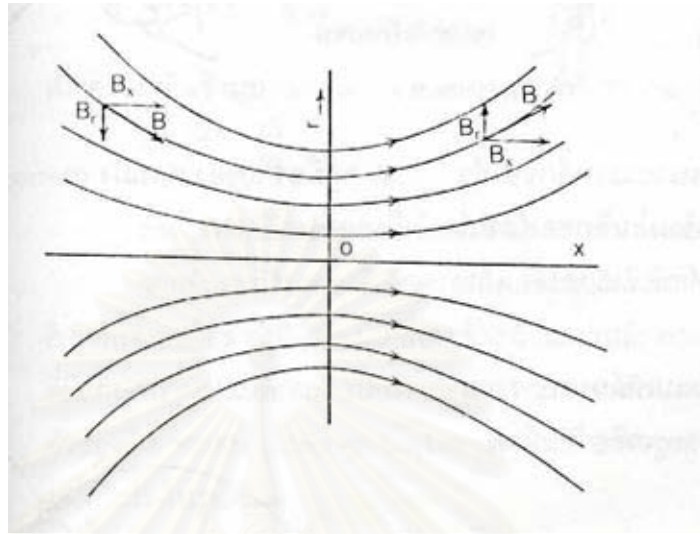
รูปที่ 2.19 แสดงภาคตัดขวางของเลนส์อิเล็กตรอนแบบแม่เหล็กไฟฟ้า [9]

หากพิจารณาถึงการกระจายตัวของเส้นแรงแม่เหล็กที่สมมาตรรอบแนวแกนนั้นสามารถพิจารณาเวกเตอร์ของความเข้มสนามแม่เหล็กได้ 2 แนวคือเวกเตอร์ความเข้มสนามแม่เหล็กตามแนวความยาวของเลนส์อิเล็กตรอน กำหนดให้เป็นแกน X (B_x) และความเข้มสนามแม่เหล็กตามแนวรัศมีของเลนส์อิเล็กตรอน กำหนดให้เป็นแกน r (B_r) จะได้ผลรวมเวกเตอร์ความเข้มสนามแม่เหล็กของเลนส์อิเล็กตรอนที่ตำแหน่งใดๆ แสดงดังสมการที่ 12. [7]

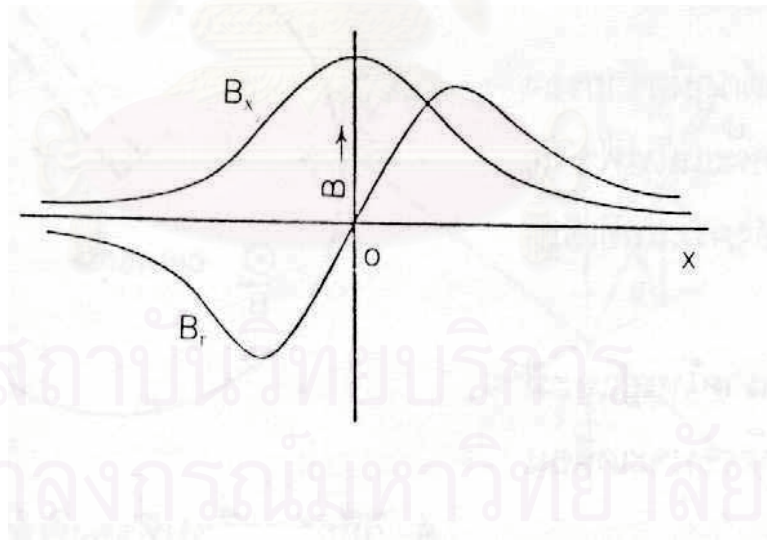
$$\vec{B} = \vec{B}_x + \vec{B}_r \quad (12)$$

เมื่อพิจารณาความเข้มสนามแม่เหล็กตามแนวแกน X แล้วจะได้ว่าสนามแม่เหล็กมีความเข้มสูงสุดที่ตำแหน่ง $X=0$ ในทางกลับกันความเข้มสนามแม่เหล็กในแนวแกน r จะมีค่าต่ำสุดที่ตำแหน่ง $X=0$ ซึ่งแสดงแนวเส้นแรงแม่เหล็กและกราฟความเข้มของสนามแม่เหล็กได้ดังรูปที่ 2.20 และรูปที่ 2.21 สำหรับความสัมพันธ์ของความเข้มสนามแม่เหล็กทั้ง 2 แนวจะเป็นไปตามสมการที่ 13

$$B_r = \frac{-r \, dB_x}{2 \, dx} \quad (13)$$



รูปที่ 2.20 แสดงแนวเส้นแรงในสนามแม่เหล็กแกนสมมาตร



รูปที่ 2.21 แสดงเส้นกราฟความเข้มของสนามแม่เหล็กของทั้ง 2 แกน

ในส่วนของวิธีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในการสร้างภาพด้วยเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 2.22 นั้น สามารถวิเคราะห์ระบบเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าได้โดยสมการของวิถีแนวแกน (paraxial-ray equation) ในสนามแม่เหล็กแกนสมมาตรดังสมการที่ 14.

$$r'' = \frac{-q}{8mV} B_x^2 r \quad (14)$$

เมื่อ r = รัศมีการเคลื่อนที่ในพิกัดรูปทรงกระบอก (cylindrical coordinate) ซึ่งมี

พิกัดเป็น (r, θ, x)

r'' = อนุพันธ์อันดับที่ 2 ของรัศมีการเคลื่อนที่เทียบกับแนวการเคลื่อนที่ (แกน x)

B_x = ความเข้มสนามแม่เหล็กในแนวแกน X

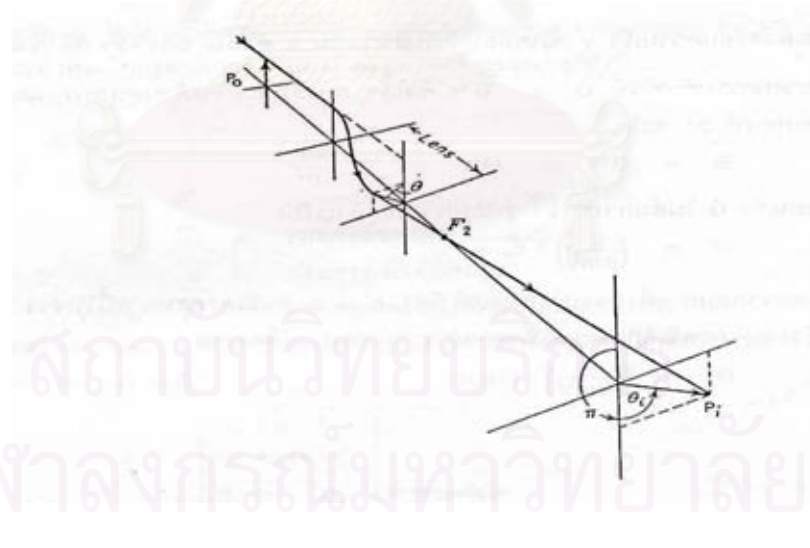
q = ประจุของอิเล็กตรอน

m = มวลของอิเล็กตรอน

V = ค่าศักดาไฟฟ้าเร่ง

ซึ่งสมการจะมีคำตอบทั่วไป (general solution) อยู่ในรูป

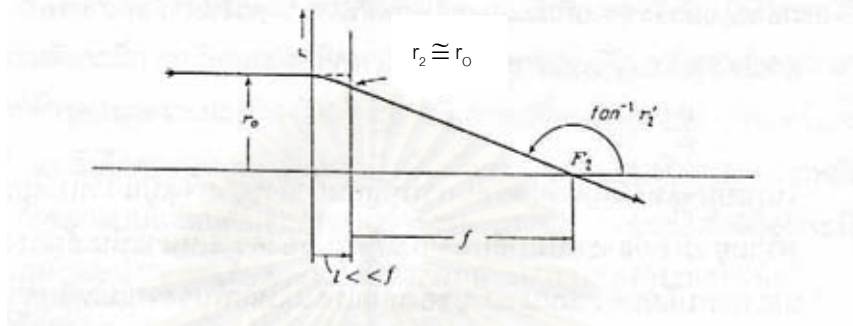
$$r = r_0 P(x) + r'_0 Q(x) \quad (15)$$



รูปที่ 2.22 แสดงวิธีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในการสร้างภาพด้วยเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า

ดังนั้นเมื่อพิจารณาเส้นฉายของเลนส์อิเล็กตรอนตามวิธีการเคลื่อนที่ดังแสดงในรูปที่ 2.23 ในกรณีที่เลนส์มีความกว้างของช่องว่างของขั้วแม่เหล็กเล็กมากเมื่อเทียบกับความยาวโฟกัส คุณสมบัติของเลนส์จะเป็น thin magnetic lens จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ 16 [7]

$$\frac{r_0}{f} = -r'_2 \quad (16)$$



รูปที่ 2.23. แสดงเส้นฉายของเลนส์อเล็กตรอนตามวิธีการเคลื่อนที่ [7]

ในสมการของวิธีแนวแกนเมื่อให้ $r = r_0$ แล้วอินทิเกรตเพื่อหาค่า r'_2 นำค่า r'_2 แทนลงในสมการที่ 16 ผลคือจะได้สมการความยาวโฟกัส (f) ของระบบเลนส์แม่เหล็กดังสมการที่ 17 [9] โดยความยาวโฟกัสของเลนส์อเล็กตรอนจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก (B) ซึ่งสามารถแปรเปลี่ยนได้ด้วยปริมาณกระแสไฟฟ้า และความเร็วของอิเล็กตรอนซึ่งสามารถแปรเปลี่ยนได้ด้วยศักดาไฟฟ้าเร่ง (V) ในขณะที่ความเข้มสนามแม่เหล็กจะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับจำนวนรอบ และกระแสที่จ่ายให้กับเลนส์อเล็กตรอน ($B \propto NI$)

$$\frac{1}{f} = \frac{q}{8mV_0} \int B_x^2 dx \quad (17)$$

2.3.2.2 ความสามารถในการแจกแจงของเลนส์

ขีดความสามารถในการแจกแจงของเลนส์นั้นสามารถพิจารณาได้จากสมการการหักเหแสงของ Abbe เมื่อลำแสงจากจุดวัตถุผ่านเลนส์รวมแสงตกกระทบบนฉากรับภาพจะเกิดจุดภาพจากคุณสมบัติการเลี้ยวเบนของคลื่นแสงที่มีลักษณะการกระจายของคลื่นแสงจากความเข้มสูงสุดที่ใจกลางและลดลงเป็นรูปร่างวงแหวนเรียกว่า "Airy disc" ดังรูปที่ 2.24 ก. เส้นผ่าศูนย์กลางของวงแหวนชั้นใน (D) สามารถคำนวณได้จาก [10]

$$D = \frac{1.22\lambda}{n \sin \alpha} \quad (18)$$

เมื่อ D คือเส้นผ่าศูนย์กลางของวงแหวนชั้นใน (m)

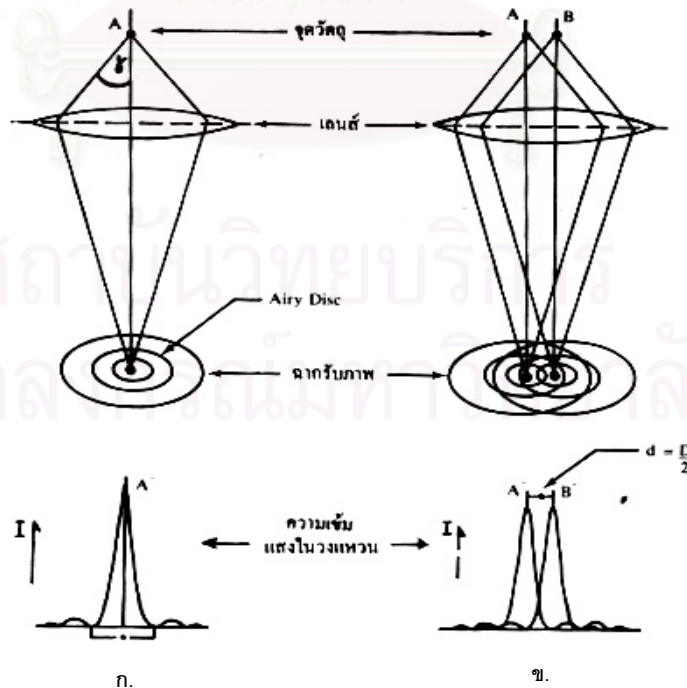
λ คือความยาวคลื่นแสง (m)

n คือดัชนีหักเหของตัวกลาง

α คือกึ่งหนึ่งของมุมรูปกรวย (radian)

ถ้าลำแสงจากจุดวัตถุสองจุดที่อยู่ใกล้กันส่องผ่านเลนส์จะเกิดจุดภาพวงแหวนสองวงมีขอบเหลื่อมกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.24 ข. ความสามารถในการแยกแยะรายละเอียดของจุดภาพ จึงพิจารณาได้จากระยะห่างระหว่างจุดยอดของความเข้มของแสงทั้ง 2 จุดซึ่งมีค่าเท่ากับรัศมีของวงแหวนชั้นในเดี่ยวนั่นเอง ($d = D/2$) ดังนั้นสมการของความสามารถในการแยกแยะรายละเอียดของภาพจึงเขียนได้เป็น

$$d = \frac{0.61\lambda}{n \sin \alpha} \quad (19)$$

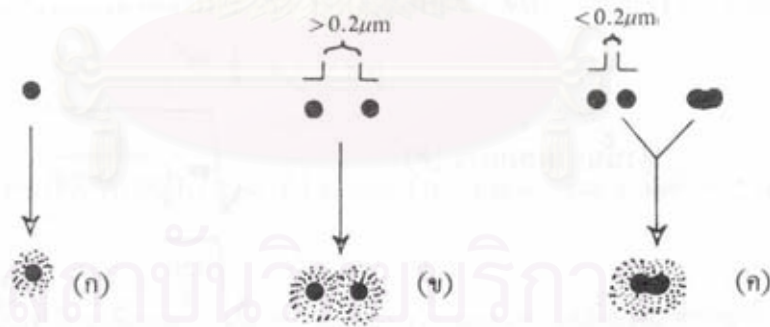


รูปที่ 2.24 แสดงการเกิดรูปวงแหวนและการพิจารณาความสามารถในการแยกแยะ [10]

เมื่อพิจารณาแหล่งกำเนิดสีกลางที่เป็นแสงสว่าง ซึ่งมีความยาวคลื่นปานกลางเท่ากับ 500 นาโนเมตร (nm) เปรียบเทียบกับขนาดของรายละเอียดของโครงสร้างไมโครที่นักวิทยาศาสตร์พยายามจะให้มนุษย์มองเห็นนั้น คลื่นแสงจะมีความยาวคลื่นที่ยาวกว่ามาก สำหรับเลนส์แก้วจุ่มน้ำมันของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงค่า $n\sin\alpha$ เท่ากับ 1.4 ดังนั้นกล้องจุลทรรศน์แบบแสงจะมีขีดจำกัดของการแยกแยะประมาณ 200 นาโนเมตร (nm) หรือ 2000 อังสตรอม โดยสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$d = \frac{0.61(500\text{nm})}{1.4} \approx 200\text{nm}$$

คำจำกัดความของความสามารถในการแยกแยะตามสมการ (19) อาจอธิบายได้ชัดเจนยิ่งขึ้นดังรูปที่ 2.25 โดยการพิจารณาจุดวัตถุทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงกำลังขยายสูง ด้านบนเป็นภาพที่เกิดจากแสงผ่านเลนส์แบบสมมาตรแบบ ซึ่งภาพที่ได้จะเป็นจุดภาพที่คมชัด ส่วนด้านล่างเป็นภาพที่เกิดจากลำแสงผ่านเลนส์แก้วธรรมดา และเกิดวงแหวนตามสมการการหักเหแสงของ Abbe ความสามารถในการแยกแยะจะลดลง ดังจะเห็นจากการเหลื่อมกันของจุดภาพในกรณีที่จุดภาพห่างกันน้อยกว่า $0.2 \mu\text{m}$



รูปที่ 2.25 แสดงความหมายของความสามารถในการแยกแยะ

ตามปกติมนุษย์สามารถแยกแยะรายละเอียดภาพด้วยตาเปล่าได้อย่างสบายที่ $250 \mu\text{m}$ ดังจุดภาพที่ห่างกัน $0.2 \mu\text{m}$ จำเป็นต้องมีการขยายภาพเพิ่มขึ้นประมาณ 1000 เท่า ซึ่งเป็นกำลังสูงสุดที่กล้องจุลทรรศน์แบบแสงทำได้ ด้วยความพยายามของนักวิทยาศาสตร์ที่จะเอาชนะขีดจำกัดของการมองเห็นโครงสร้างไมโครด้วยตาเปล่า จึงได้เปลี่ยนสีกลางของการมองเห็นจากลำ

แสงมาเป็นลำอิเล็กตรอน หลังจากที่เดอบรอย (De Broglie) พบว่า อิเล็กตรอนเมื่อถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าในหลอดสุญญากาศให้มีพลังงานสูงขึ้น จะมีพฤติกรรมทางกายภาพคล้ายคลื่น และเมื่อผนวกสมการพีลีสตั้งเดิมกับทฤษฎีควอนตัมเข้าด้วยกัน สามารถจะอธิบายพฤติกรรมของคลื่นอิเล็กตรอนได้ดังนี้

