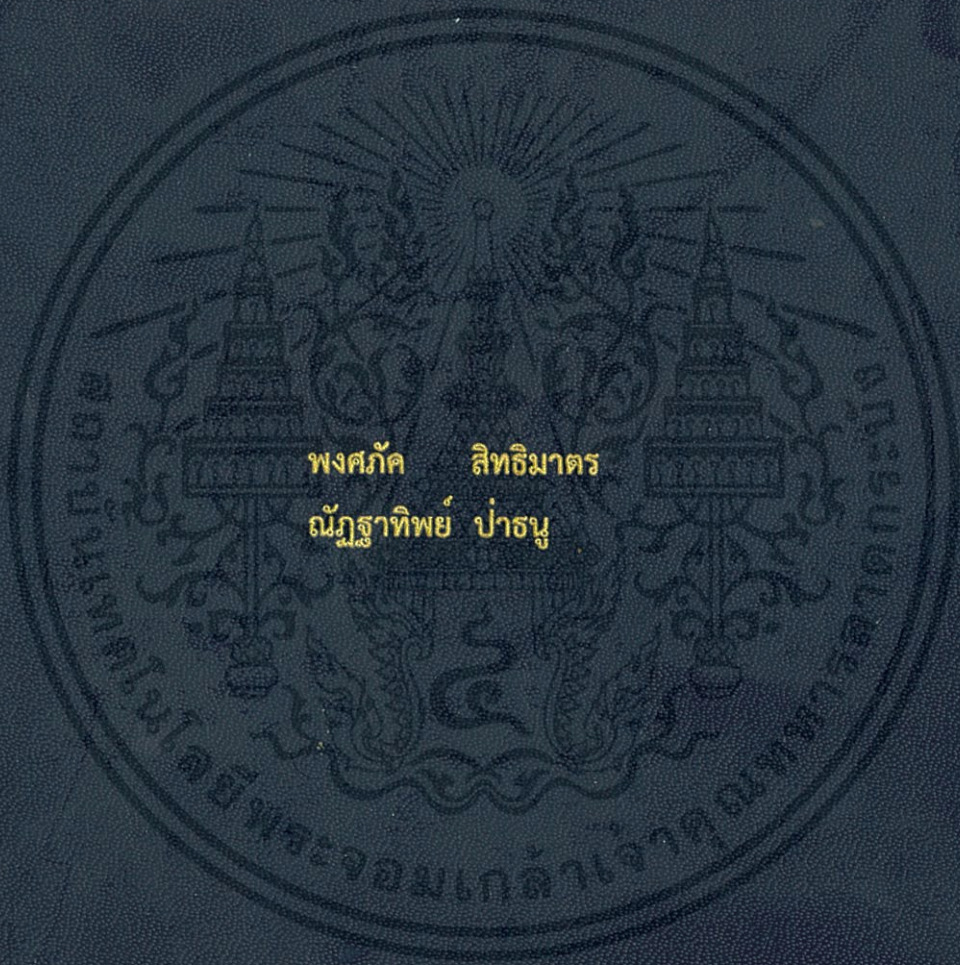


การออกแบบและสร้างหัวแมกนีตรอนสเป็คเตอรืงขนาดเล็กและ
ลักษณะเฉพาะของหัว

DESIGN AND CONSTRUCTION OF A COMPACT MAGNETRON
SPUTTERING SOURCE AND ITS CHARACTERISTICS



พงศภัค สิทธิมาตร
ณัฐฐาทิพย์ ป่ารณู

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ ภาควิชาฟิสิกส์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2557

การออกแบบและสร้างหัวแมกนีตรอนสปัตเตอร์ขนาดเล็กและ
ลักษณะเฉพาะของหัว

DESIGN AND CONSTRUCTION OF A COMPACT MAGNETRON
SPUTTERING SOURCE AND ITS CHARACTERISTICS



พงศภัค สิทธิมาตร
ณัฐฐาทิพย์ ป่าธนู

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ ภาควิชาฟิสิกส์

คณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่อนุญาตให้เผยแพร่ได้ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกรายที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2557

DESIGN AND CONSTRUCTION OF A COMPACT MAGNETRON
SPUTTERING SOURCE AND ITS CHARACTERISTICS



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE
IN APPLIED PHYSICS
DEPARTMENT OF PHYSICS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ FACULTY OF SCIENCE ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุผลเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2014

หัวข้อโครงการพิเศษ การออกแบบและสร้างหัวแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริงขนาดกะทัดรัดและ
ลักษณะเฉพาะของหัว
DESIGN AND CONSTRUCTION OF A COMPACT MAGNETRON
SPUTTERING SOURCE AND ITS CHARACTERISTICS

ชื่อนักศึกษา นายพงศภัค สิทธิมาตร รหัสนักศึกษา 54050558
นางสาวณัฐฐาทิพย์ ป่าธนู รหัสนักศึกษา 54050516
ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต ฟิสิกส์ประยุกต์
ภาควิชา ฟิสิกส์
ปีการศึกษา 2557
อาจารย์ที่ปรึกษา ดร. ณัฐพร พรหมรส
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผศ.ดร. บุญโชติ เผ่าสวัสดิ์ยรรยง

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ฟิสิกส์ประยุกต์
ประจำปีการศึกษา 2557

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ดร. ประธาน บุรณศิริ	
รศ. สาหรัย เล็กชะอุม	
ดร. วิฑูรย์ ยินดีสุข	
ดร. ณัฐพร พรหมรส	
ผศ.ดร. บุญโชติ เผ่าสวัสดิ์ยรรยง	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงการพิเศษ	การออกแบบและสร้างหัวแมกนีตรอนสปีดเตอร์ริงขนาดเล็กและลักษณะเฉพาะของหัว
ชื่อนักศึกษา	นายพงศภัค สิทธิมาตร รหัสนักศึกษา 54050558 นางสาวณัฐราทิพย์ ป่าธนู รหัสนักศึกษา 54050516
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต ฟิสิกส์ประยุกต์
ภาควิชา	ฟิสิกส์
ปีการศึกษา	2557
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.ณัฐพร พรหมรส
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผศ.ดร.บุญโชติ เผ่าสวัสดิ์รยรง

บทคัดย่อ

คณะผู้วิจัยได้ออกแบบสร้างหัวแมกนีตรอนขนาดเล็กที่มีต้นทุนในการสร้างต่ำโดยมีความเข้มของสนามแม่เหล็กบริเวณหน้าผิวเป้าสูง ซึ่งหัวทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 6 เซนติเมตร ถูกสร้างให้ใช้กับแม่เหล็กนีโอไดเมียมอัลลอยด์ตัวในรูปทรงกระบอก และแม่เหล็กตัวนอกมีรูปทรงวงแหวนตามโครงสร้างของหัวที่ถูกออกแบบ โดยมีแผ่นระบายความร้อนอยู่หลังเป้าสารเคลือบ และถูกแยกออกจากตัวแม่เหล็กตัวในและตัวนอก ในงานวิจัยนี้คณะผู้วิจัยได้เปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแม่เหล็กวงแหวนตัวนอกจากแม่เหล็กวงแหวนตัวนอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 29 มิลลิเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 39 มิลลิเมตร เป็นแม่เหล็กวงแหวนตัวนอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 30 มิลลิเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 50 มิลลิเมตร จากรูปแบบของ XRD ของฟิล์มบางทองแดงแสดงให้เห็นถึงการจัดเรียงของโครงสร้างผลึกในระนาบ (111) และ (200) จะถูกทำให้เพิ่มขึ้นเมื่อใช้แม่เหล็กวงแหวนตัวนอกขนาดใหญ่ จากผลของภาพถ่ายตัดขวางและพื้นผิวโดย SEM แสดงให้เห็นถึงขนาดความหนาของฟิล์มและขนาดเกรนของฟิล์มจะเพิ่มขึ้นเมื่อใช้แม่เหล็กวงแหวนตัวนอกขนาดใหญ่ และจากภาพถ่ายด้วย AFM แสดงให้เห็นถึงความขรุขระของพื้นผิวและขนาดเกรนจะเพิ่มขึ้นเมื่อใช้แม่เหล็กวงแหวนตัวนอกขนาดใหญ่ในการเคลือบฟิล์มบางทองแดง จากผลการทดลองทั้งหมดที่ได้รับมาอาจเป็นเพราะว่าเส้นทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนทุติยภูมิถูกทำให้เพิ่มขึ้นเมื่อใช้แม่เหล็กวงแหวนตัวนอกที่มีขนาดใหญ่ขึ้น

คำสำคัญ: หัวแมกนีตรอนสปีดเตอร์ริง, แม่เหล็กวงแหวนตัวนอก, ความเข้มของสนามแม่เหล็ก, ฟิล์มบางทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Design and Construction of a Compact Magnetron Sputtering Source and Its Characteristics
Students	Mr. Phongsaphak Sittimart student ID 54050558 Ms. Nattatip Patanoo student ID 54050516
Degree	Bachelor of Science in Applied Physics
Department	Physics
Academic Year	2557
Advisor	Dr. Nathaporn Promros
Co-advisor	Assist.Prof.Dr. Boonchoat Poasawatyanong

Abstract

We designed and constructed an affordable compact-size unbalanced magnetron sputtering source with high magnetic field density. A magnetron source with diameter of only 6-cm was constructed utilizing cylindrical neodymium-alloy magnet inner stud and outer magnet ring as main structure. The magnets were placed in isolation from a water-cooled stage behind the flat disk target material. In the present work, we changed the outer magnet ring with diameter of 29mm(I.D.)/39mm(O.D.) and 30mm(I.D.)/50mm(O.D.). The current of discharge obtained from a big magnet has value more than of a small magnet. From XRD patterns of the deposited copper thin films, the degree of (111) and (200) orientations were enhanced in case of a big magnet. The SEM results in cross-section and plane views showed that the grain size and film thickness were increased in the case of a big magnet. The AFM images show that the sizes of the grain and roughness surface were increased in case of a big magnet. These results should be because the path of secondary electron emitted from sputtering at the target was increased in case of a big magnet.

Keyword: Magnetron sputtering source, Outer magnet ring, Magnetic field strength, Copper films

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเล่มนี้สำเร็จสมบูรณ์ด้วยดีเนื่องจากผู้วิจัยได้รับอนุเคราะห์และความช่วยเหลืออย่างสูงจาก ดร.ณัฐพร พรหมรส ที่ให้ความรู้ทางด้านวิชาการตลอดจนปลูกฝังคุณธรรม จริยธรรมในการทำงาน อีกทั้งให้ข้อคิด คติ และเป้าหมายในอนาคตให้กับลูกศิษย์ ผู้วิจัยไม่สามารถจะค้นหาหรือใช้วิธีใดๆที่จะมาตอบแทนพระคุณที่ท่านได้ทำให้กับผู้วิจัย ขอให้ความดีที่ผู้วิจัยนำมาทั้งหมดตั้งแต่ชาติปางก่อนจนถึงปัจจุบันคุ้มครองอาจารย์ ให้อาจารย์มีสุขภาพร่างกาย มีผละกำลังที่จะทำงานและสั่งสอนลูกศิษย์ตราบนานเท่านาน ขอขอบคุณอีกครั้ง

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.บุญโชติ เผ่าสวัสดิ์ยรรยง รวมทั้ง ผศ.ดร.วรวรรณ พันธุนาวิ น อยู่อย่างสูงที่ให้ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม คอยกระตุ้น ในการทำงาน อีกทั้งยังคงคอยให้ความรู้ด้านวิชาการในเรื่องใหม่ๆกับลูกศิษย์ ทำให้โครงการพิเศษนี้มีความถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการคุมสอบโครงการพิเศษ รศ.สาหร่าย เล็กชะอุ่ม ดร.ประธาน บุรณศิริ และ ดร.วิฑูรย์ ยินดีสุข ที่สละเวลาอันมีค่าเข้ารับฟังการนำเสนองานวิจัย อีกทั้งยังให้คำปรึกษาและคำแนะนำในทุกๆเรื่องที่เกี่ยวข้องกับโครงการพิเศษเล่มนี้

ขอบคุณภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำหรับทุนการทำวิจัยในโครงการพิเศษนี้จนสำเร็จ และเป็นสถานที่ที่ให้ความรู้ ให้เพื่อนใหม่ ได้สังคมใหม่ๆ ได้เจออาจารย์ที่เปี่ยมไปด้วยความสามารถและความเมตตาและให้อาณาเขตสำหรับเด็กบ้านนอกทั้งสองคนนี้หากในหนึ่งชีวิตนี้ผู้วิจัยมีโอกาสกลับมาตอบแทนบุญคุณและสร้างประโยชน์ให้กับสถาบัน ผู้วิจัยก็พร้อมและเต็มใจที่จะทำอย่างสุดความสามารถที่มีเสมอ

ขอบคุณภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์ และหน่วยงาน AUN/SEED-Net JICA ที่ให้ความอนุเคราะห์ทุนงบประมาณในการทำวิจัยโครงการพิเศษนี้และห้องปฏิบัติการพลาสมาและวัสดุขั้นสูง ในการทำวิจัยจนเสร็จสมบูรณ์ ขอขอบคุณประการณ์ที่หาไม่ได้และความอนุเคราะห์จากห้องปฏิบัติการของศาสตราจารย์โยชิตาเกะ มหาวิทยาลัยคิอู ประเทศญี่ปุ่น สำหรับเครื่องวัด XRD AFM ที่ใช้ในการทดสอบฟิล์มในงานวิจัยครั้งนี้ ขอขอบพระคุณศาสตราจารย์โยชิ ศาสตราจารย์ฮงโจและศาสตราจารย์โยชิตาเกะ คุณฮานาตะ คุณทาकाฮาร่า และทุกๆคนที่ให้การต้อนรับและสอนการใช้งานอุปกรณ์ต่างๆให้กับผู้วิจัยเป็นอย่างดี

ขอบคุณโรงกลึงวิศวกรรมที่สร้างงานคุณภาพและทำให้โครงการพิเศษเล่มเสร็จสมบูรณ์ ด้วยงานที่มีคุณภาพ

คุณค่าและประโยชน์อันเกิดจากโครงการพิเศษนี้ คณะผู้วิจัยขอมอบบูชาพระคุณบิดา มารดา ตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่านที่มีส่วนร่วมในการช่วยเหลือ และขอน้อมบูชาท่านบูรพาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทความรู้ด้วยความรักและเมตตา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
คำย่อ/สัญลักษณ์	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินการ	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย	4
2.1 พลาสมาและการแตกตัวเป็นไอออนของก๊าซ (Plasma and Ionization)	4
2.2 กระบวนการสปัตเตอริง (Sputtering process)	5
2.2.1 สปัตเตอริงยิลด์ (Sputtering yields)	5
2.3 ดีซีไดโอดสปัตเตอริงและดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง (DC diode sputtering and DC magnetron sputtering)	6
2.4 องค์ประกอบที่สำคัญในการสร้างหัวแมกนีตรอนสปัตเตอริง	10
2.4.1 วัสดุที่ใช้สร้างหัวดีซีแมกนีตรอน	10
2.4.2 การระบายความร้อนที่เป้า	10
2.4.3 การควบคุมให้เกิดการสปัตเตอริงเฉพาะหน้าผิวเป้า	10
2.4.4 ประเภทของสนามแม่เหล็กบริเวณหน้าผิวเป้า	11
2.5 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบาง	13
2.5.1 โครงสร้างของทองแดง (Structure of Copper)	13
2.5.2 คุณสมบัติของทองแดง (Properties of Copper)	14
2.5.3 การใช้การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ศึกษาคุณสมบัติของโครงสร้างผลึก	14
2.5.4 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	15
2.5.5 หลักการของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเพื่อศึกษาพื้นผิวของฟิล์มบาง (Scanning Electron Microscope: SEM)	16
2.5.6 การศึกษาสภาพพื้นผิวของผลึกโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscopy: AFM)	16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และเผยแพร่โดยไม่หวังผลตอบแทนใด ๆ ภายใต้อิทธิพลของสัญญาอนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่หวังกำไร (Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike license) โดยขอสงวนสิทธิ์ในชื่อผู้เผยแพร่และขอสงวนสิทธิ์ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คนแปลกหน้าหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6 การเคลื่อนด้วยการระเหยสารโดยความร้อน (Thermal evaporation)	18
2.6.1 ความดันไอของธาตุ (Vapor pressure of the elements)	18
2.6.2 อัตราการระเหยสาร	18
บทที่ 3 การออกแบบหัวแมกนีตรอนขนาดเล็ก	20
3.1 การออกแบบหัวแมกนีตรอนสปัตเตอร์ขนาดเล็ก	20
3.1.1 เทปลอนแยกขั้วไฟฟ้าและซีลระบบสุญญากาศ	21
3.1.2 ตลับทองแดงใส่แม่เหล็กและแม่เหล็กที่ใช้	22
3.1.3 แผ่นระบายความร้อน	23
3.1.4 ตัวยึดเป้า	23
3.1.5 กราวด์ซีลด์	24
3.2 ระบบดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์	25
3.2.1 ระบบสุญญากาศ	26
3.2.2 ระบบการป้อนก๊าซและแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (DC power supply)	28
3.3 การอัดเป้าโดยเครื่องอัดไฮดรอลิค	29
3.4 การออกแบบสร้างภาชนะสุญญากาศสำหรับระบบดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ ในห้องปฏิบัติการทดลองขนาดเล็ก	32
3.4.1 ภาชนะสุญญากาศ	32
3.4.2 ฝาปิดภาชนะสุญญากาศ	33
3.4.3 หน้าแปลนอเนกประสงค์	33
3.4.4 หน้าแปลนปิดรูอเนกประสงค์	34
3.4.5 ชัตเตอร์ (Shutter)	35
3.4.6 จานรองแผ่นรองรับหรือชิ้นงานที่จะเคลือบ (Substrate holder)	39
3.5 การออกแบบสร้างระบบเทอร์มอลอีวาโพเรชัน (Thermal evaporation system)	42
3.5.1 เสาอีวาโพเรชัน	43
3.5.2 ตัวแยกขั้วด้านในและตัวแยกขั้วด้านนอก	44
3.5.3 ตัวล็อคโบ้ท	45
3.6 ขั้นตอนการเคลือบฟิล์มบางทองแดงด้วยวิธีการดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์	46
3.6.1 ขั้นตอนการทำความสะอาดของแผ่นรองรับ	46
3.6.2 ขั้นตอนการเคลือบฟิล์มบางทองแดง	46
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	50
4.1 หัวแมกนีตรอนที่ออกแบบสร้าง	50
4.2 ความเข้มของสนามแม่เหล็กบริเวณหน้าผิวเป้า	53

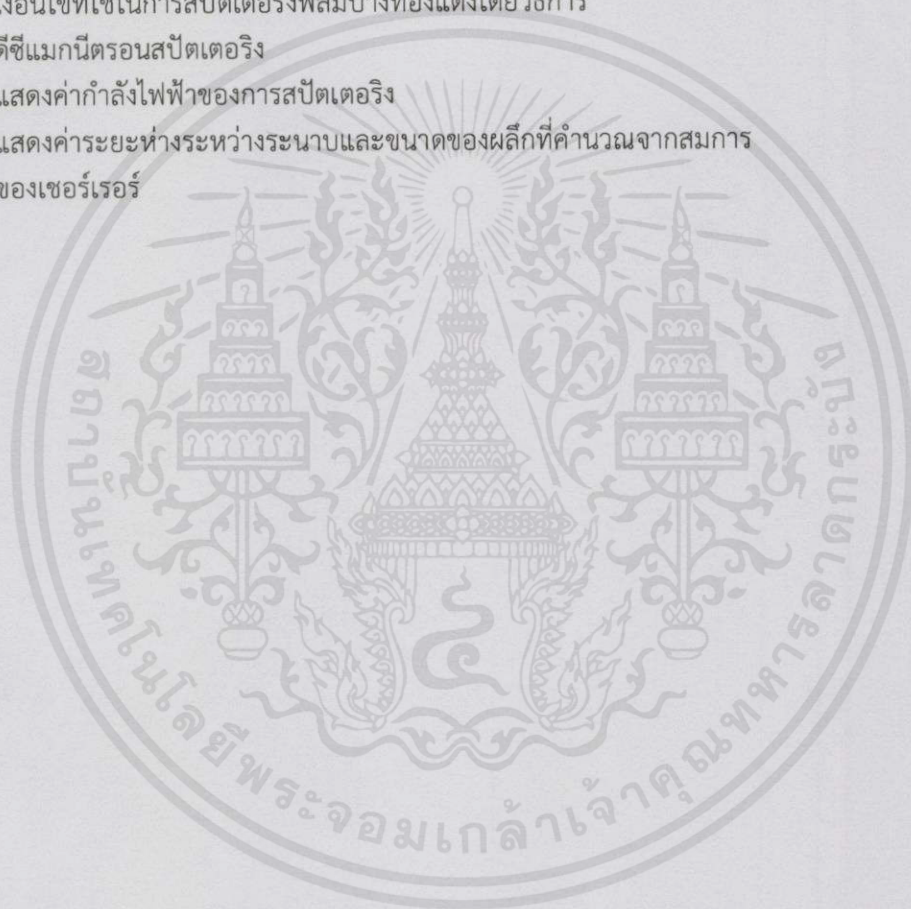
สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.1 แม่เหล็กตัวนอกและแม่เหล็กตัวใน	53
4.2.2 การตรวจสอบความเข้มของสนามแม่เหล็กบริเวณหน้าผิวเป้า	54
4.3 เงื่อนไขในการเคลือบฟิล์มบางทองแดง	58
4.4 ลักษณะเฉพาะของสนามแม่เหล็กที่บริเวณหน้าผิวเป้าที่มีผลต่อกระแสดีสชาร์จ	59
4.5 ผลการทดลองโดยการวิเคราะห์พลาสมาด้วยวิธี OES	61
4.6 ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	62
4.7 ผลการทดลองศึกษาโครงสร้างผลึกโดยการใช้องค์จูลทรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกราด	65
4.8 ผลการทดลองของการศึกษาความขรุขระของผลึกโดยกล้องจุลทรรศน์ แรงอะตอม	67
บทที่ 5 สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะเพิ่มเติม	70
5.1 สรุปผลงานวิจัย	70
5.2 ข้อเสนอแนะและงานที่จะทำในอนาคต	71
เอกสารอ้างอิง	72
ภาคผนวก	73
ภาคผนวก ก	74
ภาคผนวก ข	75
ภาคผนวก ค	76
ภาคผนวก ง	78
ภาคผนวก จ	79
ภาคผนวก ฉ	80
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน	2
2.1 แสดงค่ายิลด์ของธาตุชนิดต่างๆและค่าพลังงานขีดเริ่มที่ พลังงานไอออนอาร์กอนค่าต่างๆ	6
2.2 สมบัติพื้นฐานของโลหะทองแดง	14
4.1 แสดงค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กตัวนอก	54
4.2 เงื่อนไขที่ใช้ในการสปัตเตอริงฟิล์มบางทองแดงโดยวิธีการ ดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	59
4.3 แสดงค่ากำลังไฟฟ้าของการสปัตเตอริง	60
4.4 แสดงค่าระยะห่างระหว่างระนาบและขนาดของผลึกที่คำนวณจากสมการ ของเชอร์เรอร์	64



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงเหตุการณ์การเกิดการสปีดเตอริงบริเวณหน้าผิวเป่า	5
2.2 ระบบดีซีไดโอดสปีดเตอริงขณะทำการสปีดเตอริง	7
2.3 แสดงลักษณะของการเกิดแรงลอเรนซ์และการเคลื่อนที่แบบเกลียวกลมของอิเล็กตรอนทุติยภูมิภายใต้อิทธิพลของแรงลอเรนซ์	9
2.4 แสดงรูปแบบของเส้นแรงแม่เหล็กบริเวณและลักษณะพลาสมาบริเวณหน้าผิวเป่าของแมกนีตรอนแบบสมมาตรหรือแบบทั่วไป	11
2.5 แสดงรูปแบบของเส้นแรงแม่เหล็กบริเวณและลักษณะของพลาสมาหน้าผิวเป่าของแมกนีตรอนแบบไม่สมมาตรชนิดที่ 1	12
2.6 แสดงรูปแบบของเส้นแรงแม่เหล็กบริเวณและลักษณะของพลาสมาหน้าผิวเป่าของแมกนีตรอนแบบไม่สมมาตรชนิดที่ 2	13
2.7 โครงสร้างของทองแดงแบบเฟสเซนเตอร์คิวบิก	13
2.8 แสดงการจำลองการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เมื่อรังสีเอกซ์ถูกยิงไปยังระนาบของผลึกซึ่งจะเป็นไปตามกฎของแบรกก์	15
2.9 แสดงการจัดเรียงตัวของผลึกในระนาบ (100) ที่อยู่ในกล่องลูกบาศก์	15
2.10 ส่วนประกอบในเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	16
2.11 แสดงองค์ประกอบหลักของเครื่องกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม	17
2.12 แสดงภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมที่ใช้ในการตรวจสอบพื้นผิวของชิ้นงาน	17
2.13 กราฟแสดงค่าความดันไอของธาตุ โดยจุดต่างๆจะสัมพันธ์กับจุดหลอมเหลว	19
2.14 กราฟแสดงค่าความดันไอของธาตุในสารกึ่งตัวนำโดยจุดต่างๆจะสัมพันธ์กับจุดหลอมเหลว	19
2.15 รูประบบการเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีระเหยสารด้วยความร้อน	19
3.1 แสดงภาคตัดขวางของหัวแมกนีตรอนที่ออกแบบสร้าง	20
3.2 เทปลอนแยกชิ้นไฟฟ้าที่ออกแบบโดยโปรแกรม Solid work	21
3.3 ดับใส่แม่เหล็กที่ออกแบบโดยโปรแกรม Solid work	22
3.4 รูปจำลองภาพตัดขวางของดับใส่แม่เหล็กทองแดงที่ใส่แม่เหล็กตัวนอกต่างขนาดกัน	22
3.5 แผ่นระบายความร้อนที่ถูออกแบบโดยใช้โปรแกรม Solidworks	23
3.6 แบบตัวยึดเป่าที่ถูออกแบบโดยใช้โปรแกรม Solidworks	24
3.7 กราฟตัดขวางที่ออกแบบโดยใช้โปรแกรม Solidworks	24
3.8 แผนภาพส่วนประกอบที่สำคัญของระบบดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง	25
3.9 ภาพถ่ายของภาชนะสุญญากาศของระบบดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง	26
3.10 หน้าแปลนฝาปิดด้านบนของภาชนะสุญญากาศที่เจาะรูผ่านเพื่อเชื่อมต่อกับอุปกรณ์อื่นๆ	27
3.11 หน้าแปลนฝาปิดด้านล่างของภาชนะสุญญากาศที่เจาะรูผ่านเพื่อเชื่อมต่อกับอุปกรณ์อื่นๆ	27
3.12 ปีมกลโรตารี เบอร์ 8 two state ของบริษัท Edwards	28

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.13 ปีมัประไอ Model 203B No. 5298 ของบริษัท Edwards	28
3.14 แหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ยี่ห้อ Good will Model GPR-60H15	29
3.15 รูปแสดงการซังผงสารโดยเครื่องซังสารแบบทศนิยม 4 ตำแหน่ง	29
3.16 แสดงวิธีผสมผงสารกับกาลาเท็กซ์บนภาชนะใส่ผงสารที่เตรียมไว้	30
3.17 แสดงวิธีเทผงสารที่ผสมกับกาลาเท็กซ์ลงในบ้ำอัดสาร	30
3.18 แสดงตำแหน่งการวางบ้ำอัดสารบนแท่นอัดไฮโดรลิก	31
3.19 แสดงการใช้คานหยาบและละเอียดเพื่อออกแรงกดไปยังบ้ำอัดสาร	31
3.20 แสดงบ้ำ FeSi ₂ ที่ได้จากการอัด แต่ยังไม่ได้ผ่านการอบไล่ความชื้น	31
3.21 ภาชนะสุญญากาศที่ออกแบบโดยโปรแกรม SolidWorks	32
3.22 ฝาปิดภาชนะสุญญากาศด้านบนที่ออกแบบโดยโปรแกรม SolidWorks	33
3.23 ส่วนประกอบของหน้าแปลนอเนกประสงค์ที่ออกแบบโดยโปรแกรม SolidWorks	34
3.24 ส่วนประกอบของหน้าแปลนปิดรูอเนกประสงค์ที่ถูกออกแบบโดยโปรแกรม SolidWorks	35
3.25 ส่วนประกอบย่อยของชุดเตอร์ที่ออกแบบโดยโปรแกรม SolidWorks	36
3.26 เสาของชุดเตอร์ที่ถูกออกแบบโดยโปรแกรม SolidWorks	36
3.27 แผ่นชุดเตอร์ที่ถูกออกแบบโดยโปรแกรม SolidWorks	37
3.28 แบบแปลนคันโยกเปิด-ปิดชุดเตอร์โดยโปรแกรม SolidWorks	37
3.29 แบบตัวยึดชุดเตอร์กับฝาปิดภาชนะสุญญากาศที่ถูกออกแบบโดยโปรแกรม SolidWorks	38
3.30 น็อตล็อกตัวยึดชุดเตอร์ด้านบนที่ออกแบบโดยโปรแกรม SolidWorks	39
3.31 น็อตล็อกตัวยึดชุดเตอร์ด้านล่างที่ออกแบบโดยโปรแกรม SolidWorks	39
3.32 จานรองแผ่นรองรับที่ออกแบบโดยโปรแกรม SolidWorks	40
3.33 ฐานยึดเสาของจานรองแผ่นรองรับที่ออกแบบโดยโปรแกรม SolidWorks	40
3.34 เสาของฐานแผ่นรองรับที่ออกแบบโดยโปรแกรม SolidWorks	41
3.35 ตัวปรับระดับของแผ่นรองรับที่ออกแบบโดยโปรแกรม SolidWorks	41
3.36 จานใส่แผ่นรองรับที่ออกแบบโดยโปรแกรม SolidWorks	42
3.37 ระบบไฮบริดที่รวมทั้งระบบดีซีแมกนีตรอนสปัดเตอร์ริงและเทอร์มอลอีวาโพเรชันเข้าด้วยกันที่ถูกออกแบบโดยโปรแกรม SolidWorks	42
3.38 เทอร์มอลอีวาโพเรชันที่ออกแบบโดยโปรแกรม SolidWorks	43
3.39 เสาตัวจับโบ้ทที่ออกแบบโดยโปรแกรม SolidWorks	43
3.40 ตัวแยกขั้วด้านในที่ออกแบบโดยโปรแกรม SolidWorks	44
3.41 ตัวแยกขั้วด้านนอกที่ออกแบบโดยโปรแกรม SolidWorks	44
3.42 ตัวล็อกโบ้ทที่ออกแบบโดยโปรแกรม SolidWorks	45
3.43 แสดงภาพการติดตั้งหัวแมกนีตรอนสปัดเตอร์ริง	46

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.44 แสดงปุ่มเปิด-ปิดของอุปกรณ์ส่วนต่างๆของระบบดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอร์ริง	47
3.45 แสดงวาล์วต่างๆที่อยู่ในระบบดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอร์ริง	47
3.46 เครื่องอ่านความดันภายในภาชนะสุญญากาศแบบเข็ม	47
3.47 แสดงการปรับเปลี่ยนความดันของก๊าซและแรงดันไฟฟ้าให้เป็นไปตามเงื่อนไข	48
3.48 แสดงเป้าทองแดงที่กำลังถูกสปีดเตอร์ด้วยหัวแมกนีตรอนสปีดเตอร์ริงที่ถูกสร้างขึ้น	48
4.1 รูปถ่ายจริงหัวแมกนีตรอนที่ถูกสร้างขึ้นมา	50
4.2 แสดงภาพถ่ายส่วนประกอบย่อยของหัวแมกนีตรอนที่ถูกสร้างขึ้น	51
4.3 ตัวอย่างแม่เหล็กนีโอไดเมียม ไอรอน โบรอนที่ใช้กับหัวแมกนีตรอน	53
4.4 หัววัดความเข้มของสนามแม่เหล็ก Combi B Sensor S probe	54
4.5 แสดงตำแหน่งในแนวรัศมีในการวัดความเข้มของสนามแม่เหล็กบริเวณหน้าผิวเป้า	55
4.6 ความเข้มของสนามแม่เหล็กบริเวณหน้าผิวเป้าที่ตำแหน่งรัศมีต่างๆ	57
4.7 แผนภาพแสดงการใช้แม่เหล็กตัวนอก	59
4.8 แสดงถึงกระแสดีสชาร์จที่ได้จากการเปลี่ยนแม่เหล็กตัวนอก	60
4.9 แสดงความเข้มของพลาสมา	61
4.10 แสดงความเข้มของพลาสมาที่ความยาวคลื่นต่างๆที่ได้จากการเปลี่ยนแม่เหล็กตัวนอก	62
4.11 แสดงรูปถ่ายฟิล์มที่ได้รับจากการสปีดเตอร์ริง	62
4.12 แสดงการวัดผลด้วยเครื่อง Rigaku X-ray diffractometer ซึ่งทำร่วมกับ คุณทากาฮารุ นักศึกษาปริญญาโท มหาวิทยาลัยคิวชู ประเทศญี่ปุ่น	63
4.13 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางทองแดง	64
4.14 แสดงการวัดพื้นผิวของฟิล์มบางทองแดงโดยเครื่อง Hitachi S-4700 Scanning Electron Microscope	65
4.15 ภาพถ่ายโดยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดแสดงพื้นผิวของฟิล์มบางทองแดงและ ภาพตัดขวางของฟิล์มที่ได้จากการเคลือบโดยใช้เงื่อนไขที่ต่างกัน	66
4.16 แสดงการวัดความราบเรียบของพื้นผิวโดยเครื่อง Nano-RTM AFM atomic force microscopy ที่มหาวิทยาลัยคิวชู ประเทศญี่ปุ่น	67
4.17 แสดงภาพลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางทองแดงโดยวิธีการใช้กล้องจุลทรรศน์ แรงอะตอม	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ

E_k

E_i

SY

N_{atom}

N_{ion}

q

v

B

F_B

F_C

F_L

q_e

m

\bar{v}

\bar{E}

\bar{B}

L

V_c

$^{\circ}C$

n

λ

d_{hkl}

θ

V_v

ΔH_e

Φ_e

T_e

P_e

I.D.

O.D.

\emptyset

H

ความหมาย

พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอน

พลังงานการแตกตัวเป็นไอออนของอะตอม

สปีตเตอริงยิลด์

ปริมาณเฉลี่ยของอะตอมที่หลุดออกจากเป้าสาร

ปริมาณไอออนที่เคลื่อนที่ชน

ประจุไฟฟ้า

ความเร็ว

สนามไฟฟ้า

แรงสนามแม่เหล็ก

แรงสู่ศูนย์กลางของการเคลื่อนที่แบบวงกลม

แรงลอเรนซ์

ประจุของอิเล็กตรอน

มวลของอิเล็กตรอน

ความเร็วของอิเล็กตรอน

สนามไฟฟ้า

สนามแม่เหล็ก

ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด

ความต่างศักย์ที่จ่ายระหว่างขั้วอิเล็กโทรด

องศาเซลเซียส

ลำดับของการเลี้ยวเบน

ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์

ระยะห่างระหว่างระนาบ

มุมสะท้อนและมุมตกกระทบ

ปริมาตรของไอ

ความร้อนของสารในการระเหย

ฟลักซ์ของจำนวนอะตอม

อัตราการระเหยมวลสาร

ความดันสมดุล (Equilibrium pressure)

เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน

เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก

เส้นผ่านศูนย์กลาง

ความสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น กรุณาอย่านำเอกสารนี้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ในปัจจุบันวิธีการเคลือบฟิล์มในระบบสุญญากาศ อาทิเช่น การเคลือบด้วยวิธีการระเหยสาร (Evaporation) และการสปัตเตอร์ริง (Sputtering) เป็นที่นิยมกันอย่างมากทั้งในระดับงานวิจัยและในงานอุตสาหกรรมการสปัตเตอร์ริง เป็นวิธีการเคลือบฟิล์มบางในระบบสุญญากาศโดยอาศัยหลักการพื้นฐานของพลาสมา โดยได้มีการเริ่มต้นมาจากวิธีดีซีไดโอดสปัตเตอร์ริง (DC diode sputtering) และได้มีการนำวิธีการนี้มาใช้ในการเคลือบฟิล์มบางในยุคแรกๆ เนื่องจากเป็นวิธีการที่สามารถทำได้ง่าย อย่างไรก็ตามฟิล์มบางที่ได้จากการเคลือบโดยวิธีการนี้มีอัตราการเคลือบที่ต่ำ จึงมีการพัฒนาระบบนี้ไปเป็นระบบดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง (DC magnetron sputtering) ทั้งนี้สนามแม่เหล็กบริเวณหน้าผิวเป้าของระบบดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง จะทำหน้าที่กักอิเล็กตรอนไว้บริเวณหน้าผิวเป้าและเพิ่มเส้นทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน เป็นผลให้โอกาสในการชนระหว่างอิเล็กตรอนกับอะตอมของก๊าซให้มีการแตกตัวเป็นไอออนบวกและถูกเร่งให้ชนกับเป้าโดยสนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลทำให้อัตราการเคลือบฟิล์มบางมีค่าสูงขึ้น วิธีนี้จึงถูกนำมาใช้ในงานวิจัยและในงานอุตสาหกรรมการเคลือบเพื่อความสวยงาม การเคลือบเพื่อป้องกันการสึกกร่อน และการเคลือบเพื่อคุณสมบัติทางแสง โดยที่เงื่อนไขในการสปัตเตอร์ริงมีผลโดยตรงกับคุณสมบัติของฟิล์มเพื่อให้ได้ฟิล์มที่มีคุณสมบัติตามที่ต้องการ จึงเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งในการออกแบบสร้างหัวแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริงให้เหมาะสมกับเงื่อนไข นอกจากนี้เครื่องดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริงที่สร้างและนำเข้าจากต่างประเทศนั้นมีราคาที่สูงมาก ดังนั้นในงานวิจัยนี้คณะผู้วิจัยต้องการออกแบบและสร้างหัวแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริงจากวัสดุที่มีภายในประเทศและมีงบประมาณในการออกแบบสร้างต่ำกว่ากรณีที่นำเข้าจากต่างประเทศ อีกทั้งทางคณะผู้วิจัยต้องการที่จะพัฒนาหัวที่สร้างขึ้นให้มีประสิทธิภาพเทียบเท่าหรือใกล้เคียงกับกรณีนำเข้าจากต่างประเทศ โดยต้องการออกแบบสร้างหัวนี้ให้มีลักษณะเป็นทรงกระบอกขนาดเล็กประมาณ 60 มิลลิเมตร และใช้ในการสปัตเตอร์กับเป้าที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้วหนา 0.125 นิ้ว โดยหัวที่ถูกออกแบบนี้มีระบบระบายความร้อนด้วยน้ำซึ่งแยกออกจากตัวแม่เหล็กทำให้แม่เหล็กมีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น และหัวนี้ถูกออกแบบให้สามารถเปลี่ยนแปลงความเข้มของสนามแม่เหล็กบริเวณหน้าผิวเป้าโดยการเปลี่ยนขนาดของแม่เหล็กและระยะห่างจากแม่เหล็กถึงหน้าผิวเป้าได้ ทั้งนี้คณะผู้วิจัยมีความต้องการที่จะทดลองใช้หัวที่สร้างขึ้นในการเคลือบฟิล์มบางทองแดง เพื่อที่จะทดสอบการทำงานของหัวแมกนีตรอนที่ได้สร้างขึ้น และคณะผู้วิจัยมีความต้องการที่จะใช้หัวแมกนีตรอนที่สร้างขึ้นในการเคลือบฟิล์มบางของวัสดุใหม่ในระดับนาโน อาทิเช่น nanocrystalline (NC) iron disilicide (FeSi_2) และ dimond like carbon (DLC) เพื่อนำไปใช้ร่วมกับซิลิกอนในการสร้างโฟโตไดโอด (Photodiode) และโซลาร์เซลล์ (Solar cell)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ออกแบบสร้างหัวแม่กนีตรอนสปัตเตอร์ริงขนาดเล็กโดยการใช้วัสดุภายในประเทศและตรวจสอบลักษณะของความเข้มของสนามแม่เหล็กบริเวณหน้าผิวเป้า
2. เคลือบฟิล์มบางโดยการใช้หัวแม่กนีตรอนสปัตเตอร์ริงที่สร้างขึ้นและศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงความเข้มของสนามแม่เหล็กต่อการเคลือบฟิล์มบาง
3. ศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของฟิล์มบางที่ถูกเคลือบด้วยหัวแม่กนีตรอนสปัตเตอร์ริงที่สร้างขึ้น

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ใช้วัสดุสร้างหัวแม่กนีตรอนสปัตเตอร์ริงภายในประเทศ
2. ออกแบบสร้างหัวแม่กนีตรอนสปัตเตอร์ริงให้มีลักษณะเป็นทรงกระบอกขนาดเล็กที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 60 มิลลิเมตร และสูงประมาณ 44 มิลลิเมตร เพื่อใช้กับเป้าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้วและหนา 0.125 นิ้ว
3. ใช้แม่เหล็กชนิดนีโอไดเมียม ไอรอน โบรอน ในการสร้างสนามแม่เหล็กบริเวณหน้าผิวเป้า
4. ใช้หัวแม่กนีตรอนที่ออกแบบขึ้น เคลือบฟิล์มบางภายใต้ความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ต่างกัน
5. ตรวจสอบคุณสมบัติพื้นฐานและคุณภาพของฟิล์มบาง โดยวิธีการวัด XRD, SEM, และ AFM

1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินการ

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

การดำเนินงาน	ระยะเวลา												
	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	
ออกแบบสร้างหัวแม่กนีตรอน	←————→												
ตรวจสอบลักษณะเฉพาะของสนามแม่เหล็กบริเวณหน้าผิวเป้า			←————→										
เคลือบฟิล์มบางโดยเปลี่ยนค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก							←————→						
ตรวจสอบคุณสมบัติพื้นฐานของฟิล์มบาง										←————→			

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้รับทักษะและความรู้ในการเขียนและออกแบบโดยใช้โปรแกรม SolidWorks และวาดด้วยมือเพื่อออกแบบสร้างหัวแมกนีตรอนและชิ้นส่วนต่างๆ
2. ได้รับหัวแมกนีตรอนที่มีขนาดเล็กที่มีต้นทุนการสร้างต่ำกว่าหัวแมกนีตรอนที่นำเข้าจากต่างประเทศ ที่สามารถปรับเปลี่ยนความเข้มของสนามแม่เหล็กบริเวณหน้าผิวเข้าได้
3. ได้รับทักษะและความรู้เกี่ยวกับการเคลือบฟิล์มบางจากหัวแมกนีตรอนที่สร้างขึ้นร่วมกับระบบตีซีแมกนีตรอนสปีดเตอร์ริง
4. ได้รับความรู้และทักษะในการตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์มบางที่เคลือบจากหัวแมกนีตรอนที่สร้างขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

ฟิสิกส์พลาสมาเป็นหลักการพื้นฐานของการเคลือบฟิล์มบางโดยวิธีดีซีแมกนีตรอนสเปคโตริง เพื่อทำให้เกิดการสเปคโตริงของวัสดุ ดังนั้นสมบัติพื้นฐานของพลาสมา หลักการของการสเปคโตริง รวมถึงหลักการที่เกี่ยวข้องกับการสร้างหัวแมกนีตรอนสเปคโตริงจึงเป็นสิ่งสำคัญในการศึกษาและทำความเข้าใจ ซึ่งจะถูกอธิบายในส่วนที่มีความสอดคล้องกับงานวิจัยนี้โดยคณะผู้วิจัยเริ่มต้นอธิบายในส่วนแรกคือหลักการของพลาสมาและแมกนีตรอนสเปคโตริง ส่วนถัดไปคือหลักการและองค์ประกอบที่สำคัญของการสร้างหัวแมกนีตรอน ส่วนสุดท้ายคือหลักการต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์ม

2.1 พลาสมาและการแตกตัวเป็นไอออนของของก๊าซ (Plasma and Ionization)

พลาสมาถูกจัดเป็นสถานะที่ 4 ของสสาร และมีลักษณะเฉพาะที่แตกต่างจาก 3 สถานะอื่นๆ พลาสมาประกอบไปด้วย อนุภาคที่มีทั้งประจุบวกและประจุลบในสัดส่วนซึ่งเมื่อนำประจุทั้งหมดมารวมกันจะมีค่าเท่ากับศูนย์ การอยู่ร่วมกันของอนุภาค (The collection of particles) เหล่านี้จะเสมือนเป็นกลางทางไฟฟ้า ซึ่งหมายความว่า อิเล็กตรอนและประจุบวกในบริเวณนั้นๆมีจำนวนเท่าๆกัน และมีพฤติกรรมร่วมกัน (Collective behavior) พฤติกรรมร่วมกันนี้หมายถึง การเคลื่อนที่ของอนุภาคในพลาสมาไม่เพียงแต่จะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขในบริเวณนั้นๆ เท่านั้นแต่เป็นผลโดยรวมจากพลาสมาส่วนใหญ่มากกว่าจะเป็นผลมาจากการชนกันของอนุภาคที่อยู่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากอนุภาคในพลาสมาที่สภาวะสมดุล จะมีการสั่นด้วยความถี่ที่สูงกว่าความถี่ในการชนกันของอนุภาค 2 ตัวที่อยู่ใกล้กันดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าพฤติกรรมร่วมนี้เป็นพฤติกรรมที่กลุ่มพลาสมาแสดงออกมารวมกัน โดยที่ในจักรวาลส่วนใหญ่ประกอบไปด้วยสถานะที่เป็นพลาสมามากที่สุด [1]

อะตอมของก๊าซที่อยู่ในสภาวะที่เป็นกลางทางไฟฟ้าเมื่อถูกทำให้อะตอมแตกตัวเป็นไอออนจะก่อให้เกิดสถานะพลาสมาขึ้นเหตุการณ์ที่อะตอมของก๊าซถูกชนด้วยอนุภาคอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงและอิเล็กตรอนตัวที่มาชนมีพลังงานที่เพียงพอ จะทำให้อิเล็กตรอนของอะตอมของก๊าซหลุดออกมาซึ่งเรียกเหตุการณ์นี้ว่า การแตกตัวเป็นไอออนและพลังงานที่มีค่าน้อยที่สุดที่จะทำให้อิเล็กตรอนวงนอกสุดหลุดออกมาจากอะตอมของก๊าซได้ เรียกว่า พลังงานการแตกตัวเป็นไอออน (Ionization Energy) [2] โดยการแตกตัวเป็นไอออนเป็นกระบวนการสำคัญในการสร้างพลาสมาของระบบดีซีแมกนีตรอนสเปคโตริง ซึ่งอาจมองเช่นเดียวกันกับในกรณีของอะตอมโลหะที่ได้รับพลังงานแล้วทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาจากผิวของโลหะ เรียกว่า การปลดปล่อยอิเล็กตรอนซึ่งพลังงานที่มีค่าน้อยที่สุดที่ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาได้ คือ ค่าฟังก์ชันงาน (Work function) [3]

เหตุการณ์ที่อะตอมใดๆถูกชนด้วยอะตอมที่เป็นกลาง ไอออนหรืออิเล็กตรอนจะเกิดการแลกเปลี่ยนของพลังงานระหว่างกัน ถ้าอนุภาคที่เคลื่อนที่เข้าชนอะตอมคืออิเล็กตรอน และทำให้อะตอมที่ถูกชนเกิดการแตกตัวเป็นไอออน เรียกเหตุการณ์นี้ว่า การแตกตัวเป็นไอออนเนื่องจากการชนด้วยอิเล็กตรอน (Electron Impact Ionization) โดยที่อิเล็กตรอนจะต้องมีพลังงานจลน์มากกว่า หรือเท่ากับพลังงานการแตกตัวเป็นไอออนของอะตอม [4] ดังสมการที่ 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่ควรนำข้อมูลไปใช้

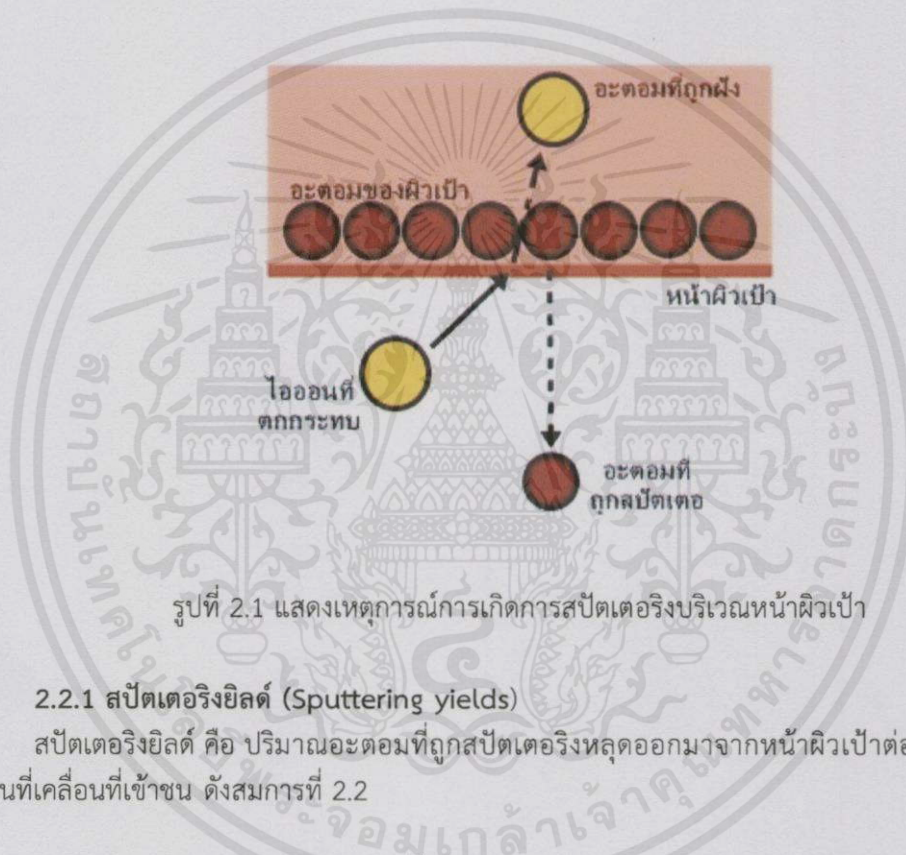
$$E_k \geq E_i$$

2.1

เมื่อ E_k เป็นพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนและ E_i เป็นพลังงานการแตกตัวเป็นไอออนของอะตอม

2.2 กระบวนการสปัตเตอริง (Sputtering process)

สปัตเตอริงเป็นเหตุการณ์ที่อะตอมบริเวณหน้าผิวเป้าถูกทำให้หลุดออกมาพร้อมกับมีการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) ออกมา [5] เป็นผลมาจากการถูกชนโดยอนุภาคที่มีพลังงานสูงที่ถูกเร่งโดยสนามไฟฟ้าให้เคลื่อนที่เข้าชนเป้าซึ่งแสดงในรูปที่ 2.1



2.2.1 สปัตเตอริงยิลด์ (Sputtering yields)

สปัตเตอริงยิลด์ คือ ปริมาณอะตอมที่ถูกสปัตเตอริงหลุดออกมาจากหน้าผิวเป้าต่อปริมาณไอออนที่เคลื่อนที่เข้าชน ดังสมการที่ 2.2

$$SY = \frac{N_{\text{atom}}}{N_{\text{ion}}}$$

2.2

เมื่อ SY เป็นสปัตเตอริงยิลด์ N_{atom} เป็นปริมาณเฉลี่ยของอะตอมที่หลุดออกจากเป้าสารและ N_{ion} เป็นปริมาณไอออนที่เคลื่อนที่ชน การสปัตเตอริงแสดงถึงลักษณะเฉพาะโดยพลังงานขีดเริ่ม (Threshold energy) ซึ่งขึ้นอยู่กับไอออนที่เคลื่อนที่เข้าชนและอะตอมที่ผิวเป้า จากตารางที่ 2.1 แสดงให้เห็นถึงค่าพลังงานขีดเริ่มของธาตุชนิดต่างๆ และค่ายิลด์ของการสปัตเตอริงของธาตุชนิดต่างๆ ที่ถูกระดมยิงด้วยไอออนของอาร์กอนที่มีพลังงานแตกต่างกัน โดยขีดเริ่มของการสปัตเตอริง (Sputtering threshold) จะอยู่ในช่วง 10-30 อิเล็กตรอนโวลต์ และเมื่อพลังงานไอออนของอาร์กอนสูงกว่าพลังงานขีดเริ่ม ยิลด์ของการสปัตเตอริงจะเพิ่มขึ้นตามพลังงานของไอออนของอาร์กอน

ตารางที่ 2.1 แสดงค่ายึดของธาตุชนิดต่างๆและค่าพลังงานขีดเริ่มที่พลังงานไอออนอาร์กอนค่าต่างๆ
[3]

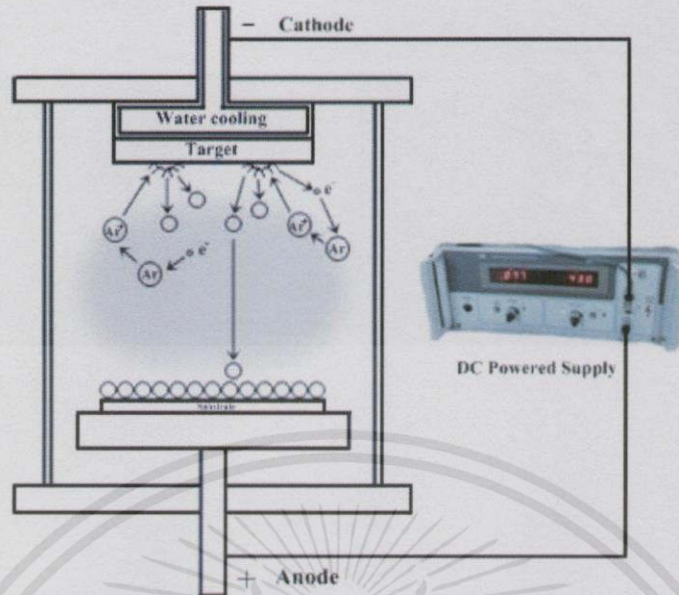
ธาตุ	พลังงานขีดเริ่ม (eV)	พลังงาน Ar^+ (eV)		
		100	300	600
Ag	15	0.63	2.20	3.40
Al	13	0.11	0.65	1.24
Au	20	0.32	1.65	2.43
Cr	22	0.30	0.87	1.30
Cu	17	0.48	1.59	2.30
Fe	20	0.20	0.76	1.26
Ge	25	0.22	0.74	1.22
Nb	25	0.06	0.40	0.65
Ni	21	0.28	0.95	1.52
Pd	20	0.42	1.41	2.39
Pt	25	0.20	0.95	1.56

2.3 ดีซีไดโอดสปัตเตอริงและดีซีแมกเนตรอนสปัตเตอริง

(DC diode sputtering and DC magnetron sputtering)

ระบบดีซีไดโอดสปัตเตอริงอย่างง่ายจะประกอบไปด้วยขั้วคาโทดและขั้วแอโนด ทั้งสองขั้วไฟฟ้าจะถูกติดตั้งไว้ภายในภาชนะสุญญากาศ โดยวัสดุที่ใช้เป็นเป้าในการสปัตเตอริงจะถูกยึดติดที่ด้านหน้าของขั้วคาโทดและแผ่นรองรับที่ต้องการเคลือบจะถูกยึดติดไว้ที่ขั้วแอโนด โดยภายในภาชนะสุญญากาศจะถูกทำให้มีความดันที่เหมาะสมและเต็มไปด้วยก๊าซงานที่จะใช้ในการสปัตเตอริง โดยเมื่อทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าไปยังสองขั้วไฟฟ้า จะก่อให้เกิดความต่างศักย์ตกคร่อมขั้วไฟฟ้า เป็นผลทำให้เกิดสนามไฟฟ้าซึ่งสนามไฟฟ้านี้จะไปเร่งอิเล็กตรอนให้เคลื่อนที่ไปชนอะตอมของก๊าซที่ใช้ในการสปัตเตอริงและเกิดการแตกตัวเป็นไอออน โดยที่ไอออนบวกของก๊าซที่ได้จากการแตกตัวเป็นไอออนจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าให้เคลื่อนที่ไปยังขั้วคาโทดแล้วพุ่งชนอะตอมที่หน้าผิวเป้าให้หลุดออกมาและเคลือบเป็นฟิล์มบางที่แผ่นรองรับที่เราต้องการเคลือบ พร้อมกับมีการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิออกมาด้วย โดยที่การเปล่งแสงดิสชาร์จจะยังคงอยู่ได้อย่างต่อเนื่องก็ด้วยอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้เนื่องจากอิเล็กตรอนจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่เข้าสู่บริเวณที่เกิดพลาสมาและทำให้เกิดการชนกับอะตอมของก๊าซที่ใช้ในการสปัตเตอริง และเกิดการแตกตัวเป็นไอออนบวกเพิ่มขึ้นมา ก่อนที่อิเล็กตรอนเหล่านี้จะเคลื่อนที่ไปอยู่ที่ขั้วแอโนด [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 ระบบดีซีไดโอดสเปตเตอริงขณะทำการสเปตเตอริง

วิธีดีซีสเปตเตอริงเป็นวิธีที่ทำให้เกิดพลาสมาจากหลักการที่ได้กล่าวมาแล้ว และจากการที่มีการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิในขณะที่อะตอมของเป้าหลุดออกมาเนื่องจากถูกชนด้วยไอออนบวก ดังนั้นถ้าหากสามารถที่จะกักเก็บอิเล็กตรอนไว้ที่หน้าผิวเป้า และเพิ่มระยะทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนให้มากขึ้นซึ่งจะส่งผลให้ออกาสในการชนกันระหว่างอิเล็กตรอนกับอะตอมของก๊าซที่ใช้ในการสเปตเตอริงเพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของโอกาสในการชนจะส่งผลโดยตรงต่อการเพิ่มขึ้นของการแตกตัวเป็นไอออนบวกและถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าให้เคลื่อนที่เข้าชนเป้าหมายมากขึ้น ซึ่งจะเป็นผลให้อัตราของการสเปตเตอริงมากขึ้นตามไปด้วย ทั้งนี้การกักเก็บอิเล็กตรอนและการเพิ่มระยะทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนให้เพิ่มขึ้นนั้นสามารถทำได้โดยการใส่สนามแม่เหล็กในทิศทางที่เหมาะสมให้กับระบบดีซีสเปตเตอริง และเมื่ออนุภาคที่มีประจุไฟฟ้า q เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว v ในทิศทางตั้งฉากกับสนามไฟฟ้า B จะเกิดแรงกระทำกับอนุภาคนั้น [4] ซึ่งมีค่าเป็นไปตามสมการที่ 2.3

$$F_B = qv \times B \sin \theta = qvB \quad 2.3$$

เมื่ออนุภาคที่มีประจุมวล m เคลื่อนที่ผ่านสนามแม่เหล็กในทิศทางที่ตั้งฉากกันก็จะได้รับอิทธิพลของแรงสนามแม่เหล็ก (F_B) ซึ่งจะส่งผลให้อนุภาคนั้นเคลื่อนที่เป็นวงกลม เมื่อวัตถุหรืออนุภาคใดๆมีการเคลื่อนที่แบบวงกลมจะทำให้เกิดแรงสู่จุดศูนย์กลาง ซึ่งมีค่าเป็นไปตามสมการที่ 2.4

$$F_c = \frac{mv^2 \sin \theta}{r} = \frac{mv^2}{r} \quad 2.4$$

เมื่อแรงสนามแม่เหล็กทำให้อนุภาคเคลื่อนที่เป็นวงกลมจะได้ว่า ไม่อนุภาคให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F_B = F_c$$

2.5

เมื่อ F_B เป็นแรงเนื่องจากสนามแม่เหล็กและ F_C เป็นแรงสู่ศูนย์กลางของการเคลื่อนที่แบบวงกลมตั้งสมการที่ 2.6

$$qvB = \frac{mv^2}{r} \quad 2.6$$

เมื่อทำการย้ายข้างสมการที่ 2.6 จะได้สมการที่มีค่ารัศมีของการเคลื่อนที่ของอนุภาคเป็น

$$r = \frac{mv}{qB} \quad 2.7$$

ซึ่งเรียกรัศมีนี้ว่า รัศมีลาร์มอร์ (Larmor's radius) โดยที่ในเรื่องการสปีดเตอริงอนุภาคอิเล็กตรอนจะได้รับผลกระทบจากแรงเนื่องจากสนามแม่เหล็กนี้ในทางกลับกันไอออนซึ่งมีมวลมากจะได้รับอิทธิพลจากแรงนี้น้อยมาก ดังนั้นเราจึงไม่คิดปัจจัยที่เกิดจากไอออนที่มีมวลมากและจากความเร็วเชิงเส้นเมื่อเทียบกับความเร็วเชิงมุมของการเคลื่อนที่เราก็จะทราบถึงความเร็วเชิงมุมของการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนเมื่อ $v = \omega r$ จะได้ว่า

$$\omega = \frac{qB}{m} \quad 2.8$$

และหากพิจารณาอิเล็กตรอนทุดียูมิที่ได้จากอะตอมของเป้าที่หลุดออกมาเนื่องจากถูกชนด้วยไอออนพลังงานสูง ซึ่งจะเคลื่อนที่ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศทางตั้งฉากกัน ซึ่งจะเกิดแรงทางไฟฟ้าที่กระทำต่ออิเล็กตรอนทุดียูมินี้โดยที่ผลรวมของแรงจากสนามไฟฟ้ากับแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีอิทธิพลต่ออนุภาคที่มีประจุคือ แรงลอเรนซ์ ซึ่งมีค่าเป็นไปตามสมการดังนี้

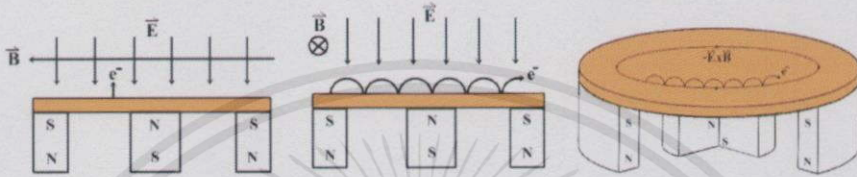
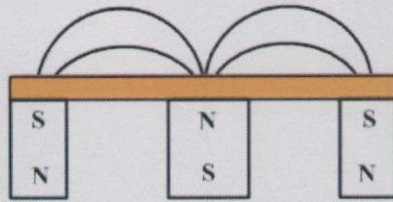
$$F_L = F_E + F_B = q_e (\vec{v} \times \vec{B} + E\vec{e}) \quad 2.9$$

โดยที่ F_L เป็นแรงลอเรนซ์ q_e เป็นประจุของอิเล็กตรอน m เป็นมวลของอิเล็กตรอน \vec{v} เป็นความเร็วของอิเล็กตรอน E เป็นสนามไฟฟ้า \vec{B} เป็นสนามแม่เหล็ก และเนื่องจากอิทธิพลของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศทางตั้งฉากกันจะทำให้อิเล็กตรอนถูกกักไว้ที่หน้าผิวเป้าและมีการเคลื่อนที่เป็นรูปเกลียววงกลมด้วยความเร็วเชิงมุม $\omega = \frac{qB}{m}$ ไปในเส้นทางของสนามไฟฟ้า

และสนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศทางตั้งฉากกัน ซึ่งจุดศูนย์กลางของการเคลื่อนที่วงกลมแบบเลื่อนลอยในทิศทางของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศทางตั้งฉากกัน ซึ่งแสดงในรูป 2.3 [6] การเคลื่อนที่ในรูปแบบนี้ของอิเล็กตรอนจะเพิ่มโอกาสในการชนกันระหว่างอะตอมของก๊าซกับอิเล็กตรอนซึ่งจะทำให้เกิดกระบวนการแตกตัวเป็นไอออนบวกสูงชันที่หน้าผิวเป้าเป็นผลให้ปริมาณไอออนบวกที่ถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าให้ไปชนเป้ามียุติปริมาณมากขึ้นซึ่งจะเป็นผลโดยตรงที่ทำให้อัตราการสปีดเตอริงมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีดีซีไดโอดสปีดเตอริง เป็นเหตุผลให้วิธีดีซีแมกนี

ตรอนสปีดเตอริงถูกใช้ในการเคลื่อนที่ล้มบางกันอย่างแพร่หลายทั้งในงานวิจัยและในงานอุตสาหกรรม

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะของการเกิดแรงลอเรนซ์และการเคลื่อนที่แบบเกลียวกลมของอิเล็กตรอนทุติยภูมิภายใต้อิทธิพลของแรงลอเรนซ์

จากความเร็วที่เกิดขึ้นโดยการเร่งจากสนามไฟฟ้าที่สม่ำเสมอที่เกิดจากการจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้เกิดความต่างศักย์ตกคร่อมขั้วอิเล็กโทรด [7] จะได้ว่า

$$E_k = E_{ef} \tag{2.10}$$

$$\frac{1}{2}mv^2 = qV \tag{2.11}$$

ซึ่งเมื่อย้ายข้างสมการใหม่จะได้ว่า

$$v = \sqrt{\frac{2qV}{m}} \tag{2.12}$$

เมื่อเราแทนค่า $r = \frac{mv}{qB}$ ลงในสมการที่ 2.12 เพื่อหาค่ารัศมีการเคลื่อนที่แบบเกลียว แล้วแทน

ค่าคงที่มวล m ของอิเล็กตรอน และค่าคงที่ประจุ q ของอิเล็กตรอนลงในสมการที่ 2.12 แล้วจัดรูปสมการใหม่จะได้ค่ารัศมีการเคลื่อนที่แบบวงกลมเกลียวภายใต้อิทธิพลของแรงลอเรนซ์ของอิเล็กตรอนดังนี้

$$r = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2mV}{q}} = 0.33 \times 10^{-5} \frac{\sqrt{V}}{B} \tag{2.13}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารโดยที่ผลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อการดิสชาร์จ จะสามารถพิจารณาได้จากสนามแม่เหล็กการคายยับยั้ง (Cut-off magnetic field: B_{cb}) สนามแม่เหล็กจะมีผลต่อการดิสชาร์จก็ต่อเมื่อความเข้มของสนามแม่เหล็กบริเวณหน้าผิวเป้าหมายมีค่ามากกว่าสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งยับยั้ง [6] ซึ่งมีค่าเป็นไปตาม

สมการที่ 2.14 ซึ่งสมการนี้ใช้กับขั้วอิเล็กโทรดแบบแผ่นราบ โดยที่ L เป็นระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดและ V_c เป็นความต่างศักย์ที่จ่ายระหว่างขั้วอิเล็กโทรด

$$B_{CB} = \frac{1}{L} \sqrt{\frac{2mV_c}{e}} \quad 2.14$$

2.4 องค์ประกอบที่สำคัญในการสร้างหัวดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง

องค์ประกอบที่สำคัญของการออกแบบสร้างหัวดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริงนั้นมีความสำคัญอย่างมากในการศึกษาก่อนที่จะทำการออกแบบสร้างหัวดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริงให้มีคุณสมบัติตามที่ต้องการ ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงได้มีการรวบรวมเนื้อหาและองค์ประกอบที่สำคัญในการสร้างหัวแมกนีตรอนสปีดเตอริงไว้ดังต่อไปนี้

2.4.1 วัสดุที่ใช้สร้างหัวดีซีแมกนีตรอน [9]

วัสดุที่ใช้ในการสร้างหัวดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริงควรเลือกใช้วัสดุที่มีคุณสมบัติดังนี้

1. เป็นวัสดุที่มีการนำไฟฟ้าและการนำความร้อนที่ดี
2. เป็นวัสดุที่มีการยึดเกาะของก๊าซต่ำ สามารถไล่ก๊าซบนผิววัสดุภายในระบบสุญญากาศได้โดยง่าย และเป็นวัสดุที่มีความทนทานต่อการกัดกร่อนที่เกิดจากสารเคมี
3. เป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงทนทานเหมาะสมกับการสร้างชิ้นงานขนาดเล็ก สามารถขึ้นรูปได้ตามลักษณะที่ต้องการและเชื่อมประกอบได้โดยไม่เกิดการร้าวซึม
4. เป็นวัสดุที่ไม่มีอิทธิพลต่อการกักกันสนามแม่เหล็กบริเวณหน้าผิวเข้าให้มีค่าน้อยลงและมีคุณสมบัติไม่เป็นสารแม่เหล็ก

2.4.2 การระบายความร้อนที่เป้า [4]

กระบวนการสปีดเตอริงนั้นใช้พลังงานไฟฟ้าที่สูงมากในการดำเนินการระบบ ซึ่งพลังงานส่วนใหญ่จะเปลี่ยนแปลงไปเป็นพลังงานความร้อนที่เป้าและแผ่ออกไปรอบๆบริเวณของหัวแมกนีตรอน หากความร้อนที่เกิดขึ้นที่บริเวณเป้าในขณะที่ทำการสปีดเตอริงมีค่าสูงกว่าค่าปกติ อาจจะทำให้เกิดความเสียหายให้เป้าและส่วนประกอบต่างๆของหัวแมกนีตรอน ดังนั้นระบบระบายความร้อนของเป้าและหัวแมกนีตรอนจึงมีความสำคัญและจำเป็นอย่างมาก เพื่อหลีกเลี่ยงความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นโดยสารที่ทำหน้าที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อนส่วนใหญ่นิยมใช้น้ำหรือของเหลวชนิดอื่นๆตามความเหมาะสม

2.4.3 การควบคุมให้เกิดการสปีดเตอริงเฉพาะหน้าผิวเป้า [4]

การควบคุมให้เกิดการสปีดเตอริงเฉพาะหน้าผิวเป้าทำได้โดยอาศัยกราวด์ชิลด์ ซึ่งจะทำให้เกิดบริเวณมืด (Dark space shield) ล้อมรอบหน้าผิวเป้า เป็นผลทำให้การสปีดเตอริงเกิดที่หน้าผิวเป้าเท่านั้น ซึ่งหากไม่มีบริเวณมืดนี้แผ่นหลังของเป้าและตัวยึดเป้าอาจจะถูกสปีดเตอริงออกมาด้วย และก่อให้เกิดความไม่บริสุทธิ์ของฟิล์มที่เคลือบและเกิดความเสียหายต่อหัวแมกนีตรอน การถูกระดมยิงของอนุภาคที่มีพลังงานสามารถป้องกันได้โดยการทำให้ระยะห่างระหว่างเป้ากับกราวด์ชิลด์ต้องมีค่าน้อยกว่าความหนาของบริเวณมืด (Dark space thickness) เพื่อป้องกันการเกิดการเปล่งแสงดิซซาร์จในพื้นที่ว่างนี้ ในบางครั้งพบว่าบริเวณที่เป็นเหลี่ยมคมและสิ่งสกปรกชิ้นเล็กๆจะทำให้เกิดการดิซซาร์จเฉพาะที่หรือการอาร์ค โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับการดิซซาร์จด้วยไฟฟ้ากระแสตรงดังนั้นเหลี่ยมที่คมหรือสิ่งสกปรกเล็กๆต้องกำจัดออกไปเสียก่อน อีกทั้งความหนาของบริเวณมืดจะมีค่าลดลงตาม

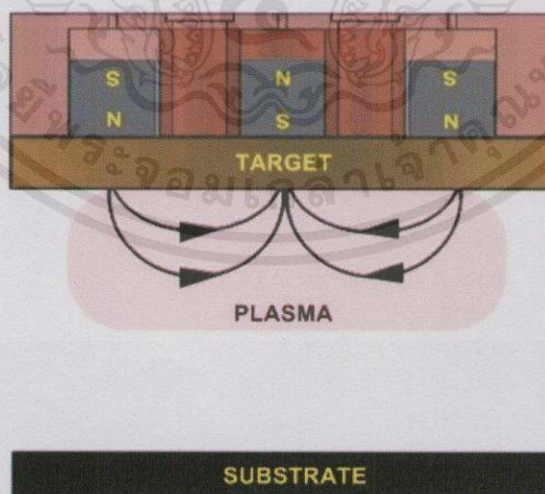
ความดันที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นระยะห่างระหว่างเป้าและกรวดซีลด์ควรจะมีค่าอยู่ในขีดจำกัดของความดันสูงสุดของระบบ

2.4.4 ประเภทของสนามแม่เหล็กบริเวณหน้าผิวเป้า [10,11]

ลักษณะเฉพาะของพลาสมาและอัตราการเคลือบของฟิล์ม รวมทั้งคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางที่ได้จากวิธีการดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงจะได้รับอิทธิพลจากสนามแม่เหล็กในระบบดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงอย่างมาก หรืออาจบอกได้ว่าตัวแปรค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กบริเวณหน้าผิวเป้านั้นเป็นอีกหนึ่งตัวแปรที่สามารถกำหนดลักษณะเฉพาะของพลาสมาหรือคุณสมบัติของฟิล์มที่เคลือบได้ โดยที่ลักษณะเฉพาะของสนามแม่เหล็กบริเวณหน้าผิวเป้าสามารถแบ่งออกได้ 3 ประเภทดังนี้

2.4.4.1. แมกนีตรอนแบบสมมาตรหรือแมกนีตรอนทั่วไป (Conventional magnetron)

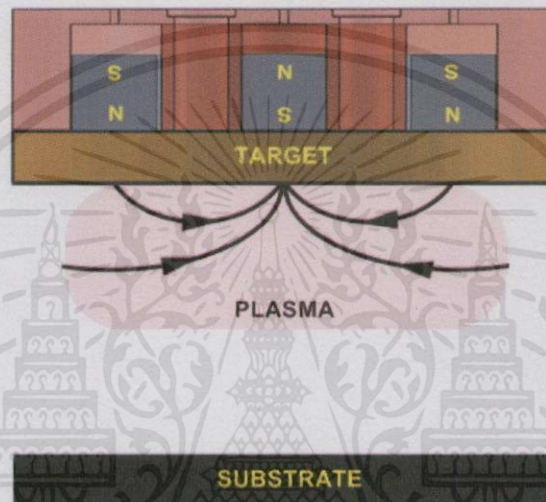
โดยที่จะมีความเข้มของแม่เหล็กตรงกลางเท่ากับแม่เหล็กด้านนอก โดยอิเล็กตรอนจะถูกกักไว้ที่บริเวณหน้าผิวเป้าโดยสนามแม่เหล็กที่ใส่เข้าไป และเคลื่อนที่เป็นเกลียวกลมในเส้นทางเลือนลอยของสนามไฟฟ้าด้วยแรงลอเรนซ์ เป็นผลให้โอกาสในการชนกับอะตอมที่เป็นกลางและเกิดกระบวนการแตกตัวเป็นไอออนบวกสูงขึ้น และจะถูกเร่งโดยสนามไฟฟ้าไปยังเป้าที่ยึดติดไว้ที่ขั้วคาโทด แล้วเคลื่อนที่เข้าชนกับอะตอมที่หน้าผิวเป้าทำให้เกิดการสปัตเตอริงของเป้าพร้อมทั้งมีการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิออกมาด้วย ซึ่งอิเล็กตรอนทุติยภูมิเหล่านี้จะถูกเร่งกลับเข้าไปยังบริเวณที่มีการดิสชาร์จ และอิเล็กตรอนส่วนใหญ่จะถูกกักไว้ภายใต้อิทธิพลของแรงลอเรนซ์ซึ่งเป็นผลให้เกิดการแตกตัวอะตอมของก๊าซในปริมาณสูงขึ้นก่อนที่หายไป ด้วยเหตุผลนี้จะทำให้พลาสมาที่บริเวณหน้าผิวเป้ามีความหนาแน่นสูง ซึ่งจะส่งผลกระทบต่ออย่างมากถ้าฟิล์มบางหรือชิ้นงานถูกเคลือบในบริเวณนี้ โดยที่โครงสร้างและคุณสมบัติของฟิล์มบางหรือชิ้นงานซึ่งจะถูกควบคุมโดยการระดมยิงของไอออน ดังนั้นจึงเป็นการยากที่จะเคลือบฟิล์มให้หนาแน่นเต็มที่ในบริเวณกว้างในการใช้แมกนีตรอนแบบสมมาตร ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.4



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษารองเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 2.4 แสดงรูปแบบของเส้นแรงแม่เหล็กบริเวณหน้าผิวเป้าและลักษณะพลาสมาหน้าผิว
เป้าของแมกนีตรอนแบบสมมาตรหรือแบบทั่วไป

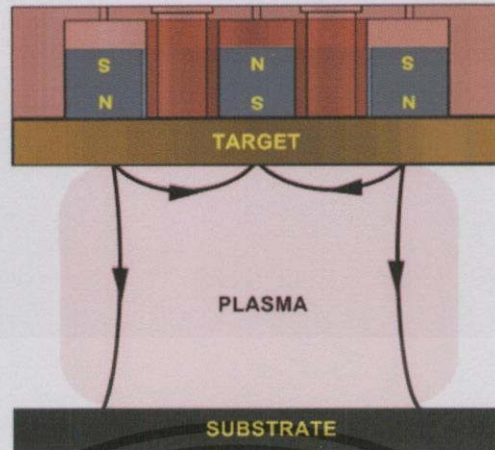
4.4.4.2. แมกนีตรอนแบบไม่สมมาตรชนิดที่ 1 (Unbalanced magnetron type 1) และ แมกนีตรอนแบบไม่สมมาตรชนิดที่ 2 (Unbalanced magnetron type 2)

แมกนีตรอนแบบไม่สมมาตรชนิดที่ 1 ความเข้มของแม่เหล็กตรงกลางมากกว่าแม่เหล็กด้านนอกซึ่งในแมกนีตรอนแบบไม่สมมาตรชนิดที่ 1 แรงแม่เหล็กส่วนหนึ่งจะเชื่อมปิดกันระหว่างแม่เหล็กด้านนอกกับแม่เหล็กตรงกลาง และเส้นแรงแม่เหล็กที่เหลือจะมีทิศทางไปยังผนังของภาชนะสุญญากาศ เป็นผลทำให้ทิศทางของอิเล็กตรอนและพลาสมาจะห่างไปจากแผ่นรองรับ ทำให้ความหนาแน่นของพลาสมาในบริเวณแผ่นรองรับมีค่าต่ำ ด้วยเหตุนี้แมกนีตรอนแบบไม่สมมาตรชนิดที่ 1 จึงไม่เป็นที่นิยมใช้ เพราะการให้ผลของกระแสไอออนต่ำที่แผ่นรองรับ ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงรูปแบบของเส้นแรงแม่เหล็กบริเวณหน้าผิวเป้าและลักษณะของพลาสมาหน้าผิวเป้าของแมกนีตรอนแบบไม่สมมาตรชนิดที่ 1

แมกนีตรอนแบบไม่สมมาตรชนิดที่ 2 เป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในการเคลือบฟิล์มโดยวิธีสปัตเตอร์ โดยที่ความเข้มของแม่เหล็กตรงกลางมีค่าน้อยกว่าแม่เหล็กด้านนอก ซึ่งในกรณีแมกนีตรอนแบบไม่สมมาตรชนิดที่ 2 นี้เส้นแรงแม่เหล็กส่วนหนึ่งจะเชื่อมปิดกันระหว่างแม่เหล็กตรงกลางและแม่เหล็กด้านนอก และเส้นแรงแม่เหล็กส่วนที่เหลือจะมีทิศทางไปยังแผ่นรองรับ ซึ่งอิเล็กตรอนทุติยภูมิส่วนหนึ่งที่มีพลังงานสูงที่ไม่ถูกกักเก็บไว้ภายใต้อิทธิพลของแรงลอเรนซ์จะเคลื่อนที่เป็นเกลียววงกลมไปตามเส้นแรงแม่เหล็กที่เหลือ โดยมีทิศทางไปยังแผ่นรองรับและเกิดการชนกับอะตอมของก๊าซที่เป็นกลางแล้วเกิดการแตกตัวเป็นไอออนในบริเวณผิวหน้าของแผ่นรองรับเป็นผลทำให้เกิดไอออนบวกเพิ่มสูงขึ้นบริเวณแผ่นรองรับและพลาสมาจะถูกกักเก็บไว้ได้น้อยลงในบริเวณหน้าผิวเป้า อย่างไรก็ตามพลาสมาจะมีปริมาณเพิ่มขึ้นโดยมีทิศทางไปยังแผ่นรองรับหรือชิ้นงานที่เราจะเคลือบในบริเวณข้ออาโนด เป็นผลทำให้ให้กระแสไอออนมีค่าสูง อีกทั้งกระแสที่หน้าผิวเป่ายังมีปริมาณเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสไอออนที่แผ่นรองรับและอัตราการเคลือบก็เช่นกัน ส่งผลต่อการเคลือบฟิล์มซึ่งให้ความหนาแน่นของกระแสไอออนต่อพื้นที่สูง โดยจากรูปที่ 2.6 จะแสดงถึงการกระจายตัวของเส้นแรงแม่เหล็กและพลาสมาไปยังแผ่นรองรับหรือชิ้นงานที่ข้ออาโนดซึ่งมีการนำไปใช้



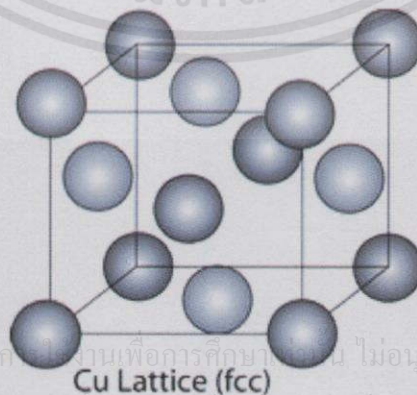
รูปที่ 2.6 แสดงรูปแบบของเส้นแรงแม่เหล็กบริเวณหน้าผิวเป้าและลักษณะของพลาสมาหน้าผิวเป้าของแมกนีตรอนแบบไม่สมมาตรชนิดที่ 2

2.5 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบาง

ทองแดงเป็นธาตุโลหะที่สำคัญอย่างหนึ่งซึ่งนิยมใช้อย่างมากในงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์และไฟฟ้ากำลัง ซึ่งในงานวิจัยนี้คณะผู้วิจัยได้ใช้โลหะทองในการทดสอบการทำงานของหัวแมกนีตรอนที่ออกแบบสร้างขึ้นมา ดังนั้นจึงเป็นสิ่งสำคัญในการศึกษาวิธีการตรวจสอบโครงสร้างของฟิล์มบางทองแดงและโครงสร้างพื้นฐานของธาตุทองแดง โดยคณะผู้วิจัยได้รวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

2.5.1 โครงสร้างของทองแดง (Structure of Copper)

ทองแดง (Copper) จัดเป็นธาตุโลหะทรานซิชัน (Transition metal) โดยอะตอมของทองแดงแต่ละอะตอมนั้นจะยึดติดกันด้วยพันธะโลหะ (Metallic bond) ซึ่งเป็นพันธะแบบไม่มีทิศทางและมีตำแหน่งของจำนวนอะตอมข้างเคียงอย่างไม่จำกัด จึงมีอะตอมข้างเคียงมากทำให้พันธะโลหะมีอะตอมที่ยึดติดกันค่อนข้างแน่น มีการจัดเรียงโครงสร้างของหน่วยเซลล์แบบเฟสเซนเตอร์คิวบิก หรือ FCC (Face Center Cubic) ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.7



Cu Lattice (fcc)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับศึกษาเท่านั้นเพื่อการเรียนการสอน ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.7 โครงสร้างของทองแดงแบบเฟสเซนเตอร์คิวบิก

2.5.2 คุณสมบัติของทองแดง (Properties of Copper)

1. สภาพการนำไฟฟ้าและนำความร้อนได้ดี ทองแดงเป็นโลหะที่ถูกใช้เป็นตัวนำไฟฟ้ามากที่สุดโดยที่เงินและธาตุอื่นๆ อาจจะถูกเพิ่มเข้ามาในทองแดงเพื่อเพิ่มความแข็งแรง ป้องกันการอ่อนตัวหรือเพื่อคุณสมบัติอื่นๆโดยไม่ทำให้เสียสภาพการนำไฟฟ้าไป
2. ความต้านทานการกัดกร่อน โลหะผสมทองแดงจะป้องกันการกัดกร่อนจากน้ำและไอน้ำได้ โลหะผสมทองแดงสามารถป้องกันการกัดกร่อน ในทะเลและโรงงานอุตสาหกรรมได้
3. สี และลักษณะที่ปรากฏ โดยทั่วไปแล้วทองแดงจะมีสีเฉพาะและอาจเปลี่ยนสีได้ โดยขึ้นอยู่กับสภาพอากาศ การสัมผัสกับบรรยากาศสามารถทำให้พื้นผิวทองแดงเป็นสีเขียวหรือบรอนซ์ดำได้ และการทำอัลลอยด์พื้นผิวสนิมในรูปแบบผลิตภัณฑ์บางประเภท
4. ความอ่อนสามารถปรับปรุงและขึ้นรูปได้ง่ายได้โดยการหลอม สามารถทำได้โดยกระบวนการหลอม การเชื่อม หรือขั้นตอนการประสาน จากตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สมบัติพื้นฐานของโลหะทองแดง

สมบัติของทองแดง	
หมายเลขอะตอม	29
น้ำหนักอะตอม	63.57
วาเลนซ์	1 หรือ 2
โครงสร้างของผลึก	FCC
อุณหภูมิหลอมเหลว (°C)	1083
จุดเดือด (°C)	2595

2.5.3 การใช้การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ศึกษาคุณสมบัติของโครงสร้างผลึก [12,13]

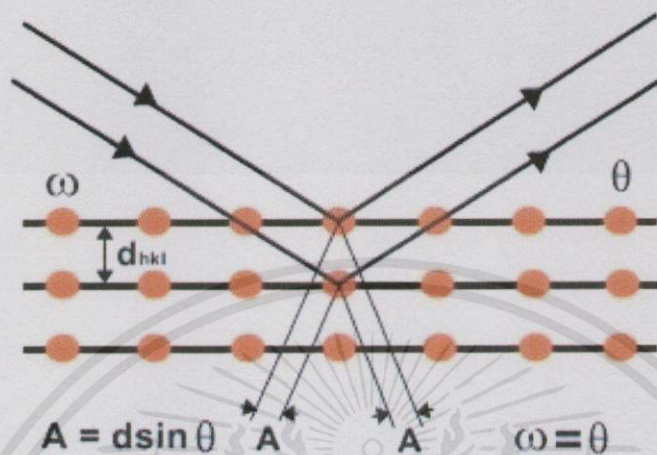
การจำแนกลักษณะโครงสร้างของผลึกโดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เป็นวิธีที่อาศัยรังสีเอกซ์จากแหล่งกำเนิดที่มีความยาวคลื่นค่าเดียวยิงตกกระทบกับผลึกของสารเคลือบ ซึ่งอาจเป็นผลึกเดี่ยวหรือผลึกพหุพันธ์ก็ได้ ในการดำเนินการตรวจสอบตัวชิ้นงานหรือฟิล์มที่มีสารเคลือบจะหมุนเป็นมุม θ ในขณะที่เครื่องตรวจจับสัญญาณรังสีเอกซ์จะเคลื่อนที่ไปเป็นมุม 2θ เมื่อรังสีเอกซ์ถูกยิงให้ไปชนสารเคลือบในชิ้นงานหรือฟิล์มบางมันจะผ่านโครงสร้างของผลึกออกมาจะเกิดการแทรกสอดทั้งแบบเสริมและแบบหักล้าง จากการทดลองของคุณวิลเลียม เฮนรี แบรกก์ได้สรุปไว้ว่าผลึกมีการจัดเรียงตัวเป็นระนาบของอะตอมซึ่งสามารถสะท้อนคลื่นที่ตกกระทบโดยมีมุมที่ตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อนโดยจะมีเงื่อนไขที่ว่าหากรังสีเอกซ์มีการแทรกสอดกันแบบเสริมมากที่สุดจะมีการกระเจิงออกจากแต่ละระนาบด้วยความแตกต่างของทางเดินคลื่น (Path difference) โดยมีค่าจำนวนเท่าของความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์โดยเราเรียกหลักการนี้ว่าเรียกว่ากฎของแบรกก์ซึ่งจะแสดงความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.15

$$2d_{hkl} \sin \theta = n\lambda$$

2.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปทำประโยชน์ด้านการค้า
เมื่อ n เป็นลำดับของการเลี้ยวเบน λ เป็นความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ d_{hkl} เป็นระยะห่างระหว่างระนาบและ θ เป็นมุมสะท้อนและมุมตกกระทบของรังสีเอกซ์เมื่อเทียบกับระนาบของผลึกโดยที่

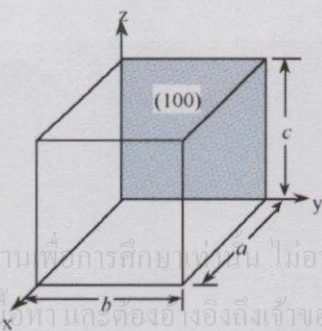
ระนาบใดที่รังสีเอกซ์ตกกระทบแล้วกระเจิงออกมาโดยสอดคล้องกับกฎของแบรกก์ เรียกว่า ระนาบแบรกก์ และมุมที่รังสีสะท้อนทำกับระนาบที่ขนานกับรังสีตกกระทบ เรียกว่า มุมเลี้ยวเบน ซึ่งมีค่าเป็นสองเท่าของมุมสะท้อน



รูปที่ 2.8 แสดงการจำลองการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เมื่อรังสีเอกซ์ถูกยิงไปยังระนาบของผลึก ซึ่งจะเป็นไปตามกฎของแบรกก์

2.5.4 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอกซ์กับมุมเลี้ยวเบน เป็นลักษณะเฉพาะของธาตุหรือสารแต่ละประเภท โดยที่ความเข้มสูงสุดที่ได้จากจากการเลี้ยวเบนและการแทรกสอดแบบเสริมของธาตุแต่ละประเภทนั้นจะมีตำแหน่งมุมเลี้ยวเบนที่แตกต่างกัน การวิเคราะห์โครงสร้างของผลึกทำได้โดยการเปรียบเทียบที่ความเข้มของรูปแบบการเลี้ยวเบนที่มุมเลี้ยวเบนค่าต่างๆของสารที่เคลื่อนกับไฟล์มาตรฐานของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผลึกซึ่งเป็นฐานข้อมูลเกี่ยวกับรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของธาตุหรือสารประกอบต่างๆ [12,13] โดยที่การเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนที่ได้กับรูปแบบการเลี้ยวเบนจากไฟล์มาตรฐานนั้น ทำได้โดยการเปรียบเทียบตำแหน่งของระนาบที่ทำให้เกิดการเลี้ยวเบนออกมา โดยการระบุระนาบจะใช้ดัชนีมิลเลอร์ในการระบุ ซึ่งนิยมใช้สัญลักษณ์เป็น (hkl) ซึ่งดัชนีมิลเลอร์จะเป็นส่วนกลับของจุดที่ระนาบตัดแกนผลึก เช่น ระนาบ (100) จะตัดแกนผลึก x, y, z ที่จุด $(1, \infty, \infty)$

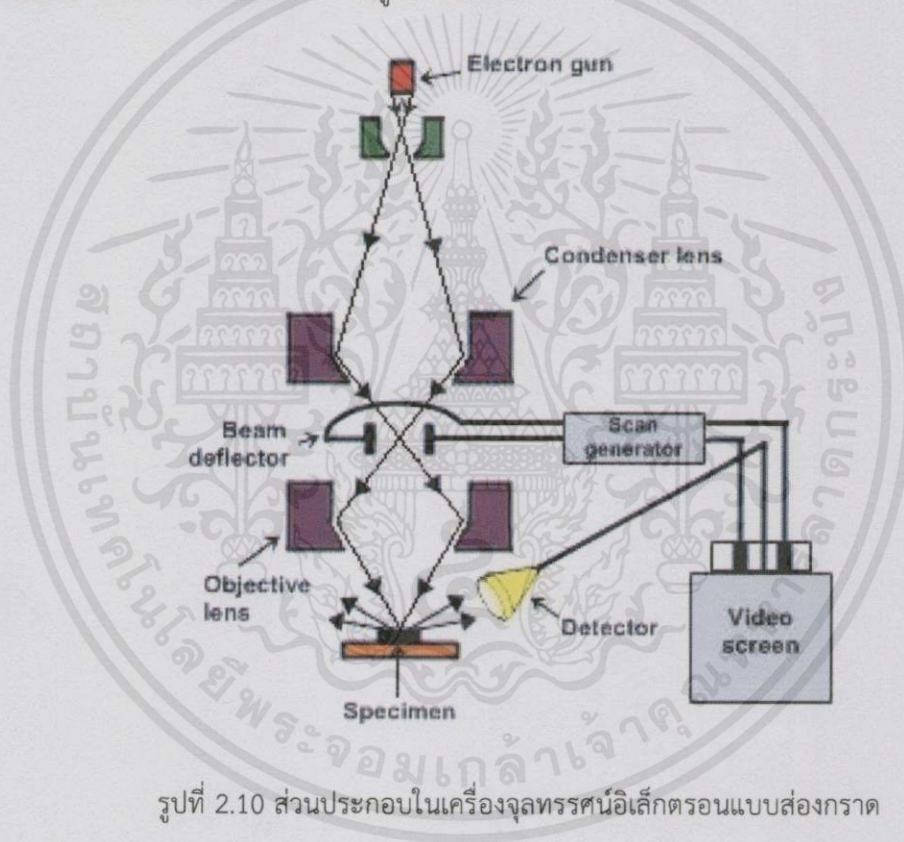


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.9 แสดงการจัดเรียงตัวของผลึกในระนาบ (100) ที่อยู่ในกล่องลูกบาศก์

2.5.5 หลักการของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเพื่อศึกษาพื้นผิวของฟิล์มบาง (Scanning Electron Microscope: SEM) [14]

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นเครื่องมือที่ใช้ส่องดูสารตัวอย่างที่มีขนาดเล็กมากๆ ให้เห็นภาพขยายของสารตัวอย่างอย่างชัดเจน เพื่อศึกษาลักษณะพื้นผิว ขนาดของเกรน รูพรุนที่เกิดขึ้น ความหนาของสารตัวอย่างที่เคลือบและองค์ประกอบทางเคมี โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจะใช้อิเล็กตรอนทำหน้าที่แทนแสง และใช้แม่เหล็กไฟฟ้าควบคุมอิเล็กตรอนให้ไปรวมกันที่ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งบนผิวของสารตัวอย่าง จากนั้นตัวรับสัญญาณจะวิเคราะห์สัญญาณและแปลสัญญาณให้ออกมาอยู่ในหน้าจอแสดงผลโดยสามารถเลือกตำแหน่งที่จะส่องดูได้อย่างละเอียด ซึ่งระบบจะอยู่ในสภาวะสุญญากาศ โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจะมีประโยชน์มากในการศึกษาและวิจัยทางด้านโลหวิทยา ทางด้านการแพทย์และทางด้านวิทยาศาสตร์อีกหลายสาขาเพราะสามารถส่องมองเห็นรูปร่างของผลึก

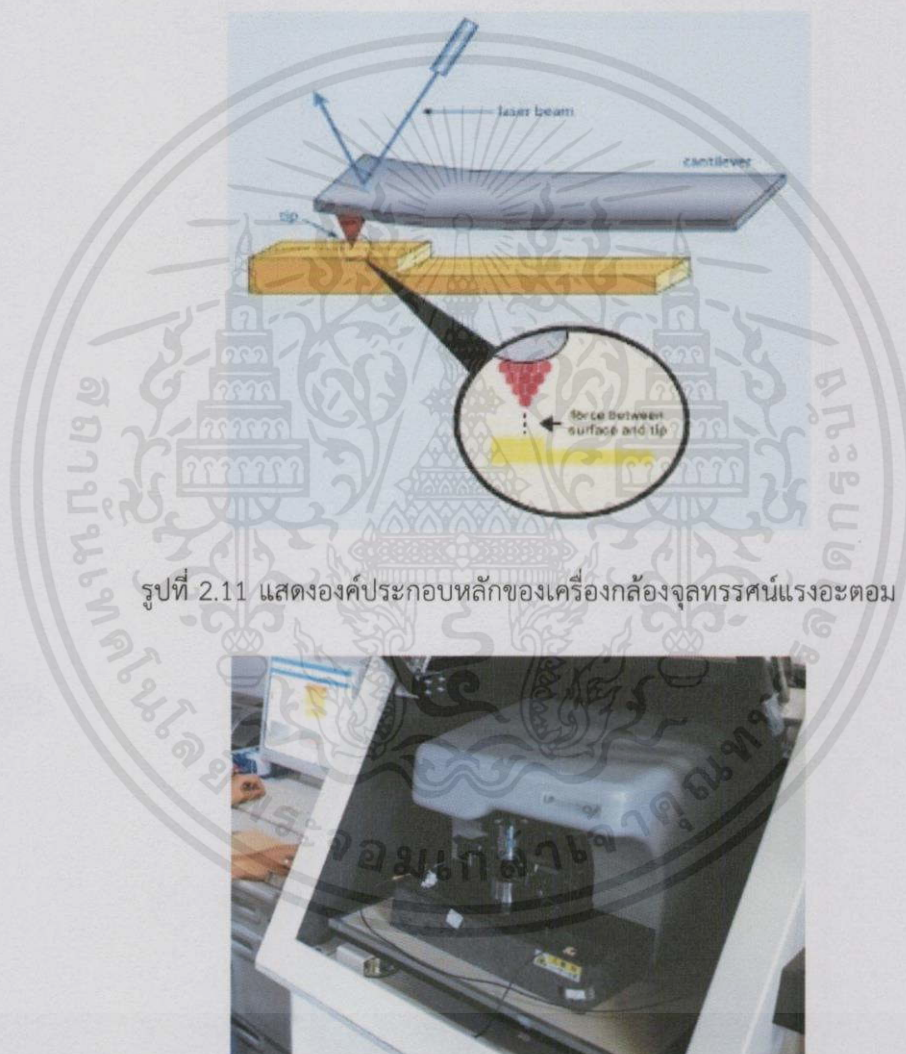


2.5.6 การศึกษาสภาพพื้นผิวของผลึกโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscopy: AFM)

กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมเป็นกล้องจุลทรรศน์ที่สามารถใช้ในการดูสภาพพื้นผิวของวัสดุประเภทต่างๆ ได้ซึ่งกล้องจุลทรรศน์ชนิดนี้จะสามารถบอกถึงค่าความขรุขระของพื้นผิวฟิล์ม ขนาดของเกรน และความหนาของชั้นงานได้ โดยใช้หลักการพื้นฐานของอันตรกิริยาของแรงระหว่างอะตอม (Atomic force) กับหัวเข็มตรวจวัดขนาดเล็ก (Probe Tip) ที่ทำจากวัสดุ Silicon nitride (Si_3N_4) เคลื่อนที่กวาดไปทั่วบริเวณต่างๆ ของพื้นผิวของฟิล์มหรือชั้นงานโดยการควบคุมของตัวเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Scanner) ซึ่งสภาพความสูงต่ำของระนาบพื้นผิวของชั้นงานที่แตกต่างกัน

ออกไปจะก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงต่อหัวเข็มตรวจวัดแตกต่างกันไปตัวคานที่มีเข็มเกาะติดอยู่จะมีการโค้งงอ (Bending) เกิดขึ้นซึ่งสามารถถูกตรวจวัดได้โดยโฟโตดีเทคเตอร์ (Photodetector)

สำหรับกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมสิ่งที่ทำให้คานที่มีเข็มเกาะอยู่เกิดการโค้งงอขึ้นก็คือแรงกระทำระหว่างอะตอมซึ่งอาจจะเป็นแรงดึงดูดหรือแรงผลักรที่ขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างหัวเข็มปลายแหลม (Tip) ดังนั้นกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมจึงสามารถที่จะใช้ทำการศึกษได้หลายวิธีแต่อย่างไรก็ตามไม่ว่าจะเป็นการใช้กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมในวิธีใด แรงกระทำที่เกิดขึ้นก็จะมีเปลี่ยนแปลงไปตามสภาพรูปทรง Topography ของพื้นผิวงานและทำให้ได้ภาพที่สอดคล้องกับสภาพผิวของวัสดุเช่นกัน



รูปที่ 2.11 แสดงองค์ประกอบหลักของเครื่องกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม

รูปที่ 2.12 แสดงภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมที่ใช้ในการตรวจสอบพื้นผิวของชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 การเคลื่อนย้ายการระเหยสารโดยความร้อน (Thermal evaporation)

การเคลื่อนย้ายการระเหยด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศนั้นเป็นวิธีการเตรียมฟิล์มบางวิธีหนึ่งของการเคลือบฟิล์มบาง ซึ่งต้องเตรียมในระบบสุญญากาศที่ระดับความดันประมาณ 10^{-5} - 10^{-7} torr [15] เพื่อการควบคุมการเคลื่อนย้ายอะตอมจากแหล่งกำเนิดความร้อนไปยังฐานรองรับที่ห่างออกไปแล้วเกิดเป็นฟิล์มบางและลดการรวมตัวของอะตอมของสารที่ระเหยกับอะตอมของก๊าซอิสระ

2.6.1 ความดันไอของธาตุ (Vapor pressure of the elements)

ธาตุของแข็งหรือเหลวเมื่อได้รับความร้อนจนถึงจุดหลอมเหลวจะเกิดการเปลี่ยนสถานะเป็นไอโดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความดันไอ ซึ่งแสดงในสมการที่ 2.16 แล้วถ้าให้ ΔV มีค่าเท่ากับปริมาตรของไอ (V_v) และเมื่อแก๊สนี้เป็นแก๊สในอุดมคติแล้ว V_v จะมีค่าเป็น RT/P ดังนั้นจะได้

$$\frac{dP}{dT} = \frac{\Delta H(T)}{T\Delta V} = \frac{P\Delta H(T)}{RT^2} \quad 2.16$$

ถ้าประมาณให้ $\Delta H(T)$ มีค่าเท่ากับ ΔH_e (ความร้อนของสารในการระเหย) จากนั้นทำการอินทิเกรต ซึ่งจะได้ค่าความดันไอของการระเหยออกมาเป็นความสัมพันธ์กับอุณหภูมิดังนี้

$$P = P_0 \exp \frac{\Delta H_e}{RT} \quad 2.17$$

2.6.2 อัตราการระเหยสาร

เฮิร์ตซ์ (Hertz) และนูดเซน (Knudsen) ได้ทำงานวิจัยเกี่ยวกับอัตราการระเหยสาร แล้วพบว่าอัตราการไหลของอะตอมหรือโมเลกุล ในสุญญากาศจากแหล่งกำเนิดความร้อน (heat source) มีความสัมพันธ์เป็นไปตามสมการ

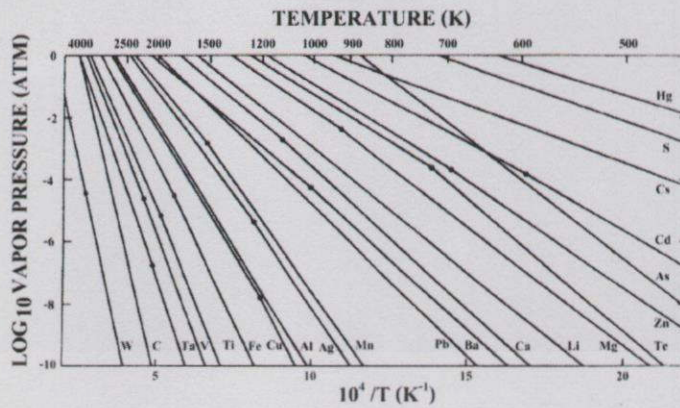
$$\Phi_e = \frac{3.513 \times 10^{22}}{(MT)^{1/2}} P_e \quad 2.18$$

โดยที่ Φ_e เป็นฟลักซ์ของจำนวนอะตอมหรือโมเลกุลของสารที่ระเหยต่อหน่วยพื้นที่ต่อเวลา P_e เป็นความดันสมดุล (Equilibrium pressure) มีหน่วยเป็น torr M เป็นมวลโมเลกุล T เป็นอุณหภูมิในหน่วยเคลวินและอัตราการระเหยมวลสาร (Mass evaporation rate: T_e) ซึ่งมีหน่วยเป็น กรัมต่อตารางเซนติเมตร-วินาที ซึ่งมีค่าเป็นไปตามสมการดังนี้

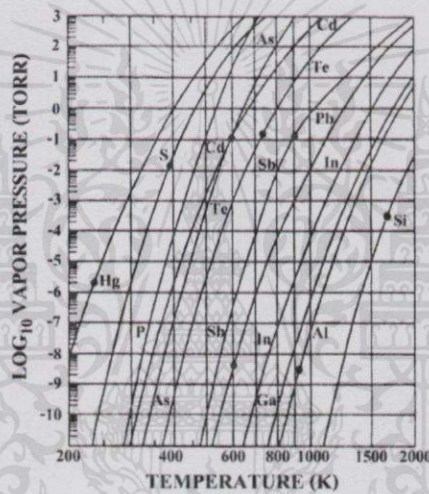
$$T_e = 5.84 \times 10^{-2} (MT)^{1/2} P_e \quad 2.19$$

ที่ความดัน 10^{-2} torr ค่าของ T_e ในธาตุจำนวนมากจะมีค่าประมาณ 10^{-4} กรัมต่อตารางเซนติเมตร-วินาที ดังนั้นสิ่งที่มีอิทธิพลต่ออัตราการระเหยสารที่สำคัญนั้นก็คือ อุณหภูมิ เพราะมีผลกระทบอย่างมากต่อความดันสมดุล

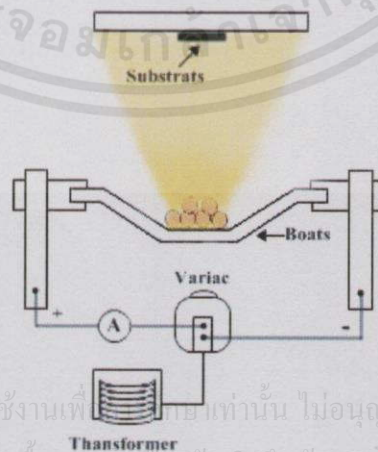
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 กราฟแสดงค่าความดันไอของธาตุ โดยจุดต่างๆจะสัมพันธ์กับจุดหลอมเหลว [15]



รูปที่ 2.14 กราฟแสดงค่าความดันไอของธาตุในสารกึ่งตัวนำโดยจุดต่างๆจะสัมพันธ์กับจุดหลอมเหลว [15]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่... ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.15 รูประบบการเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีระเหยสารด้วยความร้อน

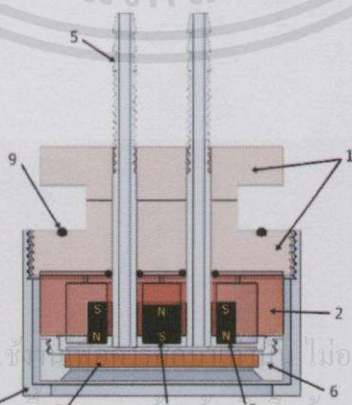
บทที่ 3

การออกแบบหัวแมกนีตรอนขนาดเล็ก

ในเนื้อหาของบทนี้จะเริ่มต้นอธิบายถึงการออกแบบหัวแมกนีตรอนขนาดเล็ก จากนั้นจะอธิบายถึงส่วนประกอบของระบบดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอร์ริงที่ใช้ในการทดสอบการทำงานของหัวแมกนีตรอนที่ออกแบบสร้างและจากนั้นจะกล่าวถึงการอัดเป่าด้วยเครื่องอัดไฮโดรลิก ต่อมาอธิบายการออกแบบสร้างภาชนะสุญญากาศสำหรับระบบดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอร์ริงในห้องปฏิบัติการทดลองขนาดเล็กและจากนั้นอธิบายการออกแบบสร้างระบบเทอร์มอลฮีทไพเรชั่น จากนั้นในหัวข้อสุดท้ายจะอธิบายถึงการทดสอบการทำงานของหัวที่ออกแบบสร้างขึ้นมาโดยการเคลือบฟิล์มบางทองแดง

3.1 การออกแบบหัวแมกนีตรอนสปีดเตอร์ริงขนาดเล็ก

ในงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์หลักคือการออกแบบสร้างหัวแมกนีตรอนสปีดเตอร์ริงที่มีขนาดเล็ก โดยในระบบดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอร์ริงประกอบไปด้วยระบบและอุปกรณ์ต่างๆหลายชิ้นส่วน ซึ่งชิ้นส่วนที่มีความสำคัญมากที่สุดก็คือหัวแมกนีตรอนสปีดเตอร์ริง เพราะประสิทธิภาพของหัวแมกนีตรอนมีผลต่อคุณสมบัติของฟิล์ม ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงได้ออกแบบหัวแมกนีตรอนให้มีรูปร่างเป็นทรงกระบอกซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 64 มิลลิเมตร โดยใช้วัสดุภายในประเทศและใช้ต้นทุนในการผลิตที่ค่อนข้างต่ำ ทั้งนี้ต้องการให้ความเข้มของสนามแม่เหล็กบริเวณหน้าผิวเป่ามีผลต่อการดีสชาร์จและลักษณะเฉพาะของพลาสมา อีกทั้งเพียงพอที่จะกักอิเล็กตรอนทุติยภูมิไว้ที่หน้าผิวเป่า หัวแมกนีตรอนที่สร้างขึ้นมีการระบายความร้อนแบบน้ำไหลเวียนให้กับเป่าอย่างทั่วถึงและมีการแยกชิ้นส่วนในการระบายความร้อนด้วยน้ำออกจากชิ้นส่วนอื่นๆของหัวแมกนีตรอนทำให้น้ำที่ใช้ระบายความร้อนไม่สัมผัสกับชิ้นส่วนอื่นๆของหัวเป็นการยืดอายุการใช้งาน อีกทั้งกลับทองแดงใส่แม่เหล็กยังถูกออกแบบให้มีการใส่แม่เหล็กได้หลายขนาด ซึ่งจะมีผลต่อลักษณะเฉพาะของพลาสมา โดยในการออกแบบสร้างหัวดีซีแมกนีตรอนนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้หัวแมกนีตรอนที่สร้างขึ้นมานี้เคลือบฟิล์มบางลงบนชิ้นงานที่มีขนาดเล็กด้วยระบบดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอร์ริงที่ขนาดเล็กและจากนั้นจะนำหัวแมกนีตรอนนี้ไปใช้เคลือบสารกึ่งตัวนำใหม่ๆ อาทิเช่น FeSi_2 และ DLC ซึ่งรูปร่างของหัวได้แสดงดังภาคตัดขวางของหัวดังในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงภาคตัดขวางของหัวแมกนีตรอนที่ออกแบบสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอก ตัดลอก และดัดแปลงข้อมูลของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

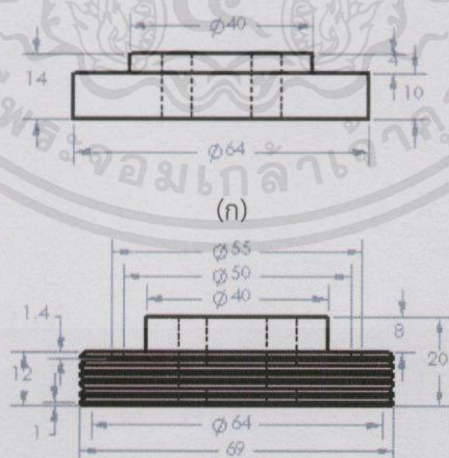
จากรูปที่ 3.1 ส่วนประกอบของหัวแมกนีตรอนที่ออกแบบสร้างแสดงไว้ตามหมายเลขต่างๆดังนี้

- | | |
|-----------------------|--------------------------|
| 1. เทปลอนแยกขั้วไฟฟ้า | 2. ตลับทองแดงใส่แม่เหล็ก |
| 3. แม่เหล็กตัวนอก | 4. แม่เหล็กตัวใน |
| 5. แผ่นระบายความร้อน | 6. ตัวยึดเป้า |
| 7. เป้า | 8. กราวด์ซิลด์ |
| 9. โอริง | |

สำหรับหัวแมกนีตรอนที่ได้ทำการออกแบบขึ้นมาตั้งแต่เริ่มต้นได้มีการปรับปรุงแก้ไขชิ้นส่วนต่างๆจนมีลักษณะดังแสดงให้เห็นดังรูปที่ 3.1 โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 64 มิลลิเมตร ซึ่งจะได้อธิบายถึงรายละเอียดการออกแบบส่วนต่างๆของหัวแมกนีตรอนดังนี้

3.1.1 เทปลอนแยกขั้วไฟฟ้าและซีลระบบสุญญากาศ

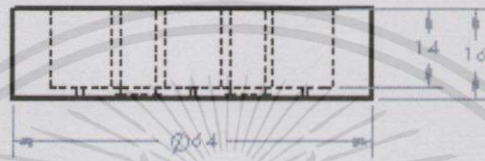
เทปลอนแยกขั้วไฟฟ้ามีอยู่ 2 ตัวคือ ตัวด้านบนและตัวด้านล่าง โดยทั้ง 2 ชิ้นจะถูกสร้างจากเทปลอนหรือวัสดุที่ไม่นำไฟฟ้าและสามารถซีลระบบสุญญากาศได้ดี ตัวที่อยู่ด้านบนจะอยู่นอกภาชนะสุญญากาศมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 64 มิลลิเมตร หนา 10 มิลลิเมตรและเจาะรู 2 รูที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.4 มิลลิเมตร เพื่อใส่เทปลอนแยกขั้วไฟฟ้ากับท่อน้ำขาเข้าและขาออก โดยจะทำหน้าที่แยกขั้วไฟฟ้าและยึดหัวแมกนีตรอนกับแผ่นปิดภาชนะสุญญากาศด้านบน และตัวแยกขั้วไฟฟ้าอีก 1 ตัวที่อยู่ด้านล่างซึ่งจะอยู่ในภาชนะสุญญากาศทำจากเทปลอนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 69 มิลลิเมตร หนา 12 มิลลิเมตรและเจาะรู 2 รูที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.4 มิลลิเมตร เพื่อใส่เทปลอนแยกขั้วไฟฟ้ากับท่อน้ำขาเข้าและขาออก และทำร่องโอริงที่ด้านบนเพื่อใส่โอริงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านใน 50 มิลลิเมตร และหนา 2 มิลลิเมตร และใช้โอริงอีก 2 ตัวที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านใน 6.5 มิลลิเมตร หนา 2 มิลลิเมตร ใส่ลงไปตามท่อน้ำขาเข้าและขาออกระหว่างตลับแม่เหล็กและตัวแยกขั้วไฟฟ้าเพื่อป้องกันการรั่วซึมของระบบสุญญากาศซึ่งแสดงในรูปที่ 3.2 (ก) และ (ข) แสดงภาพวาดออกแบบของเทปลอนแยกขั้วไฟฟ้าทั้งตัวด้านบนและตัวด้านล่างตามลำดับ



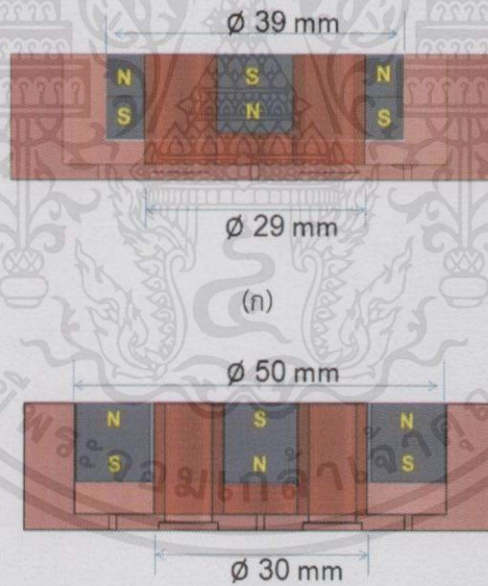
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาก่อนนั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีรูปที่ 3.2 เทปลอนแยกขั้วไฟฟ้าที่ออกแบบโดยโปรแกรม Solidworks โดยที่ (ก) ตัวด้านบน การนำไปใช้
(ข) ตัวด้านล่าง

3.1.2 ตลับทองแดงใส่แม่เหล็กและแม่เหล็กที่ใช้

สำหรับตลับใส่แม่เหล็กทองแดงถูกออกแบบขึ้น โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 64 มิลลิเมตร หนา 16 มิลลิเมตร มีช่องสำหรับใส่แม่เหล็ก 2 ช่อง โดยช่องในมีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร สูง 14 มิลลิเมตร และช่องนอกมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 28.8 มิลลิเมตรและมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 50.3 มิลลิเมตร สูง 14 มิลลิเมตร และเจาะรู 2 รูที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.4 มิลลิเมตร เพื่อใส่ตลับแม่เหล็กกับท่อน้ำขาเข้าและออก ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.3 โดยทางคณะผู้วิจัยได้จำลองการใส่แม่เหล็กตัวในและแม่เหล็กตัวนอกที่ขนาดต่างกัน ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.3 ตลับใส่แม่เหล็กที่ออกแบบโดยโปรแกรม Solidworks



(ข)

รูปที่ 3.4 รูปจำลองภาพตัดขวางของตลับใส่แม่เหล็กทองแดงที่ใส่แม่เหล็กตัวนอกต่างขนาดกันโดย

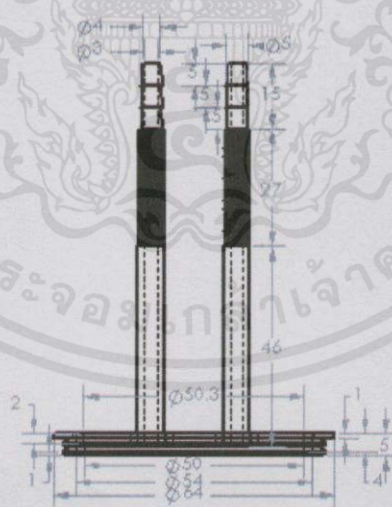
(ก) เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 29 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 39 มิลลิเมตร

(ข) เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 30 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 50 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 แผ่นระบายความร้อน

สำหรับหัวแมกนีตรอนการออกแบบเป็นชิ้นส่วนที่สำคัญ ทำหน้าที่เป็นแผ่นระบายความร้อน และเป็นชิ้นส่วนที่จะเชื่อมโยงกับชิ้นส่วนอื่นๆ มีรูปร่างเป็นแผ่นทรงกระบอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 64 มิลลิเมตร มีความหนา 5 มิลลิเมตร เพื่อให้สนามแม่เหล็กบริเวณหน้าผิวเป่ามีค่ามากที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ ซึ่งจะมีผลต่อการดิสชาร์จโดยตรง โดยที่ด้านในของแผ่นระบายความร้อนจะเป็นพื้นที่ว่างสำหรับให้น้ำไหลเวียนและเกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนออกจากระบบ โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร และมีความหนา 0.8 - 1 มิลลิเมตร เพื่อให้ให้น้ำไหลเวียนระบายความร้อนให้กับเป่าอย่างทั่วถึง ที่ขอบของแผ่นระบายความร้อน จากนั้นได้ออกแบบให้ด้านข้างเป็นลักษณะเกลียวสูง 4 มิลลิเมตรเพื่อยึดติดกับตัวยึดเป่า และที่ด้านบนของแผ่นระบายความร้อนเจาะรู 2 รู ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.4 มิลลิเมตร เพื่อเชื่อมกับท่อสแตนเลส 2 ท่อ ซึ่งทำหน้าที่เป็นช่องทางให้น้ำไหลเข้าและไหลออกอีกทั้งหน้าที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งของแผ่นระบายความร้อนนั้นก็ก็ว่าเป็นตัวล็อคหัวแมกนีตรอนกับแผ่นปิดด้านบนของภาชนะสุญญากาศ โดยท่อจะมีความสูงประมาณ 88 มิลลิเมตรและมีเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อภายนอก 6.4 มิลลิเมตรและเส้นผ่านศูนย์กลางภายในสำหรับให้น้ำไหลประมาณ 3 มิลลิเมตร โดยระยะห่างระหว่างท่อน้ำ เข้า - ออก 9.75 มิลลิเมตร และอยู่ห่างจากจุดศูนย์กลาง 4.875 มิลลิเมตร โดยส่วนล่างของท่อน้ำที่ยังไม่ทำเป็นเกลียวมีความสูง 46 มิลลิเมตร เพื่อทำการปรับเปลี่ยนความสูงของหัวดีซีแมกนีตรอน และส่วนบนที่เป็นเกลียวมีความสูง 27 มิลลิเมตรมีไว้สำหรับปรับเปลี่ยนระยะที่ใช้ยึดหัวแมกนีตรอนกับแผ่นปิดภาชนะสุญญากาศด้านบน และที่ปลายสุดด้านบนของท่อน้ำก็ตั้งเป็นหางปลาไหลสูง 15 มิลลิเมตร เพื่อต่อเข้ากับสายยางที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านใน 5 มิลลิเมตร

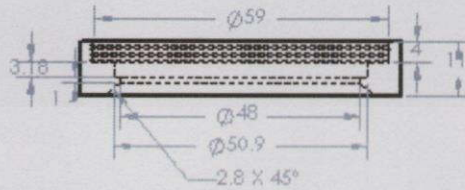


รูปที่ 3.5 แผ่นระบายความร้อนที่ถูกออกแบบโดยใช้โปรแกรม Solidworks

3.1.4 ตัวยึดเป่า

ตัวยึดเป่ามีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอก 64 มิลลิเมตร สูง 11 มิลลิเมตร และตำแหน่งที่ยึดเป่ามีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว และมีความสูง 0.125 นิ้ว เพื่อใช้กับเป่าที่จะถูกสปีดเตอร์ริงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมาตรฐาน 2 นิ้ว และหนา 0.125 นิ้ว โดยภายในมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 59

มิลลิเมตรและเป็นเกลียวสีก 4 มิลลิเมตรเพื่อยึดติดกับแผ่นระบายความร้อน ซึ่งในส่วนนี้เองจะทำให้ อุณหภูมิของเป้านั้นถูกระบายความร้อนตลอดเวลาในขณะที่ทำการสปีดเตอริง ซึ่งจะเป็นการป้องกันไม่ให้เป้ามียุณหภูมิที่สูงมากกว่าปกติ ซึ่งอาจจะก่อให้เกิดความเสียหายกับหัวแมกนีตรอนและเป่าได้ จากรูปที่ 3.6 แสดงการออกแบบตัวยึดเป่าโดยใช้โปรแกรม Solidworks

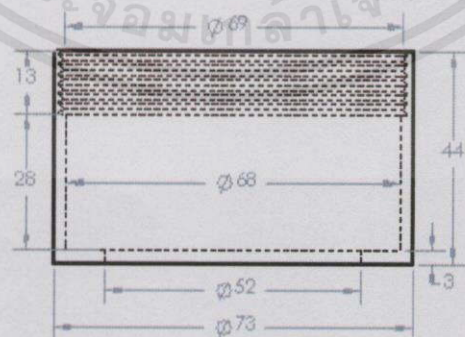


รูปที่ 3.6 แบบตัวยึดเป่าที่ถูกออกแบบโดยใช้โปรแกรม Solidworks

3.1.5 กราวด์ซีลด์

สำหรับหัวแมกนีตรอนที่จะถูกสร้างขึ้นมาสปีดเตอริงกับวัสดุที่เป็นเป่าเท่านั้น ดังนั้นการควบคุมให้เกิดการสปีดเตอริงเฉพาะบริเวณหน้าผิวเป่าจึงเป็นสิ่งสำคัญอย่างมากเพื่อป้องกันไม่ให้ส่วนอื่นถูกสปีดเตอริงออกมาด้วย โดยกราวด์ซีลด์เป็นส่วนประกอบที่ควบคุมให้เกิดการสปีดเตอริงในบริเวณหน้าผิวเป่าเท่านั้น โดยต้องการออกแบบให้ระยะห่างระหว่างหัวแมกนีตรอนกับกราวด์ซีลด์มีค่าน้อยกว่าความหนาของบริเวณมีด เพื่อป้องกันไม่ให้อนุภาคที่เคลื่อนที่ชนกันในบริเวณนี้สามารถเกิดการแตกตัวเป็นไอออน

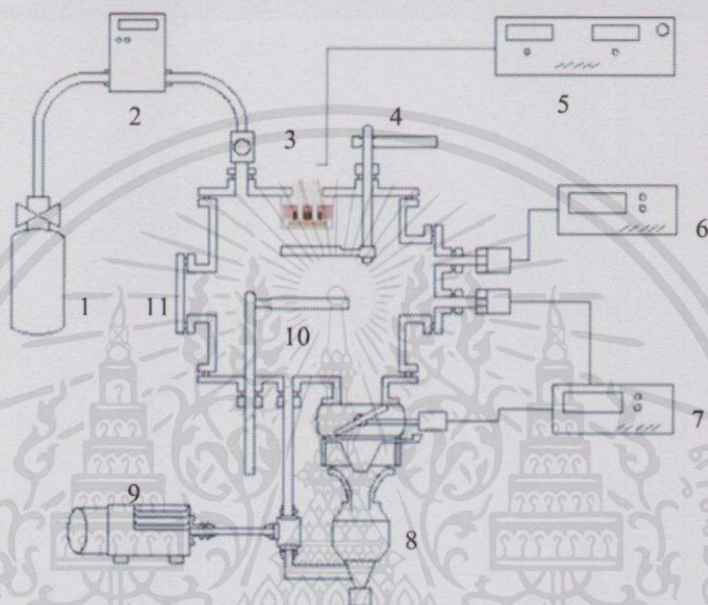
โดยกราวด์ซีลด์ที่ออกแบบที่มีความสูงทั้งหมด 44 มิลลิเมตร ซึ่งถูกออกแบบให้มีลักษณะเป็นท่อกวาง และทำเกลียวภายในเพื่อยึดติดกับแผ่นแยกขั้วเทปลอนด้านล่างที่จะถูกทำให้ยึดติดกับแผ่นปิดภาชนะสุญญากาศด้านบน ซึ่งเกลียวถูกออกแบบให้ลึกลงไปภายในกราวด์ซีลด์ 13 มิลลิเมตร ซึ่งถูกแสดงในรูปที่ 3.7 จากการที่ทำเกลียวภายในกราวด์ซีลด์นี้ก็เพื่อต้องการให้สามารถปรับเปลี่ยนระยะห่างระหว่างหัวแมกนีตรอนกับกราวด์ซีลด์ให้มีค่าประมาณ 2 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นระยะที่น้อยกว่าความหนาของบริเวณมีด โดยคลุมรอบหัวแมกนีตรอนและมีช่องเปิดที่หน้าเป่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 52 มิลลิเมตร เพื่อควบคุมให้เกิดการสปีดเตอริงเฉพาะที่ด้านหน้าผิวเป่า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนรูปที่ 3.7 กราวด์ซีลด์ที่ออกแบบโดยใช้โปรแกรม Solidworks ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 ระบบดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

ระบบดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่ใช้ในการทดสอบหัวแมกนีตรอนที่ออกแบบสร้าง โดยระบบนี้ถูกออกแบบและสร้างโดยคุณณัฐพร [16] จะประกอบไปด้วยส่วนที่สำคัญหลายอย่าง ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.8 เป็นแผนภาพแสดงส่วนประกอบของระบบ ซึ่งจะแบ่งออกเป็นระบบย่อยที่จะประกอบไปด้วยระบบสุญญากาศ ระบบแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง หัวดีซีแมกนีตรอน ระบบระบายความร้อนของหัวแมกนีตรอน และระบบควบคุมการไหลของแก๊ส



รูปที่ 3.8 แผนภาพส่วนประกอบที่สำคัญของระบบดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

โดยส่วนประกอบที่สำคัญในระบบดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงตามรูปที่ 3.8 มีส่วนประกอบตามหมายเลขดังนี้

- | | |
|-------------------------------------|---------------------------------------|
| 1. ถังก๊าซอาร์กอน | 7. เครื่องอ่านความดันละเอียด |
| 2. เครื่องควบคุมการไหลของก๊าซโดยมวล | 8. ปั๊มแพร่ไอ (Diffusion pump) |
| 3. หัวแมกนีตรอน | 9. ปั๊มโรตารี (Rotary pump) |
| 4. ชัตเตอร์ (Shutter) | 10. แผ่นใส่ชิ้นงาน (Substrate holder) |
| 5. แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง | 11. ภาชนะสุญญากาศ |
| 6. เครื่องอ่านความดันหยาบ | |

ในส่วนถัดไปจะอธิบายถึงรายละเอียดย่อยๆของส่วนประกอบต่างๆของระบบดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงโดยจะกล่าวถึงระบบสุญญากาศเป็นอันดับแรก ถัดมาจะกล่าวถึงระบบควบคุมการไหลของก๊าซ ต่อมาจะกล่าวถึงระบบจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแล้วจากนั้นสุดท้ายจะกล่าวถึงการตรวจสอบลักษณะเฉพาะของสนามแม่เหล็กบริเวณหน้าผิวเป้าเป็นหัวข้อถัดไป

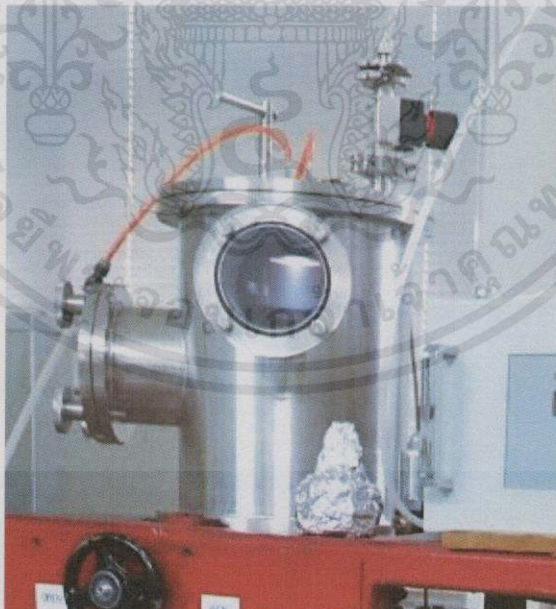
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1 ระบบสุญญากาศ

ระบบสุญญากาศเป็นอีกหนึ่งส่วนประกอบย่อยของระบบดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงโดยระบบย่อยอื่นๆจะต้องมาเชื่อมต่อกันที่ระบบสุญญากาศนี้ โดยกระบวนการสปัตเตอริงที่เกิดจากหัวแมกนีตรอนจะเกิดภายในระบบสุญญากาศโดยที่ระบบนี้จะประกอบด้วยส่วนที่สำคัญ ได้แก่ ภาชนะสุญญากาศและปั๊มสุญญากาศ โดยที่ปั๊มสุญญากาศที่ใช้ในระบบจะต้องมีอัตราการปั๊มก๊าซออกจากภาชนะสุญญากาศที่เหมาะสมกับขนาดของภาชนะสุญญากาศที่ออกแบบสร้างเพื่อให้ภายในของภาชนะสุญญากาศนั้นสามารถรักษาระดับความดันไว้ได้ โดยในระบบสุญญากาศที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ปั๊มสุญญากาศ 2 ตัว คือ ปั๊มกลโรตารีและปั๊มแพรวไอ ซึ่งในหัวข้อต่อไปจะอธิบายเกี่ยวกับภาชนะสุญญากาศและปั๊มสุญญากาศที่ใช้ในงานวิจัย

3.2.1.1 ภาชนะสุญญากาศ (Vacuum Chamber)

ภาชนะสุญญากาศในระบบดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงทำด้วยวัสดุสแตนเลส มีรูปร่างเป็นทรงกระบอกในแนวตั้ง โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 105.2 มิลลิเมตร หนา 3 มิลลิเมตร สูง 300 มิลลิเมตร มีปริมาตรประมาณ 186,000 ลูกบาศก์มิลลิเมตร ด้านหน้ามีหน้าแปลนที่เป็นประตูปิด-เปิด เพื่อใช้ในการเปลี่ยนหรือใส่แผ่นรองรับหรือชิ้นงานที่ต้องการจะเคลือบ โดยมีขนาดหน้าแปลนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 165 มิลลิเมตร พร้อมทั้งด้านขวาส่วนบนแล้วด้านซ้ายส่วนล่างจะมีหน้าแปลนขนาด ISO63 ดังแสดงในภาคผนวก (ค) เพื่อเชื่อมต่อกับอุปกรณ์อื่นๆ เช่น หน้าแปลนแผ่นอะซีลิคใสเพื่อสังเกตพลาสมาและการสปัตเตอริงระหว่างการดำเนินการเคลือบเทอร์โบโมเลกุลปั๊ม หัววัดกลางมัวร์ หัววัดความดัน เป็นต้น หน้าแปลนฝาปิดด้านล่างและด้านบนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 260 มิลลิเมตร หนา 10 มิลลิเมตร ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.9



เอกสารนี้เป็นเอกสารรูปที่ 3.9 ภาพถ่ายของภาชนะสุญญากาศของระบบดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง ระเบียบด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้าแปลนด้านบนเจาะรูตรงกลางที่มีขนาดเฉพาะโดยมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 มิลลิเมตร เพื่อใส่หัวดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริงที่ออกแบบสร้าง อีกทั้งเจาะรูที่ระยะห่างจากจุดศูนย์กลาง 76 มิลลิเมตร มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร จำนวน 3 รู เพื่อเชื่อมต่อกับอุปกรณ์อื่นๆ เช่น ซีตเตอร์ และวาล์วที่ใช้ในการควบคุมการป้องกันก๊าซเข้าสู่ภาชนะสุญญากาศ เป็นต้น ซึ่งแบบวาดของหน้าแปลนฝาปิดภาชนะสุญญากาศด้านบนจะถูกแสดงในรูปที่ 3.10 ส่วนหน้าแปลนด้านล่างเจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 124 มิลลิเมตรเพื่อเชื่อมต่อกับระบบปั๊มสุญญากาศ และมีหน้าแปลนขนาด NW25 แสดงในภาคผนวก (ค) จำนวน 2 ช่อง และหน้าแปลนขนาด NW16 แสดงในภาคผนวก (ค) จำนวน 3 ช่อง เพื่อเชื่อมต่อกับอุปกรณ์อื่นๆ เช่น หัววัดความดัน แทนวางแผ่นรองรับหรือชิ้นงานที่ต้องการเคลือบ เป็นต้น ซึ่งถูกแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.10 หน้าแปลนฝาปิดด้านบนของภาชนะสุญญากาศที่เจาะรูผ่านเพื่อเชื่อมต่อกับอุปกรณ์อื่นๆ



รูปที่ 3.11 หน้าแปลนฝาปิดด้านล่างของภาชนะสุญญากาศที่เจาะรูผ่านเพื่อเชื่อมต่อกับอุปกรณ์อื่นๆ

3.2.1.2 ปั๊มกลโรตารีและปั๊มแพโร

โดยที่ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ปั๊มโรตารี เบอร์ 8 Two state ของบริษัท Edwards ซึ่งมีความเร็วปั๊มอยู่ที่ 8.5 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ซึ่งคำนวณมาจากค่าอัตราการส่งผ่านสูงสุดมีค่าเท่ากับผลคูณของความดันกับความเร็วปั๊ม โดยหาได้จากกราฟแสดงอัตราการปั๊มที่ความดันประมาณ 10^{-2} มิลลิบาร์ จะมีค่าความเร็วปั๊ม 60 ลิตรต่อวินาทีค่าอัตราการส่งผ่านสูงสุดจะมีค่า 6×10^{-1} มิลลิบาร์-ลิตรต่อวินาที ส่วนค่าความดันท้ายวิกฤตมีค่า 0.8 มิลลิบาร์ซึ่งขึ้นอยู่กับน้ำมันที่ใช้ ความเร็วปั๊มของปั๊มกลโรตารีจะมีค่ามากกว่า 2.7 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง วิชาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 ปั๊มกลโรตารี เบอร์ 8 two state ของบริษัท Edwards

สำหรับระบบนี้ใช้ปั๊มแพร่ไอ Model 203B No. 5298 ของบริษัท Edwards โดยคุณณัฐพร และคณะวิจัยได้ทำขดลวดความร้อนขึ้นมาใหม่มีกำลังไฟฟ้า 250 วัตต์ ที่ความต่างศักย์ 220 โวลต์ ระบายความร้อนด้วยระบบไหลเวียนน้ำเย็นและใช้น้ำมันรุ่น DC704EU ของบริษัท Provac [16] ปั๊มแพร่ไอมีความเร็วที่ปากปั๊มที่ 60 ลิตรต่อวินาที แต่เนื่องจากในการใช้งานได้มีการต่อปั๊มแพร่ไอกับตัว ดักไนโตรเจนและปลั๊กวาล์วก่อนถึงภาชนะสุญญากาศเป็นผลให้ความเร็วปั๊มยังผล (Effective pumping speed) หรือความเร็วที่แท้จริงของระบบนั้นมีค่าลดลง



รูปที่ 3.13 ปั๊มแพร่ไอ Model 203B No. 5298 ของบริษัท Edwards

3.2.2 ระบบการป้อนก๊าซและแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (DC power supply)

สำหรับระบบการป้อนก๊าซ จะทำหน้าที่ควบคุมการไหลของก๊าซงานที่จะใช้ในการสปัตเตอร์ริง ให้เป็นไปตามเงื่อนไขของการทดลองโดยในระบบนี้ใช้เครื่องควบคุมอัตราการไหลของก๊าซโดยมวล Model GFC-2102 ของบริษัท Dwyer ควบคุมปริมาณก๊าซให้มีค่าคงที่ในช่วง 0 - 20 มิลลิลิตรต่อ นาทีและควบคุมการป้อนก๊าซด้วยวาล์วเข็มของบริษัท Fujikin International ทำหน้าที่ในการ ควบคุมปริมาณก๊าซที่ป้อนเข้าสู่ภาชนะสุญญากาศ

ในระบบตีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงของงานวิจัยนี้ใช้แหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง ยี่ห้อ Good will Model GPR-60H15 สามารถปรับความต่างศักย์ให้คงที่ได้ตั้งแต่ 0-600 โวลต์ และมีการจำกัดกระแสตั้งแต่ 0-1.5 แอมแปร์



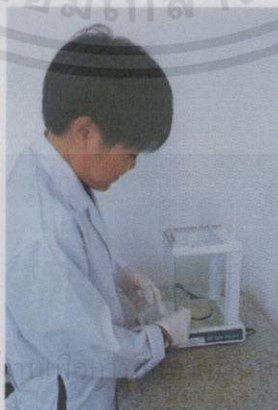
รูปที่ 3.14 แหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ยี่ห้อ Good will Model GPR-60H15

3.3 การอัดเป่าโดยเครื่องอัดไฮดรอลิก

ทางคณะผู้วิจัยมีความต้องการที่จะลดต้นทุนในการจัดซื้อเป่า FeSi_2 และ DLC ซึ่งมีราคาแพงมาก อีกทั้งยังต้องสั่งนำเข้าจากต่างประเทศเท่านั้น ทางคณะผู้วิจัยจึงได้มีการออกแบบสร้างเป่าอัดเป่า โดยคุณดาลินและคุณณัฐฐาทิพย์ สำหรับขึ้นรูปเป่าที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้วและหนา 0.125 นิ้ว ที่ใช้กับเครื่องอัดไฮดรอลิกขนาดแรงอัดสูงสุด 30 ตันของบริษัท Champ Hydraulic โดยในการอัดนั้น จะใช้ผงเหล็ก (Iron powder) ผงซิลิกอน (Silicon powder) และผงคาร์บอน (Carbon powder) เป็นตัวตั้งต้นในการขึ้นรูปซึ่งวิธีการอัดเป่าโดยเครื่องอัดไฮดรอลิกจะถูกอธิบายดังต่อไปนี้

นอกจากการทดสอบการใช้งานของหัวแมกนีตรอนที่ออกแบบสร้างโดยทดสอบกับการสปัตเตอริงเป่าโลหะทองแดงแล้ว คณะผู้วิจัยยังได้ทดสอบหัวใหม่นี้กับเป่าที่เป็นสารตัวใหม่ อาทิเช่น FeSi_2 และ Carbon ที่ถูกขึ้นรูปอัดเป่าด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกกับเป่าอัดสารที่ออกแบบและสร้าง ซึ่งในหัวข้อนี้จะยกตัวอย่างการอัดเป่า FeSi_2 ทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว หนา 0.125 นิ้ว จากผง Fe และ Si เป็นหลัก โดยในการอัดเป่าสารใหม่เหล่านี้มีวิธีการอัดเป่าดังต่อไปนี้

1. เตรียมผงสารแต่ละชนิดที่จะใช้อัดเป่า และทำการคำนวณหาอัตราส่วนปริมาณสารสัมพันธ์ โดยวิธีการคำนวณการเตรียมผงเป่า FeSi_2 จะถูกแสดงอยู่ในภาคผนวก (ก)
2. ชั่งผงสาร Fe และ Si ให้ได้ตามค่าที่คำนวณด้วยเครื่องชั่งสารแบบทศนิยม 4 ตำแหน่ง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

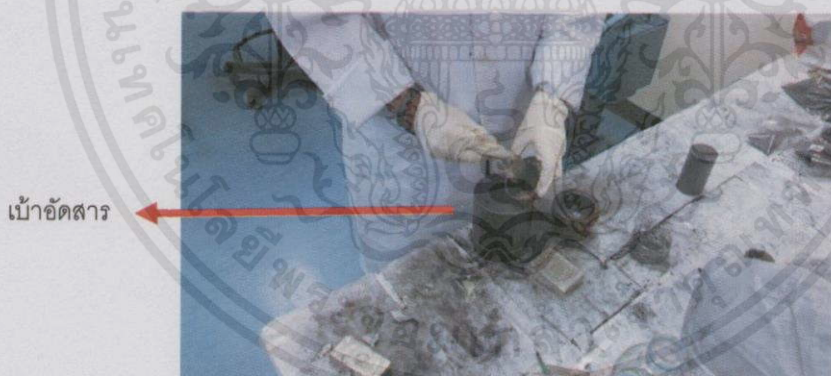
รูปที่ 3.15 รูปแสดงการชั่งผงสารโดยเครื่องชั่งสารแบบทศนิยม 4 ตำแหน่ง

3. เทผงสารที่ได้จากการชั่งลงไปรวมกันในขวดใส่สารเคมีที่ทำความสะอาด จากนั้นใช้ช้อนคนผงสารให้เข้ากันให้มากที่สุด
4. เทผงสารลงในจานภาชนะที่ทำความสะอาดในปริมาณ $\frac{3}{4}$ ช้อนโต๊ะ จากนั้นหยดกาวลาเท็กซ์จำนวน 2-3 หยด ลงในจานภาชนะที่มีผงสารอยู่



รูปที่ 3.16 แสดงวิธีผสมผงสารกับกาวลาเท็กซ์บนภาชนะใส่ผงสารที่เตรียมไว้

5. ใช้ช้อนคนผงสารให้เข้ากับกาวที่หยดลงไป จนผงสารพร้อมที่จะนำเข้าไปในเบ้าอัดจะมีลักษณะหมาดน้ำ
6. เทผงสารที่ผสมกับกาวแล้วเข้าไปในเบ้าอัดสารรูปทรงกระบอก



รูปที่ 3.17 แสดงวิธีเทผงสารที่ผสมกับกาวลาเท็กซ์ลงในเบ้าอัดสาร

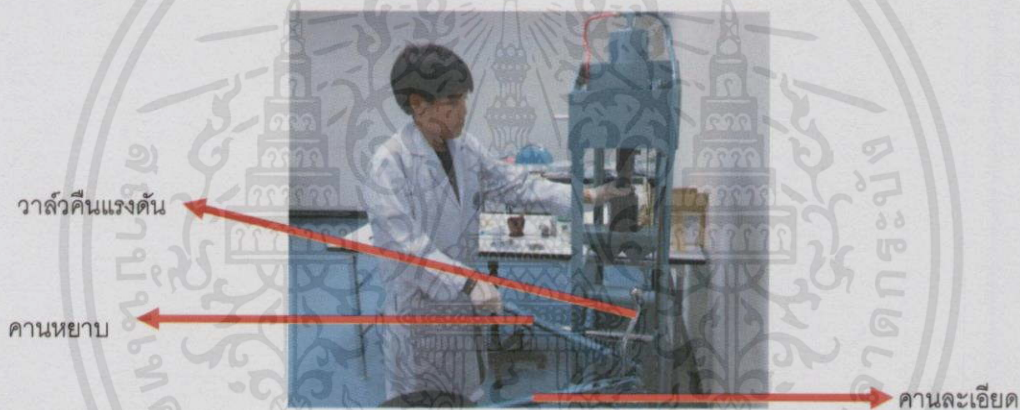
7. นำเบ้าสารที่มีผงสารอยู่ภายในขึ้นวางไว้ที่แท่นอัดไฮดรอลิก จากนั้นโยกคันเหยียบของเครื่องอัดไฮดรอลิกเพื่อให้หัวอัดไฮดรอลิกกดทับเบ้าอัดเป่า โดยที่ให้ได้แรงดันที่มากกว่า 15 kPa

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



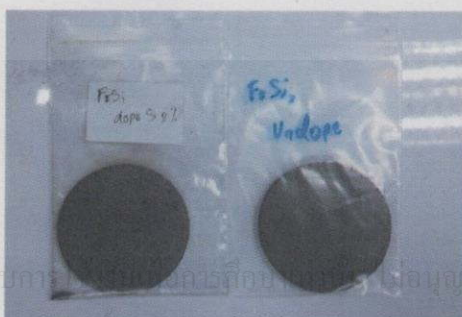
รูปที่ 3.18 แสดงตำแหน่งการวางเบ้าอัดสารบนแท่นอัดไฮโดรลิก

8. โยกคานละเอียดของเครื่องอัดไฮโดรลิกให้แรงดันถึง 30 kPa จากนั้นทิ้งไว้ 10 นาที แล้วหมุน วาล์วคืนแรงดัน



รูปที่ 3.19 แสดงการใช้คานหยาบและละเอียดเพื่อออกแรงกดไปยังเบ้าอัดสาร

9. ปิดวาล์วคืนแรงดัน พร้อมทั้งทำซ้ำขั้นตอนที่ 7 และ 8 ตามลำดับเป็นจำนวน 5 รอบ เพื่อให้ผงสารที่ถูกอัดนั้นมีรูปทรงที่อยู่ตัวและป้องกันการเกิดรอยร้าว
10. นำเบ้าอัดสารออกจากแท่นอัดไฮโดรลิก แล้วนำเป่าสารที่ได้จากการอัดออกจากเบ้าสาร



รูปที่ 3.20 แสดงเป่า FeSi_2 ที่ได้จากการอัด แต่ยังไม่ผ่านการอบไล่ความชื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

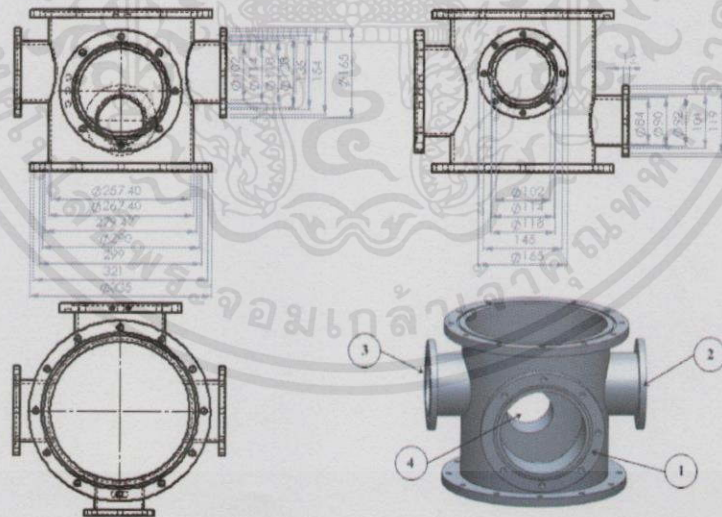
11. นำเป่าสารที่ได้ไปอบไล่ความชื้นที่เครื่องอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง จากนั้นเก็บเป่าที่ผ่านการอบในภาชนะที่ปราศจากความชื้นให้มากที่สุด

3.4 การออกแบบสร้างภาชนะสุญญากาศสำหรับระบบดีซีแมกนีตรอนสปัดเตอร์ใน ห้องปฏิบัติการทดลองขนาดเล็ก

สำหรับการออกแบบสร้างภาชนะสุญญากาศนั้น ทางคณะผู้วิจัยมีความตั้งใจอย่างมากในการที่จะออกแบบสร้างขึ้นมาให้กับทางภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เพื่อใช้ในห้องปฏิบัติการขนาดเล็กที่ใช้งบประมาณในการสร้างค่อนข้างต่ำ และเพื่อให้นักศึกษาหรือนักวิจัยรุ่นหลังที่สนใจในงานวิจัยทางด้านเทคโนโลยีสุญญากาศ ได้มีอุปกรณ์ใช้งานในการทดลองทำงานวิจัย โดยภาชนะสุญญากาศถูกออกแบบให้มีลักษณะเป็นทรงกระบอก ซึ่งวัสดุที่ใช้จะต้องเป็นวัสดุที่นำไฟฟ้าได้ดี และผิววัสดุไม่จับโมเลกุลของอากาศเพื่อง่ายต่อการทำความสะอาด [17] โดยในส่วนของการออกแบบจะถูกอธิบายดังต่อไปนี้

3.4.1 ภาชนะสุญญากาศ

สิ่งสำคัญในการสร้างภาชนะสุญญากาศนั้นคือวัสดุที่ใช้ในการสร้างจะต้องเป็นวัสดุที่นำไฟฟ้าได้ดีและพื้นผิวของวัสดุที่นำมาสร้างจะต้องไม่ทำหน้าที่เป็นกับดักจับโมเลกุลของก๊าซ อาทิเช่น วัสดุ สแตนเลส ซึ่งภาชนะสุญญากาศเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง โดยที่การออกแบบและสร้างจะต้องมีขนาดที่สอดคล้องกับเหมาะสมกับระบบปั๊มสุญญากาศและมีรูปร่างเหมาะสำหรับที่จะติดตั้งอุปกรณ์ในส่วนอื่นๆ รวมถึงอุปกรณ์ใหม่ๆ ซึ่งอาจจะมีการสร้างและเพิ่มเติมเข้ามาในระบบในอนาคต จากรูปที่ 3.21 ได้แสดงถึงภาชนะสุญญากาศที่ถูกออกแบบในงานวิจัยนี้



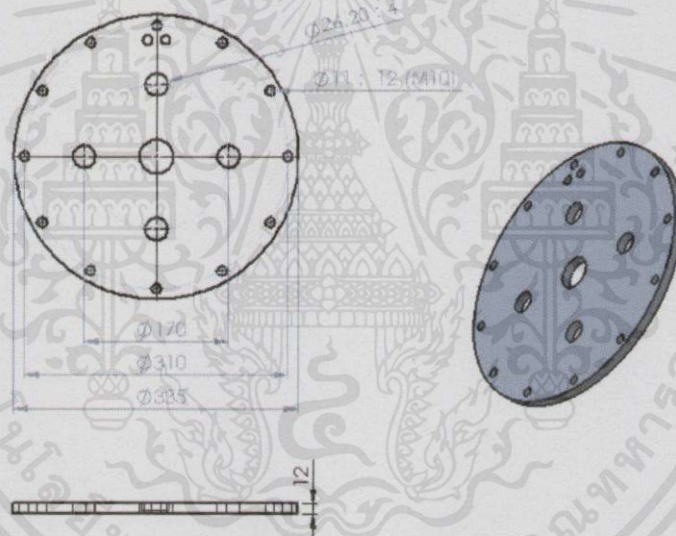
รูปที่ 3.21 ภาชนะสุญญากาศที่ออกแบบโดยโปรแกรม SolidWorks

เอกสารนี้เป็นเอกสาร ภาชนะสุญญากาศมีรูปร่างเป็นทรงกระบอกกลวงที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอก 335 มิลลิเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางด้านใน 257.4 มิลลิเมตร ซึ่งใช้หน้าแปลนมาตรฐาน ISO 250 ซึ่งแสดงในภาคผนวก (ค) ที่มีความสูง 300 มิลลิเมตร รอบภาชนะจะมีท่อยื่นออกมา 4 ท่อซึ่งมีความยาว

50 มิลลิเมตร แต่ละท่อจะมีขนาดแตกต่างกันไปและทำหน้าที่ต่างกัน โดยจากรูปที่ 3.21 หมายเลข 1 คือส่วนด้านหน้า ออกแบบไว้สำหรับใส่แผ่นรองรับหรือชิ้นงานที่จะเคลือบซึ่งใช้หน้าแปลนมาตรฐาน ISO160 แสดงในภาคผนวก (ค) หมายเลข 2 และ 3 คือส่วนที่ไว้มองดูลักษณะการเกิดของพลาสมา ขณะทำการสปัตเตอร์และอาจเป็นหน้าแปลนสำหรับติดตั้งเทอร์โบโมเลกุลปั๊ม โดยมีขนาดหน้าแปลนมาตรฐาน ISO 100 แสดงในภาคผนวก (ค) และหมายเลข 4 คือส่วนที่ปล่อยก๊าซออกจากภาชนะสุญญากาศ ซึ่งมีขนาดหน้าแปลนมาตรฐาน ISO 63 แสดงในภาคผนวก (ค)

3.4.2 ฝาปิดภาชนะสุญญากาศ

ฝาปิดภาชนะสุญญากาศมีลักษณะเป็นวงกลมให้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 335 มิลลิเมตร หนา 12 มิลลิเมตร มีเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่างรู 310 มิลลิเมตร ซึ่งรูมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 11 มิลลิเมตร จำนวน 12 รู อีกทั้งเจาะรูผ่านขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 26.2 มิลลิเมตร จำนวน 4 รู ซึ่งออกแบบมาสำหรับประกอบกับตัวชุดเตอร์ วาล์วเปิด-ปิดก๊าซ หรืออุปกรณ์ที่อาจจะต่อเข้ามาเพิ่มเติมในอนาคต และเจาะรูตรงกลางของฝาปิดขนาดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 มิลลิเมตรสำหรับใส่หัวแมกนีตรอนที่ออกแบบสร้าง

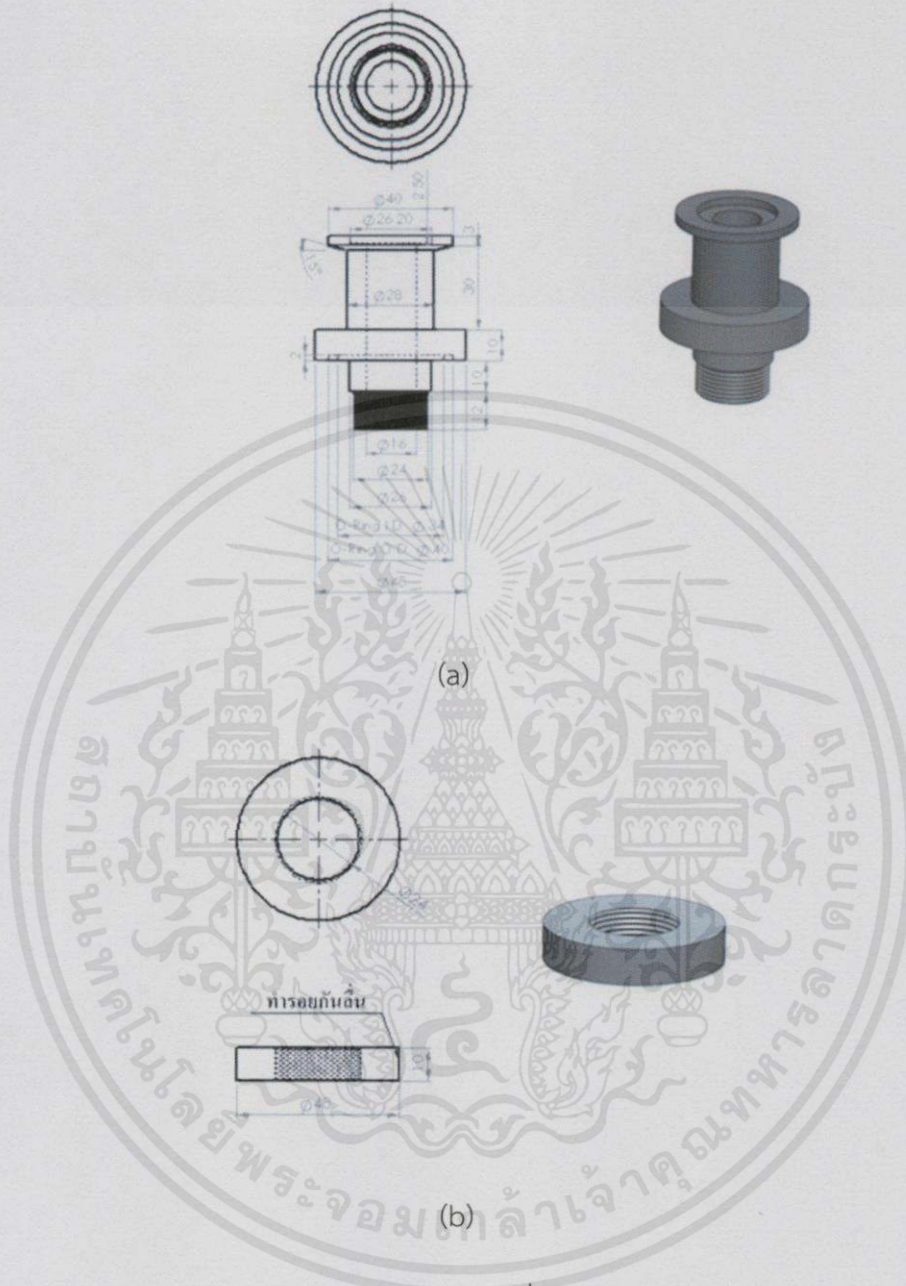


รูปที่ 3.22 ฝาปิดภาชนะสุญญากาศด้านบนที่ออกแบบโดยโปรแกรม SolidWorks

3.4.3 หน้าแปลนอเนกประสงค์

หน้าแปลนอเนกประสงค์มีลักษณะเป็นทรงกระบอกกลวงที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 28 มิลลิเมตร ด้านบนทรงกระบอกกลวงมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 มิลลิเมตร ซึ่งหน้าแปลนเป็นตามมาตรฐาน NW25 แสดงในภาคผนวก (ค) และมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 16 มิลลิเมตร สูงประมาณ 62 มิลลิเมตร ซึ่งจะอยู่ด้านนอกของฝาปิดภาชนะซึ่งแสดงในรูปที่ 3.23 (a) และจากรูปที่ 3.23 (b) คือ ส่วนตัวลอคหน้าแปลนอเนกประสงค์มีลักษณะถูกออกแบบให้เป็นทรงกระบอกกลวงที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 48 มิลลิเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 24 มิลลิเมตร หนา 10 มิลลิเมตร ซึ่งจะอยู่ด้านในของภาชนะสุญญากาศ เพื่อลอคหน้าแปลนอเนกประสงค์กับฝาปิดภาชนะสุญญากาศ อีก

ทั้งยังถูกออกแบบให้มีลักษณะพิเศษบริเวณผิวนอกในมีลักษณะผิวหยาบ เพื่อป้องกันการหมุนเข้าเกลียว

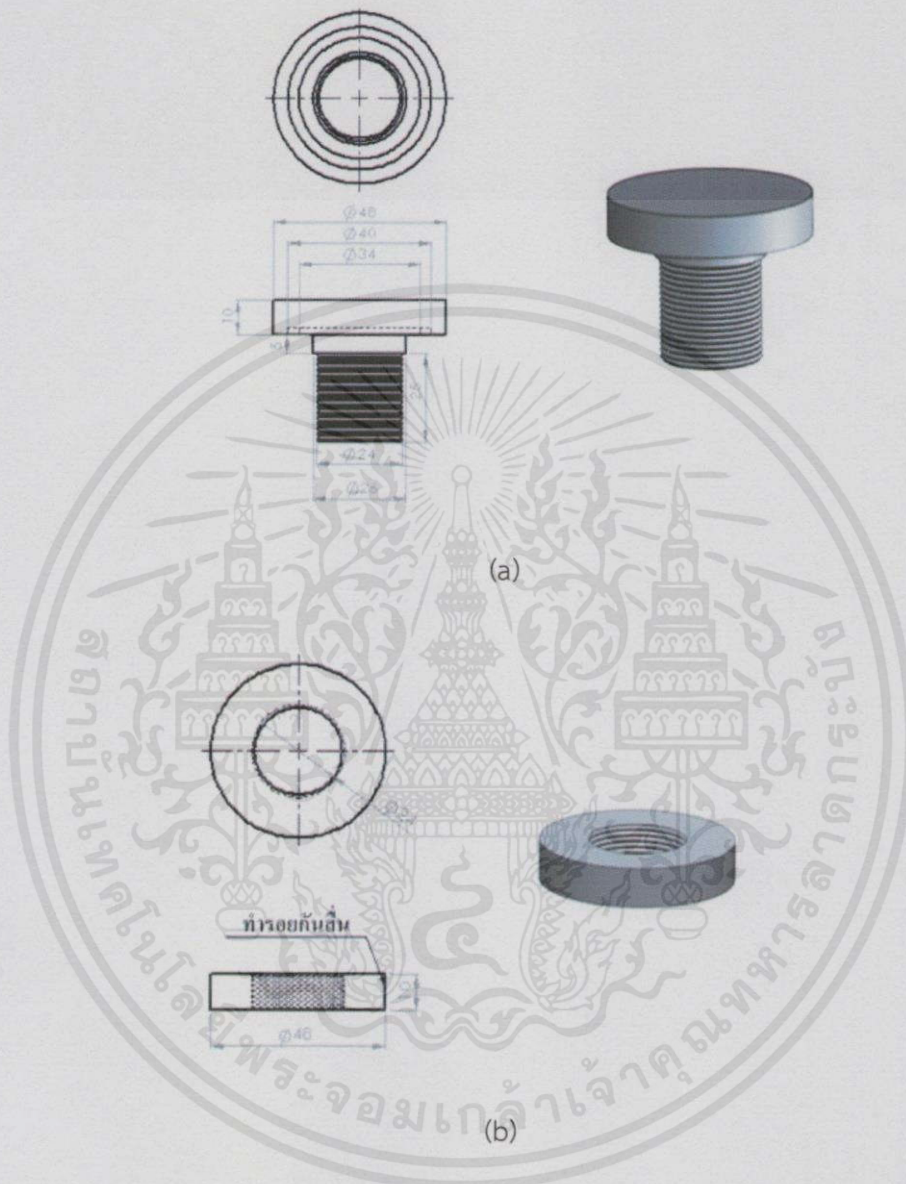


รูปที่ 3.23 ส่วนประกอบของหน้าแปลนอเนกประสงค์ที่ออกแบบโดยโปรแกรม SolidWorks โดยที่ (a) หน้าแปลนอเนกประสงค์ (b) ตัวล๊อคหน้าแปลนอเนกประสงค์

3.4.4 หน้าแปลนปิดรูอเนกประสงค์

หน้าแปลนปิดรูอเนกประสงค์ถูกออกแบบให้มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอก 2 ชั้นหรือคล้ายน็อต ชั้นบนมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 48 มิลลิเมตร หนา 10 มิลลิเมตร และส่วนชั้นล่างมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 26 มิลลิเมตร สูง 31 มิลลิเมตร ทำหน้าที่ปิดรูที่ไม่ใช้งานของฝาปิดภาชนะสุญญากาศ ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.24 (a) ส่วนตัวล๊อคหน้าแปลนปิดรูอเนกประสงค์มีลักษณะเป็นทรงกระบอกกลวงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 48 มิลลิเมตร และมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 24 มิลลิเมตร หนา

10 มิลลิเมตร ซึ่งจะอยู่ข้างในภาชนะสุญญากาศเพื่อล๊อคหน้าแปลนกับฝาปิดภาชนะสุญญากาศ ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.24 (b)

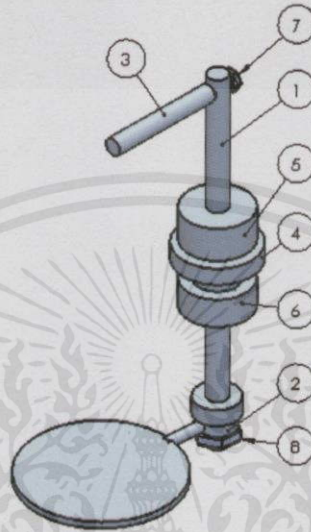


รูปที่ 3.24 ส่วนประกอบของหน้าแปลนปิดรูเอกประสงค์ที่ถูกออกแบบโดยโปรแกรม SolidWorks โดยที่ (a) หน้าแปลนปิดรูเอกประสงค์ (b) ตัวล๊อคหน้าแปลนปิดรูเอกประสงค์

3.4.5 ชัตเตอร์ (Shutter)

ชัตเตอร์ทำหน้าที่เป็นตัวกันแผ่นรองรับไม่ให้ถูกเคลือบในระหว่างเริ่มจุดพลาสมา ซึ่งในขั้นตอนนี้จะยังมีความไม่เสถียรของพลาสมาและการสปัตเตอริงสูงมาก ซึ่งหากไม่มีอุปกรณ์ชิ้นนี้ก็อาจจะทำให้ได้ชิ้นงานที่มีคุณสมบัติหรือคุณภาพไม่เป็นไปตามที่ต้องการเนื่องจากจะถูกเคลือบด้วยกระบวนการที่ไม่เสถียร โดยทางคณะผู้วิจัยได้ออกแบบชัตเตอร์ให้ลักษณะดังปรากฏในรูปที่ 3.25 โดยตัวชัตเตอร์จะมีส่วนประกอบย่อยอีก 8 ตัวตามหมายเลขดังนี้

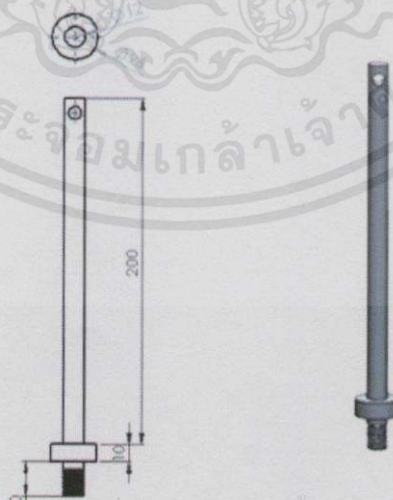
- | | |
|---------------------------|---------------------------|
| 1. เสาชัตเตอร์ | 5. น็อตด้านบน |
| 2. แผ่นกันการเคลื่อน | 6. น็อตด้านล่าง |
| 3. คันโยกเปิด-ปิดชัตเตอร์ | 7. น็อตล็อกคันโยก |
| 4. ตัวยึดชัตเตอร์ | 8. น็อตล็อกแผ่นกันเคลื่อน |



รูปที่ 3.25 ส่วนประกอบย่อยของชัตเตอร์ที่ออกแบบโดยโปรแกรม SolidWorks

3.4.5.1 เสาของชัตเตอร์

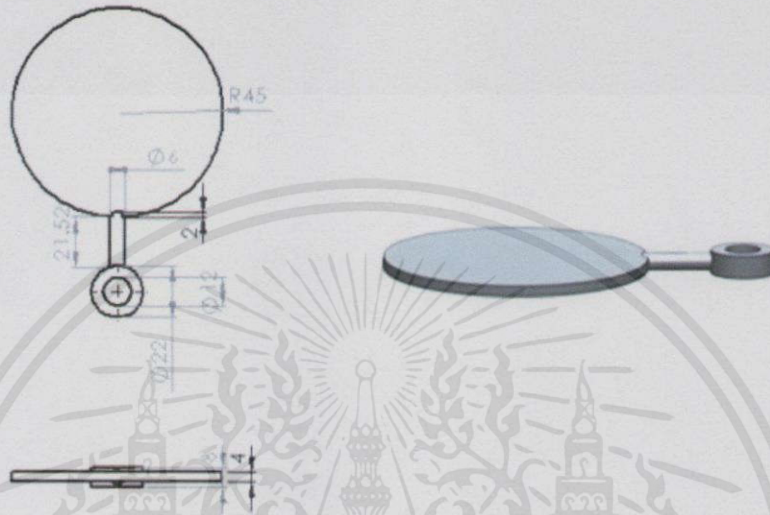
เสาของชัตเตอร์ถูกออกแบบให้มีลักษณะเป็นทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร สูง 200 มิลลิเมตร ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.26



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งรูปที่ 3.26 เสาของชัตเตอร์ที่ถูกรออกแบบโดยโปรแกรม SolidWorks นี้ที่มีการนำไปใช้

3.4.5.2 แผ่นกั้นการเคลือบ

ในอุปกรณ์ส่วนนี้ถูกออกแบบให้มีลักษณะเป็นแผ่นวงกลมบางที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 90 มิลลิเมตร หนา 4 มิลลิเมตร เป็นส่วนที่สำคัญที่สุดของชุดเตอร์ ในส่วนนี้เป็นส่วนที่กั้นการเคลือบฟิล์ม ในขณะที่กระบวนการเคลือบยังไม่มีประสิทธิภาพ



รูปที่ 3.27 แผ่นชุดเตอร์ที่ถูกออกแบบโดยโปรแกรม SolidWorks

3.4.5.3 คันโยกเปิด-ปิดชุดเตอร์

คันโยกเปิด-ปิดชุดเตอร์ถูกออกแบบให้มีลักษณะเป็นท่อตันที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ยาว 86 มิลลิเมตร โดยที่ปลายอีกด้านหนึ่งใช้น็อตเบอร์ M8 ล็อคไว้ติดกับชุดเตอร์

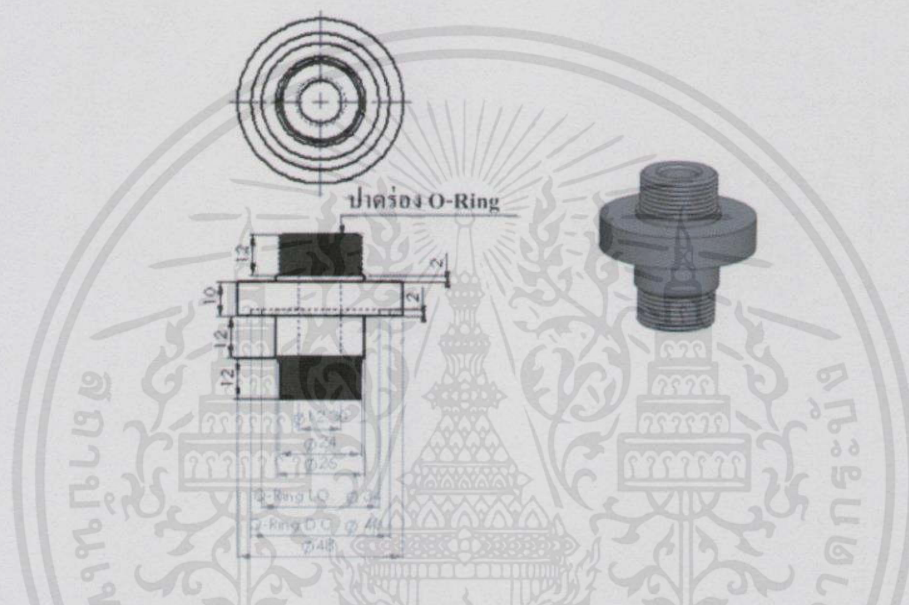


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่าการฉีกใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้อัปโหลดขึ้นเว็บไซต์หรือสื่อออนไลน์อื่นที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.28 แบบแปลนคันโยกเปิด-ปิดชุดเตอร์โดยโปรแกรม SolidWorks

3.4.5.4 ตัวยึดชุดเตอร์

ในส่วนนี้คณะผู้วิจัยได้ออกแบบให้มีลักษณะเป็นทรงกระบอกกลวงที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 48 มิลลิเมตร หนา 10 มิลลิเมตร และเจาะร่องโอริงด้านหนึ่งที่ติดกับฝาปิดภาชนะเพื่อไม่ให้อากาศเข้าไป และยังคงต่อท่อออกไปทั้งด้านบนและด้านล่างที่มีลักษณะเป็นเกลียวเพื่อล็อกกับน็อต ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 24 มิลลิเมตร สูงประมาณ 12 มิลลิเมตรปลายด้านหนึ่งจะปาดร่องโอริงเพื่อกันอากาศภายนอกไม่ให้เข้าไปในรอยต่อที่ยึดกับเสาชุดเตอร์ ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งต้องมีขนาดให้พอดีกับรูอเนกประสงค์ที่ฝาปิดภาชนะสุญญากาศ ซึ่งในส่วนนี้จะเป็นส่วนที่ยึดเสาชุดเตอร์กับฝาปิดภาชนะสุญญากาศ

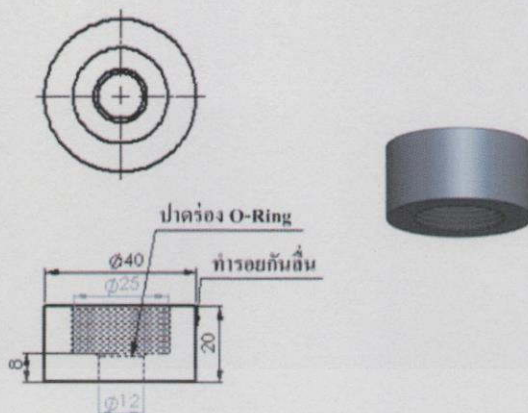


รูปที่ 3.29 แบบตัวยึดชุดเตอร์กับฝาปิดภาชนะสุญญากาศที่ถูกออกแบบโดยโปรแกรม SolidWorks

3.4.5.5 ตัวน็อตด้านบนและด้านล่างตัวชุดเตอร์

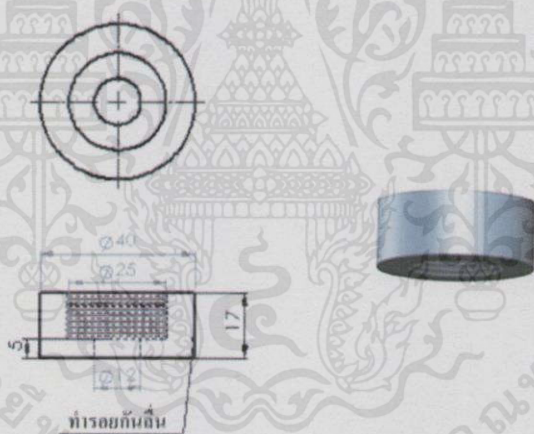
โดยในส่วนนี้ได้ถูกออกแบบให้มีลักษณะเป็นทรงกระบอกกลวงที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 มิลลิเมตร หนา 20 มิลลิเมตร ตรงกลางเจาะรูด้านหนึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร ลึกลงไป 12 มิลลิเมตร ที่มีลักษณะเป็นเกลียวและยังทำร่องโอริงเพื่อไม่ให้อากาศเข้าไปตรงรอยตัวยึดเสาเข้ากับเสาชุดเตอร์ และเจาะรูผ่านขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร เพื่อให้ใส่กับเสาชุดเตอร์ได้พอดี ดังแสดงในรูปที่ 3.30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.30 นี้อตล็คตัวยึดชุดเตอร์ด้านบนที่ออกแบบโดยโปรแกรม SolidWorks

ส่วนนี้อตล็คตัวยึดชุดเตอร์ด้านล่างนี้เป็นส่วนที่ล๊อคตัวยึดด้านล่างกับฝาปิดภาชนะสุญญากาศ ซึ่งคณะผู้วิจัยได้ออกแบบให้มีลักษณะเป็นทรงกระบอกกลวงที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 มิลลิเมตร หนา 17 มิลลิเมตร ตรงกลางเจาะรูด้านหนึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร ที่มีลักษณะเป็นเกลียวเพื่อล๊อคตัวยึดชุดเตอร์ และเจาะรูผ่านขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.3 มิลลิเมตร เพื่อให้สามารถใส่เสาชุดเตอร์ได้พอดี ดังแสดงในรูปที่ 3.31

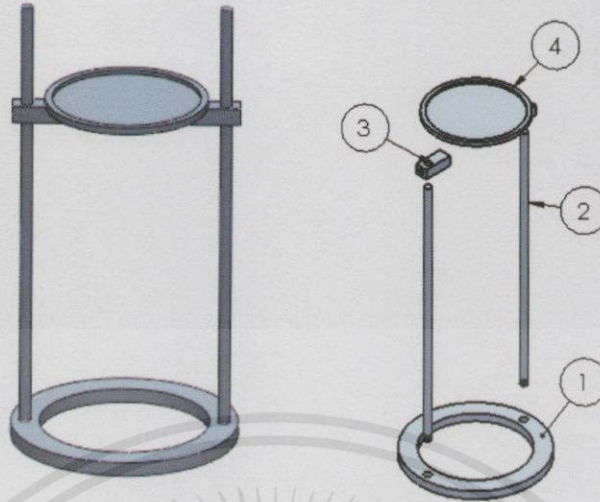


รูปที่ 3.31 นี้อตล็คตัวยึดชุดเตอร์ด้านล่างที่ออกแบบโดยโปรแกรม SolidWorks

3.4.6 จานรองแผ่นรองรับหรือชิ้นงานที่จะเคลือบ (Substrate holder)

จานรองแผ่นรองรับเป็นส่วนที่อยู่ในภาชนะสุญญากาศ ทำหน้าที่เป็นฐานใส่แผ่นรองรับหรือชิ้นงานที่จะเคลือบ ซึ่งทางคณะผู้วิจัยได้ออกแบบมาให้สามารถยกออกมาจากภาชนะสุญญากาศเพื่อปรับระยะห่างจะเข้ากับชิ้นงานที่จะเคลือบได้ง่าย อีกทั้งจานรองแผ่นรองรับยังทำหน้าที่เป็นขั้วแอมโนดในระบบดีซีแมกเนตรอนสปัตเตอริง ซึ่งเราได้ออกแบบมาดังรูปที่ 3.32 โดยจะประกอบไปด้วย 4 ส่วนดังนี้

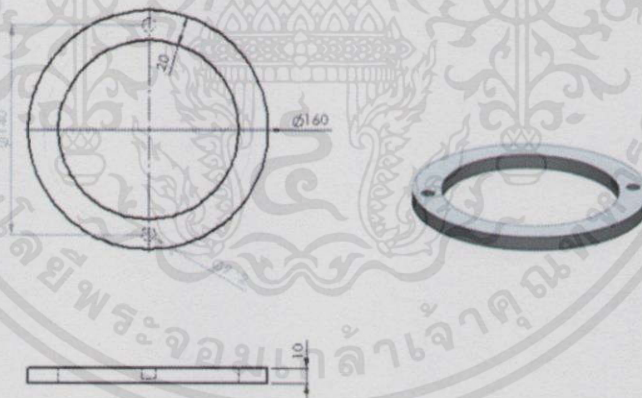
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.32 จานรองแผ่นรองรับที่ออกแบบโดยโปรแกรม SolidWorks

3.4.6.1 ฐานยึดเสาของจานรองแผ่นรองรับ

หมายเลข 1 จะเป็นชิ้นส่วนที่ยึดกับเสาสองข้างที่ขนาดเท่ากันดังปรากฏในรูปที่ 3.33 ซึ่งมีลักษณะเป็นวงแหวนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอก 160 มิลลิเมตร และมีเส้นผ่านศูนย์กลางด้านใน 120 มิลลิเมตร หนา 10 มิลลิเมตร และมีเจาะรู 2 รูที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.33 ฐานยึดเสาของจานรองแผ่นรองรับที่ออกแบบโดยโปรแกรม SolidWorks

3.4.6.2 เสาจานรองแผ่นรองรับ

โดยในส่วนนี้เป็นเสา 2 แท่ง ซึ่งถูกออกแบบมาเพื่อเป็นเสายึดจานรองแผ่นรองรับและสามารถปรับระยะห่างระหว่างเข้ากับแผ่นรองรับหรือชิ้นงานที่จะเคลือบได้ตามเงื่อนไขของการทดลอง ซึ่งมีลักษณะเป็นทรงกระบอกยาวที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร ยาว 320 มิลลิเมตร ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.34

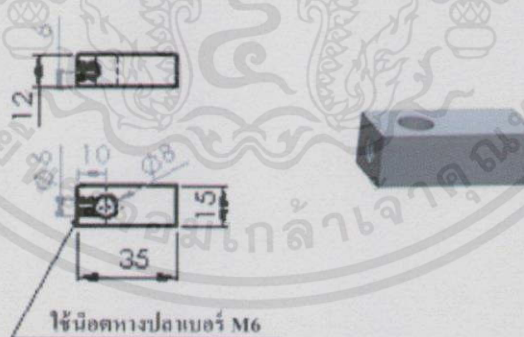
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.34 เสาของฐานแผ่นรองรับที่ออกแบบโดยโปรแกรม SolidWorks

3.4.6.3 ตัวปรับระดับ

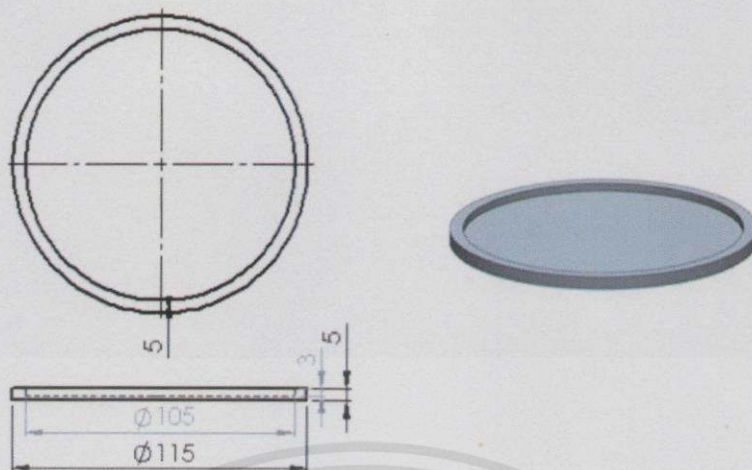
ตัวปรับระดับถูกออกแบบให้ทำหน้าที่ปรับระดับระยะห่างระหว่างเข้ากับแผ่นรองรับ และรองรับจานใส่แผ่นรองรับ ซึ่งมีลักษณะเป็นกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้ากว้าง 15 มิลลิเมตร ยาว 35 มิลลิเมตร หนา 12 มิลลิเมตร และเจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร เพื่อใส่เสาและยึดด้วยน็อตทางปลาเบอร์ M6 ตามระยะที่เราต้องการ



รูปที่ 3.35 ตัวปรับระดับของแผ่นรองรับที่ออกแบบโดยโปรแกรม SolidWorks

3.4.6.4 จานใส่แผ่นรองรับ

จานใส่แผ่นรองรับสำหรับใส่แผ่นรองรับหรือชิ้นงานที่จะเคลือบเพื่อรองรับอะตอมของเป้าที่หลุดออกมาจากเป้าที่ถูกกระทบด้วยไอออนที่มีพลังงานสูง ซึ่งทางคณะผู้วิจัยได้ออกแบบให้เป็นลักษณะจานที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 115 มิลลิเมตร หนา 5 มิลลิเมตร ทำร่องลึกลงไปมีลักษณะเป็นวงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 105 มิลลิเมตร ลึก 3 มิลลิเมตรดังแสดงในรูปที่ 3.36

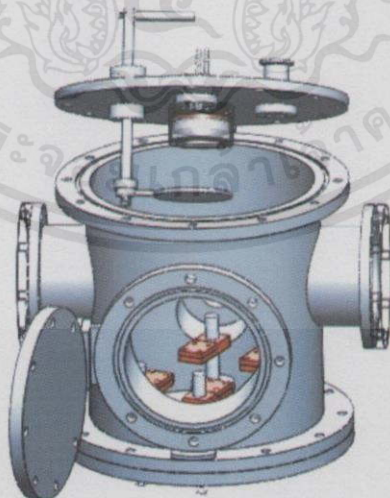


รูปที่ 3.36 งานใส่แผ่นรองรับที่ออกแบบโดยโปรแกรม SolidWorks

3.5 การออกแบบสร้างระบบเทอร์มอลอีวาโพเรชัน (Thermal evaporation system)

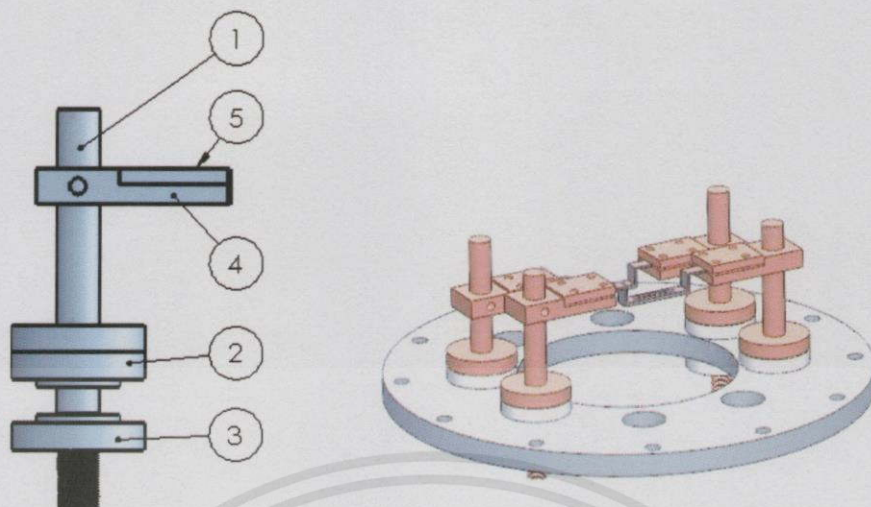
การออกแบบระบบเทอร์มอลอีวาโพเรชันเพื่อใช้งานร่วมกับระบบดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริงในสถานะสุญญากาศเดียวกัน โดยทางคณะผู้วิจัยเรียกว่า ระบบไฮบริด (Hybrid system) ซึ่งถูกแสดงดังรูปที่ 3.37

ระบบเทอร์มอลอีวาโพเรชัน คือ ระบบที่ทำให้สารสถานะของแข็งกลายเป็นก๊าซ ซึ่งการระเหยเป็นไอโดยใช้ความร้อนสูงเพื่อเคลือบบนแผ่นรองรับ ดังแสดงในรูปที่ 3.38 ซึ่งในระบบนี้ประกอบด้วย หมายเลข 1 เสาอีวาโพเรชัน หมายเลข 2 ตัวแยกขั้วด้านใน หมายเลข 3 ตัวแยกขั้วด้านนอก หมายเลข 4 และหมายเลข 5 ตัวล็อคบีทสาร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

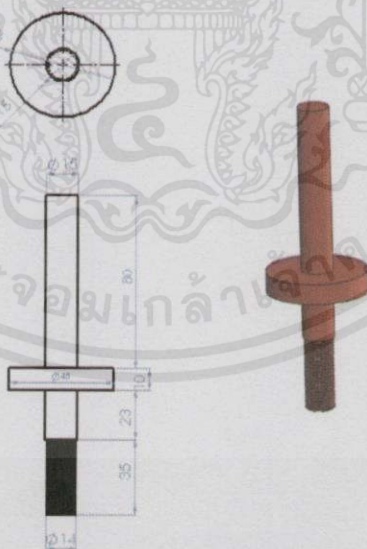
รูปที่ 3.37 ระบบไฮบริดที่รวมทั้งระบบดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริงและเทอร์มอลอีวาโพเรชันเข้าด้วยกันที่ถูกออกแบบโดยโปรแกรม SolidWorks



รูปที่ 3.38 เทอร์มอลอีวาโพเรชันที่ออกแบบโดยโปรแกรม SolidWorks

3.5.1 เสาอีวาโพเรชัน

เสาอีวาโพเรชันถูกออกแบบที่มีลักษณะเป็นท่อกระบอกตันที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร สูง 90 มิลลิเมตร และใช้วัสดุทองแดงในการสร้าง ซึ่งในส่วนนี้จะอยู่ด้วยในภาชนะสุญญากาศ ส่วนอีกด้านหนึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 14 มิลลิเมตร สูง 35 มิลลิเมตร และมีลักษณะเป็นเกลียวเพื่อล๊อคกับน็อตให้ติดกับฝาปิดส่วนล่างของภาชนะสุญญากาศ ดังรูปที่ 3.39

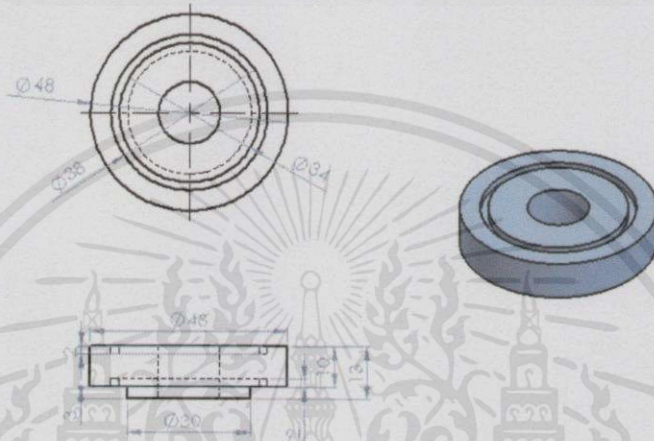


รูปที่ 3.39 เสาตัวจับโบทที่ออกแบบโดยโปรแกรม SolidWorks

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

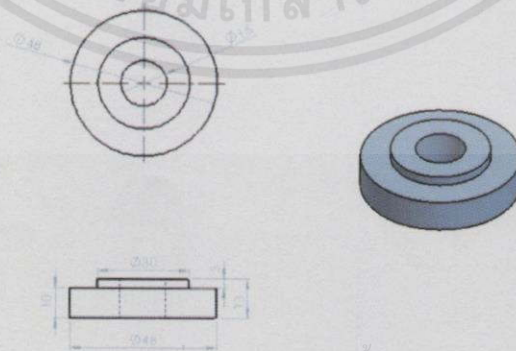
3.5.2 ตัวแยกขั้วด้านในและตัวแยกขั้วด้านนอก

ในส่วนนี้เป็นส่วนที่ทำหน้าที่แยกขั้วไฟฟ้าระหว่างขั้วแอโนดและแคโทดของระบบเทอร์โมลิวาโทพรเรชัน โดยคณะผู้วิจัยได้ออกแบบให้มีลักษณะทรงกระบอกกลวงที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 48 มิลลิเมตร หนาประมาณ 90 มิลลิเมตร 10 มิลลิเมตร และอีกด้านหนึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร หนา 3 มิลลิเมตร ซึ่งจะพอดีกับรูที่เจาะบนฝาปิดภาชนะด้านล่าง และทำร่องโอรังเพื่อกันไม่ให้อากาศเข้าไปในภาชนะสุญญากาศ โดยในอุปกรณ์ชิ้นนี้จะใช้วัสดุที่เป็นฉนวนไฟฟ้าในการสร้าง



รูปที่ 3.40 ตัวแยกขั้วด้านในที่ออกแบบโดยโปรแกรม SolidWorks

สำหรับตัวแยกขั้วด้านนอกนั้นทำหน้าที่แยกขั้วไฟฟ้าระหว่างขั้วแอโนดและแคโทดอยู่บริเวณด้านนอกภาชนะสุญญากาศ ซึ่งถูกออกแบบให้มีลักษณะทรงกระบอกกลวงที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 48 มิลลิเมตร หนาประมาณ 90 มิลลิเมตร 10 มิลลิเมตร และอีกด้านหนึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร หนา 3 มิลลิเมตร ซึ่งออกแบบให้มีขนาดเท่ากับรูที่เจาะบนฝาปิดภาชนะด้านล่าง และใช้น็อตล็อกท้ายเข้ามาอีกครั้ง โดยในอุปกรณ์ชิ้นนี้จะใช้วัสดุที่เป็นฉนวนไฟฟ้าในการสร้าง ดังแสดงในรูปที่ 3.41

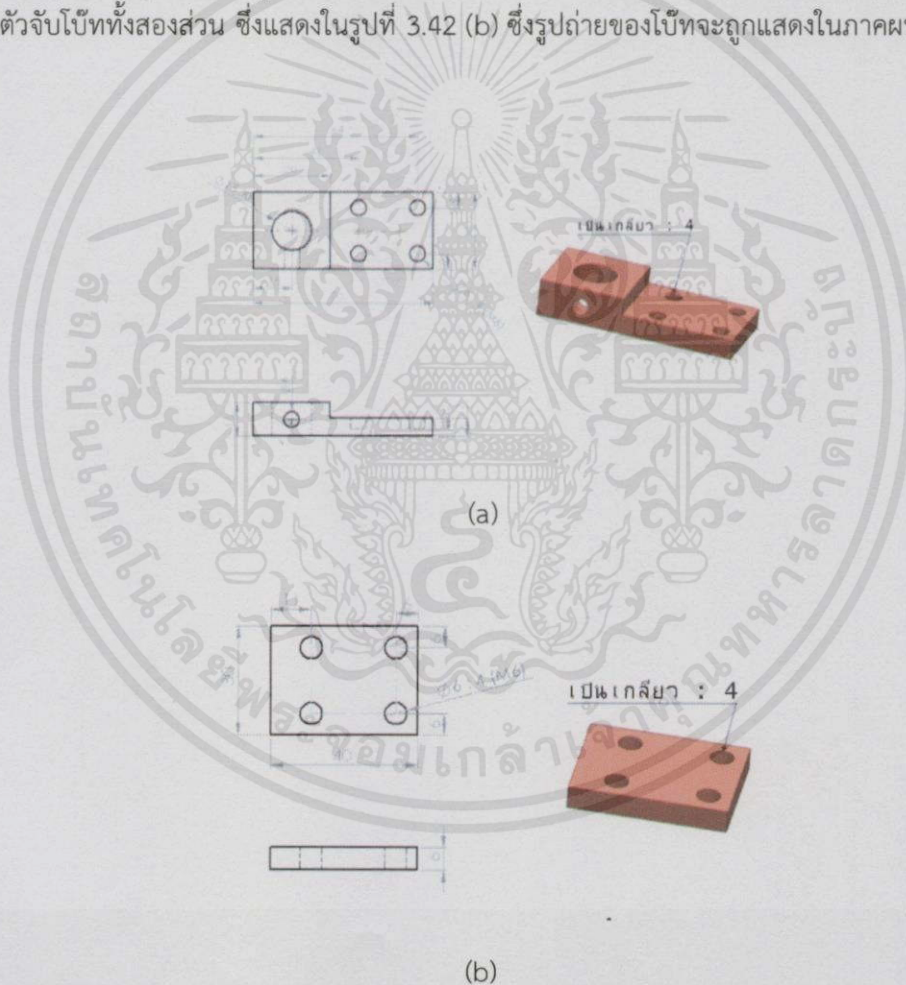


รูปที่ 3.41 ตัวแยกขั้วด้านนอกที่ออกแบบโดยโปรแกรม SolidWorks

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังห้ามเผยแพร่ข้อมูลนี้ไปยังบุคคลอื่นที่มิได้มีการนำไปใช้

3.5.3 ตัวล๊อคโบ๊ท

เป็นส่วนที่สำคัญที่สุด ซึ่งถูกออกแบบให้มีลักษณะเป็นกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า 2 ชั้นประกบกัน และใช้วัสดุในการขึ้นรูปที่นำไฟฟ้าและความร้อนได้ดีที่สุด เช่น ทองแดง เพื่อล๊อคโบ๊ทในส่วนแรกมีลักษณะเหมือนตัว L ที่ชั้นแรกมีความกว้าง 30 มิลลิเมตร ยาว 30 มิลลิเมตร หนา 13 มิลลิเมตร ตรงกลางเจาะรูผ่านที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 15.3 มิลลิเมตร เพื่อใส่กับเสา และด้านข้างก็เจาะรูทะลุผ่านที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ลักษณะเป็นเกลียวเพื่อจะใช้ น็อตทางปลาถือตัวจับโบ๊ทกับเสาที่ระดับตามเงื่อนไขการทดลอง ส่วนชั้นที่สองมีความกว้าง 30 มิลลิเมตร ยาว 40 มิลลิเมตร หนา 7 มิลลิเมตร อีกทั้งเจาะรูที่อยู่ตรงบริเวณสี่มุมแต่ละรูมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ลึก 4 มิลลิเมตร มีลักษณะเป็นเกลียว ซึ่งถูกแสดงในรูปที่ 3.42 (a) ส่วนที่สองมีลักษณะเป็นกล่องสี่เหลี่ยมที่มีความกว้าง 30 มิลลิเมตร ยาว 40 มิลลิเมตร หนา 6 มิลลิเมตร ในส่วนนี้เราได้เจาะรูสี่รูทะลุผ่านอยู่ตรงบริเวณสี่มุมแต่ละรูมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร มีลักษณะเป็นเกลียว เพื่อใช้หนีตทางปลาถือตัวล๊อคตัวจับโบ๊ททั้งสองส่วน ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.42 (b) ซึ่งรูปถ่ายของโบ๊ทจะถูกแสดงในภาคผนวก (จ)



รูปที่ 3.42 ตัวล๊อคโบ๊ทที่ออกแบบโดยโปรแกรม SolidWorks

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครู ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 ขั้นตอนการเคลือบฟิล์มบางทองแดงด้วยวิธีการตีซีแมกนีตรอนสเปตเตอริง

สำหรับการออกแบบสร้างหัวแมกนีตรอนนั้น เมื่อทำการสร้างได้สำเร็จตามเงื่อนไขที่กำหนดขึ้นแล้ว ทางคณะผู้วิจัยมีความต้องการที่จะทดสอบหัวที่ออกแบบสร้างมานี้ เพื่อทดสอบการทำงานของหัวที่ได้รับมาสามารถทำให้เกิดกระบวนการสเปตเตอริง และเคลือบฟิล์มบางลงในชิ้นงานได้ตามปกติ โดยในขั้นตอนทางคณะผู้วิจัยได้ทดสอบหัวใหม่นี้กับเป้าที่เป็นโลหะ โดยในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงวิธีการทำความสะอาดแผ่นรองรับก่อนทำการเคลือบ หลังจากนั้นจะกล่าวถึงขั้นตอนการเปิด-ปิดระบบตีซีแมกนีตรอนสเปตเตอริง และสุดท้ายจะอธิบายถึงเงื่อนไขในการเคลือบฟิล์มบาง

3.6.1 ขั้นตอนการทำความสะอาดของแผ่นรองรับ

1. ใช้กระดาษลวดที่มีขนาดหนา 1 มิลลิเมตร ตัดให้เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีขนาด 10×20 มิลลิเมตร
2. ทำความสะอาดผิวหน้ากระดาษลวด
 - 2.1 ทำความสะอาดด้วยน้ำยาล้างจานและน้ำเปล่าบริสุทธิ์
 - 2.2 ทำความสะอาดด้วยอะซิโตนพร้อมทั้งใช้เครื่องอัลตราโซนิคช่วยในการสั่นเป็นเวลา 5 นาที
 - 2.3 ทำความสะอาดด้วยเอทานอลพร้อมทั้งใช้เครื่องอัลตราโซนิคช่วยในการสั่น เป็นเวลา 5 นาที
 - 2.4 ทำความสะอาดด้วยน้ำปลอดประจุพร้อมทั้งใช้เครื่องอัลตราโซนิคช่วยในการสั่นทำความสะอาดเป็นเวลา 10 นาที
 - 2.5 เป่ากระจกด้วยก๊าซไนโตรเจนให้แห้งจากนั้นนำกระดาษฟรอยด์มาปิดที่ขอบของกระดาษลวดประมาณ 1 ใน 4 ของกระจก เพื่อสังเกตการณ์เปลี่ยนแปลงของกระดาษลวดเมื่อถูกเคลือบแล้ว

3.6.2 ขั้นตอนการเคลือบฟิล์มบางทองแดง

1. ติดตั้งหัวแมกนีตรอนด้วยเป้าในระบบตีซีการสเปตเตอริงที่ฝาปิดด้านบนภาชนะสุญญากาศและใส่กระดาษลวดเข้าไปในช่องทางใส่แผ่นรองรับ



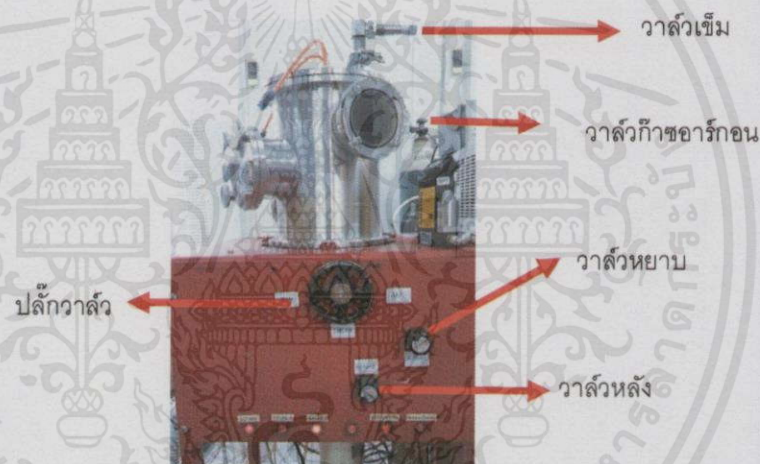
รูปที่ 3.43 แสดงภาพการติดตั้งหัวแมกนีตรอนสเปตเตอริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ 2. เปิดระบบน้ำในการระบายความร้อนของปั๊มแพรโอและหัวแมกนีตรอนทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.44 แสดงปั๊มเปิด-ปิดของอุปกรณ์ส่วนต่างๆของระบบดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์

3. เปิดปั๊มกลโรตารี ตามด้วยวาล์วหลังเพื่อสูบลอากาศออกในบริเวณที่สูบลอากาศประมาณ 15 นาที
4. ปิดวาล์วหลัง แล้วเปิดเครื่องวัดความดันเพื่อดูความดันภายในภาชนะสุญญากาศ



รูปที่ 3.45 แสดงวาล์วต่างๆที่อยู่ในระบบดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์

5. เปิดวาล์วหยาบเพื่อสูบลอากาศออกจากภาชนะสุญญากาศจนความดันภายในภาชนะสุญญากาศมีค่าน้อยกว่า 6×10^{-2} ทอร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้...ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

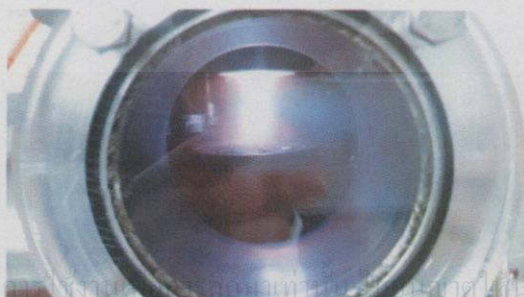
รูปที่ 3.46 เครื่องอ่านความดันภายในภาชนะสุญญากาศแบบเข็ม

6. ปิดวาล์วหยุด แล้วเปิดวาล์วหลังเพื่อสูบลำอากาศออกพร้อมกับปั๊มแพร่ไอ
7. เปิดปลั๊กวาล์วเพื่อสูบลำอากาศออกจากภาชนะสุญญากาศ โดยจะทำงานร่วมกันระหว่างปั๊มแพร่ไอและปั๊มกลโรตารีจนความดันภายในภาชนะสุญญากาศมีค่าน้อยกว่า 5×10^{-5} ทอร์
8. เปิดวาล์วก๊าซอาร์กอนที่ถังอาร์กอน จากนั้นเปิดระบบควบคุมการไหลของก๊าซด้วยเครื่องควบคุมการไหลของก๊าซโดยมวล
9. เปิดวาล์วเข็มเพื่อให้ก๊าซอาร์กอนเข้าไปในภาชนะสุญญากาศ โดยเปิดทิ้งไว้ 2 นาที จากนั้นจึงปิดวาล์วเข็มแล้วปล่อยให้ก๊าซภายในภาชนะถูกดูดออกมาอีก 2 นาที โดยทำขั้นตอนนี้ 3 ครั้ง
10. ค่อยๆปรับปลั๊กวาล์วเพื่อควบคุมให้อัตราการปั๊มสัมพันธ์กับอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน
11. จากนั้นเปิดแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง และปรับความต่างศักย์ที่จะจ่ายเข้าไปในระบบ โดยมีค่าเริ่มต้น 350 - 400 โวลต์
12. กดปุ่ม output ที่แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อจ่ายไฟฟ้าเข้าไปในระบบดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอร์ จะทำให้เกิดการเปล่งแสงดิซชาร์จ
13. ปรับปลั๊กวาล์วและแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไปตามเงื่อนไขของการทดลอง โดยที่ชัตเตอร์จะยังไม่ถูกเปิดให้ชิ้นงานถูกเคลือบ



รูปที่ 3.47 แสดงการปรับเปลี่ยนความดันของก๊าซและแรงดันไฟฟ้าให้เป็นไปตามเงื่อนไข

14. เมื่อควบคุมระบบตามเงื่อนไขของการทดลองให้คงที่ได้แล้ว จากนั้นทำการพรี-สปีดเตอร์ (Pre-sputter) ทิ้งไว้ประมาณ 10 นาที จากนั้นทำการเปิดชัตเตอร์เพื่อทำการการเคลือบชิ้นงานตามเงื่อนไขของเวลาในการทดลอง

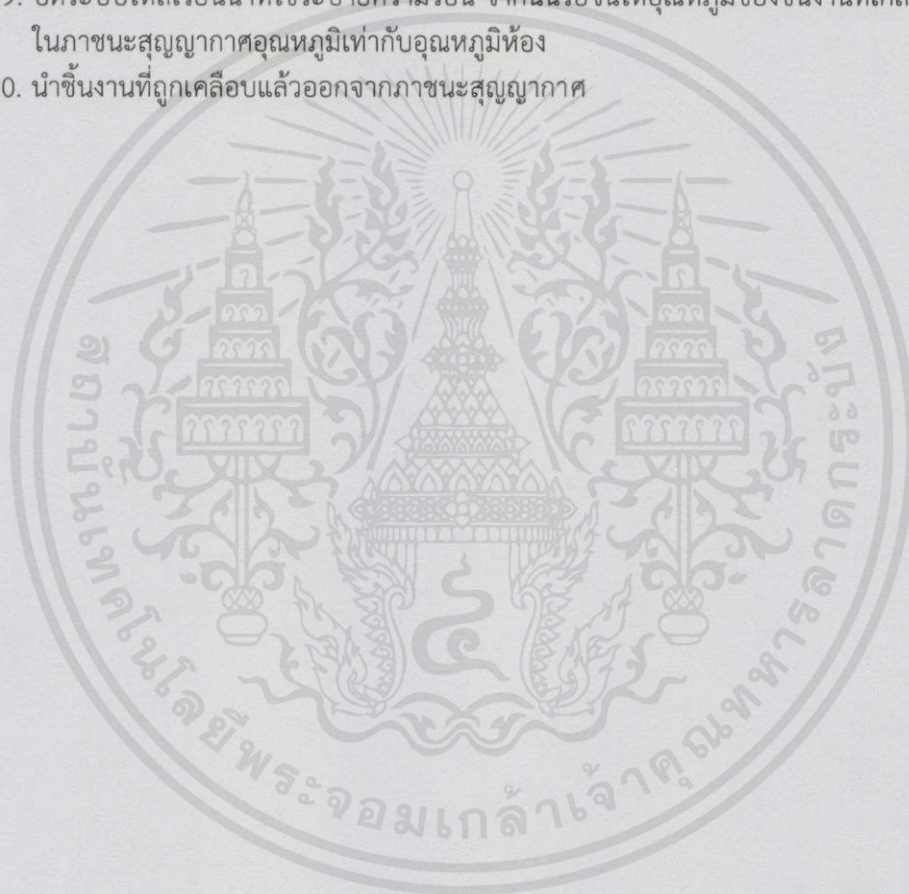


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ... ใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.48 แสดงเป้าหมายที่กำลังถูกสปีดเตอร์ด้วยหัวแมกนีตรอนสปีดเตอร์ที่ถูกสร้างขึ้น

15. เมื่อทำการเคลือบชิ้นงานด้วยวิธีซีซีแมกนีตรอนสปีดเตอร์ริงครบในเวลาที่ต้องการแล้ว จากนั้นกดปุ่ม output ที่แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแล้วหมุนปุ่มปรับแรงดันไฟฟ้าให้กลับมาที่ค่าเริ่มที่ 0 โวลต์ หลังจากนั้นให้ทำการปิดเครื่องจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง
16. ปิดระบบการป้องกัน โดยการปิดวาล์วเข็มให้สนิท จากนั้นปิดเครื่องควบคุมการไหลของก๊าซโดยมวล
17. ปิดปลั๊กวาล์ว แล้วปิดปั๊มแพรโอเพื่อหยุดตม้ำมันในปั๊ม โดยในขั้นตอนนี้วาล์วหลังจะยังไม่ถูกปิด
18. รอกน้ำมันของปั๊มแพรโอมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง โดยใช้เครื่องวัดอุณหภูมิด้วยรังสีอินฟราเรดในการตรวจสอบหลังจากนั้นทำการปิดปั๊มโรตารี
19. ปิดระบบไหลเวียนน้ำที่ไซร์บายความร้อน จากนั้นรอกจนให้อุณหภูมิของชิ้นงานที่เคลือบที่อยู่ในสถานะสุญญากาศอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง
20. นำชิ้นงานที่ถูกเคลือบแล้วออกจากภาชนะสุญญากาศ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ผลการทดลองของงานวิจัยนี้เป็นการทดสอบการทำงานของหัวแมกนีตรอนที่ออกแบบสร้างด้วยการสเป็คเตอรืงฟิล์มบางทองแดงตามเงื่อนไขที่กำหนดขึ้นโดยจะถูกแบ่งเป็น 5 ส่วน คือ (i) หัวแมกนีตรอนขนาดเล็กที่ออกแบบสร้าง (ii) ความเข้มของสนามแม่เหล็กบริเวณหน้าผิวเป้าทั้ง 3 แบบ (iii) ลักษณะเฉพาะของความเข้มของสนามแม่เหล็กบริเวณหน้าผิวเป้าที่มีผลต่อกระแสดีสชาร์จ (iv) อิทธิพลความเข้มของสนามแม่เหล็กที่บริเวณหน้าผิวเป้าที่มีผลต่อความเข้มของพลาสมา(v) การวิเคราะห์คุณสมบัติทางด้านฟิสิกส์ของฟิล์มบางทองแดงซึ่งแบ่งย่อยได้ 3 ผลการทดลอง โดยประกอบไปด้วยการจัดเรียงของโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางทองแดง ผลของสนามแม่เหล็กที่บริเวณหน้าผิวเป้าที่มีผลต่อความราบเรียบของพื้นผิวฟิล์มบางทองแดง และอิทธิพลของสนามแม่เหล็กบริเวณหน้าผิวเป้าที่มีผลต่อขนาดของผลึกและความหนาของฟิล์มบางทองแดง ซึ่งจะถูกอธิบายดังนี้

4.1 หัวแมกนีตรอนที่ออกแบบสร้าง

หัวแมกนีตรอนที่สร้างขึ้นได้มีการแก้ไขและปรับปรุงหลายครั้งจนสามารถนำมาใช้งานได้ดังปรากฏในรูปที่ 4.1 เป็นภาพถ่ายแสดงหัวแมกนีตรอนที่ถูกสร้างขึ้นมาสำเร็จแล้วโดยมีขนาดเป็นไปตามแบบที่ทางคณะผู้วิจัยได้ทำการออกแบบไว้



รูปที่ 4.1 รูปถ่ายจริงหัวแมกนีตรอนที่ถูกสร้างขึ้นมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนประกอบย่อยต่างๆของหัว ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.2 โดยในส่วนรูป (a) เป็นตัวยึดเป้าที่ใช้ยึดเป้าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว หนา 0.125 นิ้ว ให้ติดกับแผ่นระบายความร้อนเพื่อระบายความร้อนให้กับเป้าในขณะที่ทำการสปัตเตอร์เพื่อป้องกันการเกิดความร้อนที่อาจเกิดขึ้นจากความร้อนของการระดมยิงด้วยอนุภาคที่มีพลังงานสูง (b) เป็นแผ่นระบายความร้อนที่ใช้ระบายความร้อนออกจากเป้าและหัวแมกนีตรอนโดยน้ำจะไหลเวียนภายในแผ่นนี้และเกิดการถ่ายเทความร้อนออกจากหัว และอีกหนึ่งหน้าที่สำคัญของแผ่นระบายความร้อนก็คือ ทำหน้าที่ยึดส่วนประกอบทั้งหมดของหัวให้ติดกับฝาด้านบนของภาชนะสุญญากาศของระบบดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ (c) ตลับทองแดงใส่แม่เหล็ก โดยตลับทองแดงถูกสร้างขึ้นมาให้สามารถใช้กับทั้งแม่เหล็กตัวในและตัวนอกได้หลายขนาด โดยที่แม่เหล็กตัวในทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 10 มิลลิเมตรและสูงไม่เกิน 14 มิลลิเมตร และใส่แม่เหล็กตัวนอกวงแหวนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 29 มิลลิเมตร ถึง 50 มิลลิเมตร (d) เทปลอนแยกขั้วไฟฟ้าตัวด้านนอกและตัวด้านใน โดยที่ตัวแยกขั้วไฟฟ้าทั้งสองตัวนี้จะทำหน้าที่แยกขั้วไฟฟ้าในระบบดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ ซึ่งตัวแยกขั้วไฟฟ้านี้ทำจากวัสดุที่เป็นฉนวนไฟฟ้า (e) กราวด์ซิลด์ จะทำหน้าที่ควบคุมให้เกิดการสปัตเตอร์ที่บริเวณหน้าผิวเป้าเท่านั้น เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นต่อชิ้นส่วนอื่นๆของหัว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(c)



(d)



(e)

รูปที่ 4.2 แสดงภาพถ่ายส่วนประกอบย่อยของหัวแมกนีตรอนที่ถูกสร้างขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ความเข้มของสนามแม่เหล็กบริเวณหน้าผิวเป้า

โดยในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะออกแบบสร้างหัวดีซีแมกนีตรอนที่มีขนาดเล็กแล้วจากนั้นจะนำหัวที่สร้างมาทดสอบการเคลือบฟิล์มบาง ฉะนั้นลักษณะเฉพาะของสนามแม่เหล็กของหัวแมกนีตรอนที่หน้าผิวเป้าจึงเป็นตัวแปรที่สำคัญที่จะต้องทำการวัดเมื่อทำการสร้างหัวแมกนีตรอนสำเร็จแล้ว

4.2.1 แม่เหล็กตัวนอกและแม่เหล็กตัวใน

สำหรับแม่เหล็กที่ใช้กับหัวแมกนีตรอนที่ออกแบบสร้างนั้นเป็นแม่เหล็กนีโอไดเมียม ไอรอน โบรอน (Neodymium iron boron) เพราะแม่เหล็กประเภทนี้จะมีแรงดึงดูดสูง มีประสิทธิภาพและคุณสมบัติสูงที่สุดในประเภทของแม่เหล็กถาวรสำหรับใช้กับงานวิจัยนี้ โดยตัวแรกที่ใส่ลงในช่องตรงกลางของตลับทองแดงสามารถใส่แม่เหล็กมีรูปร่างเป็นทรงกระบอกโดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางได้หลายขนาดตามที่หาซื้อได้ในประเทศ เช่น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร สูง 10 มิลลิเมตร หรือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร มีสูง 10 มิลลิเมตร หรือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร มีความสูง 10 มิลลิเมตร ซึ่งแสดงตัวอย่างในรูปที่ 4.3 (a)



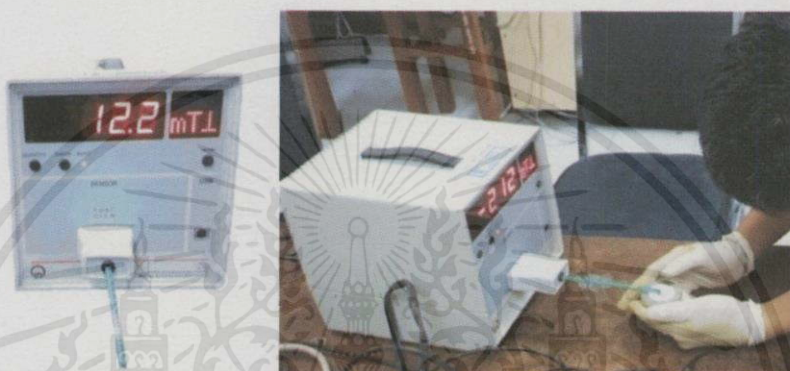
รูปที่ 4.3 ตัวอย่างแม่เหล็กนีโอไดเมียม ไอรอน โบรอนที่ใช้กับหัวแมกนีตรอน โดยที่ (a) แม่เหล็กตัวใน (b) แม่เหล็กตัวนอกตัวนอก

โดยที่ แม่เหล็กชนิดนี้สามารถทนความร้อนได้ถึงอุณหภูมิประมาณ 80°C ส่วนแม่เหล็กอีกตัวที่ใส่ลงในช่องด้านนอกของตลับทองแดงสามารถใส่แม่เหล็กมีรูปร่างเป็นวงแหวนได้หลายขนาดโดยสามารถใส่แม่เหล็กรูปร่างวงแหวนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในตั้งแต่ 29 มิลลิเมตร จนถึงเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 50 มิลลิเมตร มีความหนาตั้งแต่ 5-14 มิลลิเมตร แม่เหล็กทั้งสองแบบจะถูกติดตั้งลงในช่องใส่ตลับแม่เหล็กให้สลับขั้วกันเพื่อให้เส้นแรงแม่เหล็กเชื่อมปิดระหว่างแม่เหล็กทั้ง 2 ตัวและกักเก็บอิเล็กตรอนให้อยู่บริเวณหน้าผิวเป้าและบังคับให้เคลื่อนที่เป็นเกลียวกลมที่หน้าผิวเป้า

4.2.2 การตรวจสอบความเข้มของสนามแม่เหล็กบริเวณหน้าผิวเป้า

ในการตรวจสอบลักษณะเฉพาะของสนามแม่เหล็กบริเวณหน้าผิวเป้าที่มีผลต่อการดิสชาร์จนั้นในเบื้องต้นได้มีการปรับเปลี่ยนเฉพาะขนาดของแม่เหล็กตัวนอกเพื่อปรับเปลี่ยนลักษณะเฉพาะของสนามแม่เหล็กบริเวณหน้าผิวเป้าที่ระยะห่างต่าง ๆ กัน

โดยในการวัดลักษณะความเข้มของสนามแม่เหล็กได้ใช้หัววัดความเข้มของสนามแม่เหล็กรุ่น Combi B Sensor S probe ต่อเข้ากับจอแสดงผล โดยงานวิจัยนี้ใช้หน่วยในการวัดความเข้มของสนามแม่เหล็กเป็น มิลลิเทสลา ซึ่งค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ระยะห่างต่าง ๆ จะถูกแสดงในตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.6 โดยจากรูปที่ 4.4 แสดงรูปหัววัดสนามแม่เหล็กที่ใช้ในงานวิจัยนี้



รูปที่ 4.4 หัววัดความเข้มของสนามแม่เหล็ก Combi B Sensor S probe

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กตัวนอกที่ขนาด $\varnothing 29(\text{I.D.})/39(\text{O.D.})$ และ $\varnothing 30(\text{I.D.})/50(\text{O.D.})$ และรังผึ้ง โดยแม่เหล็กตัวนอกทั้งสองสูงประมาณ 10 มิลลิเมตร และใช้แม่เหล็กตัวในทรงกระบอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร และ สูง 10 มิลลิเมตร

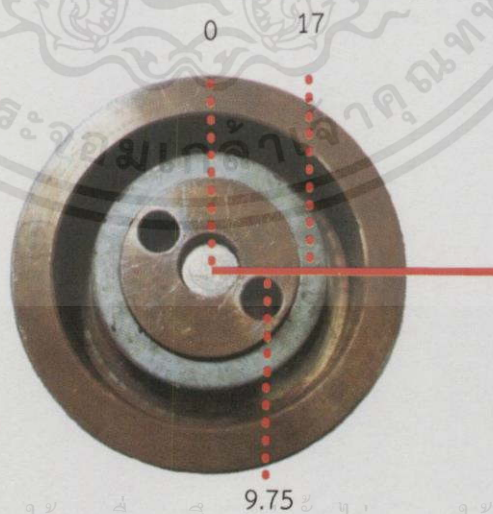
d (มิลลิเมตร)	ความเข้มของสนามแม่เหล็กที่หน้าเป้า (มิลลิเทสลา)						
		แม่เหล็กวงแหวน $\varnothing 29(\text{I.D.})/39(\text{O.D.})$		แม่เหล็กวงแหวน $\varnothing 30(\text{I.D.})/50(\text{O.D.})$		แม่เหล็กรังผึ้ง $\varnothing 32(\text{I.D.})/48(\text{O.D.})$	
	$\varnothing 10 \times h 10$	9.75	17.00	10.00	20.00	10.50	20.00
0	-56.30	18.67	82.73	11.20	95.67	-10.13	56.13
1	-39.60	20.86	78.03	17.80	84.17	-1.80	52.50
2	-25.66	24.00	71.76	24.43	71.00	4.56	46.06
3	-9.60	26.43	65.63	26.80	61.83	10.30	41.16
4	-5.12	27.70	56.73	29.03	60.90	14.76	38.10
5	2.56	28.76	55.56	31.23	58.83	16.50	36.67
6	11.46	29.83	52.83	32.30	50.53	16.96	34.63
7	15.13	30.67	45.47	31.30	45.56	18.53	33.56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำ

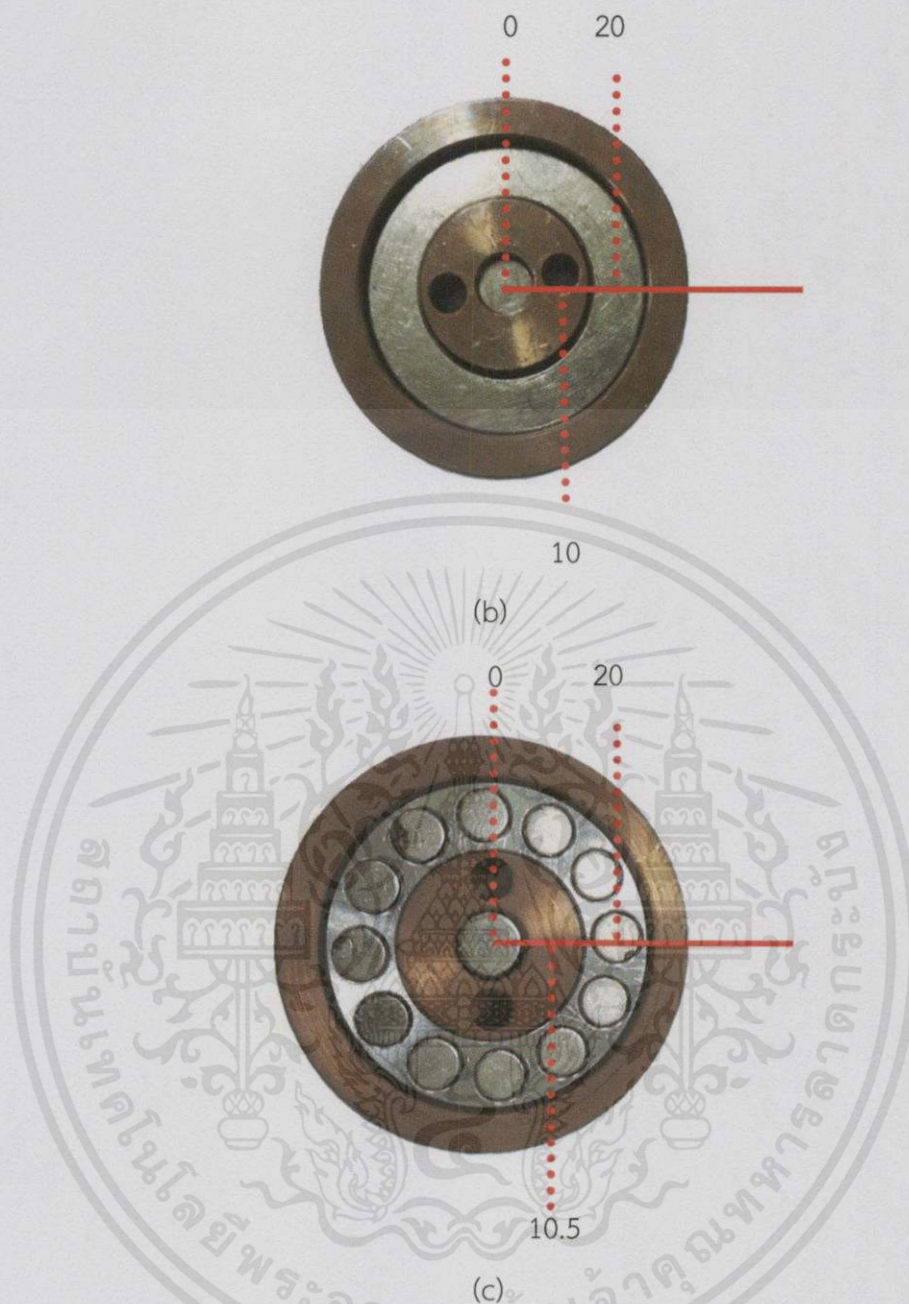
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการวัดความเข้มของสนามแม่เหล็กที่บริเวณหน้าผิวเข้าโดยการเปลี่ยนขนาดของแม่เหล็กวงแหวนตัวนอก 3 แบบ คือ 1.ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในขนาด 29 มิลลิเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 39 มิลลิเมตร 2.ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในขนาด 30 มิลลิเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 50 มิลลิเมตร 3.รูปแบบรีง്മึ่ง ซึ่งในการวัดจะทำการคงที่ขนาดของแม่เหล็กทรงกระบอกตัวในโดยจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร สูง 10 มิลลิเมตร ซึ่งในการวัดค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กจะวัดในระยะต่างๆนั้นจะวัดอยู่สองทิศทาง ซึ่งจะถูกอธิบายระยะการวัดดังนี้

- 0.00 เป็นตำแหน่งของการวัดในแนวราบที่บริเวณจุดศูนย์กลางของแม่เหล็กตัวในทรงกระบอก
- 9.75 เป็นตำแหน่งของการวัดในแนวราบที่ห่างจากจุดศูนย์กลางแม่เหล็กทรงกระบอก 9.75 มิลลิเมตร โดยใช้แม่เหล็กวงแหวนตัวนอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 29 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 39 มิลลิเมตร
- 17.0 เป็นตำแหน่งของการวัดในแนวราบที่ห่างจากจุดศูนย์กลางแม่เหล็กตัวในทรงกระบอก 17 มิลลิเมตรโดยใช้แม่เหล็กวงแหวนตัวนอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 29 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 39 มิลลิเมตร
- 10.0 เป็นตำแหน่งของการวัดในแนวราบที่ห่างจากจุดศูนย์กลางแม่เหล็กตัวในทรงกระบอก 10 มิลลิเมตรโดยใช้แม่เหล็กวงแหวนตัวนอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 30 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 50 มิลลิเมตร
- 20.0 เป็นตำแหน่งของการวัดในแนวราบที่ห่างจากจุดศูนย์กลางแม่เหล็กตัวในทรงกระบอก 20 มิลลิเมตรโดยใช้แม่เหล็กวงแหวนตัวนอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 30 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 50 มิลลิเมตรและแม่เหล็กรีง്മึ่ง
- 10.5 เป็นตำแหน่งของการวัดในแนวราบที่ห่างจากจุดศูนย์กลางแม่เหล็กตัวในทรงกระบอก 10.5 มิลลิเมตรโดยใช้แม่เหล็กแม่เหล็กรีง്മึ่ง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

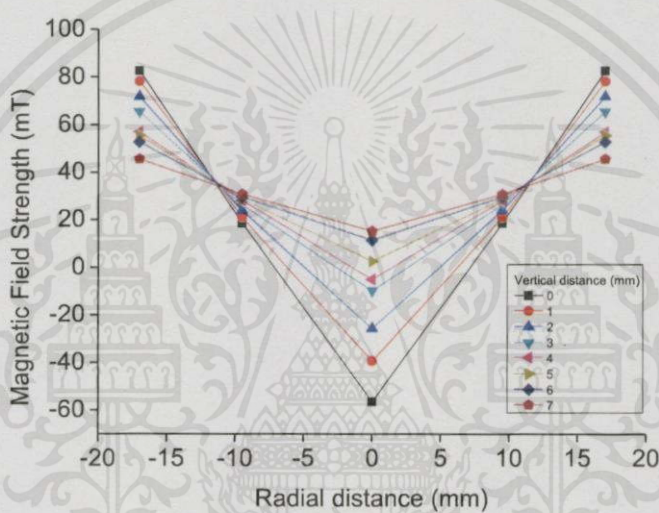


รูปที่ 4.5 แสดงตำแหน่งในแนวนอนในการวัดความเข้มของสนามแม่เหล็กบริเวณหน้าผิวเข้าโดยที่
 (a) ใช้แม่เหล็กตัวนอกขนาด $\text{Ø}29(\text{I.D.})/39(\text{O.D.})$ (b) ใช้แม่เหล็กตัวนอกขนาด
 (b) $\text{Ø}30(\text{I.D.})/50(\text{O.D.})$ และ (c) ใช้แม่เหล็กตัวนอกในรูปแบบของรังผึ้ง

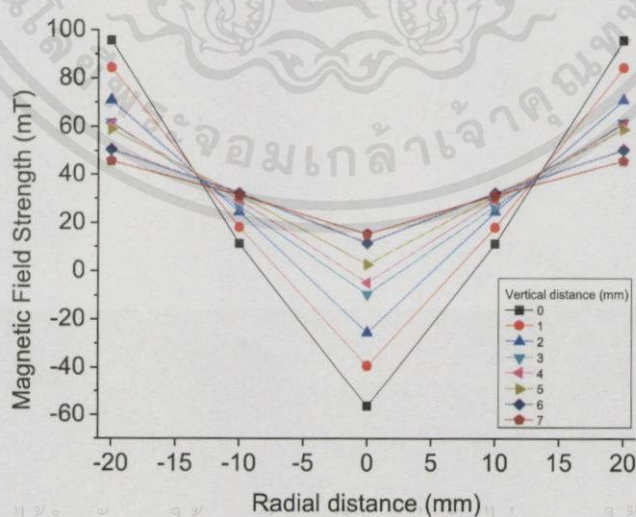
จากรูปที่ 4.6 (a) แสดงลักษณะเฉพาะของสนามแม่เหล็กบริเวณหน้าผิวเข้าของหัวแมกนีตรอนสปัตเตอร์โดยใช้แม่เหล็กตัวในขนาด $\text{Ø}10 \times 10$ มิลลิเมตร และแม่เหล็กตัวนอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 29 มิลลิเมตร และมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 39 มิลลิเมตร สูง 10 มิลลิเมตร (b) แสดงลักษณะเฉพาะของสนามแม่เหล็กที่หน้าผิวเข้าของหัวแมกนีตรอนสปัตเตอร์โดยใช้แม่เหล็กตัวในขนาด $\text{Ø}10 \times 10$ มิลลิเมตร และแม่เหล็กตัวนอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 30 มิลลิเมตร และมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 50 มิลลิเมตร สูง 10 มิลลิเมตร (c) แสดง

ลักษณะเฉพาะของสนามแม่เหล็กที่หน้าผิวเป้าของหัวแมกนีตรอนสปัตเตอร์โดยใช้แม่เหล็กตัวในขนาด $\varnothing 10 \times 10$ มิลลิเมตร และแม่เหล็กตัวนอกในรูปแบบริง

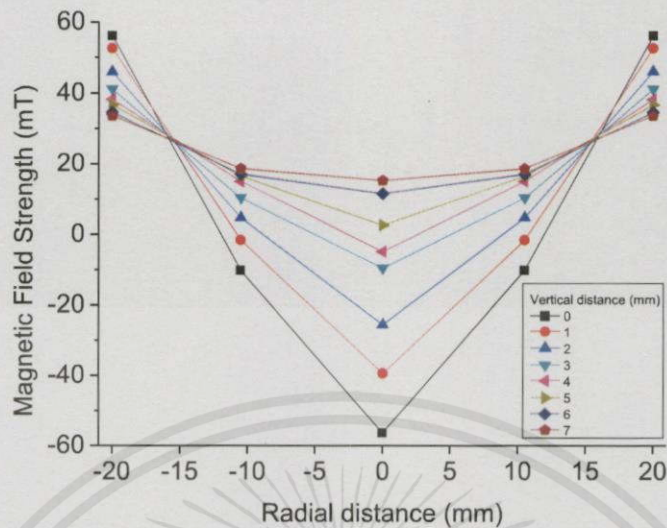
โดยในแนวแกน X จะเป็นค่ารัศมีตำแหน่งต่างๆของหัวแมกนีตรอน โดยตรงกลางของหัวแมกนีตรอนจะเป็นจุดศูนย์กลางของรัศมี และในแนวแกน Y จะเป็นค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กที่หน้าผิวเป้า โดยในกราฟแต่ละเส้นแสดงถึงค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กที่พื้นผิวเป้าที่ระยะห่างจากหัววัดที่ค่าต่างๆ ซึ่งจากรูปที่ 4.3 พบว่าค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กตัวนอกของรูปที่ 4.6 (a) มีค่ามากที่สุดที่ 82.73 มิลลิเทสลา และรูปที่ 4.6 (b) มีค่ามากที่สุด 95.67 มิลลิเทสลา ส่วนรูปที่ 4.6 (c) มีค่ามากที่สุด 56.30 มิลลิเทสลา โดยในงานวิจัยนี้ได้เคลือบฟิล์มบางจากลักษณะสนามแม่เหล็กทั้ง 2 แบบคือแบบ (a) และ (b) จากนั้นตรวจสอบคุณสมบัติต่างๆของฟิล์ม



(a)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และ (b) อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(c)

รูปที่ 4.6 ความเข้มของสนามแม่เหล็กบริเวณหน้าผิวเป้าที่ตำแหน่งรัศมีต่างๆ โดยที่ (a) แม่เหล็กตัวนอก $\varnothing 29(\text{I.D.})/39(\text{O.D.})$ (b) แม่เหล็กตัวนอก $\varnothing 30(\text{I.D.})/50(\text{O.D.})$ (c) แม่เหล็กตัวนอก รูปแบบรังผึ้ง $\varnothing 32(\text{I.D.})/48(\text{O.D.})$

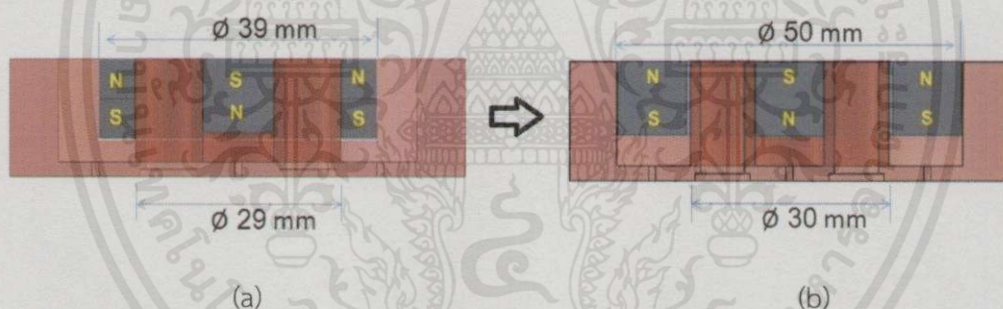
4.3 เงื่อนไขในการเคลือบฟิล์มบางทองแดง

ในงานวิจัยนี้ได้นำเอาโลหะทองแดงบริสุทธิ์มาใช้ในการเคลือบฟิล์มบางบนกระจกสไลด์ เนื่องจากทองแดงเป็นโลหะที่ใช้มากที่สุดในวงการอุตสาหกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ โดยจุดประสงค์หลักของการเคลือบฟิล์มบางทองแดงนั้นเพื่อทดสอบการทำงานของหัวแมกนีตรอนที่ออกแบบสร้างขึ้นมาว่าสามารถใช้งานได้จริง อีกทั้งคณะผู้วิจัยต้องการตรวจสอบผลของความเข้มของสนามแม่เหล็กที่หน้าผิวเป้าต่อคุณสมบัติของฟิล์มบางทองแดง ทางคณะผู้วิจัยจึงได้กำหนดเงื่อนไขต่างๆ ในการเคลือบฟิล์มบางทองแดงที่ความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ค่าต่างกัน โดยการเปลี่ยนขนาดของแม่เหล็กวงแหวนตัวนอก โดยที่แม่เหล็กทรงกระบอกตัวกลางมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร สูง 10 มิลลิเมตร และเงื่อนไขการเคลือบฟิล์มบางทองแดงอื่นๆ ซึ่งแสดงในตารางที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 เงื่อนไขที่ใช้ในการสเปตเตอริงฟิล์มบางทองแดงโดยวิธีการดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอริง

ตัวแปรในการทดลอง	เงื่อนไขที่ใช้ในการทดลอง
เป้าที่ใช้	ทองแดง
แผ่นรองรับ	กระจกสไลด์
ระยะห่างระหว่างเป้าถึงแผ่นรองรับ	70 มิลลิเมตร
ความดันพื้นฐาน	$< 5 \times 10^{-5}$ ทอร์
ปริมาณก๊าซอาร์กอน	10 sccm
ความดันขณะทำการสเปตเตอริง	5×10^{-3} ทอร์
เวลาในการพรี-สเปตเตอริง	10 นาที
เวลาที่ใช้ในการเคลือบ	30 นาที
ความต่างศักย์ของการดีสชาร์จ	450 โวลต์
ขนาดของแม่เหล็กตัวใน	เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร
** ขนาดของแม่เหล็กตัวนอก	(a) เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 29 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 39 มิลลิเมตร (b) เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 30 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 50 มิลลิเมตร

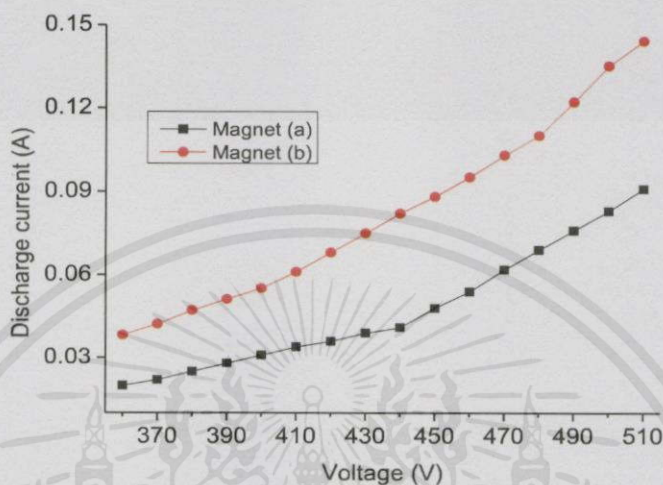


รูปที่ 4.7 แผนภาพแสดงการใช้แม่เหล็กตัวนอก โดยที่ (a) เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 29 มิลลิเมตรเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 39 มิลลิเมตร (b) เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 30 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 50 มิลลิเมตร

4.4 ลักษณะเฉพาะของสนามแม่เหล็กที่บริเวณหน้าผิวเป้าที่มีผลต่อกระแสดีสชาร์จ

จากรูปที่ 4.8 แสดงกระแสดีสชาร์จที่ได้จากการใช้แม่เหล็กตัวนอกขนาดต่างกันโดยที่ (a) คือ กระแสดีสชาร์จที่ใช้แม่เหล็กตัวนอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 29 มิลลิเมตรและเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 39 มิลลิเมตร (โดยต่อไปนี้จะเรียกแทนว่า แม่เหล็กตัวเล็ก) และ (b) คือ กระแสดีสชาร์จที่ใช้แม่เหล็กตัวนอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 30 มิลลิเมตรและเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 50 มิลลิเมตร (โดยต่อไปนี้จะเรียกแทนว่า แม่เหล็กตัวใหญ่) โดยที่ค่าความต่างศักย์ที่ใช้ในการดีสชาร์จอยู่ในช่วง 360-510 โวลต์ค่ากระแสของการดีสชาร์จที่เกิดขึ้นที่ทุกจุดของแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าเท่ากัน กระแสดีสชาร์จที่ได้จากการใช้แม่เหล็กตัวใหญ่จะมีค่ามากกว่ากระแสดีสชาร์จที่ใช้แม่เหล็กตัวเล็กเกือบถึงประมาณ 2 เท่าของทุกๆจุด ซึ่งมันสามารถอธิบายได้ว่า แม่เหล็กตัวใหญ่นั้นมี

ความสามารถที่จะกักเก็บอิเล็กตรอนทุติยภูมิได้มากกว่าแม่เหล็กตัวเล็ก ซึ่งส่งผลให้โอกาสการชนกันระหว่างอิเล็กตรอนกับก๊าซมีมากกว่า จึงทำให้กระแสดิสชาร์จนั้นมีค่ามากกว่าเมื่อควบคุมตัวแปรอื่นๆ ให้เหมือนกัน จากความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าซึ่งมีค่าเป็น $P = IV$ จะได้กำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ซึ่งแสดงในตารางที่ 4.8



รูปที่ 4.8 แสดงถึงกระแสดิสชาร์จที่ได้จากการเปลี่ยนแม่เหล็กตัวนอก

ตารางที่ 4.3 แสดงค่ากำลังไฟฟ้ของการสปัตเตอร์ที่เกิดจากความสัมพันธ์ระหว่างกระแสดิสชาร์จและแรงดันไฟฟ้าของการดิสชาร์จภายใต้เงื่อนไขของการสปัตเตอร์ในตารางที่ 4.2

แรงดันไฟฟ้า (โวลต์)	กำลังไฟฟ้ของการสปัตเตอร์ (วัตต์)	
	แม่เหล็กตัวเล็ก	แม่เหล็กตัวใหญ่
360	7.20	13.68
370	8.14	15.54
380	9.50	17.86
390	10.92	19.89
400	12.40	22
410	13.94	25.01
420	15.12	28.56
430	16.77	32.25
440	18.04	36.08
450	21.60	39.60
460	24.84	43.70
470	29.14	48.41
480	33.12	52.80
490	37.24	59.78
500	41.50	67.50
510	46.41	73.44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้งานเพื่อศึกษาเท่านั้น ไม่ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ลอกเลียนแบบหรืออ้างถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 ผลการทดลองโดยการวิเคราะห์พลาสมาด้วยวิธี OES

จากรูปที่ 4.10 แสดงให้เห็นถึงความเข้มของพลาสมาในย่านความยาวคลื่นตั้งแต่ 400-1100 นาโนเมตร ซึ่งได้จากการวัดโดยเครื่อง HR4000 spectrometer และประยุกต์ใช้งานกับโปรแกรม OOIBase 32 โดยในการวัดผลทางคณะผู้วิจัยได้ทำงานร่วมกับนายวีรศรุต



(a)

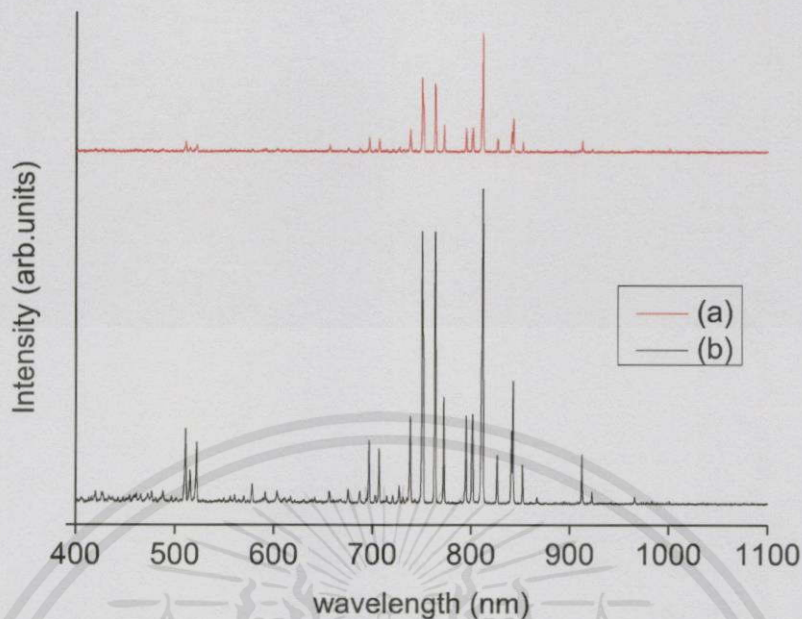


(b)

รูปที่ 4.9 แสดงความเข้มของพลาสมาเมื่อ (a) ใช้แม่เหล็กตัวเล็กในการสปีดเตอริง (b) ใช้แม่เหล็กตัวใหญ่ในการสปีดเตอริง

โดยจากรูปที่ 4.10 (a) คือความเข้มของพลาสมาที่ได้จากกระบวนการดิสชาร์จโดยใช้แม่เหล็กตัวเล็ก (b) คือความเข้มของพลาสมาที่ได้จากกระบวนการดิสชาร์จโดยใช้แม่เหล็กตัวใหญ่ โดยทั้งสองนั้นใช้เงื่อนไขในการทดลองตามตารางที่ 4.2 โดยจากผลของการวัดที่ความเข้มของพลาสมาที่ความยาวคลื่นทุกจุดที่เหมือนกัน ความเข้มของพลาสมาที่ได้จากการใช้แม่เหล็กตัวใหญ่จะมีความเข้มมากกว่ากรณีที่ใช้แม่เหล็กตัวเล็กอย่างมาก ซึ่งผลในส่วนนี้อาจมาจากปริมาณของอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่บริเวณหน้าผิวเป้านั้นมีปริมาณมากขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการใช้แม่เหล็กที่ใหญ่กว่า โดยจะเห็นทั้งหมดในผลการทดลองของหัวข้อนี้สามารถบอกเป็นทางอ้อมได้ว่าฟิล์มที่ได้จากการเคลือบด้วยพลาสมาที่มีความเข้มมากกว่าอาจจะมี ความหนา (Thickness) และขนาดของเกรนใหญ่ (Grain size) มากกว่า และพลังงานของอิเล็กตรอนก็อาจจะมีค่ามากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น มิใช่เพื่อเผยแพร่โดยไม่เป็นประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 แสดงความเข้มของพลาสมาที่ความยาวคลื่นต่างๆที่ได้จากการเปลี่ยนแม่เหล็กตัวนอก

4.6 ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ได้จากการวัดโดยเครื่อง Rigaku X-ray diffractometer โดยในการวัดผลครั้งนี้คณะผู้วิจัยได้ทำการวัดร่วมกับห้องปฏิบัติการ Yoshitake ของมหาวิทยาลัยคิวชู (Kyushu University) ที่ประเทศญี่ปุ่น โดยมีคุณทากาฮาร่าเป็นผู้ช่วยในการดำเนินการวัด

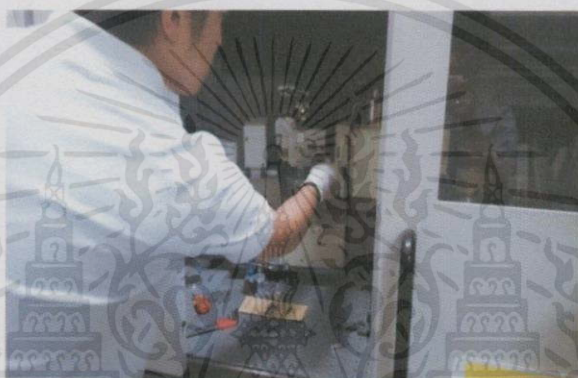
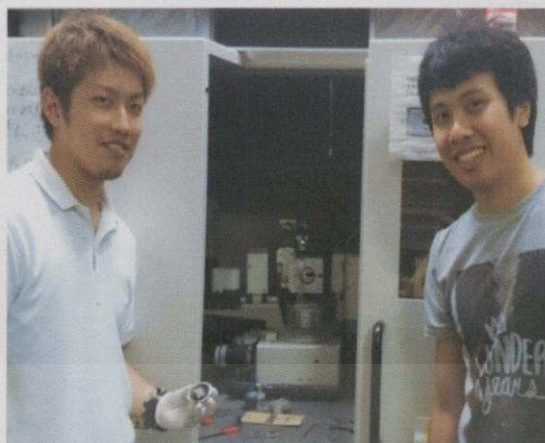


(a)

(b)

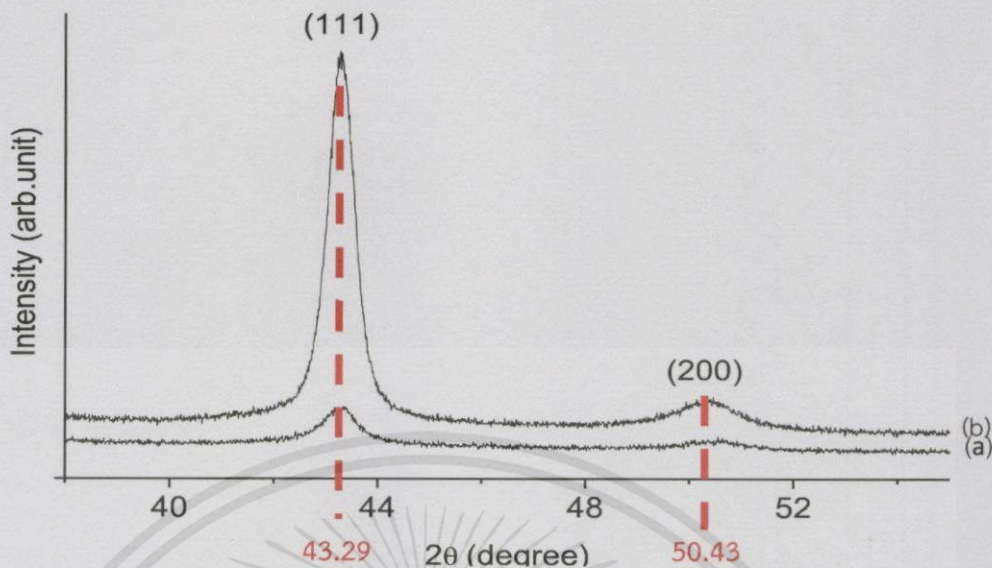
รูปที่ 4.11 แสดงรูปถ่ายฟิล์มที่ได้รับจากการสปัตเตอร์ริงตามเงื่อนไขในตารางที่ 3.2 (a) ได้จากใช้แม่เหล็กตัวเล็กในการสปัตเตอร์ริง (b) ได้จากการใช้แม่เหล็กตัวใหญ่ในการสปัตเตอร์ริง โดยฟิล์มทั้งสองจะถูกนำไปตรวจสอบคุณสมบัติทางด้านกายภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 แสดงการวัดผลด้วยเครื่อง Rigaku X-ray diffractometer ซึ่งทำร่วมกับคุณทหาศาสตราจารย์
นักศึกษาปริญญาโท มหาวิทยาลัยคิซุ ประเทศญี่ปุ่น

จากผลการวัดที่ปรากฏในรูปที่ 4.13 ของฟิล์มบางทองแดงที่เคลือบลงบนกระจกสไลด์ ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.11 ที่ได้จากการเคลือบโดยใช้เงื่อนไขที่กำหนดขึ้นเพื่อทดสอบการทำงานของหัวแมกนีตรอนที่ออกแบบสร้าง โดยใช้มุม 2θ ตั้งแต่ $38 - 56$ องศา พบว่าการจัดเรียงตัวของผลึกของฟิล์มบางทองแดงมีการจัดเรียงตัวที่มีความเข้มมากที่สุดในระดับ (111) ที่มุม 43.29 องศาและ (200) ที่มุม 50.43 องศา ตามลำดับซึ่งแสดงให้เห็นถึงฟิล์มที่ได้รับมานั้นมีผลึกเป็นแบบพหุพันธ์ โดยความเข้มของพีคที่ปรากฏของฟิล์มบางทองแดงที่ได้จากการเคลือบด้วยแม่เหล็กตัวใหญ่จะมีความเข้มที่มากกว่ากรณีที่ใช้แม่เหล็กตัวเล็กอย่างมาก นั่นอาจจะเป็นผลมาจากอัตราการสปีดเตอริงที่เพิ่มมากขึ้นจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่เป็นผลมาจากการถูกกักเก็บโดยแม่เหล็กตัวใหญ่มีจำนวนที่มากกว่าแม่เหล็กตัวเล็ก ซึ่งจะไปเพิ่มโอกาสในการชนกันระหว่างอิเล็กตรอนกับก๊าซ ทำให้ได้ปริมาณไอออนที่เข้าชนเป้าหมายมีปริมาณมากขึ้น จากความเข้มของพีคที่ระดับ (111) และ (200) ที่มุมดังกล่าวที่กล่าวมาข้างต้นเมื่อนำมาเทียบค่าตำแหน่งที่ปรากฏกับตารางมาตรฐานดังแสดงในภาคผนวก (ข) สามารถยืนยันได้ว่าฟิล์มที่ได้ส่วนใหญ่เป็นผลึกของทองแดง และมีการจัดเรียงโครงสร้างของผลึกแบบของเฟสเซนเตอร์คิวบิก นอกจากนั้นความเข้มของพีคที่มีค่ามากที่สุด ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.13 สามารถคาดการณ์ได้ว่าขนาดของเกรนที่ได้จากฟิล์มที่ใช้ด้วยแม่เหล็กตัวใหญ่จะมีขนาดที่ใหญ่กว่ากรณีใช้แม่เหล็กตัวเล็ก



รูปที่ 4.13 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางทองแดงที่ได้จากการใช้ (a) แม่เหล็กตัวเล็ก (b) แม่เหล็กตัวใหญ่

หากพิจารณาระยะห่างระหว่างระนาบ (d-spacing) และขนาดของเกรนของฟิล์มบางทองแดงที่ได้จากพีครูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในรูปที่ 4.13 โดยสมการของเชอร์เรอร์ (Sherrer's Equation) โดยที่

$$d\text{-spacing} = \frac{\lambda}{2\sin\theta}$$

$$\text{Grain size} = \frac{k\lambda}{\text{FWHM}\cos\theta}$$

เมื่อ λ เป็นความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ k เป็นค่าคงที่ของรังสีเอกซ์ และ FWHM เป็นค่าความกว้างของพีคที่ระยะเป็นครึ่งหนึ่งของระยะสูงสุด เมื่อนำมาคำนวณก็จะได้ค่าตามตารางที่ 4.4 ดังนี้

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าระยะห่างระหว่างระนาบและขนาดของผลึกที่คำนวณจากสมการของเชอร์เรอร์

ขนาดแม่เหล็ก	ระนาบ	ระยะห่างระหว่างระนาบ (nm)	ขนาดของเกรน (Å)
ตัวเล็ก	111	21.1346	53.0919
	200	18.0744	39.4745
ตัวใหญ่	111	21.1346	124.0565
	200	18.0744	43.9278

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการทำงานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.4 จากสมการของแบรกก์ $2d\sin\theta = n\lambda$ โดยในการวัดใช้ CuK_{α} ที่มีความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ 1.54056 Å สามารถคำนวณหาระยะห่างระหว่างระนาบและขนาดของเกรนของฟิล์มบางทองแดง ที่ระนาบ (111) และ (200) โดยฟิล์มที่ใช้แม่เหล็กตัวใหญ่ในการเคลือบที่ระนาบ (111) จะมีระยะห่างระหว่างระนาบ 21.1346 นาโนเมตร และมีขนาดของเกรน 124.0565 อังสตรอม และในกรณีใช้แม่เหล็กตัวเล็กจะมีระยะห่างระหว่างระนาบเท่ากับกับกรณีที่ใช้ตัวใหญ่ และมีขนาดของเกรน 53.0919 อังสตรอม และเมื่อพิจารณาที่ระนาบ (200) ฟิล์มที่ใช้แม่เหล็กตัวใหญ่ในการเคลือบจะมีระยะห่างระหว่างระนาบ 18.0744 นาโนเมตร และมีขนาดของเกรน 43.9278 อังสตรอม และในกรณีใช้แม่เหล็กตัวเล็กจะมีระยะห่างระหว่างระนาบเท่ากับกับกรณีใช้แม่เหล็กตัวใหญ่ ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อขนาดของแม่เหล็กตัวนอกใหญ่ขึ้นก็จะทำให้ขนาดของเกรนมีขนาดมากขึ้น และระยะห่างระหว่างระนาบจะมีค่าเท่ากันในแต่ละระนาบ

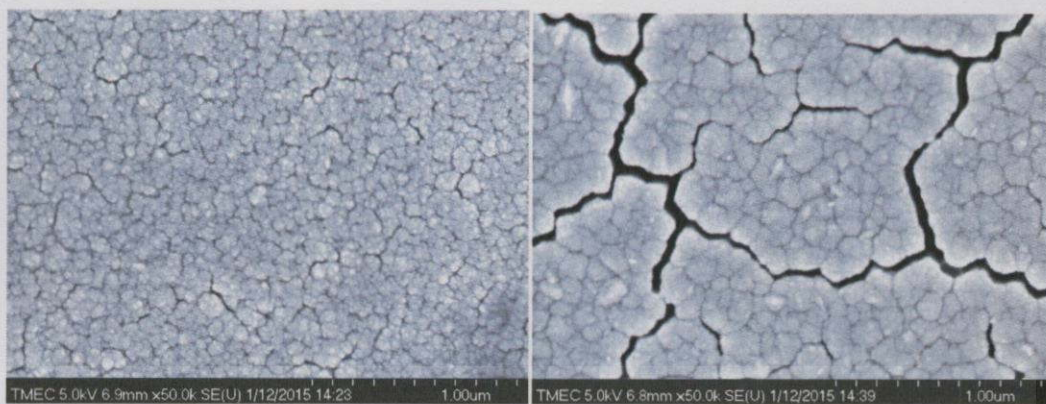
4.7 ผลการทดลองศึกษาโครงสร้างผลึกโดยการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ภาพถ่ายพื้นผิวของฟิล์มบางทองแดงกำลังขยาย 50,000 เท่า ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.15 (a) และ (b) โดยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดยี่ห้อ Hitachi S-4700 Scanning Electron Microscope ของศูนย์ไทยไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (Thai Micro Electronic Center: TMEC)



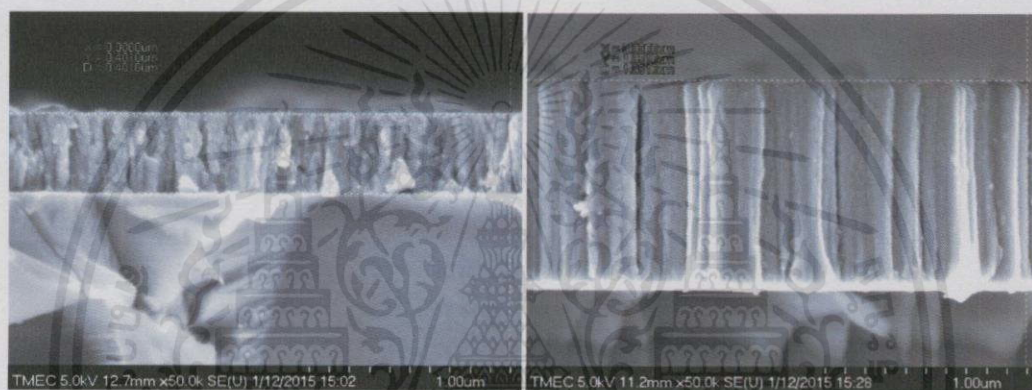
รูปที่ 4.14 แสดงการวัดพื้นผิวของฟิล์มบางทองแดงโดยเครื่อง Hitachi S-4700 Scanning Electron Microscope ของศูนย์ไทยไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (Thai Micro Electronic Center : TMEC) โดยคณะผู้วิจัยได้ร่วมวัดกับเจ้าหน้าที่ขององค์กร

ซึ่งแสดงให้เห็นถึงขนาดของเกรนของฟิล์มบางทองแดงที่ได้จากการเคลือบโดยใช้เงื่อนไขที่กำหนดขึ้น ซึ่งฟิล์มที่ได้จากการเคลือบโดยใช้แม่เหล็กตัวใหญ่จะมีขนาดของเกรนที่ใหญ่กว่ากรณีที่ได้จากการเคลือบด้วยแม่เหล็กตัวเล็กอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งจะแสดงความแตกต่างในรูปที่ 4.15 (a) และ (b) อีกทั้งจากภาพถ่ายตัดขวางของฟิล์มรูปที่ 4.15 (c) และ (d) ที่ได้รับมา แสดงให้เห็นถึงความหนาของฟิล์มที่ได้รับมาจากการเคลือบในเวลา 30 นาที โดยฟิล์มที่ได้จากการเคลือบด้วยแม่เหล็กตัวใหญ่จะมีความหนา 1000 นาโนเมตร ซึ่งมากกว่าฟิล์มที่ได้รับจากการเคลือบด้วยแม่เหล็กตัวเล็ก ซึ่งมีค่าความหนา 400 นาโนเมตร จากนั้นเมื่อคำนวณหาอัตราการเคลือบจากความหนาของฟิล์มที่ได้รับมาปรากฏว่า กรณีที่ใช้แม่เหล็กตัวใหญ่กับเงื่อนไขของการเคลือบที่กำหนดขึ้นตามตารางที่ 4.2 มีค่าเป็น 33.33 นาโนเมตรต่อนาที และส่วนกรณีที่ใช้แม่เหล็กตัวเล็ก มีค่าเป็น 13.33 นาโนเมตรต่อนาที



(a)

(b)



(c)

(d)

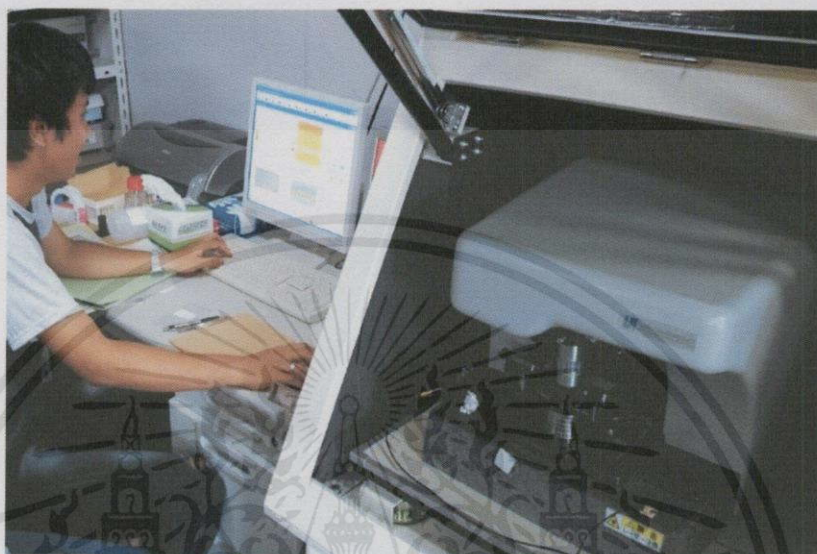
รูปที่ 4.15 ภาพถ่ายโดยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดแสดงพื้นผิวของฟิล์มบางทองแดงและภาพตัดขวางของฟิล์มที่ได้จากการเคลือบโดยใช้เงื่อนไขที่ต่างกันโดยที่ (a) ภาพพื้นผิวของฟิล์มทองแดงกรณีใช้แม่เหล็กตัวเล็กในการเคลือบ (b) ภาพพื้นผิวของฟิล์มทองแดงกรณีใช้แม่เหล็กตัวใหญ่ในการเคลือบ (c) ภาพตัดขวางของฟิล์มทองแดงกรณีใช้แม่เหล็กเล็กใหญ่ในการเคลือบ (d) ภาพตัดขวางของฟิล์มทองแดงกรณีใช้แม่เหล็กตัวใหญ่ในการเคลือบ

จากผลการทดลองดังกล่าวทั้งหมดในหัวข้อนี้สามารถที่จะบอกได้อย่างแน่ชัดแล้วว่า ขนาดของเกรนและความหนาของฟิล์มบางทองแดงนั้นจะมีค่ามากขึ้นเมื่อใช้แม่เหล็กตัวใหญ่ซึ่งในการทดลองโดยใช้เงื่อนไขเดียวกัน ซึ่งผลการทดลองในส่วนนี้อาจจะมาจากการเพิ่มขึ้นของระยะทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนทุติยภูมิ และผลการทดลองนี้ยังสอดคล้องกับผลการทดลองในหัวข้อ 4.6 ซึ่งได้กล่าวมาแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.8 ผลการทดลองของการศึกษาความขรุขระของผลึกโดยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม

จากรูปที่ 4.17 แสดงภาพลักษณะความขรุขระของฟิล์มบางทองแดงโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมยี่ห้อ Nano-R™ AFM atomic force microscopy ของห้องปฏิบัติการโยชิจาเกะ มหาวิทยาลัยคิวชู ประเทศญี่ปุ่น โดยมีคุณฮานาตะเป็นผู้ช่วยดำเนินการวัด



รูปที่ 4.16 แสดงการวัดความขรุขระของพื้นผิวโดยเครื่อง Nano-R™ AFM atomic force microscopy ที่มหาวิทยาลัยคิวชู ประเทศญี่ปุ่น

โดยผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงความขรุขระของฟิล์มบางทองแดง โดยฟิล์มบางทองแดงที่ได้จากการเคลือบด้วยแม่เหล็กตัวใหญ่จะมีความขรุขระน้อยกว่าฟิล์มที่ได้จากกรณีใช้แม่เหล็กตัวเล็ก โดยที่มีค่าเฉลี่ยรากที่สองของความขรุขระ (The root mean square roughness : RMS roughness) ของฟิล์มบางทองแดงที่ได้จากแม่เหล็กตัวใหญ่มีค่า 8.26 นาโนเมตร ซึ่งมากกว่าฟิล์มที่ได้จากกรณีที่ใช้แม่เหล็กตัวเล็กประมาณ 2 เท่าจากผลการทดลองข้างต้นอาจจะเป็นเพราะปริมาณของอะตอมที่ตกมาใส่กระจกสไลด์หรือแผ่นรองรับมีปริมาณมากขึ้นเมื่อในกรณีของแม่เหล็กตัวใหญ่ขึ้น อีกทั้งรูปที่ 4.17 (b) ยังยืนยันขนาดของเกรนของฟิล์มบางทองแดงที่ได้จากการเคลือบโดยใช้แม่เหล็กตัวใหญ่นั้นมีขนาดใหญ่กว่าฟิล์มบางทองแดงที่ได้จากการเคลือบโดยใช้แม่เหล็กตัวเล็กดังแสดงในรูปที่ 4.17 (a) ซึ่งเป็นผลที่สอดคล้อง และสนับสนุนผลการทดลองอื่นๆในงานวิจัยนี้ตั้งที่กล่าวมาแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(b)

รูปที่ 4.17 แสดงภาพลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางทองแดงโดยวิธีการใช้กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม โดยที่ (a) คือฟิล์มทองแดงที่ได้จากการเคลือบโดยแม่เหล็กตัวเล็ก (b) คือฟิล์มทองแดงที่ได้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จากเคลือบโดยแม่เหล็กตัวใหญ่เพื่อการศึกษานี้ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเปลี่ยนแปลงแม่เหล็กตัวนอกให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่าเดิม โดยทำในเงื่อนไขที่กำหนดขึ้นมาและขนาดของแม่เหล็กตัวนอกต้องใส่กับหัวแมกนีตรอนที่ออกแบบสร้างขึ้น จะเป็นผลโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของฟิล์มที่ได้จากการเคลือบ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของผู้เลือกใช้งานว่าต้องการฟิล์มที่มีคุณภาพตามต้องการอย่างไร

จากผลการทดลองทั้งหมดในหัวข้อผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองนี้ เป็นการยืนยันว่าหัวแมกนีตรอนที่มีขนาดเล็กที่ถูกออกแบบสร้างโดยคณะผู้วิจัยนั้นสามารถใช้งานร่วมกับระบบดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริงในการเคลือบฟิล์มบางโลหะได้จริง และในอนาคตนี้ทางคณะผู้วิจัยจะทดสอบการทำงานของหัวนี้ในการสปีดเตอริงเป้าที่เป็นวัสดุใหม่ๆ อาทิเช่น FeSi_2 และ DLC เพื่อที่จะยืนยันว่าหัวที่ถูกออกแบบสร้างมาสามารถใช้งานกับวัสดุจำพวกสารกึ่งตัวนำหรือ อโลหะได้เช่นกัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะเพิ่มเติม

5.1 สรุปผลงานวิจัย

จากงานวิจัยการออกแบบสร้างหัวแมกนีตรอนสปัตเตอร์ขนาดเล็กและลักษณะเฉพาะของหัว คณะผู้วิจัยได้ออกแบบสร้างหัวแมกนีตรอนที่ใช้งานได้ภายในประเทศ และมีต้นทุนในการสร้างที่ต่ำกว่าหัวที่มีการนำเข้าจากต่างประเทศอย่างมาก โดยใช้งบประมาณในการสร้างต่ำกว่า 8,700 บาท โดยหัวที่ได้รับมามีลักษณะเฉพาะดังนี้

- I. มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวน้อยกว่า 7 เซนติเมตร
- II. เหมาะสำหรับใช้กับเป้าหมายมาตรฐานหรือขึ้นรูปเองที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว หนา 0.125 นิ้ว
- III. ตลับใส่ทองแดงสามารถเปลี่ยนขนาดของแม่เหล็กตัวในและแม่เหล็กตัวนอกเพื่อเปลี่ยนแปลงลักษณะเฉพาะของสนามแม่เหล็กบริเวณหน้าผิวเป้า
- IV. แผ่นระบายความร้อนด้วยน้ำแยกออกจากชิ้นส่วนอื่นๆของหัว ซึ่งจะช่วยให้หัวแมกนีตรอนมีอายุการใช้งานมากขึ้น

จากนั้นคณะผู้วิจัยได้ทดสอบการทำงานของหัวแมกนีตรอนที่ถูกออกแบบสร้างกับระบบดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ โดยการใช้เป้าโลหะทองแดงในการสปัตเตอร์ฟิล์มบางทองแดงภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดขึ้นมาพบว่า หัวที่ออกแบบสร้างสามารถใช้งานได้เป็นปกติ อีกทั้งขนาดของแม่เหล็กตัวนอกจะมีผลโดยตรงต่อความเข้มของพลาสมาและการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของฟิล์มบางทองแดง โดยคณะผู้วิจัยได้สรุปเป็นหัวข้อดังนี้

- I. กระแสดีเอสอาร์จที่ได้จากใช้แม่เหล็กตัวนอกที่มีขนาดใหญ่กว่าจะมีค่ามากกว่ากรณีที่ใช้แม่เหล็กตัวนอกที่มีขนาดเล็ก
- II. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแม่เหล็กตัวนอกจะมีผลโดยตรงกับความเข้มของพลาสมา โดยเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากขึ้นความเข้มของพลาสมาก็จะมากขึ้น
- III. ฟิล์มบางทองแดงที่ได้จากการเคลือบโดยใช้แม่เหล็กตัวใหญ่จะมีความเข้มของรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในระนาบ (111) และ (200) มากกว่าฟิล์มที่ได้จากการใช้แม่เหล็กตัวเล็ก
- IV. ขนาดของเกรนและความหนาของฟิล์มบางทองแดงที่ได้จากการเคลือบโดยใช้แม่เหล็กตัวใหญ่จะมีค่ามากกว่าฟิล์มที่ได้จากการเคลือบโดยแม่เหล็กตัวเล็กประมาณ 2 เท่า อีกทั้งความขรุขระของพื้นผิวฟิล์มที่ได้จากการเคลือบโดยแม่เหล็กตัวใหญ่จะมีค่ามากกว่าใช้แม่เหล็กตัวเล็ก

จากผลการทดลองทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่าหัวแมกนีตรอนขนาดเล็กสามารถใช้เคลือบฟิล์มบางที่ใช้เป้าโลหะกับระบบดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ได้ตามปกติ โดยที่คุณภาพและคุณสมบัติของฟิล์มสามารถควบคุมได้ตามเงื่อนไขของการทดลอง อีกทั้งจากผลการทดลองที่ได้รับมาทั้งหมดที่เป็นเช่นนั้นอาจจะเป็นเพราะว่าระยะการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่ถูกปลดปล่อยออกจากกระบวนการสปัตเตอร์ถูกทำให้เพิ่มขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงขนาดของแม่เหล็กตัวนอก และผลจาก

การเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กที่หน้าผิวเป้าของหัวจะส่งผลโดยตรงกับคุณสมบัติทางกายภาพของฟิล์มที่เคลือบและอาจจะไปเพิ่มอายุการใช้งานของเป้าโดยการเพิ่มหรือลดบริเวณร่องกัดกร่อนที่ถูกจากการระดมยิงด้วยอนุภาคที่มีพลังงานสูงจากกระบวนการสปัตเตอร์ริงเมื่อสนามแม่เหล็กบริเวณหน้าผิวเป้าเปลี่ยนแปลง

5.2 ข้อเสนอแนะและงานที่จะทำในอนาคต

- I. หัวแมกนีตรอนขนาดเล็กที่ถูกสร้างขึ้นสามารถใช้เคลือบฟิล์มที่เป็นโลหะได้ตามปกติแล้ว ควรทดสอบหัวนี้กับเป้าประเภทอื่น เช่น เป้าสารกึ่งตัวนำ carbon หรือ graphite หรือ Iron Silicide
- II. สำหรับหัวที่ออกแบบสร้างขึ้นมาสามารถปรับระดับความห่างของแม่เหล็กตัวในกับเป้าได้ตั้งแต่ 1-4 มิลลิเมตร ควรศึกษาผลกระทบต่อโครงสร้างของฟิล์มเมื่อปรับระดับความห่างของแม่เหล็กตัวในกับเป้า
- III. นำข้อมูลของผลการทดลอง 4.5 เรื่องการวัดความเข้มของพลาสมา มาคำนวณหาพลาสมาพารามิเตอร์ (Plasma parameters)
- IV. ควรสร้างเงื่อนไขในการเคลือบฟิล์มโดยใช้กระบวนการ reactive sputtering ทดสอบกับหัวนี้แล้วเปลี่ยนลักษณะเฉพาะของสนามแม่เหล็ก แล้วศึกษาคุณสมบัติของฟิล์ม
- V. สร้างรูปแบบการใส่แม่เหล็กของตลับทองแดงใส่แม่เหล็กของหัวใหม่เพื่อเปลี่ยนลักษณะของสนามแม่เหล็กหน้าผิวเป้า
- VI. ควรสร้างชิ้นส่วนของกราวด์ชิลด์และตัวยึดเป้า สำรองไว้หลายๆตัวเพื่อทำการเปลี่ยนเมื่อมีการเปลี่ยนเป้าที่ใช้ในการสปัตเตอร์ริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] R. O. Dendy. 1990. Plasma Dynamics. Oxford. Clarendon Press.
- [2] Nasser, E. 1971. Fundamentals of Gaseous Ionization and Plasma Electronics. U.S.A. John Wiley & Sons.
- [3] Grill, A. 1994. Cold Plasma in Materials Fabrication from Fundamentals to Applications. The Institute of Electrical and Electronics.
- [4] Chapman, B. 1980. Glow Discharge Processes Sputtering and Plasma Etching. U.S.A. John Wiley & Sons.
- [5] Rossmagel, S. M., Cuomo, J. J., and Weswood, W. D. 1994. Handbook of Plasma Processing Technology. Noyes Publications.
- [6] Wasa, K., and Hayakawa, S. 1992. Handbook of Sputter Deposition Technology. Noyes Publications.
- [7] Magnetic Force. Available from:
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/magnetic/magfor.html>.
- [8] Bunshah, R. H. 1994. Handbook of Deposition Technologies for Films and Coatings. Noyes Publications.
- [9] Chambers, A., Fitch, R. K., and Halliday, B. S. 1998. Basic Vacuum Technology Second Edition. IOP Publishing.
- [10] Kelly, P. J., and Arnell, R. D. 2000. Magnetron sputtering: a review of recent developments and application. Vacuum 56: 159-172
- [11] Window, B. 1995. Recent advances in sputter deposition. Surface and Coatings Technology 71: 93-97.
- [12] Whiston, C. 1991. X-ray Methods. John Wiley & Sons.
- [13] บัญชา ธนบุญสมบัติ. 2544. การศึกษาวัสดุโดยเทคนิคดีฟแฟรกชัน. สำนักพิมพ์ ส.ส.ท. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
- [14] บัญชา ธนบุญสมบัติ และ ศุภกาญจน์ คำมณี. 2544. จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง: ประตูลู่โลกในระดับจุลภาค. ศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) และสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช).
- [15] Ohring M. 2002. Materials Science of Thin Films Deposition and Structure. 2nd Ed. San Diego. ACADEMIC PRESS.
- [16] ธีรพร พรหมรส. 2548. “การออกแบบและลักษณะเฉพาะของหัวดีซีแมกนีตรอนสเปดเทอริง.” ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิชาฟิสิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ในการอัดเป่า FeSi_2 โดยใช้เข้าอัดสารที่ออกแบบสร้างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว กับเครื่องอัดไฮดรอลิกขนาด 30 ตัน ในการอัดแต่ละครั้งคณะผู้วิจัยผสมสาร FeSi_2 ครั้งละ 40 กรัม โดยจะใช้อัดได้จำนวน 2 ชิ้น ซึ่งมีวิธีการคำนวณดังนี้

$$\text{Fe} \quad 1 \quad \text{mol} \quad \text{หนัก} \quad 55.845 \text{ g/mol}$$

$$\text{Si} \quad 1 \quad \text{mol} \quad \text{หนัก} \quad 28.085 \text{ g/mol}$$

โดยที่ FeSi_2 มีอัตราส่วน mol ระหว่าง Fe : Si เป็น 2 : 1

$$\text{ดังนั้น } \text{FeSi}_2 \quad 1 \quad \text{mol} \quad \text{หนัก} \quad (55.845) + (28.085 \times 2) = 112.015 \text{ g/mol}$$

ถ้าต้องการ FeSi_2 ปริมาณ 40g จะต้องใช้

$$\text{Fe} \quad \text{หนัก} \quad \frac{(55.845 \times 1) \times 40}{112.015} = 19.9420 \text{ กรัม}$$

$$\text{Si} \quad \text{หนัก} \quad \frac{(28.085 \times 2) \times 40}{112.015} = 20.0580 \text{ กรัม}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

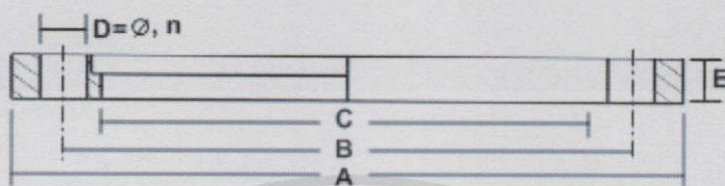
ไฟล์มาตรฐานของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

<i>Pattern</i> : 4-836		<i>Radiation</i> = 1.540598				<i>Quality</i> :
Deleted						
Cu		<i>2th</i>	<i>l</i>	<i>h</i>	<i>k</i>	<i>l</i>
Copper, syn / Copper		43.298	100	1	1	1
		50.434	46	2	0	0
		74.132	20	2	2	0
<i>Lattice</i> : Face-centered cubic		89.934	17	3	1	1
<i>S.G.</i> : Fm3m (225)		95.143	5	2	2	2
<i>a</i> = 3.61500		116.923	3	4	0	0
<i>Z</i> = 4		136.514	9	3	3	1
		144.723	8	4	2	0
MELTING POINT : 1083 deg.						
SAMPLE PREPARATION : It had been heated in an H ₂ atmosphere at 300C.						
SAMPLE SOURCE OR LOCALITY : Sample from metallurgical laboratory of NBS, Gaithersburg, MD, USA.						
TEMP. OF DATA COLLECTION : Pattern taken at 26 C.						
GENERAL COMMENTS : Impurities from 0.001-0.01%, Ag, Al, Bi, Fe, Si, Zn.						
GENERAL COMMENTS : Opaque mineral optical data on specimen from unspecified locality, R3R%=60.65, Disp.=Std., VHN100=96-104, Ref.: IMA Commission on Ore Microscopy QDF.						
GENERAL COMMENTS : Measured density and color from Dana's System of Mineralogy, 7th Ed., I 99.						
COLOR : Red						
CAS: 7440-50-8						
*Natl. Bur. Stand. (U.S.), Circ. 539, volume 0, page 15, (1953)						
primary reference : Swanson, Tatge.						
<i>Radiation</i> : CuK α 1		<i>Filter</i> : Beta				
<i>Lambda</i> : 1.54050		<i>d-sp</i> : Not given				
<i>SS/FOM</i> : F8= 89(0.0112,8)						

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

ขนาดหน้าแปลนมาตรฐานของ NW และ ISO ต่างๆ

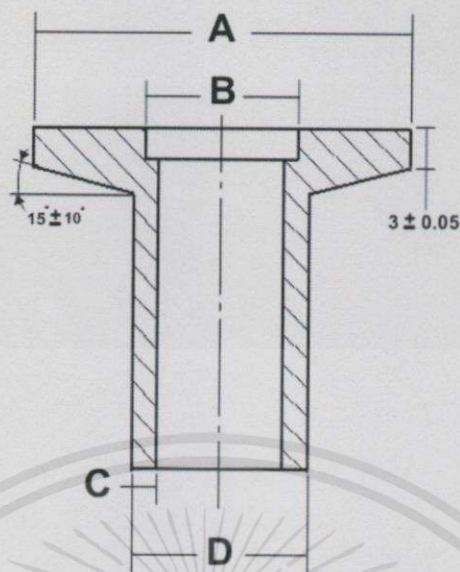


รูปที่ ค1 แสดงลักษณะของหน้าแปลนมาตรฐาน ISO

ตารางที่ ค1 แสดงขนาดมาตรฐานของหน้าแปลน ISO

เบอร์	เส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)				
	A	B	C	D, n	E
ISO 63	130	110	95.5	9,4	12
ISO 80	145	125	110	9,8	12
ISO 100	165	145	130.7	9,8	12
ISO 160	225	200	180.7	11,8	16
ISO 200	285	260	240.7	11,12	16
ISO 250	335	310	290.7	11,12	16
ISO 320	425	395	371	14,12	20
ISO 400	510	480	451	14,12	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค2 แสดงลักษณะของหน้าแปลนมาตรฐาน NW

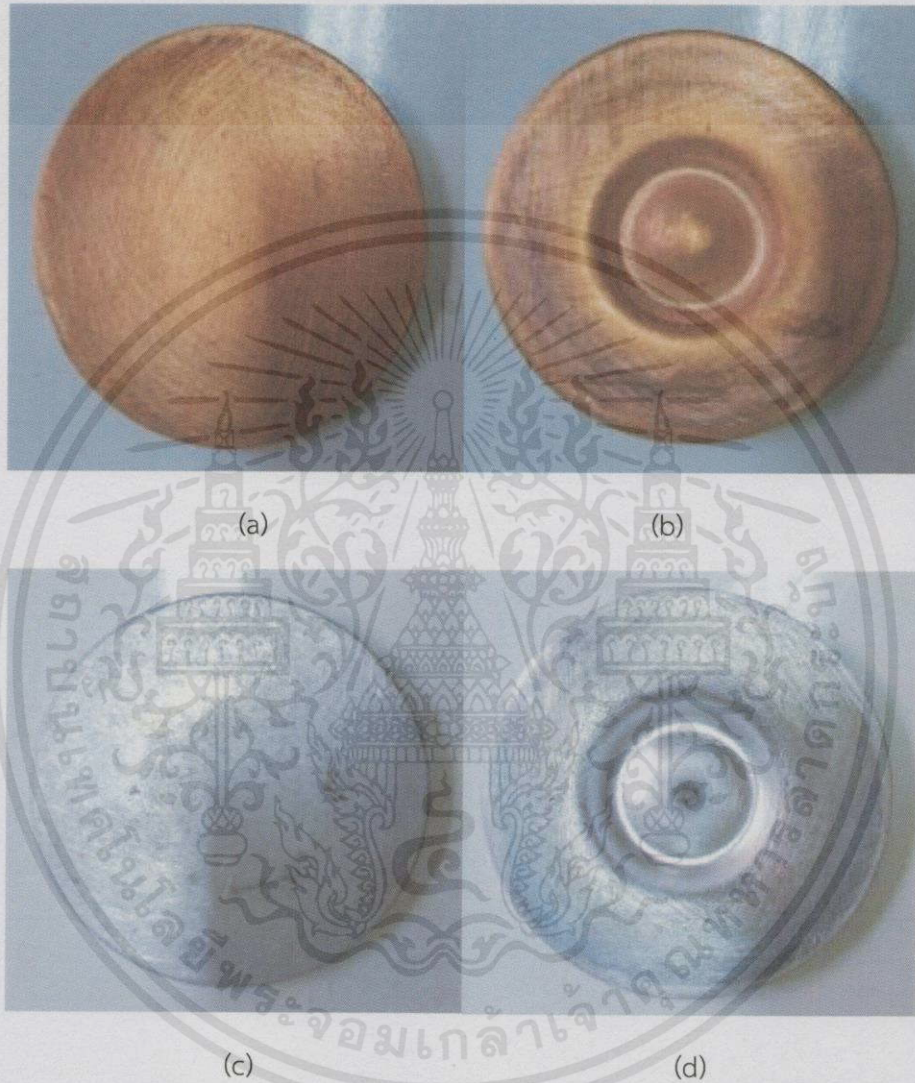
ตารางที่ ค2 แสดงขนาดมาตรฐานของหน้าแปลน NW

เบอร์	เส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)			
	A	B	C	D
NW 10	30	12.2	2	14
NW 16	30	17.2	2	20
NW 20	40	22.2	2	25
NW 25	40	26.2	2	28
NW 32	55	34.2	2	38
NW 40	55	41.2	2	44.5
NW 50	75	52.2	2	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

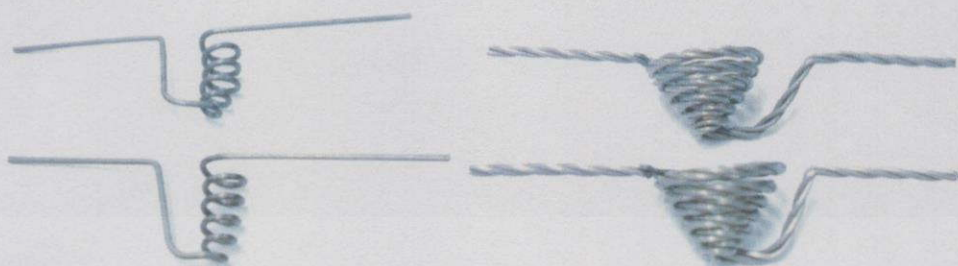
เป้าที่ผ่านการสปีดเตอริงจะทำให้เกิดการกัดกร่อนบริเวณหน้าผิวเป้า



รูปที่ ง1 แสดงเป้าทองแดงและเป้าอะลูมิเนียม โดยที่ (a) และ (c) คือเป้าที่ยังไม่ได้ทำการสปีดเตอริง ส่วน (b) และ (d) คือเป้าที่ถูกทำการสปีดเตอริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

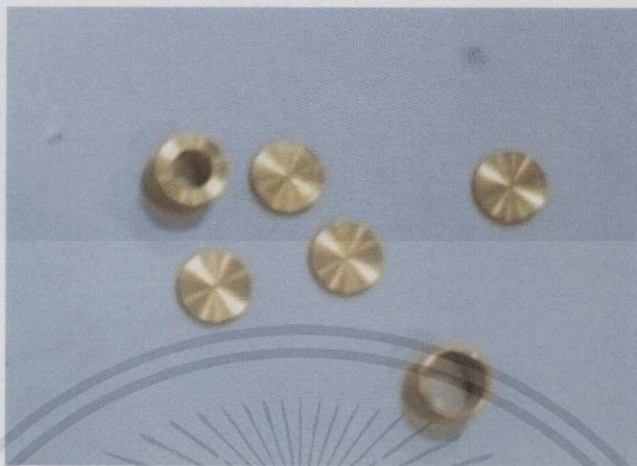
ภาคผนวก จ



รูปที่ จ1 แสดงภาพถ่ายของโบ๊ทในลักษณะต่างๆที่จะนำมาใช้กับระบบประเหยสารโดยความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ฉ



รูปที่ ฉ1 แสดงตัวจิกปรับระดับระยะห่างระหว่างแม่เหล็กทั้งตัวในและตัวนอกกับเป้า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้วิจัย



นายพงศภัค สิทธิมาตร เกิดวันที่ 12 มิถุนายน พ.ศ. 2535 ที่จังหวัดนครราชสีมา จบชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายที่โรงเรียนศรีสะเกษวิทยาลัย ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรี สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ พลังงานทางเลือก ปัจจุบันมีเกรดเฉลี่ย 3.20 คะแนนภาษาอังกฤษ TOEIC 490 และกำลังพัฒนาทักษะทางภาษาอังกฤษให้ดีขึ้น มีความสนใจอย่างสูงในด้านฟิสิกส์วัสดุศาสตร์โดยเฉพาะ FeSi_2 หรือ DLC และการออกแบบสร้างเครื่องมือด้านสุญญากาศ โดยมีประวัติการทำงานดังนี้

ผู้ช่วยสอนวิชา Intermediate Laboratory 1 (การตกแบบอิสระ, สนามแม่เหล็กโลก), Intermediate Laboratory 2 (เทอร์มิสเตอร์, เซมิคอนดักเตอร์)	2556-2558
ผู้ช่วยนักวิจัยศูนย์วิจัยพลาสมาและวัสดุขั้นสูง ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์ โดยได้รับทุนสนับสนุนจาก AUN/SEED-Net JICA (รัฐบาลญี่ปุ่น) และทุนสนับสนุนจากศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์บริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เรื่อง Preparation and characterization of iron disilicide and heterojunction combined with silicon for photodiode and photovoltaic applications	2556-2558
ผู้ช่วยนักวิจัย (2014-2015) สาขาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยได้รับทุนสนับสนุนโครงการวิจัยงบประมาณรายได้ปี 2558 คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เรื่อง การออกแบบและสร้างหัวแมกนีตรอนขนาดกะทัดรัดและลักษณะเฉพาะของหัว เพื่อใช้เคลือบฟิล์มบาง Iron disilicide และ Graphite ที่ความเข้มของสนามแม่เหล็กหน้าผิวเป้าต่างกัน	2557-2558
ฝึกงานและทำวิจัยร่วมกับ ดร.ณัฐพร ที่ห้องปฏิบัติการของศาสตราจารย์โยชิตาเกะ มหาวิทยาลัยคิวชู ประเทศญี่ปุ่น โดยทำหน้าที่เป็นผู้ช่วยนักวิจัย	3-29 ส.ค. 2558
ฝึกงานที่ห้องปฏิบัติการพลาสมาและวัสดุขั้นสูงภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์	1 เม.ย. - 31 พ.ค.2558
ผู้ช่วยออกข้อสอบวิชาฟิสิกส์ร่วมกับ รศ.วิชาญ ดร.ณัฐพรและคณะอาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ ในกิจกรรมการตอบปัญหาวิทยาศาสตร์ในงานสัปดาห์วันวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	25-26 ส.ค. 2557

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

➤ ผลงานด้านวิชาการ

ผลงานตีพิมพ์

1. N.Promros, D. Prajakkan, N. Hongsa, N. Suthayanan, P. Sittimart, M. Takahara, R. Baba, T. M. Mostafa, M. Shaban and T. Yoshitake. The 2nd International Conference on Materials Science and Engineering Technology (MSET). Temperature Dependent Current-Voltage Characteristics of n-Type β -FeSi₂/Intrinsic Si/p-Type Si Heterojunctions. 2015 (Advanced Materials Research, accepted on 14 February 2015)

ผลงานด้านการนำเสนอ

1. N. Promros, P. Sittimart, N. Patanoo, S. Kongnithichalerm, M. Horprathum, W. Bhaunthumnavin and B. Paosawatyanong. The 2nd International Conference on Applied Physics and Material Applications. Physical Properties of Copper Films Deposited by an Affordable Compact-Size Magnetron Sputtering Source with Changing Outer Magnet Ring. (ICAPMA 2015) (Abstract & Poster may be publication)
2. N. Promros, D. Prajakkan, N. Hongsa, N. Suthayanan, P. Sittimart, K. Hanada, M. Takahara, T. Hanada, R. Baba, T. M. Mostafa, L. Chen and T. Yoshitake. The 2nd International Conference on Applied Physics and Material Applications. Characterization of Diode Parameters at Low Temperatures in n-Type Nanocrystalline Iron Disilicide/Intrinsic Ultrananocrystalline Diamond/Amorphous Carbon Composite/p-Type Silicon Heterojunctions. (ICAPMA 2015)(Abstract & Poster may be publication)
3. N.Promros, D. Prajakkan, N. Hongsa, N. Suthayanan, P. Sittimart, M. Takahara, R. Baba, T. M. Mostafa, M. Shaban and T. Yoshitake. The 2nd International Conference on Materials Science and Engineering Technology (MSET). Temperature Dependent Current-Voltage Characteristics of n-Type β -FeSi₂/Intrinsic Si/p-Type Si Heterojunctions. 2015 (Advanced Materials Research, accepted on 14 February 2015)
4. N. Promros, P. Sittimart, M. Takahara, T. Hanada, L. Chen, T. Yoshitake Pacific Rim Symposium on surfaces, Coatings & Interfaces, Kahala Coast Hawaii U.S.A. Electrical Transport Properties and Photodetection Performances of n-Type NC-FeSi₂/i-UNCD/a-C/p-Type Si Heterojunction Photodiodes at Low Temperature, December 7-11, 2014 (Poster)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เป็นการเชิงนามเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. P. Sittimart, N. Patanoo, S. Pongnitichareom, M. Horprathum, N. Promros, W. Bhuanthunnavin, B. Paosawatanyong. The 40th Congress on Science and Technology of Thailand (STT40), P.70, Magnetic Field Characteristics of a Locally Designed Compact Magnetron Sputtering Source, 2014 (Abstract & Poster)
6. N. Promros, P. Sittimart, N. Patanoo, S. Kongnithichalerm, M. Horprathum, W. Bhuanthunnavin and B. Paosawatanyong. AUN/SEED-Net Regional Conference on Materials Engineering, Kuala Lumpur Malaysia, Page 41, Design of Compact Magnetron Sputtering Source for Thin Film Deposition, November 11-12, 2014 (Abstract)

➤ บุคคลอ้างอิง

ดร.ณัฐพร พรหมรส อาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ผศ.ดร.บุญโชติ เผ่าสวัสดิ์ยรรยง อาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้วิจัย



ชื่อ นางสาวณัฐฐาทิพย์ ป่าธนู
เกิดเมื่อวันที่ 18 พฤศจิกายน 2535 ที่จังหวัดลำพูน

ประวัติการศึกษา

ระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย ที่โรงเรียนจักรคำคณาทร จังหวัดลำพูน
ระดับการศึกษาปริญญาตรี คณะวิทยาศาสตร์ ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ สาขาโซลิด
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เกรดเฉลี่ย 2.59

สถานที่ทำงาน

บริษัท จี-เซเว่นคอร์ปอเรชั่น
ที่อยู่ 66 ซอย สุภาพงษ์ 1 แขวง หนองบอน เขต ประเวศ กรุงเทพมหานคร 10250
เริ่มงานวันที่ 11 พฤษภาคม 2558 ในตำแหน่ง Draftman

ประสบการณ์การทำงาน

1. ทำหน้าที่ออกแบบสร้างหัวแมกนีตรอนสเป็คเตอริงขนาดเล็กใช้สำหรับเคลือบฟิล์มบาง โดยได้รับทุนสนับสนุนจากคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในช่วง พ.ศ. 2556-2558
2. เป็นผู้ช่วยนักวิจัยระหว่างเรียนที่ศูนย์วิจัยพลาสมาและวัสดุขั้นสูง ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์ โดยได้รับทุนสนับสนุนจาก AUN/SEED-Net JICA (รัฐบาลญี่ปุ่น) และทุนสนับสนุนจากศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์บริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เรื่อง Preparation and characterization of iron disilicide and heterojunction combined with silicon for photodiode and photovoltaic applications ในช่วง พ.ศ. 2556-2558
3. เป็นผู้ช่วยสอนวิชา Intermediate Laboratory 1 (การตกแบบอิสระ, สนามแม่เหล็กโลก) และวิชา Intermediate Laboratory 2 (เทอร์มิสเตอร์, เอมโฮล์ชเรโซแนน) ในช่วง พ.ศ. 2556-2558
4. เป็นผู้ช่วยนักวิจัย (2014-2015) สาขาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) ทำหน้าที่และส่วนรับผิดชอบออกแบบสร้างหัวแมกนีตรอนขนาดกะทัดรัดและลักษณะเฉพาะของหัว เพื่อใช้เคลือบฟิล์มบาง Iron disilicide และ Graphite ที่ความเข้มข้นของสนามแม่เหล็กหน้าผิวเป้าต่างกัน (ทุนโครงการวิจัยงบประมาณรายได้ปี 2558 คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง) ในช่วง พ.ศ. 2557-2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสาร หากมีการนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสาร เจ้าของเอกสารขอสงวนสิทธิ์ในการดำเนินคดีตามกฎหมาย

5. เป็นผู้ช่วยควบคุมการแข่งขัน ตอบปัญหาทางวิทยาศาสตร์ ในกิจกรรมงานสัปดาห์วันวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังในปี 25-26 สิงหาคม พ.ศ. 2557
6. เป็นผู้ช่วยในการสอนร่วมกัน รศ.สาหร่าย เล็กชะอุ่ม ให้กับนักศึกษาชั้นปี 2 และ 3 สาขาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) ในเรื่องของการใช้โปรแกรมออกแบบ SolidWorks เบื้องต้น ในช่วงวันที่ 4-6 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2558
7. ฝึกงานที่หน่วยงานฟิสิกส์ ที่หน่วยงานกองพิสูจน์หลักฐานกลาง จังหวัดกรุงเทพมหานคร ในช่วงวันที่ 1 เมษายน-31 พฤษภาคม พ.ศ. 2557

ผลงานด้านวิชาการ

1. N. Promros, P. Sittimart, **N. Patanoo**, S. Kongnithichalerm, M. Horprathum, W. Bhaunthumnavin and B. Paosawatanyong. The 2nd International Conference on Applied Physics and Material Applications. **Physical Properties of Copper Films Deposited by an Affordable Compact-Size Magnetron Sputtering Source with Changing Outer Magnet Ring.** (ICAPMA 2015)(Abstract & Poster may be publication)
2. P. Sittimart, **N. Patanoo**, S. Pongnithichareom, M. Horprathum, N. Promros, W. Bhaunthumnavin, B. Paosawatanyong. The 40th Congress on Science and Technology of Thailand (STT40), P.70. **Magnetic Field Characteristics of a Locally Designed Compact Magnetron Sputtering Source,** 2014 (Abstract & Poster)
3. N. Promros, P. Sittimart, **N. Patanoo**, S. Kongnithichalerm, M. Horprathum, W. Bhaunthumnavin and B. Paosawatanyong. AUN/SEED-Net Regional Conference on Materials Engineering, Kuala Lumpur Malaysia, Page 41, **Design of Compact Magnetron Sputtering Source for Thin Film Deposition,** November 11-12, 2014 (Abstract)

ผ่านการอบรมและได้ใบรับรอง

Achievement Award Certificate Completed SolidWorks Training
จาก Dassault Systèmes SolidWorks Corp.

บุคคลอ้างอิง

1. ดร.ณัฐพร พรหมรส อาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
2. ผศ.ดร.บุญโชติ เผ่าสวัสดิ์ยรรยง อาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย