การพัฒนาระบบเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อใช้ในการผลิตรังสีเอกซ์ชนิดไมโคร โฟกัส

น.ส.นพวรรณ์ ตัญเจริญสุขจิต

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2549
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEVELOPMENT OF ELECTROMAGNETIC LENS SYSTEM FOR PRODUCTION OF MICROFOCUS X-RAY

Miss Noppawan Tancharoensukjit

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering Program in Nuclear Technology

Department of Nuclear Technology

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2006

Copyright of Chulalongkorn University

490621

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาระบบเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อใช้ในการผลิตรังสีเอกซ์ชนิดไมโครโฟกัส
โดย	น.ส. นพวรรณ์ ตัญเจริญสุขจิต
สาขาวิชา	นิวเคลียร์เทคโนโลยี
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุวิทย์ ปุณณชัยยะ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์ เดโช ทองอร่าม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.สัญชัย นิลสุวรรณโฆษิต)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุวิทย์ ปุณณชัยยะ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(อาจารย์ เดโช ทองอร่าม)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อรรถพร ภัทรสุมันต์)

นพวรรณ์ ตัญเจริญสุขจิต : การพัฒนาระบบเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อใช้ในการผลิตรังเอกซ์ชนิดไมโครโฟกัส. (DEVELOPMENT OF ELECTROMAGNETIC LENS SYSTEM FOR PRODUCTION OF MICROFOCUS X-RAY) อ. ที่ปรึกษา : ผศ.สุวิทย์ ปุณณชัยยะ, อ. ที่ปรึกษา ร่วม : อ. เดโช ทองอร่าม 62 หน้า.

ระบบเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำไปใช้โฟกัสลำอิเล็กตรอนในการผลิตรังสีเอกซ์แบบไมโครโฟกัสในงานจุลทรรศน์รังสีเอกซ์ เนื่องจากปืนอิเล็กตรอนสำหรับผลิตลำอิเล็กตรอนที่พัฒนาไว้เดิมออกแบบให้มีเลนส์คอนเด็นเซอร์เพียงตัวเดียว จึงไม่สามารถโฟกัสปลายลำอิเล็กตรอนให้ผลิตรังสีเอกซ์ที่มีจุดโฟกัสเล็กกว่า 120 ไมครอนได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นในการพัฒนาเลนส์ออฟเจ็กทีฟ เพื่อประกอบเข้ากับเลนส์เดิมให้เป็นระบบเลนส์ที่มีความสามารถในการโฟกัสลำอิเล็กตรอนได้ดีกว่า โครงสร้างของเลนส์ที่สร้างขึ้นประกอบด้วยแกนวงจรแม่เหล็กซึ่งทำจากเหล็กคาร์บอนต่ำที่หาได้ในประเทศ มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 ซม. และสูง 9.4 ซม. เปิดช่องสนามแม่เหล็กขนาด 6 มม. และขดลวดสนามแม่เหล็กที่มีจำนวนรอบ 2,857 รอบ เลือกอัตราส่วนช่องเปิดสนามแม่เหล็กต่อช่องทางผ่านลำอิเล็กตรอน (S/D) เท่ากับ 2 เพื่อให้สามารถแปรเปลี่ยนสนามแม่เหล็กได้อย่างสม่ำเสมอระหว่าง 10 – 100 เทสลา

ผลทดสอบระบบเลนส์ที่พัฒนาขึ้นนี้พบว่าสามารถปรับโฟกัสลำอิเล็กตรอนเพื่อผลิตรังสีเอกซ์ที่มีจุดโฟกัสเล็กลงเป็น 67.96 ไมครอน และจากการทดลองถ่ายภาพชิ้นตัวอย่างชีวภาพด้วยกำลังขยาย 4 เท่า ใช้เวลาถ่ายภาพ 10 นาที บันทึกภาพด้วยแผ่นบันทึกภาพของบริษัทฟูจิฟิล์มรุ่น BAS-TR2025 แทนฟิล์ม พบว่าภาพที่ได้มีความเปรียบต่างดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับระบบเดิมที่ยังไม่มีเลนส์ออฟเจ็กทีฟ แต่ยังขาดความคมชัด นอกจากนี้พบว่าการใช้กระบวนการสร้างภาพด้วยแผ่นบันทึกภาพมีความสะดวก แต่แผ่นบันทึกภาพมีความไวต่อรังสีกระเจิงมาก จำเป็นต้องใช้เทคนิคการกรองรังสีช่วย เพื่อลดการรบกวนของรังสีกระเจิงต่อภาพถ่ายรังสี

ภาควิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี ลายมือชื่อ.....

สาขาวิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ปีการศึกษา 2549 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4670344021 : MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY

KEY WORD: MICROFOCUS X-RAY / ELECTROMAGNETIC LENS / ELECTRON LENS / OBJECTIVE LENS / IMAGE PLATE

NOPPAWAN TANCHAROENSUKJIT: DEVELOPMENT OF ELECTROMAGNETIC LENS SYSTEM FOR PRODUCTION OF MICROFOCUS X-RAY: THESIS ADVISOR: ASST. PROF. SUVIT PUNNACHAIYA, THESIS COADVISER: DECHO THONG-ARAM 62 pp.

The electromagnetic lens system was developed to focus electron beam for microfocus of x-ray generated in x-ray microscopy. From previous development, the single condenser lens control in electron gun was designed. Therefore, the electron beam could not be focused to generate x-ray at focal spot of less than 120 μm. In this thesis, the objective lens were developed and combined together with the single condenser lens for enhancing the focus capability of the lens system. The developed lens structure comprised the local low carbon iron of $\phi 10 \times 9.4$ cm magnetic yoke with 6 mm opened magnetic gap and electromagnetic coil of 2,857 turns of wire. The magnetic gap to beam path diameter ratio (S/D) of 2 was selected in order to varying the uniformity magnetic flux between 10 -100 T.

In this developed lens testing, the 67.96 μm focal spot x-ray could be generated in the electron beam focusing. The microradiographic test of biological specimen at 4 times magnification with 10 minute exposure time was performed. And the BAS-TR2025 Fuji imaging plate was used for image recording instead of the film. After the objective lens was installed and operated, the obtained image contrast from the lens system was greater than the previous one, however it was insufficient sharpness. Moreover, the investigation revealed that the image plate recording was very convenience, although it was sensitive to the scattered x-ray. In order to prevent the image degradation by these scattered x-ray, the radiation filtering technique was applied.

Department	Nuclear Technology	Student's signature .....
Field of Study	Nuclear Technology	Advisor's signature .....
Academic	2006	Co-advisor's signature .....

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุวิทย์ ปุณณชัยยะ และอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมอาจารย์เดโช ทองอร่าม ที่คอยให้คำปรึกษา ข้อชี้แนะในการทำวิจัยและความช่วยเหลือต่างๆ

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่ให้ทุนสนับสนุนทุนวิจัยในการทำวิจัยครั้งนี้ และขอขอบคุณ คุณบังอร และเจ้าหน้าที่ส่วนงานจุลทรรศน์อิเล็กตรอนทุกคน ที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในการอนุเคราะห์การใช้เครื่องมือและอำนวยความสะดวกในการดำเนินการวิจัย

ขอขอบคุณ คุณรัฐภูมิ โคกศิริ เจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ช่วยเหลือในการสร้างอุปกรณ์สำหรับงานวิจัย

ขอบคุณ เพื่อนๆ พี่ๆและ น้องๆทุกคนที่ให้กำลังใจและช่วยเหลือในงานวิจัยมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ผู้ให้ความรัก สั่งสอน อบรม ให้การศึกษา และเป็นกำลังใจเสมอมา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ

กิตติกรรมประกาศ..... ฉ

สารบัญ..... ช

สารบัญภาพ..... ญ

บทที่

1 บทนำ..... 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของการวิจัย..... 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย..... 2

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์..... 2

1.4 ขั้นตอนและวิธีในการดำเนินการวิจัย..... 2

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 3

1.6 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 3

2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง..... 4

2.1 ระบบเลนส์อิเล็กตรอน 4

2.1.1 โครงสร้างของเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า..... 4

2.2 Condenser Lens..... 8

2.3 Objective Lens..... 12

2.4 ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นในอิเล็กตรอนออฟติกคอลัมน์..... 13

2.4.1 ความคลาดเคลื่อนแบบ spherical..... 13

2.4.2 ความคลาดเคลื่อนแบบ chromatic..... 14

2.4.3 ความคลาดเคลื่อนแบบ diffraction..... 15

2.4.4 ความคลาดเคลื่อนแบบ stigmatism..... 16

2.5 การออกแบบเลนส์อิเล็กตรอน..... 17

2.5.1 ขนาดของ bore (d_p)..... 19

2.5.2 การคำนวณขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า..... 22

2.6 ระบบบันทึกภาพด้วยแผ่นบันทึกภาพ (imaging plate)..... 23

บทที่		หน้า
3	การพัฒนาระบบเลนส์อิเล็กตรอน	26
	3.1 การออกแบบเลนส์อิเล็กตรอนชนิดออฟเจ็กทีฟ	26
	3.1.1 โครงสร้างของเลนส์ออฟเจ็กทีฟ	27
	3.1.2 การออกแบบขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้าของเลนส์อิเล็กตรอน	28
	3.1.3 การสร้างชิ้นส่วนของเลนส์ออฟเจ็กทีฟ	30
	3.2 การติดตั้งระบบเลนส์สำหรับปรับโฟกัสลำอิเล็กตรอน	32
	3.2.1 การประกอบเลนส์ออฟเจ็กทีฟ	33
	3.2.2 โครงสร้างของระบบเลนส์ที่ประกอบขึ้นเป็นเครื่องกำเนิดลำอิเล็กตรอน	33
	3.2.2.1 โครงสร้างของระบบผลิตลำอิเล็กตรอนเดิมที่ใช้เลนส์ชุดเดียว	34
	3.2.2.2 โครงสร้างของระบบผลิตลำอิเล็กตรอนที่ปรับสมรรถนะขึ้น	35
	3.3 การจัดอุปกรณ์ตรวจวัดคุณภาพของลำอิเล็กตรอน	36
	3.3.1 การเลือกชนิดของแผ่นบันทึกภาพ	36
	3.3.2 การเลือกอุปกรณ์ทดสอบคุณภาพของลำอิเล็กตรอน	37
4	การทดลองและผลการทดลอง	42
	4.1 การทดสอบความเข้มสนามแม่เหล็กของเลนส์	42
	4.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดสอบ	42
	4.1.2 การทดสอบและบันทึกผล	42
	4.2 การทดสอบระบบเลนส์อิเล็กตรอน	44
	4.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดสอบ	44
	4.2.2 การทดสอบการปรับโฟกัสปลายของลำอิเล็กตรอน	44
	4.3 การประเมินคุณภาพของลำอิเล็กตรอนด้วยวิธี edge spread	45
	4.3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดสอบ	45
	4.3.2 การทดลอง	45
	4.4 การทดสอบความคมชัดของภาพกับเวลาในการถ่าย	46
	4.4.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดสอบ	46
	4.4.2 การทดลองถ่ายภาพรังสีเอกซ์แบบไมโครโฟกัส	47

บทที่		หน้า
5	สรุปผลและเสนอแนะ	50
	5.1 สรุปผลการวิจัย	50
	5.2 ปัญหาและอุปสรรคในการดำเนินการ	51
	5.3 ข้อเสนอแนะ	51
รายการอ้างอิง		52
ภาคผนวก .		53
ภาคผนวก ก.		54
ภาคผนวก ข		61
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์		62

สารบัญภาพ

รูปที่		หน้า
2.1	แสดงภาคตัดขวางของเลนส์อิเล็กตรอนแบบแม่เหล็กไฟฟ้า	4
2.2	แสดงแนวเส้นแรงในสนามแม่เหล็กแกนสมมาตร	5
2.3	แสดงเส้นกราฟความเข้มของสนามแม่เหล็กของทั้ง 2 แนวแกน	6
2.4	แสดงวิถีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในการสร้างภาพด้วยเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า	7
2.5.	แสดงเส้นฉายของเลนส์อิเล็กตรอนตามวิถีการเคลื่อนที่	7
2.6	การเกิดมุม α_c ที่จุด 0 ที่ระนาบวัตถุ	8
2.7	เงื่อนไขในการจำกัดมุม α_c	10
2.8	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง α_c กับความเข้มของ condenser lens	10
2.9	แสดง double condenser	11
2.10	โครงสร้างของเลนส์คอนเด็นเซอร์แบบ 2 ชั้น	12
2.11	แสดงเลนส์ออฟเจ็กทีฟ	12
2.12	แสดงความคลาดเคลื่อนแบบ spherical	13
2.13	แสดงความคลาดเคลื่อนแบบ chromatic	14
2.14	แสดงความคลาดเคลื่อนแบบ diffraction	15
2.15	แสดงความคลาดเคลื่อนแบบ stigmatism	16
2.16	เลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าในอุดมคติ	17
2.17	ความสัมพันธ์ของ $1/f$ กับ ψl	18
2.18	แสดงความสัมพันธ์ของความยาวโฟกัสที่ต่ำที่สุด $\upsilon_{\min}$ กับ bore d_p โดยให้ s เป็นความยาวของ gap และ D เป็นค่าของจำนวนขดลวดกับกระแส	19
2.19	ความสัมพันธ์ของ NI และ $f_{\min}/s$	20
2.20	ความสัมพันธ์ของการกระจายตัวของสนามแม่เหล็ก half-value width 2a กับความยาวgap l	20
2.21	ความสัมพันธ์ของ $1/f$ กับ NI เมื่อ bore มีขนาดใหญ่	21
2.22	แสดงความสัมพันธ์ของความยาวโฟกัสกับจำนวนขดลวดและกระแสในเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า	21
2.23	แสดงตัวแปรที่เกี่ยวข้องในการพันขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า	22
2.24	โครงสร้างของแผ่นบันทึกภาพ	24
2.25	หลักในการอ่านภาพทางรังสีจากแผ่นบันทึกภาพ	24
2.26	กระบวนการบันทึก, อ่านค่าและลบภาพถ่ายทางรังสีโดยวิธีของแผ่นบันทึกภาพ	25

รูปที่ หน้า

2.27 กลไกการทำงานของลูมิเนสเซนต์ของแผ่นบันทึกภาพ..... 25
3.1 แผนภาพตัดขวางของเลนส์อิเล็กตรอนชนิดออฟเจ็กทีฟที่ออกแบบขึ้น..... 27
3.2 แผนภาพตัดขวางของท่อนำอิเล็กตรอน..... 28
3.3 แสดงขนาดของชุดขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า..... 28
3.4 แกนขดลวด..... 30
3.5 ขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า..... 30
3.6 ชิ้นส่วนฝาปิดแกนแม่เหล็กของเลนส์คอนเดนเซอร์..... 30
3.7 ชิ้นส่วนสำหรับเชื่อมโยงเลนส์เข้าด้วยกัน..... 31
3.8 แกนปิดวงจรแม่เหล็กของเลนส์ออฟเจ็กทีฟ..... 31
3.9 จานปิดวงจรแม่เหล็กของเลนส์ออฟเจ็กทีฟ..... 32
3.10 ส่วนประกอบที่ช่วยในการเชื่อมต่อระบบเลนส์..... 32
3.11 แสดงชิ้นส่วนถอดประกอบของเลนส์ออฟเจ็กทีฟ..... 33
3.12 ภาพแสดงเลนส์ออฟเจ็กทีฟที่ประกอบเสร็จสมบูรณ์..... 33
3.13 แสดงโครงสร้างของระบบผลิตลำอิเล็กตรอน..... 34
3.14 โครงสร้างเลนส์เดิมซึ่งเป็นเลนส์คอนเดนเซอร์..... 34
3.15 โครงสร้างผลิตลำอิเล็กตรอนที่พัฒนาขึ้นใหม่..... 35
3.16 โครงสร้างระบบเลนส์ใหม่..... 35
3.17 แสดงอุปกรณ์ในการทดสอบภาพถ่ายรังสีเอกซ์พลังงานต่ำ..... 37
3.18 เปรียบเทียบผลของภาพถ่ายรังสีเอกซ์พลังงานต่ำจากแผ่นบันทึกภาพ..... 37
3.19 อุปกรณ์ถ่ายภาพรังสีเอกซ์ที่มีผู้วิจัยพัฒนาไว้แล้ว..... 38
3.20 รูปแสดงการจัดอุปกรณ์ทดสอบคุณภาพลำอิเล็กตรอนด้วยการบันทึกภาพ
ปลายลำอิเล็กตรอน..... 39
3.21 เครื่องอ่านแผ่นบันทึกภาพรุ่น FLA-5100..... 39
3.22 ผลการอ่านภาพถ่ายปลายลำอิเล็กตรอนด้วยแผ่นบันทึกภาพ..... 40
3.23 ผลการอ่านภาพถ่ายรังสีเอกซ์ของขอบใบมีดโกน..... 41
3.24 ข้อมูลระยะห่าง d1 และ d2 ของอุปกรณ์ถ่ายภาพรังสี..... 41
4.1 แสดงอุปกรณ์ทดสอบความเข้มสนามแม่เหล็กของเลนส์..... 42
4.2 เส้นกราฟความสัมพันธ์ของกระแสและความเข้มสนามแม่เหล็กของเลนส์..... 43
4.3 แสดงการวัดกระแสที่ตัวอย่าง..... 44
4.4 ภาพเรืองแสงของปลายลำอิเล็กตรอนบนฉากเรืองแสง..... 45

รูปที่ หน้า

4.5 ภาพขอบใบมีดโกนที่ถ่ายด้วยเครื่องกำเนิดลำอิเล็กตรอนที่พัฒนาขึ้น 46
4.6 การเตรียมตัวอย่างถ่ายภาพรังสีเอกซ์แบบไมโครโฟกัส..... 47
4.7 ภาพถ่ายรังสีเอกซ์ของส่วนหางปลาหางนกยูงด้วยแผ่นบันทึกภาพ..... 47
4.8 ภาพถ่ายรังสีเอกซ์ของส่วนหางปลาหางนกยูงด้วยแผ่นบันทึกภาพที่หุ้มด้วย
ฟิล์มโพลีโพรไพลีนเคลือบอลูมิเนียม..... 48
4.9 ภาพถ่ายรังสีเอกซ์ของส่วนหางของปลาหางนกยูงด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน
แบบสแกนของ JEOL รุ่น JSM-5800LV..... 49