จากพฤติกรรมของโฟตอนซึ่งมีธรรมชาติเป็นได้เป็นคลื่นและอนุภาค ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนตัมกับความยาวคลื่นคือ

$$p = \frac{h\nu}{c} \quad (20)$$

แทนค่า $\frac{\nu}{c}$ ด้วย $\frac{1}{\lambda}$ จะได้

$$p = \frac{h}{\lambda}$$

หรือ

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad (21)$$

โดยที่ h คือค่าคงที่ของ Planck มีค่า 6.62×10^{-34} (J-s)

c คือความเร็วของแสง มีค่า 2.998×10^8 (m/s)

ν คือความถี่ (s^{-1})

p คือโมเมนตัม (kg-m/s)

ในกรณีของอิเล็กตรอนมวล m ความเร็ว v โมเมนตัมของอิเล็กตรอนจะมีค่า mv ดังนั้นจากสมการ

(21) ความยาวคลื่นของอิเล็กตรอนหรือความยาวคลื่นของเดอบรอยคือ

$$\lambda = \frac{h}{mv} \quad (22)$$

ขณะที่อิเล็กตรอน ซึ่งมีค่าประจุไฟฟ้า q_e เท่ากับ 1.602×10^{-19} coulomb ถูกบังคับให้เคลื่อนในสนามไฟฟ้า โดยมีศักดาเร่ง (accelerating voltage) พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนจะมีค่า

$$\frac{1}{2}mv^2 = q_eV \quad (23)$$

ดังนั้นจากสมการ (23)

$$\begin{aligned} \lambda &= \sqrt{\frac{h^2}{m^2 \left(\frac{2q_eV}{m}\right)}} = \sqrt{\frac{h^2}{2mq_eV}} \\ &\approx \sqrt{\frac{150}{V}} \times 10^{-8} \quad \text{\AA} \end{aligned} \quad (24)$$

โดย V มีหน่วยเป็นโวลต์ (Volt)

ในกรณีที่ศักดาไฟฟ้าเร่งเกินกว่า 50 kV ความเร็วของอิเล็กตรอนจะเข้าใกล้ความเร็วแสงมวลของอิเล็กตรอนจะเปลี่ยนไปจากมวลที่หยุดนิ่ง (m_0) ตามทฤษฎีสัมพันธภาพของไอน์สไตน์ ดังนั้นมวลของอิเล็กตรอนจะมีค่า

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

สมการของความยาวคลื่นจะมีค่าเป็น

$$\lambda = \frac{h}{m_0 v} \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2} \quad (25)$$

และเนื่องจากพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนที่ได้จากสนามไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ

$$q_eV = mc^2 - m_0c^2 \quad (26)$$

ดังนั้น สมการของความยาวคลื่นของอิเล็กตรอนเมื่อศักดาไฟฟ้าเร่งเกิน 50 kV จึงมีค่าเป็น

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2m_0q_eV + \frac{q_e^2V^2}{c^2}}} \quad \text{\AA}$$

$$= \frac{12.26}{\sqrt{V} \cdot \sqrt{1 + 9.788 \times 10^{-7} V}} \quad \text{\AA} \quad (27)$$

หรือ

$$\lambda \approx \frac{12.3}{\sqrt{V}} \quad \text{\AA} \quad (28)$$

จากสมการ (28) จะเห็นว่าเมื่อศักดาไฟฟ้าแรงเพิ่มขึ้น ความยาวคลื่นของอิเล็กตรอนจะสั้นลง ดังนั้น ถ้าให้ศักดาไฟฟ้าแรงกับลำอิเล็กตรอน 60 kV ความยาวคลื่นของอิเล็กตรอนในคอลด์มันน์สุญญากาศจะมีค่าประมาณ 0.05 \text{\AA} ซึ่งถ้าเทียบกับความยาวของคลื่นแสงแล้ว อิเล็กตรอนความเร็วสูงมีความยาวคลื่นสั้นกว่ามาก เมื่อพิจารณาโครงสร้างของกล้องจุลทรรศน์ โดยเปลี่ยนแหล่งกำเนิดแสงเป็นลำอิเล็กตรอนและเปลี่ยนระบบเลนส์เป็นระบบเลนส์อิเล็กตรอนในคอลด์มันน์สุญญากาศ จะพบว่าลำอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ผ่านช่องบังค้ำ (aperture) จะมีมุมหักเห้อยมาก คือค่า $\sin\alpha \approx \alpha$ และค่าดัชนีหักเหมีค่าเท่ากับ 1 ทำให้สามารถเขียนสมการความสามารถในการแยกแยะ (สมการ 19) สำหรับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนด้วยการแทนค่า λ จากสมการ (28) ได้ดังนี้

$$d = \frac{0.61(12.3)}{n \sin\alpha \sqrt{V}} \approx \frac{7.5}{\alpha \sqrt{V}} \quad \text{\AA} \quad (29)$$

สมมติว่าศักดาไฟฟ้าแรงมีค่า 100 kV และ α มีค่า 10^{-2} radian

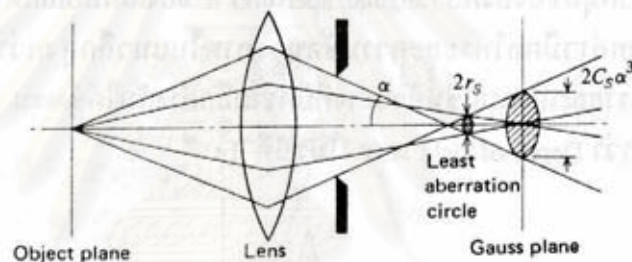
$$d = 2.4 \quad \text{\AA}$$

เมื่อเปรียบเทียบการแยกแยะของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนกับกล้องจุลทรรศน์แบบแสงแล้ว กล้องจุลทรรศน์ที่อาศัยอิเล็กตรอนเป็นสื่อกลางในการมองเห็นภาพขยายโครงสร้างไมโครจะมีความสามารถในการแยกแยะเหนือกว่าหลายพันเท่า

2.3.2.3 ปัจจัยที่ส่งผลต่อความผิดเพี้ยนของเลนส์

ในระบบเลนส์อเล็กตรอนนั้นจะเกิดความผิดเพี้ยนของภาพ (aberrations) ได้เช่นเดียวกับกรณีของเลนส์แก้ว ความผิดเพี้ยนที่สำคัญในเลนส์อเล็กตรอนเกิดจากสาเหตุต่างๆดังนี้

ก. ความผิดเพี้ยนทางเรขาคณิต (geometric aberration) เป็นความผิดเพี้ยนที่เกิดจากรูปทรงของเลนส์ที่มีลักษณะเป็นเลนส์นูน ลำอเล็กตรอนที่ฉายผ่านจุดวัตถุด้านขอบเลนส์และกลางเลนส์จะเกิดการโฟกัสที่ระยะต่างกัน ลำอเล็กตรอนใกล้แกนจะโฟกัสที่ระนาบเกาส์เซียน (gaussian plan) ในขณะที่ลำอเล็กตรอนที่ผ่านบริเวณขอบเลนส์จะโฟกัสที่ระยะใกล้เข้ามาทำให้เกิดภาพวงกลมวงขึ้นเรียกว่า disc of least confusion ความผิดเพี้ยนนี้เรียกว่า “spherical aberration” ดังแสดงในรูปที่ 2.26



รูปที่ 2.26 spherical aberration [8]

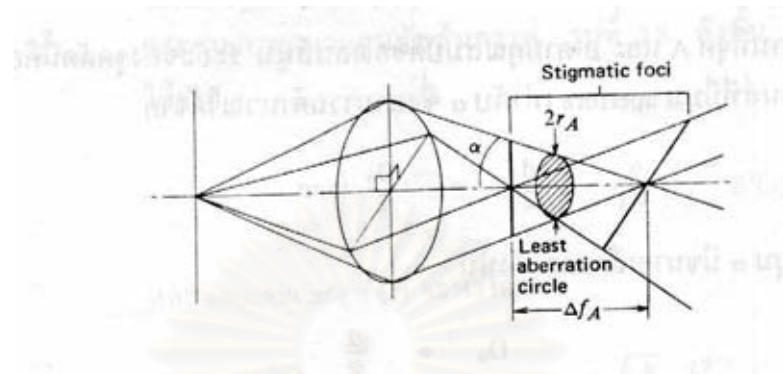
รัศมีของวงกลมความผิดเพี้ยนน้อยที่สุด (least of aberration circle) หาได้จาก

$$2r_s = \frac{1}{2} C_s \alpha^3 \quad (30)$$

C_s เรียกว่า spherical aberration coefficient

ข. ความผิดเพี้ยนเนื่องจากความไม่สมมาตร (asymmetric aberration) เป็นความผิดเพี้ยนที่เกิดจากความไม่สมมาตรของเลนส์ มีสาเหตุมาจากคุณภาพของเลนส์อเล็กตรอน เช่น วัสดุ ความละเอียดในการสร้างชิ้นส่วน ความกลมของช่องทางเคลื่อนที่ของลำ

อเล็กตรอนเป็นต้น ทำให้สนามแม่เหล็กไม่สม่ำเสมอ เกิดการบิดเบี้ยวทางทิศทางของลำอเล็กตรอน ความบิดเบี้ยวนี้เรียกว่า “axial stigmatism” ดังแสดงในรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.27 axial stigmatism [8]

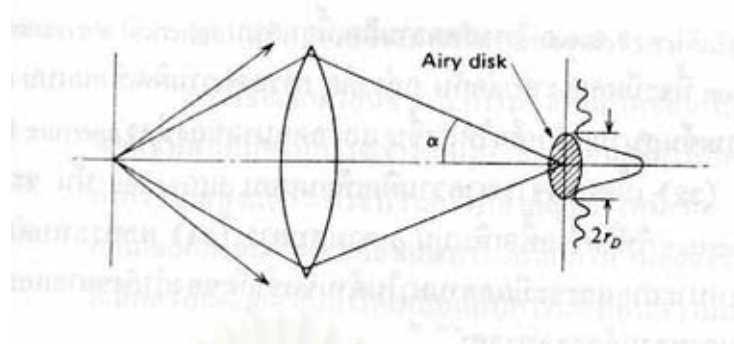
รัศมีของวงกลมความบิดเบี้ยวน้อยที่สุดหาได้จาก

$$2r_A = \Delta f_A \alpha \quad (31)$$

Δf_A คือ ระยะระหว่าง stigmatic foci

ค. เวฟออปติกัลอเบอเรชัน (wave optical aberration) เป็นความบิดเบี้ยวเนื่องจากปรากฏการณ์เลี้ยวเบนของคลื่นอเล็กตรอนเมื่อตกกระทบจุดวัตถุจะปรากฏภาพเป็นรูปวงแหวน (Airy disc) เมื่อช่อง aperture ด้านล่างของเลนส์อเล็กตรอนที่ทำหน้าที่ป้องกันลำอเล็กตรอนกระเจิงที่ไม่ต้องการมีขนาดเล็กมาก มุม α ก็จะมีขนาดเล็ก ภาพของชั้นวงแหวนก็จะยิ่งเด่นชัดขึ้น และรบกวนจุดภาพข้างเคียง ความบิดเบี้ยวที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า “diffraction aberration” ดังแสดงในรูปที่ 2.28

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



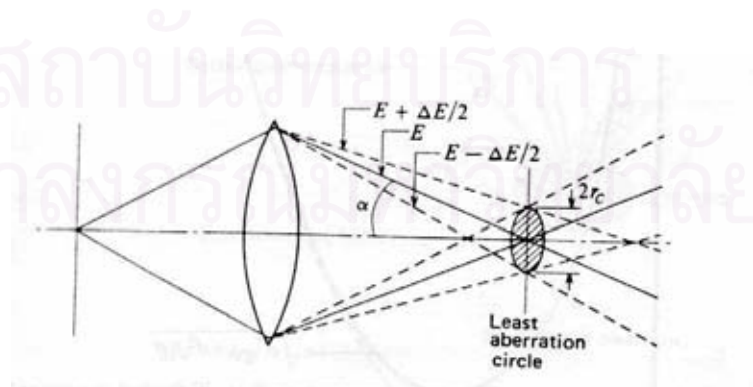
รูปที่ 2.28 diffraction aberration [8]

รัศมีของวงรอบ Airy หาได้จาก

$$2r_D = 1.22 \frac{\lambda}{\alpha} \quad (32)$$

λ = ความยาวคลื่นของอิเล็กตรอน

ง. ความผิดเพี้ยนเนื่องจากความไม่มีเสถียรภาพ (aberration due to instability) เป็นความผิดเพี้ยนที่เกิดจากระบบจ่ายไฟฟ้ากำลังในระบบอิเล็กทรอนิกส์อพติคทั้งศักดาไฟฟ้าที่ใช้เร่งอิเล็กตรอน (E) และกระแสไฟฟ้าที่จ่ายแก่เลนส์อิเล็กตรอน ถ้าระบบจ่ายกำลังไฟฟ้ามีสิ่งรบกวนความยาวคลื่นของอิเล็กตรอนและทิศทางการเคลื่อนที่ของลำอิเล็กตรอนก็จะแปรเปลี่ยนตามสิ่งรบกวนทางไฟฟ้านั้น ทำให้ตำแหน่งโฟกัสบนระนาบภาพแปรเปลี่ยนไปเกิดวงภาพลวงขึ้น ความผิดเพี้ยนนี้เรียกว่า “chromatic aberration” ดังแสดงในรูปที่ 2.29



รูปที่ 2.29 chromatic aberration [8]

รัศมีของวงรอบความผิดเพี้ยนหาได้จาก

$$2r_c = C_c \alpha \frac{\Delta E}{E} \quad (33)$$

ΔE = การเปลี่ยนแปลงของศักดาไฟฟ้าเร่ง

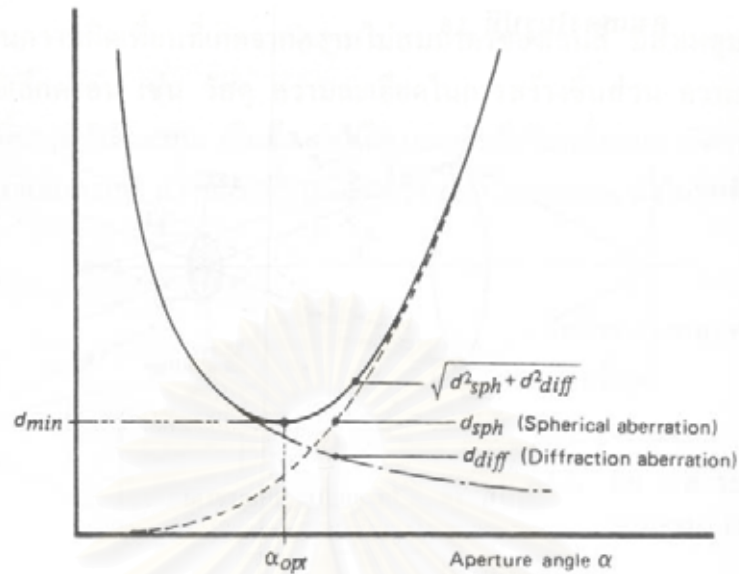
C_c = chromatic aberration coefficient

ในทางปฏิบัตินั้นไม่สามารถสร้างเลนส์อิเล็กตรอนไม่ให้เกิดความผิดเพี้ยนได้ แต่สามารถปรับแก้ความผิดเพี้ยนได้ เช่น การปรับแก้ความผิดเพี้ยนชนิด Chromatic aberration ปรับแก้โดยออกแบบระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบเลนส์อิเล็กตรอน ให้มีความเสถียรสูง ในขณะที่ความผิดเพี้ยนจากความไม่สมมาตรจะเพิ่มขนาดความผิดเพี้ยนหลายชั่วเข้าไปปรับแก้ความไม่สมมาตร เรียกว่า “stigmatism correction” ส่วนความผิดเพี้ยนที่เกิดจาก spherical และ diffraction นั้นจะอาศัยหลักการคำนวณหาจุดสมดุล เนื่องจากความผิดเพี้ยนทั้ง 2 แบบนี้ขึ้นกับมุมของช่องบังคับลำอิเล็กตรอน (α) ดังแสดงในเส้นกราฟรูปที่ 2.30 ซึ่ง O.Scherzer [8] ได้เสนอสมการคำนวณค่ามุมของช่องบังคับที่เหมาะสม กับความยาวคลื่นของลำอิเล็กตรอนที่ใช้เพื่อให้ได้ความสามารถในการแจกแจงรายละเอียดภาพที่ดีที่สุด (d_{min}) และมุม α ของช่อง objective aperture ที่พอเหมาะ (α_{opt}) ไว้ดังนี้

$$d_{min} = 0.43 \sqrt[4]{\lambda^3 C_s} \quad (34)$$

และ $\alpha_{opt} = \sqrt[4]{\lambda / C_s} \quad (35)$

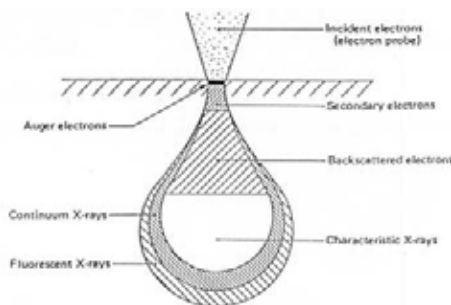
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.30 เส้นกราฟแสดงสมดุลของการปรับแก้ความผิดเพี้ยนแบบ spherical และ diffraction

2.3.3 เป้าผลิตรังสีเอกซ์ (target)

ในการกำเนิดรังสีเอกซ์แบบไมโครโฟกัสสำหรับกล้องจุลทรรศน์รังสีเอกซ์แบบฉายภาพ เมื่อลำอิเล็กตรอนถูกเร่งจากแคโทดผ่านช่องของแอโนดลง และเคลื่อนที่เข้าสู่สนามแม่เหล็กจะถูกโฟกัสโดยเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าลงบนเป้าโลหะ ลำอิเล็กตรอนจะทำอันตรกิริยากับอะตอมของเป้าโลหะทำให้เกิดการกระเจิงของลำอิเล็กตรอนในชั้นความลึกของเป้าโลหะได้รังสีเอกซ์ที่แตกต่างกัน ซึ่งจะขึ้นอยู่กับพลังงานของลำอิเล็กตรอนที่สามารถควบคุมได้ด้วยศักดาไฟฟ้าเร่ง และอีกปัจจัยคือเลขอะตอมของเป้าโลหะ ถ้าเลขอะตอมมีค่าสูงการเกิดอันตรกิริยาจะเกิดขึ้นตั้งแต่จะเป็นบริเวณกว้าง แต่ถ้าเลขอะตอมต่ำอันตรกิริยาจะเกิดได้ลึกแต่บริเวณแคบ เมื่อเป้าโลหะถูกกระตุ้นก็จะปลดปล่อยอนุภาคนิวเคลียร์ชนิดต่างๆตามความลึกของลำอิเล็กตรอนที่กระเจิงลงไปดังแสดงในรูปที่ 2.31

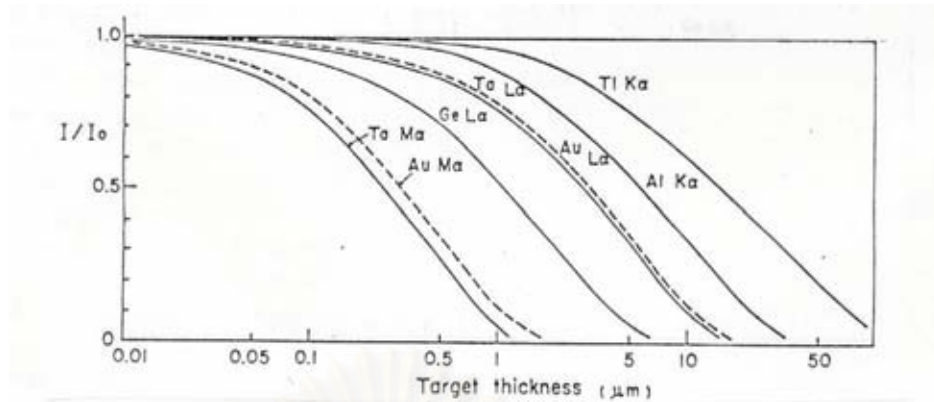


รูปที่ 2.31. แสดงการเกิดอันตรกิริยานิวเคลียร์ที่ชั้นความลึกต่างๆ [1]

เป้าโลหะที่ใช้ผลิตรังสีเอกซ์แบบฉายภาพนั้นปกติจะทำด้วยโลหะบางชนิดที่นิยมใช้ได้แก่ Au, Ta, Ti, Sc และ Ge ซึ่งใช้ในการผลิตรังสีเอกซ์เฉพาะตัวที่ความยาวคลื่นในช่วง 5 ถึง 10 Å โดยใช้ศักดาไฟฟ้าแรง 10 กิโลโวลต์ การพิจารณาเลือกเป้าผลิตรังสีเอกซ์นั้นจะต้องคำนึงถึงคุณสมบัติต่างๆ ได้แก่ พลังงานหรือความยาวคลื่นที่เหมาะสมกับชนิดของตัวอย่างที่ต้องการถ่ายภาพ จุดหลอมเหลว การนำความร้อน ความแข็งแรงและการทนต่อความกัดกร่อนทางเคมี รวมทั้งความหนาของเป้าผลิตรังสีเอกซ์จะต้องให้ประสิทธิภาพในการผลิตรังสีเอกซ์ได้ดีที่สุดด้วย ซึ่งคุณสมบัติของโลหะที่ใช้ทำเป้าชนิดต่างๆแสดงดังตารางที่ 2.2 และผลของการลดทอนปริมาณรังสีเอกซ์ของความหนาของเป้าแสดงดังกราฟรูปที่ 2.32

ตารางที่ 2.2 ความยาวคลื่นและพลังงานของรังสีเอกซ์เฉพาะตัวของธาตุที่เลือกใช้ทำเป้าผลิตรังสีเอกซ์ รวมทั้งค่าจุดหลอมเหลวและค่าการนำความร้อน [1,11]

Element	Characteristic X-ray wavelength (Å)			mp (°C)	K (W m ⁻¹ T ⁻¹)
	K _α (keV)	L _α (keV)	M _α (keV)		
C 6	44			3,500	250
Al 13	8.34 (1.48)			660	233
Si 14	7.13 (1.74)			1,414	170
Sc 21	3.03 (4.09)	31.4		1,400	22
Ti 22	2.75 (4.51)	27.4		1,675	22
Ge 32	1.26 (9.87)	10.5 (1.19)		958	67
Zr 40	0.79	6.07 (2.04)		1,852	22
Mo 42	0.71	5.41 (2.29)		2,610	135
Ag 47	0.56	4.15 (2.98)	21.8	962	428
Ta 73	0.22	1.52 (8.14)	7.25 (1.71)	2,996	57
W 74	0.21	1.47 (8.39)	6.98 (1.77)	3,384	139
Au 79	0.18	1.28 (9.71)	5.84 (2.15)	1,064	319



รูปที่ 2.32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนากับปริมาณการลดทอนรังสีเอกซ์เฉพาะตัวของเป้าที่ทำด้วยธาตุต่างๆ [1,11]

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

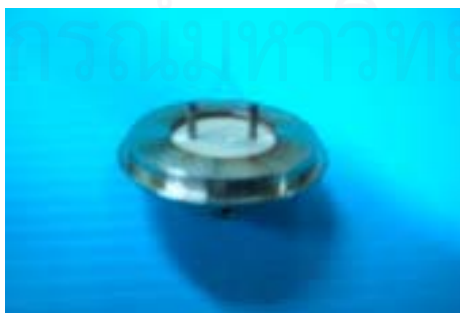
บทที่ 3

การพัฒนาปืนอิเล็กตรอนแบบไมโครโฟกัส

การถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ที่ต้องการกำลังขยายสูงนั้นส่วนสำคัญซึ่งจะส่งผลให้เกิดภาพถ่ายที่มีความคมชัดสูงคือจุดโฟกัสของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์จะต้องมีขนาดเล็กมาก เนื่องจากหากจุดโฟกัสของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์มีขนาดใหญ่จะเปรียบเสมือนมีแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ขนาดเล็กหลายๆจุดกระจายอยู่บนพื้นที่ของจุดโฟกัสนั้น เมื่อจัดระบบถ่ายภาพทางรังสีเพื่อสร้างภาพขยายจะทำให้ภาพที่ได้เกิดขอบเงามัว (penumbra) ส่งผลให้ภาพถ่ายที่ได้ไม่ดีเท่าที่ควร ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะพัฒนาปืนอิเล็กตรอนที่มีสมรรถนะในการก่อกำเนิดจุดโฟกัสของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีขนาดเล็กมากโดยอาศัยการควบคุมการโฟกัสลำอิเล็กตรอนที่จะตกกระทบบนเป้าโลหะผลิตรังสีเอกซ์ด้วยเลนส์สนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งส่วนประกอบหลักของปืนอิเล็กตรอนได้แก่ แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน ระบบอิเล็กตรอนออฟติก ระบบสุญญากาศ แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรง และห้องใส่ตัวอย่าง เป็นต้น

3.1 การออกแบบและสร้างแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนแบบทังสเตนแฮร์พิน

แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนแบบทังสเตนแฮร์พินที่ทำหน้าที่ในการกำเนิดลำอิเล็กตรอนมีส่วนประกอบคือ ใต้หลอดทังสเตนแฮร์พินของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (SEM) และ wehnelt ซึ่งทำหน้าที่ควบคุมลำอิเล็กตรอน ของบริษัท JEOL รุ่น T220 ในส่วนของแอนโอดนั้นใช้เหล็กกล้าไร้สนิม (stainless steel) กลึงเป็นลักษณะทรงกระบอกกลวงเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 mm เจาะรูตรงกลางขนาด 3 mm ฐานล่างมีลักษณะเป็นเกลียวใช้ประกอบติดกับส่วนคอดัมนซึ่งขึ้นส่วนที่ประกอบกันเป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนแสดงดังรูปที่ 3.1 รูปที่ 3.2 และรูปที่ 3.3 ตามลำดับ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนขนาด 101.6 mm



รูปที่ 3.1 แสดงใต้หลอดแบบทังสเตนแฮร์พิน



รูปที่ 3.2 wehnelt ที่ประกอบกับส่วนบนของปืนอิเล็กตรอน

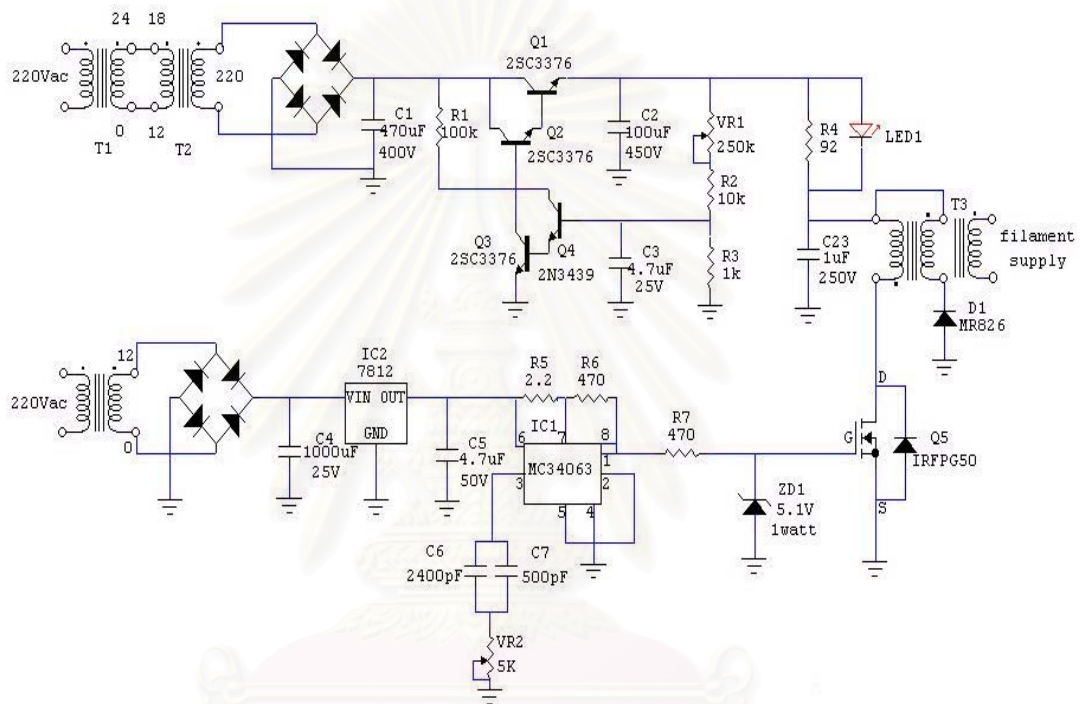


รูปที่ 3.3 แอนโนด

แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนจะอยู่ส่วนบนของคอลัมน์สุญญากาศ เมื่อได้รับการจ่ายศักดาไฟฟ้าแรงบริเวณระยะห่างระหว่างแคโทดกับแอนโนดที่จัดไว้ห่าง 4 cm จะสร้างเลนส์สนามไฟฟ้าสถิตที่ทำหน้าที่โฟกัสลำอิเล็กตรอนในขั้นต้น โดยส่วนที่เป็นแคโทดหรือไส้หลอดนั้นได้ออกแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันต่ำแบบปรับค่าได้ตั้งแต่ 1 ถึง 3 V ประมาณ 2 A สำหรับเผาไส้หลอดให้ร้อนพร้อมจะปลดปล่อยอิเล็กตรอนแบบเทอร์มิออนิก ซึ่งวงจรจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันต่ำนี้เป็นวงจรแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงทำงานด้วยการแปลงแรงดันจากไฟฟ้า 220 V_{ac} ผ่านหม้อแปลงชนิดแยกกราวด์ (T₁, T₂) ซึ่งอัตรารอบทางเข้าและทางออกเป็น 1:1 จากนั้นแปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงได้แรงดัน 311 V_{dc} ทางออกของวงจรสามารถปรับค่าแรงดันได้ตั้งแต่ 20 ถึง 200 V ด้วยวงจรควบคุมแรงดันแบบอันดับ (series regulator) ซึ่งประกอบด้วย Q₁, Q₂, Q₃ และ Q₄ เพื่อจ่ายให้กับหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันต่ำ (step-down

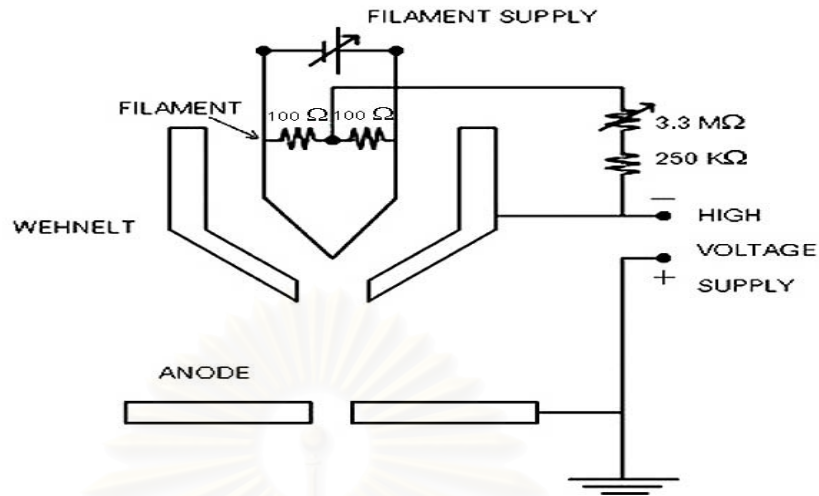
transformer) ที่มีอัตรารอบ $N_p:N_s$ เท่ากับ 20:1 ซึ่งจะต้องออกแบบฉนวนระหว่างขดปฐมภูมิและทุติยภูมิให้ทนแรงดันไฟฟ้าแรงไม่น้อยกว่า 40 kV (แสดงการออกแบบตามภาคผนวก ก.)

