สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

เรื่อง

การศึกษา การออกแบบ และการสร้างมอเตอร์ไฟฟ้าสถิตขนาดจิ๋วชนิดใหม่

Design nad Fabrication of new type Electrostatic Micro Motor

คณะผู้วิจัย

รศ.ดร. สมเกียรติ ศุภเดช

รศ. สมศักดิ์ เชียร์ศิริกุล

นาย เกียรติชัย มากเกษม

นางสาว ประภาพรรณ วิภาตวิทย์

รศ. โยอิชิ ยาซูมุระ

T034416

สถานที่ทำการวิจัย

ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง

ได้รับทุนสนับสนุนจาก

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

ปีงบประมาณ 2541

RCH
TK
9892
.Tb
ร451

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 34416
วัน, เดือน, ปี 1 พ.ย. 2542

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ หน้า

บทคัดย่อ 1

Abstract 2

บทที่ 1 บทนำ 3

1.1 ความเป็นมาของมอเตอร์ไฟฟ้าสถิต 3

1.2 จุดประสงค์ของงานวิจัย 4

บทที่ 2 ทฤษฎี การทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าสถิต 5

2.1 การเกิดแรงไฟฟ้าสถิต บนชิ้นสารกึ่งตัวนำซิลิคอน 5

2.2 โครงสร้างมอเตอร์ไฟฟ้าสถิต 8

2.2.1 โครงสร้างพื้นฐานของมอเตอร์ไฟฟ้าสถิตอย่างง่าย 8

2.2.2 โครงสร้างของมอเตอร์ขนาดจิ๋ว 10

บทที่ 3 การออกแบบมอเตอร์ไฟฟ้าสถิต 12

3.1 การออกแบบ และการคำนวณการกระจายของแรงในมอเตอร์ไฟฟ้าสถิต 12

3.1.1 แบบจำลองของมอเตอร์ 12

3.1.2 การคำนวณการกระจายของแรงในมอเตอร์ 13

บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง 16

4.1 การทดลองวัดแรงไฟฟ้าสถิตที่เกิดขึ้นในชิ้นซิลิคอน 16

4.1.1 การจัดเตรียมอุปกรณ์ในการทดลอง 16

4.1.2 ผลของความเข้มข้นของอะตอมสารเจือ และตำแหน่งของชิ้นสารซิลิคอน 17

4.1.3 ผลของสนามไฟฟ้า และตำแหน่งของแผ่นซิลิคอน 18

4.1.4 ผลของขนาดพื้นที่ของแผ่นซิลิคอน 21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การทดลองสร้าง และประกอบมอเตอร์ไฟฟ้าสถิตอย่างง่าย 22

4.2.1 โครงสร้างของมอเตอร์ที่สร้าง 22

4.2.2 การสร้าง 23

4.2.3 การทดสอบการทำงานของมอเตอร์ 25

บทที่ 5 สรุป และวิจารณ์ 27

ภาคผนวก 28

เอกสารอ้างอิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษา การออกแบบ และการสร้างมอเตอร์ไฟฟ้าสถิตขนาดจิ๋วชนิดใหม่

Design and Fabrication of new type Electrostatic Micro Motor

บทคัดย่อ

ระบบจักรกลไฟฟ้าจุลภาค (Micro Electro Mechanical System) หรือ MEMS นับวันแต่จะมีความสำคัญต่อชีวิตความเป็นอยู่ของมนุษย์มากขึ้นเรื่อยๆ เช่นเดียวกับงานอิเล็กทรอนิคส์จุลภาค หรือ ไมโครอิเล็กทรอนิคส์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอนาคต ความก้าวหน้าของระบบดังกล่าวนี้ อยู่ที่ตัวอุปกรณ์จักรกลไฟฟ้าจุลภาค(Electro Micro Machine) ดังนั้นมอเตอร์ไฟฟ้าขนาดจิ๋ว ซึ่งทำหน้าที่เป็นต้นกำเนิดแรงกลจึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง

ในรายงานฉบับนี้ได้เสนอผลการศึกษา การออกแบบ และการสร้างมอเตอร์ไฟฟ้าสถิตขนาดจิ๋วชนิดใหม่ โดยเริ่มจากการทดลองพื้นฐาน เพื่อศึกษา ความสัมพันธ์ระหว่างแรงไฟฟ้าสถิตที่เกิดบนชิ้นสารตัวนำ หรือสารกึ่งตัวนำ ที่ถูกวางไว้ในสนามไฟฟ้า กับ ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญต่างๆ เช่น ชนิดของอะตอมสารเจือ ความเข้มข้นของอะตอมสารเจือในชิ้นสารซิลิคอน ผลของความเข้มสนามไฟฟ้า ผลของขนาด และรูปร่างของชิ้นสาร และ ผลของตำแหน่งที่ชิ้นสารนั้นถูกวางในสนามไฟฟ้า นอกจากนี้ยังได้ทำการออกแบบ และทดลองสร้างมอเตอร์ไฟฟ้าสถิตที่มีขนาดเล็ก เส้นผ่าศูนย์กลางราว 2.5 มิลลิเมตร โดยเป็นโครงสร้างที่ง่ายต่อการสร้าง ทั้งยังสามารถที่จะพัฒนาต่อไปให้เป็นอุปกรณ์จักรกลไฟฟ้าที่มีขีดความสามารถสูงยิ่งขึ้น ผลการทดลองและข้อมูลต่างๆที่ได้นี้ เป็นประโยชน์ และสำคัญมากในการออกแบบสร้าง และพัฒนามอเตอร์ไฟฟ้าสถิต ให้มีประสิทธิภาพสูง และประยุกต์เป็นระบบจักรกลไฟฟ้าจุลภาคเพื่อการใช้งานในด้านต่างๆต่อไปได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Design and Fabrication of new type Electrostatic Micro Motor

Abstract

At present and in the future the Micro Electro Mechanical System or MEMS. will be important for human life the same as Micro Electronic System. In the MEMS. Electro micro machine is the heart of the system. Then Micro motor that be used as the power source is the main importance device.

This report described the experiment and results of the basic Design and Fabrication of new type Electrostatic Micro Motor. The dependence of type and concentration of impurity in silicon slab, electric field intensity , area of silicon, and position of silicon slab in electric field on the electrostatic force that occur in silicon slab are reported. Finally, the design and fabrication of micro motor with2.5 millimeter diameter are explained. The experience and all data of experimental results is very useful for the further development of electrostatic micro motor.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของมอเตอร์ไฟฟ้าสถิต

ในปัจจุบันนี้ ได้มีผู้ศึกษา วิจัยและพัฒนางานด้าน เครื่องจักรกลไฟฟ้าจุลภาค หรือElectrical Micro Machine เป็นจำนวนมาก โดยที่เครื่องจักรกลไฟฟ้าเหล่านี้ เป็นอุปกรณ์เครื่องจักรกลไฟฟ้าที่มีขนาดเล็กมาก เช่น มีขนาดในระดับไมโครเมตร(1×10^{-6}เมตร) เป็นต้น ชิ้นส่วนต่างๆที่ประกอบอยู่ภายใน มีลักษณะ และรูปร่างเหมือนกับเครื่องจักรกลไฟฟ้าขนาดใหญ่ทุกประการ ทั้งยังสามารถใช้งานได้เป็นอย่างดี โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การนำไปประยุกต์ใช้กับงานระบบจักร์กลไฟฟ้าขนาดจิ๋ว (Micro Electro Mechanical System(MEMS) ซึ่งในอนาคตอันใกล้นี้ จะมีความสำคัญต่อชีวิตความเป็นอยู่ของมนุษย์เป็นอย่างมาก

ในการออกแบบและสร้างชิ้นส่วนต่างๆเหล่านี้ จำเป็นต้องมีความละเอียดอ่อน และต้องอาศัยเทคโนโลยีพิเศษเฉพาะทาง มาช่วย ไม่สามารถใช้เทคนิคพื้นฐานได้ เช่นในปัจจุบันนี้เทคโนโลยีของงานออกแบบ และสร้างอุปกรณ์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ มีความก้าวหน้าเป็นอย่างมาก ดังนั้นจึงมีการนำเทคโนโลยี ดังกล่าวมาช่วยในงานการสร้างอุปกรณ์จักรกลไฟฟ้าขนาดจิ๋ว เช่น เทคนิคการทำ Photo lithography Etching เป็นต้น

สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าจุลภาค ที่มีหลักการทำงานโดยอาศัยแรงไฟฟ้าสถิตย์ที่เกิดขึ้นบนชิ้นสารกึ่งตัวนำ ซึ่งถูกวางไว้ในสนามไฟฟ้า อย่างเหมาะสม ซึ่งจากการศึกษาเกี่ยวกับทฤษฎีสารกึ่งตัวนำ พบว่าสนามไฟฟ้าจากภายนอกที่กระทำต่อประจุไฟฟ้าซึ่งกระจายอยู่ในสารกึ่งตัวนำอย่างไม่สม่ำเสมอ จะก่อให้เกิดแรงที่ไม่สมดุลขึ้น จึงทำให้ชิ้นสารกึ่งตัวนำสามารถเคลื่อนที่ได้ ดังนั้นจากหลักการดังกล่าวนี้ เราสามารถนำไปประยุกต์ และสร้างขึ้นเป็นมอเตอร์ไฟฟ้าสถิตขนาดจิ๋วได้ และนำมาเป็นต้นกำเนิดของแรง เพื่อให้เกิดการเคลื่อนที่ในลักษณะต่างๆกันได้เช่น การเคลื่อนที่แบบเชิงเส้น(Linear motion) หรือการเคลื่อนที่แบบหมุน(Rotation motion) ดังแสดงในตารางที่ 1 และมอเตอร์ประเภทดังกล่าวนี้ถูกเรียกว่า "มอเตอร์ไฟฟ้าสถิตขนาดจิ๋ว" เนื่องจากมอเตอร์ประเภทนี้ไม่มีขดลวดเหมือนมอเตอร์ทั่วๆไป ดังนั้น จึงเป็นมอเตอร์ที่มีขนาดเล็ก และสามารถสร้างให้มีขนาดเล็กมากๆได้ โดยใช้เทคนิคของงานไมโครอิเล็กทรอนิกส์ และกลายเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญของงานระบบ จักรกลขนาดจิ๋ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเคลื่อนที่	แรงบิด	วัสดุที่ใช้	แรงดัน
rotation	afew pNm	poly-si	60-400v
rotation	10 pNm	poly-si	50-300v
rotation	~1 nNm	poly-si	26-105v
10μm (L.L)	2 μN	poly-si	$40v_{dc}$ $+10v_{ac}$
7μm (L.L)	0.8 μN	poly-si	10V
2μm (L.L)	N.A.	metal poly-immide	200V
on-off valve	110 mmHg	metal Si_3N_4	30V

L.L : linear motion in laleral direction

ตารางที่ 1. แสดง micro actuator ที่ใช้แรงไฟฟ้าสถิต

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาคุณสมบัติ และการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าสถิตขนาดจิ๋ว เราจะเริ่มการศึกษาพื้นฐานของการเกิดแรงระหว่างประจุไฟฟ้าที่กระจายอยู่ในสารกึ่งตัวนำ กับสนามไฟฟ้าจากภายนอก รวมทั้งการวิเคราะห์ผลกระทบอื่นๆที่เกิดขึ้น จากนั้นจะได้ศึกษาการออกแบบ และการสร้างมอเตอร์ไฟฟ้าสถิตขนาดจิ๋ว โดยมีการคำนวณ และการจำลองแบบของมอเตอร์ขนาดจิ๋ว และในตอนสุดท้าย ได้ทำการทดลองสร้างและประกอบมอเตอร์ไฟฟ้าขนาดจิ๋ว โดยใช้เทคนิคง่ายๆและทำการทดลองและทดสอบ คุณสมบัติต่างๆ เพื่อใช้เป็นข้อมูล สำหรับการพัฒนา ปรับปรุง ประสิทธิภาพ ของการออกแบบ และการสร้างมอเตอร์ไฟฟ้าสถิตต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

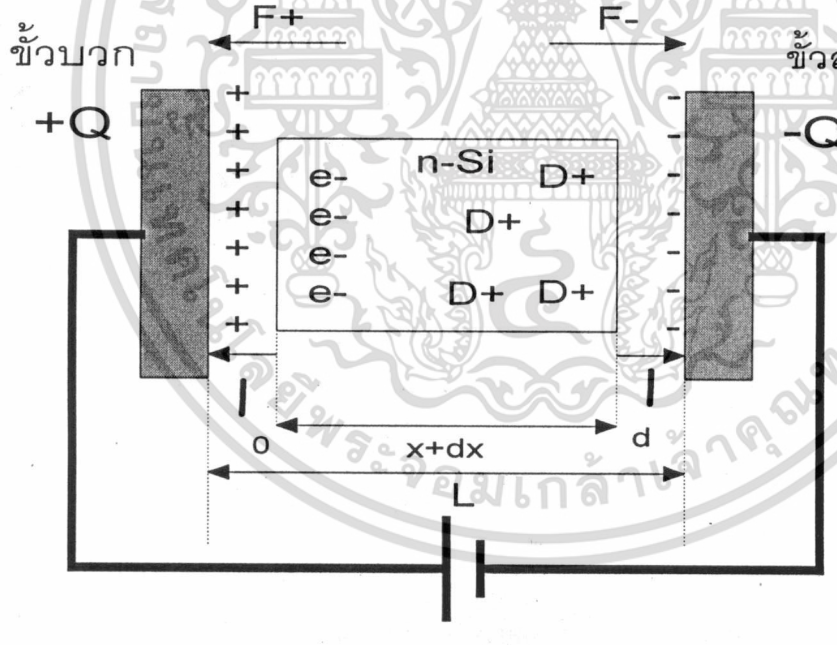
บทที่ 2

หลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าสถิต

2.1 การเกิดแรงไฟฟ้าสถิตบนชิ้นซิลิคอน

สำหรับสารกึ่งตัวนำซิลิกอนที่วางอยู่ในสนามไฟฟ้า สนามไฟฟ้าจะมีผลทำให้เกิดการกระจายตัวอย่างไม่สม่ำเสมอของประจุพาหะบนแผ่นซิลิกอน ในกรณีที่เป็นแผ่นซิลิกอนชนิดเอ็น สมมติให้สนามไฟฟ้ามีค่ามากพอที่จะทำให้อิเล็กตรอนอิสระ มาสะสมอยู่ที่บริเวณผิวของแผ่นซิลิกอนบริเวณด้านที่ใกล้กับขั้วบวก และทิ้งให้อะตอมของสารเจือผู้ให้มีสภาพเป็นไอออนบวกหรือ D+ (positive ionized donor atom) ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งทำให้เกิดมีแรงไฟฟ้าสถิตหรือแรงคูลอมบ์(coulomb force) F+ ระหว่างอิเลคตรอน (e^-) ที่ชิ้นซิลิกอนกับประจุบวก $(+)$ ที่ขั้วบวก

และมีแรงคูลอมบ์ F- ระหว่างประจุของอะตอมสารเจือผู้ให้ (D^+) ที่กระจายอยู่บนแผ่นซิลิกอนกับประจุ ธ (–) ที่ขั้วลบดังแสดงในรูป



รูปที่ 1 แสดงการเกิดแรงระหว่างประจุไฟฟ้าบนแผ่นซิลิกอนชนิดเอ็นในสนามไฟฟ้า

จากรูปที่ 1 ถ้าให้

S คือ พื้นที่หน้าตัดของแผ่นซิลิกอน

N_d คือ ความเข้มข้นของสารเจือชนิดเอ็น (donor density)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

d คือ ความยาวของชิ้นซิลิกอน

ดังนั้นอิเลคตรอนทั้งหมดที่มาสะสมอยู่ที่ผิวใกล้ๆ กับขั้วบวกแสดงได้ดังในสมการที่ (1) คือ

$$-enSd = -eN_dSd \qquad (1)$$

โดยให้ $n = N_d$, และ n คือความหนาแน่นอิเลคตรอนอิสระ

และประจุบวกบนขั้วบวกแสดงได้ดังในสมการที่ (2) โดย

$$+Q = \varepsilon_0 S_A V_{dc} / L \qquad (2)$$

S_A คือพื้นที่หน้าตัดของขั้วไฟฟ้า โดยไม่คิดผลของความเป็นไดอิเลคตริคของสารกึ่งตัวนำ V_{dc} และ L คือความต่างศักย์และระยะห่างระหว่างขั้วบวกและลบตามลำดับ

กำหนดให้แรงคูลอมบ์ F+ คือแรงระหว่างอิเล็กตรอนอิสระ (e^-) บนแผ่นซิลิกอนกับประจุบวก $(+Q)$ บนขั้วบวก ดังนั้นจะได้ว่า

$$F+ = -\frac{QeN_dSd}{4\pi\varepsilon_o l^2} = -\frac{V_{dc}S_AeSN_dd}{4\pi Ll^2} \qquad (3)$$

โดยที่ l คือระยะห่างระหว่างแผ่นซิลิกอนกับขั้วไฟฟ้า

ต่อไปพิจารณาแรง F- ที่เกิดระหว่าง ประจุสารเจือผู้ให้ (D^+) บนซิลิกอนกับประจุลบ $(-Q)$ บนขั้วลบ โดยให้แรงระหว่างประจุสารเจือผู้ให้แต่ละตัวกับประจุลบ $(-Q)$ บนขั้วลบแทนด้วย dF- ดังนั้นจะได้ว่า

$$dF- = -\frac{QeN_dSdx}{4\pi\varepsilon_o(d+l-x)^2}$$

หรือ

$$= -\frac{V_{dc}S_AeN_dSdx}{4\pi L(d+l-x)^2} \qquad (4)$$

และดังนั้นแรง F- ก็คือ

$$F- = \int_0^d dF- = -\frac{V_{dc}S_A}{4\pi L}eN_dS\left(\frac{1}{l} - \frac{1}{l+d}\right) \qquad (5)$$

แรง F+ จากสมการที่ (3) เป็นแรงที่ผลักให้แผ่นซิลิกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เคลื่อนที่ไปทางขั้วบวก แรง F- จากสมการที่ (5) เป็นแรงที่ผลักให้แผ่นซิลิกอนเคลื่อนที่ไปทางขั้วลบ ซึ่งแรงทั้งสองนี้เป็นแรงที่มีทิศทางตรงกันข้าม

ดังนั้นแรงรวมสุทธิที่กระทำกับแผ่นซิลิกอนก็คือ

$$F_+ - F_- = \frac{V_{dc} S_A e N_d S d^2}{4\pi L l^2 (l+d)} \qquad (6)$$

จะเห็นได้ว่า $F_+ - F_-$ มีค่าเป็นบวกซึ่งหมายความว่า $F_+ > F_-$ นั่นคือ แผ่นซิลิกอนชนิดเอ็นเมื่อวางอยู่ในสนามไฟฟ้าจะเกิดแรงไฟฟ้าสถิต ทำให้แผ่นซิลิกอนชนิดเอ็นเคลื่อนที่ไปทางขั้วบวก

สำหรับในกรณีที่เป็นแผ่นซิลิกอนชนิดพี เมื่อวางชิ้นสารกึ่งตัวนำชนิดพีลงในสนามไฟฟ้า โฮลจะมาสะสมอยู่ที่บริเวณผิว ของแผ่นซิลิกอนใกล้กับขั้วลบ และทิ้งให้อะตอมสารเจือผู้รับมีสภาพเป็นไอออนลบ A^- (negative ionized acceptor atom) กระจายอยู่บนแผ่นซิลิกอน ดังแสดงในรูปที่ 2 ทำให้เกิดมีแรง F- เกิดขึ้นระหว่างประจุลบที่ขั้วลบกับโฮลที่มาสะสมอยู่บริเวณผิวของแผ่นซิลิกอน และแรง F+ ระหว่างประจุบวกบนขั้วบวกกับอะตอมสารเจือผู้รับ ซึ่งกระจายอยู่ที่ตำแหน่งต่างๆบนแผ่นซิลิกอน การพิจารณาคล้ายกับแผ่นซิลิกอนชนิดเอ็น ดังนั้นจะได้ว่า

$$dF+ = -\frac{V_{dc} S_A e N_a S dx}{4\pi L (d+l-x)^2}$$

$$F+ = \int_0^d dF+ = -\frac{V_{dc} S_A}{4\pi L} eN_a S \left(\frac{1}{l} - \frac{1}{l+d} \right) \qquad (7)$$

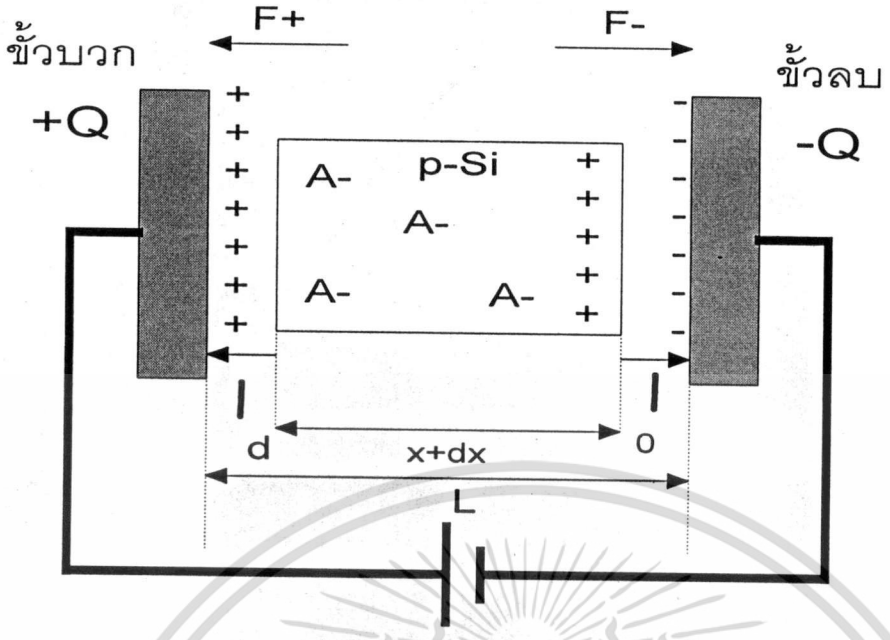
$$F- = -\frac{V_{dc} S_A e S N_a d}{4\pi L l^2} \qquad (8)$$

ดังนั้นแรงรวมสุทธิที่กระทำกับแผ่นซิลิกอน ในกรณีนี้ก็คือ

$$F_+ - F_- = -\frac{V_{dc} S_A e N_a S d^2}{4\pi L l^2 (l+d)} \qquad (9)$$

จะเห็นได้ว่า $F_- > F_+$ ดังนั้น สำหรับแผ่นซิลิกอนชนิดพี เมื่อวางอยู่ในสนามไฟฟ้าจะเกิดมีแรงไฟฟ้าสถิต ทำให้แผ่นซิลิกอนชนิดพีเคลื่อนที่ไปทางขั้วลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2 แสดงการเกิดแรงระหว่างประจุไฟฟ้าบนแผ่นซิลิกอนชนิดพีในสนามไฟฟ้า

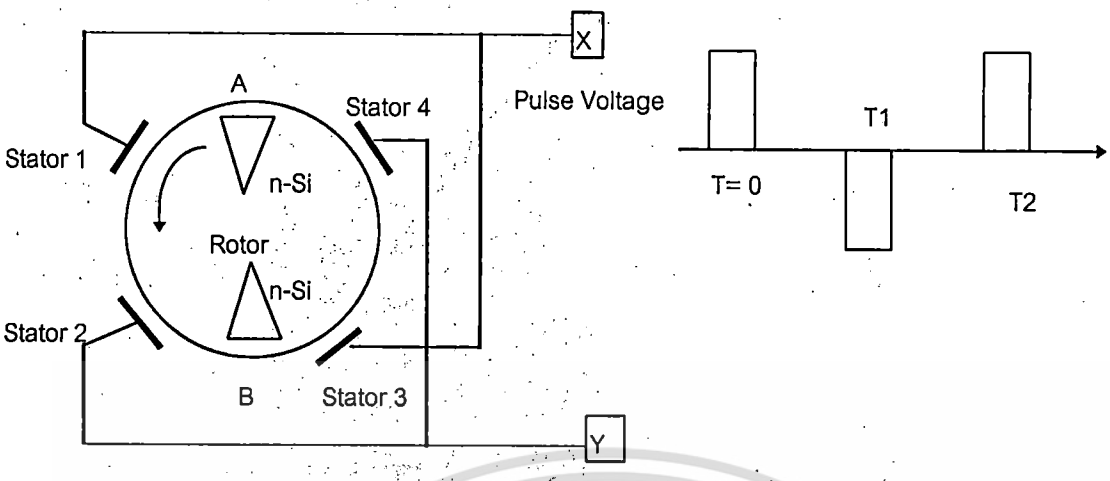
2.2 โครงสร้างมอเตอร์ไฟฟ้าสถิต

จากหลักการเกิดแรงบนชิ้นสารกึ่งตัวนำ ทั้งสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และชนิดพี ทำให้สามารถนำมาประยุกต์เป็นมอเตอร์ไฟฟ้าสถิตได้เป็นอย่างดี ซึ่งโครงสร้างของมอเตอร์ไฟฟ้าสถิตนี้สามารถทำได้หลายรูปแบบต่างๆกันเช่น

2.2.1 โครงสร้างพื้นฐานของมอเตอร์ไฟฟ้าสถิตอย่างง่าย

ลักษณะโครงสร้างของมอเตอร์ไฟฟ้าสถิตอย่างง่าย แสดงได้ดังในรูปที่ 2(ก) โดยที่ชิ้นสารกึ่งตัวนำสองชิ้นคือ A และ B ถูกนำมาติดตั้งอยู่บนแผ่นโรเตอร์(Rotor) ซึ่งเป็นแผ่นพลาสติกวงกลมบาง โดยชิ้นสารกึ่งตัวนำสองชิ้นนี้ จะถูกวางในตำแหน่งตรงกันข้าม และส่วนของสเตเตอร์(Stator)ทั้ง 4 ทำจากแผ่นโลหะตัวนำ ถูกวางไว้ด้านนอกรอบๆโรเตอร์ ห่างจากขอบของโรเตอร์เล็กน้อย และถูกจัดเป็นคู่โดยสเตเตอร์ 1 และ 3 กับ สเตเตอร์ 2 และ 4 ถูกต่อเข้าด้วยกัน และมีปลายทางออกที่ขั้ว X และขั้ว Y ในรูปที่ 2 (ข) แสดงรูปร่างของแรงดันพัลซ์รูปสี่เหลี่ยม ซึ่งถูกนำไปป้อนให้กับ ขั้ว X และขั้ว Y สนามไฟฟ้าที่เกิดจากแรงดันพัลซ์ จะทำให้เกิดแรงบนชิ้นสารกึ่งตัวนำ เมื่อชิ้นสารกึ่งตัวนำเคลื่อนที่ จะทำให้ตัวโรเตอร์หมุนไปด้วย จึงเกิดการเคลื่อนที่ลักษณะเป็นวงกลมหรือก็คือการหมุนของโรเตอร์ ซึ่งเป็นคุณสมบัติของมอเตอร์ไฟฟ้าสถิตนั่นเอง ลักษณะโครงสร้างของมอเตอร์ไฟฟ้าสถิต ซึ่งมีชิ้นสารกึ่งตัวนำสองชิ้นนี้ เป็นโครงสร้างที่ง่ายที่สุด สำหรับโครงสร้างที่ซับซ้อนกว่านี้ก็สามารถทำได้เช่น มีจำนวนชิ้นสารกึ่งตัวนำบนโรเตอร์เพิ่มขึ้นเป็น 4 ชิ้น และมีตัวสเตเตอร์ หรือขั้วไฟฟ้า 8 ขั้ว เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) แผนผังโครงสร้างของมอเตอร์ไฟฟ้าสถิต (ข) รูปลักษณะของแรงดันพัลซ์

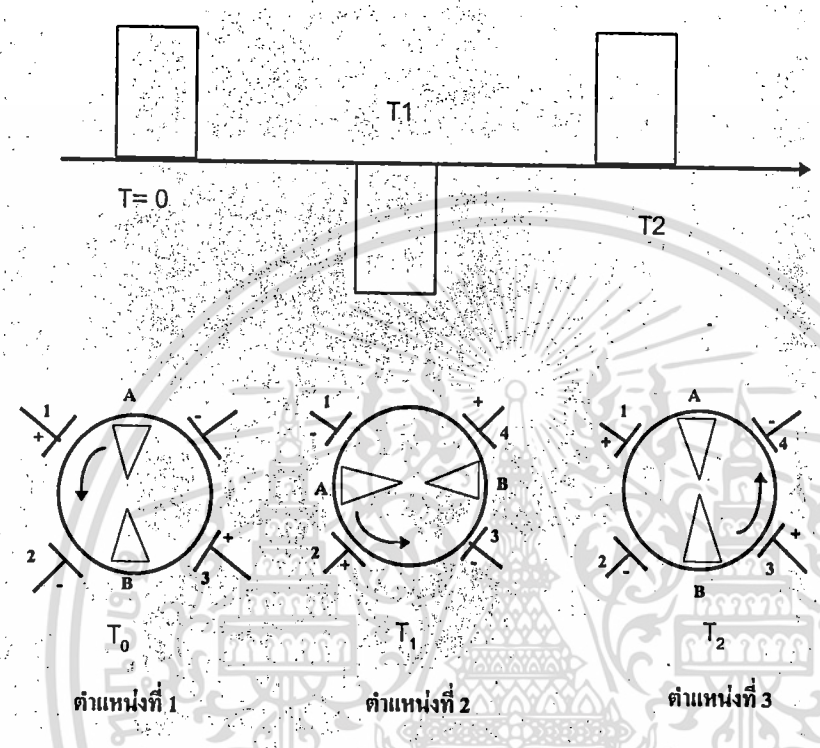
รูปที่ 2(ก) แสดงแผนผังโครงสร้างของมอเตอร์ไฟฟ้าสถิตอย่างง่าย

(ข) แสดงรูปร่างของแรงดันพัลซ์ที่ถูกป้อนให้กับมอเตอร์

หลักการทำงานของมอเตอร์

จากโครงสร้างของมอเตอร์ และแรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์ จะเห็นได้ว่าแผ่นของโรเตอร์ถูกวางไว้บนแกนหมุน และรอบๆโรเตอร์มีสเตเตอร์ซึ่งเป็นขั้วไฟฟ้า เมื่อสเตเตอร์ได้รับแรงดันพัลซ์ที่เวลา t=0 ทำให้สเตเตอร์ที่ 1 และ 3 เป็นศัก บวก สเตเตอร์ที่ 2 และ 4 มีศักเป็นลบ ทำให้มีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นระหว่างขั้วของสเตเตอร์ ดังนั้น แผ่นซิลิคอนจึงอยู่ในสนามไฟฟ้านี้ ด้วย จึงมีแรงจากไฟฟ้าสถิต ที่เกิดขึ้นบนชิ้นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นทั้งสอง ทำให้ชิ้นสารเคลื่อนที่เข้าหาขั้วสเตเตอร์ที่มีศักเป็นบวก นั่นคือ สารชิ้น A จะเคลื่อนที่เข้าหาสเตเตอร์ที่ 1 และสารชิ้น B จะเคลื่อนที่เข้าหาสเตเตอร์ที่ 3 โรเตอร์จึงหมุนจากตำแหน่งที่ 1 ไปอยู่ที่ตำแหน่งที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 3 เมื่อเวลา ผ่านไปเป็น t1 แรงดันพัลซ์จะเปลี่ยนแปลง โดยสเตเตอร์ที่ 1 และ 3 มีศักเป็นลบ ส่วนสเตเตอร์ที่ 2 และ 4 มีศักเป็นบวก ดังนั้นแรงจากไฟฟ้าสถิตจะทำให้ชิ้นสารกึ่งตัวนำ A และ B เคลื่อนที่เข้าหาสเตเตอร์ที่ 2 และ 4 ตามลำดับ โรเตอร์จึงหมุนจากตำแหน่งที่ 2 ไปอยู่ที่ตำแหน่งที่ 3 ทำให้โรเตอร์หมุนได้ครบรอบพอดี จากนั้นที่เวลา t3 แรงดันพัลซ์ก็จะทำให้ สเตเตอร์ที่ 1 และ 3 กลับมามีศักเป็นบวกอีกครั้งหนึ่ง การหมุนของโรเตอร์ในรอบที่สองก็จะเริ่มขึ้นอีกครั้งหนึ่งเป็นเช่นนี้ไปเรื่อย เราจึงเห็นโรเตอร์หมุนรอบๆจุดศูนย์กลาง ตลอดเวลาอย่างต่อเนื่องเช่นเดียวกับมอเตอร์ ขนาดของแรงดันพัลซ์เป็นตัวกำหนดค่าของแรงที่ทำให้โรเตอร์เคลื่อนที่ ช่วงเวลาของพัลซ์ หรือความถี่ของพัลซ์ เป็นตัวกำหนดความเร็วหรือความถี่ของการหมุนของโรเตอร์ จะเห็นว่ามอเตอร์ไฟฟ้าสถิตนี้ ไม่เกี่ยวข้องกับสนามแม่เหล็กใดๆ ดังนั้นจึงไม่ต้องมีขดลวด (Inductor)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



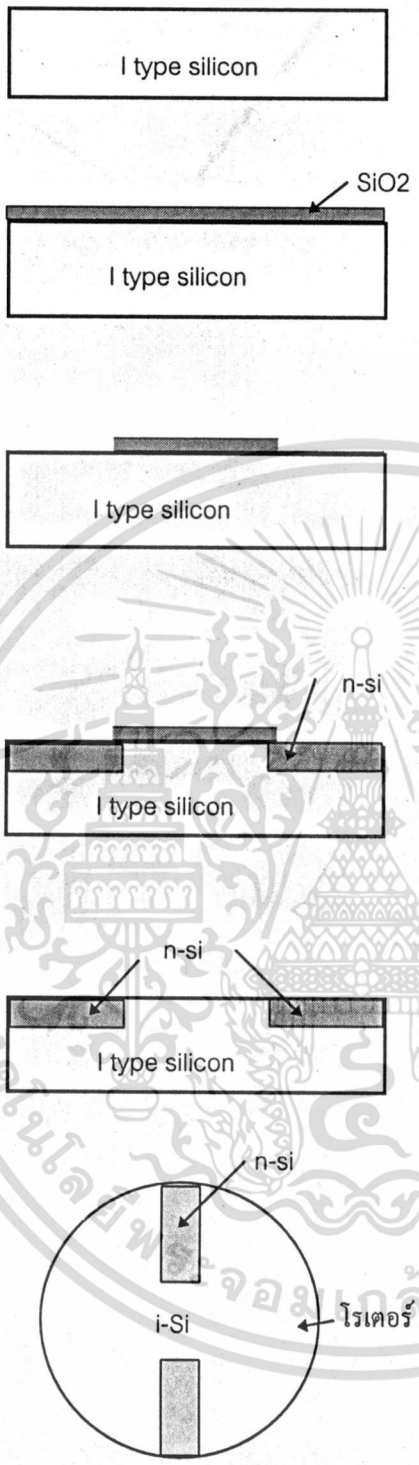
รูปที่ 3 แสดงการเคลื่อนที่ของโรเตอร์สัมพันธ์กับศักไฟฟ้าที่สเตเตอร์ ที่เวลาต่างๆ

ทำให้มอเตอร์ชนิดนี้มีขนาดที่เล็กกว่ามอเตอร์ทั่วๆไป ซึ่งมีประโยชน์มากสำหรับงานระบบเครื่องจักรกลไฟฟ้าขนาดเล็ก

2.2.2 โครงสร้างของมอเตอร์ขนาดจิ๋ว

ในกรณีที่ต้องการให้ได้โครงสร้างมอเตอร์ขนาดเล็กมาก สามารถทำได้ด้วยการใช้เทคนิคการสร้างอุปกรณ์ไมโครอิเล็กทรอนิคส์ มาช่วยในการสร้างโรเตอร์ โดยใช้แผ่นผลึกซิลิคอนชนิดอินทรินซิค หรือชนิดที่มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสูงๆ ทำหน้าที่เป็นแผ่นโรเตอร์ จากนั้นใช้เทคนิคการแพร่สารเฉพาะที่ ทำการสร้างส่วนสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ด้วยการแพร่อะตอมฟอสฟอรัสซึ่งเป็นสารเจือชนิดเอ็น โดยมีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ทำหน้าที่เป็นหน้ากากขณะแพร่สาร จากเทคนิคดังกล่าวนี้ จะทำให้ได้ โรเตอร์ที่มีขนาดเล็กตามที่ต้องการ ซึ่งรูปตัดขวางของโครงสร้างโรเตอร์ขนาดเล็ก แสดงได้ดังในรูปที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4 แสดงลำดับขั้นตอนการสร้างโรเตอร์ขนาดเล็กโดยใช้เทคนิค การสร้างอุปกรณ์ไมโครอิเล็กทรอนิคส์

สำหรับส่วนสเตเตอร์ก็สามารถใช้เทคนิคเดียวกันนี้สร้างได้เช่นกัน ดังนั้นจะทำให้ได้มอเตอร์ที่มีขนาดเล็กมากๆเป็นมอเตอร์ขนาดจิ๋ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

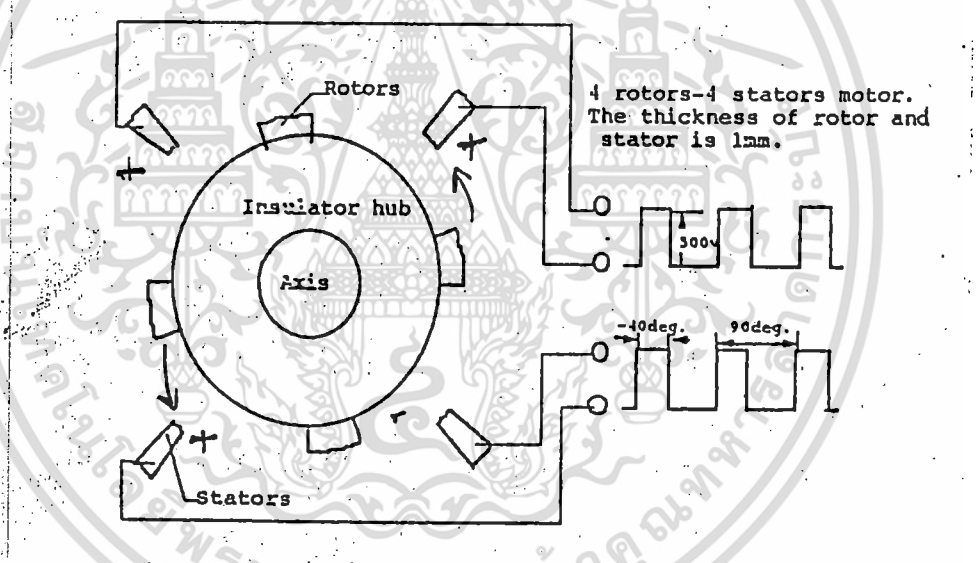
บทที่ 3

การออกแบบและการสร้างมอเตอร์

3.1 การออกแบบ และการคำนวณ การกระจายของแรงในมอเตอร์ไฟฟ้าสถิต

3.1.1 แบบจำลองของมอเตอร์

เพื่อการวิเคราะห์ ออกแบบ และคำนวณ เราจะทดลองสร้างแบบจำลองของมอเตอร์ไฟฟ้าสถิตแบบง่ายๆ โดยมีชิ้นสารกึ่งตัวนำ ชนิดเอ็น 4 ชิ้น ถูกติดอยู่บริเวณขอบนอกของแผ่นโรเตอร์ ซึ่งเป็นฉนวนและรอบๆโรเตอร์มีสเตเตอร์ 4 สเตเตอร์ ทั้งโรเตอร์และสเตเตอร์มีความหนาประมาณ 1 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 5 ชิ้นของสารกึ่งตัวนำที่ติดอยู่บนโรเตอร์ ถูกวางให้ทำมุมต่อกัน 90 องศา เช่นเดียวกับสเตเตอร์ สมมุติให้ระยะห่างระหว่างโรเตอร์ และสเตเตอร์ มีขนาด 0.5 มิลลิเมตร

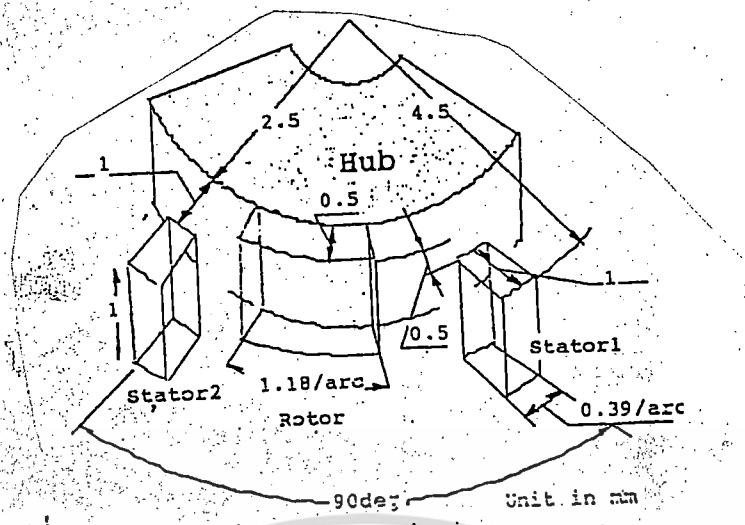


รูปที่ 5 แสดงภาพจำลองของมอเตอร์ที่ออกแบบขึ้น

แรงดันที่ใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์ มีลักษณะเป็นพัลซ์รูปสี่เหลี่ยม มีขนาดแรงดัน 500 โวลต์ โดยจ่ายให้แก่สเตเตอร์ สองคู่ แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่สเตเตอร์นี้จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นในตัวมอเตอร์อย่างสม่ำเสมอ และสมมาตร เกิดมีแรงกระทำต่อโรเตอร์ทั้ง4 อย่างสมมาตร โรเตอร์จึงเคลื่อนที่เข้าหาขั้วไฟฟ้าบวกของสเตเตอร์ ทำให้เกิดการหมุนของมอเตอร์

สำหรับการวิเคราะห์ เราจะพิจารณาเพียง ¼ ของโครงสร้างของมอเตอร์ ซึ่งรายละเอียดแสดงในรูปที่ 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า การแสวงหาผลกำไรทางการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6 แสดงรายละเอียดของมอเตอร์เฉพาะบริเวณ ¼ ของมอเตอร์

3.1.2 การคำนวณการกระจายของแรงในมอเตอร์

สำหรับแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ จะเป็นข้อมูลทางตัวเลข โดยใช้วิธีการของ Finite Element Method หรือ FEM แบบ 2 มิติ โดยที่พารามิเตอร์อื่นๆทั้งหมด จะถูกนำมาประกอบการพิจารณาด้วย เช่น ชนิดของวัสดุที่ใช้ เงื่อนไขขอบเขต

แรงที่เกิดขึ้นบนตัวนำบริเวณผิวของพื้นที่ s แสดงได้ดังสมการที่ 10

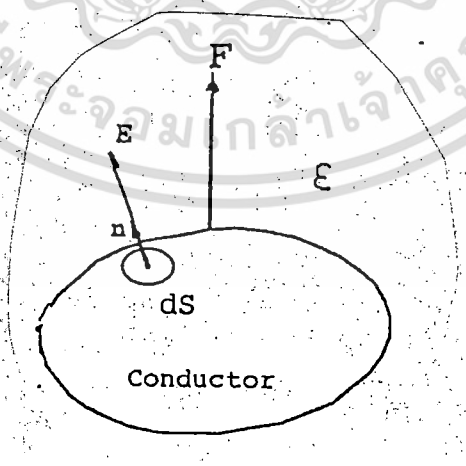
$$F = \frac{1}{2}\int_{s} \varepsilon E^2 n.ds \qquad (10)$$

เมื่อ n คือ เวคเตอร์ 1 หน่วย ที่กระทำกับพื้นผิว S

ε คือค่า Permittivity ของตัวกลางด้านนอกของตัวนำ

และ E คือ สนามไฟฟ้า

ทิศทางของแรง และสนามไฟฟ้าบนตัวนำแสดงดังในรูปที่ 7



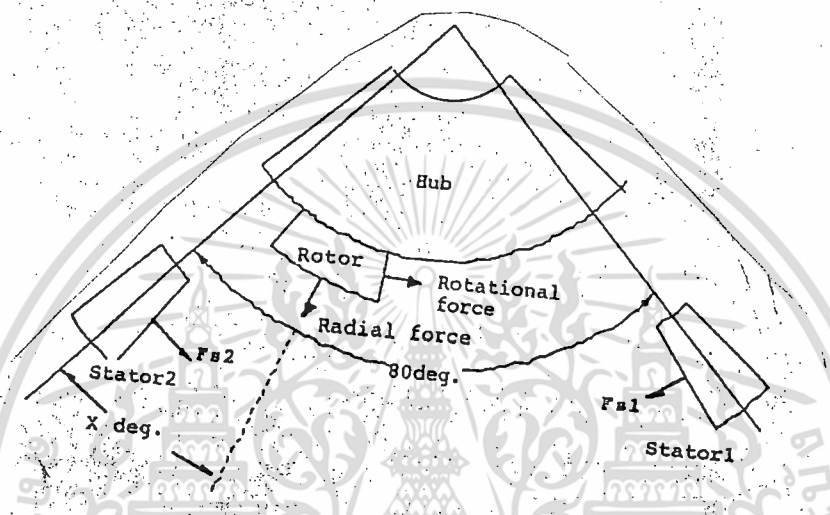
รูปที่ 7 แสดงทิศทางของแรงและสนามไฟฟ้าบนตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีของแรงที่เกิดขึ้นบนโรเตอร์ พิจารณาได้ว่า ประกอบด้วยแรง 2 แรง คือ

1. แรงที่เกิดตามแนวรัศมี(Radial Force) และ
2. แรงที่เกิดตามแนวหมุน (Rotatioal Force)

โดยแรงที่เกิดตามแนวรัศมี จะเกิดขึ้นที่พื้นที่บริเวณด้านนอกของตัวโรเตอร์ และแรงที่เกิดตามแนวหมุน จะเกิดขึ้นที่บริเวณพื้นที่ผิวหน้าสัมผัสของโรเตอร์ และจะมีทิศทางตรงข้ามกับทิศทางของการหมุน ซึ่งเวคเตอร์ของแรงทั้งหมดแสดงได้ดังในรูปที่ 8

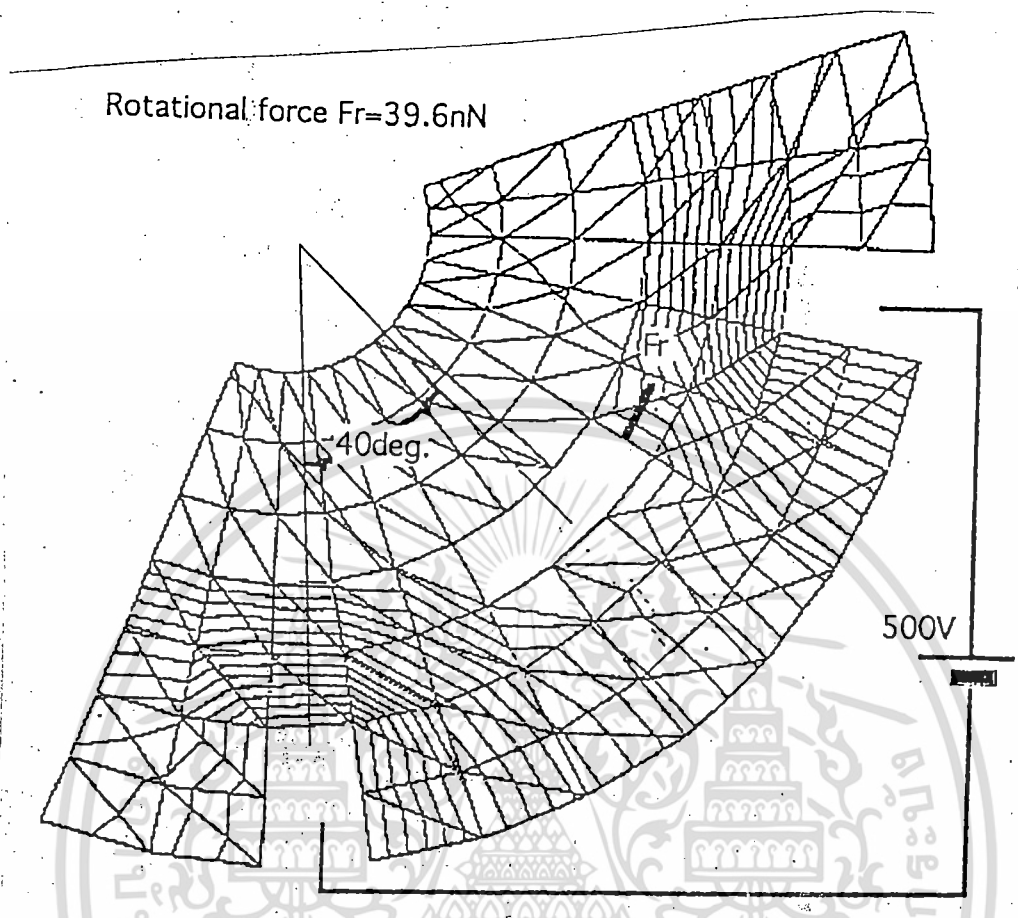


รูปที่ 8 แสดงเวคเตอร์ของแรงที่เกิดขึ้นในมอเตอร์

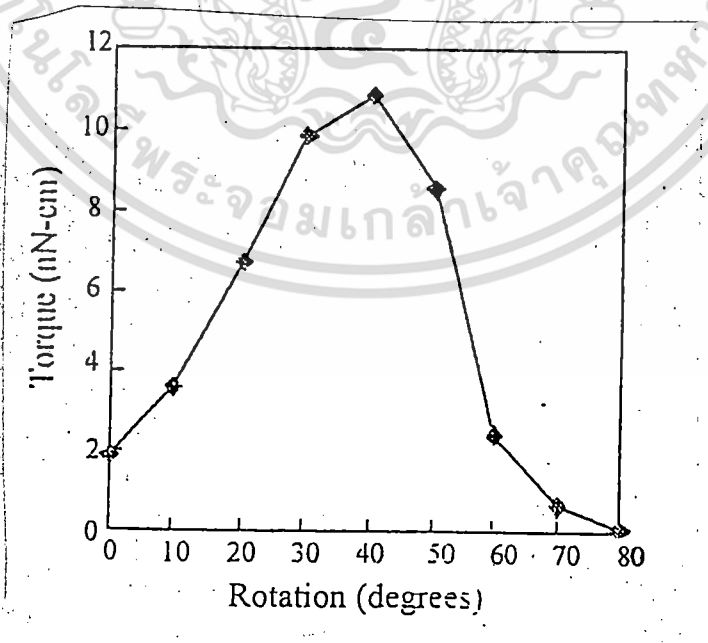
แรงตามแนวรัศมีที่เกิดขึ้นบนโรเตอร์ คือแรงที่ใช้ดึงมอเตอร์ ออกจากจุดศูนย์กลาง ในทางทฤษฎีแล้ว สำหรับแบบจำลองที่มีความสมมาตรกันอย่างสมบูรณ์ ทั้งสเตเตอร์ และโรเตอร์ แรงที่เกิดตามแนวรัศมีนี้จะหักล้างกันอย่างสมบูรณ์ ซึ่งหมายถึงความสมดุลยของตัวมอเตอร์นั่นเองลักษณะการกระจายของศักไฟฟ้าตามแบบจำลอง FEM ซึ่งกำหนดให้โรเตอร์ อยู่ตรงกลางระหว่างสเตเตอร์ที่ 1 และ 2 แสดงได้ดังในรูปที่ 9

กรณีนี้เราจ่ายแรงดันให้กับขั้วของสเตเตอร์ 500 โวลต์ ทำให้มีแรงกระทำต่อโรเตอร์ ตามสมการที่10 ดังนั้นโรเตอร์จะหมุนรอบแกนกลาง ทอร์ค(Torque) ที่เกิดขึ้นบนโรเตอร์ เมื่อโรเตอร์หมุนไปอยู่ในตำแหน่งต่างๆหรือที่มุมต่างๆ จาก 0 ถึง 80 องศา แสดงได้ดังในรูปที่10 ซึ่งได้จากการคำนวณผลรวมของความหนาแน่นของแรงที่ตำแหน่งต่างๆของโรเตอร์ จากกราฟจะเห็นว่าทอร์คจะมีค่าสูงสุดที่ตำแหน่งราว 40 องศา หรือก็คือเมื่อโรเตอร์อยู่ที่บริเวณกึ่งกลางของสเตเตอร์ทั้งสอง ที่ตำแหน่งซึ่งโรเตอร์อยู่ใกล้กับสเตเตอร์ใดๆ จะทำให้ค่าของทอร์ค มีขนาดลดลง และ เนื่องจากสนามไฟฟ้าส่วนใหญ่จะหายไปบริเวณที่ว่างระหว่างสเตเตอร์ กับโรเตอร์ ผลการวิเคราะห์นี้ทำให้ได้ภาพที่สมบูรณ์ ของแรงที่เกิดขึ้นในมอเตอร์ และการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ไฟฟ้าสถิต อย่างไรก็ดี การวิเคราะห์นี้ม่ได้พิจารณาค่าของแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นทั้งหมดของตัวมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 9 แสดงการกระจายของศักไฟฟ้าบนโรเตอร์



รูปที่ 10 แสดงทอร์คที่เกิดขึ้นบนโรเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

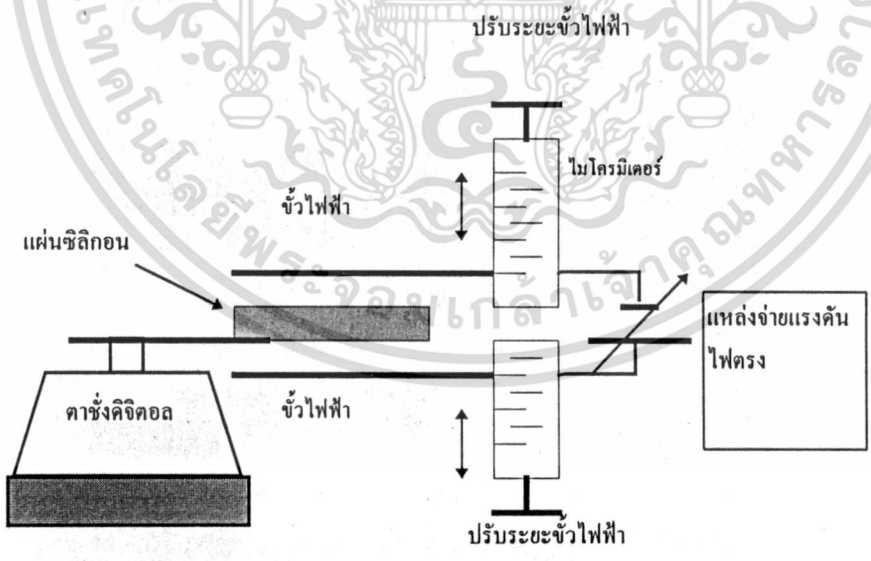
บทที่ 4

การทดลอง และผลการทดลอง

4.1 การทดลองวัด แรงไฟฟ้าสถิตที่เกิดบนชิ้นซิลิคอน

4.1.1 การจัดเตรียมอุปกรณ์ในการทดลอง

อุปกรณ์ในการทดลองเพื่อวัดแรงไฟฟ้าสถิตที่เกิดบนชิ้นสารกึ่งตัวนำซิลิคอน สามารถจัดเตรียมได้ดังแสดงในรูปที่11 แรงไฟฟ้าสถิตที่เกิดขึ้นบนชิ้นซิลิกอนวัดได้โดยการใช้เครื่องชั่งไฟฟ้าที่มีความละเอียดสูงถึง 0.1 mg และแสดงค่าเป็นตัวเลข แผ่นซิลิกอนจะถูกนำไปวางบนจานรองของเครื่องชั่ง ที่อยู่ในสนามไฟฟ้าซึ่งเกิดจากแผ่นโลหะสองแผ่นวางขนานกันกับแผ่นซิลิกอน ค่าของสนามไฟฟ้าปรับได้ด้วยแรงดันจากแหล่งจ่ายแรงดันไฟตรง (V_{dc}) ซึ่งปรับค่าได้สูงสุดถึง 500 โวลต์ ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองสามารถปรับได้โดยใช้ไมโครมอเตอร์ 2 ตัวซึ่งปรับค่าได้ละเอียดถึง 0.01 mm แรงที่เกิดขึ้นบนแผ่นซิลิกอนจะถูกแสดงออกมาบนหน้าปัทม์ของเครื่องชั่งโดยตรง



รูปที่ 11 แสดงการจัดเตรียมอุปกรณ์การวัดแรงไฟฟ้าสถิตที่เกิดขึ้นบนชิ้นซิลิคอน เมื่อได้รับสนามไฟฟ้า

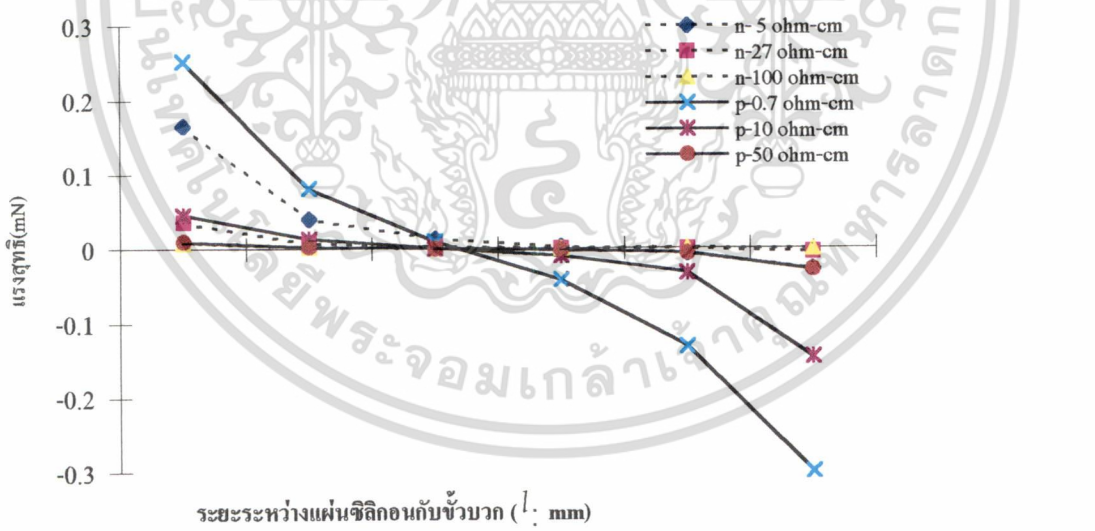
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

4.1.2 ผลของความเข้มข้นของอะตอมสารเจือ และตำแหน่งของชิ้นสารซิลิคอน

ในการทดลองครั้งนี้ได้จัดเตรียมแผ่นซิลิกอน โดยมีชนิดและขนาดที่แตกต่างกันดังนี้ แผ่นซิลิกอนชนิดเอ็นขนาด 9 mm^2 , 25 mm^2 และ 100 mm^2 มีสภาพความต้านทาน (resistivity) 5 Ω.cm , 27 Ω.cm และ100Ω.cm ความหนา ของแผ่นซิลิกอน 400 μm และแผ่นซิลิกอนชนิดพีมีขนาดเดียวกันกับชนิดเอ็นสภาพความต้านทาน 0.7 Ω.cm ,10 Ω.cm และ 50 Ω.cm ความหนาของแผ่นซิลิกอน 200 μm

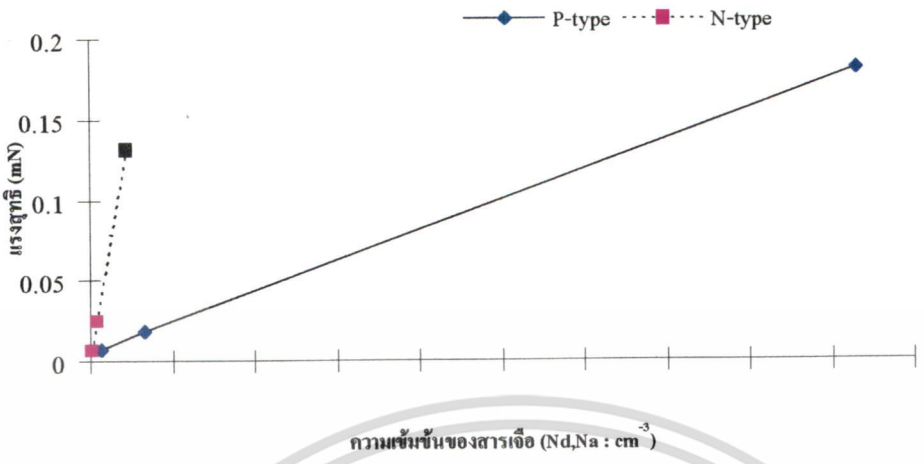
สำหรับการทดลองเพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของอะตอมสารเจือ และตำแหน่งของชิ้นสารซิลิคอนนี้ใช้แผ่นผลึกซิลิกอนทั้งชนิดเอ็นและชนิดพีขนาด 9 mm^2 ที่มีสภาพความต้านทานไฟฟ้าต่างๆ กัน ให้แรงดันไฟตรง (V_{dc}) คงที่ 500 โวลต์ โดยมีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า L = 1.1 mm คงที่สำหรับแผ่นซิลิกอนชนิดเอ็น และ 0.9 mm สำหรับแผ่นซิลิกอนชนิดพี การปรับเลื่อนแผ่นซิลิกอนไปที่ตำแหน่งต่างๆ ระหว่างขั้วโลหะทั้งสองแต่ละตำแหน่งจะทำให้เกิดแรงคูลอมบ์บนแผ่นซิลิกอนซึ่งปรากฏบนเครื่องชั่ง ผลการทดลองถูกนำมาเขียนแสดงและเปรียบเทียบดังในรูปที่ 12 และรูปที่ 13 โดยแกนนอนของกราฟแสดงระยะห่างระหว่างแผ่นซิลิกอนกับขั้วบวก ส่วนแกนตั้งของกราฟแสดงแรงรวมสุทธิที่กระทำต่อแผ่นซิลิกอน ผลการทดลองแสดงว่าเมื่อแผ่นซิลิกอนวางอยู่ใกล้กับขั้วใดแรงที่กระทำต่อแผ่นซิลิกอนกับขั้วนั้นจะมีค่ามากกว่าอีกขั้วหนึ่ง



รูปที่ 12 แสดงแรงไฟฟ้าสถิตสุทธิบนแผ่นซิลิกอนพิกัด ความต้านทานต่าง ๆ ทั้งชนิดเอ็นและชนิดพีที่ ตำแหน่งต่างๆกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

34416



รูปที่ 13 แสดงค่าแรงที่เกิดขึ้นบนชิ้นซิลิกอนชนิดเอ็นและ พีที่มีความเข้มข้นของพาหะต่างๆ กัน

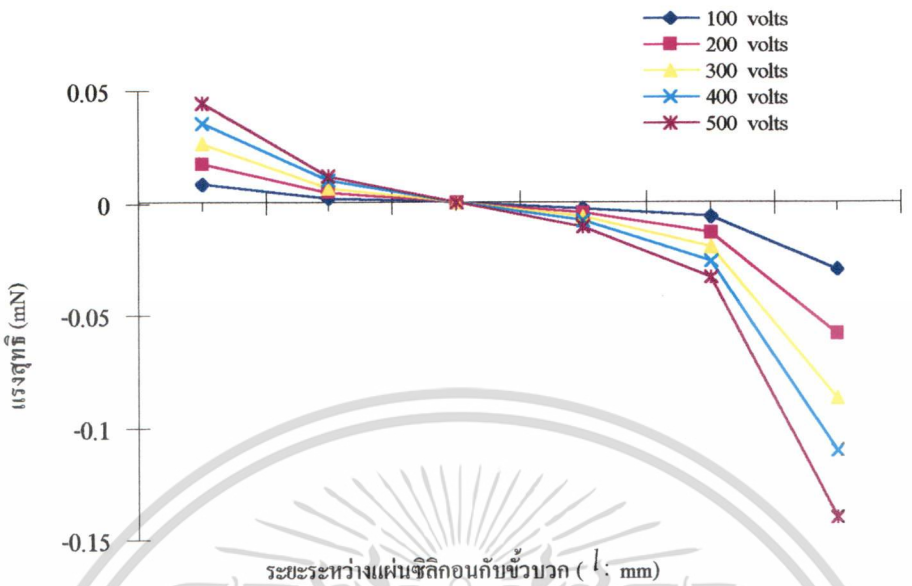
แผ่นซิลิกอนชนิดเอ็นจะเกิดแรงดูดอมบ์กับขั้วบวกมากกว่าขั้วลบ ส่วนแผ่นซิลิกอนชนิดพีเกิดแรงดูดอมบ์กับขั้วลบมากกว่าขั้วบวกซึ่งแสดงดังกราฟรูปที่ 12 และ จากกราฟรูปที่ 13 จะพบว่า แผ่นซิลิกอนทั้งชนิดเอ็นและพี มีแรงรวมสุทธิที่เกิดขึ้นกับแผ่นซิลิกอนแปรผันตรงกับความเข้มข้นสารเจือของแผ่นซิลิกอนโดยที่ความเข้มข้นสูงๆ จะทำให้ได้แรงรวมสุทธิมีค่ามาก

4.1.3 ผลของสนามไฟฟ้าและตำแหน่งของแผ่นซิลิกอน

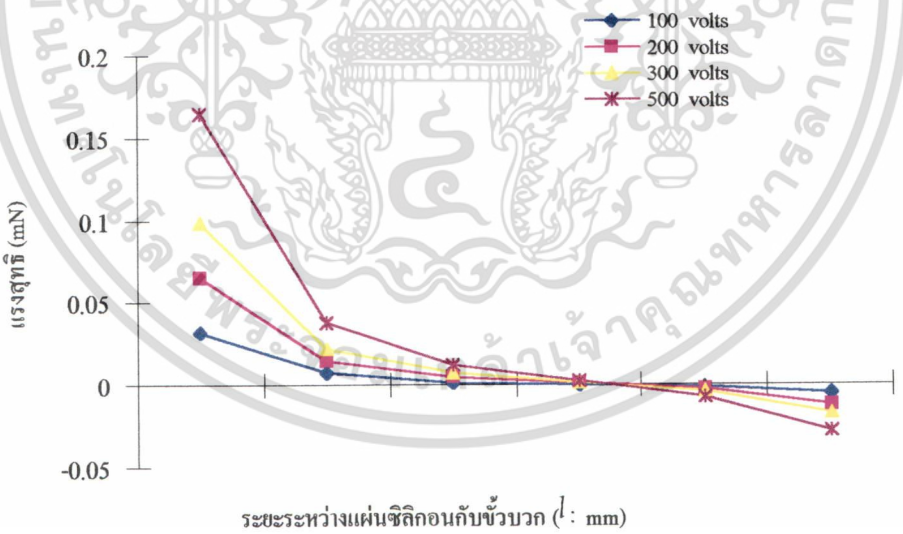
ทำการทดลองโดยใช้แผ่นซิลิกอนชนิดพีขนาด 9 mm^2 มีสภาพความต้านทานไฟฟ้า 10 Ω.cm วางไว้ในสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงได้ โดยปรับค่าแรงดันไฟตรงระหว่าง 100-500 โวลต์ ให้กับขั้วไฟฟ้าทั้งสองซึ่งวางห่างกันคงที่เป็นระยะ L = 0.9 mm

สำหรับแผ่นซิลิกอนชนิดเอ็นขนาดเดียวกันกับชนิดพี มีค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้า 5 Ω.cm วางไว้ในสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงได้ โดยจ่ายแรงดันไฟตรง 100-500 โวลต์ ให้กับขั้วไฟฟ้าทั้งสองซึ่งวางห่างกันคงที่เป็นระยะ L = 1.1 mm วัดแรงรวมสุทธิของแผ่นซิลิกอนทั้งสองแสดงได้ดังกราฟรูปที่ 14 และ 15 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



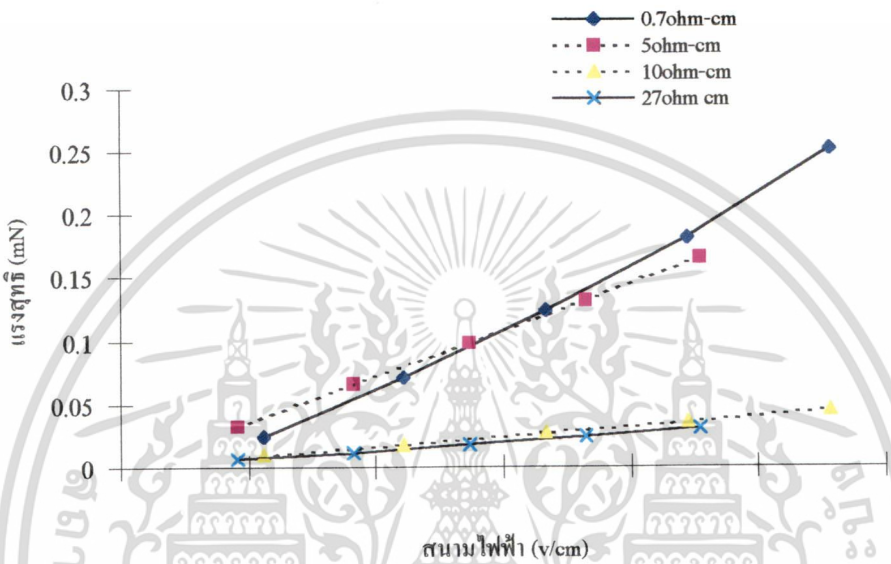
รูปที่ 14 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงไฟฟ้าสถิต บนแผ่นซิลิกอนชนิดพี 10 Ω.cm ที่ถูกวางไว้ระหว่างขั้วไฟฟ้าที่มีความต่างศักย์ค่าต่างๆ กันใน ตำแหน่งต่างๆ ระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง



รูปที่ 15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงไฟฟ้าสถิตบนแผ่น ซิลิกอนชนิดเอ็น 5 Ω.cm ที่ถูกวางไว้ระหว่างขั้วไฟฟ้าที่มีความต่างศักย์ค่าต่างๆ กันในตำแหน่ง ต่างๆ ระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปกราฟที่ 14 และ 15 จะเห็นว่า เมื่อแรงดันเพิ่มขึ้น แรงรวมสุทธิที่วัดได้จะมีค่ามากขึ้น ผลการทดลองวัดแรงคูลอมบ์ที่เกิดขึ้นบนแผ่นซิลิกอนที่มีความเข้มข้นสารเจือค่าต่างๆ ที่วางไว้ในสนามไฟฟ้าค่าต่างๆ แสดงได้ดังในรูปที่ 16 ซึ่งจะเห็นว่าแรงคูลอมบ์แปรผันตรงกับสนามไฟฟ้า

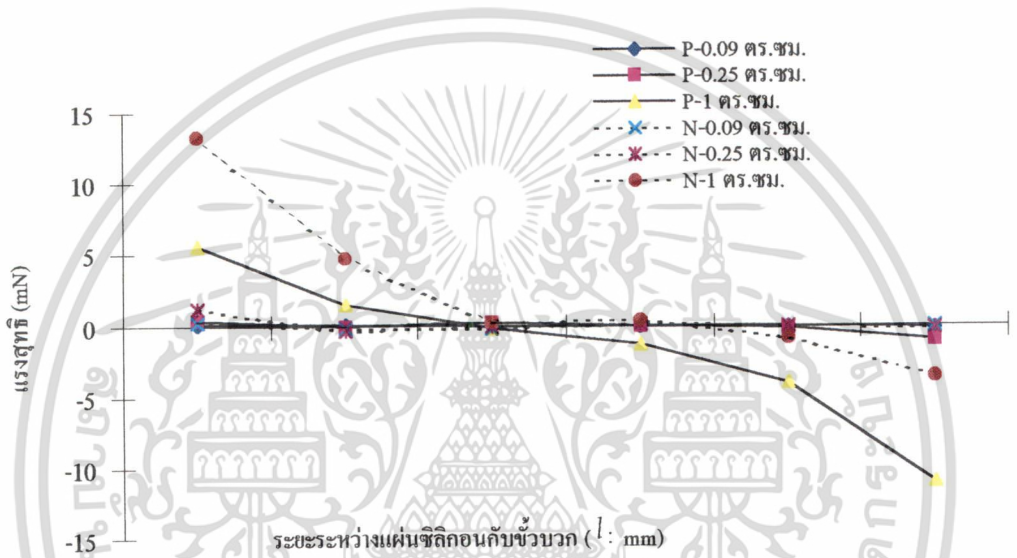


รูปที่ 16 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงรวมสุทธิกับสนามไฟฟ้าของแผ่นผลึกค่าความต้านทานต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.4 ผลของขนาดพื้นที่ของแผ่นซิลิกอน

การทดลองนี้เพื่อศึกษาผลของขนาดพื้นที่แผ่นซิลิกอนกับแรงคูลอมบ์ที่เกิดขึ้นโดยใช้แผ่นซิลิกอนชนิดเอ็นและพีที่มีขนาดพื้นที่ต่างๆ กัน คือ 9 mm^2, 25 mm^2 และ 100 mm^2 วางไว้ในสนามไฟฟ้าที่มีระยะระหว่างขั้วไฟฟ้า L = 1.1 mm และ 0.9 mm สำหรับแผ่นซิลิกอนชนิดเอ็นและพีตามลำดับโดยใช้แรงดันไฟตรงค่าคงที่ 500 โวลต์ ป้อนให้กับขั้วไฟฟ้าทั้งสอง



รูปที่ 17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงไฟฟ้าสถิตกับ แผ่นซิลิกอนขนาดต่างๆ กัน ทั้งชนิดพี 10 Ω และชนิดเอ็น 5 Ω.cm

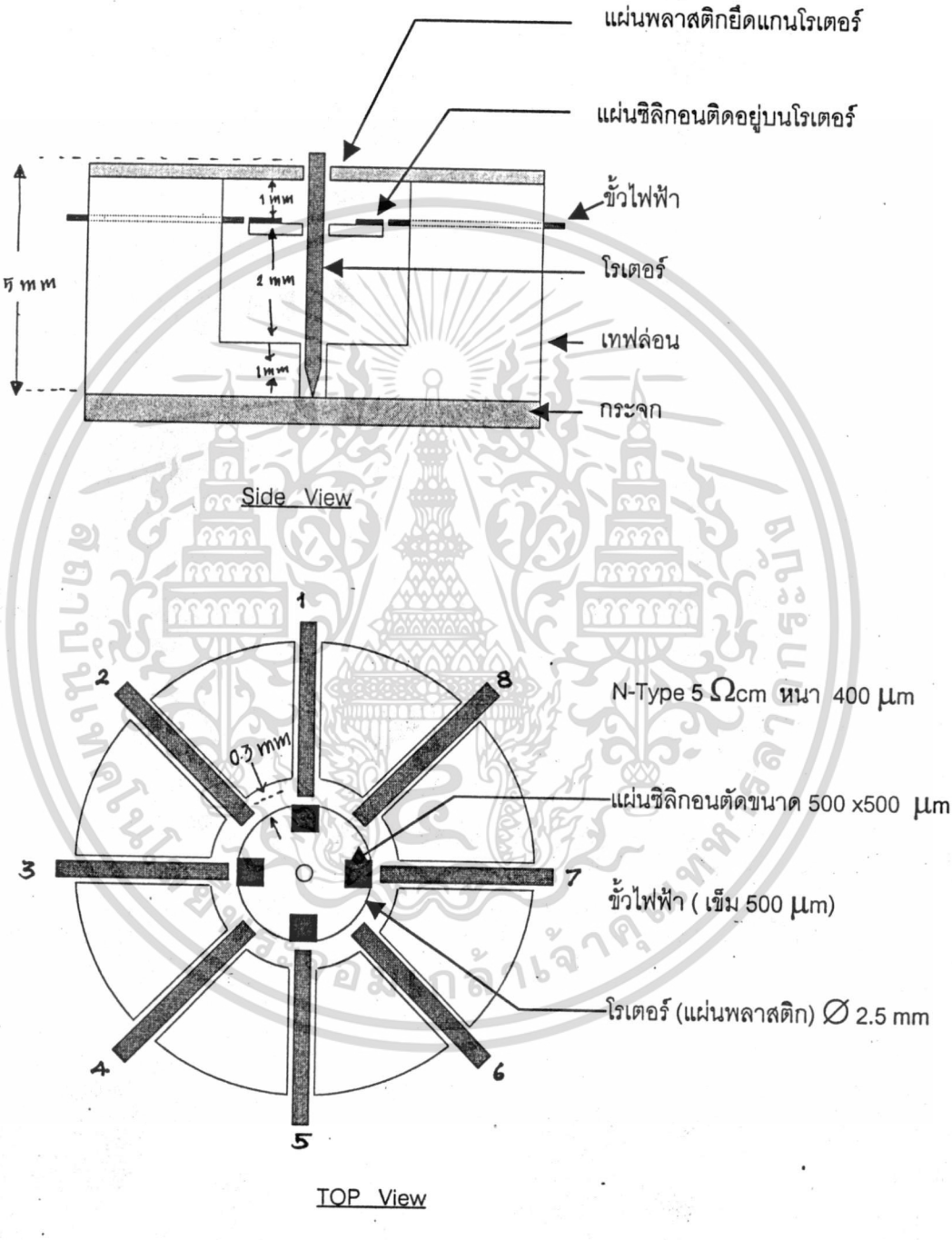
ผลการทดลองแสดงได้ดังในรูปที่ 17 ซึ่งจะเห็นว่าแรงคูลอมบ์ที่เกิดขึ้นบนชิ้นซิลิคอน แปรผันโดยตรงกับขนาดพื้นที่ของแผ่นซิลิกอนทั้งชนิดเอ็นและพี ชิ้นซิลิคอนที่มีขนาดใหญ่จะมีแรงคูลอมบ์ค่ามากกว่าชิ้นที่มีขนาดเล็ก อย่างไรก็ตามชิ้นสารที่มีขนาดใหญ่จะมีน้ำหนักมากกว่า ดังนั้นผลการเคลื่อนที่ของชิ้นสารอาจมีค่าเท่าเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การทดลองสร้าง และประกอบมอเตอร์ไฟฟ้าสถิตอย่างง่าย

4.2.1 โครงสร้างของมอเตอร์ที่สร้าง

ลักษณะโครงสร้างของมอเตอร์ไฟฟ้าสถิตที่ออกแบบสร้างแสดงได้ดังในรูปที่ 18



รูปที่ 18 แสดงลักษณะโครงสร้างของมอเตอร์ไฟฟ้าสถิตที่สร้างขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 การสร้าง

(ก) ส่วนของโรเตอร์ เป็นแผ่นพลาสติคบางประเภทไมล่าร์ มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 มิลลิเมตร มีชิ้นสารกึ่งตัวนำซิลิคอนชนิดเอ็นจำนวน 4 ชิ้นติดอยู่บนแผ่นโรเตอร์นี้ โดยวางให้ชิ้นซิลิคอนทั้ง 4 ชิ้น ทำมุมต่อกัน 90 องศา ชิ้นของซิลิคอนมีขนาด 500 x 500 ตารางไมโครเมตร จุดศูนย์กลางของแผ่นของโรเตอร์ถูกวางอยู่บนแกนของแท่งสเตนเลสปลายแหลมขนาด ราว 100 ไมโครเมตร
ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของแท่งสเตนเลสนี้ประมาณ 500 ไมโครเมตร และสูงราว 5 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูป

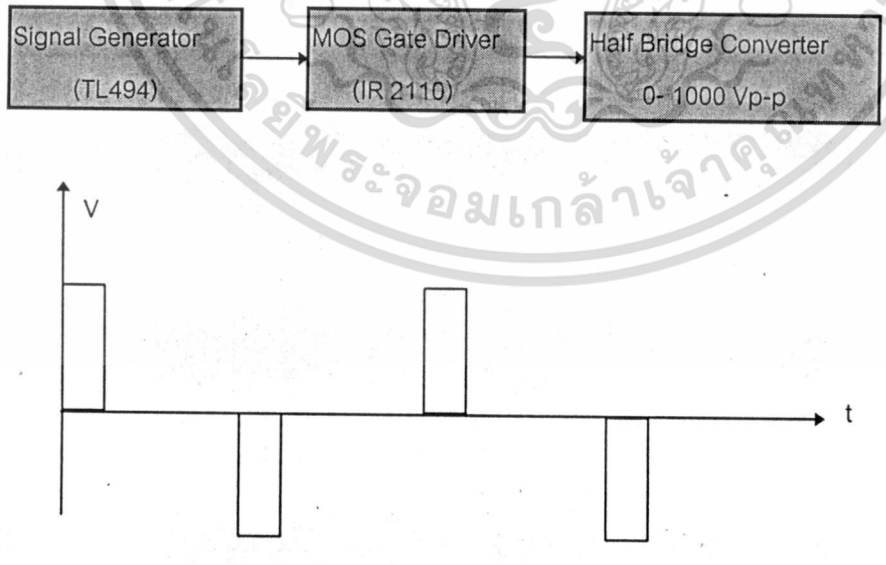
(ข) ส่วนสเตเตอร์ หรือขั้วไฟฟ้า แผ่นสเตเตอร์ ถูกฝังไว้ในฐานสเตเตอร์ซึ่งทำด้วยวัสดุเทปล่อน มีเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 10 มิลลิเมตร สูง 4 มิลลิเมตร และเส้นผ่าศูนย์กลางภายในสเตเตอร์ มีขนาด 3.5 มิลลิเมตร ขั้วไฟฟ้าของสเตเตอร์มีทั้งหมดจำนวน 8 ขั้ว ทำจากเข็มสเตนเลส ขนาด 500 ไมโครเมตร ปลายขั้วของสเตเตอร์นี้ถูกปรับให้อยู่ห่างจากขอบของโรเตอร์ประมาณ 0.3 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูป

(ค) ส่วนฐานของมอเตอร์ ส่วนฐานของมอเตอร์ทำด้วยวัสดุกระจกใสผิวเรียบ เพื่อลดแรงเสียดทานของมอเตอร์ความหนาราว 1.5 มิลลิเมตร

ในการประกอบมอเตอร์ ส่วนของโรเตอร์ซึ่งยึดติดกับเข็มสเตนเลส จะถูกวางลงไปในส่วนกลางของฐานสเตเตอร์ โดยปลายของเข็ม และฐานของสเตเตอร์ ถูกวางลงบนแผ่นกระจก ดังแสดงในรูป

(ง) ส่วนของแหล่งจ่ายแรงดันพัลซ์รูปสี่เหลี่ยม

ส่วนของแหล่งจ่ายแรงดันพัลซ์รูปสี่เหลี่ยม เพื่อจ่ายให้แก่มอเตอร์ ได้แก่Switching Power Supply ซึ่งประกอบด้วยส่วนต่างๆคือ Signal Generator Driver และ Half Bridge Converter ซึ่งสามารถจ่ายแรงดันพัลซ์รูปสี่เหลี่ยมขนาด 0 - 1000 Vp-p และสามารถปรับค่าความถี่ของพัลซ์ได้ ดังแสดงในรูปที่ 19

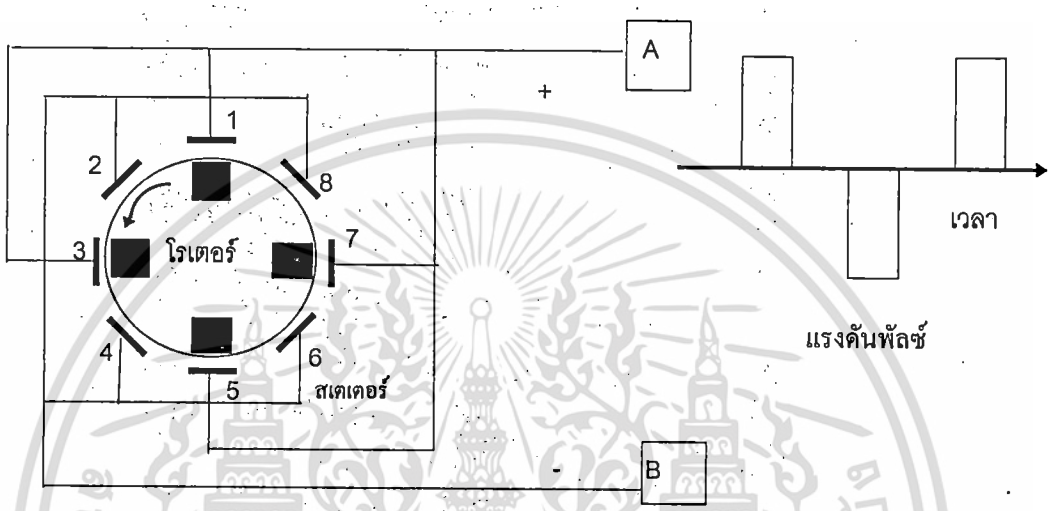


รูปที่ 19 แสดงส่วนประกอบของแหล่งจ่ายแรงดันพัลซ์รูปสี่เหลี่ยม และลักษณะของแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 การทดสอบการทำงานของมอเตอร์

สำหรับมอเตอร์ไฟฟ้าสถิตที่สร้างขึ้น ขั้วของสเตเตอร์(Stator) ที่ 1, 3,5 และ 7 จะถูกต่อเข้าด้วยกันและออกที่ขั้ว A ส่วนของขั้วสเตเตอร์ที่ 2 , 4, 6 และ 8 จะถูกต่อเข้าด้วยกัน และนำออกที่ขั้ว B การทดสอบการทำงานของมอเตอร์ ทำได้โดยการป้อนแรงดันพัลซ์ จากแหล่งจ่ายแรงดัน ให้แก่มอเตอร์ที่ขั้ว A และ B ดังแสดงในรูปที่ 21



รูปที่ 21 แสดงการต่อขั้วของโรเตอร์ เพื่อการทดสอบการทำงานของ

ผลการทดสอบ

ในการทดลองนี้ได้ทำการออกแบบและสร้างแหล่งจ่ายแรงดันพัลซ์ เพื่อใช้ในการขับเคลื่อนให้มอเตอร์ทำงาน เมื่อแรงดันพัลซ์ที่ป้อนให้แก่มอเตอร์ มีขนาดของแรงดันน้อยกว่า 200 โวลต์ มอเตอร์จะยังไม่ทำงาน นั่นคือแรงไฟฟ้าสถิตที่เกิดบนชิ้นสารซิลิกอนที่โรเตอร์มีค่าไม่เพียงพอที่จะทำให้มอเตอร์หมุนได้ แม้ว่าจะมีการกระตุ้นด้วยการให้แรงเริ่มต้นแก่มอเตอร์ แต่เมื่อขนาดของแรงดันพัลซ์มีค่ามากกว่า 200 โวลต์ และโดยการช่วยให้มีแรงหมุนเริ่มต้น แก่มอเตอร์มอเตอร์จะสามารถทำงานได้โดยมีการหมุนอย่างต่อเนื่อง และเมื่อให้แรงดันพัลซ์ มีค่าเพิ่มขึ้น ความเร็วของมอเตอร์จะเพิ่มขึ้นด้วย นอกจากนี้เมื่อเพิ่มความถี่ของพัลซ์ ความเร็วของมอเตอร์ก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน อย่างไรก็ดี จากการทดลองพบว่า การสร้างมอเตอร์ไฟฟ้าสถิตขนาดจิ๋ว มีความยุ่งยาก พอสมควร กล่าวคือ เนื่องจากอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการสร้างมีขีดจำกัด เช่นชิ้นของสารกึ่งตัวนำทั้ง 4 ชิ้นที่มีขนาดเล็ก และได้จากการตัดแผ่นผลึก เครื่องมือที่ใช้ทำให้แต่ละชิ้นมีขนาดต่างกันบ้าง แต่แม้เพียงเล็กน้อย ก็จะทำให้น้ำหนักของชิ้นซิลิคอนไม่เท่ากัน ดังนั้นโรเตอร์จึงเกิดความไม่สมดุล ขณะที่มอเตอร์ทำงานแผ่นของโรเตอร์จะหมุนโดยแกว่ง จากจุดศูนย์ถ่วง ทำให้มีแรงเสียดทานเพิ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขึ้น และมอเตอร์หมุนไม่สะดวก ในบางครั้งจะทำให้มอเตอร์หยุดหมุนได้ ซึ่งเป็นปัญหาต่อการทำงานของมอเตอร์ นอกจากนี้ยังพบว่า แหล่งจ่ายพัลซ์แรงดันสูง ที่สร้างขึ้นมีความไม่แน่นอนในการจ่ายแรงดัน และมีปัญหาในการควบคุมขนาด และความถี่ของพัลซ์ โดยเฉพาะที่แรงดันสูงๆ ลักษณะ ของพัลซ์ ขนาด และความถี่ของพัลซ์ ควบคุมยาก และไม่สม่ำเสมอ และมักมีอาการเสียเกิดขึ้นบ่อยๆ จึงเป็นอุปสรรคต่อการทดสอบคุณสมบัติของมอเตอร์ไฟฟ้าสถิตเป็นอย่างมาก โดยทำให้มอเตอร์ทำงานได้ไม่แน่นอน ดังนั้นการทดสอบมอเตอร์ควรทำกังแหล่งจ่ายแรงดันพัลซ์ที่มีประสิทธิภาพสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปและวิจารณ์

งานการศึกษาและวิจัยนี้ เป็นงานวิจัยพื้นฐานเชิงประยุกต์ ซึ่งเป็นการศึกษา และทดลองเกี่ยวกับหลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าสถิตชนิดใหม่ ซึ่งเป็นมอเตอร์ที่มีโครงสร้างง่ายๆ ไม่ยุ่งยากหรือซับซ้อนเช่นมอเตอร์ไฟฟ้า ทั่วไป ที่ต้องมีขดลวดเพื่อการเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็ก แต่มอเตอร์ชนิดนี้ไม่ต้องมีขดลวดใดๆ จึงทำให้มอเตอร์ชนิดนี้มีขนาดเล็ก และยังสามารถที่จะพัฒนาให้เป็นมอเตอร์ที่เล็กมากได้ โดยใช้เทคโนโลยีของการสร้างอุปกรณ์ไมโครอิเล็กทรอนิคส์

งานวิจัยเริ่มจากการศึกษาแรงที่เกิดขึ้นบนชิ้นสารกึ่งตัวนำซิลิคอน ทั้งชนิดเอ็น และชนิดพี โดยได้ทดลองและวัดการเปลี่ยนแปลงของแรงที่เกิดบนชิ้นซิลิคอน กับผลของชนิดอะตอมสารเจือ ผลของความหนาแน่นของอะตอมสารเจือ ผลของสนามไฟฟ้า ผลของตำแหน่งและขนาดพื้นที่ของชิ้นสารซิลิคอนที่ถูกวางในสนามไฟฟ้า การจัดเตรียมอุปกรณ์ในการทดลองให้เหมาะสมเป็นเรื่องที่สำคัญ และต้องทำให้ได้ผลที่ชัดเจนและแน่นอน เพราะแรงที่เกิดนี้ มีขนาดน้อยมาก อุปกรณ์ที่ใช้ต้องสามารถแสดงผลที่ถูกต้อง

นอกจากนี้ในการวิจัยนี้ ได้ออกแบบ และทดลองสร้างและประกอบมอเตอร์ไฟฟ้าสถิตขนาดเล็กซึ่งมีโครงสร้างง่ายๆ โดยใช้ชิ้นซิลิคอน 4 ชิ้นติดตั้งบนโรเตอร์ รอบๆโรเตอร์ มีสเตเตอร์ หรือขั้วไฟฟ้าจำนวน 8 ขั้ว แต่ละขั้วจะอยู่ห่างเป็นระยะที่เท่ากัน ผลการทดลองได้ผลน่าพอใจ โดยมอเตอร์สามารถทำงานได้ แม้จะมีอุปสรรคบ้างในเรื่องของการประกอบให้ได้มอเตอร์ที่มีโครงสร้างที่สมดุล และสมมาตรกันอย่างสมบูรณ์ แต่จากการทดลองก็ให้ผลที่ดี และทำให้คณะผู้วิจัย ได้รับความรู้ และประสพการณ์ที่เป็นประโยชน์มาก อุปสรรคอีกประการหนึ่งได้แก่แหล่งจ่ายแรงดันพัลซ์ที่ดำเนินการจัดสร้างและประกอบขึ้นเอง ให้แรงดันเอาท์พุทที่ไม่สูงมากพอ และไม่สม่ำเสมอ ไม่แน่นอน จึงทำให้เป็นอุปสรรคต่อการทดสอบคุณสมบัติ การทำงานและการนำไปประยุกต์ใช้งานของมอเตอร์ อย่างไรก็ดี ข้อมูลและประสพการณ์ที่ได้จากงานวิจัยนี้ เป็นสิ่งที่มีคุณค่ามากสำหรับการวิจัยและพัฒนามอเตอร์ไฟฟ้าสถิตขนาดจิ๋วต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

สมมุติให้ขั้วอิเลคโตดทั้งหมดเป็นตัวนำไฟฟ้า จากทฤษฎีของเกาส์ จะได้ว่าสนามไฟฟ้าภายในตัวนำจะมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นอิเลกโตดจึงมีสนามไฟฟ้าภายในเป็นศูนย์ดังรูปที่ B1

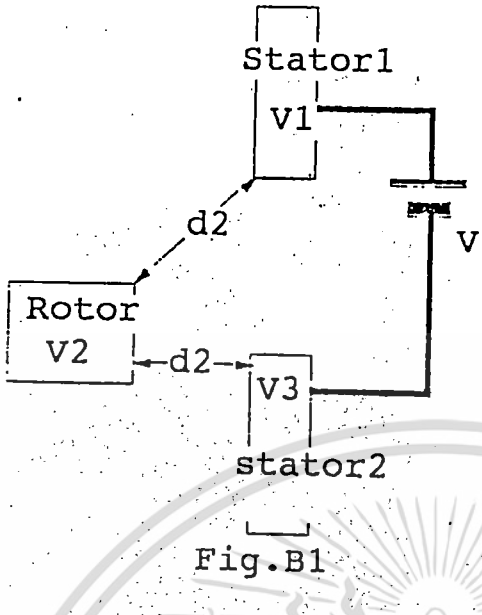


Fig.B1

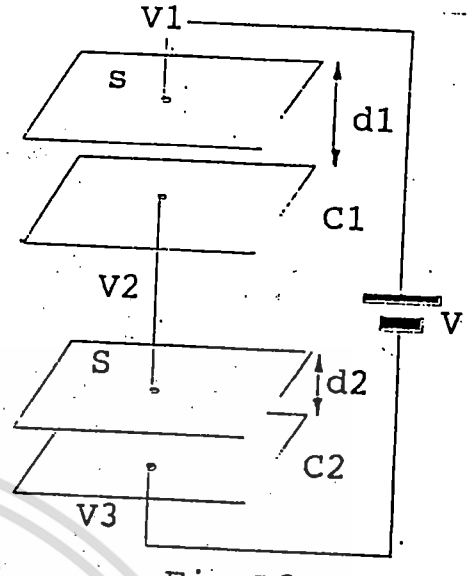


Fig.B2

สมมุติให้ความต่างศักย์ระหว่าง V1-V2 และ V2-V3 ขึ้นอยู่กับระยะทางที่ใกล้ที่สุด d1 และ d2 ในภาพโรเตอร์และสเตเตอร์ ความต่างศักย์ที่ให้ไปจะสามารถแบ่งออกเป็นโวลต์ที่ต่างกันในตัวเก็บประจุสองตัวที่ต่อขนานกัน ดังรูปที่ B2 ซึ่งจะมีสมการดังนี้

$$C_T = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \quad \text{และ} \quad Q = C_T V$$

V1-V2 และ V2-V3 จะเป็น

$$V_1 - V_2 = \frac{Q}{C_1} = \frac{C_2}{C_1 + C_2} V$$

$$V_2 - V_3 = \frac{Q}{C_2} = \frac{C_1}{C_1 + C_2} V$$

$C_1 = \frac{\varepsilon S}{d_1}$ และ $C_2 = \frac{\varepsilon S}{d_2}$ จะสามารถเขียนในรูประยะทางเป็น

$$V_1 - V_2 = \frac{d_1}{d_1 + d_2} V$$

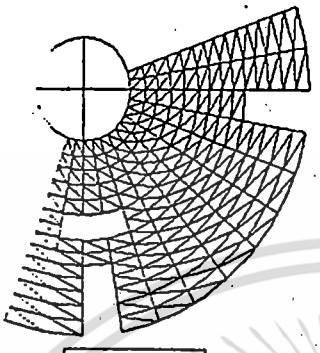
$$V_2 - V_3 = \frac{d_2}{d_1 + d_2} V$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

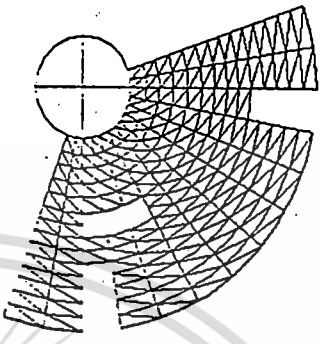
Appendix

Two Dimensional FEM Software

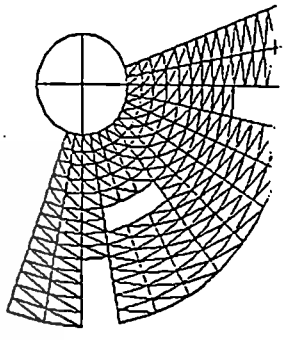
Finite Element of Static Motor



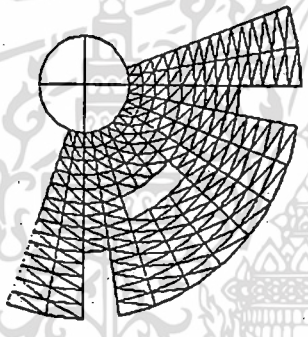
X = 0 deg.



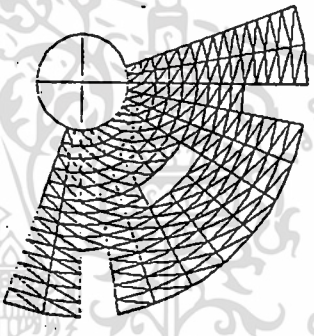
X =10 deg



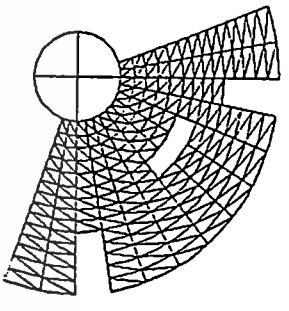
X =20 deg



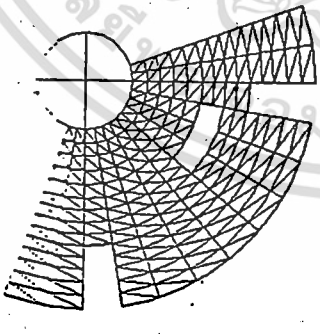
X =30 deg



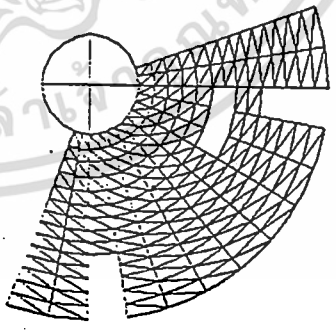
X =40 deg



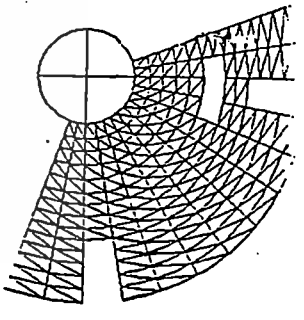
X =50 deg



X =60 deg



X =70 deg



X =80 deg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Part of numerical data

For X=40deg. Node X,Y coordinates

node	X-Coor (m)	Y-Coor(m)
1	0.00596	0.00577
2	0.00672	0.00557
3	0.0075	0.0055
4	0.00828	0.00557
5	0.00904	0.00577
6	0.00975	0.006105
7	0.010395	0.006555
8	0.010945	0.007105
9	0.011395	0.00775
10	0.01173	0.00846
11	0.01193	0.00922
12	0.012	0.01
13	0.01193	0.01078
14	0.01173	0.01154
15	0.00613	0.00624
16	0.006805	0.00606
17	0.0075	0.006
18	0.008195	0.00606
19	0.00887	0.00624
20	0.0095	0.006535
21	0.01007	0.006935
22	0.010565	0.00743
23	0.010965	0.008
24	0.01126	0.00863
25	0.01144	0.009305

Element indexes and Permitivity

No. element	node I	node j	node k	In X(F/m)	in Y(F/m)
1	1	2	15	8.85E-12	8.85E-12
2	15	2	16	8.85E-12	8.85E-12
3	2	3	16	8.85E-12	8.85E-12
4	16	3	17	8.85E-12	8.85E-12
5	4	5	18	8.85E-12	8.85E-12
6	18	5	19	8.85E-12	8.85E-12
7	5	6	19	8.85E-12	8.85E-12
8	19	6	20	8.85E-12	8.85E-12
9	6	7	20	8.85E-12	8.85E-12
10	20	7	21	8.85E-12	8.85E-12
11	7	8	21	8.85E-12	8.85E-12
12	21	8	22	8.85E-12	8.85E-12
13	8	9	22	8.85E-12	8.85E-12
14	22	9	23	8.85E-12	8.85E-12
15	9	10	23	8.85E-12	8.85E-12
16	23	10	24	8.85E-12	8.85E-12
17	10	11	24	8.85E-12	8.85E-12
18	24	11	25	8.85E-12	8.85E-12
19	12	13	26	8.85E-12	8.85E-12
20	26	13	27	8.85E-12	8.85E-12
21	13	14	27	8.85E-12	8.85E-12
22	27	14	28	8.85E-12	8.85E-12
23	15	16	29	8.85E-12	8.85E-12
24	29	16	30	8.85E-12	8.85E-12
25	16	17	30	8.85E-12	8.85E-12

Boundary conditions

node	Potential(V)
3	0
4	0
11	500
12	500
17	0
18	0
25	500
26	500
31	0
32	0
39	500
40	500
48	250
49	250
50	250
51	250
62	250
63	250
64	250
65	250

Potential distribution

```
'Nov 14,1998 modified by Praphaphan
'For micromotor
'Option setting
Option Explicit
Public Const NumberOfNodes As Integer = 112, NumberOfElements As Integer = 168
Public Kmatrix(1 To NumberOfNodes, 1 To NumberOfNodes) As Single
Public Const NumberOfNodesOf1stClassBC As Integer = 20
Public Fvector(1 To NumberOfNodes) As Single
Public XcoordinateOfNode(1 To NumberOfNodes) As Single
Public YcoordinateOfNode(1 To NumberOfNodes) As Single
Sub main()
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    MatrixandVector          'module 3
    BoundCond                'module 4
    linearEquation           'module 5
End Sub
Sub MatrixandVector()
Dim targetrange As Range
Dim membersOfElement(1 To 3) As Integer
Dim Bijk(1 To 3) As Single
Dim Cijk(1 To 3) As Single
Dim CondDx As Single
Dim CondDy As Single
Dim Element  As Integer
Dim ElementAreaDet As Single
Dim CirculateL As Integer
Dim CirculateM As Integer
Dim InterimValue As Single
Dim i As Integer
Dim j As Integer
For Element = 1 To NumberOfElements
    Worksheets("element").Select
    Set targetrange = Range("BT3:BX1759")
    membersOfElement(1) = targetrange.Cells(Element, 1)
    membersOfElement(2) = targetrange.Cells(Element, 2)
    membersOfElement(3) = targetrange.Cells(Element, 3)
    CondDx = targetrange.Cells(Element, 4)
    CondDy = targetrange.Cells(Element, 5)
     Worksheets("node").Select
    Set targetrange = Range("BE3:BF1247")
    XcoordinateOfNode(membersOfElement(1)) = targetrange.Cells(membersOfElement(1), 1)
    YcoordinateOfNode(membersOfElement(1)) = targetrange.Cells(membersOfElement(1), 2)
    XcoordinateOfNode(membersOfElement(2)) = targetrange.Cells(membersOfElement(2), 1)
    YcoordinateOfNode(membersOfElement(2)) = targetrange.Cells(membersOfElement(2), 2)
    XcoordinateOfNode(membersOfElement(3)) = targetrange.Cells(membersOfElement(3), 1)
    YcoordinateOfNode(membersOfElement(3)) = targetrange.Cells(membersOfElement(3), 2)
    Bijk(1) = YcoordinateOfNode(membersOfElement(2)) - _
              YcoordinateOfNode(membersOfElement(3))
    Bijk(2) = YcoordinateOfNode(membersOfElement(3)) - _
              YcoordinateOfNode(membersOfElement(1))
    Bijk(3) = YcoordinateOfNode(membersOfElement(1)) - _
              YcoordinateOfNode(membersOfElement(2))

    Cijk(1) = XcoordinateOfNode(membersOfElement(3)) - _
              XcoordinateOfNode(membersOfElement(2))
    Cijk(2) = XcoordinateOfNode(membersOfElement(1)) - _
              XcoordinateOfNode(membersOfElement(3))
    Cijk(3) = XcoordinateOfNode(membersOfElement(2)) - _
              XcoordinateOfNode(membersOfElement(1))
     ElementAreaDet = (Bijk(2) * Cijk(3) - Bijk(3) * Cijk(2)) / 2
      For CirculateL = 1 To 3
        For CirculateM = 1 To 3
          InterimValue = (CondDx * Bijk(CirculateL) * Bijk(CirculateM) + _
                  CondDy * Cijk(CirculateL) * Cijk(CirculateM)) / ElementAreaDet
          Kmatrix(membersOfElement(CirculateL), membersOfElement(CirculateM)) = _
          Kmatrix(membersOfElement(CirculateL), membersOfElement(CirculateM)) + _
                  InterimValue
        Next CirculateM
      Next CirculateL
Next Element
        Worksheets("PartOfK").Select  'new Kmatrix(sheet PartOfK)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        Set targetrange = Range("A1:DH112")
        For i = 1 To 112
          For j = 1 To 112
            targetrange.Cells(i, j) = Kmatrix(i, j)
          Next j
        Next i
End Sub
Sub BoundCond()
Dim targetrange As Range
Dim L As Integer
Dim M As Integer
Dim i As Integer
Dim j As Integer
Dim Node  As Integer
Dim Temp As Single
 For L = 1 To NumberOfNodesOf1stClassBC
   Worksheets("BC").Select
   Set targetrange = Range("U3:V22")
   Node = targetrange.Cells(L, 1)
   Temp = targetrange.Cells(L, 2)
     For M = 1 To NumberOfNodes
       Fvector(M) = Fvector(M) - Kmatrix(M, Node) * Temp
     Next M
   For i = 1 To NumberOfNodes
     Kmatrix(Node, i) = 0
     Kmatrix(i, Node) = 0
   Next i
   Kmatrix(Node, Node) = 1
   Fvector(Node) = Temp
Next L
Worksheets("PartOfK").Select  'view Kmatrix(sheet PartOfK)
Set targetrange = Range("A1:DH112")
For i = 1 To 112
  For j = 1 To 112
    targetrange.Cells(i, j) = Kmatrix(i, j)
  Next j
Next i
End Sub
Sub linearEquation()
Dim targetrange As Range
Dim i As Integer
Dim j As Integer
Dim M As Integer
Dim interimP As Single
Dim interimQ As Single
For M = 1 To NumberOfNodes
                    'MsgBox "M=" & M
  interimP = 1 / (Kmatrix(M, M))
                    'MsgBox "(Kmatrix(M,M))=" & (Kmatrix(M, M))
                    'MsgBox "interimp= " & interimP
  For j = M To NumberOfNodes
    Kmatrix(M, j) = Kmatrix(M, j) * interimP
  Next j
  Fvector(M) = Fvector(M) * interimP
  For i = 1 To NumberOfNodes
    If i <> M Then
    interimQ = Kmatrix(i, M)
                    'MsgBox "InterimQ=" & interimQ
    If interimQ <> 0 Then
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
      For j = M To NumberOfNodes
                  'MsgBox "J=" & J
        Kmatrix(i, j) = Kmatrix(i, j) - interimQ * Kmatrix(M, j)
      Next j
      Fvector(i) = Fvector(i) - interimQ * Fvector(M)
    End If
    End If
    Next i
Next M
Worksheets("node").Select
Set targetrange = Range("BG3:BG114")
For i = 1 To NumberOfNodes
  targetrange.Cells(i) = Fvector(i)
Next i
End Sub
```

Electric field distribution

```
'Nov 14th 1998 modified by Praphaphan
  'Electric Field
Option Explicit
Public PotentialOfNode(1 To NumberOfNodes)
Public Yi, Yj, Yk As Single
Public Ex(1 To NumberOfElements)
Public Ey(1 To NumberOfElements)
Public SineE(1 To NumberOfElements)
Public E(1 To NumberOfElements)
Sub ElectricField()
Dim targetrange As Range
Dim i, j, K As Integer
Dim ValueOfBijk(1 To 3) As Single
Dim ValueOfCijk(1 To 3) As Single
Dim DoubleDelta As Single
Dim Vi, Vj, Vk As Single
Dim AA As Single
Dim IJKOfElement(1 To 3) As Integer
Worksheets("PostprocData1").Select
Set targetrange = Range("AP3:AR114")
For i = 1 To NumberOfNodes
  XcoordinateOfNode(i) = targetrange.Cells(i, 1)
  YcoordinateOfNode(i) = targetrange.Cells(i, 2)
  PotentialOfNode(i) = targetrange.Cells(i, 3)
Next i

Worksheets("PostprocData2").Select
Set targetrange = Range("B4:D171")
For j = 1 To NumberOfElements
  IJKOfElement(1) = targetrange.Cells(j, 1)
  IJKOfElement(2) = targetrange.Cells(j, 2)
  IJKOfElement(3) = targetrange.Cells(j, 3)

  ValueOfBijk(1) = YcoordinateOfNode(IJKOfElement(2)) - YcoordinateOfNode(IJKOfElement(3))
'=Yj-Yk
  ValueOfBijk(2) = YcoordinateOfNode(IJKOfElement(3)) - YcoordinateOfNode(IJKOfElement(1))
'=Yk-Yi
  ValueOfBijk(3) = YcoordinateOfNode(IJKOfElement(1)) - YcoordinateOfNode(IJKOfElement(2))
'=Yi-Yj
  ValueOfCijk(1) = XcoordinateOfNode(IJKOfElement(3)) - XcoordinateOfNode(IJKOfElement(2))
'=Xk-Xj
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    ValueOfCijk(2) = XcoordinateOfNode(IJKOfElement(1)) - XcoordinateOfNode(IJKOfElement(3))
'=Xi-Xk
    ValueOfCijk(3) = XcoordinateOfNode(IJKOfElement(2)) - XcoordinateOfNode(IJKOfElement(1))
'=Xj-Xi
              'MsgBox "Xi=" & Xcocrd(IJKOfElement(1))
     DoubleDelta = ValueOfBijk(2) * ValueOfCijk(3) - ValueOfBijk(3) * ValueOfCijk(2)
              'MsgBox "2Delta=" & DoubleDelta
    Vi = PotentialOfNode(IJKOfElement(1))
    Vj = PotentialOfNode(IJKOfElement(2))
    Vk = PotentialOfNode(IJKOfElement(3))

    AA = -1 / DoubleDelta
    Ex(j) = AA * (ValueOfBijk(1) * Vi + ValueOfBijk(2) * Vj + ValueOfBijk(3) * Vk)
    Ey(j) = AA * (ValueOfCijk(1) * Vi + ValueOfCijk(2) * Vj + ValueOfCijk(3) * Vk)
    E(j) = ((Ex(j) ^ 2 + Ey(j) ^ 2) ^ (1   2))
    SineE(j) = Ey(j) / ((Ex(j) ^ 2 + Ey(j) ^ 2) ^ (1 / 2))
  Next j
  Worksheets("PostprocData2").Select
  Set targetrange = Range("BW4:BZ1771")
  For K = 1 To NumberOfElements
    targetrange.Cells(K, 1) = Ex(K)
    targetrange.Cells(K, 2) = Ey(K)
    targetrange.Cells(K, 3) = SineE(K)
    targetrange.Cells(K, 4) = E(K)
  Next K
  End Sub
```

Force calculation

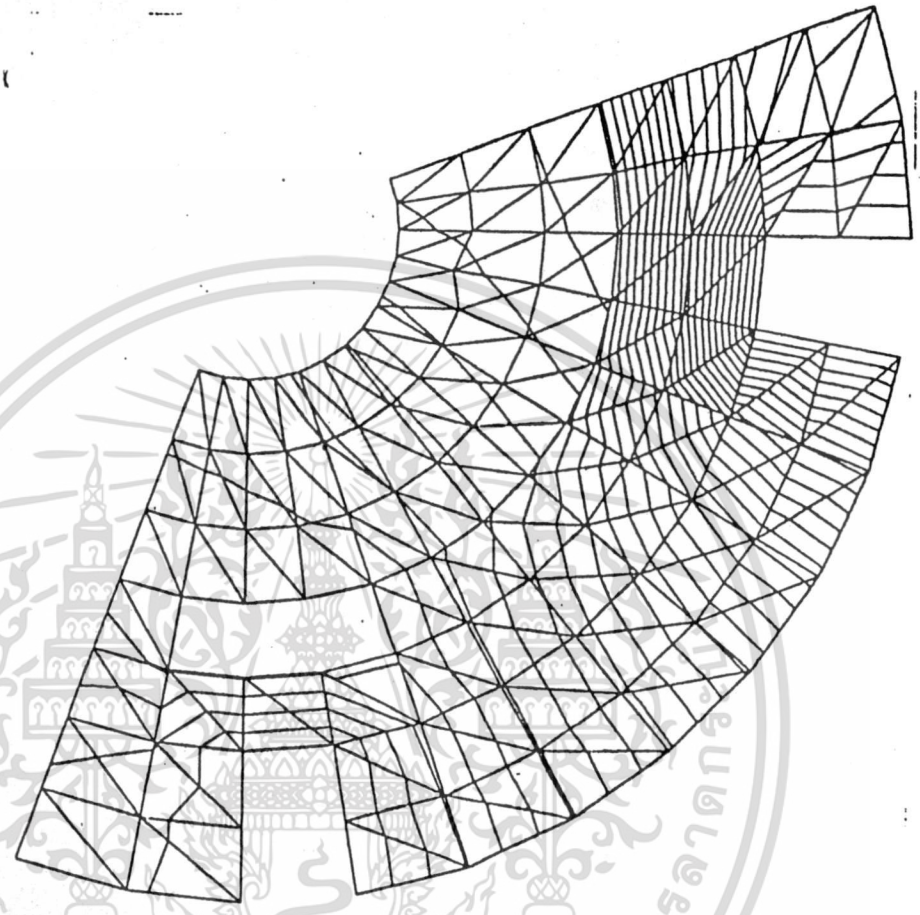
```
Nov 14,1998 modified by Praphaphan
Option Explicit
Const NumberOfElements As Integer = 90
Const E0 As Double = 8.8542 * 10 ^ -12
Sub Forcecalculation1()
Dim ElectricField(1 To NumberOfElements) As Single
Dim ForceOfElements(1 To NumberOfElements) As Single
Dim i, j As Integer
Dim targetrange As Range
Worksheets("PostProcData2").Select
Set targetrange = Range("BS4:BS93")
For i = 1 To NumberOfElements
  ElectricField(i) = targetrange.Cells(i, 1)
  ForceOfElements(i) = 1 / 2 * E0 * (ElectricField(i)) ^ 2  'n = 1
Next i
Worksheets("PostProcData2").Select
Set targetrange = Range("BT4:BT93")
For j = 1 To NumberOfElements
  targetrange.Cells(j, 1) = ForceOfElements(j)
Next j
End Sub
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Appendix

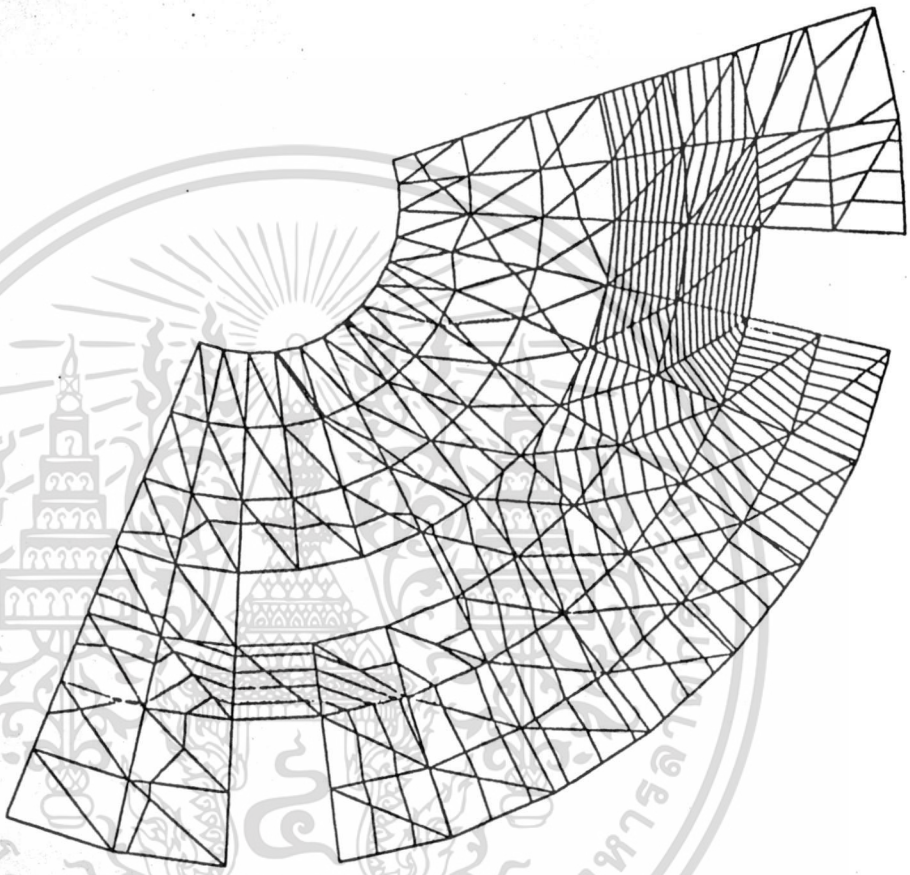
Potential Distributions

X=0deg.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

X=10deg.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. Akio Takahashi , Yukio Akiba, Tetsuya Tamura, Fumihiko Ohse and Masamori Iida " New Type of Electrostatic Motor Based on Asymmetri Distribution of Electric Charge in Semiconductors"
2. Hiroyoki Fujita and Kaigham J. Gabriel " New Opportunities to Micro Actuators" 1991 IEEE p.p. 14 - 20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้