สำหรับวงจรขับหม้อแปลงจัดแบบวงจรสวิตชิงชนิดฟลายแบ็กพร้อมขดรีเซท (Flyback converter with reset winding) [13] โดยวงจรกำเนิดความถี่ 15 kHz เลือกใช้ไอซี MC34063 สร้างสัญญาณพัลส์รูปเหลี่ยมมี duty cycle = 15 % เพื่อขับทรานซิสเตอร์มอสเฟต IRFPG50 สำหรับสวิตซ์หม้อแปลงแรงดันต่ำ ดังวงจรในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 วงจรจ่ายแรงดันสำหรับจุดไส้หลอดปืนอิเล็กทรอนิกส์

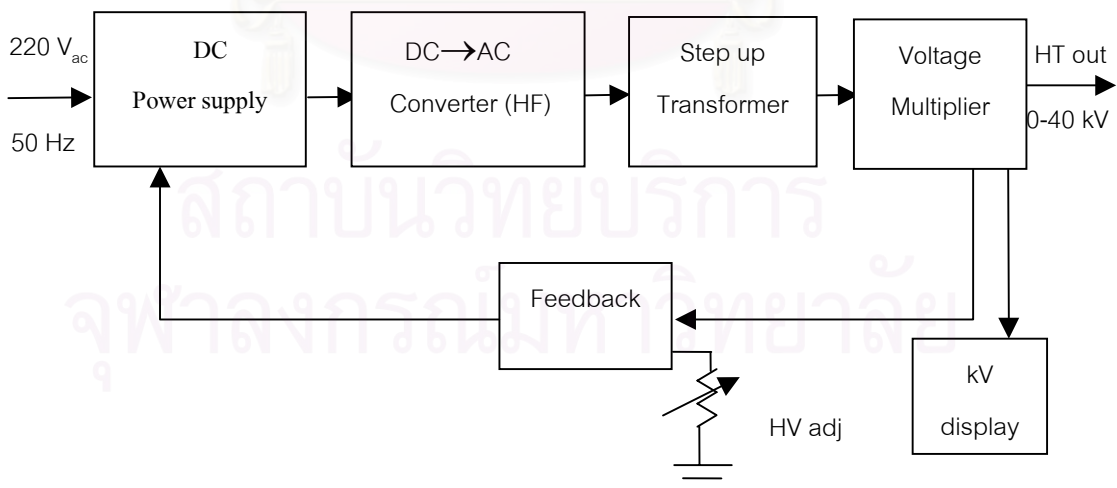
ในส่วนของการไบอัสระหว่างแคโทดกับกริด (wehnelt) นั้นจะใช้ความต้านทานขนาด 100 Ω 2 ตัวต่อคร่อมไส้หลอดไว้ซึ่งจุดร่วมของความต้านทานทั้ง 2 ตัว จะต่อผ่านความต้านทานขนาด 250 k Ω สำหรับจำกัดกระแสแล้วต่อเข้ากับความต้านทานปรับค่าได้ขนาด 3.3 M Ω ก่อนที่จะต่อถึงส่วนกำเนิดแรงดันไฟฟ้าสูง โดยการปรับไบอัสระหว่างแคโทดกับ wehnelt ที่ความต้านทาน 3.3 M Ω นั้นจะใช้สำหรับปรับเปลี่ยนปริมาณความเข้มของลำอิเล็กตรอนที่จะปลดปล่อยออกไป ดังแสดงวงจรในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แสดงการไบอัสระหว่างไส้หลอดกับ whenelt

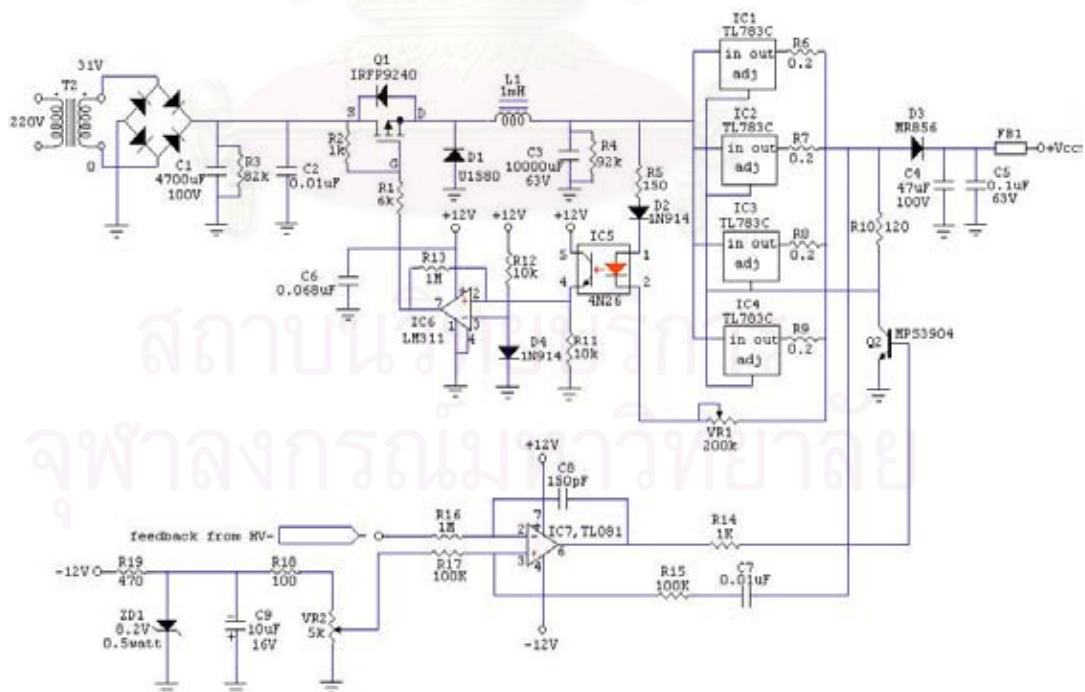
3.2 การออกแบบและสร้างแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูง

ระบบจ่ายศักดาไฟฟ้าสูงที่สร้างขึ้นออกแบบให้สามารถปรับค่าได้ตั้งแต่ 0 ถึง 40 กิโลโวลต์จ่ายกระแสได้ 500 ไมโครแอมแปร์ เพื่อสร้างความต่างศักย์ระหว่างแคโทดกับแอโนดสำหรับควบคุมพลังงานของอิเล็กตรอนในคอลัมน์ มีแผนภาพการทำงานในรูปที่ 3.6



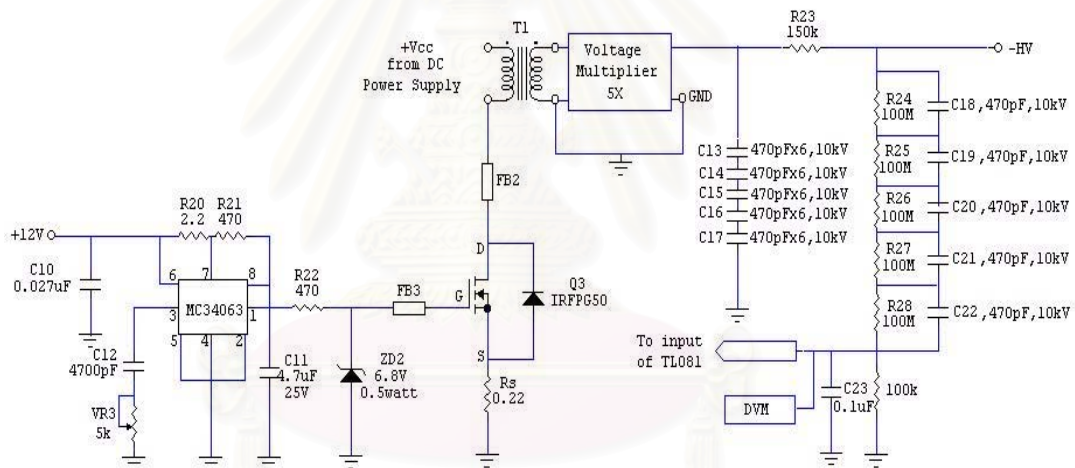
รูปที่ 3.6 แผนภาพวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูง

3.2.1 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC power supply) เนื่องจากวงจรจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงจะต้องปรับค่าได้ในย่านกว้าง 0-30 โวลต์ ที่กระแส 2 A ดังนั้นเพื่อให้ประสิทธิภาพการทำงานของแหล่งจ่ายสูง จึงแบ่งการทำงานของวงจรออกเป็น 2 ส่วน คือ วงจรควบคุมแรงดันไฟฟ้าส่วนหน้า (preregulator) และวงจรควบคุมแรงดันไฟฟ้าหลัก (main regulator) วงจรควบคุมแรงดันไฟฟ้าส่วนหน้าทำงานแบบสวิตชิ่ง เพื่อให้มีการสูญเสียกำลังไฟฟ้าต่ำ และให้ประสิทธิภาพสูงรับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทางเข้าจากการแปลงแรงดันไฟฟ้าของหม้อแปลง T_2 และจัดวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าได้แรงดันทางเข้า 43 V การขับแรงดันทางออกทำงานด้วยการสวิตช์ของทรานซิสเตอร์มอสเฟตชนิด P-channel Q_1 (IRFP9240) ผ่านวงจรกรองกระแส L_1 และ C_3 ควบคุมแรงดันให้คงที่ด้วยการป้อนกลับแบบพัลส์วิดมอดูเลชัน (PWM) โดยการตรวจสอบแรงดันของทางออกด้วย IC5 ซึ่งเป็น opto isolation transistor และเปรียบเทียบผลต่างของแรงดันอ้างอิงด้วย IC6 (LM311) ซึ่งเป็น voltage comparator ให้สัญญาณทางออกในลักษณะการแปรเปลี่ยนพัลส์วิด ในส่วนของวงจรควบคุมแรงดันไฟฟ้าหลัก ต้องการให้มีรีปเปลต้าจึงเลือกใช้ไอซีควบคุมแรงดันแบบอันดับชนิด 3-terminals (TL783C) ซึ่งจ่ายกระแสได้สูงสุดได้ 700 mA นำมาขนานกัน 4 ตัว (IC1-IC4) เพื่อรับพิกัดจ่ายกระแสสูงสุด 2 A ควบคุมแรงดันทางออกจาก 0-30 โวลต์ ด้วยไอซีเปรียบเทียบแรงดัน IC7 TL081 และทรานซิสเตอร์ Q_2 (MPS3904) โดยจัดแรงดันอ้างอิงปรับค่าไว้ที่ 0-5 โวลต์ สัมพันธ์กับการเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าสูง 0-40 kV ดังแสดงวงจรตามรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

3.2.2 วงจรกำเนิดไฟฟ้าศักดาสูง ออกแบบให้กำเนิดแรงดันไฟฟ้าสูงด้วยการแปลงไฟฟ้า กระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงชนิดฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์ และทวีแรงดันเป็นไฟฟ้า กระแสตรง โดยใช้ทรานซิสเตอร์มอสเฟต N-channel IRFPG50 เป็นตัวขับหม้อแปลงเพิ่มแรงดัน ไฟฟ้า (step-up transformer) ซึ่งมีอัตรารอบ 1:312 (การออกแบบแสดงในภาคผนวก ข.) และ เลือกใช้ไอซีเบออร์ MC34063 กำเนิดสัญญาณพัลส์รูปเหลี่ยมซึ่งมี duty cycle 15% ความถี่ 15 kHz กำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงขนาด 8 kV จ่ายให้กับวงจรทวีแรงดัน 5 เท่าชนิด กราวนด์บวก (positive ground) ทำให้ได้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 40 kV จ่ายกระแสได้สูงสุด 500 μ A กรองแรงดันไฟฟ้าให้เรียบด้วย $C_{13}-C_{17}$ ในขณะที่ทางออกของวงจรจัดวงจรแบ่งแรงดัน ป้อนกลับเพื่อรักษาแรงดันให้คงที่ และปรับค่าแรงดันได้จาก 0-40 kV จะป้อนแรงดันกลับไปยัง แหล่งจ่ายไฟฟ้าของวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่ IC7 (voltage comparator) และอ่านค่าแรง ดันไฟฟ้าทางออกจากสัดส่วนแรงดันไฟฟ้าของวงจรป้อนกลับด้วยโวลต์มิเตอร์ชนิดแสดงผลเชิงเลข ดังแสดงในวงจรรูปที่ 3.8

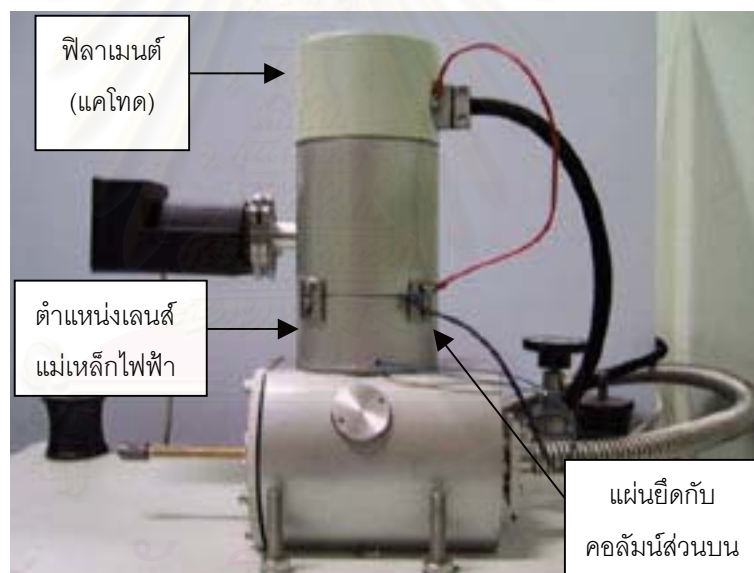


รูปที่ 3.8 วงจรกำเนิดไฟฟ้าศักดาสูง

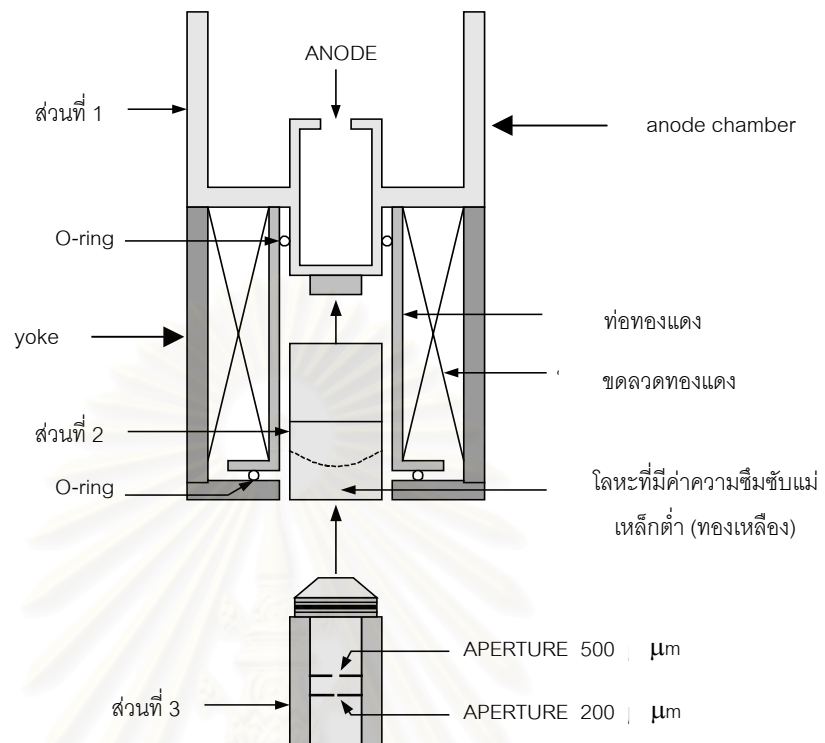
3.3 การออกแบบและสร้างเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า

เลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าที่ทำการออกแบบในงานวิจัยนี้ใช้แกนเหล็กอ่อน (yoke) ซึ่งมีค่าความ ซึมซับแม่เหล็กสูงที่สามารถหาได้ในประเทศเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความเข้มสนามสูง จากการศึกษาวิเคราะห์หาส่วนประกอบของวัสดุที่ใช้พบว่ามีส่วนประกอบของเหล็กอยู่ถึง 98% มี คาร์บอนอยู่น้อยมากประมาณ 0.2 % ดังนั้นจึงออกแบบโดยใช้เหล็กดังกล่าวที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 101.6 mm เท่ากับเส้นผ่าศูนย์กลางของแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน โดยกลึงเนื้อผิวด้านใน ออกให้เหลือความหนาลักษณะเป็นท่อทรงกระบอกกลวงข้างละ 9 mm มีความสูง 45 mm

ประกอบอยู่ใต้ส่วนของเหล็กทรงกระบอกกลางที่เป็น gun chamber และยึดติดกันเป็นคอลัมน์ของปืนอิเล็กตรอนด้วยแผ่นยึดอีกชั้นหนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 3.9 ในส่วนของขั้วแม่เหล็ก (pole piece) ที่ใช้สร้างสนามแม่เหล็กนั้นได้กลึงเป็น 3 ท่อนโดย ชั้นแรกนั้นจะเป็นส่วนที่ยื่นออกมาจากคอลัมน์ของปืนอิเล็กตรอนกลึงให้มีระดับยกต่ำลงมา 15 mm ทำเกลียวสำหรับยึดส่วนที่ 2 ซึ่งเป็นขั้วแม่เหล็กส่วนบน ซึ่งติดกับทองเหลืองเพื่อไม่ให้เกิดการควบวงจรสนามแม่เหล็กโดยไม่ผ่านตำแหน่งขั้วแม่เหล็ก และที่ทองเหลืองนี้จะมีเกลียวสำหรับยึดขั้วแม่เหล็กส่วนล่างอีกชั้นหนึ่ง โดยที่ขั้วแม่เหล็กด้านล่างตัวยึด aperture ขนาดรู 500 μm และ 200 μm ไว้ และขั้วแม่เหล็กที่ออกแบบจะมีขนาดรู (bore size, D) ให้อิเล็กตรอนผ่านขนาด 2 mm มีระยะห่างระหว่างขั้วแม่เหล็ก (gap length, S) 1.5 mm ดังนั้นจึงมีค่าสัดส่วน $S/D = 0.75$ ขั้วแม่เหล็กดังกล่าวจะยึดติดด้วยเกลียวใต้แอโนดและบรรจุอยู่ในกระบอกทองแดงที่ออกแบบให้เป็นคอลัมน์สุญญากาศดังแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.9 แสดงตำแหน่งของเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า



รูปที่ 3.10 เลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น

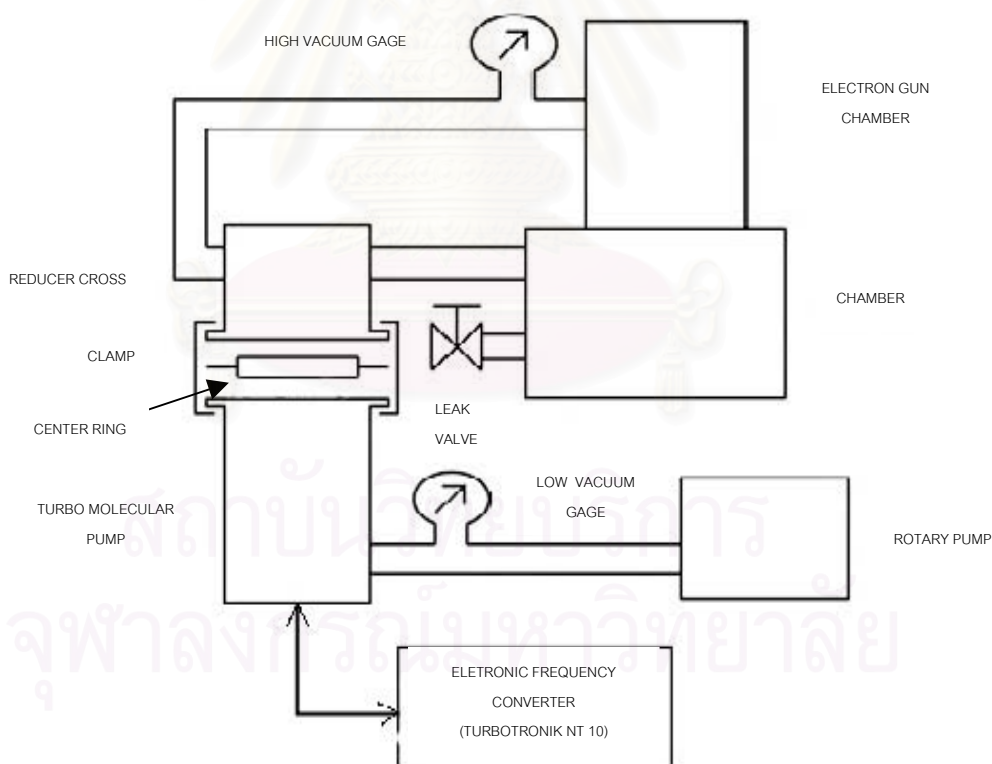
ส่วนขดลวดสำหรับสร้างสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งขั้วแม่เหล็กนั้นได้ออกแบบและคำนวณ (ภาคผนวก ค.) เลือกใช้ลวด SWG เบอร์ 25 ซึ่งสามารถทนกระแสไฟฟ้าได้ประมาณ 1 แอมแปร์ พันรอบบอบบิน 2380 รอบ ดังนั้นจะได้แรงเคลื่อนแม่เหล็กประมาณ 2380 NI เพื่อสร้างความเข้มสนามแม่เหล็กที่ขั้วแม่เหล็กในการบังคับระยะโฟกัสของลำอิเล็กตรอน โดยแกนบอบบินที่ใช้ได้ออกแบบให้พอดีกับช่องว่างที่เหลืออยู่ของแกนเหล็กอ่อนพอดี ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 แสดงบอบบินและขดลวดที่ถูกพันไว้สำหรับสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

3.4 การออกแบบและสร้างระบบสุญญากาศ

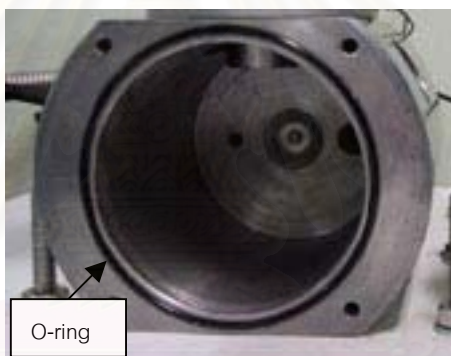
ระบบทำสุญญากาศในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องสุญญากาศแบบ เทอร์โบโมเลกูลาร์ (turbo molecular) ของบริษัท LEYBOLD VAKUUM GMBH ซึ่งเป็นเครื่องสุญญากาศความดันสูง มีอัตราสูบอากาศ 50 ลิตรต่อวินาที ความเร็วรอบ 72000 รอบต่อวินาที ไม่ต้องการระบบระบายความร้อน มีอุปกรณ์ควบคุมการทำงานอัตโนมัติและระบบวัดความดันสุญญากาศ พร้อมทำงานร่วมกับเครื่องสูบอากาศแบบโรตารี (rotary pump) ซึ่งมีอัตราสูบอากาศ 100 ลิตรต่อวินาที โดยเครื่องสูบโรตารีสามารถลดความดันสุญญากาศลดลงได้ประมาณ 10^{-2} torr ขณะที่เครื่องสุญญากาศเทอร์โบโมเลกูลาร์ ใช้เวลาประมาณ 30-45 นาที ลดความดันสุญญากาศลงได้ 10^{-5} - 10^{-6} torr ขณะหยุดการทำงานจะต้องปล่อยอากาศเข้าระบบเพื่อไม่ให้น้ำมันในเครื่องสูบโรตารีซึมกลับเข้าไปในห้องสูบอากาศ จึงต้องออกแบบ leak valve ไว้ที่ห้องใส่ตัวอย่าง แผนภาพของระบบสุญญากาศที่ออกแบบขึ้นแสดงในรูปที่ 3.12



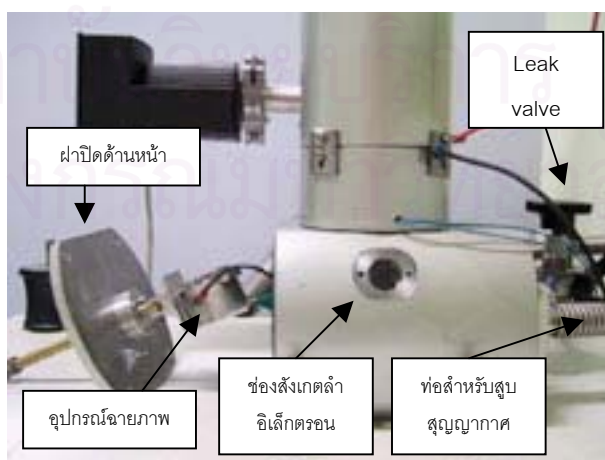
รูปที่ 3.12 แผนภาพของระบบทำสุญญากาศ

3.5 ห้องใส่ตัวอย่างและอุปกรณ์ฉายภาพรังสีเอกซ์

ห้องใส่ตัวอย่างสำหรับการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ในงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบโดยใช้ท่อเหล็กทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลาง 152.4 mm ยาว 152.4 mm กิ่งคว้านเนื้อเหล็กด้านในออกไปประมาณ 101.6 mm ด้านหน้าทำร่องสำหรับวาง O-ring เพื่อใช้แผ่นโลหะผสมอลูมิเนียมปิดด้านหน้าอีกชั้นในการรักษาสภาพสุญญากาศภายในห้องใส่ตัวอย่าง แสดงดังรูปที่ 3.13 ส่วนด้านหลังของห้องใส่ตัวอย่างเจาะรูไว้ 2 ตำแหน่งสำหรับติดตั้งท่อสุญญากาศจากเครื่องสุญญากาศแบบเทอร์โบโมเลกูลาร์ และสำหรับติดตั้ง leak valve ด้านข้างเจาะร่องกลมขนาด 2 cm ใส่อะคริลิกสำหรับตรวจสอบลำอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นและป้องกันการรั่วซึมด้วยอีพ็อกซี (epoxy) ในส่วนของฝาปิดด้านหน้าของห้องใส่ตัวอย่างนั้นได้ติดตั้งฐานสำหรับวางอุปกรณ์ฉายภาพรังสีเอกซ์ซึ่งสามารถปรับเลื่อนได้ 3 แกน เพื่อปรับเลื่อนสำหรับตำแหน่งลำอิเล็กตรอนที่จะตกกระทบบนแผ่นเคลือบสารเรืองแสงขณะทำการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 3.14

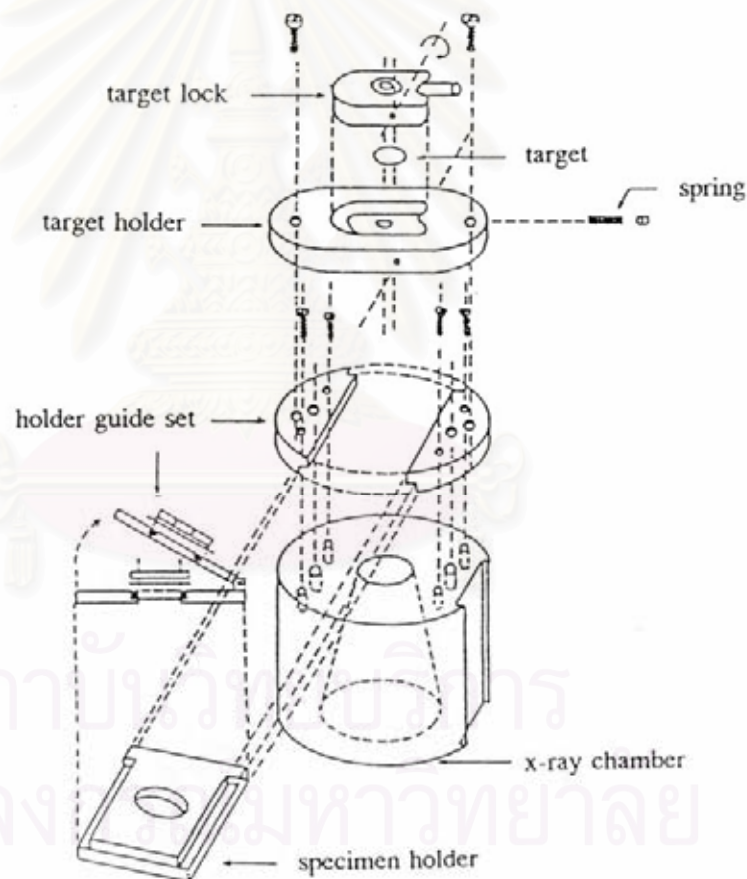


รูปที่ 3.13 ห้องใส่ตัวอย่างด้านหน้า



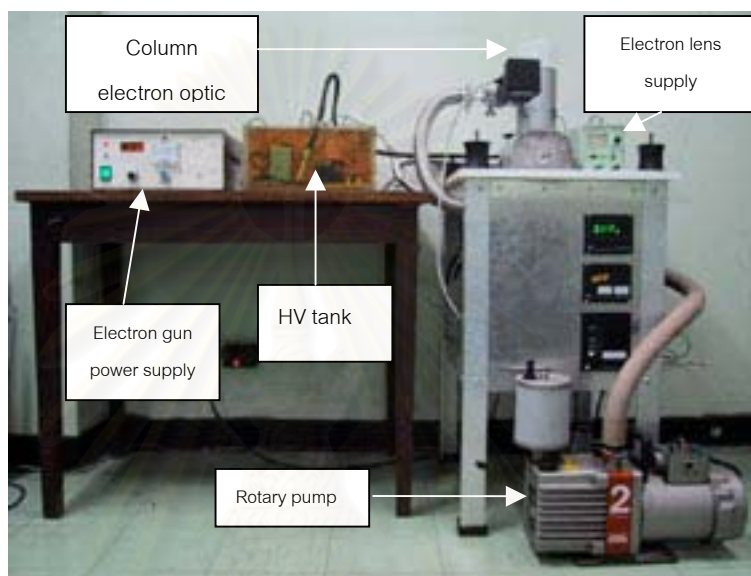
รูปที่ 3.14 แสดงห้องใส่ตัวอย่างด้านข้าง

ในส่วนของอุปกรณ์ฉายภาพรังสีเอกซ์นั้นใช้ชุดเดียวกับที่ใช้ในงานวิจัยเรื่อง “A Simple X-Ray Microscope for SEM” [12] เพื่อเปรียบเทียบระบบถ่ายภาพที่ได้พัฒนาขึ้นโดยใช้แผ่นเป้ากำเนิดรังสีเอกซ์เป็นแผ่นฟิล์มทองคำเคลือบผิวบนแผ่นไมกาบางด้วยวิธี ion sputtering อุปกรณ์ฉายภาพทางรังสีเอกซ์ที่ใช้ได้รับการออกแบบให้มีลักษณะเป็นทรงกระบอกกลม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 40 mm สูง 30 mm ทำด้วยอลูมิเนียม สามารถบันทึกภาพด้วยแผ่นฟิล์มขนาด 41 X 59 mm² มีส่วนสำหรับยึดเป้าผลิตรังสีเอกซ์ ห้องฉายภาพรังสีเอกซ์ (x-ray chamber) ชั้นส่วนสำหรับยึดตัวอย่าง ชั้นส่วนสำหรับยึดแผ่นฟิล์มบันทึกภาพถ่ายรังสีเอกซ์ และก้านสำหรับยึดชิ้นส่วนต่างๆ เข้ากับฐานใส่ตัวอย่างของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน เป็นต้น ดังแสดงโครงสร้างในรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 โครงสร้างอุปกรณ์ฉายภาพรังสีเอกซ์ [12]

รูปที่ 3.16 แสดงการนำอุปกรณ์และชิ้นส่วนต่างๆที่พัฒนาขึ้นประกอบรวมกันเป็นระบบถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ชนิดไมโครโฟกัสได้แก่ แหล่งจ่ายไฟฟ้าสำหรับปืนอิเล็กตรอน แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงซึ่งทำงานในฉนวนน้ำมัน (HV tank) คอลัมน์ของปืนอิเล็กตรอนและระบบสุญญากาศ เป็นต้น



รูปที่ 3.16 ระบบถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์แบบไมโครโฟกัส

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลทดสอบการทำงาน

ปืนอิเล็กทรอนิกส์แบบไมโครโฟกัสที่พัฒนาขึ้นใช้ในการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์เพื่อสร้างภาพขยายจากชิ้นงานตัวอย่างที่มีขนาดเล็กมีส่วนประกอบของระบบหลายส่วนซึ่งได้แยกทำการทดสอบทีละส่วน รวมทั้งทดสอบรวมทั้งระบบดังต่อไปนี้

4.1 ผลทดสอบการทำงานของระบบจ่ายไฟฟ้าศักดาสูง

4.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดสอบ

4.1.1.1 มัลติมิเตอร์ระบบเชิงตัวเลข ของ Hewlett Packard model 3476B พร้อม HV probe model 34111A

4.1.1.2 เครื่องอ่านรูปสัญญาณ (oscilloscope) ของ Tektronix model 465 พร้อม probe model P6109B

4.1.1.3 มัลติมิเตอร์ระบบเชิงเลข (digital multimeter) ของ Fluke model 8840 A

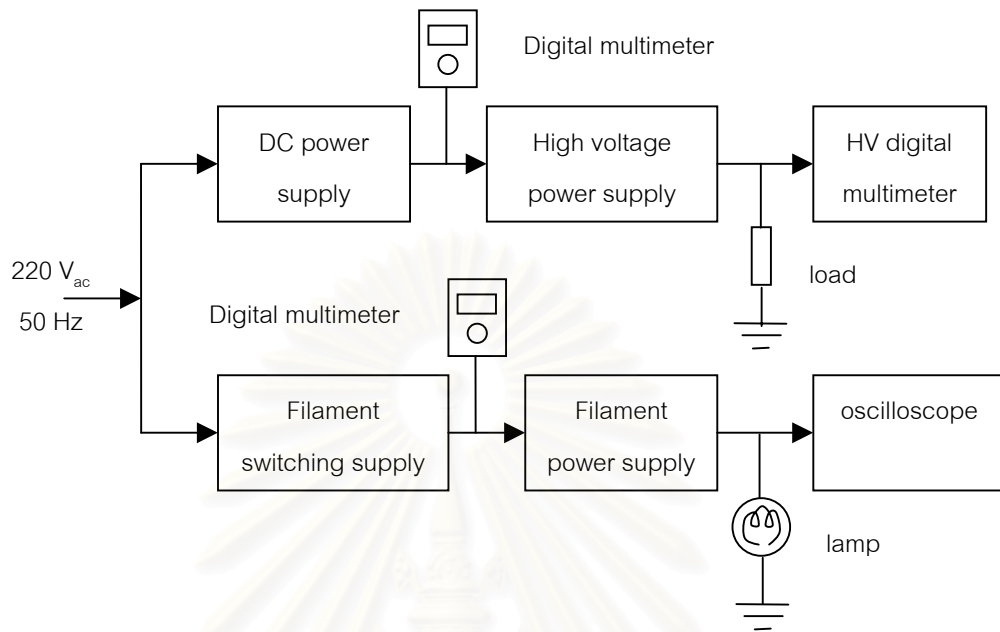
4.1.2 ทดสอบสมรรถนะของระบบจ่ายไฟฟ้าศักดาสูง

4.1.2.1 จัดระบบการทดสอบตามแผนภาพรูปที่ 4.1

4.1.2.2 ทดสอบการจ่ายแรงดันไฟฟ้าสูงของวงจร 0-40 kV และความสัมพันธ์กับแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ ขณะไม่ได้จ่ายกระแสแก๊สไหล โดยปรับแรงดันจาก 1.3 ถึง 40 kV ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.1 และเส้นกราฟรูปที่ 4.2

4.1.2.3 ทดสอบการจ่ายแรงดันไฟฟ้าสูงของวงจร 0-30 kV โดยต่อโหลดขนาด 300 M Ω เพื่อไหลกระแส 100 μ A ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.2 และเส้นกราฟรูป 4.3

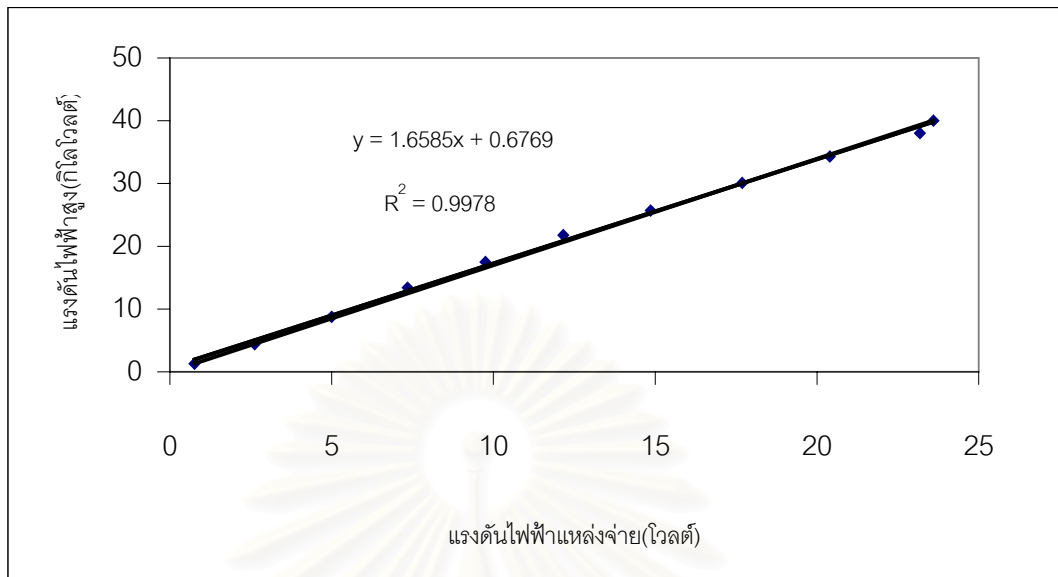
4.1.2.4 ทดสอบการจ่ายกระแสของวงจรจ่ายให้หลอดโดยจ่ายแรงดันอินพุตตั้งแต่ 20-200 V โดยไหลกระแส 1.5 A ด้วยหลอดไฟ 2.4 V 0.5 A ต่อขนานกัน 3 หลอด ในสภาวะที่รับแรงดันอินพุต 200 V วัดสัญญาณเอาพุตที่เครื่องอ่านรูปสัญญาณกระแสสลับความถี่ 15 kHz ได้ 2 V_{p-p} ซึ่งเพียงพอต่อการขับไส้ฟิวเมนต์ที่ใช้กับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กทรอนิกส์ให้ผลิตกระแสอิเล็กตรอนถึง 120 μ A ได้



รูปที่ 4.1 การทดสอบการทำงานของระบบไฟฟ้าคัตตาสูงและวงจรจ่ายได้หลอด

ตารางที่ 4.1 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายกับแรงดันไฟฟ้าสูงขณะไม่มีโหลด

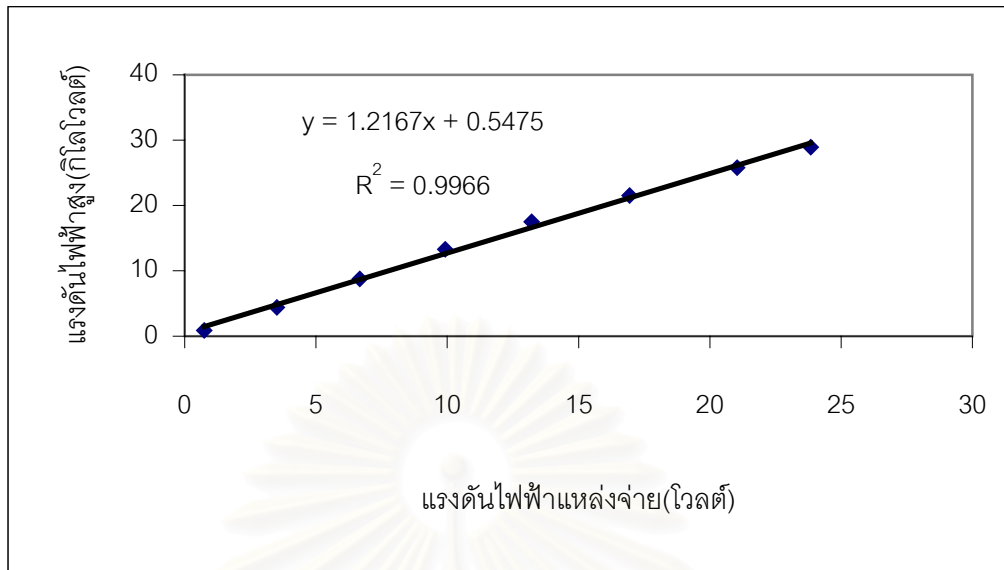
แรงดันไฟฟ้าแหล่งจ่าย (โวลต์)	แรงดันไฟฟ้าสูงทางออก (กิโลโวลต์)
0.76	-1.30
2.62	-4.40
5.00	-8.77
7.35	-13.4
9.75	-17.5
12.2	-21.8
14.9	-25.7
17.7	-30.1
20.4	-34.3
23.2	-38.0
23.6	-40.0



รูปที่ 4.2 เส้นกราฟแสดงความเป็นเชิงเส้นของแรงดันไฟฟ้าสูงขณะไม่จ่ายโหลด

ตารางที่ 4.2 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าสูงขณะจ่ายโหลด ที่กระแส 100 μA

แรงดันไฟฟ้าแหล่งจ่าย (โวลต์)	แรงดันไฟฟ้าสูงทางออก (กิโลโวลต์)
0.74	-0.86
3.51	-4.41
6.67	-8.76
9.92	-13.3
13.21	-17.5
16.94	-21.5
21.04	-25.8
23.84	-30.0

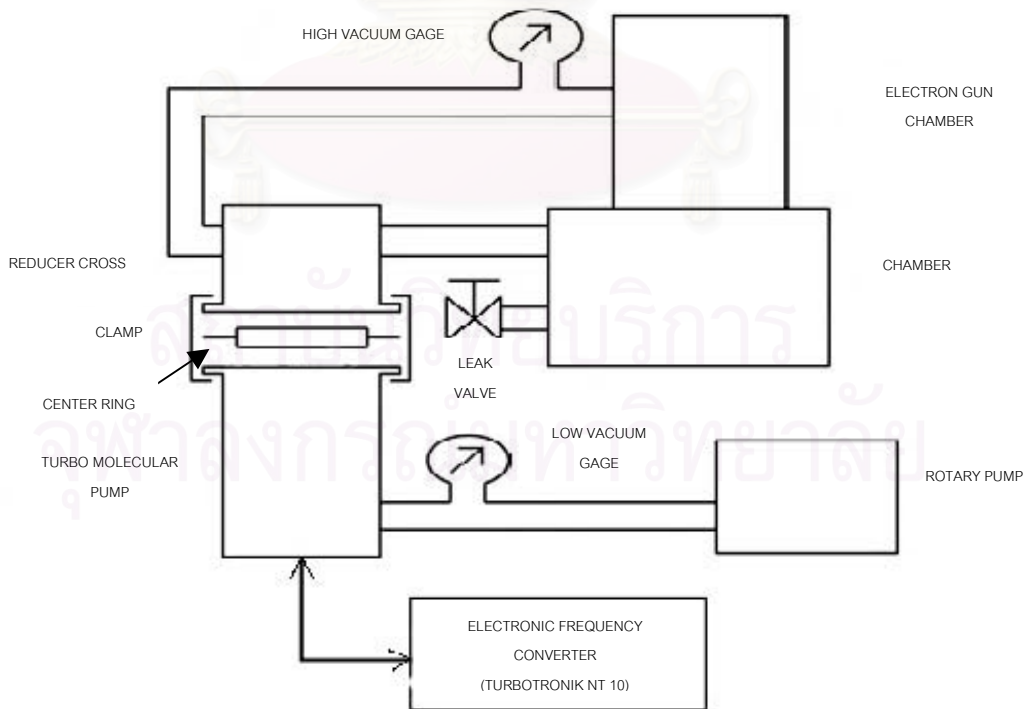


รูปที่ 4.3 เส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นของแรงดันขณะจ่ายโวลต์ที่กระแส $100 \mu\text{A}$

4.2 ผลทดสอบระบบสุญญากาศ

4.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดสอบ

ระบบสุญญากาศที่พัฒนาขึ้นแสดงดังแผนภาพการจัดระบบรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 แผนภาพระบบสุญญากาศ

4.2.2 ทดสอบการทำงานของระบบสุญญากาศ

ทดสอบความสามารถในการสูบอากาศโดยเดินเครื่องสุญญากาศแบบโรตารีจนกระทั่งได้ระดับสุญญากาศที่ประมาณ 10^{-2} torr จากนั้นเริ่มเดินเครื่องระบบสุญญากาศแบบเทอร์โบโมเลกูลาร์ พร้อมทั้งบันทึกความดันสุญญากาศในช่วงเวลาต่างๆ ผลการทดสอบเป็นไปตามตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบระบบสุญญากาศ

เวลา (นาที)	สถานะทำการทดสอบ	ระดับสุญญากาศที่ เกจความดันต่ำ (ทอร์)	ระดับสุญญากาศที่ เกจความดันสูง (ทอร์)
0	เดินเครื่องสูบ สุญญากาศโรตารี	-	-
4	เดินเครื่องสูบสุญญากาศ เทอร์โบโมเลกูลาร์	2.3×10^{-2}	-
7		2.1×10^{-2}	1.7×10^{-4}
10		1.9×10^{-2}	1.4×10^{-4}
20		1.7×10^{-2}	1.1×10^{-4}
30		1.6×10^{-2}	8.3×10^{-5}
45		1.5×10^{-2}	4.2×10^{-5}
60		1.5×10^{-2}	3.2×10^{-5}
75		1.5×10^{-2}	3.0×10^{-5}
90		1.5×10^{-2}	2.9×10^{-5}

4.3 ผลทดสอบการกำเนิดลำอิเล็กตรอนของปืนอิเล็กตรอน

4.3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดสอบ

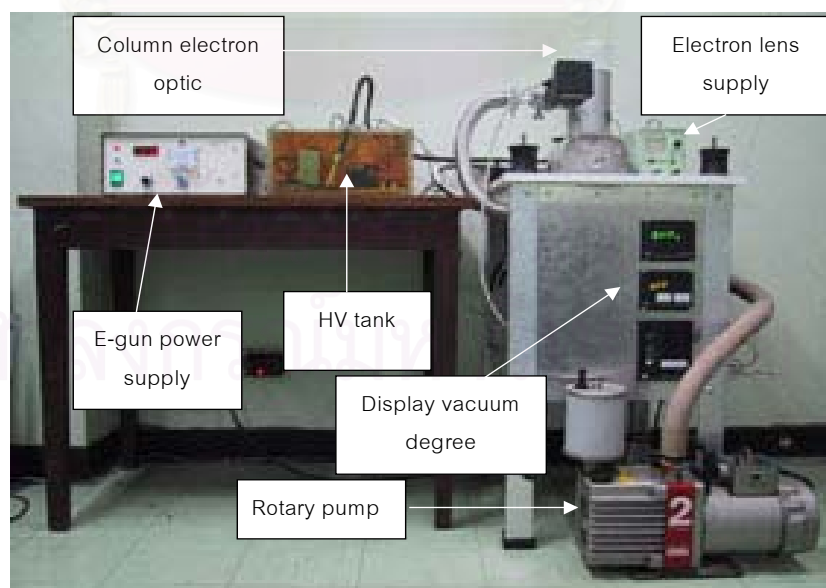
4.3.1.1 ฉากเรืองแสงขนาด $6.5 \times 6.5 \text{ cm}^2$

4.3.1.2 ระบบถ่ายภาพรังสีเอกซ์แบบไมโครโฟกัสที่พัฒนาขึ้น

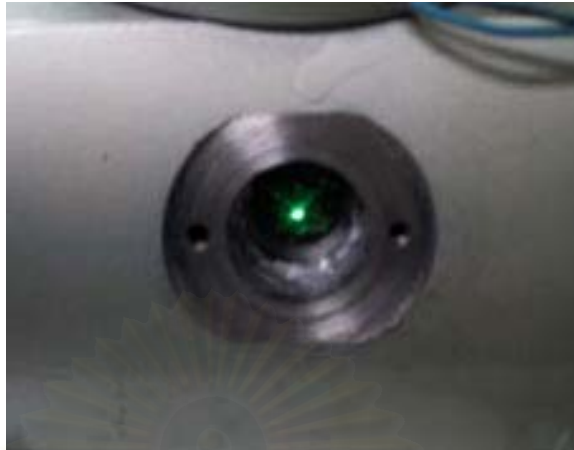
4.3.2 ทดสอบการกำเนิดลำอิเล็กตรอน

4.3.2.1 จัดระบบทดสอบตามระบบถ่ายภาพด้วยปืนอิเล็กตรอนแบบไมโครโฟกัสที่พัฒนาขึ้นตามรูปที่ 4.5 โดยวางฉากเรืองแสงห่างจากตำแหน่งหัวแม่เหล็กไฟฟ้า 5 cm ที่แทนสำหรับวางอุปกรณ์ฉายภาพรังสีเอกซ์เริ่มให้ระบบสูบลูญากาศทำงานจนได้ระดับความดันสุญญากาศที่ประมาณ 5×10^{-5} torr จากนั้นทดสอบการกำเนิดลำอิเล็กตรอนที่แรงดันศักดาไฟฟ้าสูง 10 kV โดยปรับโฟกัสที่เลนส์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าให้ลำอิเล็กตรอนมีความเข้มสูงสุดและขนาดเล็กที่สุดสังเกตได้จากช่องมองฉากเรืองแสงด้านข้างของห้องใส่ตัวอย่างสามารถมองเห็นการกำเนิดลำอิเล็กตรอนได้ดังรูปที่ 4.6 เมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของฟิลาเมนต์ จะทำให้ความเข้มของลำอิเล็กตรอนที่ตกกระทบฉากเรืองแสงเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงได้ชัดเจน เมื่อปรับกระแสของเลนส์อิเล็กตรอนจะมีผลให้ขนาดของจุดโฟกัสลำอิเล็กตรอนเปลี่ยนขนาดได้

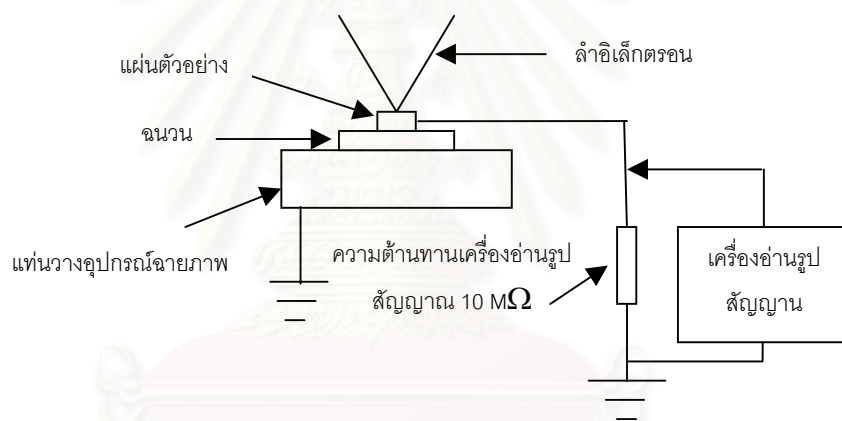
4.3.2.2 วัดกระแสของลำอิเล็กตรอนที่ตกกระทบตัวอย่าง โดยใช้เครื่องอ่านรูปสัญญาณซึ่งมีอิมพีแดนซ์ทางเข้า $10 \text{ M}\Omega$ ปรับค่าแรงดันไฟฟ้าที่ 20 kV และปรับกระแสของฟิลาเมนต์ให้ถึงภาวะการอิ่มตัวครั้งที่ 2 อ่านค่าแรงดันไฟฟ้าได้ 12 V คำนวณค่ากระแสจากลำอิเล็กตรอนได้ $1.2 \mu\text{A}$ และสังเกตกระแสริบเบิลจากการอ่านค่าแรงดันไฟฟ้าด้วยเครื่องอ่านรูปสัญญาณมีค่าน้อยกว่า 5 nA ที่ความถี่ประมาณ 1 kHz การจัดอุปกรณ์วัดกระแสที่ตัวอย่างได้แสดงรูปที่ 4.7 นอกจากนี้ยังวัดกระแสฮิมิตชันได้ $120 \mu\text{A}$



รูปที่ 4.5 ระบบทดสอบการกำเนิดลำอิเล็กตรอนด้วยปืนอิเล็กตรอนแบบไมโครโฟกัส



รูปที่ 4.6 แสดงลำอิลีกตรอนที่ศักดาไฟฟ้า 10 กิโลโวลต์



รูปที่ 4.7 แสดงการวัดกระแสที่ตัวอย่าง

4.4 การทดสอบการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์

4.4.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดสอบ

4.4.1.1 แผ่นฟิล์มของ Fuji สำหรับงานถ่ายภาพจุลทรรศน์อิลีกตรอน รุ่น FG orthochromatic

4.4.1.2 อุปกรณ์ฉายภาพรังสีเอกซ์

4.4.1.3 ตัวอย่างสำหรับถ่ายภาพคือ กระดูกส่วนหางปลาหางนกยูง

4.4.1.4 ระบบปืนอิลีกตรอนแบบไมโครโฟกัสสำหรับการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ที่

พัฒนาขึ้น

4.4.2 ทดสอบการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์

4.4.2.1 ทดสอบการถ่ายภาพตัวอย่างทางชีวภาพโดยวางแผ่นฟิล์มและตัวอย่างในอุปกรณ์ฉายภาพด้วยรังสีเอกซ์ให้ระบบถ่ายภาพมีกำลังขยายภาพ 2 เท่า ซึ่งขนาดชิ้นส่วนตัวอย่างและอุปกรณ์ฉายภาพด้วยรังสีเอกซ์แสดงในรูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9 ตามลำดับ ติดตั้งอุปกรณ์ฉายภาพด้วยรังสีเอกซ์พร้อมตัวอย่างในห้องใส่ตัวอย่างและเดินเครื่องสูบอากาศจนกระทั่งได้ความดันสุญญากาศที่ 5×10^{-5} torr จากนั้นจ่ายไฟฟ้าค้ำดาสูงที่ 18 kV พร้อมปรับกระแสไฟฟ้าที่จ่ายแก่ฟิลลาเมนต์และเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อให้ได้ลำอิเล็กตรอนที่มีความเข้มสูงที่สุดและขนาดเล็กที่สุดที่กระแสโปรบอิเล็กตรอน 500 nA ผลของภาพถ่ายตัวอย่างชิ้นงานที่ค้ำดาไฟฟ้า 18 kV ใช้เวลาถ่ายภาพนาน 20 นาที แสดงในรูปที่ 4.10 และ 4.11

4.4.2.2 ทดสอบหาขนาดจุดโฟกัสของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์โดยจัดระบบและอุปกรณ์ในการถ่ายภาพเช่นเดียวกับข้อ 4.4.2.1 จัดระบบถ่ายภาพของขอบแผ่นช่องบังค้ำอิเล็กตรอนที่กำลังขยาย 5 เท่า ที่ไฟฟ้าค้ำดาสูง 18 kV นาน 20 นาที ผลของภาพถ่ายตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 4.12 ก. และ 4.12 ข. หลังจากนั้นนำแผ่นฟิล์มที่ได้จากการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ไปหาค่าความสามารถในการแจกแจงรายละเอียดภาพด้วยเทคนิค edge spread function โดยอ่านค่าความแตกต่างของความดำที่ขอบภาพด้วยระบบสแกนอ่านค่าความดำ (microdensitometer) ผลการอ่านค่าความดำของแผ่นฟิล์มด้วยระบบสแกนอ่านค่าความดำ แสดงดังรูปที่ 4.12 และเส้นกราฟแสดงข้อมูลค่าความดำที่ขอบภาพดังแสดงในรูปที่ 4.13 จากเส้นกราฟสามารถหาค่าขอบเงามัว (penumbra) ได้เท่ากับ 0.45 mm นำข้อมูลไปคำนวณหาค่าขนาดจุดโฟกัสของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ได้เท่ากับ $112.5 \mu\text{m}$ ด้วยวิธีการคำนวณดังนี้

การหาค่าขนาดจุดโฟกัสของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์

ค่าขอบเงามัว (P) อ่านจากแผ่นฟิล์ม = 9 pixels \times 0.05 mm (resolution ของระบบสแกนอ่านค่าความดำตามรูปที่ 4.14)

$$= 0.45 \text{ mm}$$

ดังนั้น จากสมการที่ 4 สามารถหาขนาดของจุดโฟกัสของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ได้เป็น

$$\begin{aligned} \text{ขนาดโฟกัส (F)} &= P(d_1/d_2), d_1 = 0.5 \text{ cm}, d_2 = 2 \text{ cm} \\ &= (0.45 \text{ mm})(0.5 \text{ cm}/2 \text{ cm}) \\ &= 112.5 \mu\text{m} \end{aligned}$$

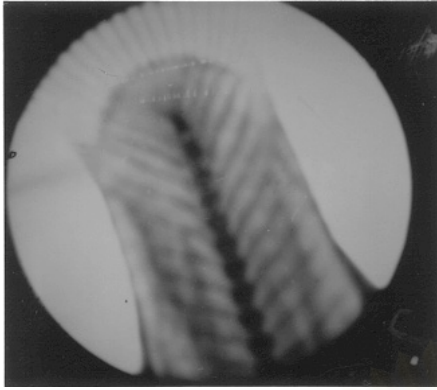


รูปที่ 4.8 แสดงชิ้นส่วนตัวอย่าง

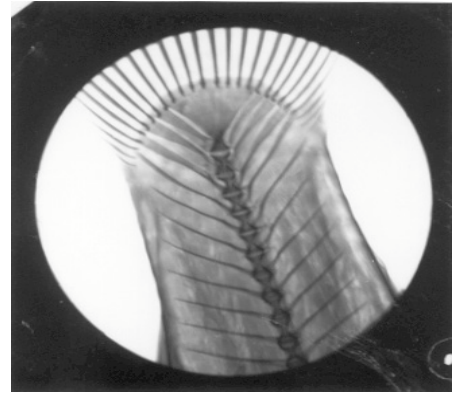


รูปที่ 4.9 แสดงอุปกรณ์ฉายภาพรังสีเอกซ์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

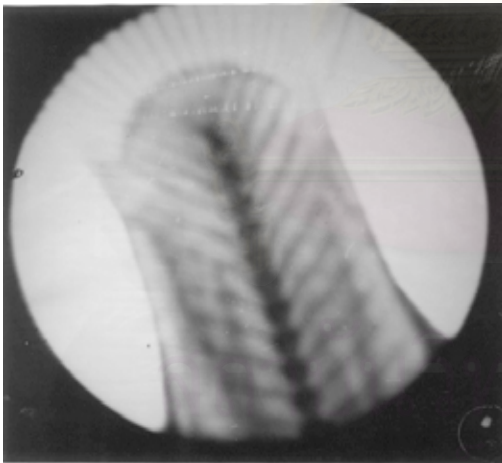


ก. ภาพถ่ายจากระบบที่พัฒนาขึ้นใช้ศักดา
ไฟฟ้าแรง 18 kV เวลาถ่ายภาพ 20 นาที

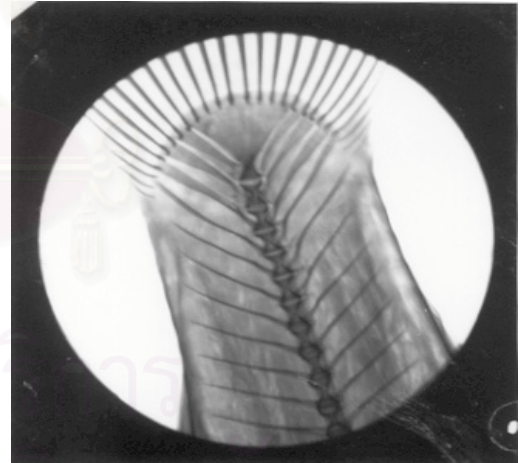


ข. ภาพถ่ายจากระบบดัดแปลงกล้อง
จุลทรรศน์อิเล็กตรอนใช้ศักดาไฟฟ้า
แรง 18 kV เวลาถ่ายภาพ 30 นาที

รูปที่ 4.10 แสดงภาพถ่ายส่วนหางปลาหางนกยูงที่กำลังขยายภาพ 2 เท่า กำลังอัดขยายภาพ 3 เท่า กำลังขยายรวม 6 เท่า เปรียบเทียบกับระบบดัดแปลงของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของ JEOL รุ่น 35 CF



ก. ภาพถ่ายจากระบบที่พัฒนาขึ้น



ข. ภาพถ่ายจากระบบดัดแปลงกล้อง
จุลทรรศน์อิเล็กตรอน

รูปที่ 4.11 แสดงภาพถ่ายส่วนหางปลาหางนกยูงที่กำลังขยายภาพ 2 เท่า กำลังอัดขยายภาพ 5 เท่า กำลังขยายรวม 10 เท่า เปรียบเทียบกับระบบดัดแปลงของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของ JEOL รุ่น 35 CF



1 cm

แนวสแกนความดำฟิล์ม

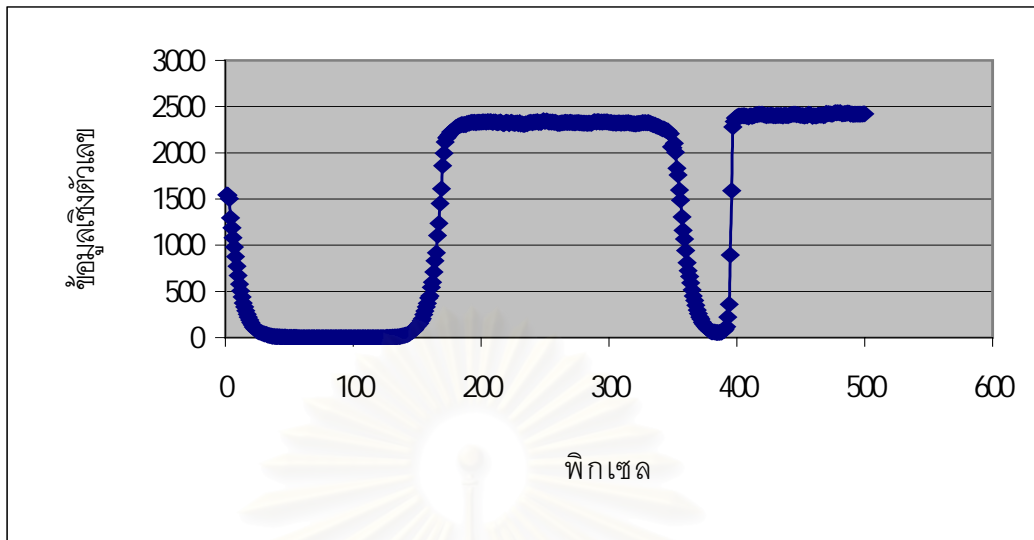
ก. จัดกำลังขยายภาพ 5 เท่า อัตราขยาย 3 เท่า กำลังขยายรวม 15 เท่า



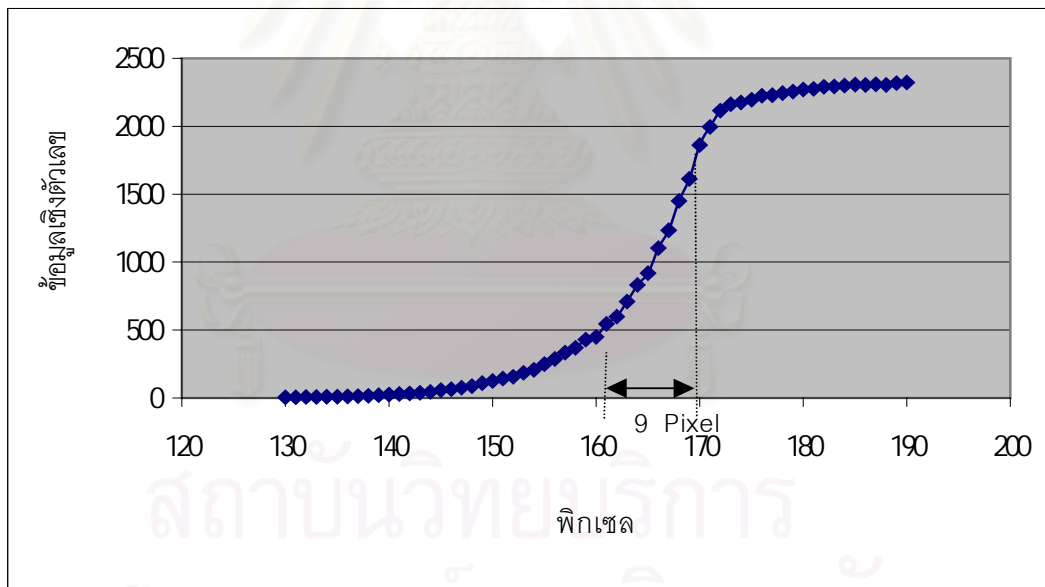
1 cm

ข. จัดกำลังขยายภาพ 5 เท่า อัตราขยาย 5 เท่า กำลังขยายรวม 25 เท่า

รูปที่ 4.12 ภาพถ่ายช่องบังค้ำลำอิเล็กตรอน (aperture) ขนาดรู 1 mm



รูปที่ 4.13 แสดงผลการอ่านค่าความดำของแผ่นฟิล์มด้วยระบบสแกนอ่านค่าความดำ



รูปที่ 4.14 แสดงกราฟแสดงข้อมูลค่าความดำที่ขอบภาพ

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 ปีนีเล็กตรอนแบบไมโครโฟกัสที่พัฒนาขึ้นสามารถสร้างขึ้นได้โดยใช้วัสดุและอุปกรณ์ที่หาได้ง่าย สามารถปรับแรงดันไฟฟ้าเร่งได้ต่อเนื่องจาก 0-40 kV ให้กระแสแอโนดสูงสุดได้ 120 μA กำเนิดโปรบินีเล็กตรอนที่ความเข้มอิเล็กตรอนสูงถึง 1.2 μA มีกระแสริปเปิลน้อยกว่า 5 nA ทำงานที่ความดันสุญญากาศในห้องแอโนด 5×10^{-5} torr การควบคุมการโฟกัสลำอิเล็กตรอนยังให้ประสิทธิภาพสูงไม่เพียงพอ ในขณะที่เดียวกันการสร้างระบบกลต้องการความละเอียดสูง เนื่องจากประสบปัญหาเรื่องการรั่วซึมบริเวณรอยต่อสุญญากาศ

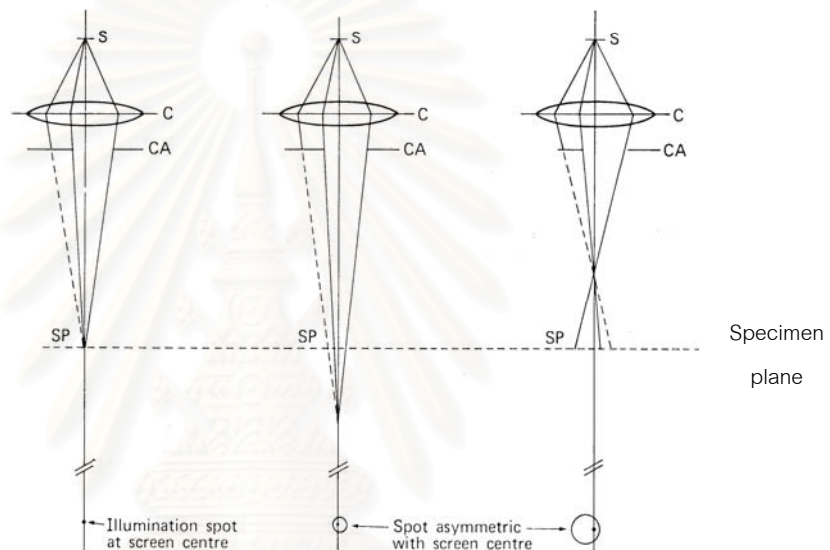
5.1.2 จากการทดสอบการทำงานของเลนส์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ทำการออกแบบไว้พบว่าการสร้างความเข้มสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งของขั้วแม่เหล็กส่งผลต่อความยาวโฟกัสของลำอิเล็กตรอนมาก เมื่อมีการปรับเพิ่มกระแสไฟฟ้าที่จ่ายแก่เลนส์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าในระดับมิลลิแอมแปร์จะทำให้ความยาวโฟกัสและขนาดจุดโฟกัสของลำอิเล็กตรอนเปลี่ยนไปมาก โดยเลนส์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะเริ่มทำให้อิเล็กตรอนเกิดการโฟกัสที่ฉากเรืองแสงที่ใช้สังเกตลำอิเล็กตรอนที่ตำแหน่งวัดห่างจากขั้วแม่เหล็กประมาณ 5 เซนติเมตร ใช้กระแสเพียง 40-60 มิลลิแอมแปร์ ความต่างศักย์ที่จ่ายแก่เลนส์ 1-2 โวลต์ แต่เมื่อปรับตำแหน่งของฉากเรืองแสงให้เพิ่มขึ้นมากกว่า 5 เซนติเมตรจะไม่สามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าเพื่อปรับขนาดของลำอิเล็กตรอนให้ลดลงได้เลย แสดงให้เห็นว่าเลนส์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ออกแบบไว้มีความยาวโฟกัสที่ค่อนข้างสั้นมาก

5.1.3 ผลการทดสอบการผลิตรังสีเอกซ์โดยใช้แผ่นเป้าทองคำความหนา 50 μm ใช้กระแสโปรบินีเล็กตรอน 100 nA และพลังงานของลำอิเล็กตรอน 18 KeV ถ่ายภาพของช่องบังค้ำลำอิเล็กตรอน (aperture) ที่กำลังขยาย 5 เท่า และตรวจสอบความไม่คมชัด ด้วยวิธี edge spread function และคำนวณหาค่าขนาดของจุดโฟกัสของการกำเนิดรังสีเอกซ์พบว่า ให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 112.5 μm

5.1.4 ผลทดสอบการถ่ายภาพขึ้นตัวอย่างทางชีวภาพที่กำลังขยาย 2 เท่า เวลาถ่ายภาพ 20 นาที พบว่า ภาพถ่ายให้ความคมชัดและความเปรียบต่างดีพอสมควรเทียบกับภาพถ่ายขึ้นตัวอย่างเดียวกันที่ถ่ายด้วยระบบดัดแปลงกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่ผลิตจากต่างประเทศ ซึ่งใช้เวลาถ่ายภาพ 30 นาที

5.2 วิจารณ์ผลการวิจัย

5.2.1 ผลการควบคุมการโฟกัสลำอิเล็กตรอนมีประสิทธิภาพไม่เพียงพอในการควบคุมให้ลำอิเล็กตรอนเล็กกว่านี้ และบางจุดที่พยายามปรับโฟกัสให้อยู่ในตำแหน่งที่ต้องการไม่ได้ อาจมีผลมาจากการสร้างอุปกรณ์ในระบบอิเล็กตรอนออปติก ไม่อยู่ในแนวแกนที่เที่ยงตรง ทำให้ช่องบังคับลำอิเล็กตรอนเหลื่อมกันกับต้นกำเนิดลำอิเล็กตรอน และเกิดผลกระทบดังในรูปที่ 5.1 [14] ซึ่งจำเป็นต้องมีระบบปรับแก้แนวแกน (axis alignment)



รูปที่ 5.1 แสดงผลของการปรับโฟกัสเนื่องจากการเหลื่อมกันระหว่างต้นกำเนิดอิเล็กตรอน และช่องบังคับลำอิเล็กตรอน [14]

5.2.2 การสังเกตและการควบคุมให้ลำอิเล็กตรอนตกกระทบบนเป่าโลหะที่ใช้ผลิตรังสีเอกซ์ทำได้ยากมาก เนื่องจากกลไกควบคุมที่สร้างขึ้นด้วยเครื่องมือที่มีอยู่ไม่ละเอียดพอตามแบบที่ออกไว้ จึงมีผลต่อการมองเห็นตำแหน่งที่ลำอิเล็กตรอนตกกระทบบริเวณเรืองแสงที่จัดไว้ทำให้ไม่สามารถสังเกตจุดโฟกัสที่ระดับได้เลนส์ได้ นอกจากนี้การปรับตำแหน่งละเอียดให้ได้กึ่งกลางทำได้ลำบาก มีผลให้ภาพถ่ายรังสีแต่ละครั้งไม่อยู่ที่กึ่งกลางของบริเวณพื้นที่ฉายภาพของอุปกรณ์ฉายภาพรังสีเอกซ์ และบริเวณภาพถ่ายมีปริมาณรังสีไม่สม่ำเสมอ

5.2.3 จุดโฟกัสของระบบถ่ายภาพจุลทรรศน์รังสีเอกซ์ที่จัดระบบด้วยปืนอิเล็กตรอนที่พัฒนาขึ้นยังมีขนาดเล็กไม่เพียงพอ ($112.5 \mu\text{m}$) แต่ให้กระแสโปรบอิเล็กตรอนสูงมาก ถ้าพัฒนาประสิทธิภาพของระบบอิเล็กตรอนออปติกให้ดีขึ้น จะได้ขนาดจุดโฟกัสที่เล็กลง และเพิ่มกำลัง

ขยายได้สูงขึ้น โดยใช้เวลาถ่ายภาพสั้นกว่ากล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนซึ่งออกแบบไว้ที่กระแสโปรบอิเล็กตรอนค่อนข้างต่ำ และจากผลของภาพถ่ายขึ้นตัวอย่างทางชีวภาพนั้นความคมชัดของภาพถ่ายที่ได้จะดีกว่างานวิจัยที่ใช้ต้นกำเนิดรังสีเอกซ์ที่ดัดแปลงจากปืนอิเล็กตรอนของหลอดรังสีแคโทด [2] แต่จะดีกว่าระบบดัดแปลงกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (Scanning Electron Microscope : SEM) เนื่องจากปลายโปรบอิเล็กตรอนของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนมีขนาดเล็กกว่า $5 \mu\text{m}$ [14]

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 ระบบการถ่ายภาพด้วยปืนอิเล็กตรอนแบบไมโครโฟกัสที่พัฒนาขึ้นควรมีการออกแบบระบบให้สามารถสังเกตลำอิเล็กตรอนที่จะตกกระทบบนเป้าผลิตรังสีเอกซ์ที่มีประสิทธิภาพสูงกว่าเดิมซึ่งจะทำให้การทดสอบตำแหน่งการทำงานที่ส่งผลต่อความยาวโฟกัสของลำอิเล็กตรอนไม่ถูกจำกัด โดยเฉพาะระบบควรปรับเปลี่ยนตำแหน่งของเป้าโลหะผลิตรังสีเอกซ์ได้ทั้ง 3 แกนในห้องสุญญากาศ

5.3.2 ควรมีการศึกษาการทำงานของเลนส์อิเล็กตรอนให้มากกว่านี้และเพิ่มประสิทธิภาพในการสร้างกำลังขยายภาพของเลนส์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะสูงขึ้นอีกหากมีการเพิ่มจำนวนเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้ามากกว่า 1 ตัว เพื่อให้สามารถลดขนาดโฟกัสปลายโปรบของลำอิเล็กตรอนลงได้มากกว่านี้

5.3.3 ควรมีการพัฒนาชุดสนามแม่เหล็กควบคุมแนววิถีการเคลื่อนที่ของลำอิเล็กตรอน (axis alignment coil) เพื่อปรับแก้ความไม่เที่ยงตรงของงานสร้างชิ้นส่วน จะช่วยให้คุณภาพของระบบออปติกเลนส์ดีขึ้น

5.3.4 จากระบบการถ่ายภาพที่พัฒนาขึ้นหากมีการออกแบบระบบการสแกนลำอิเล็กตรอนและระบบการเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์เพื่อให้เห็นภาพที่เกิดขึ้นได้ทันที (real time) จะสามารถสร้างเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนได้ (Scanning Electron Microscope : SEM) และการปรับตำแหน่งปลายโปรบอิเล็กตรอนลงบนเป้ากำเนิดรังสีเอกซ์จะเที่ยงตรงทุกครั้ง

5.3.5 ระบบทำสุญญากาศสามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้สูงขึ้นได้โดยการปรับปรุงระบบการสูบลำอากาศใหม่โดยลดการรั่วซึมของรอยต่อที่มีผิวไม่ละเอียดและความไม่กระชับของร่อง O-ring

รายการอ้างอิง

1. วิรุพห์ มังคละวิรัช, สุวิทย์ ปุณณชัยยะ. กล้องจุลทรรศน์รังสีเอกซ์แบบฉายภาพ. วารสารศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, ปีที่2 ฉบับที่2, 2535. หน้า 107-137.
2. วิมล ทวีพย์ส่งสุข. การดัดแปรหลอดรังสีแคโทดสำหรับงานจุลทรรศน์รังสีเอกซ์.วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.
3. นเรศร์ จันทน์ขาว. การถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์และรังสีแกมมาในงานอุตสาหกรรม. เอกสารประกอบการสอนวิชา 2111626 การประยุกต์ใช้รังสีในทางอุตสาหกรรม. ภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540.
4. สุวิทย์ ปุณณชัยยะ และ เดโช ทองอร่าม. แคโทดสำหรับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน. วารสารศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, ปีที่4 ฉบับที่2, 2537. หน้า 139-169.
5. J.C.H. Phang, D.S.H. Chan. Scanning Electron Microscopy Theory and Applications. Department of Electrical Engineering : NUS , (n.d.)
6. David C. Joy. Principles of Analytical Electron Microscopy. Plenum Pres, New York and London,1943.
7. Cecil E. Hall. Introduction to Electron Microscopy. Massachusetts Institute of Technology : McGraw-Hill Inc., 1966.
8. Instruction Book. Introduction to Electron Optics. JOEL Ltd.
9. วิรุพห์ มังคละวิรัช, สุวิทย์ ปุณณชัยยะ. ระบบเลนส์อิเล็กตรอนของ TEM ที่ภาพไม่หมุนเคลื่อนตำแหน่งเมื่อเปลี่ยนกำลังขยาย, วารสารศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, ปีที่3 ฉบับที่2, 2536. หน้า 173-187.
10. วิรุพห์ มังคละวิรัช, สุวิทย์ ปุณณชัยยะ. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน, วารสารศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, ปีที่1 ฉบับที่2, 2534. หน้า 129-165.
11. Keiji Yada, Shoichi Takahashi. Target Materials Suitable for Projection X-ray Microscope Observation of Biological Samples. J. Electron Microsc., Vol. 38, No.5,1989. p321-331.

12. V. Mangclaviraj, S. Punnachaiya, N. Ngernvijit and D. Tong-aram. A Simple X-ray Microscope from SEM. Proceeding 5th Asia-Pasific Electron Microscopy Conference, Beijing, 1992.
13. Muhammad H. Rashid. Power Electronics. 2nd ed. : Prentice Hall International, Inc., 1988.
14. A.W. Agar, R.H. Alderson and D. Chescoe. Principles and Practice of Electron Microscopy Operation. North-Holland Publishing Company, 1980.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก.

การออกแบบและคำนวณหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันต่ำ

หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันต่ำเลือกใช้แกนฟลายแบคค์ (flyback) ของเครื่องรับโทรทัศน์ซึ่งทำงานที่ความถี่ 15 kHz โครงสร้างของบอบบิ้นจะต้องสามารถบรรจุในช่องว่างของแกนและฉนวนระหว่างขดปฐมภูมิและขดทุติยภูมิต้องทนแรงดันได้ไม่น้อยกว่า 40 kV ขณะที่จ่ายกระแสให้กับได้หลอด ดังนั้นโครงสร้างบอบบิ้นจึงเลือกใช้เทปลอนที่มีความหนา 2 ซ.ม. แยกระหว่างขดปฐมภูมิและขดทุติยภูมิ

กำหนดให้

$$f = 15 \text{ kHz}$$

$$B_{\max} = 0.09 \text{ T (900 G)}$$

$$V_p = 200 \text{ V}$$

$$V_s = 10 \text{ V}$$

$$I_D = 800 \text{ Circular mils/A}$$

$$I_p = 20 \text{ mA}$$

$$I_s = 1.5 \text{ A}$$

$$A_e = 2.3 \text{ cm}^2$$

$$T_{\text{on}} = \text{duty cycle} \times T$$

$$= 0.15 \times 66.67$$

$$= 10 \mu\text{s}$$

หาจำนวนรอบด้านปฐมภูมิ

$$N_p = [V_p \times T_{\text{on}}] / [B_{\max} \times A_e]$$

$$= [200 \times 10 \times 10^{-6}] / [0.09 \times 2.3 \times 10^{-4}]$$

$$= 96.62 \text{ รอบ}$$

หาจำนวนรอบขดรีเซท

$$N_R / N_p = (1-k) / k$$

โดยที่ $k = \text{duty cycle}$

จะได้

$$N_R = [(1-0.15)/0.15] \times 96.62$$

$$= 547.51 \text{ รอบ}$$

หาขนาดลวดทองแดงด้านปฐมภูมิ

$$\text{ขนาดลวด} = I_p \times I_D$$

$$= 20 \times 10^{-3} \times 800$$

$$= 16 \text{ Circular mils}$$

จากตารางขนาดลวดเลือกขนาดลวดทองแดง AWG เบอร์ 37

ดังนั้นทางทางด้านปฐมภูมิใช้ลวดทองแดง AWG เบอร์ 37 พื้นที่ 100 รอบ

ส่วนขดรีเซทพื้นที่ด้วยลวดทองแดงเบอร์เดียวกันที่ 550 รอบ

$$N_S = N_p \times (V_S/V_p)$$

$$= 100 \times (10/200)$$

$$= 5 \text{ รอบ}$$

หาขนาดขดลวดทองแดงด้านทุติยภูมิ

$$\text{ขนาดลวด} = I_s \times I_D$$

$$= 1.5 \times 800$$

$$= 1200 \text{ Circular mils}$$

จากตารางขนาดลวดเลือกขนาดลวดทองแดง AWG เบอร์ 19

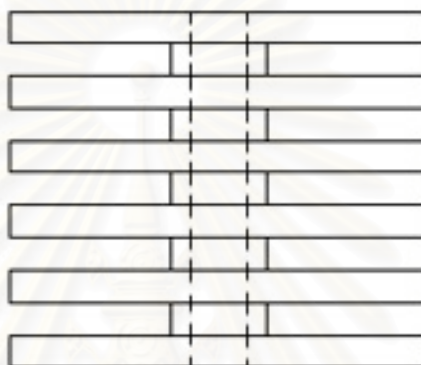
ดังนั้นทางทางด้านทุติยภูมิใช้ลวดทองแดง AWG เบอร์ 19 พื้นที่ 5 รอบ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข.

การออกแบบและคำนวณหม้อแปลงไฟฟ้าสูง

หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงเลือกใช้แกนฟลายแบคส์เช่นเดียวกัน โครงสร้างของบอบบิน ออกแบบไม่ให้เกิดการอาร์คระหว่างขด โดยเลือกใช้ฉนวนเทปลอนเซาะร่องแยกขดทุกขดมีออกมาเป็น 5 ชั้น ดังในรูป



แสดงส่วนของบอบบินที่ออกแบบ

กำหนดให้

$$f = 15 \text{ kHz}$$

$$B_{\max} = 0.09 \text{ T (900 G)}$$

$$V_p = 30 \text{ V}$$

$$V_s = 8 \text{ kV}$$

$$I_D = 800 \text{ Circular mils/A}$$

$$I_p = 2 \text{ A}$$

$$I_s = 500 \mu\text{A}$$

$$A_e = 2.3 \text{ cm}^2$$

$$T_{\text{on}} = \text{duty cycle} \times T$$

$$= 0.15 \times 66.67$$

$$= 10 \mu\text{s}$$

หาจำนวนรอบด้านปฐมภูมิ

$$\begin{aligned} N_p &= [V_p \times T_{on}] / [B_{max} \times A_e] \\ &= [30 \times 10 \times 10^{-6}] / [0.09 \times 2.3 \times 10^{-4}] \\ &= 14.49 \text{ รอบ} \end{aligned}$$

หาขนาดลวดทองแดงด้านปฐมภูมิ

$$\begin{aligned} \text{ขนาดลวด} &= I_p \times I_D \\ &= 2 \times 800 \\ &= 1600 \text{ Circular mils} \end{aligned}$$

จากตารางขนาดลวดเลือกขนาดลวดทองแดง AWG เบอร์ 19

ดังนั้นทางทางด้านปฐมภูมิใช้ลวดทองแดง AWG เบอร์ 19 พัน 20 รอบ

$$\begin{aligned} N_s &= N_p \times (V_s / V_p) \\ &= 20 \times (8 \times 10^3 / 30) \\ &= 5333.33 \text{ รอบ} \end{aligned}$$

หาขนาดขดลวดทองแดงด้านทุติยภูมิ

$$\begin{aligned} \text{ขนาดลวด} &= I_s \times I_D \\ &= 500 \times 10^{-6} \times 800 \\ &= 0.4 \text{ Circular mils} \end{aligned}$$

จากตารางขนาดลวดเลือกขนาดลวดทองแดง AWG เบอร์ 42

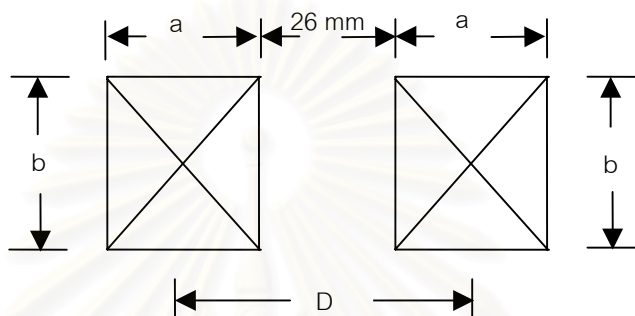
ดังนั้นทางทางด้านปฐมภูมิใช้ลวดทองแดง AWG เบอร์ 42 พัน 6248 รอบ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค.

การออกแบบและคำนวณเลนส์สนามแม่เหล็กไฟฟ้า

การคำนวณเลนส์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าออกแบบให้พันอยู่บนบอบบินที่สามารถบรรจุในช่องว่างของแกนเหล็กอ่อน (yoke) ที่ใช้สร้างความเข้มสนามแม่เหล็กโดยมีขนาดตามรูปด้านล่าง



ต้องการ $NI = 2500$ amps-turn

กำหนดแหล่งจ่ายไฟฟ้าแก่เลนส์จ่ายได้ $V = 30$ V , $I = 1$ A

ดังนั้นจำนวนรอบในการพันเลนส์ $N = NI/I = (2500)/1 = 2500$ turns

ใช้เส้นลวดทองแดงที่มีค่า $\rho = 1.9 \times 10^{-6}$ Ω -cm

$$ab = [4\rho D(NI)^2] / (VI)$$

กำหนด $D =$ เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเลนส์

$$= 4.5 \text{ cm}$$

ดังนั้น

$$ab = [4 \times 1.9 \times 10^{-6} \times 4.5 \times (2500)^2] / (30 \times 1)$$

$$= 7.125 \text{ cm}^2$$

ได้ค่า $a = 2.5$ cm , $b = 2.85$ cm , $D = 4.5$ cm

หาขนาดลวด, d

$$d = \sqrt{\frac{ab}{N}}$$

$$= \sqrt{\frac{7.125}{2500}}$$

$$= 0.05338 \text{ cm}$$

เปิดตารางเทียบขนาดลวดใช้ลวด SWG เบอร์ 25

เมื่อออกแบบเพื่อใช้งานจริงมีการปรับค่าต่างๆตามความเหมาะสมดังนี้

- จำนวนรอบที่พันด้วยลวด SWG เบอร์ 25 จริง คือ 2380 turns ดังนั้น NI จริง มีค่าเท่ากับ 2380 amps-turn
- ขนาด a และ b จริง คือ 2.7 cm และ 3.3 cm



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายกิตติพงษ์ เกษมสุข เกิดเมื่อวันที่ 28 เมษายน พ.ศ.2518 ที่จังหวัดขอนแก่น จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนขอนแก่นวิทยายน จังหวัดขอนแก่น ได้รับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ในปีการศึกษา 2540 และได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ปีการศึกษา 2542 ในสาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย