การออกแบบและกระบวนการสร้างเซนเซอร์วัดความชื้นแบบตัวเก็บประจุ

THE CAPACITIVE HUMIDITY SENSOR: DESIGN AND FABRICATION

อาคม ศรีหาเพท
ARCKOM SRIHAPAT

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2556

KMITL-2013-EN-M-043-175

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE CAPACITIVE HUMIDITY SENSOR: DESIGN AND FABRICATION

ARCKOM SRIHAPAT

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN MICROELECTRONICS ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2013

KMITL-2013-EN-M-043-175

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COPYRIGHT 2013
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การออกแบบและกระบวนการสร้างเซนเซอร์วัดความชื้นแบบตัวเก็บประจุ
Thesis Title The Capacitive Humidity Sensor : Design and Fabrication
นักศึกษา นายอาคม ศรีหาเพท
รหัสประจำตัว 54612407
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2013-EN-M-043-175

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.สุรศักดิ์	เนียมเจริญ	
ดร.โยธิน	วงศ์ประเสริฐ	
ดร.อัมพร	โพธิ์ใย	
ดร.นรินทร์	อติวงศ์แสงทอง	
รศ.ดร.วิสุทธิ์	ฐิติรุ่งเรือง	

วัน / เดือน/ ปี ที่สอบ วันอังคารที่ 8 ตุลาคม พ.ศ. 2556 เวลา 13.00-15.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร 12 ชั้น (E12) ห้อง E12-301

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว

(ศาสตราจารย์ ดร.สุชัชวีร์ สุวรรณสวัสดิ์)
คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่ 8 ตุลาคม พ.ศ. 2556

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบและกระบวนการสร้างเซนเซอร์วัดความชื้นแบบตัวเก็บประจุ
นักศึกษา	นายอาคม ศรีหาเพท
รหัสนักศึกษา	54612407
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์
พ.ศ.	2556
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้นำเสนอการออกแบบ และกระบวนการสร้างเซนเซอร์ตรวจวัดความชื้นแบบตัวเก็บประจุ โครงสร้างขั้วอินเตอร์ดิจิเตท พัฒนาโดยศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) ใช้เทคนิคการสร้างบนพื้นฐานเทคโนโลยีกระบวนการผลิตซีมอส ออกแบบเซนเซอร์มีลักษณะโครงสร้างเหมือนกับตัวเก็บประจุให้สามารถสัมผัสกับอากาศที่มีความชื้น ซึ่งบริเวณร่องระหว่างขั้วโลหะของซี่หวีจะทำหน้าที่เป็นไดอิเล็กทริกให้กับตัวเก็บประจุ มีขนาดเล็กต่อขนานกัน โดยมีชั้นโลหะ (Aluminium) ชั้นเดียวเป็นโครงสร้างแบบซี่หวีสลับ ออกแบบให้เป็นเครือข่ายรวมของส่วนย่อยๆ 600 ส่วน โดยมีชั้นฟิล์มซิลิคอนไนไตรด์หนา 50 nm เป็นชั้นป้องกันขั้วโลหะ และใช้ช่วยในการดูดซับความชื้น ซึ่งจะทำให้มีขนาดเล็ก และมีค่าความจุไฟฟ้าสูง ทำงานได้ดี มีความไวในการวัดสูง สำหรับกระบวนการสร้างเซนเซอร์ตรวจวัดความชื้นแบบตัวเก็บประจุบนแผ่นซิลิคอน เริ่มจากการปลูกฟิล์มโลหะบนชั้นซิลิคอนไดออกไซด์แล้วทำการกัดชั้นโลหะให้เป็นร่องสำหรับอากาศมาคั่น เพื่อทำหน้าที่เป็นไดอิเล็กทริกให้กับตัวเก็บประจุ ปลูกฟิล์มซิลิคอนไนไตรด์ปิดทับเพื่อป้องกันการลัดวงจรของแผ่นเพลต จากการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าพบว่าค่าความจุทางไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับความหนาของชั้นไดอิเล็กทริก และค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของฉนวนระหว่างขั้วโลหะ ซึ่งในการสร้างครั้งนี้จะได้ yield 98 % โดยตัวเก็บประจุแต่ละตัวจะมีค่าความจุไฟฟ้าเฉลี่ย 10.96 pF และเมื่อเปรียบเทียบค่าที่วัดได้กับตัวผลิตความชื้นมาตรฐานที่ค่าความชื้น 12 %RH, 33 %RH, 75 %RH และ 100 %RH จะพบว่าความจุไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นตามความชื้นในอากาศโดยมีค่าเฉลี่ย 67.7 pF, 78.5 pF, 122.7 pF และ 142.8 pF ตามลำดับ หัววัดความชื้นมีความไวในการตอบสนองที่ 1 pF/%RH นอกจากนั้นยังพบว่าความถี่ในช่วง 1 MHz – 2 MHz และอุณหภูมิช่วง 25 °C - 50 °C ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของเซนเซอร์ตรวจวัดความชื้นแบบตัวเก็บประจุซึ่งเหมาะสมสำหรับการพัฒนาเซนเซอร์วัดความชื้นอากาศ เพื่อพัฒนาสู่เชิงพาณิชย์ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	The Capacitive Humidity sensor: Design and Fabrication
Student	Mr. Arckom Srihapat
Student ID	54612407
Degree	Master of Engineering
Program	Microelectronics Engineering
Year	2013
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Wisut Titiroongruang

ABSTRACT

This thesis introduces design and manufacturing process of interdigitate capacitive humidity sensor developed by Thai Micro-Electronics Center (TMEC). The manufacturing process is based on 0.5 um CMOS technology. By adapting interdigitate structure used as capacitor, spaces between electrodes exposed to humid air act as effective sensing area. The whole structure was designed as a combination of 600 capacitors connected in parallel implemented by one patterned aluminium layer. The interdigitate structure was protected by 50 nm Silicon Nitride film preventing corrosion and also using as an absorbing layer. The manufacturing process was finished in cleanroom environment with micro structure patterning by photo lithography technique cooperating with wet oxidation, chemical vapour deposition and sputtering for thin-film deposition processes and plasma dry etching for finishing patterning result. The device was realised to be high sensitive, small size and practical. Electrical characteristics of the device was estimated by C - V measurement results. Dependency of frequency was found in frequency range of 1 MHz – 2 MHz and operating temperature is around 25 ℃ – 50 ℃ (limit by our testing range). Linear Sensitivity of 1 pF/%RH was calculated from measuring test with standard relative humidity reference of 12 %RH, 33 %RH, 75 %RH and 100 %RH with capacitance of 67.7 pF, 78.5 pF, 122.7 pF and 142.8 pF respectively. Manufacturing yield is around 98 % on this batch and average device capacitance on wafer is 10.96 pF. This is a promising results for further development of a commercial humidity sensor.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ลงได้ ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง ผู้ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา ควบคุมวิทยานิพนธ์ ให้แนวความคิด คำปรึกษา การแก้ไขปัญหา สนับสนุนการทำวิจัย และให้กำลังใจในการทำวิจัยตลอดมา

ขอขอบพระคุณ ดร. อัมพร โพธิ์ใย, คุณชาญเดช หรูอนันทต์ ที่ให้โอกาสในการศึกษา และให้การสนับสนุนในการทำวิจัยจนสำเร็จลุล่วงไปได้

ขอขอบพระคุณ ดร.นิภาพรรณ กลั่นเงิน, ดร.พุทธพล เพ็งพัด, คุณชนะ ลีภัทรพงศ์พันธ์ ที่คอยช่วยเหลือ และให้คำแนะนำต่างๆ

ขอขอบพระคุณพนักงานทุกท่านที่ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านกระบวนการสร้าง รวมถึงเครื่องมือในการวัดต่างๆ ในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ ดร.เฉลิมชัย โฆษิตพิพัฒน์, คุณภูวเดช ยงมหาภากรณ์, คุณภานุ สกลธนารักษ์ ที่ให้การสนับสนุนด้านทุนการศึกษา และเป็นกำลังใจมาโดยตลอด

ท้ายที่สุดขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และพี่ - น้อง ผู้ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง เป็นผู้ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจทางด้านการศึกษามาโดยตลอด จนทำให้ข้าพเจ้ามีความสำเร็จในวันนี้ได้ สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับ บิดา มารดา อาจารย์ที่เคารพทุกท่าน และศูนย์วิจัยไมโครอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งเป็นสถานที่ให้ความรู้ และประสบการณ์ในการทำวิจัย จนกระทั่งจบการศึกษา

อาคม ศรีหาเพท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....II
กิตติกรรมประกาศ.....III
สารบัญ.....IV
สารบัญตาราง.....VII
สารบัญรูป.....VIII

บทที่ 1 บทนำ.....1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....3
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....6
1.6 ขั้นตอนการศึกษา.....6

บทที่ 2 ทฤษฎี.....7
2.1 ตัวเก็บประจุ (Capacitor).....7
2.1.1 โครงสร้างของตัวเก็บประประจุ.....7
2.1.2 ความจุไฟฟ้า (Capacitance).....8
2.1.3 เมทริกค่าความจุไฟฟ้าของแมกเวลล์ (The Maxwell Capacitance Matrix)10
2.1.4 การทำงานของตัวเก็บประจุ.....11
2.2 การวัดความชื้นในบรรยากาศ (Atmospheric humidity).....12
2.2.1 ความชื้นสัมบูรณ์ (Absolute humidity, X).....12
2.2.2 อัตราส่วนผสม (Mixing ratio, r).....12
2.2.3 ความชื้นจำเพาะ (Specific humidity, q).....13
2.2.4 ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity, RH).....13
2.3 การประยุกต์ใช้งานตัวเก็บประจุในการวัดความชื้นอากาศ.....14
2.4 ความไวต่อการตอบสนอง.....14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 การออกแบบ และการดำเนินงานวิจัย 16
3.1 การจำลองการทำงานของเซนเซอร์วัดความชื้นแบบตัวเก็บประจุโดยใช้ซอฟต์แวร์ Sentaurus TCAD 16
3.1.1 จำลองโครงสร้าง และการทำงาน (Simulation) ก่อนทำการบรรจุภัณฑ์ (Packaging) 18
3.1.1.1 การจำลองโครงสร้าง 18
3.1.1.2 การจำลองคุณสมบัติทางไฟฟ้า 18
3.1.1.3 แสดงผลและวิเคราะผลการจำลอง 19
3.1.2 การจำลองโครงสร้างและ การทำงาน (Simulation) หลังทำการบรรจุภัณฑ์ (Packaging) 19
3.2 การทดสอบความสัมพันธ์ของ พื้นที่ของตัวเก็บประจุ และความหนาของชั้นไดอิเล็กทริก ที่คั่นกลางระหว่างขั้วตัวนำไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ 20
3.3 การออกแบบ และสร้างเซนเซอร์วัดความชื้นแบบตัวเก็บประจุ 21
3.3.1 การออกแบบลวดลายสำหรับสร้างเซนเซอร์วัดความชื้นแบบตัวเก็บประจุ 21
3.3.2 ขั้นตอนการสร้างเซนเซอร์วัดความชื้นแบบตัวเก็บประจุ 22
3.4 การทดสอบเซนเซอร์วัดความชื้นแบบตัวเก็บประจุ 27
3.4.1 การวัดลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า – ความถี่ 28
3.4.2 การวัดลักษณะสมบัติกระแส - แรงดันไฟฟ้า 28
3.4.3 การวัดคุณสมบัติการตอบสนองของหัววัดความชื้น 29
3.4.4 การวัดคุณสมบัติการตอบสนองต่ออุณหภูมิ 29

บทที่ 4 ผลการทดลอง และการวิเคราะห์ผลการทดลอง 30
4.1 ผลการจำลอง และวิเคราะห์ผลการจำลอง 30
4.1.1 ผลก่อนทำการบรรจุภัณฑ์ (Packaging) 33
4.1.2 ผลการจำลองหาค่าความจุไฟฟ้า 34
4.1.2.1 ผลความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับค่าศักย์ไฟฟ้าที่ไบอัสที่ขั้ว Anode 35
4.1.2.2 ผลความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับจำนวนเซลล์ 35
4.1.2.3 ผลความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับความหนาของชั้น Si_3N_4 36
4.1.3 หลังทำการบรรจุภัณฑ์ (Packaging) 36
4.1.3.1 ผลโครงสร้างและสมบัติทางไฟฟ้า 36
4.1.4 ผลข้อมูลการวัดค่าความจุไฟฟ้าของเซนเซอร์ 38
4.1.4.1 ผลความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศกับค่าความจุไฟฟ้า 38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.1.4.2 ผลความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ที่ใช้ในการวัดกับค่าความจุไฟฟ้า.... 39
4.1.5 การจำลองหาค่าความจุไฟฟ้าและความสัมพันธ์กับความชื้นสัมพัทธ์ 40
4.1.5.1 หาค่า Permittivity ของ Polymerโดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Permittivity ของ Polymer กับค่าความจุไฟฟ้า..... 40
4.1.5.2 ผลความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับค่า Permittivity ของอากาศ 41
4.2 ผลการทดสอบความสัมพันธ์ของพื้นที่ของตัวเก็บประจุ และความหนาของชั้นไดอิเล็กทริกที่ขั้นกลางระหว่างขั้วตัวนำไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ..... 44
4.3 ผลการออกแบบ และสร้างเซนเซอร์วัดความชื้นแบบตัวเก็บประจุ 44
4.4 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซนเซอร์วัดความชื้นแบบตัวเก็บประจุ..... 46
4.4.1 ผลการวัดลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า – ความถี่ 46
4.4.2 ผลการวัดลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้า..... 47
4.4.3 ผลการวัดคุณสมบัติการตอบสนองของหัววัดความชื้น 48
4.4.4 ผลการวัดคุณสมบัติการตอบสนองต่ออุณหภูมิ 49
4.4.5 ค่าความไวในการตอบสนองของเซนเซอร์วัดความชื้นในอากาศ 50
4.4.6 ค่าฮีสเตอร์รีซีสของเซนเซอร์วัดความชื้นในอากาศแบบตัวเก็บประจุ..... 50

บทที่ 5 สรุปผลงานวิจัย และข้อเสนอแนะ 52

เอกสารอ้างอิง 54
ภาคผนวก ก ไฟล์คำสั่งสำหรับสั่งให้ SDE จำลองโครงสร้างเซนเซอร์วัดความชื้น 56
ภาคผนวก ข ไฟล์คำสั่งสำหรับสั่งให้ Sdevice จำลองคุณสมบัติทางไฟฟ้า 62
ภาคผนวก ค โปรแกรม Inspect ใช้ในการแสดงผลในรูปแบบกราฟ 65
ภาคผนวก ง ไฟล์คำสั่งสำหรับสั่งให้ SDE จำลองโครงสร้างเซนเซอร์วัดความชื้น หลังทำการบรรจุภัณฑ์ (Packaging)..... 66
ภาคผนวก จ ค่าคงที่ทางฟิสิกส์..... 74
ประวัติผู้เขียน..... 75
บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ 78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า
2.1 อัตราการเปลี่ยนแปลงค่า Relative permittivity (ε_r) ต่อค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์..... 10
3.1 พารามิเตอร์ต่างๆ ในการออกแบบ..... 20
4.1 ผลของการจำลอง พารามิเตอร์ต่างๆ ในการออกแบบ..... 44
4.2 ค่าฮิสเตอร์รีซิสของเซนเซอร์วัดความชื้นในอากาศแบบตัวเก็บประจุ..... 51
จ.1 ค่าคงที่ทางฟิสิกส์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์..... 74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

1.1 โครงสร้างพื้นฐานของตัวเก็บประจุ 3
1.2 โครงสร้างตัวเก็บประจุแบบที่ไม่มีไดอิเล็กทริก และที่มีไดอิเล็กทริก 4
1.3 หลักการใช้ตัวเก็บประจุวัดค่าความชื้นในอากาศ 5
2.1 โครงสร้างของตัวเก็บประประจุ 7
2.2 โครงสร้างตัวเก็บประจุแบบที่ไม่มีไดอิเล็กทริก และที่มีไดอิเล็กทริก 8
2.3 การเก็บประจุ 11
2.4 การคายระจุ 12
2.5 หลักการใช้ตัวเก็บประจุวัดค่าความชื้นในอากาศ 14
3.1 เซนเซอร์วัดความชื้นแบบตัวเก็บประจุ มุมมองจากด้านบน (Bird's-eye view) 16
3.2 ภาพตัดขวางของเซนเซอร์วัดความชื้นแบบตัวเก็บประจุ 17
3.3 ขั้วอิเล็กโทรดโครงสร้างอินเตอร์ดิจิเตทที่มีการปรับเปลี่ยนค่า 20
3.4 รูปแบบโครงสร้างหัววัดความชื้นที่ออกแบบ 22
3.5 ลวดลายของเซนเซอร์วัดความชื้น และเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ จากการออกแบบด้วยโปรแกรม L – edit 23
3.6 ชั้นฟิล์มออกไซด์ 24
3.7 ชั้นฟิล์มโลหะ 24
3.8 การสร้างลวดลายวงจรบนชั้นโลหะ 24
3.9 การกัดลวดลายวงจรบนชั้นโลหะ 25
3.10 การสร้างชั้นฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) และชั้นฟิล์มซิลิคอนไนไตรด์ (Si_3N_4) 25
3.11 การสร้างลวดลายชั้น SENSE (Sensor open) 25
3.12 การกัดชั้นฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) และชั้นฟิล์มซิลิคอนไนไตรด์ (Si_3N_4) 26
3.13 การสร้างชั้นฟิล์มซิลิคอนไนไตรด์ (Si_3N_4) 26
3.14 การสร้างลวดลายชั้น PAD 26
3.15 การกัดชั้นฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) และชั้นฟิล์มซิลิคอนไนไตรด์ (Si_3N_4) 27
3.16 ภาพถ่ายเซนเซอร์วัดความชื้นแบบตัวเก็บประจุที่สร้างเสร็จสมบูรณ์ 27
3.17 การวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเครื่อง Agilent B1500A Semiconductor Device Analyzer วัดเซนเซอร์วัดความชื้นแบบตัวเก็บประจุที่สร้างเสร็จสมบูรณ์ 28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

3.18 แผนภาพอุปกรณ์วัดลักษณะสมบัติกระแส - แรงดันของเซนเซอร์วัดความชื้น 29
3.19 การทดสอบเทียบกับชุดความชื้นมาตรฐาน.....29
4.1 โครงสร้างของเซนเซอร์วัดความชื้นขนาด 5 เซลล์ และภาพขยายแสดงขนาด 1 เซลล์.....30
4.2 โครงสร้างของเซนเซอร์วัดความชื้นหลัง Meshing ขนาด 5 เซลล์ และภาพขยาย.....31
4.3 ขนาดของศักย์ไฟฟ้า (Potential) ของเซนเซอร์วัดความชื้นขนาด 5 เซลล์ และภาพขยาย 31
4.4 ขนาดของสนามไฟฟ้าของเซนเซอร์วัดความชื้นขนาด 5 เซลล์ และภาพขยาย.....32
4.5 ขนาดของ Space Charge ของเซนเซอร์วัดความชื้นขนาด 5 เซลล์ และภาพขยาย 32
4.6 ขนาดของความหนาแน่นของ e^- ของเซนเซอร์วัดความชื้นขนาด 5 เซลล์ และภาพขยาย.....33
4.7 ขนาดของความหนาแน่นของโฮล h^+ ของเซนเซอร์วัดความชื้นขนาด 5 เซลล์และภาพขยาย ...33
4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าที่ไบอัสที่ขั้ว Anode กับค่าความจุไฟฟ้า.....34
4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเซลล์กับค่าความจุไฟฟ้าเมื่อ V = 0 35
4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้น Si_3N_4 กับค่าความจุไฟฟ้า.....36
4.11 โครงสร้างของเซนเซอร์วัดความชื้นขนาด 5 เซลล์ และภาพแสดงสนามไฟฟ้า 37
4.12 แสดงศักย์ไฟฟ้า (ซ้าย) และแสดง Space Charge (ขวา) 37
4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศกับค่าความจุไฟฟ้า 38
4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถี่กับค่าความจุไฟฟ้า.....39
4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Permittivity ของ Polymer กับค่าความจุไฟฟ้า.....40
4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Permittivity ของอากาศกับค่าความจุไฟฟ้า.....41
4.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Permittivity ของ Polymer กับค่า %RH ของอากาศ.....43
4.18 ภาพตัดขวางของชิ้นงานที่ผ่านการสร้างเสร็จสมบูรณ์ 45
4.19 ชิ้นงานที่ผ่านการบรรจุภัณฑ์ 45
4.20 ผลการวัดค่าความจุไฟฟ้าของแต่ละตำแหน่ง 46
4.21 ผลของค่าความจุไฟฟ้าและแรงดันที่ความถี่ไฟฟ้า 1MHz, 1.5MHz และ 2 MHz 47
4.22 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน เมื่อได้รับแรงดันไบอัสตรงและไบอัสย้อนกลับ ที่ -5V ถึง +5V48
4.23 ผลของค่าความจุไฟฟ้า และแรงดันที่ค่าความชื้นมาตรฐานต่างๆ 48
4.24 ผลของค่าความจุไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ.....49
4.25 ความไวในการตอบสนองต่อความชื้นของเซนเซอร์.....50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันสิ่งประดิษฐ์อุปกรณ์ตรวจวัดความชื้นของอากาศได้มีการพัฒนาไปหลายรูปแบบ และมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น เซนเซอร์วัดความชื้นถูกใช้อย่างกว้างขวาง ได้มีการนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมด้านต่างๆ มากขึ้น เช่น อุตสาหกรรมการผลิตส่วนประกอบระบบควบคุม, อุตุนิยมวิทยา, การเกษตรกรรม และเป็นเครื่องมือเกี่ยวกับด้านการแพทย์ การวิจัย และอื่นๆ ในขณะที่เซนเซอร์วัดความชื้นโครงสร้างปกติมีราคาแพง และต้องการระบบอิเล็กทรอนิกส์เฉพาะ ซึ่งการวัดความชื้นโดยทั่วไปจะมีสองหลักการหลักๆ คือ การวัดความชื้นโดยใช้หลักการระเหยของไอน้ำซึ่งถ้าในอากาศมีไอน้ำในปริมาณมากจะทำให้การระเหยน้อยลง การวัดการระเหยจะวัดจากผลต่างของอุณหภูมิที่เป็นค่าปกติกับอุณหภูมิที่วัดจากส่วนที่มีการระเหยของของเหลว เริ่มตั้งแต่แบบดั้งเดิมคือใช้การยืดหดตัวของเส้นผม เส้นขน เส้นใย และการใช้เทอร์โมมิเตอร์แบบกระเปราะเปียกกระเปราะแห้ง โดยมากจะใช้เทอร์โมมิเตอร์สองอัน อันแรกใช้วัดอุณหภูมิปกติเรียกว่ากระเปาะแห้ง อีกอันวัดอุณหภูมิที่มีการระเหยของน้ำโดยใช้ผ้าชุบน้ำหุ้มกระเปาะไว้ เรียกว่ากระเปาะเปียก แล้วเอาผลต่างของอุณหภูมิมาคำนวณหาการระเหยจากความร้อนแฝงจำเพาะของน้ำ แล้วนำอัตราการระเหยของน้ำไปคำนวณหาความชื้นในอากาศอีกต่อหนึ่ง ซึ่งวิธีการนี้ใช้ในการวัดอุณหภูมิในอากาศของกรมอุตุนิยมวิทยา โดยผลที่ได้จากการวัดอาจมีความคลาดเคลื่อนสูง เพราะว่าการระเหยของน้ำนั้นนอกจากปัจจัยด้านความชื้นในอากาศแล้วยังมีปัจจัยของอุณหภูมิ ความดัน กระแสลม ซึ่งทำให้ผลการวัดที่ได้ไม่แม่นยำเท่าที่ควร มาถึงปัจจุบันที่เป็นอุปกรณ์วัดความชื้นแบบอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งใช้หลักการการเปลี่ยนค่าความต้านทาน (Resistance), ค่าความจุไฟฟ้า (Capacitance), อุปกรณ์ทางกล, อุปกรณ์ทางความถี่ และ thermo mental ซึ่งแต่ละประเภทขึ้นกับหลักการทำงานในการตรวจจับ[1] วัสดุเซนเซอร์วัดความชื้น ของวงจรไฟฟ้า แล้ววัดค่าสัญญาณไฟฟ้าที่ให้ออกมาในรูป ความต่างศักย์ กระแสไฟฟ้า ซึ่งง่ายต่อการนำไปประมวลผล หรือต่อเชื่อมกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่นๆ ส่วนเซนเซอร์วัดความชื้น แบบใช้หลักการของตัวเก็บประจุ โดยอากาศจะทำหน้าที่เป็นไดอิเล็กทริกของตัวเก็บประจุ ซึ่งค่าไดอิเล็กทริกของอากาศและของน้ำจะมีค่าแตกต่างกัน เมื่อความชื้นอยู่รวมกับอากาศก็จะทำให้มีผลรวมค่าไดอิเล็กทริกค่าหนึ่ง เมื่อความชื้นในอากาศเปลี่ยนไป ก็จะส่งผลให้ค่าไดอิเล็กทริกรวมในอากาศเปลี่ยนไปด้วย ซึ่งค่าไดอิเล็กทริกที่เปลี่ยนไปก็จะทำให้ค่าความจุทางไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงด้วย โดยค่าความจุทางไฟฟ้านี้สามารถวัดได้โดยหลักการไฟฟ้ากระแสสลับ เข้าไปในเซนเซอร์ซึ่งค่าความจุทางไฟฟ้าจะมีผลต่อความต้านทานเชิงความจุไฟฟ้า ซึ่งจะมีผลต่อกระแสไฟฟ้าที่ปล่อยออกมา จากนั้นนำสัญญาณทางไฟฟ้านี้ไปขยายด้วยวงจรขยายสัญญาณและนำไปคำนวณค่าความชื้นในอากาศต่อไป จะเห็นได้ว่าวิธีของตัวเก็บประจุจะวัดความชื้นในอากาศจากปริมาณน้ำในอากาศโดยตรง ทำให้มีความแม่นยำ และรวดเร็ว เหมาะที่จะนำไปใช้ในเชิงอุตสาหกรรมมากกว่า

จึงเป็นจุดเริ่มต้นของวิทยานิพนธ์นี้ คือการเริ่มต้นทำการศึกษาการสร้างเซนเซอร์ตรวจวัดความชื้น ที่สร้างด้วยกระบวนการพื้นฐานกระบวนการสร้างวงจรรวมของซีมอส และเพื่อออกแบบเซนเซอร์ให้มีลักษณะที่มีโครงสร้างเหมือนกับตัวเก็บประจุ และทำงานได้ดี มีความไวในการวัดสูง มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดเล็ก และมีค่าความจุไฟฟ้าต่อขนาดสูง จึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจ ซึ่งในกระบวนการสร้างวงจรรวมในแผ่นซิลิคอนจึงเป็นหนึ่งวิธีที่เหมาะสำหรับการสร้างเซนเซอร์ให้มีขนาดเล็กระดับไมครอน ซึ่งจากการศึกษาพบว่าสามารถออกแบบตัวเก็บประจุให้มีขนาดเล็กให้ต่อขนานกันซึ่งจะทำให้มีค่าความจุไฟฟ้าสูงขึ้น เพิ่มความไวในการวัด โดยแนวคิดในการสร้างตัวเก็บประจุในแผ่นเวเฟอร์คือ การปลูกฟิล์มโลหะบนชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ และทำการกัดชั้นโลหะให้เป็นร่องสำหรับอากาศมาคั่น แล้วทำหน้าที่เป็นไดอิเล็กทริกให้กับตัวเก็บประจุ และปลูกฟิล์มซิลิคอนไนไตรด์ปิดทับเพื่อป้องกันการลัดวงจรของแผ่นเพลต โดยกระบวนการสร้างตัวเซนเซอร์ทั้งหมดจะอยู่ในห้องสะอาด (Cleanroom) ที่มีการควบคุมปริมาณฝุ่น ความชื้นซึ่งเป็นห้องสะอาด ดังนั้นจึงมีความสนใจที่จะสร้างเครื่องมือวัดความชื้นที่ใช้หลักการวัดที่ไม่ซับซ้อน สะดวกในการใช้งานและสามารถผลิตจำนวนมากได้ โดยที่มีราคาย่อมเยาว์ ซึ่งเหมาะสมกับงานทางด้านวิจัยและพัฒนา ที่มีความจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์วัดความชื้นอากาศ เพื่อพัฒนาสู่เชิงพาณิชย์ต่อไป

1.2 ความมุ่งหมาย และวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. ศึกษาทฤษฎีของอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้น และทฤษฎีพื้นฐานของตัวเก็บประจุ โครงสร้าง หลักการทำงาน ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า และเซนเซอร์ตรวจวัดความชื้นชนิดตัวเก็บประจุโครงสร้างขั้วอินเตอร์ดิจิเตท
2. ศึกษาการจำลองของเซนเซอร์ตรวจวัดความชื้นแบบตัวเก็บประจุ
3. ศึกษากระบวนสร้างเซนเซอร์ตรวจวัดความชื้นแบบตัวเก็บประจุโครงสร้างขั้วอินเตอร์ดิจิเตท ที่สร้างด้วยกระบวนการพื้นฐานกระบวนการสร้างวงจรรวม
4. ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของเซนเซอร์ตรวจวัดความชื้นแบบตัวเก็บประจุโครงสร้างขั้วอินเตอร์ดิจิเตท

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

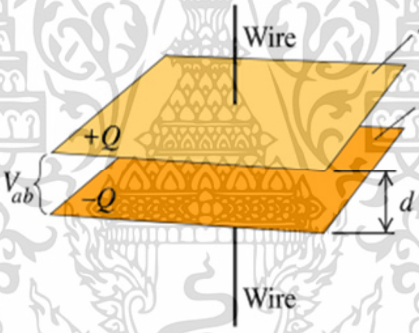
เมื่อพิจารณาอุปกรณ์วัดความชื้นที่มีโครงสร้างขั้วแบบอินเตอร์ดิจิเตท จากลักษณะโดยทั่วไป ให้คุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดีคือค่าความจุไฟฟ้าสูง สมบัติทางกระแส - แรงดัน และความจุ - แรงดัน มีความสมมาตรกัน ทั้งแรงดันไบอัสตรงและไบอัสย้อนกลับ ส่วนค่าความจุทางไฟฟ้า มีค่าเพิ่มขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงของชั้นไดอิเล็กทริก, พื้นที่ของแผ่นเผลตโลหะ, ระยะห่างระหว่างแผ่นโลหะ เป็นต้น จากผลงานภายในศูนย์วิจัยไมโครอิเล็กทรอนิกส์ที่ผ่านมาเป็นการศึกษาวิจัยการสร้างเซนเซอร์วัดความชื้นที่สร้างบนแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ ที่ออกแบบโดยการคำนวนค่าและกำหนดขนาดที่แน่นอนให้คุณสมบัติทางไฟฟ้าค่าหนึ่ง จึงมีแนวคิดในการสร้างโดยเริ่มการจำลองของเซนเซอร์ตรวจวัดความชื้นชนิดตัวเก็บประจุ เพื่อออกแบบเซนเซอร์ให้มีลักษณะที่มีโครงสร้างเหมือนกับตัวเก็บประจุ และทำงานได้ดี มีความไวในการวัดสูง การทำให้เซนเซอร์มีขนาดเล็กและมีค่าวามจุไฟฟ้าต่อขนาดสูง จึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจ ซึ่งในกระบวนการสร้างวงจรรวมในแผ่นเวเฟอร์จึงเป็นหนึ่งวิธีที่เหมาะสำหรับการสร้างเซนเซอร์ให้มีขนาดเล็กระดับไมครอนซึ่งจากการศึกษาพบว่าสามารถออกแบบตัวเก็บประจุให้มีขนาดเล็กให้ต่อขนานกันเป็นโครงข่าย ซึ่งจะทำให้มีค่าความจุไฟฟ้าสูงขึ้น เพิ่มความไวในการวัดสูง โดยการจำลองความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องเพื่อศึกษาผลของพารามิเตอร์ที่เหมาะสม แล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการออกแบบการสร้างเซนเซอร์ตรวจวัดความชื้นชนิดตัวเก็บประจุโครงสร้างขั้วอินเตอร์ดิจิเตท ที่สร้างด้วยกระบวนการพื้นฐานกระบวนการสร้างวงจรรวม เพื่อนำไปวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า โดยทำการออกแบบลวดลายที่มีขนาดเล็กเพื่อเพิ่มพื้นที่บนชิ้นงานและเพิ่มพื้นที่ในการตอบสนองต่อความชื้นในอากาศได้ดี และเพิ่มปริมาณของชิ้นงานในการผลิตเป็นการลดต้นทุนในการผลิตไปด้วย สามารถพัฒนาสู่เชิงพาณิชย์ต่อไป

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

จากสมมติฐานที่ได้กล่าวข้างต้น เพื่อออกแบบเซนเซอร์ให้มีลักษณะที่มีโครงสร้างเหมือนกับตัวเก็บประจุและทำงานได้ดี มีความไวในการวัดสูง การทำให้เซนเซอร์มีขนาดเล็กและมีค่าวามจุไฟฟ้าต่อขนาดสูง สามารถออกแบบตัวเก็บประจุให้มีขนาดเล็กให้ต่อขนานกันซึ่งจะทำให้มีค่าความจุไฟฟ้าสูงขึ้น เพิ่มความไวในการวัด โดยแนวคิดในการสร้างตัวเก็บประจุในแผ่นเวเฟอร์คือ การปลูกฟิล์มโลหะบนชั้นซิลิคอนออกไซด์และทำการกัดชั้นโลหะให้เป็นร่องสำหรับอากาศมาคั่น แล้วทำหน้าที่เป็นไดอิเล็กทริกให้กับตัวเก็บประจุ แล้วจากนั้นก็ต่อขั้วไฟฟ้าเข้ากับเข้าคู่โลหะทั้งสองก็จะทำให้ชั้นโลหะทำหน้าที่เปรียบเสมือนแผ่นเพลตของตัวเก็บประจุ แล้วมีอากาศที่คั่นกลางเป็นสารไดอิเล็กทริก ดังรูปที่ 1.1

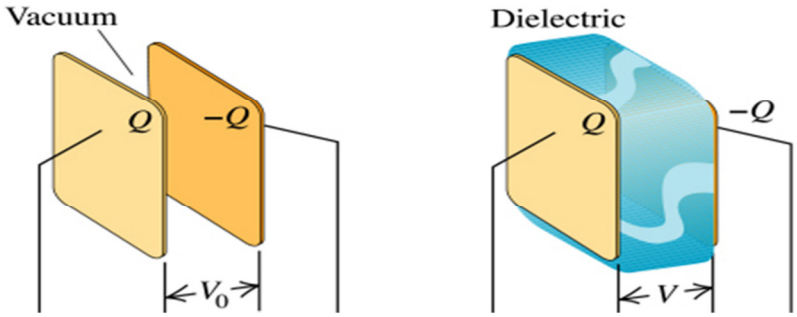


รูปที่ 1.1 โครงสร้างพื้นฐานของตัวเก็บประจุ

ตัวเก็บประจุประกอบด้วยอุปกรณ์ดังนี้

1. แผ่นตัวนำ 2 แผ่น ที่แยกออกจากกัน เรียกว่า เพลต (PLATE)
2. ฉนวนกั้นระหว่างแผ่นตัวนำทั้งสอง ฉนวนกั้นนี้เรียกว่า ไดอิเล็กทริก (DIELECTRIC) ซึ่งอาจจะเป็น อากาศ พลาสติก กระดาษ ยาง ไมก้า เซรามิค ฯลฯ สายไฟหรือลวดตัวนำที่ต่อออกจากแผ่นตัวนำทั้งสอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) (ข)

รูปที่ 1.2 โครงสร้างตัวเก็บประจุ
(ก) แบบที่ไม่มีไดอิเล็กทริก
(ข) แบบที่มีไดอิเล็กทริก

จากรูปที่ 1.1 ตัวเก็บประจุจะมีพื้นที่หน้าตัด A , มีระยะห่างระหว่างเพลต d และมีศักย์ไฟฟ้าตกคร่อม V โดยความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุจะมีค่า C มีหน่วยเป็น ฟารัด (F) มีความสัมพันธ์ดังสมการ 1.1

$$C = \frac{Q}{V} \tag{1.1}$$

เมื่อ

C คือ ค่าความจุไฟฟ้า มีหน่วยเป็นฟารัด (F)
Q คือ ประจุที่มีอยู่แผ่นเพลต
V คือ ศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ

และมีความสัมพันธ์อีกสมการคือ

$$C = \frac{\varepsilon A}{d} \tag{1.2}$$

เมื่อ

C คือ ค่าความจุไฟฟ้า
ε คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก
A คือ พื้นที่ของแผ่นเพลต
D คือ ระยะห่างระหว่างเพลต

ค่าความจุของตัวเก็บประจุ จะมากหรือน้อยอยู่กับสิ่งดังต่อไปนี้

1. พื้นที่ผิวของตัวนำ ถ้าพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นค่าความจุจะเพิ่มขึ้น
2. ระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำทั้งสอง ถ้าแผ่นทั้งสองชิดกันค่าความจุจะมาก ถ้าห่างกันค่าความจุจะน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ชนิดของฉนวนที่กั้นระหว่างแผ่นตัวนำทั้งสอง เรียกว่า ไดอิเล็กทริก (Dielectric) ซึ่งอาจจะใช้กระดาษ อากาศ ไมก้า

หลักการทำงานของเซนเซอร์วัดความชื้นแบบตัวเก็บประจุนี้ใช้คุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงค่าตัวเก็บประจุที่ขึ้นอยู่กับค่า relative permittivity ของไดอิเล็กทริก ที่ใช้ในตัวเก็บประจุชนิดนั้น แสดงดังสมการที่ 1.3 ค่าตัวเก็บประจุเท่ากับ

$$C(RH) = \frac{\varepsilon_{RH}\varepsilon_{0}A}{d} \qquad (1.3)$$

โดยที่

C คือ ความจุทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามความชื้นสัมพันธ์

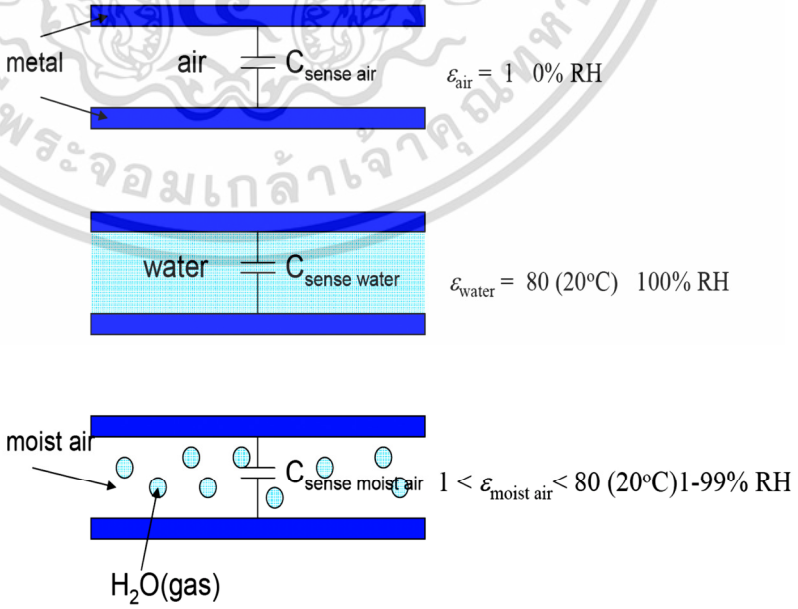
ε_{RH} คือ ค่า relative permittivity ของ ไดอิเล็กทริก ในตัวเก็บประจุขึ้นอยู่กับความชื้น

ε_{0} คือ ค่า absolute permittivity ของอากาศแห้งซึ่งมีค่าเท่ากับ 8.85×10^{-12} F/m

A คือ พื้นที่ของตัวเก็บประจุ

d คือ ความหนาของชั้นไดอิเล็กทริกที่ขั้นกลางระหว่างขั้วตัวนำไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ

ในการนำไปใช้ตัวเก็บประจุวัดค่าความชื้นสัมพัทธ์ (%RH) นี้แสดงกระบวนการดังรูปที่ 1.3 ดังจะเห็นจากการเปรียบเทียบค่า relative permittivity ของอากาศแห้ง และน้ำ ซึ่งสามารถเทียบเคียงได้กับค่า 0 %RH และค่า 100 %RH ตามลำดับ (ที่ทุกๆ อุณหภูมิถ้าค่า relative permittivity มีค่าเท่ากับ 100 %RH ไอน้ำในอากาศจะถูกควบแน่นให้อยู่ในสถานะเป็นของเหลว) ดังนั้นอากาศที่มีความชื้นระหว่าง 0 %RH ถึง 100 %RH จึงมีผลทำให้ค่าของตัวเก็บประจุนี้มีค่าแตกต่างกันในลักษณะเชิงเส้นได้ ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศให้เป็นค่าทางไฟฟ้าได้โดยตรง



รูปที่ 1.3 หลักการใช้ตัวเก็บประจุวัดค่าความชื้นในอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทั่วไปแล้วความชื้นในอากาศที่เราเรียกกันสั้นๆ ว่าความชื้น ซึ่งมาจากคำเต็มๆว่าความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity หรือ RH) หมายถึงอัตราส่วนระหว่างปริมาณความชื้น (ไอน้ำ) ที่มีอยู่จริงในอากาศกับปริมาณความชื้น (ไอน้ำ) ที่อากาศขณะนั้นจะรองรับได้เต็มที่ ณ อุณหภูมิเดียวกัน (Matthes and Rushing, 1972)[2] หากปริมาณความชื้นมีมากกว่าจะกลั่นตัวเป็นหยดน้ำ หน่วยของความชื้นสัมพัทธ์จึงออกมาเป็นเปอร์เซ็น (%)

ความชื้นสัมพันธ์ หมายถึงอัตราส่วนของปริมาณไอน้ำที่มีอยู่จริงในอากาศต่อปริมาณไอน้ำที่จะทำให้อากาศอิ่มตัว ณ. อุณหภูมิเดียวกัน หรืออัตราส่วนของความดันไอน้ำที่มีอยู่จริงต่อความดันไอน้ำอิ่มตัว ค่าความชื้นสัมพันธ์จะแสดงในรูปของร้อยละ (%) ดังสมการที่ 1.4

$$\text{ความชื้นสัมพันธ์}(\%) = \left(\frac{\text{ปริมาณไอน้ำที่มีในอากาศ}}{\text{ปริมาณไอน้ำที่ทำให้อากาศอิ่มตัว}} \right) \times 100 \qquad (1.4)$$

1.5 ขอบเขตการวิจัย

ขอบเขตการวิจัยเริ่มต้นจากการศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องของอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้น และทฤษฎีพื้นฐานของตัวเก็บ โครงสร้าง หลักการทำงาน ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า และเซนเซอร์ตรวจวัดความชื้นชนิดตัวเก็บประจุโครงสร้างขั้วอินเตอร์ดิจิเตท โดยศึกษาการสร้างเซนเซอร์ตรวจวัดความชื้นชนิดตัวเก็บประจุโครงสร้างขั้วอินเตอร์ดิจิเตท ที่สร้างด้วยกระบวนการพื้นฐานกระบวนการสร้างวงจรรวม ของศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ขั้นตอนแรกจำลองการทำงานเซนเซอร์ตรวจวัดความชื้นชนิดตัวเก็บประจุโครงสร้างขั้วอินเตอร์ดิจิเตท และทำการทดสอบคุณสมบัติของตัวเก็บประจุในลวดลายแบบอินเตอร์ดิจิเตทที่เงื่อนไขต่างๆ เช่นระยะห่างระหว่างขั้ว และจำนวนขั้วอิเล็กโทรดเป็นต้น จากนั้นทำการสร้างเซนเซอร์ตรวจวัดความชื้นชนิดตัวเก็บประจุโครงสร้างขั้วอินเตอร์ดิจิเตท ด้วยกระบวนสร้างวงจรรวมซีมอส จากนั้นนำเซนเซอร์ทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าเช่น กระแส - แรงดัน, ความจุ - แรงดัน, ความถี่ - แรงดัน และทดสอบคุณสมบัติการตอบสนองกับความชื้นมาตรฐาน

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

เนื้อหาในวิทยานิพนธ์แบ่งเป็น 5 บท โดยมีรายละเอียด ดังนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาของงานวิจัย ความมุ่งหมาย และวัตถุประสงค์ สมมติฐาน ทฤษฎีที่ใช้ ขอบเขตของการวิจัย และขั้นตอนของการศึกษา

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของเซนเซอร์ตรวจวัดความชื้น และทฤษฎีพื้นฐานของตัวเก็บโครงสร้าง หลักการทำงาน ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า และเซนเซอร์ตรวจวัดความชื้นแบบตัวเก็บประจุโครงสร้างขั้วอินเตอร์ดิจิเตท

บทที่ 3 กล่าวถึงการจำลอง, การออกแบบ, กระบวนการสร้าง และการทดสอบเพื่อวัดลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า ของเซนเซอร์ตรวจวัดความชื้นแบบตัวเก็บประจุโครงสร้างขั้วอินเตอร์ดิจิเตท

บทที่ 4 ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลอง และการอภิปรายผลการทดลอง

บทที่ 5 บทสรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎี

ในบทนี้กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของตัวเก็บ และทฤษฎีพื้นฐานของตรวจวัดความชื้น โครงสร้าง หลักการทำงาน ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า และอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้นชนิดตัวเก็บประจุ โครงสร้างขั้วอินเตอร์ดิจิเตท คุณสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆ เช่น กระแส - แรงดัน, ความจุ - แรงดัน, ความจุ - ความถี่ เป็นต้น และอธิบายถึงโครงสร้าง หลักการทำงานของการใช้งานในการวัดความชื้นอากาศ

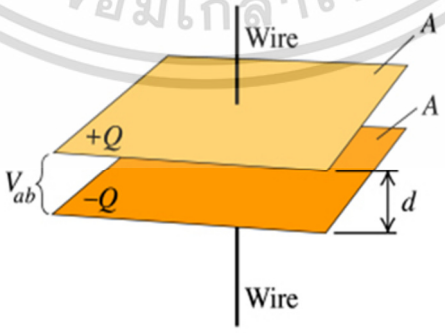
2.1 ตัวเก็บประจุ[3] (Capacitor)

ตัวเก็บประจุ (Capacitor) เป็นอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์อีกชนิดหนึ่ง สามารถเก็บสะสมประจุไว้ได้ และสามารถคายประจุที่เก็บสะสมออกมาได้ ตัวเก็บประจุจึงทำหน้าที่เก็บประจุ และคายประจุ ในวงจรไฟฟ้าหรือวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ค่าความจุจะแสดงคุณสมบัติของวงจรไฟฟ้าที่สามารถเก็บสะสมพลังงานไฟฟ้าไว้ในรูปของสนามไฟฟ้า และสามารถที่จะคายพลังงานนี้ได้ในเวลาต่อมา คุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวเก็บประจุคือ ต่อต้านการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟที่ตกคร่อมตัวมัน เช่น เมื่อมีแรงดันไฟตกคร่อมตัวเก็บประจุเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นทันทีทันใด ตัวเก็บประจุจะทำให้แรงดันไฟตกคร่อมลดลงอย่างช้าๆ จนถึงจุดอิ่มตัวจึงจะหยุดการเปลี่ยนแปลง และในกรณีแรงดันไฟลดลงอย่างทันทีทันใด ตัวเก็บประจุก็หน่วงแรงดันไฟให้ลดลงช้าๆ จนถึงจุดต่ำสุดจึงจะหยุดการหน่วงแรงดันไฟ

2.1.1 โครงสร้างของตัวเก็บประจุ

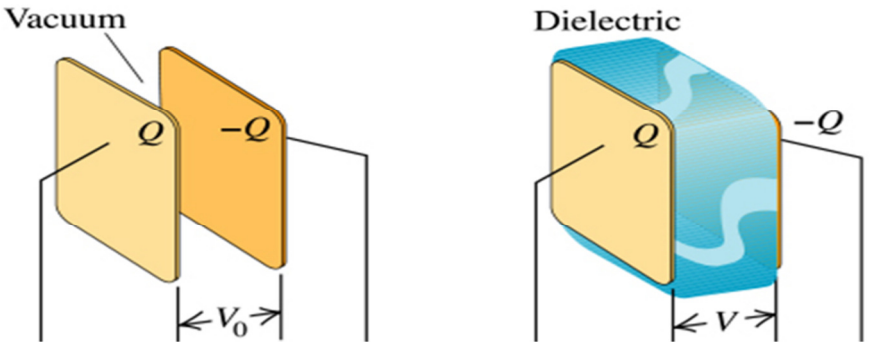
ตัวเก็บประจุประกอบด้วยอุปกรณ์ดังนี้

1. แผ่นตัวนำ 2 แผ่น ที่แยกออกจากกัน เรียกว่า เพลต (PLATE)
2. ฉนวนกั้นระหว่างแผ่นตัวนำทั้งสอง ฉนวนกั้นนี้เรียกว่า ไดอิเล็กทริก (DIELECTRIC) ซึ่งอาจจะเป็น อากาศ พลาสติก กระดาษ ยาง ไมก้า เซรามิค ฯลฯ สายไฟหรือลวดตัวนำที่ต่อออกจากแผ่นตัวนำทั้งสอง แสดงดังรูปที่ 2.1 และรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของตัวเก็บประประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) (ข)

รูปที่ 2.2 โครงสร้างตัวเก็บประจุ
(ก) แบบที่ไม่มีไดอิเล็กทริก
(ข) แบบที่มีไดอิเล็กทริก

2.1.2 ความจุไฟฟ้า[4] (Capacitance)

ความจุไฟฟ้า หมายถึงความสามารถในการเก็บประจุไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้า หรือปริมาณประจุไฟฟ้าที่ทำให้ตัวนำมีศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น หรือลดลง 1 หน่วย ตัวนำใดมีความจุไฟฟ้ามาก แสดงว่าจะต้องใช้ประจุไฟฟ้าจำนวนมากในการทำให้ศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น แต่ตัวนำใดมีความจุไฟฟ้าน้อยศักย์ไฟฟ้าก็จะเพิ่มขึ้นจากเดิมมาก ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังสมการ 2.1

$$C = \frac{Q}{V} \tag{2.1}$$

หรือ ในกรณีที่ค่า C อยู่ในรูปของฟังก์ชันของ V (C เปลี่ยนตามค่า V) จะได้สมการ 2.2

$$C = \frac{dQ(V)}{dV} \tag{2.2}$$

เมื่อ C คือ ความจุไฟฟ้าของตัวนำ มีหน่วยเป็นฟารัด (F)

Q คือ จำนวนประจุไฟฟ้า ที่ทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้า มีหน่วยเป็นคูลอมบ์ (C)

V คือ ศักย์ไฟฟ้าของตัวนำ มีหน่วยเป็นโวลต์ (V)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความจุไฟฟ้าของแผ่นตัวนำขนานในอุดมคติ (Parallel-plate capacitor) สามารถหาได้จากสมการ 2.3

$$C = \varepsilon_r \varepsilon_0 \frac{A}{d} \qquad (2.3)$$

เมื่อ C คือ ความจุไฟฟ้าของตัวนำ มีหน่วยเป็นฟารัด (F)

ε_r คือ Relative permittivity ของ ไดอิเล็กทริก ระหว่างแผ่นตัวนำ (ไม่มีหน่วย)

ε_0 คือ Vacuum permittivity มีค่าประมาณ 8.854×10^{-12} Fm^{-1}

A คือ พื้นที่ของแผ่นตัวนำ

d คือ ความหนาของชั้น ไดอิเล็กทริก

หรือ ความจุไฟฟ้าของตัวนำทรงกลม (Self capacitance ของตัวนำทรงกลม) สามารถหาได้จากสมการ 2.4

$$C = 4\pi\varepsilon_r \varepsilon_0 R \qquad (2.4)$$

เมื่อ C คือ ความจุไฟฟ้าของตัวนำ มีหน่วยเป็นฟารัด (F)

ε_r คือ Relative permittivity ของ ไดอิเล็กทริก ระหว่างแผ่นตัวนำ (ไม่มีหน่วย)

ε_0 คือ Vacuum permittivity มีค่าประมาณ 8.854×10^{-12} Fm^{-1}

R คือ รัศมีของทรงกลม

จากสมการข้างต้นจะเห็นได้ว่าค่าความจุไฟฟ้าของตัวนำลักษณะต่างๆ นั้นจะขึ้นอยู่กับค่า ε_r ซึ่งค่า ε_r นี้เป็นค่าเฉพาะตัวของวัสดุแต่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ค่า ε_r ของอากาศนั้น ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ความดันอากาศ ความชื้นของอากาศ ความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นต้น ในที่นี้เราจะสนใจเฉพาะความชื้นของอากาศ โดยที่อุณหภูมิห้อง และที่ความดันบรรยากาศ ค่า ε_r จะเปลี่ยนแปลงตามความชื้นของอากาศ ดังแสดงในตารางที่ 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 อัตราการเปลี่ยนแปลงค่า Relative permittivity (ε_r) ต่อค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์

เอกสารอ้างอิง	Bell[5]	Froome[6]	Bean[7]	Baxter[8]	Mean[9]
$\frac{d\varepsilon_r}{d(\%RH)}$ $[\frac{ppm}{\%RH}]$	2.11	2.19	2.19	1.4	1.97

เมื่อค่า ε_r ของอากาศแห้ง (0 %RH) มีค่าเท่ากับ 1 และสมมุติว่าความสัมพันธ์เป็นแบบเส้นตรง เราจึงสามารถหาค่าของ ε_r สำหรับทุกค่าความชื้นสัมพัทธ์ได้จากสมการที่ 2.5

$$\varepsilon_r = 1 + \%RH \times \frac{d\varepsilon_r}{d(\%RH)} \tag{2.5}$$

สำหรับวัสดุชนิดอื่นเมื่อมีการดูดซับความชื้นเข้าไป หรือมีหยดน้ำแทรกตัวอยู่ในรูพรุนของวัสดุนั้นๆ ค่า Relative permittivity (ε_r) จะมีค่าอยู่ระหว่าง ค่า ε_r ของวัสดุนั้น และค่า $\varepsilon_{r,\,water}$ ของน้ำซึ่งเท่ากับ $\varepsilon_{r,\,water}$ = 80 ตัวอย่าง เช่น ชั้น SiO_2 มีค่า $\varepsilon_{r,SiO2}$ = 3.9 ถ้ามีหยดน้ำแทรกเข้าไปในชั้นจะมีค่า $\varepsilon_{r,SiO2}$ อยู่ระหว่าง 3.9 – 80 หรือชั้น Si_3N_4 มีค่า $\varepsilon_{r,Si3N4}$ = 7.5 ถ้ามีหยดน้ำแทรกเข้าไปในชั้นจะมีค่า $\varepsilon_{r,Si3N4}$ อยู่ระหว่าง 7.5 – 80 แต่ความน่าจะเป็นที่ค่า ε_r อยู่ในระดับที่สูงหรือเข้าใกล้ 80 นั้นมีน้อย เนื่องจากวัสดุหนึ่งๆ จะสามารถรับน้ำเข้าไปได้จำนวนหนึ่งเท่านั้น เราได้นำหลักการดังกล่าวข้างต้นนี้ มาใช้ในการประดิษฐ์อุปกรณ์วัดความชื้น โดยค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุในวงจรจะเปลี่ยนไปเมื่อความชื้นในอากาศเปลี่ยนไป เพราะค่า Relative permittivity (ε_r) ของวัสดุต่างๆ รอบๆ ตัวเก็บประจุนั้นเปลี่ยนไปนั่นเอง

2.1.3 เมทริกค่าความจุไฟฟ้าของแมกเวลล์[10] (The Maxwell Capacitance Matrix)

เมทริกค่าความจุไฟฟ้าของแมกเวลล์สามารถอธิบายค่าความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (Voltage) ของชุดของตัวนำหลายๆ ตัว กับค่าความจุไฟฟ้าบนตัวนำเหล่านั้น ดังสมการที่ 2.6

$$Q = C \cdot V \tag{2.6}$$

เมื่อ C คือ Maxwell capacitance matrix

Q คือ เวกเตอร์ประจุไฟฟ้า (Charge vector)

V คือ เวกเตอร์ความต่างศักย์ (Voltage vector)

รูปทั่วไปของ The Maxwell Capacitance Matrix สำหรับตัวนำ n ตัว จะอยู่ในรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{bmatrix} C_{11}+C_{12}+ & -C_{12}\cdots & -C_{1n} \\ +\cdots+C_{1n} & & \\ \vdots & C_{21}+C_{22}+\ddots & \vdots \\ -C_{21} & +\cdots+C_{2n} & \\ & & C_{n1}+C_{n2}+ \\ -C_{n1} & -C_{n2}\cdots & +\cdots+C_{nm} \end{bmatrix}$$

เมื่อ C_{ij} คือ ค่าความจุไฟฟ้าระหว่างตัวนำที่ i และ j

C_{ii} คือ ค่า Self capacitance ของตัวนำที่ i

ค่าความจุของตัวเก็บประจุ จะมากหรือน้อยอยู่กับสิ่งดังต่อไปนี้

1. พื้นที่ผิวของตัวนำ ถ้าพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นค่าความจุจะเพิ่มขึ้น

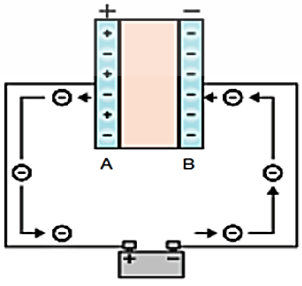
2. ระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำทั้งสอง ถ้าแผ่นทั้งสองชิดกันค่าความจุจะมาก ถ้าห่างกันค่าความจุจะน้อย

3. ชนิดของฉนวนที่กั้นระหว่างแผ่นตัวนำทั้งสอง เรียกว่า ไดอิเล็กทริก (Dielectric) ซึ่งอาจจะใช้กระดาษ อากาศ ไมก้า

2.1.4 การทำงานของตัวเก็บประจุ[11]

2.1.4.1. การเก็บประจุ

การเก็บประจุ คือการเก็บอิเล็กตรอนไว้ที่แผ่นเพลตของตัวเก็บประจุ เมื่อนำแบตเตอรี่ต่อกับตัวเก็บประจุอิเล็กตรอนจากขั้วลบของแบตเตอรี่จะเข้าไปออกันที่แผ่นเพลต ทำให้เกิดประจุลบขึ้น และยังส่งสนามไฟฟ้าไปผลักอิเล็กตรอนของแผ่นเพลตตรงข้าม ซึ่งโดยปกติในแผ่นเพลตจะมีประจุเป็นบวก และลบปะปนกันอยู่เมื่ออิเล็กตรอนจากแผ่นเพลตนี้ถูกผลักให้หลุดออกไปแล้วจึงเหลือประจุบวกมากกว่าประจุลบยิ่งอิเล็กตรอนถูกผลักออกไปมากเท่าไรแผ่นเพลตนั้นก็จะเป็นบวกมากขึ้นเท่านั้น ดังรูปที่ 2.3

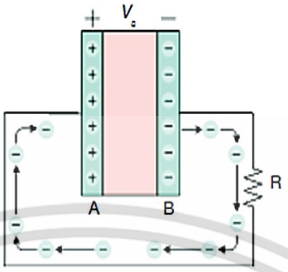


รูปที่ 2.3 การเก็บประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.4.2. การคายประจุ

ตัวเก็บประจุที่ถูกประจุแล้วถ้าเรายังไม่นำขั้วตัวเก็บประจุมาต่อกันดังรูปที่ 2.4 อิเล็กตรอนก็ยังคงอยู่ที่แผ่นเพลต แต่ถ้ามีการครบวงจรระหว่างแผ่นเพลตทั้งสองเมื่อไร อิเล็กตรอนก็จะวิ่งจากแผ่นเพลตทางด้านลบไปครบวงจรที่แผ่นเพลตบวกทันที เราเรียกเหตุการณ์นี้ว่า “การคายประจุ”



รูปที่ 2.4 การคายระจุ

2.2 การวัดความชื้นในบรรยากาศ (Atmospheric humidity)[12]

ความชื้นที่มีอยู่ในบรรยากาศ หมายถึง น้ำที่อยู่ในสถานะของก๊าซ หรือเรียกว่า “ไอน้ำ” (water vapor) แต่ไม่ใช่น้ำที่ในรูปของของเหลว (liquid) เช่น เม็ดเมฆ หมอกหรือฝน (cloud droplets, fog or rain) ซึ่งไอน้ำจะมีคุณสมบัติเหมือนก๊าซอื่น ๆ ในบรรยากาศ ดังนั้น จึงมีความดันซึ่งเรียกว่า “ความดันไอน้ำ” (vapor pressure) ซึ่งจะมีปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจะมีค่าไม่เกิน 4 เปอร์เซ็นต์ของบรรยากาศทั้งหมด ซึ่งไอน้ำจะมีปริมาณไม่คงที่ โดยผันแปรตั้งแต่ 3 เปอร์เซ็นต์ ไปจนถึงค่าสงสุดคือ 100 เปอร์เซ็นต์ ในแถบโซนร้อนการผันแปรของปริมาณไอน้ำในบรรยากาศนั้นขึ้นอยู่กับทั้งเวลา และสถานที่ การวัดปริมาณความชื้นในอากาศสามารถวัดได้หลายรูปแบบขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการนำไปใช้ ดังแสดงดังต่อไปนี้

2.2.1 ความชื้นสัมบูรณ์ (Absolute humidity, X) คืออัตราส่วนระหว่างมวลของไอน้ำและปริมาตรของอากาศชื้น มีหน่วยเป็น กรัมต่อลูกบาศก์เมตร

$$X = \frac{m_v}{V} \tag{2.7}$$

เมื่อ

X คือ ความชื้นสัมบูรณ์ มีหน่วยเป็น กรัมต่อลูกบาศก์เมตร

m_v คือ มวลของไอน้ำในอากาศที่ปริมาตรใดๆ

V คือ ปริมาตรของอากาศ

2.2.2 อัตราส่วนผสม (Mixing ratio, r) คืออัตราส่วนระหว่างมวลของไอน้ำ และมวลของอากาศแห้ง มีหน่วยเป็นกรัมของไอน้ำต่อกิโลกรัมของอากาศแห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$r = \frac{m_v}{m_d} \tag{2.8}$$

เมื่อ

r คือ อัตราส่วนผสมมีหน่วยเป็นกรัมของมวลไอน้ำต่อกิโลกรัมของมวลอากาศแห้ง

m_v คือ มวลของไอน้ำ

m_d คือ มวลของอากาศแห้ง

2.2.3 ความชื้นจำเพาะ (Specific humidity, q) คืออัตราส่วนระหว่างมวลของไอน้ำและมวลของอากาศชื้น

$$q = \frac{m_v}{\left(m_v + m_d\right)} \tag{2.9}$$

เมื่อ

q คือ ความชื้นจำเพาะ

m_v คือ มวลของไอน้ำ มีหน่วยเป็นกิโลกรัม (kg)

m_d คือ มวลของอากาศแห้ง มีหน่วยเป็นกิโลกรัม (kg)

2.2.4 ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity, RH) คืออัตราส่วนระหว่างปริมาณไอน้ำจริงและปริมาณไอน้ำอิ่มตัวที่อุณหภูมิและความกดอากาศเดียวกันโดยแสดงในหน่วยของเปอร์เซ็นต์

$$\left.\begin{aligned} RH &= \frac{r}{r_s} \times 100 \\ RH &= \frac{q}{q_s} \times 100 \\ RH &= \frac{e}{e_s} \times 100 \end{aligned}\right\} \tag{2.10}$$

เมื่อ

RH คือ ความชื้นสัมพัทธ์ มีหน่วยเป็นเปอร์เซ็น (%)

r คือ อัตราส่วนผสม

r_s คือ อัตราส่วนผสมในภาวะอิ่มตัว

q คือ ความชื้นจำเพาะ

q_S คือ ความชื้นจำเพาะในภาวะอิ่มตัว

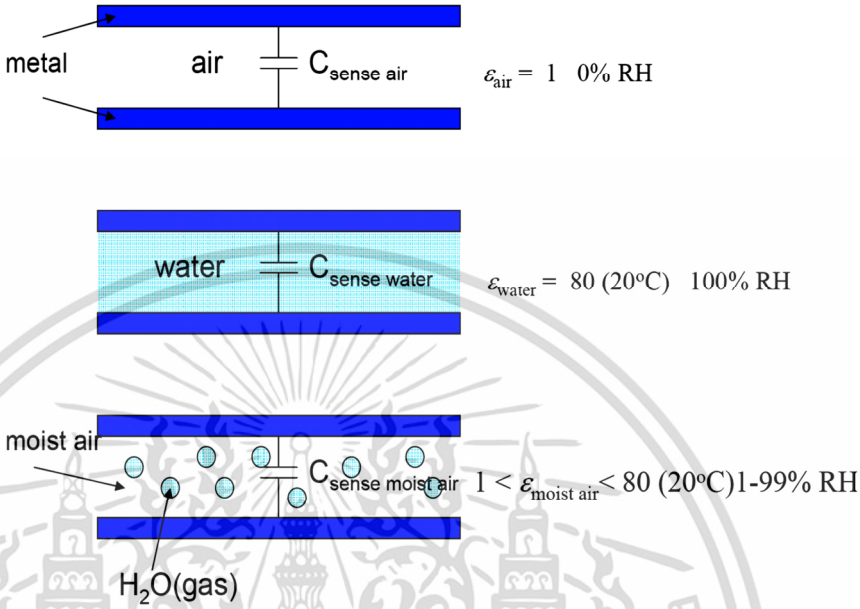
e คือ ความดันไอน้ำมีหน่วยเป็น มิลิบาร์ หรือ นิวตันต่อตารางเมตร, พาสคาล (Pa)

e_S คือ ความดันไอน้ำในภาวะอิ่มตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 การประยุกต์ใช้งานตัวเก็บประจุ กับการใช้งานในการวัดความชื้นอากาศ[13]

การนำใช้ตัวเก็บประจุวัดค่าความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ (%RH) นี้แสดงกระบวนการดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 หลักการใช้ตัวเก็บประจุวัดค่าความชื้นในอากาศ

จะเห็นจากการเปรียบเทียบค่า relative permittivity ของอากาศแห้ง และน้ำ ซึ่งสามารถเทียบเคียงได้กับค่า 0 %RH และค่า 100 %RH ตามลำดับ (ที่ทุกๆ อุณหภูมิถ้าค่า relative permittivity มีค่าเท่ากับ 100 %RH ไอน้ำในอากาศจะถูกควบแน่นให้อยู่ในสถานะเป็นของเหลว) ดังนั้นอากาศที่มีความชื้นระหว่าง 0 %RH ถึง 100 %RH จึงมีผลทำให้ค่าของตัวเก็บประจุนี้มีค่าแตกต่างกันในลักษณะเชิงเส้นได้ ซึ่งแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศให้เป็นค่าทางไฟฟ้าได้โดยตรง

2.4 ความไวต่อการตอบสนอง[14]

เซนเซอร์ทุกชนิดสิ่งแรกที่จะต้องคำนึงถึงนั้น คือความไวในการตอบสนอง (Sensitivity) ซึ่งเซนเซอร์ที่ดีนั้นควรจะต้องมีความไวสูง และคงที่นั้นหมายความว่าเซนเซอร์นั้นจะมีการตอบสนองต่ออินพุทที่มากระทำได้ดี โดยความไวในการตอบสนองจะเป็นอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงสัญญาณเอ้าท์พุทที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงสัญญาณอินพุท เมื่อให้ y เป็นเอ้าท์พุทที่มีความสัมพันธ์กับ x ซึ่งเป็นอินพุทโดยเป็นไปตามฟังก์ชัน $y = f(x)$ ดังนั้นสมการความไว y ที่จุด x_0 ใด ๆ จะสามารถเขียนได้ดังสมการ 2.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$S(x_0) = \frac{D_y}{D_x} \tag{2.11}$$

สำหรับความไวในการตอบสนองต่อความชื้นสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.12 ซึ่งเป็นอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงความจุไฟฟ้าและความชื้น

$$S = \frac{\Delta C}{\Delta \%RH} \tag{2.12}$$

เมื่อ

S คือ ความไวในการตอบสนองต่อความชื้น

ΔC คือ การเปลี่ยนแปลงความจุไฟฟ้า

$\Delta \%RH$ คือ การเปลี่ยนแปลงของความชื้นสัมพัทธ์

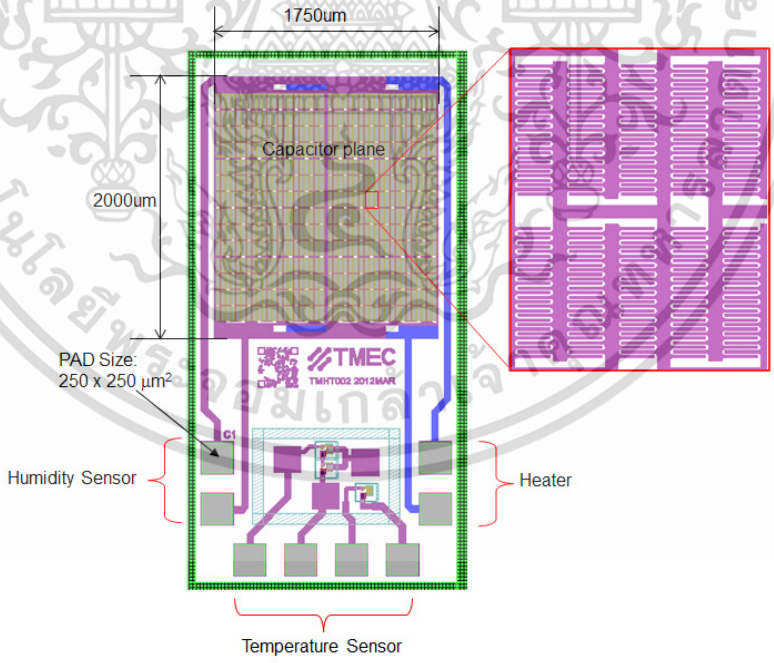
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
การออกแบบ และการดำเนินงานวิจัย

การออกแบบ และดำเนินงานวิจัยแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนหลักคือ ขั้นตอนแรกเป็นการจำลองคุณสมบัติของเซนเซอร์วัดความชื้นแบบตัวเก็บประจุ ขั้นตอนที่สองเป็นการทดสอบความสัมพันธ์ของพื้นที่ของตัวเก็บประจุ และ ความหนาของชั้นไดอิเล็กทริก ที่ขั้นกลางระหว่างขั้วตัวนำไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ ขั้นตอนที่สามเป็นการออกแบบ และสร้างเซนเซอร์วัดความชื้นแบบตัวเก็บประจุ ที่ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ จากนั้นทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซนเซอร์ที่ทำการสร้าง เพื่อหาคุณสมบัติการทำงาน พารามิเตอร์ต่างๆ ของตัวอุปกรณ์

3.1 การจำลองการทำงานของเซนเซอร์วัดความชื้นแบบตัวเก็บประจุโดยใช้ซอฟต์แวร์ Sentaurus TCAD

การจำลองการทำงานของเซนเซอร์วัดความชื้นแบบตัวเก็บประจุโดยใช้ซอฟต์แวร์ Sentaurus TCAD[15]-[17] เป็นการจำลองช่วงก่อนทำการบรรจุภัณฑ์ (Packaging) เพื่อจำลองดูผลที่เกิดขึ้นของเซนเซอร์วัดความชื้นแบบตัวเก็บประจุ และหลังทำการบรรจุภัณฑ์ (Packaging) โครงสร้างของเซนเซอร์วัดความชื้นแบบตัวเก็บประจุ ที่ได้ออกแบบขึ้นมีส่วนประกอบสำคัญดังแสดงในรูปที่ 3.1

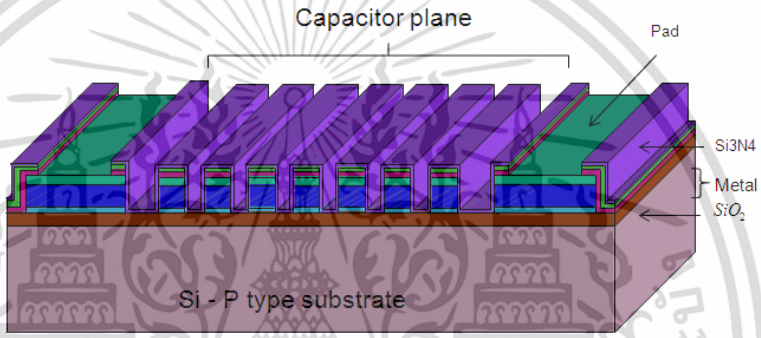


รูปที่ 3.1 เซนเซอร์วัดความชื้นแบบตัวเก็บประจุ มุมมองจากด้านบน (Bird's-eye view)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บนเซนเซอร์วัดความชื้นแบบตัวเก็บประจุประกอบไปด้วยส่วนหลักๆ คือ

1. ส่วนของเซนเซอร์วัดความชื้น (Humidity Sensor) ประกอบด้วยส่วนของ Pad ต่อใช้งาน และแผงตัวเก็บประจุ (Capacitor plan) ทำจากชั้นของโลหะมีลักษณะเป็นซี่หวี หรือฟันปลาสลับกันไปมาเพื่อเพิ่มพื้นที่หน้าตัด A ทำให้ค่าความจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ง่ายต่อการวัดวิเคราะห์
2. ส่วนของเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ (Temperature Sensor) ใช้ในการวัดค่าของอุณหภูมิเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบค่าความชื้น เพราะค่าความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ
3. ส่วนของฮีตเตอร์ (Heater) ใช้ในการทำความร้อนเพื่อใช้ในการไล่ความชื้นในตัวเซนเซอร์ในสภาวะที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศอิ่มตัว



รูปที่ 3.2 ภาพตัดขวางของเซนเซอร์วัดความชื้นแบบตัวเก็บประจุ

รูปที่ 3.2 ภาพตัดขวางของเซนเซอร์วัดความชื้นแบบตัวเก็บประจุ ซึ่งประกอบไปด้วยชั้นสารกึ่งตัวนำ และชั้นฟิล์มต่างๆ เรียงตามลำดับจากล่างขึ้นบนได้ดังแสดงในรูปที่ 3.2

1. ชั้น Si-Wafer ชนิด P-Type ความต้านทาน (Resistivity) 1-10 Ω·cm ความหนา 625 μm
2. ชั้นฟิล์ม Sacrificial oxide ความหนา 25 nm
3. ชั้นฟิล์ม Oxide ปลูกด้วยสาร TEOS ความหนา 650 nm
4. ชั้นฟิล์ม Oxide ปลูกด้วยกระบวนการ PECVD ความหนา 500 nm
5. ชั้นฟิล์ม โลหะ ประกอบด้วย
   - ชั้นฟิล์ม Ti ความหนา 30 nm
   - ชั้นฟิล์ม TiN ความหนา 80 nm
   - ชั้นฟิล์ม Al ความหนา 500 nm
   - ชั้นฟิล์ม TiN ความหนา 80 nm
6. ชั้นฟิล์ม Si_3N_4 Passivation - layer ความหนา 50 nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1 จำลองโครงสร้าง และการทำงาน (Simulation) ก่อนทำการบรรจุภัณฑ์ (Packaging)

เพื่อเพิ่มความเข้าใจในระบบการทำงานของเซนเซอร์ ได้ทำการ Simulation เพื่อจำลองโครงสร้าง และจำลองคุณสมบัติทางไฟฟ้า โดยใช้โปรแกรมชื่อ Sentaurus TCAD ซึ่งจะประกอบไปด้วยโปรแกรมย่อย (Tools) หลายโปรแกรม โดยการจำลองหลักจะทำในโปรแกรมย่อยชื่อ Sentaurus Workbench (SWB) เป็น graphic user interface ที่ทำหน้าที่เป็นศูนย์รวมของโปรแกรมต่างๆ ซึ่งขั้นตอนการจำลองมี ดังนี้

3.1.1.1 จำลองโครงสร้าง

การจำลองโครงสร้างเราใช้โปรแกรมย่อย ชื่อ Sentaurus Structure Editor (SDE) โดยจำลองภาคตัดขวางของเซนเซอร์เฉพาะส่วนของแผงตัวเก็บประจุ การเลือกโดเมน (Domain) ของโครงสร้างที่จะจำลองนั้นต้องคำนึงถึงปัจจัยหลายๆ อย่าง เช่น ความสมมาตร (Symmetry) ของโครงสร้าง เงื่อนไขขอบเขต (Boundary conditions) ของโดเมน ความคลาดเคลื่อน (Error) และการเบนเข้าหาค่าๆหนึ่ง (Convergence) ของผลลัพธ์เมื่อมีการเปลี่ยนขนาดของโดเมน เป็นต้น ไฟล์คำสั่ง (Command file) สำหรับสั่งให้ SDE จำลองโครงสร้างเซนเซอร์วัดความชื้นสามารถดูได้จากภาคผนวก ก. ซึ่งสามารถแบ่งเป็นส่วนๆ เรียงตามลำดับได้ดังนี้

1. ชุดคำสั่งกำหนดตัวแปรและค่าของตัวแปรต่างๆ (Defining Parameters)
2. ชุดคำสั่งการสร้างโครงสร้าง (Creating Geometries)
3. ชุดคำสั่งกำหนดจุดเชื่อมต่อ (Defining Contact)
4. ชุดคำสั่งการเจือสาร (Defining constant doping level in a region)
5. ชุดคำสั่งเมช (Meshing)
6. ชุดคำสั่งบันทึกข้อมูล (Save)

เพื่อพิสูจน์ว่า Simulation domain ถูกต้อง มีความคลาดเคลื่อนไม่มาก และสามารถใช้แทนอุปกรณ์ทั้งหมดได้ จึงลองทำการขยายขนาดของอากาศ (Air) และ (Si - Substrate) เพื่อตรวจสอบดูว่าค่าความจุไฟฟ้า C ที่ออกมาเบนเข้าหาค่าหนึ่งหรือไม่ (Converge) และค่าที่เรานำมาจำลองนั้นคลาดเคลื่อนจากค่านี้มากน้อยเพียงใด ขั้นต่อมาคือลองทำการเพิ่มจำนวนเซลล์ (Cell) แล้วดูว่าค่า C เพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นหรือไม่

3.1.1.2 จำลองคุณสมบัติทางไฟฟ้า

การจำลองคุณสมบัติทางไฟฟ้าใช้โปรแกรมย่อยชื่อ Sentaurus Device (Sdevice) โดยเป้าหมายหลัก คือการจำลองหาค่าความจุไฟฟ้าของเซนเซอร์ ซึ่งโหมดการจำลองที่ใช้คือ Mixed-Mode Simulations เป็นโหมดการจำลองที่สามารถสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดอื่นๆ เช่น ตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ แหล่งจ่ายไฟ ฯลฯ เพื่อนำมาต่อกับอุปกรณ์ไฟฟ้าที่จำลองให้กลายเป็นวงจรขนาดย่อม และอีกโหมดที่สำคัญคือ Small - Signal AC Analysis Simulation เป็นโหมดที่ใช้ในการหาค่าความความจุไฟฟ้า ซึ่งค่า C ที่ออกมาจะอยู่ในรูปของ Maxwell Capacitance Matrix โหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไฟล์คำสั่ง (Command file) สำหรับสั่งให้ Sdevice จำลองคุณสมบัติทางไฟฟ้าสามารถดูได้จาก ภาคผนวก ข. ซึ่งสามารถแบ่งเป็นส่วนๆ เรียงตามลำดับได้ดังนี้

1. Device Humidity sensor {} เป็นการจำลองเซนเซอร์วัดความชื้นที่เราได้สร้างขึ้นจาก SDE ก่อนหน้านี้โดยให้ชื่ออุปกรณ์ว่า Humidity sensor

   1.1 Electrode {...} กำหนด Boundary Condition ของขั้วไฟฟ้าของ Humidity sensor โดยขั้วที่ชื่อ Anode และ Cathode ให้เป็นขั้วชนิดแรงดันไฟฟ้า ซึ่งมีค่าแรงดันเริ่มต้นเป็นศูนย์โวลต์ ส่วนขั้ว Substrate เป็นขั้วชนิดประจุไฟฟ้า (Floating Contact) ซึ่งมีค่าประจุสุทธิเป็นศูนย์ฟารัด

   1.2 File {...} กำหนดชื่อไฟล์ Input และ Output ของ Humidity sensor

   1.3 Physics {...} กำหนด Physics Models ที่จะใช้ในการจำลอง Humidity sensor

2. Math {...} กำหนดวิธีการคำนวณในส่วนของ Solve ในภาพรวม (Global)
3. Plot {...} กำหนดตัวแปรผลลัพธ์ที่จะบันทึกในไฟล์ Output ในภาพรวม (Global)
4. File {...} กำหนดชื่อไฟล์ Input และ Output ในภาพรวม (Global)
5. System {...} กำหนดอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในวงจร
6. Solve {...} กำหนดวิธีจำลอง ในส่วนนี้เราทำการไบอัสเฉพาะศักย์ไฟฟ้าที่ขั้ว Anode จาก -V ถึง +V เมื่อ V คือความต่างศักย์ระหว่างขั้ว Anode และขั้ว Cathode และใช้คำสั่ง AC Coupled ในการหาค่าเมทริก C

3.1.1.3 แสดงและวิเคราะห์ผลการจำลอง

โปรแกรมย่อยที่เราใช้แสดง และวิเคราะห์ผลการจำลองมีหลายโปรแกรม เช่น Sentaurus Structure Editor Graphical User Interface (GUI) เป็นโปรแกรมที่ใช้สร้างหรือแสดงโครงสร้างของอุปกรณ์ทั้งแบบสองมิติ และสามมิติ, Tecplot SV เป็นโปรแกรมที่ใช้แสดงโครงสร้าง Mesh ค่าทางไฟฟ้าต่างๆ เช่น สนามไฟฟ้า ศักย์ไฟฟ้า ความหนาแน่นประจุ ฯลฯ และโปรแกรม Inspect ใช้ในการแสดงผลในรูปแบบกราฟ และแสดงค่าใน SWB ไฟล์คำสั่งของ Inspect สามารถดูได้จาก ภาคผนวก ค.

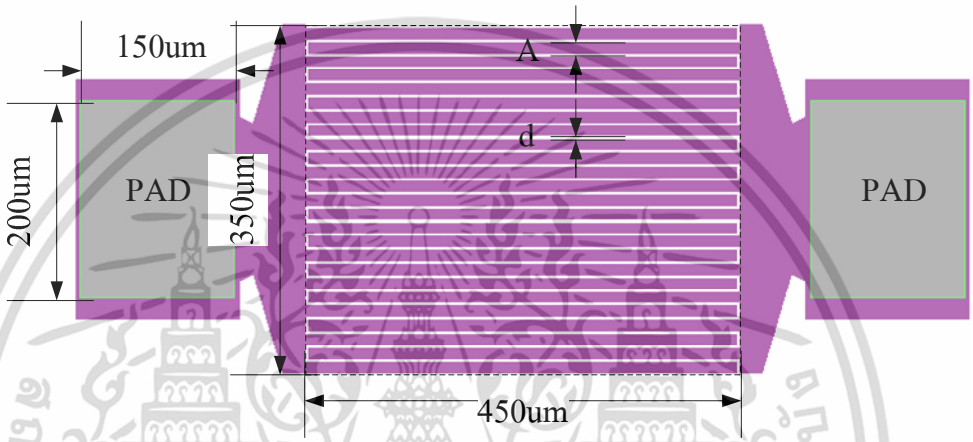
3.1.2. หลังทำการบรรจุภัณฑ์ (Packaging)

ดำเนินการเช่นเดียวกับก่อนการบรรจุภัณฑ์เปลี่ยนแปลงเพียง Command file ของ SDE ที่ใช้สำหรับจำลองโครงสร้าง ตัวอย่างของ Command file สามารถดูได้จาก ภาคผนวก ง.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การทดสอบความสัมพันธ์ของพื้นที่ของตัวเก็บประจุ และความหนาของชั้นไดอิเล็กทริก ที่คั่นกลางระหว่างขั้วตัวนำไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ

การสร้างมีขั้นตอนเช่นเดียวกันกับการสร้างตัวเก็บประจุ แต่แตกต่างกันที่ความสัมพันธ์ของพื้นที่ความกว้างของตัวเก็บประจุ คือ 1 μm, 5 μm, 10 μm, 15 μm และความหนาของชั้นไดอิเล็กทริก ที่คั่นกลางระหว่างขั้วตัวนำไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ คือ 1 μm, 2 μm, 4 μm โดยศึกษาผลของ กระแส – แรงดัน, ความจุไฟฟ้า – แรงดัน เพื่อหาคุณสมบัติของตัวเก็บประจุ ที่จะใช้ในการออกแบบการสร้าง แสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ขั้วอิเล็กโทรดโครงสร้างอินเตอร์ดิจิเตทที่มีการปรับเปลี่ยนค่า

ชั้นโลหะมีลักษณะของขั้วโลหะแบบอินเตอร์ดิจิเตทที่มีการกำหนดความกว้างของขั้วอินเตอร์ดิจิเตทแต่มีการเปลี่ยนแปลงค่าระยะห่างระหว่างขั้วอินเตอร์ดิจิเตท, และระยะห่างระหว่างขั้ว ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ต่างๆ ในการออกแบบ

การออกแบบ	ความกว้างขั้วอิเล็กโทรด (A)	ระยะห่างขั้วอิเล็กโทรด (d)	จำนวนขั้วอิเล็กโทรด (N)	ความลึก (h)
1	1 μm	1 μm	175	690 μm
2	1 μm	2 μm	115	690 μm
3	1 μm	4 μm	70	690 μm
4	5 μm	1 μm	58	690 μm
5	5 μm	2 μm	49	690 μm
6	5 μm	4 μm	38	690 μm
7	10 μm	1 μm	31	690 μm
8	10 μm	2 μm	28	690 μm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ต่างๆ ในการออกแบบ (ต่อ)

การออกแบบ	ความกว้างขั้วอิเล็กโทรด (A)	ระยะห่างขั้วอิเล็กโทรด (d)	จำนวนขั้วอิเล็กโทรด (N)	ความลึก (h)
9	10 μm	4 μm	24	690 μm
10	15 μm	1 μm	21	690 μm
11	15 μm	2 μm	20	690 μm
12	15 μm	4 μm	18	690 μm

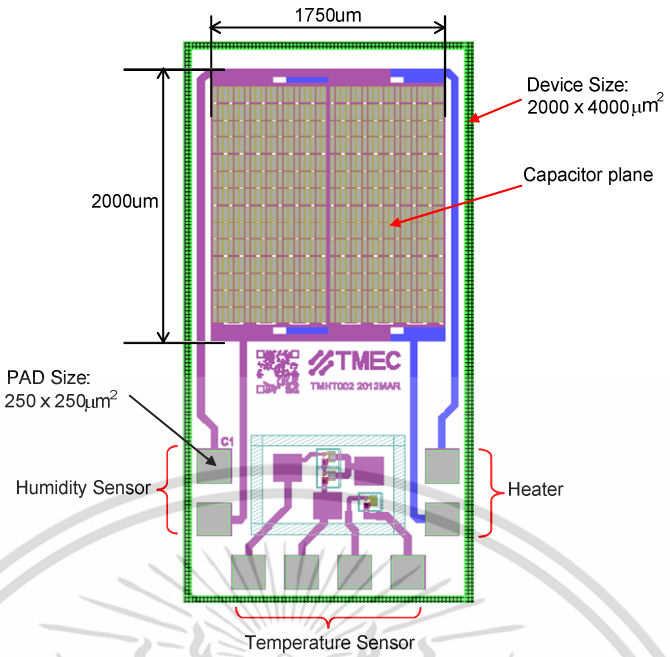
จากรูปที่ 3.3 และตารางที่ 3.1 สามารถคำนวนหาค่าตัวเก็บประจุที่จะทำการสร้างเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของตัวเก็บประจุได้ดังนี้ พื้นที่คือผลคูณของความกว้างของขั้วอิเล็โทรดกับความลึกของการชั้นฟิล์มโลหะที่ถูกกัดให้เกิดเป็นขั้วโลหะแบบอินเตอร์ดิจิเตท หารด้วยระยะห่างขั้วอิเล็คโทรด แล้วคูณด้วยค่าไดอิเล็กทริก คูณด้วยจำนวนขั้วโลหะทั้งหมด เมื่อทราบถึงความสัมพันธ์ของเงื่อนไขต่างๆ ตลอดจนค่าของตัวเก็บประจุ สามารถนำไปออกแบบ และสร้างเซนเซอร์วัดความชื้นแบบตัวเก็บประจุได้

3.3 การออกแบบ และสร้างเซนเซอร์วัดความชื้นแบบตัวเก็บประจุ

3.3.1 การออกแบบลวดลายสำหรับสร้างเซนเซอร์วัดความชื้นแบบตัวเก็บประจุ

การออกแบบเซนเซอร์วัดความชื้นแบบตัวเก็บประจุ ด้วยโปรแกรม L-Edit จะทำการออกแบบให้โครงสร้างขั้วแบบอินเตอร์ดิจิเตท ซึ่งประกอบด้วยแท่งสัมผัสระหว่างโลหะอลูมิเนียม โดยมีพื้นที่ตรวจรับความชื้นอยู่ระหว่างแท่งโลหะอลูมิเนียม ออกแบบให้มีพื้นที่ตรวจรับความชื้นขนาด 1750 μm × 2000 μm ระยะห่างระหว่างขี่ขั้วโหละ 1.5 μm ขนาดของขั้วที่ต่อใช้งาน 250 μm × 250 μm จากนั้นนำลวดลายต้นแบบที่ได้ไปทำกระบวนการสร้างเป็นกระจกต้นแบบ โดยได้ทำการออกแบบหัววัดวัดความชื้น (Humidity sensor) ให้อยู่ร่วมกันกับฮีทเตอร์ (Heater) และเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ (Temperature Sensor) แสดงในรูปที่ 3.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 รูปแบบโครงสร้างหัววัดความชื้นที่ออกแบบ

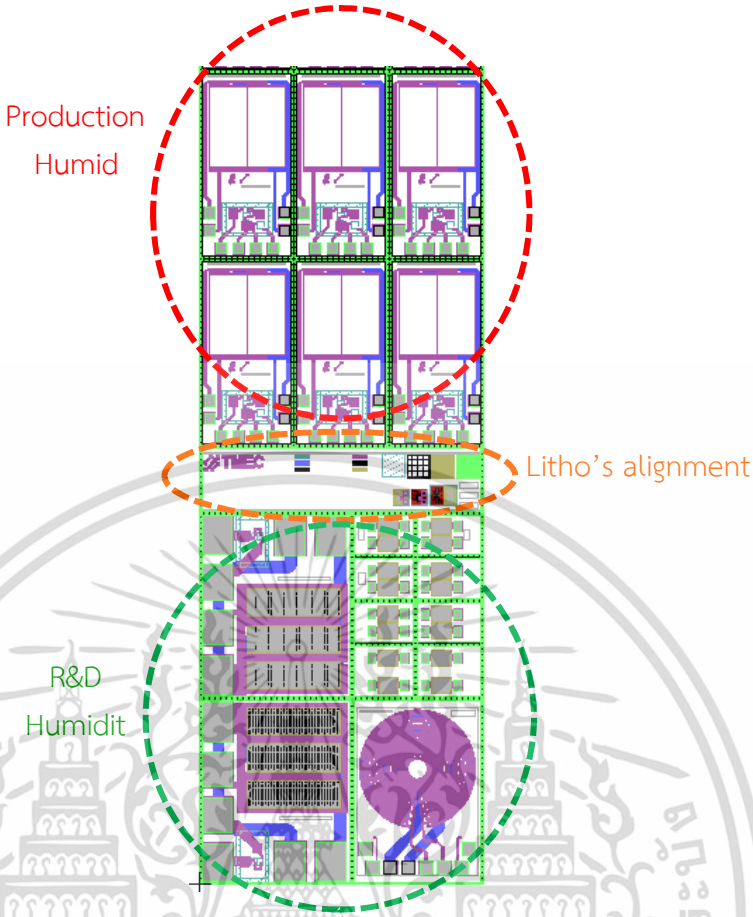
ในการสร้างเซนเซอร์มีลวดลายวงจรทั้งหมด 9 ชั้นลายวงจร โดยสร้างเป็นกระจกต้นแบบ แต่ละชั้นลายวงจรมีรายละเอียดดังนี้

- ชั้นแอคทีฟ (Active) และ โลคอส (LOCOS)
- ชั้นยิงฝังประจุชนิดเอ็น (n-Implant)
- ชั้นยิงฝังประจุชนิดพี (p-Implant)
- ชั้นโลหะ 1 (Metal 1)
- ชั้นเวียร์ (Via)
- ชั้นโลหะ 2 (Metal 2)
- ชั้นตรวจวัดความชื้น (Sense)
- ชั้นสร้างขั้ว (PAD)
- ชั้นเพิ่มพื้นที่ตรวจวัด (Dice Etch)

3.3.2 ขั้นตอนการสร้างเซนเซอร์วัดความชื้นแบบตัวเก็บประจุ

ตามที่ได้กล่าวถึงไว้ในบทที่ 2 แล้วในส่วนของการออกแบบหัววัดความชื้นนี้จะอาศัยหลักการทำงานของตัวเก็บประจุ ซึ่งเมื่อมีความชื้นในอากาศเปลี่ยนไปจะส่งผลให้ค่าไดอิเล็กทริกของอากาศเปลี่ยนไป มีผลให้ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุเปลี่ยนไป โดยทำการออกแบบไว้ในเงื่อนไขต่างๆ โดยจะขอกล่าวเพียงขั้นตอนกระบวนการสร้างเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



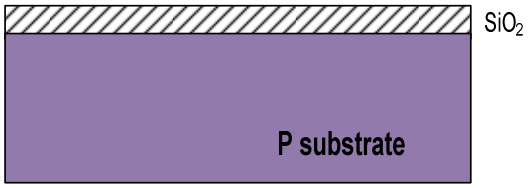
รูปที่ 3.5 ลวดลายของเซนเซอร์วัดความชื้นและเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ จากการออกแบบด้วยโปรแกรม L-edit

จากรูปที่ 3.5 เป็นลวดลายของเซนเซอร์วัดความชื้นแบบตัวเก็บประจุ การออกแบบหัววัดความชื้นนี้จะอาศัยหลักการทำงานของตัวเก็บประจุ ซึ่งเมื่อมีความชื้นในอากาศเปลี่ยนไปจะส่งผลให้ค่าไดอิเล็กทริกของอากาศเปลี่ยนไป มีผลให้ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุเปลี่ยนไป โดยทำการออกแบบไว้ในเงื่อนไขต่างๆ ขั้นตอนการสร้างเซนเซอร์วัดความชื้นแบบตัวเก็บประจุ มีขั้นตอนดังนี้

1. เตรียมแผ่นผลึกซิลิคอนระนาบ(100) ชนิดพี (P-Type) สภาพต้านทาน 1-20 Ohm.cm
2. ทำความสะอาดแผ่นสารกึ่งตัวนำด้วยสารเคมี (Cleaning) ดังนี้
   - Piranha สำหรับทำความสะอาดสาร Organic ต่างๆ
   - SC1 (NH_4OH:DI:H_2O_2) ทำความสะอาดฝุ่น
   - HF สำหรับลอกฟิล์มออกไซด์บางที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกริยาระหว่างออกซิเจนกับซิลิคอน
   - DI สำหรับล้างทำความสะอาดสารเคมี

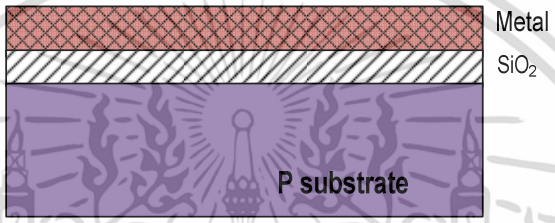
3. ปลูกชั้นฟิล์มบางซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) หนา ด้วยเครื่อง LPCVD หนา 560 อังสตรอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



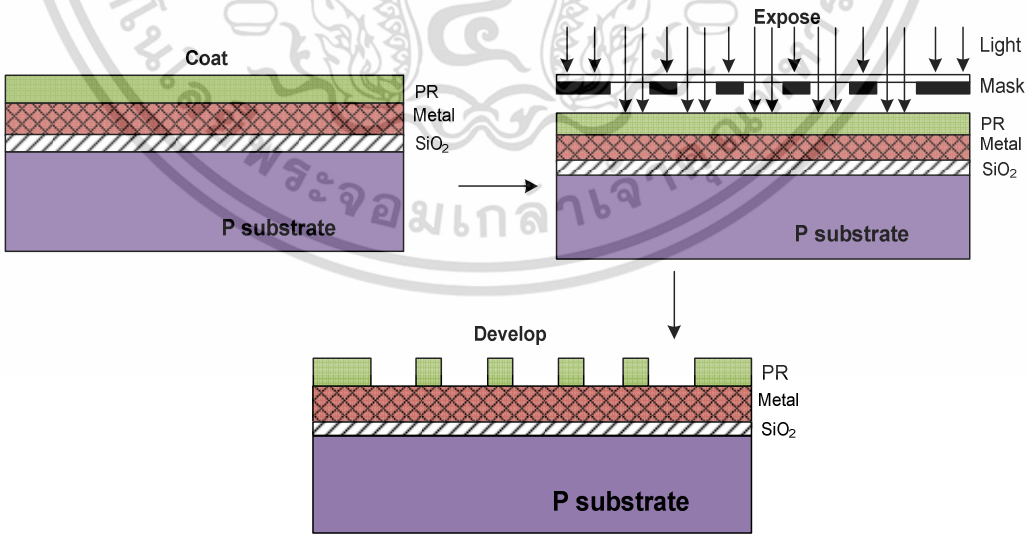
รูปที่ 3.6 ชั้นฟิล์มออกไซด์

4. สร้างฟิล์มโลหะด้วยกระบวนการสปัตเตอริง (Sputtering) โดยการยิงอิออนอาร์กอนไปยังโลหะที่จะใช้เคลือบมี 4 ชนิด คือ ไทเทเนียม, ไทเทเนียมไนไตรด์, อะลูมิเนียม และไทเทเนียมไนไตรด์ ตามลำดับ ลงบนแผ่นซิลิคอน



รูปที่ 3.7 ชั้นฟิล์มโลหะ

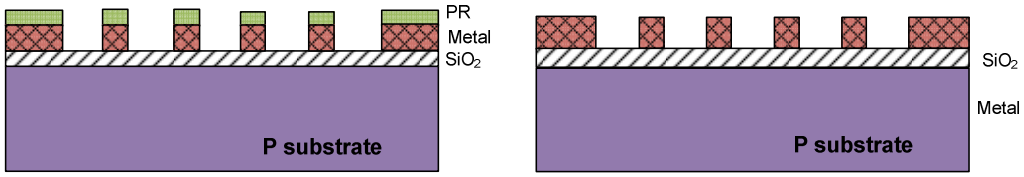
5. สร้างลวดลายวงจรชั้นโลหะด้วยกระบวนการถ่ายย่อแบบ ประกอบด้วย การเคลือบฟิล์มไวแสง การฉายแสง และการล้างลายด้วยน้ำยาไวแสงตรงที่ไม่โดนแสงก็จะละลายไปกับน้ำยาล้างไวแสง



รูปที่ 3.8 การสร้างลวดลายวงจรบนชั้นโลหะ

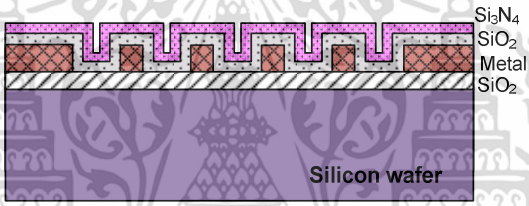
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. กัดลวดลายวงจรชั้นโลหะด้วยกระบวนการกัดแห้งและล้างฟิล์มไวแสงด้วยน้ำยา ALEG-310 ใช้เวลา 10 นาที



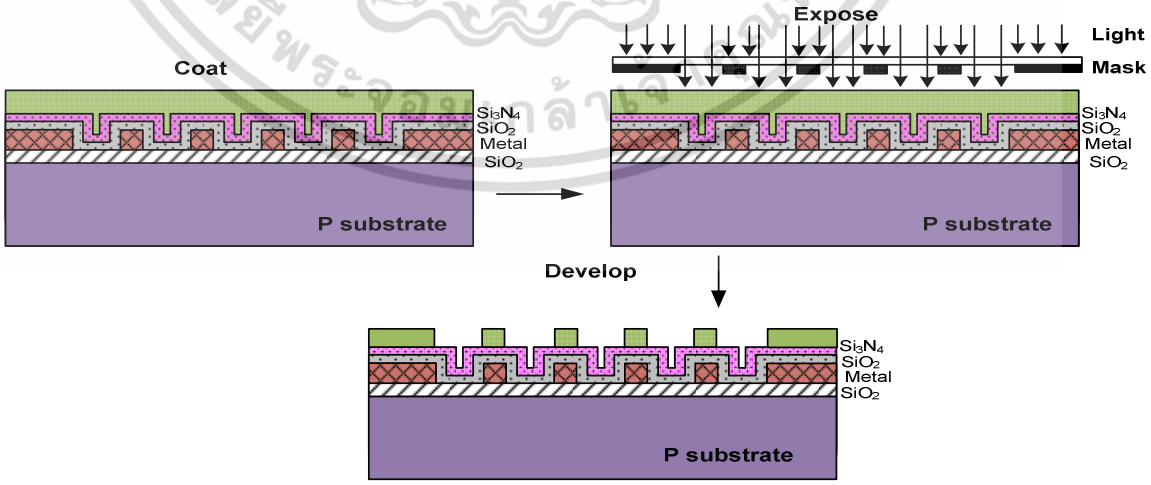
รูปที่ 3.9 การกัดลวดลายวงจรบนชั้นโลหะ

7. สร้างชั้นฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) และชั้นฟิล์มซิลิคอนไนไตรด์ (Si_3N_4) โดยกระบวนการเคลือบชั้นฟิล์มโดยใช้พลาสมา PEVCD สร้างฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์หนา 3,000 อังสตรอม และฟิล์มซิลิคอนไนไตรด์หนา 3,000 อังสตรอม



รูปที่ 3.10 การสร้างชั้นฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) และชั้นฟิล์มซิลิคอนไนไตรด์ (Si_3N_4)

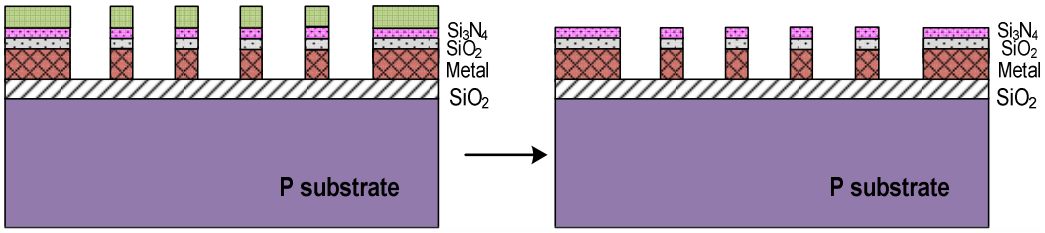
8. สร้างลวดลายชั้น Sensor open ด้วยกระบวนการถ่ายย่อแบบ โฟโต้ลิโธกราฟฟี่ สร้างลวดลายส่วนหัววัดความชื้นบนชั้นฟิล์ม เปิดส่วน SENSE (Sensor open)



รูปที่ 3.11 การสร้างลวดลายชั้น SENSE (Sensor open)

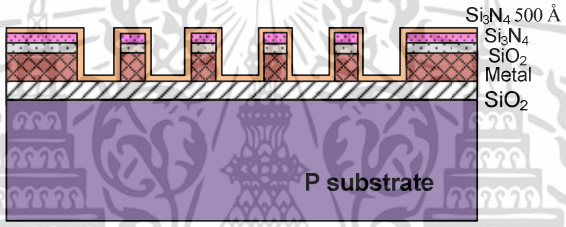
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. กัดชั้นฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) หนา 3,000 อังสตรอม และชั้นฟิล์มซิลิคอนไนไตรด์ (Si_3N_4) หนา 3,000 อังสตรอม ออกด้วยกระบวนการกัดแห้ง และล้างฟิล์มไวแสงออก



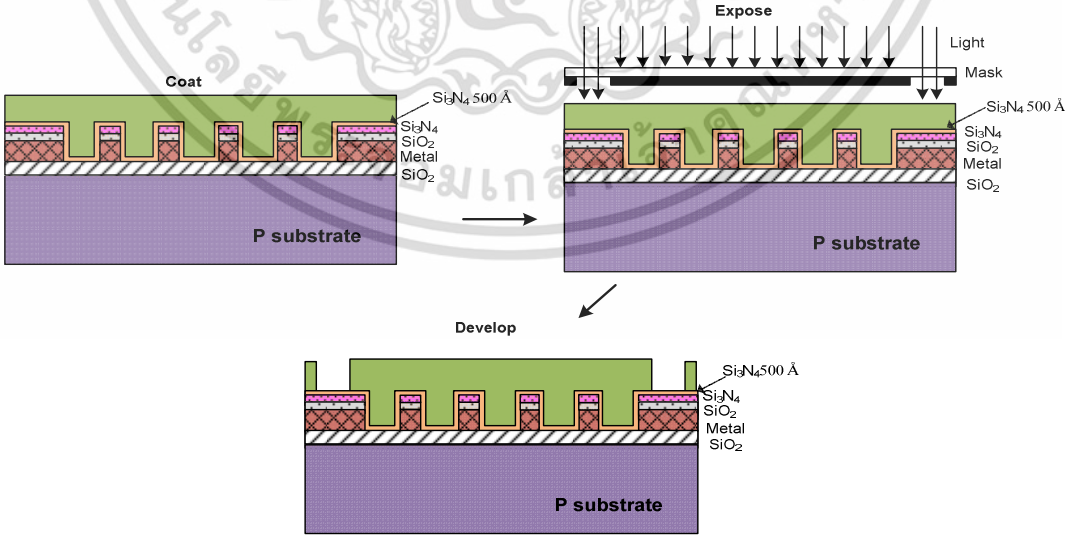
รูปที่ 3.12 การกัดชั้นฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) และชั้นฟิล์มซิลิคอนไนไตรด์ (Si_3N_4)

10. สร้างชั้นฟิล์มซิลิคอนไนไตรด์ (Si_3N_4) หนา 500 อังสตรอม สำหรับดูดซับความชื้น และเป็นชั้นป้องกันการขีดข่วนของผิวหน้าของชิ้นงาน



รูปที่ 3.13 การสร้างชั้นฟิล์มซิลิคอนไนไตรด์ (Si_3N_4)

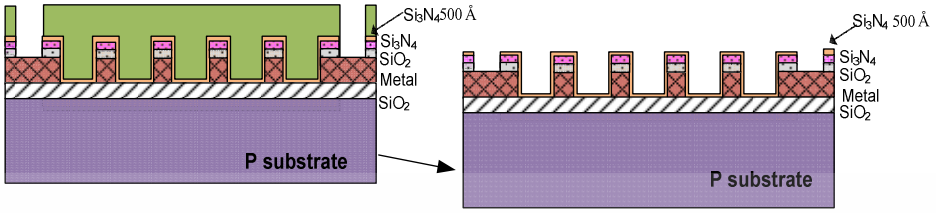
11. สร้างลวดลายชั้นเปิดขั้ว ด้วยกระบวนการถ่ายย่อแบบ เพื่อเปิดบริเวณขั้วสำหรับวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า และต่อใช้งาน



รูปที่ 3.14 การสร้างลวดลายชั้น PAD

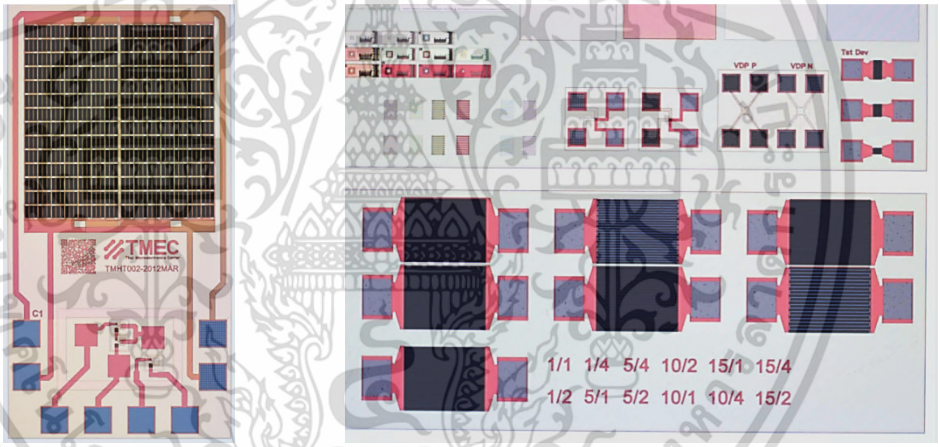
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12. กัดชั้นฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) และซิลิคอนไนไตรด์ (Si_3N_4) ออกส่วนที่ไม่มีน้ำยา (resist) ก็จะถูกกัดออกหลังจากนั้นก็นำไปล้างด้วยน้ำยา ALEG-310 ที่อุณหภูมิ 55 °C ประมาณ 10 นาที และล้างน้ำไร้ประจุ (DI Wafer) 10 นาที



รูปที่ 3.15 การกัดชั้นฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) และชั้นฟิล์มซิลิคอนไนไตรด์ (Si_3N_4)

13. แล้วซินเตอร์ริ่งที่ 400 °C ใช้เวลา 30 นาที ในบรรยากาศไนโตรเจน เป็นอันเสร็จสิ้นกระบวนการสร้างเซนเซอร์ตรวจวัดความชื้นแบบตัวเก็บประจุ



(ก) (ข)

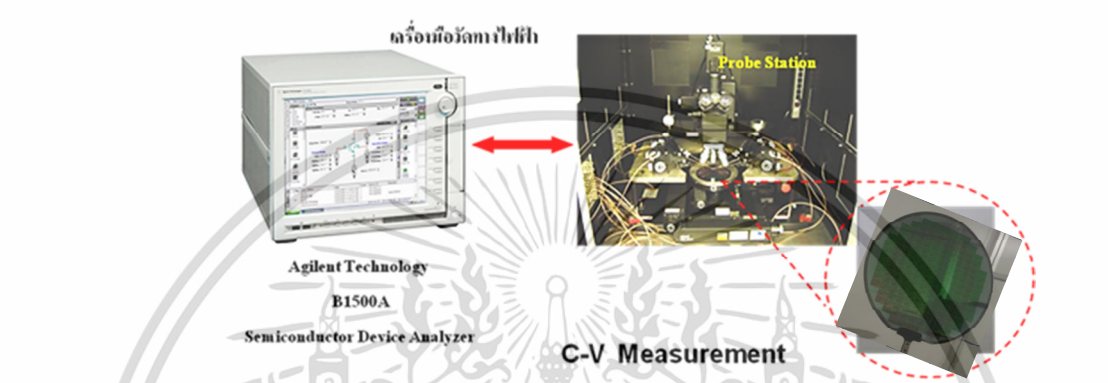
รูปที่ 3.16 ภาพถ่ายกำลังขยายสูงของเซนเซอร์วัดความชื้นแบบตัวเก็บประจุที่สร้างเสร็จสมบูรณ์
(ก) บนแผ่นซิลิคอน
(ข) การเปลี่ยนแปลงค่าระยะห่างระหว่างขั้วอินเตอร์ดิจิเตท, และระยะห่างระหว่างขั้ว

3.4 การทดสอบเซนเซอร์วัดความชื้นแบบตัวเก็บประจุ

ภายหลังจากการสร้างเซนเซอร์แล้ว เป็นการทดสอบหาลักษณะสมบัติของอุปกรณ์ โดยการวัดลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าเบื้องต้นด้วยเครื่อง Agilent B1500A Semiconductor Device Analyzer โดยในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการทดลองต่างๆ ของเซนเซอร์วัดความชื้นแบบตัวเก็บประจุโดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นการทดลองเพื่อหาคุณสมบัติของตัวเก็บประจุ โดยวัตถุประสงค์หลักเพื่อดูค่าความเก็บประจุ ที่สร้างที่เหมาะสมในการสร้างเซนเซอร์วัดความชื้นแบบตัวเก็บประจุ โดยศึกษาจากสมบัติกระแส-แรงดัน และสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดัน ส่วนที่สองหลังจากวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเครื่องโพรบสเตชั่น จากนั้นนำแผ่นไปทำการตัดแบ่งเซนเซอร์แต่ละตัวและนำชิพไปเชื่อมต่อสาย IC ด้วยลวดทองคำแล้วก็นำไปทำการบรรจุภัณฑ์สำหรับนำไปใช้งานต่อไป นำเซนเซอร์ตรวจวัดความชื้นมาวัดกระแส , แรงดันและความจุไฟฟ้า ซึ่งจะทำการต่ออุปกรณ์ โดยเครื่องมือประกอบด้วยหัวเข็มวัดชิ้นงาน (Probe Station) ต่อกับ Precision Semiconductor Parameter Analyzer ซึ่งทำหน้าที่วัดกระแส แรงดัน และความจุไฟฟ้า โดยควบคุมการทำงานและบันทึกผลด้วยโปแกรม Easy Expert วัดคุณสมบัติความจุไฟฟ้า และแรงดันของหัวัดความชื้นที่ค่าความถี่ไฟฟ้าต่างๆ



รูปที่ 3.17 การวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเครื่อง Agilent B1500A Semiconductor Device Analyzer วัดเซนเซอร์วัดความชื้นแบบตัวเก็บประจุที่สร้างเสร็จสมบูรณ์

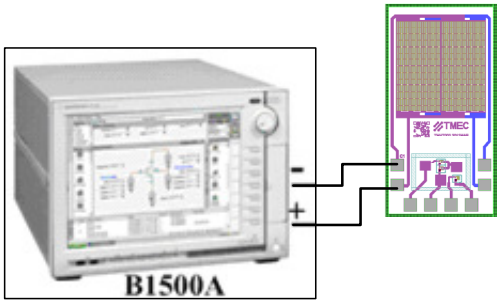
3.4.1 การวัดลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า – ความถี่

การวัดคุณสมบัติความจุไฟฟ้า และแรงดันของหัววัดความชื้นที่ค่าความถี่ไฟฟ้าต่างๆ นำเซนเซอร์วัดความชื้นแบบตัวเก็บประจุ มาวัดความถี่ซึ่งมีค่าตั้งแต่ 1MHz, 1.5MHz และ 2MHz ทำการวัดโดยใช้เครื่องมือดังรูปที่ 3.18

3.4.2 การวัดลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้า

นำเซนเซอร์วัดความชื้นแบบตัวเก็บประจุ ทดสอบลักษณะสมบัติกระแส - แรงดัน เมื่อได้รับแรงดันไบอัสตรง และไบอัสย้อนกลับ ที่ -3V ถึง +3V ซึ่งทำการต่ออุปกรณ์ดังรูปที่ 3.18 เครื่องมือวัดประกอบด้วยหัวเข็มวัดชิ้นงาน (Probe Station) ต่อกับ Agilent B1500A Semiconductor Device Analyzer ซึ่งทำหน้าที่วัดกระแส และแรงดัน, ความจุไฟฟ้า โดยควบคุมการทำงาน และบันทึกผลด้วยโปรแกรม Easy Expert

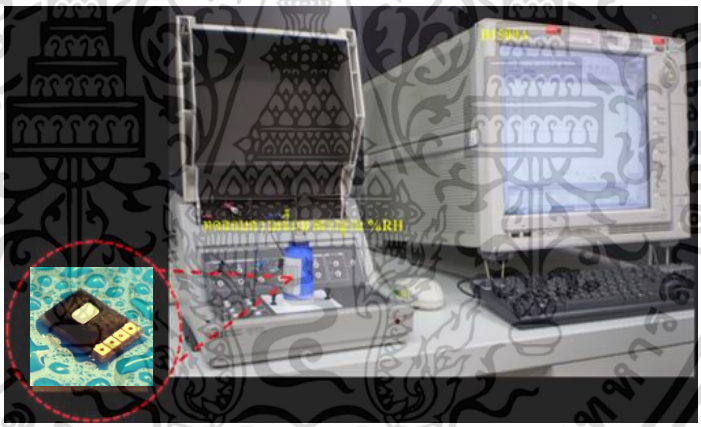
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.18 แผนภาพอุปกรณ์วัดลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของเซนเซอร์วัดความชื้นแบบตัวเก็บประจุ

3.4.3 การวัดคุณสมบัติการตอบสนองของเซนเซอร์วัดความชื้นแบบตัวเก็บประจุ

หลังจากวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเครื่องโพรบสเตชั่น จากนั้นนำแผ่นไปทำการตัดแบ่งเซนเซอร์แต่ละตัวและนำชิพไปเชื่อมต่อสาย IC ด้วยลวดทองคำแล้วก็นำไปทำการบรรจุภัณฑ์สำหรับนำไปใช้งานต่อไป ทดสอบหัววัดความชื้นด้วยชุดทดสอบค่าความชื้นมาตรฐานที่ความชื้นในอากาศเท่ากับ LiCl 12%RH, $MgCl_2$ 33%RH, NaCl 75%RH และ H_2O 100 %RH



รูปที่ 3.19 การทดสอบเทียบกับชุดความชื้นมาตรฐาน

3.4.4 การวัดคุณสมบัติการตอบสนองต่ออุณหภูมิ

วัดคุณสมบัติความจุไฟฟ้าของหัววัดความชื้นที่อุณหภูมิต่างๆ นำเซนเซอร์วัดความชื้นมาวัดที่ค่าอุณหภูมิตั้งแต่ 25 °C – 50 °C ทำการต่อเซนเซอร์เข้ากับชุดเครื่องมือประกอบด้วยหัวเข็มวัดชิ้นงาน (Probe Station) ต่อกับ Agilent B1500A Semiconductor Device Analyzer ซึ่งทำหน้าที่วัดความจุไฟฟ้าเทียบกับตัวทำอุณภูมิ โดยควบคุมการทำงานและบันทึกผลด้วยโปแกรม Easy Expert

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

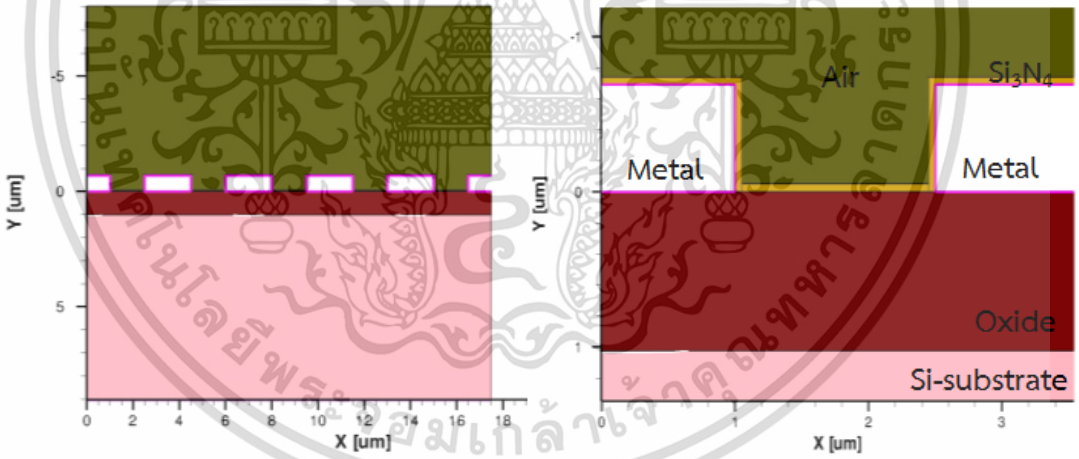
บทที่ 4
ผลการทดลอง และการวิเคราะห์ผลการทดลอง

บทนี้กล่าวถึงผลการทดลอง และวิเคราะห์ผลการทดลอง จากการสร้างอุปกรณ์ที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 ประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก คือส่วนแรกเป็นการจำลอง คุณสมบัติของอุปกรณ์วัดความชื้นแบบตัวเก็บประจุ ส่วนที่สองเป็นการศึกษาความสัมพันธ์ของพื้นที่ของตัวเก็บประจุ และความหนาของชั้นไดอิเล็กทริก ที่ขั้นกลางระหว่างขั้วตัวนำไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ ส่วนที่สามเป็นการศึกษาการออกแบบสร้างเซนเซอร์วัดความชื้นแบบตัวเก็บประจุ และการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ที่ทำการสร้าง

4.1. ผลการจำลองและวิเคราะห์ผลการจำลอง

4.1.1 ก่อนทำการบรรจุภัณฑ์ (Packaging)

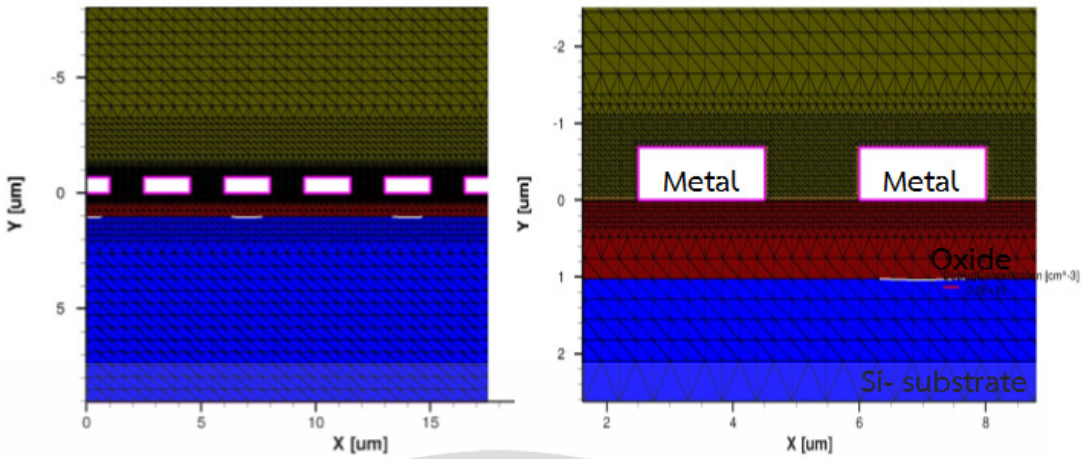
การจำลองโครงสร้าง และสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์วัดความชื้นที่ได้จากการจำลองโดยโปรแกรม SDE Sdevice และแสดงผลโดยโปรแกรม Tecplot SV มีลักษณะโครงสร้าง และสมบัติทางไฟฟ้า ดังนี้



รูปที่ 4.1 โครงสร้างของอุปกรณ์วัดความชื้นขนาด 5 เซลล์ (ซ้าย)และภาพขยายแสดงขนาด 1 เซลล์ (ขวา)

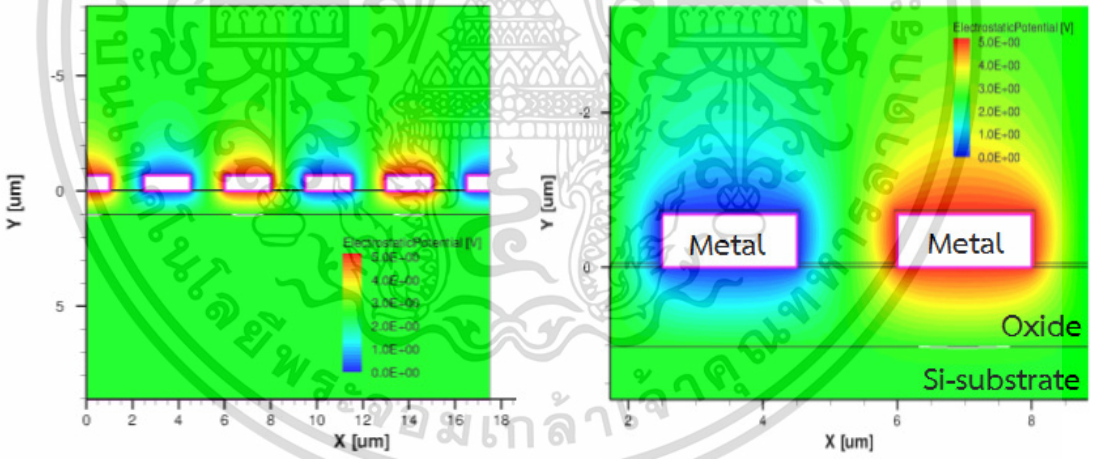
จากรูปที่ 4.1 แสดงตัวอย่างของโครงสร้างของอุปกรณ์วัดความชื้นขนาด 5 เซลล์ และภาพขยายแสดงขนาด 1 เซลล์ ซึ่งได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม SDE สีชมพูอ่อนหมายถึงชั้น Si-Substrate สีแดงหมายถึงชั้น Oxide สีเขียวขี้ม้าหมายถึงบริเวณที่เป็นอากาศ สีเหลืองส้มหมายถึงชั้น Si_3N_4 และสีขาวที่ลูกล้อมรอบด้วยสีชมพูเข้มแสดงขั้วไฟฟ้า ซึ่งเราสามารถสร้างการทดลองโดยเปลี่ยนความหนาของชั้นต่างๆ และจำนวนเซลล์ได้ตามที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 โครงสร้างของอุปกรณ์วัดความชื้นหลัง Meshing ขนาด 5 เซลล์ (ซ้าย) และภาพขยายขนาด 1 เซลล์ (ขวา)

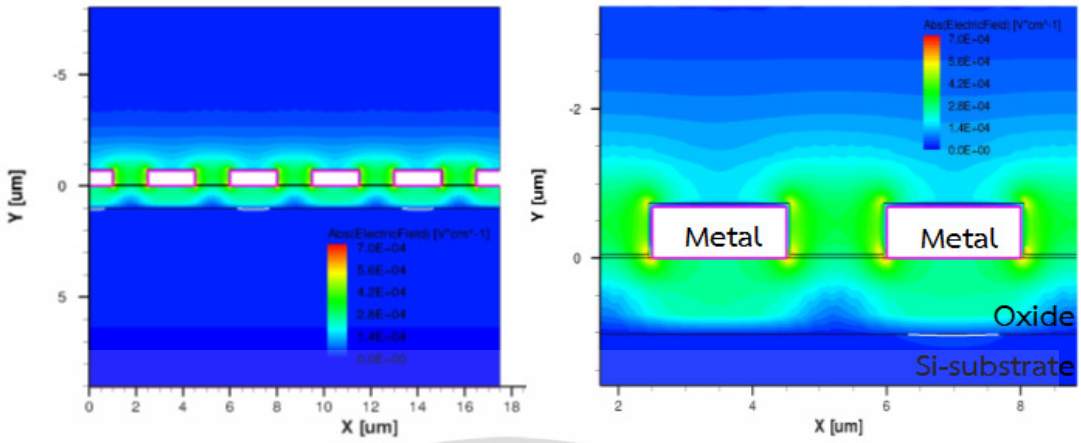
จากรูปที่ 4.2 แสดง Mesh บริเวณต่างๆ ของอุปกรณ์วัดความชื้น โดย Mesh จะมีความถี่มากที่สุดบริเวณใกล้กับขั้วไฟฟ้าซึ่งเป็นบริเวณที่มีสนามไฟฟ้าและการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าสูง (ดูรูปที่ 4.3) และ Mesh จะมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อห่างออกไปจากขั้วไฟฟ้าซึ่งเป็นบริเวณที่มีสนามไฟฟ้าต่ำและเปลี่ยนแปลงน้อย



รูปที่ 4.3 ขนาดของศักย์ไฟฟ้า (Potential) ของอุปกรณ์วัดความชื้นขนาด 5 เซลล์ (ซ้าย) และภาพขยายขนาด 1 เซลล์ (ขวา)

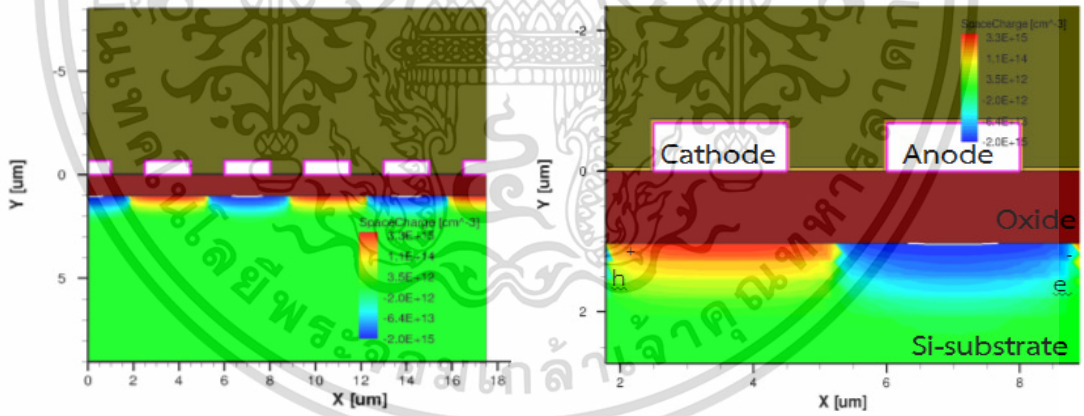
จากรูปที่ 4.3 แสดงขนาดของศักย์ไฟฟ้า (Potential) บริเวณต่างๆ ของอุปกรณ์วัดความชื้น โดยภาพที่ยกมาเป็นตัวอย่างของศักย์ไฟฟ้าเมื่อไบอัสศักย์ไฟฟ้าที่ขั้ว Anode ขนาด 5 โวลล์ และไบอัสศักย์ไฟฟ้าที่ขั้ว Cathode ขนาด 0 โวลล์ เราจะสังเกตเห็นว่าที่ตำแหน่งซึ่งห่างจากขั้วทั้งสองมากกว่า 4 ไมครอน ศักย์ไฟฟ้ามีค่าประมาณ 2.5 โวลต์และแทบจะไม่มีการเปลี่ยนแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 ขนาดของสนามไฟฟ้าของอุปกรณ์วัดความชื้นขนาด 5 เซลล์ (ซ้าย) และภาพขยายขนาด 1 เซลล์ (ขวา)

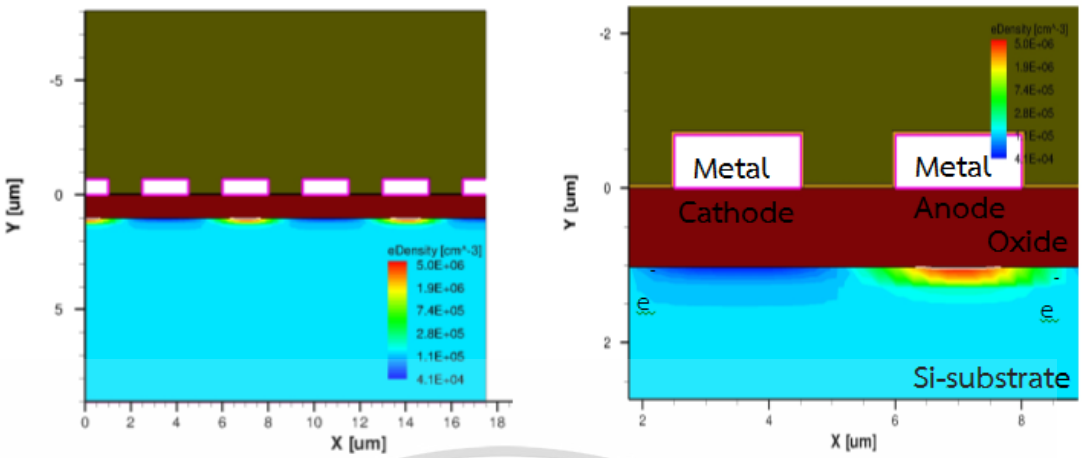
จากรูปที่ 4.4 แสดงขนาดของสนามไฟฟ้าบริเวณต่างๆ ของอุปกรณ์วัดความชื้น โดยภาพที่ยกมาเป็นตัวอย่างของสนามไฟฟ้าเมื่อไบอัสศักย์ไฟฟ้าที่ขั้ว Anode ขนาด 5 โวลล์ จะสังเกตเห็นว่าสนามไฟฟ้าจะหนาแน่นและเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วบริเวณใกล้กับขั้วไฟฟ้าโดยเฉพาะส่วนมุมของขั้วไฟฟ้า ส่วนบริเวณซึ่งห่างออกไปมากกว่า 4 ไมครอน สนามไฟฟ้าและในชั้นของ Si-Substrate สนามไฟฟ้าจะมีค่าน้อยมากจนเข้าใกล้ศูนย์



รูปที่ 4.5 ขนาดของ Space Charge ของอุปกรณ์วัดความชื้นขนาด 5 เซลล์ (ซ้าย) และภาพขยายขนาด 1 เซลล์ (ขวา)

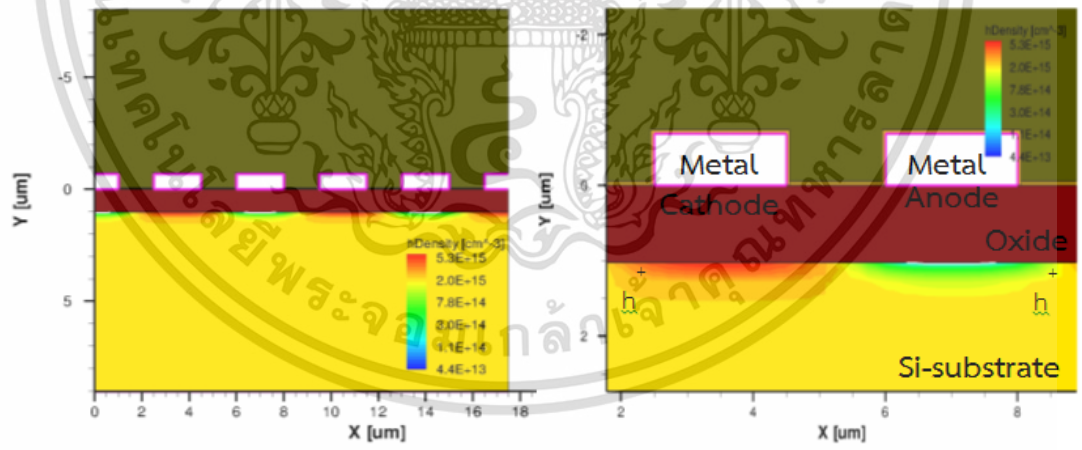
จากรูปที่ 4.5 แสดงขนาดของ Space Charge บริเวณต่างๆ ของอุปกรณ์วัดความชื้น โดยภาพที่ยกมาเป็นตัวอย่างของ Space Charge เมื่อไบอัสศักย์ไฟฟ้าที่ขั้ว Anode ขนาด 5 โวลล์ และไบอัสศักย์ไฟฟ้าที่ขั้ว Cathode ขนาด 0 โวลล์ เราจะสังเกตเห็นว่าที่ตำแหน่งใต้ขั้ว Anode จะมีประจุลบสุทธิรวมตัวกันอย่างหนาแน่นขนาดประมาณ -2×10^{15} cm^{-3} ในทางตรงกันข้ามที่ใต้ขั้ว Cathode มีประจุบวกสุทธิรวมตัวกันอย่างหนาแน่นขนาดประมาณ 3.3×10^{15} cm^{-3} ขีดสีขาวใต้ขั้ว Anode แสดงบริเวณปลอดพาหะ (Depletion Region) ซึ่งมีขนาดเล็กมาก (<100 nm)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 ขนาดของความหนาแน่นของอิเล็กตรอน (e^-) ของอุปกรณ์วัดความชื้นขนาด 5 เซลล์ (ซ้าย) และภาพขยายขนาด 1 เซลล์ (ขวา)

จากรูปที่ 4.6 แสดงขนาดของความหนาแน่นของอิเล็กตรอน (e^-) บริเวณต่างๆ ของอุปกรณ์วัดความชื้น โดยภาพที่ยกมาเป็นตัวอย่างของความหนาแน่นของอิเล็กตรอน (e^-) เมื่อไบอัสศักย์ไฟฟ้าที่ขั้ว Anode ขนาด 5 โวลล์ และไบอัสศักย์ไฟฟ้าที่ขั้ว Cathode ขนาด 0 โวลล์ จะสังเกตเห็นว่าที่ตำแหน่งใต้ขั้ว Anode จะมีอิเล็กตรอนรวมตัวกันอย่างหนาแน่นขนาดประมาณ 5×10^{6} cm^{-3} ในขณะที่ใต้ขั้ว Cathode มีอิเล็กตรอนรวมตัวกันเบาบางกว่าขั้ว Anode ขนาดประมาณ 4.1×10^{4} cm^{-3}



รูปที่ 4.7 ขนาดของความหนาแน่นของโฮล (h^+) ของอุปกรณ์วัดความชื้นขนาด 5 เซลล์ (ซ้าย) และภาพขยายขนาด 1 เซลล์ (ขวา)

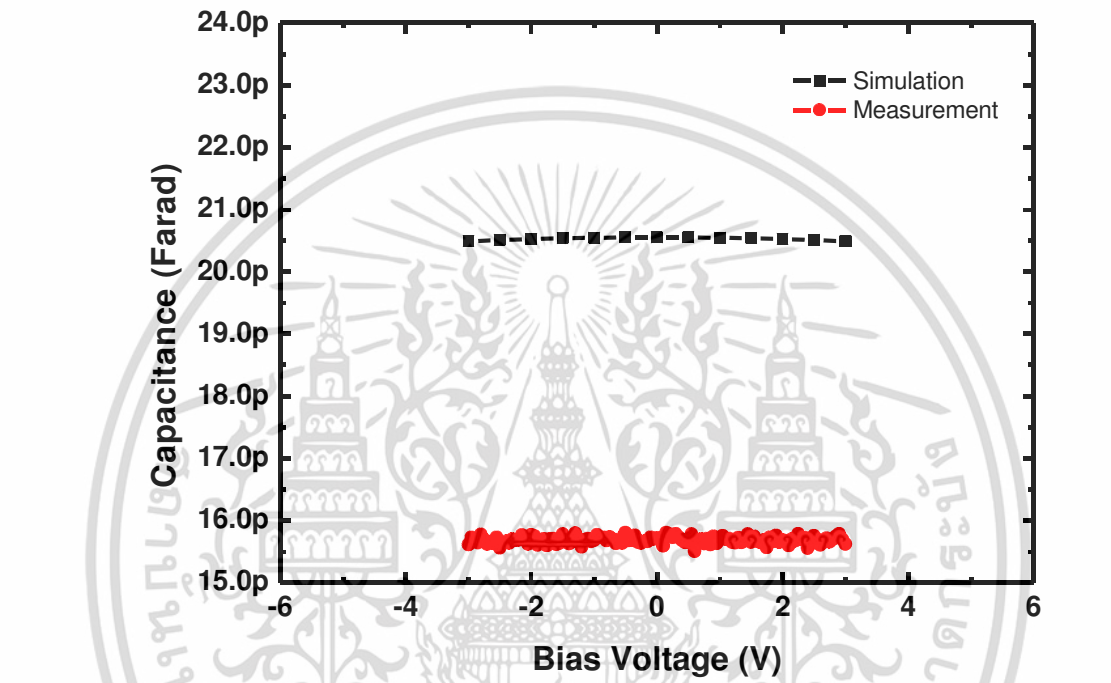
จากรูปที่ 4.7 แสดงขนาดของความหนาแน่นของโฮล (h^+) บริเวณต่างๆ ของอุปกรณ์วัดความชื้น โดยภาพที่ยกมาเป็นตัวอย่างของความหนาแน่นของโฮลเมื่อไบอัสศักย์ไฟฟ้าที่ขั้ว Anode ขนาด 5 โวลล์ และไบอัสศักย์ไฟฟ้าที่ขั้ว Cathode ขนาด 0 โวลล์ เราจะสังเกตเห็นว่าที่ตำแหน่งใต้ขั้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Anode จะมีโฮลรวมตัวกันที่ขนาดประมาณ 3×10^{14} cm^{-3} ในขณะที่ใต้ขั้ว Cathode มีโฮลรวมตัวกันหนาแน่นกว่าขั้ว Anode ขนาดประมาณ 5.3×10^{15} cm^{-3}

4.1.2 การจำลองหาค่าความจุไฟฟ้า

4.1.2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับค่าศักย์ไฟฟ้าที่ไบอัสที่ขั้ว Anode

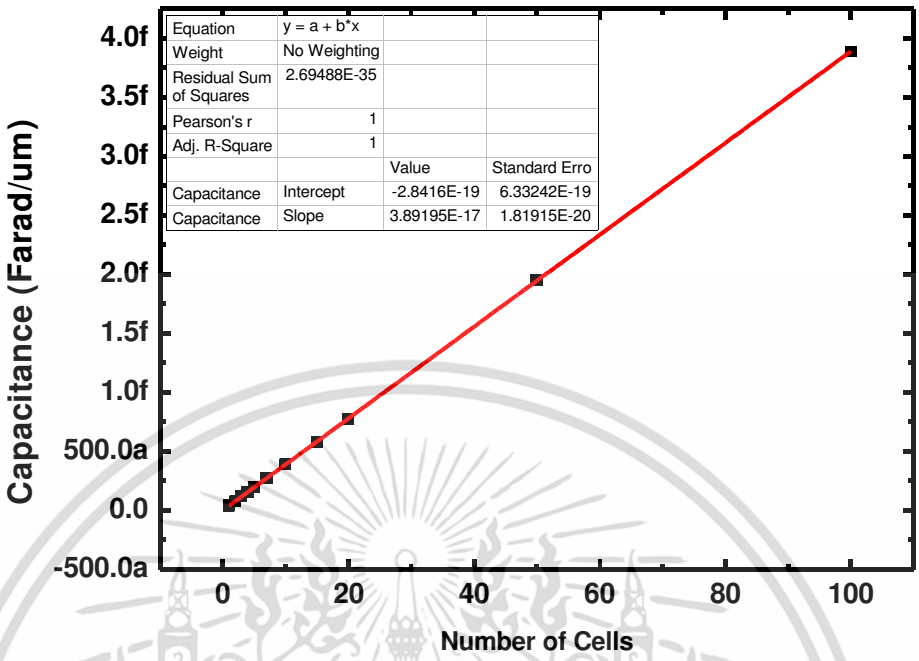


รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าที่ไบอัสที่ขั้ว Anode กับค่าความจุไฟฟ้า

จากกราฟจะเห็นว่าจากการจำลองความจุไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อยเมื่อศักย์ไฟฟ้าที่ไบอัสที่ขั้ว Anode เปลี่ยนไปสาเหตุเนื่องมาจาก เมื่อเราไบอัสที่ขั้ว Anode ด้วยศักย์ไฟฟ้าที่บวกที่สูงพอ จะทำให้เกิดบริเวณปลอดพาหะ (Depletion region) ที่ใต้ขั้วไฟฟ้า Anode ดังแสดงในรูปที่ 4.8 ซึ่งทำให้ประจุถูกดันออกห่างจากขั้ว ในทางกลับกันเมื่อเราไบอัสที่ขั้ว Anode ด้วยศักย์ไฟฟ้าที่ลบที่สูงพอ จะทำให้เกิดบริเวณพร่องประจุ (Depletion region) ที่ใต้ขั้วไฟฟ้า Cathode กราฟจึงมีความสมมาตร จากสมการที่ 11 เมื่อค่า d เพิ่มขึ้นค่า C จะลดลง แต่เนื่องจากบริเวณพร่องประจุมีขนาดเล็กมาก ค่าความเก็บประจุจึงไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก จากกราฟการวัดจริงเราจึงแทบจะไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงของค่าความเก็บประจุ จากการวัดค่าความจุไฟฟ้าของอุปกรณ์วัดความชื้นบนแผ่น Wafer ทั้งหมด 132 จุด พบว่าค่าเฉลี่ยอยู่ที่ ค่าความจุไฟฟ้า C = 15.7 ± 0.6 pF โดยค่าจากการจำลองอยู่ที่ C = 20.6 pF ซึ่งคลาดเคลื่อนจากค่าจริงอยู่ 31% สาเหตุหลักของความคลาดเคลื่อนน่าจะมาจากโครงสร้างที่จำลองกับโครงสร้างจริงคลาดเคลื่อนกัน เช่น ความยาวของเซลล์และส่วนโค้งของเซลล์ ความหนาของชั้นต่างๆ Space บริเวณขอบของขั้วไฟฟ้า เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับจำนวนเซลล์



รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเซลล์กับค่าความจุไฟฟ้าเมื่อ V = 0

เมื่อทดลองเพิ่มจำนวนเซลล์จาก 1 – 100 เซลล์ พบว่าค่าความจุ และจำนวนเซลล์มีความสัมพันธ์เป็นแบบเส้นตรงบรรยายได้ด้วยสมการ

$$C = 3.89\times10^{-17} * N - 2.48\times10^{19} \quad (10)$$

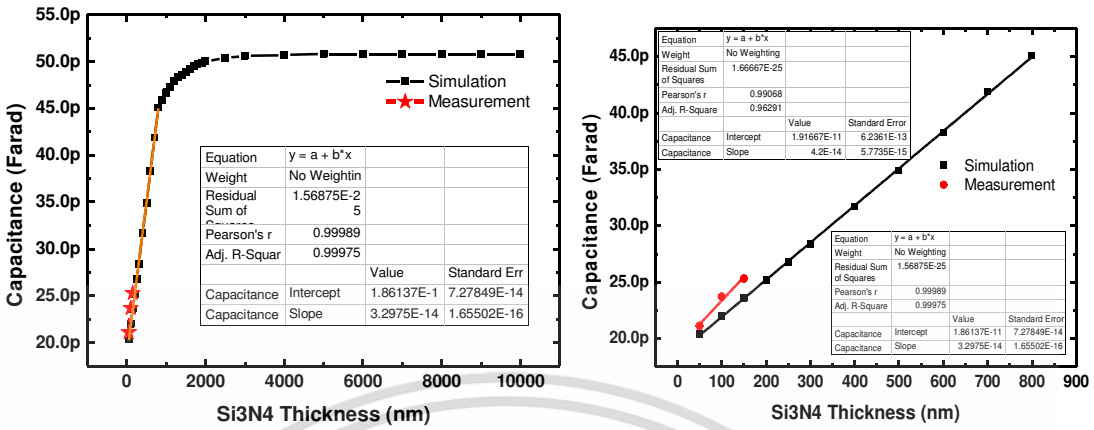
เมื่อ C คือ ค่าความจุไฟฟ้าต่อความยาว 1 μm (Capacitance)

N คือ จำนวนเซลล์

ความชันของกราฟมีค่า $3.89\times10^{-17} \pm 1.82\times10^{20}$ farad * μm^{-1} และจุดตัดแกนค่าความจุไฟฟ้าที่ค่า -2.48×10^{19} farad * μm^{-1} โดยโครงสร้างจริงของอุปกรณ์วัดความชื้นมีจำนวนเซลล์ประมาณ 17,640 เซลล์ แต่ละเซลล์ยาวประมาณ 30 μm เมื่อแทนในสมการที่ 10 เราจะได้ค่าความจุของเซลล์รวม อยู่ที่ C = 20.59 pF เนื่องจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้า และจำนวนเซลล์เป็นแบบเส้นตรงโดยจะเห็นได้ว่าค่าความคลาดเคลื่อนของความชัน และค่าจุดตัดแกน ค่าความจุไฟฟ้ามีค่าน้อยมาก จึงสามารถลดความซับซ้อนของการจำลองโดยการจำลองเพียงเซลล์เดียวแล้วนำค่าความจุไฟฟ้าที่ได้มาคูณกับความยาวเซลล์ และจำนวนเซลล์ซึ่งค่าความจุที่ออกมาจะมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 1%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับความหนาของชั้น Si_3N_4



รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้น Si_3N_4 กับค่าความจุไฟฟ้า

จากกราฟที่ 4.10 จะเห็นได้ว่าที่ความหนาของชั้น Si_3N_4 ระหว่าง 0 – 800 nm ค่าความจุไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อความหนาของชั้น Si_3N_4 เพิ่มขึ้น โดยความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นSi_3N_4 กับค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการจำลองเป็นแบบเส้นตรงบรรยายได้ด้วยสมการ

$$C = 3.30\times10^{-14} * d + 1.86\times10^{-11} \quad (11)$$

เมื่อ C คือ ค่าความจุไฟฟ้าของเซลล์รวม (Capacitance)

d คือ ความหนาของชั้น Si_3N_4

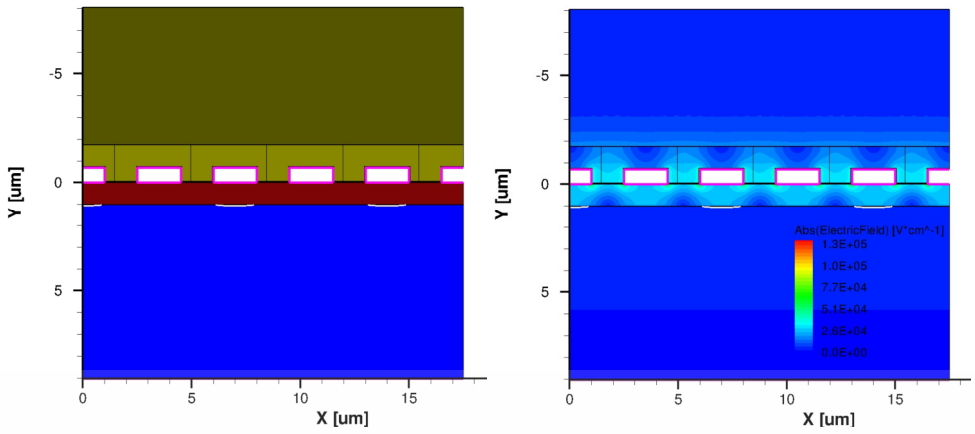
ที่ความหนาของชั้น Si_3N_4 มากกว่า 3000 nm ค่าความจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้นน้อยมากเมื่อความหนาของชั้น Si_3N_4 เพิ่มขึ้น และมีแนวโน้มที่จะเข้าหาค่าใดค่าหนึ่ง สาเหตุเนื่องมาจาก สนามไฟฟ้าจะมีความหนาแน่นที่บริเวณใกล้ขั้วโลหะเท่านั้น จากรูปที่ 4.10 จะเห็นได้ว่าที่ระยะห่างจากขั้วมากกว่า 3 μm ค่าสนามไฟฟ้ามีค่าเข้าใกล้ศูนย์และเปลี่ยนแปลงน้อยมาก จากกราฟด้านขวาเราจะเห็นว่าค่าที่ได้จากการจำลอง และจากการวัดจริงมีค่าใกล้เคียงกัน แล้วมีแนวโน้มความสัมพันธ์เป็นแบบเส้นตรงเหมือนกัน โดยค่าความชันจากการวัดอยู่ที่ 4.2×10^{-14} Farad/m ซึ่งความคลาดเคลื่อนของค่าจากการจำลองจากค่านี้อยู่ที่ 21 %

4.1.3 หลังทำการบรรจุภัณฑ์ (Packaging)

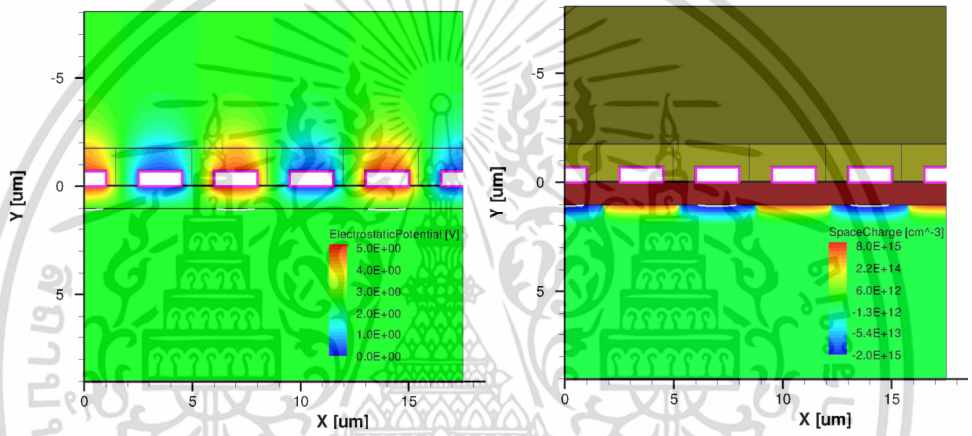
4.1.3.1 โครงสร้างและสมบัติทางไฟฟ้า

อุปกรณ์วัดความชื้นที่ได้จากการจำลองโดยโปรแกรม SDE Sdevice และแสดงผลโดยโปรแกรม Tecplot SV มีลักษณะโครงสร้าง และสมบัติทางไฟฟ้า ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 โครงสร้างของอุปกรณ์วัดความชื้นขนาด 5 เซลล์ (ซ้าย) และสนามไฟฟ้า (ขวา)



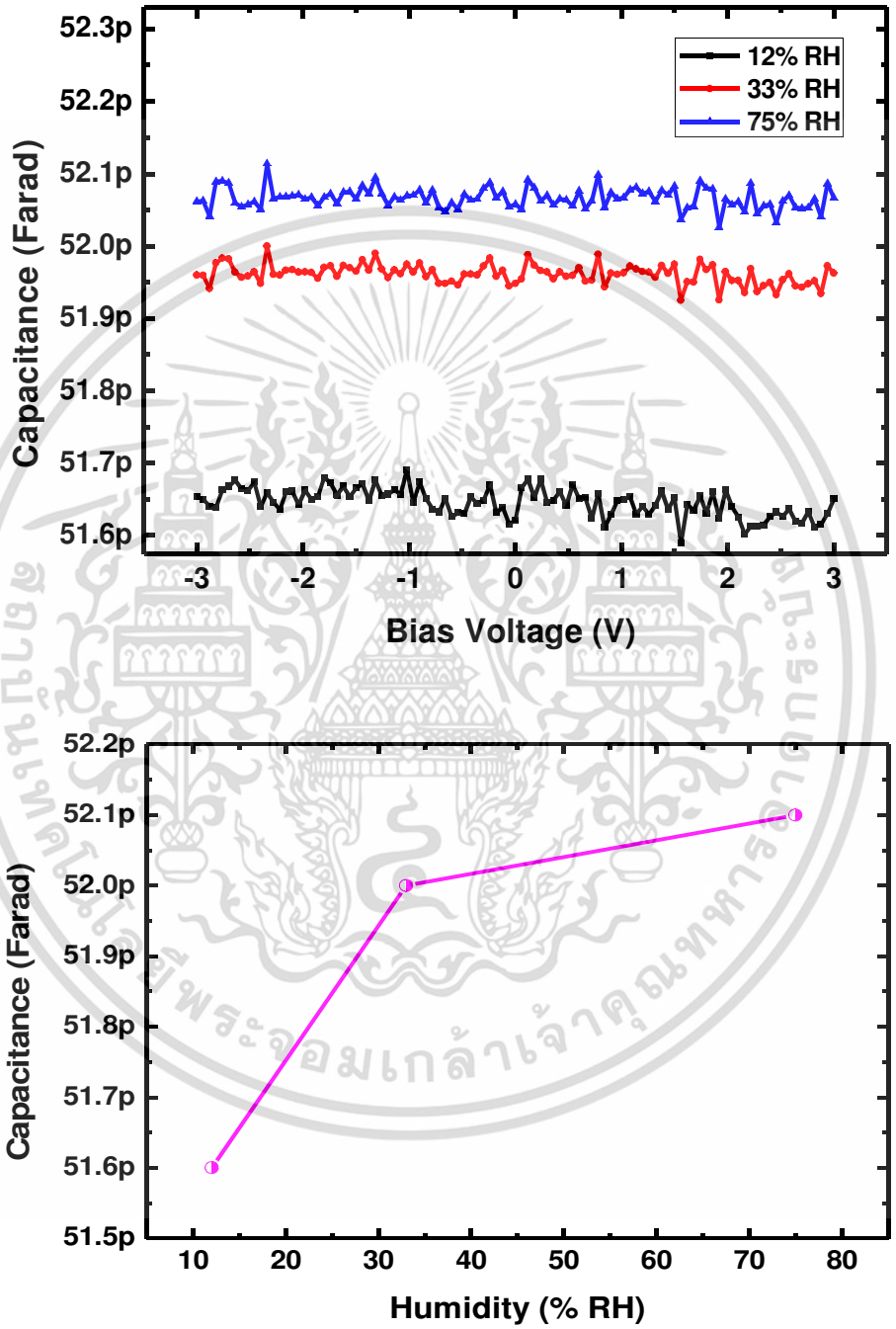
รูปที่ 4.12 ความหนาแน่นของศักย์ไฟฟ้า (ซ้าย) และSpace Charge (ขวา)

คุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์วัดความชื้นหลังทำการบรรจุภัณฑ์มีคุณสมบัติคล้ายกับก่อนทำการบรรจุภัณฑ์ โดยสนามไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าจะหนาแน่นที่บริเวณใกล้กับขั้วไฟฟ้า แต่รูปร่างของสนามไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าภายในชั้น Polymer จะแตกต่างออกไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.4 ข้อมูลการวัดค่าความจุไฟฟ้าของอุปกรณ์

4.1.4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศกับค่าความจุไฟฟ้า



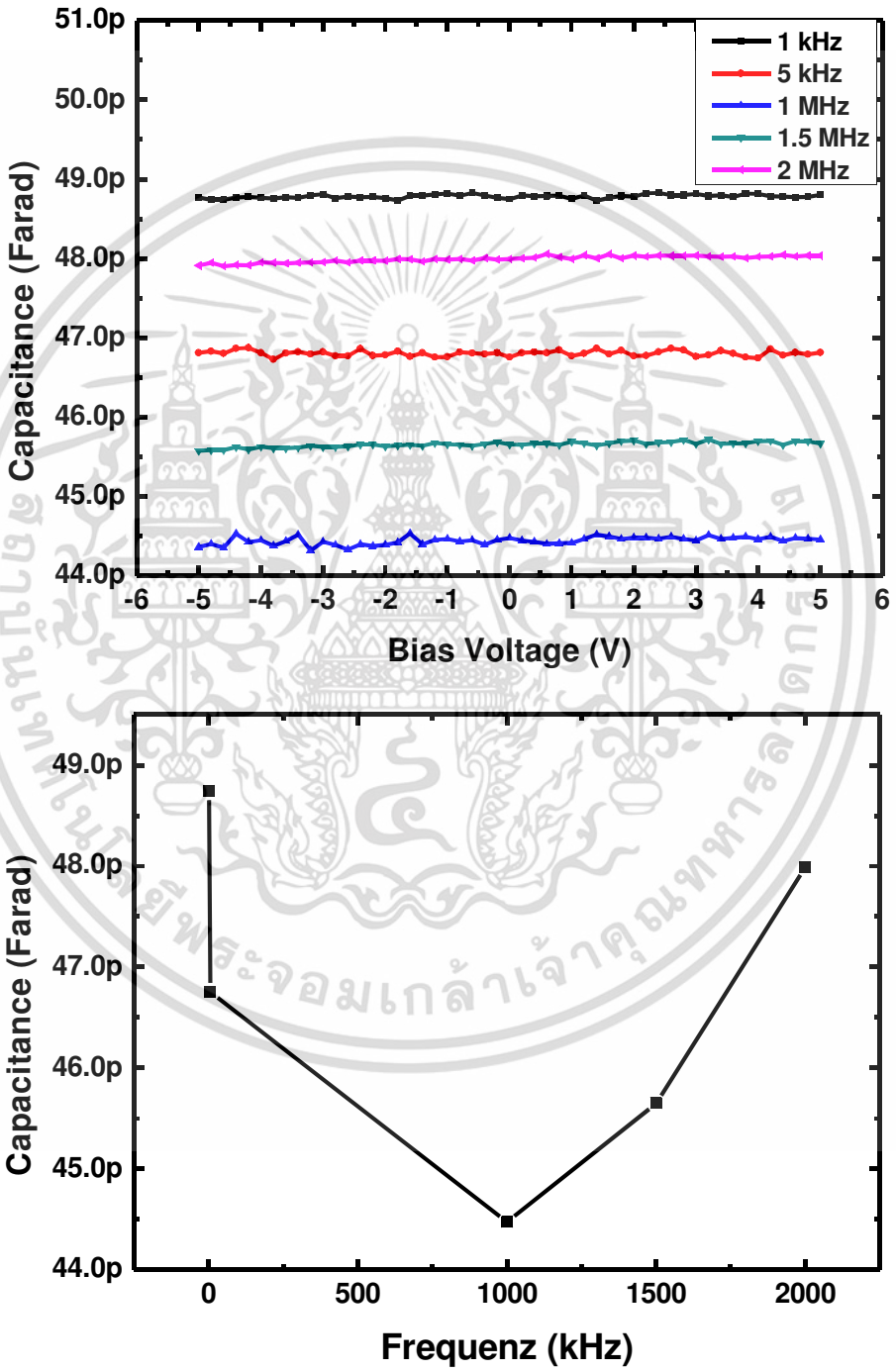
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศกับค่าความจุไฟฟ้า

จากรูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศกับค่าความจุไฟฟ้าจากการวัดโดยการใช้ค่าความชื้นมาตรฐาน 3 ความชื้น คือ 12 %RH, 33 %RH, และ 75 %RH

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟจะเห็นว่าเมื่อค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเพิ่มขึ้นค่าความจุไฟฟ้าก็จะเพิ่มขึ้นด้วยแต่มีลักษณะไม่เป็นเส้นตรง ซึ่งเราไม่ทราบแน่ชัดว่าข้อมูลที่ได้จากการวัดมีความคลาดเคลื่อนมากน้อยเพียงใด และมีความน่าเชื่อถือมากน้อยเพียงใดเพราะเป็นข้อมูลเก่า จากแนวโน้มเราสามารถประมาณค่าความเก็บประจุ ที่ความชื้นอากาศปกติ 50 %RH ได้ประมาณ 52.0 pF

4.1.4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ที่ใช้ในการวัดกับค่าความจุไฟฟ้า



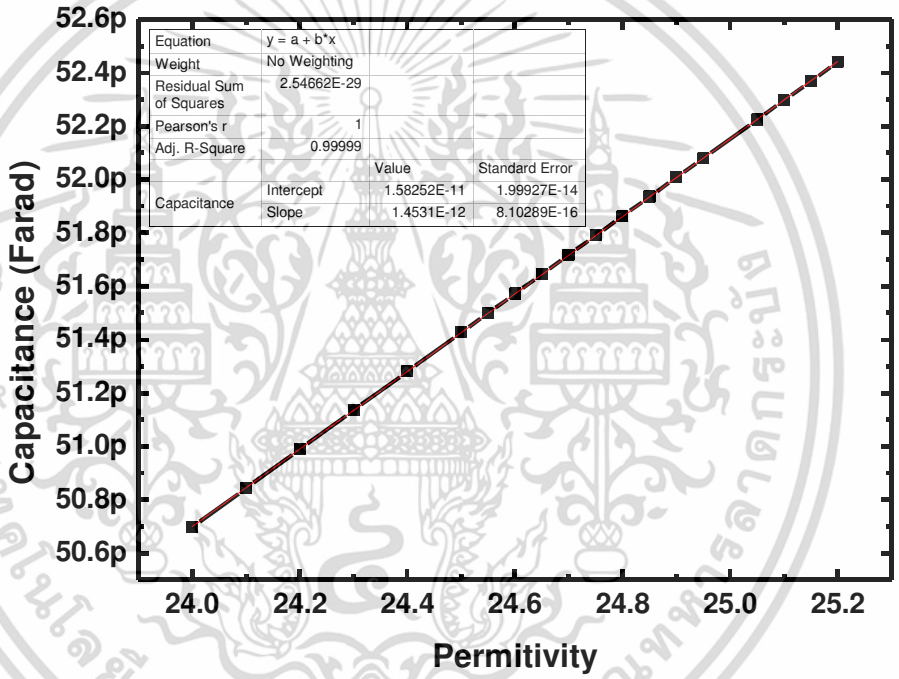
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถี่กับค่าความจุไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถี่กับค่าความจุไฟฟ้า จะเห็นได้ว่าค่าความจุไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปเมื่อความถี่เกิดการเปลี่ยนแปลง โดยสาเหตุเนื่องมาจากค่า Permittivity ของวัสดุต่างๆ เปลี่ยนแปลงไปขึ้นอยู่กับความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และอีกเหตุผลคือการเปลี่ยนค่า C เนื่องจากค่าความจุไฟฟ้าของ MOS (Metal - Oxide -Semiconductor) แต่เนื่องจากการจำลองด้วยโปรแกรมนี้ ไม่สามารถทำการจำลองในลักษณะดังกล่าวได้ ทำให้เราไม่สามารถเปรียบเทียบข้อมูลได้

4.1.5 การจำลองหาค่าความจุไฟฟ้า และความสัมพันธ์กับความชื้นสัมพัทธ์

4.1.5.1 หาค่า Permittivity ของ Polymer โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Permittivity ของ Polymer กับค่าความจุไฟฟ้า



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Permittivity ของ Polymer กับค่าความจุไฟฟ้า

จากรูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Permittivity ของ Polymer กับค่าความจุไฟฟ้า เราจะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า Permittivity ของ Polymer กับค่าความจุไฟฟ้าเป็นไปในลักษณะเส้นตรงบรรยายด้วยสมการ

$$C = 1.45\times10^{-12} * \varepsilon_{r,Polymer} + 1.58\times10^{-11} \quad (12)$$

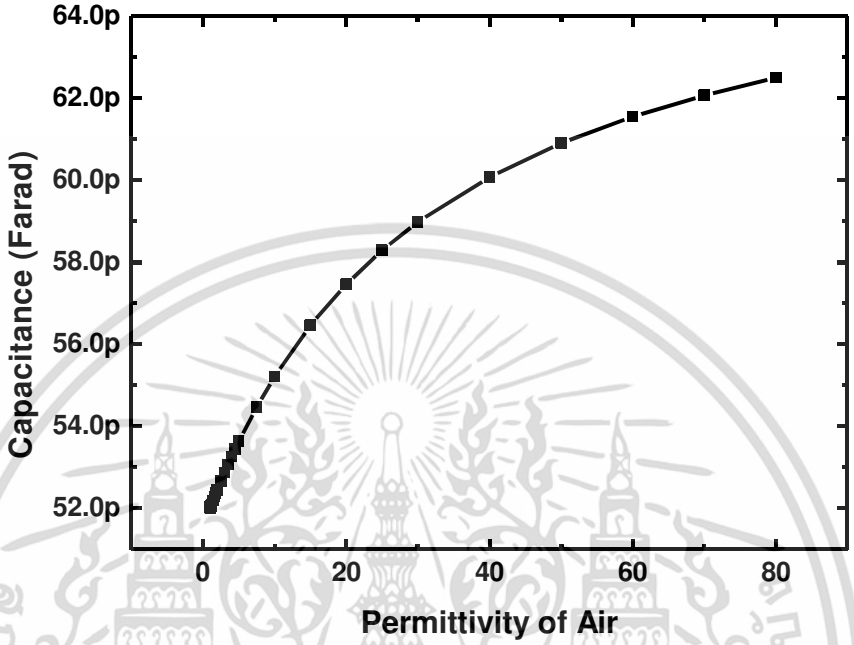
เมื่อ C คือ ค่าความจุไฟฟ้าของเซลล์รวม (Capacitance)

$\varepsilon_{r,Polymer}$ คือ ค่า Permittivity ของ Polymer

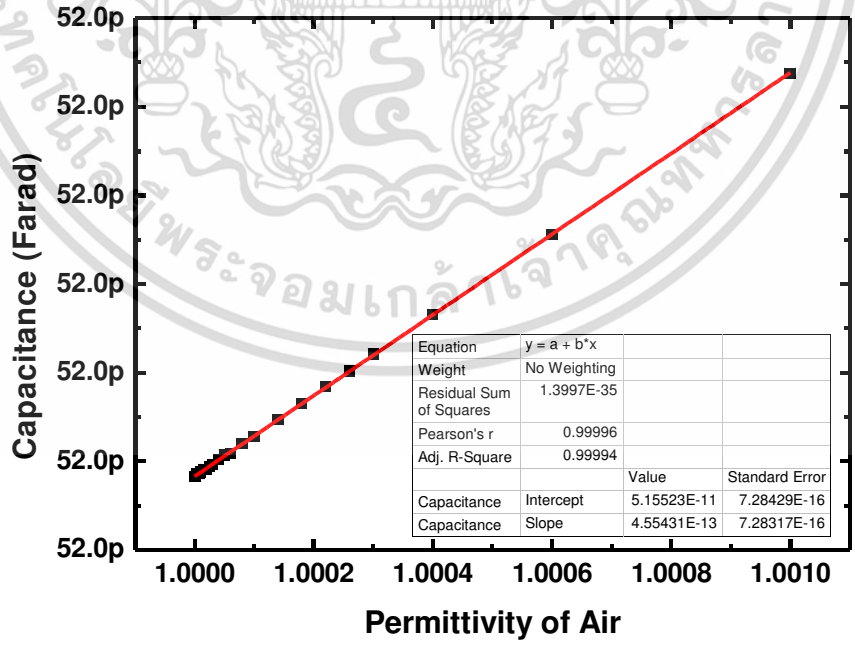
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 12 เมื่อเรารู้ค่าของ C = 52 pF ที่ความชื้นอากาศ 50 %RH สามารถหาค่า Permittivity ของ Polymer ได้ $\varepsilon_{r,Polymer}$ = 24.9

4.1.5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับค่า Permittivity ของอากาศ



ช่วง ε_r = 1 – 80,



ช่วง ε_r = 1 – 1.001

รูปที่ 4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Permittivity ของอากาศกับค่าความจุไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟที่ 4.16 เราจะเห็นได้ว่าในช่วงที่ค่า Permittivity ของอากาศสูง $\varepsilon_{r,air} > 10$ ความสัมพันธ์ระหว่าง Permittivity ของอากาศกับค่าความจุไฟฟ้า ไม่เป็นแบบเส้นตรง แต่ที่ค่า Permittivity ต่ำ ช่วง $\varepsilon_{r,air} = 1 - 1.001$ ระหว่าง Permittivity ของอากาศกับค่าความจุไฟฟ้าเป็นแบบเส้นตรงบรรยายด้วยสมการ

$$C = 4.55\times10^{-12} * \varepsilon_{r,air} + 5.16\times10^{-11} \quad (13)$$

เมื่อ C คือ ค่าความจุไฟฟ้าของเซลล์รวม (Capacitance)

$\varepsilon_{r,air}$ คือ Relative Permittivity ของอากาศ

จากความชันของกราฟ จะได้ค่า $\frac{dC}{d\varepsilon_r} = 4.55\times10^{-12}$ Farad

ถ้าเราสมมติว่าความสัมพันธ์ระหว่าง %RH ของอากาศ กับ ความจุไฟฟ้า C สามารถบรรยายโดยสมการ

$$\frac{dC}{d(\%RH)} = \frac{dC}{d\varepsilon_{r,air}} \cdot \frac{d\varepsilon_r}{d(\%RH)} \quad (14)$$

จากค่า $\frac{dC}{d\varepsilon_r} = 4.55\times10^{-12}$ Farad

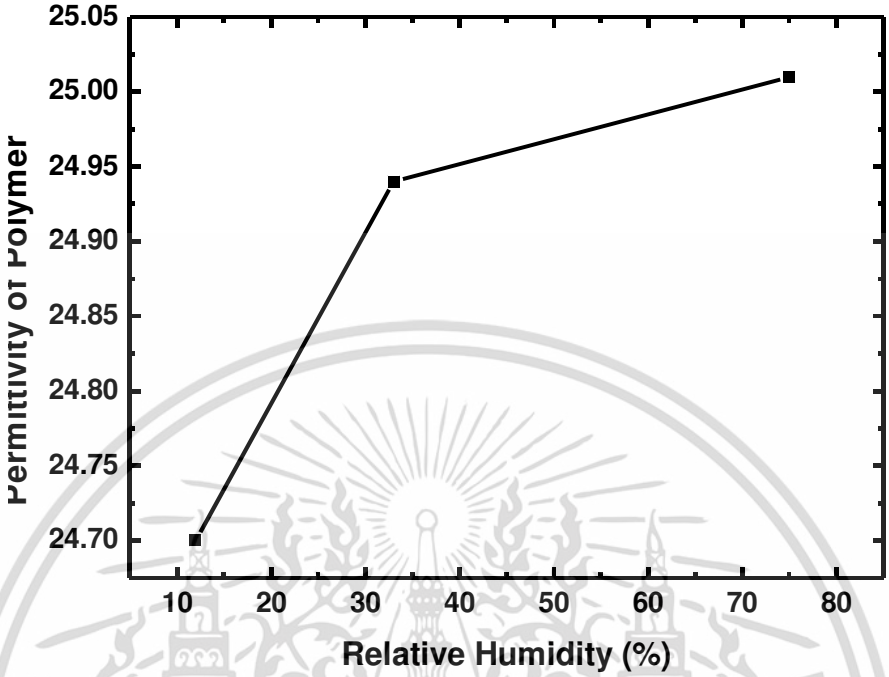
และ $\frac{d\varepsilon_r}{d(\%RH)} = 1.97\times10^{-6}$ $\%RH^{-1}$

จะได้ $\frac{dC}{d(\%RH)} = \frac{dC}{d\varepsilon_{r,air}} \cdot \frac{d\varepsilon_r}{d(\%RH)} = 8.96\times10^{-18} \frac{Farad}{\%RH}$

จะเห็นว่าค่า $\frac{d\varepsilon_r}{d(\%RH)}$ ที่ได้นั้นมาค่าน้อยมาก ยกตัวอย่างเช่น เมื่อความชื้นสัมพัทธ์ เปลี่ยนแปลงไป 100 %RH ค่าความจุไฟฟ้าจะเปลี่ยนไป 8.96×10^{-16} Farad หรือประมาณ 8.96×10^{-4} pF ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับกราฟที่ 4 พบว่าค่าต่างกันมาก ดังนั้นเราจึงอาจสรุปได้ว่า การเปลี่ยนแปลงของค่า $\varepsilon_{r,air}$ เพียงอย่างเดียวไม่สามารถทำให้ค่าความจุไฟฟ้าเปลี่ยนไปมากเหมือนดังกราฟที่ 4.16 แสดงว่าการเปลี่ยนไปของค่าความชื้นในอากาศไม่ได้ส่งผลต่อ $\varepsilon_{r,air}$ เพียงอย่างเดียวแต่ต้องส่งผลกับตัวแปรอื่นที่มีผลต่อค่าความจุไฟฟ้า สมมุติฐานของเราคือการเปลี่ยนแปลงความชื้นในอากาศส่งผลต่อค่า Permittivity ของ Polymer เมื่อเราลอง plot กราฟระหว่างค่า %RH ของอากาศกับ Permittivity

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของ Polymer โดยใช้ค่าความจุไฟฟ้า จากกราฟที่ 4.16 และสมการที่ 12 ในการหาค่า $\varepsilon_{r,Polymer}$ จะได้กราฟ



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Permittivity ของ Polymer กับค่า %RH ของอากาศ

จากรูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Permittivity ของ Polymer กับค่า %RH ของอากาศ จะเห็นได้ว่าในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ระหว่าง 12 %RH – 75 %RH ค่า $\varepsilon_{r,Polymer}$ เปลี่ยนแปลงไปโดยมีค่าอยู่ระหว่าง 24.7 – 25 โดยความกว้างของช่วงที่เปลี่ยนแปลงสอดคล้องกับ Polymer ที่ใช้เป็นตัวดูดซับความชื้นในท้องตลาด เช่น สาร Polyimide มีค่า $\varepsilon_{r,Polymer}$ อยู่ระหว่าง 3.2 – 4.0 ในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ระหว่าง 0 – 100 % แต่ค่า $\varepsilon_{r,Polymer}$ ที่เราหาได้มีค่าค่อนข้างสูง หาเหตุอาจจะเนื่องมาจากการที่เราไม่ทราบความหนาที่แท้จริงของชั้น Polymer

สรุปการจำลองได้ดังนี้ จำลองการทำงานของอุปกรณ์วัดความชื้นใช้หลักการ การเปลี่ยนแปลงของค่าความจุไฟฟ้า โดยเปลี่ยนแปลงค่าของระยะห่างระหว่างขั้วโลหะ และขนาดพื้นที่ของโลหะการจำลองการทำงานของอุปกรณ์วัดความชื้น พบค่าความเข้มสนามไฟฟ้า ขนาดของศักย์ไฟฟ้า การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและโฮล สอดคล้องเป็นไปตามทฤฎีของตัวเก็บประจุ สามารถเป็นแนวทางในการออกแบบได้ ค่าความจุไฟฟ้าของอุปกรณ์วัดความชื้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ค่า Permittivity ของวัสดุต่างๆ ความถี่ที่ใช้วัด ศักย์ไฟฟ้าที่ไบอัสที่ขั้ว ฯลฯ การเปลี่ยนไปของค่าความชื้นต้องส่งผลกับตัวแปรอื่นอีก ที่มีผลต่อค่าความจุไฟฟ้า ที่มีความเป็นไปได้มากที่สุดคือค่า Permittivity ของ Polymer และ Polymer อาจจะทำหน้าที่เป็นตัวดูดซับความชื้นซึ่งทำให้ค่า Permittivity ของมันเปลี่ยนไป ซึ่งส่งผลหลักต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความจุไฟฟ้าของอุปกรณ์วัดความชื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลการทดสอบความสัมพันธ์ของ พื้นที่ของตัวเก็บประจุ และ ความหนาของชั้นไดอิเล็กทริก ที่ขั้นกลางระหว่างขั้วตัวนำไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ

จากกระบวนการสร้างเสร็จสมบรูณ์แล้ววัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า (Fabrication) และการจำลองโครงสร้าง การทำงานของตัวเก็บประจุ (Simulation) ได้ผลดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลของการจำลอง พารามิเตอร์ต่างๆ ในการออกแบบ

การออกแบบ	ความกว้างขั้วอิเล็กโทรด (A)	ระยะห่างขั้วอิเล็กโทรด (d)	ค่าความจุไฟฟ้าจากการวัด (C) pF	ค่าความจุไฟฟ้าจากการจำลอง (C) pF
1	1 μm	1 μm	0.67	1.67
2	1 μm	2 μm	0.22	0.84
3	1 μm	4 μm	0.067	0.45
4	5 μm	1 μm	11.2	1.14
5	5 μm	2 μm	4.71	0.85
6	5 μm	4 μm	1.81	0.60
7	10 μm	1 μm	1.2	0.98
8	10 μm	2 μm	0.54	0.84
9	10 μm	4 μm	0.23	0.69
10	15 μm	1 μm	1.12	0.92
11	15 μm	2 μm	0.58	0.82
12	15 μm	4 μm	0.26	0.71

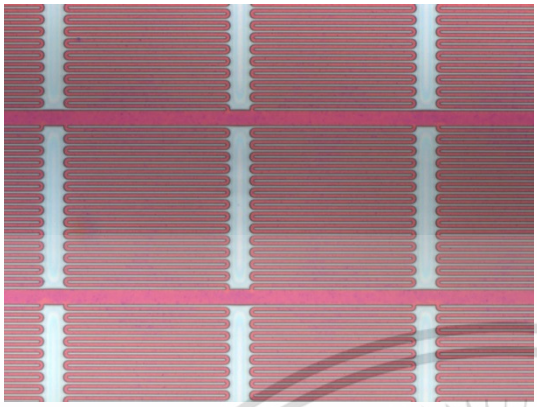
จากตารางที่ 4.1 แสดงค่าตัวเก็บประจุที่เกิดจากความสัมพันธ์ของ พื้นที่ซึ่งก็คือผลคูณของความกว้างของขั้วอิเล็กโทรดกับความลึกของชั้นโลหะ (690 μm) ที่กัดให้เกิดเป็นขั้วโลหะ หารด้วยความหนาของชั้นไดอิเล็กทริกซึ่งก็คือ ระยะห่างระหว่างขั้นอิเล็คโทรด ผลการวัดค่าความจุไฟฟ้าหลังการสร้างเสร็จและจากการจำลองโครงสร้างตัวเก็บประจุพบว่า มีแนวโน้มที่เป็นไปแนวเดียวกัน คือ เมื่อพื่นที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้ค่าความจุไฟฟ้ามากขึ้นด้วย แต่ในทางกลับกันเมื่อระยะห่างระหว่างขั้วมากขึ้นจะทำให้ค่าความจุไฟฟ้าน้อยลง จะเห็นว่าค่าที่เหมาะสมในกระบวนการสร้างที่จะนำไปสร้างเซ็นเซอร์วัดความชื้นแบบตัวเก็บประจุ คือ ความกว้างของขั้วอิเล็กโทรด 5 μm และระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 1 μm ให้ค่าความจุมากที่สุด 11.2 pF

4.3 ผลการออกแบบ และสร้างอุปกรณ์วัดความชื้นแบบตัวเก็บประจุ

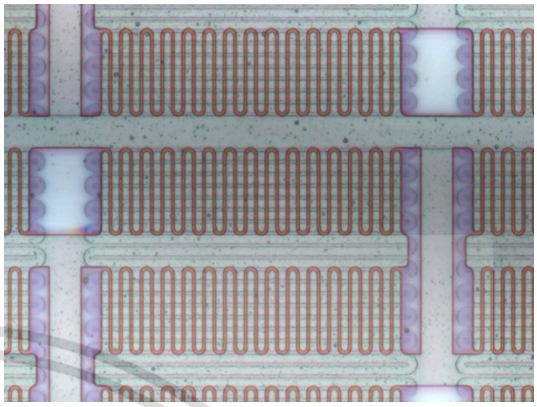
รูปที่ 4.18 แสดงชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการสร้างเสร็จสิ้นแล้ว อุปกรณ์ตรวจวัดความชื้นแบบตัวเก็บประจุ ในหนึ่งแผ่นเวเฟอร์ที่สร้างมีจำนวน 1,500 ชิ้น ผลการวัดความจุไฟฟ้าของหัววัดความชื้นบนเวเฟอร์ ทำการวัดค่าความจุไฟฟ้าของหัววัดความชื้นบนเวเฟอร์ โดยการสุ่มทดสอบหัววัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

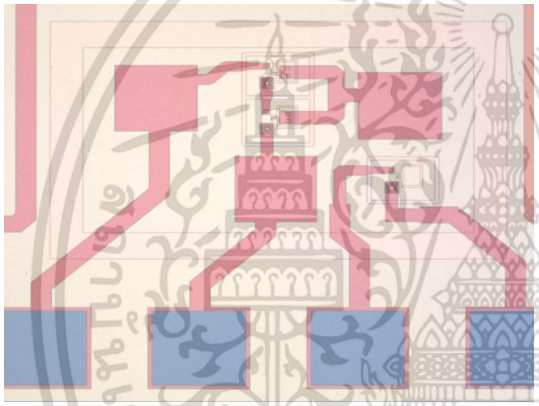
ความชื้นทั้งหมด 150 ชิ้นงาน บนแผ่นเวเฟอร์จากทั้งหมด 1500 ชิ้นงาน คิดเป็น 10 % พบว่า มีเปอร์เซ็นดี 98 % หรือ ดี 147 ชิ้นงาน



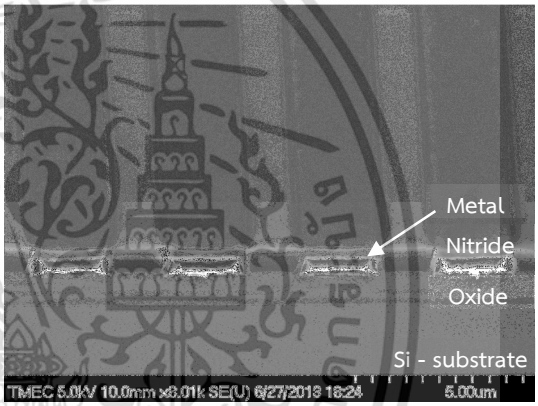
(ก)



(ข)



(ค)

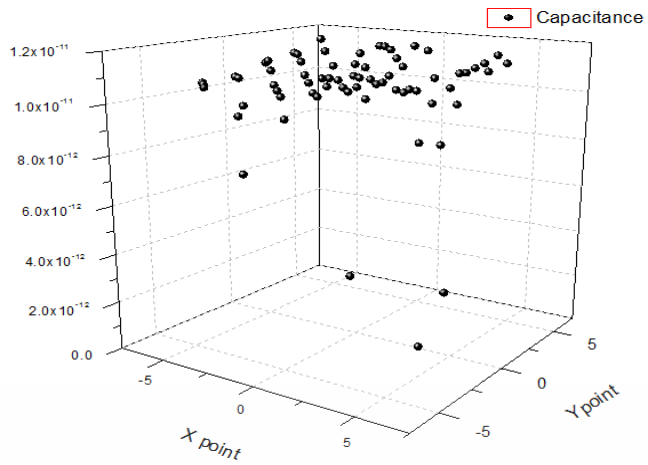


(ง)

รูปที่ 4.18 ชิ้นงานที่สร้างเสร็จสมบูรณ์
(ก) ส่วนของโครงสร้างฮีเตอร์ (Heater)
(ข) เซนเซอร์วัดความชื้นที่สร้างบนฮีตเตอร์
(ค) เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ
(ง) ภาพตัดขวางของเซนเซอร์วัดความชื้นแบบตัวเก็บประจุ

รูปที่ 4.19 ชิ้นงานที่ผ่านการบรรจุภัณฑ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 ผลการวัดค่าความจุไฟฟ้าของแต่ละตำแหน่ง

จากรูปที่ 4.20 แสดงผลการวัดค่าความจุไฟฟ้าของแต่ละตำแหน่ง จะเห็นว่าค่าความจุไฟฟ้าของหัววัดความชื้น ที่ทำการสุ่มทดสอบทั่วแผ่นเวเฟอร์คิดเป็น 10% พบว่ามีค่าใกล้เคียงกันทั่วทั้งแผ่นเวเฟอร์ โดยมีค่าเฉลี่ยความจุไฟฟ้าที่ 10.9 pF ซึ่งจะใช้เป็นค่ามาตรฐานในการเปรียบเทียบความจุไฟฟ้าของหัววัดความชื้นทั้งหมดในแผ่นเวเฟอร์

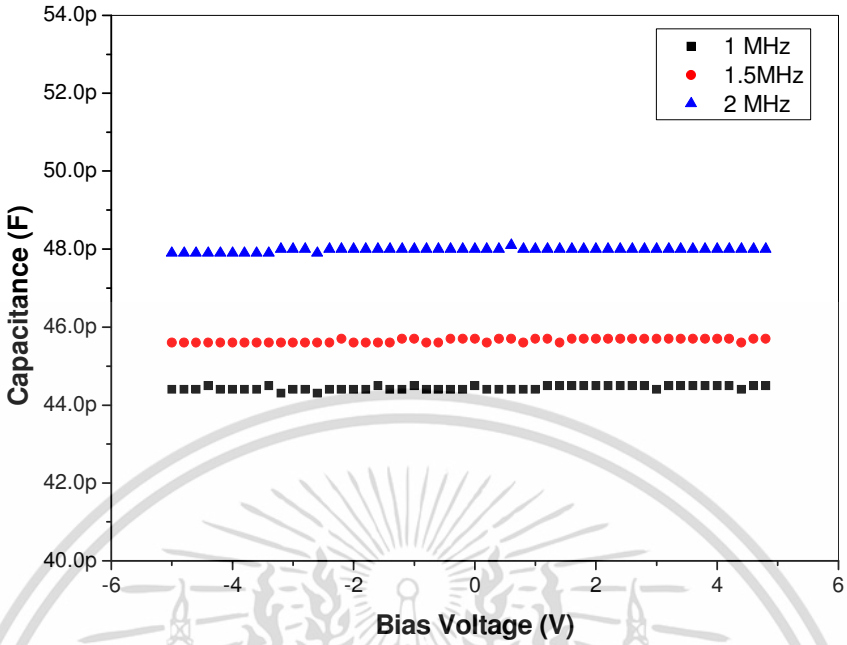
4.4 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์วัดความชื้นแบบตัวเก็บประจุ

ภายหลังจากการสร้างอุปกรณ์แล้ว เป็นการทดสอบลักษณะสมบัติของอุปกรณ์โดยการวัดลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าเบื้องต้นด้วยเครื่อง Agilent B1500A Semiconductor Device Analyzer วัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเครื่องโพรบสเตชั่น จากนั้นนำแผ่นไปทำการตัดแบ่งอุปกรณ์แต่ละตัว และนำชิพไปเชื่อมต่อสาย IC ด้วยลวดทองคำแล้วก็นำไปทำการบรรจุภัณฑ์แสดงดังรูป 4.19 สำหรับนำไปใช้งานต่อไป นำอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้นมาวัดกระแส, แรงดันและความจุไฟฟ้า ซึ่งจะทำการต่ออุปกรณ์ โดยเครื่องมือประกอบด้วยหัวเข็มวัดชิ้นงาน (Probe Station) ต่อกับ Precision Semiconductor Parameter Analyzer ซึ่งทำหน้าที่วัดกระแส, แรงดัน และความจุไฟฟ้า โดยควบคุมการทำงาน และบันทึกผลด้วยโปแกรม Easy Expert วัดคุณสมบัติความจุไฟฟ้า และแรงดันของหัววัดความชื้นที่ค่าความถี่ไฟฟ้าต่างๆ

4.4.1 ผลการวัดลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า – ความถี่

การวัดคุณสมบัติความจุไฟฟ้า และแรงดันของหัววัดความชื้นที่ค่าความถี่ไฟฟ้าต่างๆ นำเซนเซอร์วัดความชื้นแบบตัวเก็บประจุ มาวัดความถี่ซึ่งมีค่าตั้งแต่ 1 MHz, 1.5 MHz และ 2 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



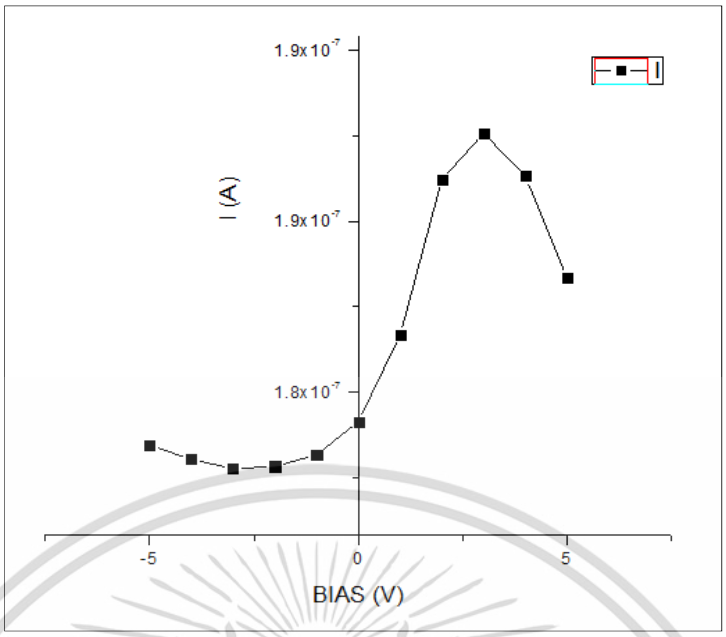
รูปที่ 4.21 ผลของค่าความจุไฟฟ้าและแรงดันที่ความถี่ไฟฟ้า 1 MHz, 1.5 MHz และ 2 MHz

จากรูปที่ 4.21 กราฟแสดงผลของค่าความจุไฟฟ้าและแรงดันที่ความถี่ไฟฟ้า 1 MHz, 1.5 MHz และ 2 MHz จะพบว่าความจุไฟฟ้าจะมีค่าคงที่ในทุกๆแรงดัน โดยแรงดันที่ป้อนให้เป็นแรงดันไบอัสช่วง บวก และลบ เมื่อเพิ่มความถี่ไฟฟ้าจะเห็นว่าค่าความจุไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าความถี่ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากในตัวเครื่องวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้านอกจากตัวเก็บประจุแล้วยังมีขดลวดเหนี่ยวนำต่อร่วมอยู่ด้วย จึงเป็นเหตุทำให้กระแสไฟฟ้าป้อนกลับจากเครื่องวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้ามีค่าเปลี่ยนแปลงตามค่าความถี่ไฟฟ้า โดยจากการวัดที่ค่าความถี่ 1 MHz, 1.5 MHz และ 2 MHz จะมีค่าความจุไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 44.4 pF , 45.6 pF และ 47.9 pF ตามลำดับ

4.4.2 ผลการวัดลักษณะสมบัติกระแส - แรงดันไฟฟ้า

นำเซนเซอร์วัดความชื้นแบบตัวเก็บประจุ ทดสอบลักษณะสมบัติกระแส - แรงดัน เมื่อได้รับแรงดันไบอัสตรงและไบอัสย้อนกลับ ที่ -5 V ถึง +5 V แสดงให้เห็นถึงเซนเซอร์ที่ทำการออกแบบและสร้างสามารถทำงานในลักษณะเก็บประจุ และคายประจุได้ ใช้กระแสในช่วง 0.17 μm - 0.19 μA ซึ่งผลแสดงดังรูปที่ 4.22

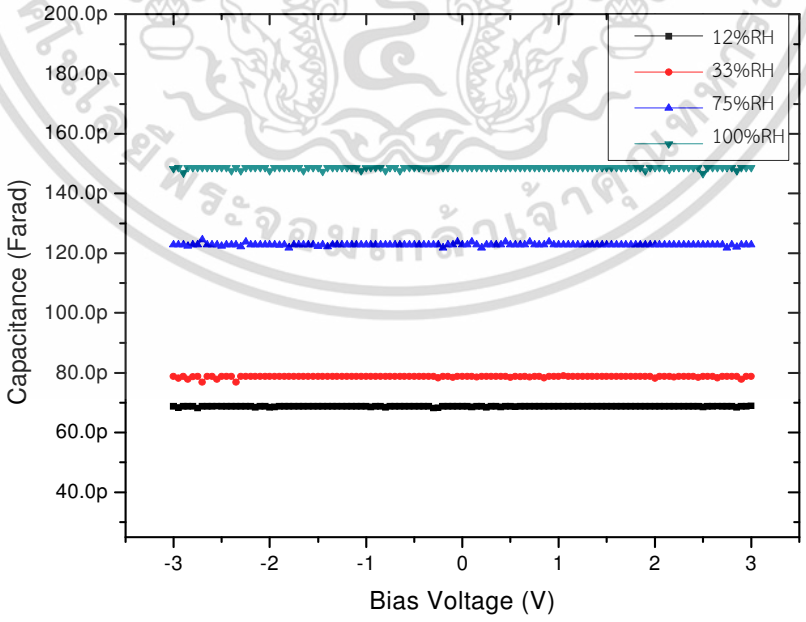
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 ลักษณะ กระแส - แรงดัน เมื่อได้รับแรงดันไบอัสตรงและไบอัสย้อนกลับ ที่ -5V ถึง +5V

4.4.3. ผลการวัดคุณสมบัติการตอบสนองของหัววัดความชื้น

หลังจากวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเครื่องโพรบสเตชั่น จากนั้นนำแผ่นไปทำการตัดแบ่งอุปกรณ์แต่ละตัวออกจากกัน และนำชิพไปเชื่อมต่อสาย IC ด้วยลวดทองคำแล้วก็นำไปทำการบรรจุภัณฑ์สำหรับนำไปใช้งานต่อไป ทดสอบหัววัดความชื้นด้วยชุดทดสอบค่าความชื้นมาตรฐานที่ความชื้นในอากาศเท่ากับ 12 %RH, 33 %RH, 75 %RH และ 100 %RH



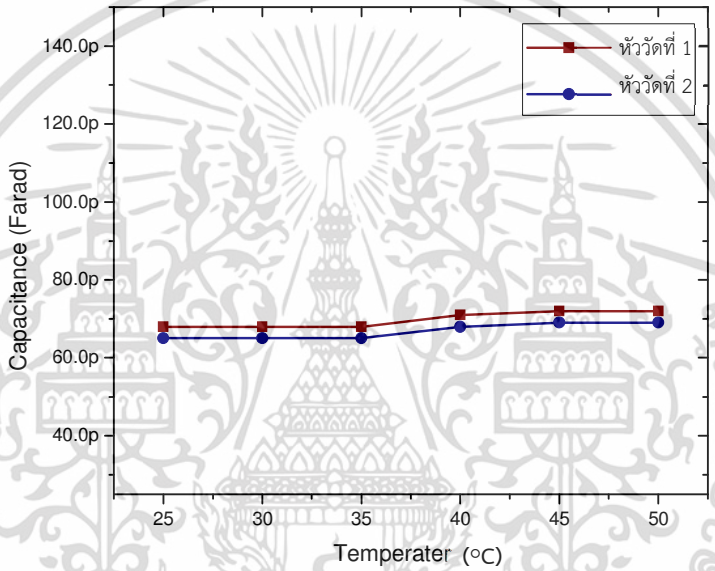
รูปที่ 4.23 ผลของค่าความจุไฟฟ้า และแรงดันที่ค่าความชื้นมาตรฐานต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.23 เป็นการสุ่มตัวอย่าง 10 % มาทดสอบ ผลของค่าความจุไฟฟ้า และแรงดันที่ค่าความชื้นมาตรฐานต่างๆ พบว่าที่ความชื้นในอากาศเท่ากับ 12 %RH, 33 %RH, 75 %RH และ 100 %RH ความจุไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นตามความชื้นในอากาศโดยที่ความชื้นที่ได้มีค่าความจุไฟฟ้าได้เฉลี่ย 67.7 pF, 78.5 pF, 122.7 pF และ 142.8 pF ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเซนเซอร์ความชื้นแบบตัวเก็บประจุที่ทำการสร้างมีการตอบสนองต่อความชื้นอากาศได้

4.4.4. ผลการวัดคุณสมบัติการตอบสนองต่ออุณหภูมิ

วัดคุณสมบัติความจุไฟฟ้าของหัววัดความชื้นที่อุณหภูมิต่างๆ นำอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้นมาวัดที่ค่าอุณหภูมิตั้งแต่ 25 °C – 50 °C

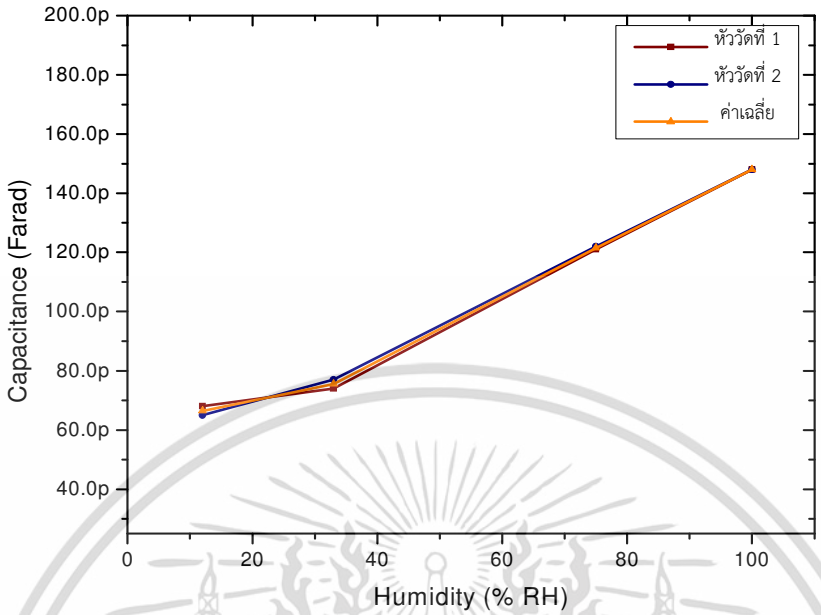


รูปที่ 4.24 ผลของค่าความจุไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ

จากรูปที่ 4.24 แสดงผลของค่าความจุไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ เป็นการทดสอบหัววัดความชื้นแบบตัวเก็บประจุโดยการสุ่มตัวอย่างชิ้นงานนำมาทดสอบที่ความชื้นมาตรฐาน 75 %RH ที่อุณหภูมิระหว่าง 25 °C – 50 °C ค่าความจุไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยที่ 4 pF โดยจากการวัดพบว่าค่าความจุไฟฟ้ามีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อย อันเนื่องมากจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะมีส่วนที่สามารถระเหยเป็นไอ จากไอส่วนนี้เองที่ทำให้หัววัดความชื้นอ่านค่าคลาดเคลื่อนไปเล็กน้อย จึงสรุปได้ว่าค่าความจุไฟฟ้าของหัววัดความชื้นที่ผลิตจะไม่แปรผันตามอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.5. ค่าความไวในการตอบสนองของเซนเซอร์วัดความชื้นในอากาศ



รูปที่ 4.25 ความไวในการตอบสนองต่อความชื้นของเซนเซอร์

จากรูปที่ 4.25 กราฟแสดงความไวในการตอบสนองต่อความชื้นของเซนเซอร์ เป็นการทดสอบความไวในการตอบสนองต่อความชื้นของเซนเซอร์วัดความชื้นแบบตัวเก็บประจุ โดยการสุ่มตัวอย่างชิ้นงานนำมาทดสอบที่ความชื้นมาตรฐาน 12 %RH - 100 %RH ที่อุณหภูมิ 25 °C การวิเคราะห์ความไวในการตอบสนอง พิจารณาตามลักษณะช่วงการตอบสนองของอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้นโดยใช้สมการ 2.12 ในการคำนวณหาความไวในการตอบสนองต่อความชื้นมาตรฐาน พบว่าหัววัดความชื้นมีความไวในการตอบสนองที่ 1 pF/%RH

4.4.6. ค่าฮีสเตอร์รีซีสของเซนเซอร์วัดความชื้นในอากาศแบบตัวเก็บประจุ

ค่าฮิสเตอร์รีซิสเป็นคุณสมบัติที่แสดงความสามารถในการวัดซ้ำได้ของเซนเซอร์วัดความชื้นในอากาศแบบตัวเก็บประจุ ตลอดย่านการทำงานที่ความชื้นมาตรฐาน 12 %RH - 100 %RH ที่อุณหภูมิ 25 °C ซึ่งวัดทดสอบกับความดันไปและกลับหนึ่งรอบครึ่งโดยใช้ตำแหน่งที่มีค่าต่างกันมากที่สุดเพื่อนำมาวิเคราะห์ผล แสดงดังตารางที่ 4.3 โดยใช้สมการในการคำนวนค่าดังนี้

$$Hysteresis\ (\%) = [\frac{O_{forward\ 1st} - O_{forward\ 2nd}\ or\ O_{forward\ 1st} - O_{reverse\ 1st}}{V_{FS} - V_{OS}}]_{\max} x100\%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ค่าฮิสเตอร์รีซิสของเซนเซอร์วัดความชื้นในอากาศแบบตัวเก็บประจุ

ช่วงการตอบสนอง	ค่าฮิสเตอร์รีซิส (%FSO)			
	หัววัดที่ 1	หัววัดที่ 2	หัววัดที่ 3	ค่าเฉลี่ย
12 %RH – 33 %RH	0.987	0.998	0.997	0.994
33 %RH – 75 %RH	0.436	0.452	0.421	0.436
75 %RH – 100 %RH	0.314	0.322	0.323	0.319

จากตารางที่ 4.3 แสดงค่าฮิสเตอร์รีซิสของเซนเซอร์วัดความชื้นในอากาศแบบตัวเก็บประจุ จากการคำนวณหาค่าฮิตเตอร์รีซิส สามารถวิเคราะห์ผลที่ได้พบว่า ตลอดช่วงค่าการตอบสนองเต็มสเกล (Full scale Output) 12 %RH - 100 %RH ของเซนเซอร์วัดความชื้นแบบตัวเก็บประจุในอากาศมาตรฐาน ความผิดพลาดจากค่าฮิสเตอร์รีซิส มีค่าเฉลี่ยไม่เกิน 1 %FSO โดยค่าฮิสเตอร์ริซิสที่มากสุดในช่วงการทดสอบ 12 %RH - 33 %RH มีค่าเท่ากับ 0.994 %FSO จากผลการทดสอบแสดงถึงความสามารถในการวัดซ้ำของเซนเซอร์วัดความชื้นแบบตัวเก็บประจุในอากาศว่ามีเสถียรภาพสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยทั้งหมดที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ มีเนื้อหาที่สอดคล้องกับความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษาที่ได้กำหนดไว้ ซึ่งเป็นการศึกษาเกี่ยวกับการออกแบบ และกระบวนการสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้นแบบตัวเก็บประจุ ที่มีโครงสร้างแบบซี่หวี โดยใช้กระบวนการสร้างบนพื้นฐานเทคโนโลยีกการผลิตวงจรรวมแบบซีมอส สามารถสรุปได้ดังนี้

1. จากการทดสอบการจำลองการสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้นแบบตัวเก็บประจุ ที่มีความแตกต่างกันของความกว้างของขั้วของตัวเก็บประจุ คือ 1 μm, 5 μm, 10 μm, 15 μm และ ความหนาของชั้นไดอิเล็กทริก ที่ขั้นกลางระหว่างขั้วตัวนำไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ คือ 1 μm, 2 μm, 4 μm พบว่าเมื่อความกว้างของขั้วตัวเก็บประจุ 1 μm และความหนาของชั้นไดอเล็กทริก ที่ขั้นกลางระหว่างขั้วตัวนำไฟฟ้า 1 μm จะให้ค่าความจุไฟฟ้าสูงสุดคือ 1.67 pF

2. จากการจำลองได้เลือกเงื่อนไข ที่ความกว้างของขั้วของตัวเก็บประจุ 5 μm และความหนาของชั้นไดอิเล็กทริก ที่ขั้นกลางระหว่างขั้วตัวนำไฟฟ้า 1 μm ให้ค่าความจุไฟฟ้า 1.14 pF ซึ่ง เหมาะสำหรับกระบวนการสร้างบนพื้นฐานเทคโนโลยีกการผลิตวงจรรวมแบบซีมอส และหลังจากการสร้างจริงจะวัดค่าความจุไฟฟ้ามากที่สุด 11.2 pF

3. กระบวนการสร้างเสร็จสิ้นได้ทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆ ของเซนเซอร์วัดความชื้นแบบตัวเก็บประจุ ในหนึ่งแผ่นเวเฟอร์ที่สร้างมีจำนวน 1500 ชิ้นงาน ผลการวัดค่าความจุไฟฟ้าจากการสุ่มทดสอบหัววัดความชื้น 10 % (150 ชิ้นงาน) พบว่า มีเปอร์เซ็นดี 98 % (147 ชิ้นงาน) มีค่าความจุไฟฟ้าเฉลี่ยตัวละ 10.96 pF จึงสรุปได้ว่า ในการสร้างเซนเซอร์แต่ละครั้งจะมี yield 98% และมีค่าความจุไฟฟ้าตัวละ 10.96 pF

4. การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า

- การวัดที่ค่าความถี่ 1 MHz, 1.5 MHZ และ 2 MHz จะมีค่าความจุไฟฟ้าเฉลี่ย เท่ากับ 44.4 pF, 45.6 pF และ 47.9 pF ตามลำดับ เนื่องจากในตัวเครื่องวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้านอกจากตัวเก็บประจุแล้วยังมีขดลวดเหนี่ยวนำต่อร่วมอยู่ด้วย จึงเป็นเหตุทำให้กระแสไฟฟ้าป้อนกลับจากเครื่องวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้ามีค่าเปลี่ยนแปลงตามค่าความถี่ไฟฟ้าเล็กน้อยจึงสรุปได้ว่าค่าความจุไฟฟ้าของหัววัดความชื้นที่ผลิตจะไม่แปรผันตามค่าความถี่ไฟฟ้า

- การทดสอบหัววัดความชื้นแบบตัวเก็บประจุโดยการสุมตัวอย่างชิ้นงานนำมาทดสอบที่ความชื้นมาตรฐาน 75 %RH ที่อุณหภูมิระหว่าง 25 °C – 50 °C ค่าความจุไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยที่ 4 pF อันเนื่องมากจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะมีส่วนที่สามารถระเหยเป็นไอ จากไอส่วนนี้ที่ทำให้หัววัดความชื้นอ่านค่าคลาดเคลื่อนไปเล็กน้อย มีค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงต่ออุณหภูมิเท่ากับ 0.16pF/°C จึงสรุปได้ว่าค่าความจุไฟฟ้าของหัววัดความชื้นที่ผลิตจะไม่แปรผันตามอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. การวัดความชื้นเทียบกับมาตรฐานจากการสุ่มตัวอย่าง 10 % มาทดสอบ ที่ค่าความชื้น LiCl 12 %RH, $MgCl_2$ 33 %RH, NaCl 75 %RH และ H_2O 100 %RH จะพบว่าคุณสมบัติทางไฟฟ้า ค่าความจุไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นตามความชื้นในอากาศโดยที่ความชื้นที่ได้มีค่าความจุไฟฟ้าได้เฉลี่ย 67.7 pF, 78.5 pF, 122.7 pF และ 142.8 pF ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเซนเซอร์ความชื้นแบบตัวเก็บประจุที่ทำการสร้างมีการตอบสนองต่อความชื้นอากาศได้ และหัววัดความชื้นแบบตัวเก็บประจุมีความไวในการตอบสนองที่ 1 pF/%RH ค่าฮิสเตอร์ริซิสมีค่าเฉลี่ยไม่เกิน 1 %FSO แสดงถึงความสามารถในการวัดซ้ำของเซนเซอร์วัดความชื้นแบบตัวเก็บประจุในอากาศว่ามีเสถียรภาพสูง จะทำการวิจัยและพัฒนาสู่เชิงพาณิชย์ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] Adamo, F. et. al, “Design and Development of a sensor prototype for Soil Moisture Measurement: First Experimental Results”, Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings, 2007. IMTC 2007, IEEE, pp 1-5, 2007

[2] Kummer, A.M.; Hierlemann, A., “Configurable electrodes for capacitive-type sensors and chemical sensors” Sensor Journal, IEEE, vol. 6 Issue 1, 3-10, 2006.

[3]http://www.scimath.org/index.php/socialnetwork/groups/viewbulletin/339-(Capacitance)?groupid=40 [Online].

[4] http://en.wikipedia.org/wiki/Capacitance [Online].

[5] Bell, D.A and Bell A.M., Temperature Coefficient of Capacitance and of Inductance, Electronic Technology, 37 (1690)

[6] Froom, K.D. And Essen, L., The Velocity of Light and Radio Waves, Academic Press (1969)

[7] Bean, B.R. and Dutton, E.F., Radio Metrology, National Bureau of Standards, Monograph 92 (1966)

[8] http://www.capsense.com/capsense-wp.pdf [Online].

[9] W. Harmsen, The Excessive Humidity Effect on Capacitive Distance Sensors for Precision Positioning, Master thesis, Delft University of Technology, Netherland (2010)

[10]http://www.fastfieldsolvers.com/Papers/The_Maxwell_Capacitance_Matrix_WP110301_R01.pdf [Online].

[11] Sakai, Y. et. al, “Water resistive humidity sensor composed of interpenetrating polymer networks of hydrophilic and hydrophilic and hydrophobic methacrylate ”, Solid-State Sensors and Actuators, 562-565, 1991.

[12] http://www.rmutphysics.com/charud/scibook/physcis-for-everyday/physics-for-everydayuse-content/41-60/indexcontent58.htm [Online].

[13] Jyh-Jier Ho.The design and fabrication of a micro-thermal/pressure-sensor for medicalelectro-skin application.

[14] Jaspreet Singh, M M Nayak1, K Nagachenchaiah, “Linearity and Sensitivity Issues in Piezoresistive Pressure,” Solid-State Electronics 46 (2002) , pp 1205–1209.

[15] Li Cao , Tae Song Kim , Susan C. Mantell,Dennis L. Polla. “Simulation and fabrication of piezoresistive membrane type MEMS strain sensors”. Sensors and Actuators 80_2000. pp 273–279.

[16] Li Cao , Tae Song Kim, Susan C. Mantell and Dennis L. Polla, “Simulation and fabrication of piezoresistive membrane type MEMS,” Sensors and Actuators 80_2000.273–279.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[17] Quan Wang , Jianning Ding, Wenxiang Wang, “Fabrication and temperature coefficient compensation technology of low cost high temperature pressure sensor,” Sensors and Actuators A 120 (2005) ,pp 468–473.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ไฟล์คำสั่ง (Command file) สำหรับสั่งให้ SDE จำลองโครงสร้างเซนเซอร์วัดความชื้น

```
;Humidity Sensor

;Defining parameters

(define Si_THK @Si_THK@) ;Silicon substrate thickness

(define Si_Dop @Si_Dop@) ;Silicon doping concentration

(define Oxide @Oxide@) ;Oxide thickness

(define SiN @SiN@) ;Si3N4 thickness

(define Air @Air@) ;Air thickness

(define Metal_Wd @Metal_Wd@) ;Metal width

(define Metal_Gap @Metal_Gap@) ;Gap width between two metals

(define Metal_THK @Metal_THK@) ;Metal thickness

(define Cells @Cells@) ;Number of cells

(define Cell_Wd (+ Metal_Wd Metal_Gap)) ;Width of one cell

(define Sub_Wd (* Cells Cell_Wd)) ;Total substrate width

(define RoughMeshX @RoughMeshX@) ;Number of rough meshes in X-direction

(define RoughMeshY @RoughMeshY@) ;Number of rough meshes in Y-direction

(define FineMeshX @FineMeshX@) ;Number of fine meshes in refinement window in
X-direction

(define FineMeshY @FineMeshY@) ;Number of fine meshes in refinement window in
Y-direction
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
; Selecting default Boolean expression

(sdegeo:set-default-boolean "ABA") ;New replaces old.

;Creating geometries

;Creating PEOX Layer

(sdegeo:create-rectangle

(position 0.0 0.0 0.0)

(position Sub_Wd Oxide 0.0)

"Oxide" "Oxide_Region")

;Creating Si substrate

(sdegeo:create-rectangle

(position 0.0 Oxide 0.0)

(position Sub_Wd (+ Si_THK Oxide) 0.0)

"Silicon" "Si_Substate")

;Creating Air

(sdegeo:create-rectangle

(position 0.0 (* (+ SiN Air) -1) 0.0)

(position Sub_Wd 0.0 0.0)

"Insulator1" "Air_Region")

;Creating Si3N4 whole cells

(sdegeo:create-rectangle

(position 0.0 (* SiN -1) 0.0)

(position Sub_Wd 0.0 0.0)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
"Si3N4" "Si3N4_Region")
;Creating Si3N4 half first cell
(sdegeo:create-rectangle
(position 0.0 0.0 0.0)
(position (+ SiN (/ Metal_Wd 2)) (* (+ SiN Metal_THK) -1) 0.0)
"Si3N4" "Si3N4_Region")
;Creating Aluminum electrode half first cell
(sdegeo:create-rectangle
(position 0.0 0.0 0.0)
(position (/ Metal_Wd 2) (* Metal_THK -1) 0.0)
"Aluminum" "Al_Region")
; Creating electrodes
(do ( (i 1 (+ i 1)) ) ; i: Counter name; 1: initial value; (+ i 1): incrementer
( (= i (+ Cells 1)) ) ; End tester
(begin ; Body of loop
(if (= (expt -1 i) -1)
(begin ; Creating gold electrodes
;Creating Si3N4 half cell
(sdegeo:create-rectangle
(position (+ (* i Cell_Wd) (- (* Metal_Wd -0.5) SiN)) 0.0 0.0)
(position (+ (* i Cell_Wd) (+ SiN (* Metal_Wd 0.5))) (* -1 (+ SiN Metal_THK)) 0.0)
"Si3N4" "Si3N4_Region")
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
;Creating gold electrodes
(sdegeo:create-rectangle
(position (+ (* i Cell_Wd) (* Metal_Wd -0.5)) 0.0 0.0)
(position (+ (* i Cell_Wd) (* Metal_Wd 0.5)) (* -1 Metal_THK) 0.0)
"Gold" "Au_Region") )
(begin ; Creating Aluminum Electrodes
;Creating Si3N4 half cell
(sdegeo:create-rectangle
(position (+ (* i Cell_Wd) (- (* Metal_Wd -0.5) SiN)) 0.0 0.0)
(position (+ (* i Cell_Wd) (+ SiN (* Metal_Wd 0.5))) (* -1 (+ SiN Metal_THK)) 0.0)
"Si3N4" "Si3N4_Region")
;Creating Aluminum electrodes
(sdegeo:create-rectangle
(position (+ (* i Cell_Wd) (* Metal_Wd -0.5)) 0.0 0.0)
(position (+ (* i Cell_Wd) (* Metal_Wd 0.5)) (* -1 Metal_THK) 0.0)
"Aluminum" "Al_Region") ) ) ) )
;Deleting region
(sdegeo:create-rectangle
(position Sub_Wd (* (+ SiN Air) -1) 0.0)
(position (+ Sub_Wd Metal_Wd) (+ Si_THK Oxide) 0.0)
"Silicon" "Delete_Region")
(sdegeo:delete-region (find-region-id "Delete_Region"))
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
; Defining contacts

(sdegeo:define-contact-set "Anode" 4.0 (color:rgb 1.0 0.0 0.0 ) "##" )

(sdegeo:define-contact-set "Cathode" 4.0 (color:rgb 0.0 1.0 0.0 ) "##")

(sdegeo:define-contact-set "Substrate" 4.0 (color:rgb 0.0 0.0 1.0 ) "##" )

; Setting contacts at edges

(sdegeo:define-2d-contact (find-edge-id (position Metal_Wd (+ Si_THK Oxide) 0.0))
"Substrate")

; Replacing a region with a contact

(sdegeo:set-current-contact-set "Anode")

(sdegeo:set-contact-boundary-edges (find-material-id "Aluminum"))

(sdegeo:delete-region (find-material-id "Aluminum"))

(sdegeo:set-current-contact-set "Cathode")

(sdegeo:set-contact-boundary-edges (find-material-id "Gold"))

(sdegeo:delete-region (find-material-id "Gold"))

; Defining constant doping levels in a material

(sdedr:define-constant-profile "Const.Silicon" "BoronActiveConcentration" Si_Dop)

(sdedr:define-constant-profile-material "PlaceCD.Silicon" "Const.Silicon" "Silicon")

; Defining a refinement window

(sdedr:define-refinement-window "RefWin.all"

"Rectangle" (position 0.0 (* (+ SiN Air) -1) 0.0) (position Sub_Wd (+ Si_THK Oxide) 0.0))

; Defining mesh strategies in a refinement window1

(sdedr:define-refinement-size "RefDef.all"
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
RoughMeshX RoughMeshY (/ RoughMeshX 2) (/ RoughMeshY 2))

(sedr:define-refinement-placement "PlaceRF.all" "RefDef.all" "RefWin.all")

;Defining mesh strategies in a a refinement window2

(sedr:define-refinement-size "RefDef.Fine"

FineMeshX FineMeshY (/ FineMeshX 2) (/ FineMeshY 2))

(sedr:define-refinement-window "RefWin.Fine"

"Rectangle" (position 0.0 (* 2 Oxide) 0.0) (position Sub_Wd (* Metal_THK -4) 0.0))

(sedr:define-refinement-placement "PlaceRF.Fine2" "RefDef.Fine" "RefWin.Fine")

;Defining mesh strategies in a a refinement window3

(sedr:define-refinement-size "RefDef.Fine3"

(/ FineMeshX 5) (/ FineMeshY 5) (/ FineMeshX 10) (/ FineMeshY 10))

(sedr:define-refinement-window "RefWin.Fine3"

"Rectangle" (position 0.0 (* 0.5 Metal_THK) 0.0) (position Sub_Wd (* Metal_THK -1.5)
0.0))

(sedr:define-refinement-placement "PlaceRF.Fine3" "RefDef.Fine3" "RefWin.Fine3")

; Saving the model

(sde:save-model "n@node@")

; Meshing the device structure

(sde:build-mesh "snmesh" "" "n@node@_msh")

;-----------------------------------------------------------------------

; Save CMD file (sedr:write-cmd-file "@commands/o@")
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ไฟล์คำสั่ง (Command file) สำหรับสั่งให้ Sdevice จำลองคุณสมบัติทางไฟฟ้า

```
Device Humiditysensor

{Electrode{

{ name="Anode" Voltage=0.0 }

{ name="Cathode" Voltage=0.0 }

{ name="Substrate" Charge=0.0 } }

File{

Grid = "@tdr@"

Plot = "@tdrdat@"

Current = "@plot@"

Param = "@parameter@"}

Physics{

Mobility( DopingDep HighFieldSaturation Enormal )

EffectiveIntrinsicDensity( oldSlotboom )}}

Math{

Extrapolate

RelErrControl

Notdamped=50

Iterations=20}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
Plot{

eDensity hDensity

eCurrent hCurrent

ElectricField/Vector eEnormal hEnormal

eQuasiFermi hQuasiFermi

Potential Doping SpaceCharge

SRH Auger

AvalancheGeneration

eMobility hMobility

DonorConcentration AcceptorConcentration

Doping

eVelocity hVelocity}

File{

Output = "@log@"

ACExtract = "@acplot@"}

System {

Humiditysensor Humid1 (Anode=a Cathode=c)

Vsource_pset va ( a 0 ){ dc = 0 }

Vsource_pset vc ( c 0 ){ dc = 0 }}

Solve{

NewCurrentPrefix="init"

Coupled(Iterations=100){ Poisson }
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
Coupled{ Poisson Electron Hole }

Quasistationary (

InitialStep=0.1 Increment=1.3

MaxStep=0.5 Minstep=1.e-5

Goal { Parameter=va.dc Voltage=-@Voltage@}

){ Coupled { Poisson Electron Hole } }

#-ramp gate

NewCurrentPrefix=""

Quasistationary (

InitialStep=0.01 Increment=1.3

MaxStep=0.05 Minstep=1.e-5

Goal { Parameter=va.dc Voltage=@Voltage@}

){ ACCoupled (

StartFrequency=@Frequency@ EndFrequency=@Frequency@ NumberOfPoints=1
Decade

Node(a c) Exclude(va vc)

ACCompute (Time = (Range = (0 1) Intervals = 20))

){ Poisson Electron Hole }

 } }
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

โปรแกรม Inspect ใช้ในการแสดงผลในรูปแบบกราฟและแสดงค่าใน SWB ไฟล์คำสั่งของ Inspect

```
proj_load n@previous@_ac_des.plt ExtractC

cv_create C "ExtractC v(a)"\

"ExtractC c(a,c)" y

set C1 [cv_compute "vecvaly(<C>, @at_Voltage@)" A A A A]

ft_scalar Cap [format %.8g $C1]

set TotalCap_a_c [expr -264600*$C1/@Cells@]

ft_scalar TotalCap [format %.8g $TotalCap_a_c]
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

ไฟล์คำสั่ง (Command file) สำหรับสั่งให้ SDE จำลองโครงสร้างเซนเซอร์วัดความชื้น หลังทำการบรรจุภัณฑ์ (Packaging)

```
;Humidity Sensor

;Define Parameters

(define Si_THK @Si_THK@) ;Silicon Substrate Thickness

(define Si_Dop @Si_Dop@) ;Silicon Doping Concentration

(define Oxide @Oxide@) ;Oxide Thickness

(define SiN @SiN@) ;Si3N4 Thickness

(define Air @Air@) ;Air Thickness

(define Polymer @Polymer@) ;Polymer Thickness

(define Metal_Wd @Metal_Wd@) ;Metal Width

(define Metal_Gap @Metal_Gap@) ;Gap Width between two Metals

(define Metal_THK @Metal_THK@) ;Metal_THK Thickness

(define Cells @Cells@) ;Number of Cells

(define Cell_Wd (+ Metal_Wd Metal_Gap)) ;Width of one Cell

(define Sub_Wd (* Cells Cell_Wd)) ;Total Substrate Width

(define RoughMeshX @RoughMeshX@) ;Number of Rough Meshes in X-direction

(define RoughMeshY @RoughMeshY@) ;Number of Rough Meshes in Y-direction

(define FineMeshX @FineMeshX@) ;Number of Fine Meshes in Refinement Window in
X-direction
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(define FineMeshY @FineMeshY@) ;Number of Fine Meshes in Refinement Window in Y-direction

; Selecting default Boolean expression

(sdegeo:set-default-boolean "ABA") ;New replaces Old.

;Create Geometry

;Creating PEOX Layer

(sdegeo:create-rectangle

(position 0.0 0.0 0.0)

(position Sub_Wd Oxide 0.0)

"Oxide" "Oxide_Region")

;Creating Si Substrate

(sdegeo:create-rectangle

(position 0.0 Oxide 0.0)

(position Sub_Wd (+ Si_THK Oxide) 0.0)

"Silicon" "Si_Substate")

;Creating Air

(sdegeo:create-rectangle

(position 0.0 (* (+ SiN Air) -1) 0.0)

(position Sub_Wd 0.0 0.0)

"Insulator1" "Air_Region")

;Creating Polymer Whole Cells

(sdegeo:create-rectangle

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
(position 0.0 (* (+ Polymer SiN) -1) 0.0)

(position Sub_Wd 0.0 0.0)

"Insulator2" "Polymer_Region")

;Creating Polymer half first cell

(sdegeo:create-rectangle

(position 0.0 0.0 0.0)

(position (+ (+ SiN (/ Metal_Wd 2)) Polymer) (* (+ Polymer (+ SiN Metal_THK)) -1) 0.0)

"Insulator2" "Polymer_Region")

; Creating Polymer

(do ( (i 1 (+ i 1)) ) ; i: Counter name; 1: initial value; (+ i 1): incrementer

( (= i (+ Cells 1)) ) ; End Tester

(begin ; Body of loop

(if (= (expt -1 i) -1)

(begin  ;Creating Polymer half cell

(sdegeo:create-rectangle

(position (+ (* i Cell_Wd) (- (* Metal_Wd -0.5) (+ Polymer SiN))) 0.0 0.0)

(position (+ (* i Cell_Wd) (+ (+ Polymer SiN) (* Metal_Wd 0.5))) (* -1 (+ (+ Polymer SiN)
Metal_THK)) 0.0)

"Insulator2" "Polymer_Region") )

(begin  ;Creating Polymer half cell

(sdegeo:create-rectangle

(position (+ (* i Cell_Wd) (- (* Metal_Wd -0.5) (+ Polymer SiN))) 0.0 0.0)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
(position (+ (* i Cell_Wd) (+ (+ Polymer SiN) (* Metal_Wd 0.5))) (* -1 (+ (+ Polymer SiN)
Metal_THK)) 0.0)

"Insulator2" "Polymer_Region") ) ) ) )

;Creating Si3N4 Whole Cells

(sdegeo:create-rectangle

(position 0.0 (* SiN -1) 0.0)

(position Sub_Wd 0.0 0.0)

"Si3N4" "Si3N4_Region")

;Creating Si3N4 half first cell

(sdegeo:create-rectangle

(position 0.0 0.0 0.0)

(position (+ SiN (/ Metal_Wd 2)) (* (+ SiN Metal_THK) -1) 0.0)

"Si3N4" "Si3N4_Region")

; Creating SIN

(do ( (i 1 (+ i 1)) ) ; i: Counter name; 1: initial value; (+ i 1): incrementer

( (= i (+ Cells 1)) ) ; End Tester

(begin ; Body of loop

(if (= (expt -1 i) -1)

(begin  ;Creating Si3N4 half cell

(sdegeo:create-rectangle

(position (+ (* i Cell_Wd) (- (* Metal_Wd -0.5) SiN)) 0.0 0.0)

(position (+ (* i Cell_Wd) (+ SiN (* Metal_Wd 0.5))) (* -1 (+ SiN Metal_THK)) 0.0)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
"Si3N4" "Si3N4_Region") )
(begin
;Creating Si3N4 half cell
(sdegeo:create-rectangle
(position (+ (* i Cell_Wd) (- (* Metal_Wd -0.5) SiN)) 0.0 0.0)
(position (+ (* i Cell_Wd) (+ SiN (* Metal_Wd 0.5))) (* -1 (+ SiN Metal_THK)) 0.0)
"Si3N4" "Si3N4_Region") ) ) ) )
; Creating Electrodes
(do ( (i 1 (+ i 1)) ) ; i: Counter name; 1: initial value; (+ i 1): incrementer
( (= i (+ Cells 1)) ) ; End Tester
(begin ; Body of loop
(if (= (expt -1 i) -1)
(begin ; Creating Gold Electrodes
;Creating Gold Electrodes
(sdegeo:create-rectangle
(position (+ (* i Cell_Wd) (* Metal_Wd -0.5)) 0.0 0.0)
(position (+ (* i Cell_Wd) (* Metal_Wd 0.5)) (* -1 Metal_THK) 0.0)
"Gold" "Au_Region") )
(begin ; Creating Aluminum Electrodes
;Creating Aluminum Electrodes
(sdegeo:create-rectangle
(position (+ (* i Cell_Wd) (* Metal_Wd -0.5)) 0.0 0.0)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
(position (+ (* i Cell_Wd) (* Metal_Wd 0.5)) (* -1 Metal_THK) 0.0)
"Aluminum" "Al_Region") ) ) ) )
;Creating Aluminum Electrode half first cell
(sdegeo:create-rectangle
(position 0.0 0.0 0.0)
(position (/ Metal_Wd 2) (* Metal_THK -1) 0.0)
"Aluminum" "Al_Region")
;Delete Region Right
(sdegeo:create-rectangle
(position Sub_Wd (* (+ (+ Polymer SiN) Air) -1) 0.0)
(position (+ Sub_Wd (+ (+ Polymer SiN) Metal_Wd)) (+ Si_THK Oxide) 0.0)
"Silicon" "Delete_Region_Right")
(sdegeo:delete-region (find-region-id "Delete_Region_Right"))
;Delete Region Left
(sdegeo:create-rectangle
(position 0 (* (+ (+ Polymer SiN) Air) -1) 0.0)
(position (* (+ (+ Polymer SiN) Metal_Wd) -1) (+ Si_THK Oxide) 0.0)
"Silicon" "Delete_Region_Left")
(sdegeo:delete-region (find-region-id "Delete_Region_Left"))
; Defining contacts
(sdegeo:define-contact-set "Anode" 4.0 (color:rgb 1.0 0.0 0.0 ) "##" )
(sdegeo:define-contact-set "Cathode" 4.0 (color:rgb 0.0 1.0 0.0 ) "##")
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
(sdegeo:define-contact-set "Substrate" 4.0 (color:rgb 0.0 0.0 1.0 ) "##" )

; Setting contacts at edges

(sdegeo:define-2d-contact (find-edge-id (position Metal_Wd (+ Si_THK Oxide) 0.0))
"Substrate")

; Replacing a region with a contact

(sdegeo:set-current-contact-set "Anode")

(sdegeo:set-contact-boundary-edges (find-material-id "Aluminum"))

(sdegeo:delete-region (find-material-id "Aluminum"))

(sdegeo:set-current-contact-set "Cathode")

(sdegeo:set-contact-boundary-edges (find-material-id "Gold"))

(sdegeo:delete-region (find-material-id "Gold"))

; Defining constant doping levels in a material

(sdedr:define-constant-profile "Const.Silicon" "BoronActiveConcentration" Si_Dop)

(sdedr:define-constant-profile-material "PlaceCD.Silicon" "Const.Silicon" "Silicon")

; Defining a refinement window

(sdedr:define-refinement-window "RefWin.all"

"Rectangle" (position 0.0 (* (+ SiN Air) -1) 0.0) (position Sub_Wd (+ Si_THK Oxide) 0.0))

; Defining mesh strategies in a refinement window1

(sdedr:define-refinement-size "RefDef.all"

RoughMeshX RoughMeshY (/ RoughMeshX 2) (/ RoughMeshY 2))

(sdedr:define-refinement-placement "PlaceRF.all" "RefDef.all" "RefWin.all")

;Defining mesh strategies in a a refinement window2
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
(sdedr:define-refinement-size "RefDef.Fine"
(/ FineMeshX 5) (/ FineMeshY 5) (/ FineMeshX 10) (/ FineMeshY 10))
(sdedr:define-refinement-window "RefWin.Fine"
"Rectangle" (position 0.0 (* 2 Oxide) 0.0) (position Sub_Wd (* Metal_THK -4) 0.0))
(sdedr:define-refinement-placement "PlaceRF.Fine2" "RefDef.Fine" "RefWin.Fine")
;Defining mesh strategies in a a refinement window3
(sdedr:define-refinement-size "RefDef.Fine3"
(/ FineMeshX 5) (/ FineMeshY 5) (/ FineMeshX 10) (/ FineMeshY 10))
(sdedr:define-refinement-window "RefWin.Fine3"
"Rectangle" (position 0.0 (* 0.5 Metal_THK) 0.0) (position Sub_Wd (* Metal_THK -1.5)
0.0))
(sdedr:define-refinement-placement "PlaceRF.Fine3" "RefDef.Fine3" "RefWin.Fine3")
; Saving the model
(sde:save-model "n@node@")
; Meshing the device structure
(sde:build-mesh "snmesh" "" "n@node@_msh")

;-----------------------------------------------------------------------
; Save CMD file
(sdedr:write-cmd-file "@commands/o@")
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

ค่าคงที่ทางฟิสิกส์

ตารางที่ จ.1 ค่าคงที่ทางฟิสิกส์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้

พารามิเตอร์	สัญลักษณ์	ค่า	หน่วย
ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน	q	1.602×10^{-19}	C
ค่าคงที่โบสต์มันน์	k	1.38×10^{-23}	J/K
เปอร์มิติวิตีในสุญญากาศ	ε_0	8.854×10^{-14}	F/cm
เปอร์มิอะบิลิตีในสุญญากาศ	μ_0	1.2566×10^{-6}	$N \cdot A^2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายอาคม ศรีหาเพท
วัน เดือน ปีเกิด	12 พฤษภาคม 2524 ที่ อำเภอบ้านม่วง จังหวัดสกลนคร
ที่อยู่	65 หมู่ 8 บ้านคำยาง ตำบลดงเหนือ อำเภอบ้านม่วง จังหวัดสกลนคร 47140
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2549 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ
ความชำนาญเฉพาะด้าน	1.) กระบวนการผลิตวงจรรวม, เซนเซอร์ 2.) กระบวนการปลูกฟิล์มบาง (Thin films deposition) 3.) การประยุกต์ใช้งานอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ 4.) ระบบควบคุม - ไมโครคอลโทรลเลอร์
ประสบการณ์ทำงาน	
พ.ศ. 2549 - 2550	ตำแหน่งวิจัยและพัฒนา บริษัทจีเอ็มเม็ดไลน์ จำกัด
พ.ศ. 2551 - ปัจจุบัน	ผู้ช่วยนักวิจัย 1 ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในวิทยานิพนธ์นี้

[1] อาคม ศรีหาเพท วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง พุทธพล เพ็งพัด นิภาพรรณ กลั่นเงิน ชาญเดช หรูอนันต์ และ อัมพร โพธิ์ใย. ปี2555, “ การออกแบบและกระบวนการสร้างหัววัดความชื้นแบบตัวเก็บประจุ ” วารสาร การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 35, , เล่มที่ 2, หน้า 767-770.

[2] อาคม ศรีหาเพท วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง พุทธพล เพ็งพัด นิภาพรรณ กลั่นเงิน ชาญเดช หรูอนันต์ และ อัมพร โพธิ์ใย. ปี 2555, “ การออกแบบและการสร้างหัววัดความชื้นสำหรับงานวัดความชื้นในดิน ” วารสาร การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 35, เล่มที่ 2, หน้า 747-750.

ผลงานวิจัยอื่น ๆ

[1] พุทธพล เพ็งพัด, อาคม ศรีหาเพท, นิภาพรรณ กลั่นเงิน, ชาญเดช หรูอนันต์, อัมพร โพธิ์ใย.และทีมงาน, ปี 2555, “ อุปกรณ์วัดความชื้นในดิน ”,ทรัพย์สินทางปัญญา – สิทธิบัตรการประดิษฐ์ วันที่ยื่นคำขอ 13/12/2555 สิทธิบัตรเลขที่ 4929885, 7170302 B2, 6441622 B1

[2] ธงชัย ธงวิจิตรมณี, อาคม ศรีหาเพท, ชาญเดช หรูอนันต์, นิภาพรรณ กลั่นเงิน, อัมพร โพธิ์ใย, และ รัตนพันธุ์ นพเก้า, วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง, อัษฎา จิรประยุกต์เลิศ , เจริญชัย โขมพัตราภรณ์, 2553,"การหาค่าพารามิเตอร์ในการเคลือบฟิล์มซิลิกอนไนไตรด์ด้วยกระบวนการเคลือบไอเคมีโดยอาศัยพลาสมา", วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 563(2), 332-342

[3] ธงชัย ธงวิจิตรมณี, อาคม ศรีหาเพท, ชาญเดช หรูอนันต์, อัมพร โพธิ์ใย, และ รัตนพันธุ์ นพเก้า, วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง, อัษฎา จรประยุกต์เลิศ, เจริญชัย โขมพัตราภรณ์, 2552, "แบบจำลองคุณสมบัติกระบวนการเคลือบไอเคมีโดยอาศัยพลาสมาของฟิล์มซิลิคอนไนไตรด์โดยอาศัยเทคนิคพื้นผิวตอบสนอง", วารสารวิชาการเนคเทค, 552(21), 219-224

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[4] Arckom Srihapat, Chana Leepattarapongpan, Naritchaphan Penpondee, Putapon Pengpad, Supanit Porntheeraphat, Praphaphan Wipatawit, Charndet Hruanun, Amporn Poyai, 2009, anisotropic magnetoresistive sensors form NiFe single Layer, NECTEC TECHNICAL JOURNAL, 9(21), 269-273

[5] Chana Leepattarapongpan, Naritchaphan Penpondee, Putapon Pengpad, Supanit Porntheeraphat, Arckom Srihapat, Ekalak Chaowicharat, Charndet Hruanun, Amporn Poyai, 2009, "Fabrication and Characterization of Magnetic sensor based on Magnetoresistive Effect", asiasense 2009, 140, 87

[6] Putapon Pengpad, Arckom Srihapat, Chana Leepattarapongpan, Naritchaphan Penpondee, Charndet Hruanun, Amporn Poyai, 2009, "A Study of Magnetic Sensors' Sensitivity and Power Consumption by Simulation Modelling Technique", Asiasense 2009, The 4th International Conference on Sensors,140, 44

[7] Putapon Pengpad, Chana Leepattarapongpan, Naritchaphan Penpondee, Arckom Srihapat, Charndet Hruanun, Amporn Poyai, 2009, "Sensitivity Improvement of Merged Three-terminal Magnetic Sensor by 3D Simulations Modelling", Asiasense 2009, The 4th International Conference on Sensors, 140, 88

[8] Thongchai Thongvigitmanee, Arckom Srihapat, Charndet Hruanun, Nipapan Klunngien, Amporn Poyai, and visut tithirongrrang , 2010, "Use of Neural Network to Model the Refractive Property of PECVD Silicon Nitride Films Used to Prevent Water Permeability of Piezoresistive Pressure Sensor", ECS Transactions - China Semiconductor Technology International Conference (CSTIC), 107, 767-772

[9] Chana Leepattarapongpan, Putapon Pengpad, Arckom Srihapat, Naritchaphan Penpondee, Amporn Poyai, Charndet Hruanun, 2010, "The Low Power Magnetotransistor Based on the CMOS Technology", The 2010 ECTI International Conference on Electrical Engineering/Electronic, Computer, Telecommunications and Information Technology, 140, 171-174

[10] Chana Leepattarapongpan, Naritchaphan Penpondee, Putapon Pengpad, Arckom Srihapat, Charndet Hruanun, Wutthinan Jeamsaksiri, Amporn Poyai, 2011, "The Effect Injection Width and Temperature-Offset Compensation of Magnetotransistor", Eurosensors 2011, 214, 1269-1272

[11] Thongchai Thongvigitmanee, Arckom Srihapat, Amporn Poyai, Opas Trithaveesak, Charndet Hruanun, and visut tithirongrrang , 2011, "Use of Neural Network to Model the FTIR Spectra of PECVD Silicon Nitride Films for Cardiovascular Pressure Sensor Applications", IEEE/SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference, 402, 152-156

[12] Chana Leepattarapongpan, Arckom Srihapat, Putapon Pengpad, Naritchaphan Penpondee, Amporn Poyai, Charndet Hruanun, 2011, "The Deflection Length and Emitter Width on Sensitivity of Magnetotransistor", IEEE- NEMS 2011, 139, 367-370

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[13] Chana Leepattarapongpan, Naritchaphan Penpondee, Putapon Pengpad, Arckom Srihapat, Ekalak Chaowicharat, Charndet Hruanun, Amporn Poyai, 2011, "The Low Power 3DMagnetotransistor Based on CMOS Technology", IEEE SENSORS 2011 CONFERENCE, 299, 500-503

[14] Arckom Srihapat, Chana Leepattarapongpan, Naritchaphan Penpondee, Putapon Pengpad, Charndet Hruanun, Amporn Poyai, 2010, The Wireless Current Sensors for Automobile by Magnetotransistor Structure, NECTEC Technical journal, 10(22), 302 - 307 ,july-October,2010

[15] Chana Leepattarapongpan, Naritchaphan Penpondee, Putapon Pengpad, Arckom Srihapat, Charndet Hruanun, Amporn Poyai, 2010, The Deflection Length and Injection Width on the Sensitivity of Magnetotransistor, Nectec technical journal, 10 (22), 212 - 217 ,july-October,2010

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The 35th Electrical Engineering Conference (EECON-35)

SCHOOL OF
ENGINEERING
BANGKOK UNIVERSITY

NECTEC
a member of NSTDA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

EL006	**การออกแบบและกระบวนการสร้างหัววัดความชื้นแบบตัวเก็บประจุ** *อาคม ศรีมหาเพท[1,2], วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง[2], พุทธพล เพ็งพัด[1], นิภาพรรณ กลั่นเงิน[1], ชาญเดช หรูอนันต์[1] และ อัมพร โพธิ์ใย[1]* *[1]ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ* *[2]สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง*	**767**
EL007	**ตัวควบคุมพีไอดีโดยใช้วงจรอินเวอร์เตอร์แบบซีมอสที่ถูกควบคุมด้วยกระแส** *สมเกียรติ เกิดทอง[1], วินัย ศิลารวม[2], วิภาวัลย์ นาคทรัพย์[3], วิภา แสงพิสิทธิ์[1] และ วิวัฒน์ กิรานนท์[2]* *[1]สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง* *[2]มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร* *[3]มหาวิทยาลัยสยาม*	**771**
EL008	**วงจรควอดราเจอร์ออสซิลเลเตอร์สี่เฟสอันดับที่สามโหมดกระแสโดยใช้วงจร MCCCFTA วงจรเดียว** *อิทธิพล กันศิริ มนตรี คำเงิน สมยศ จุณณะปิยะ* *สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง*	**775**
EL009	**วงจรควอดราเจอร์ออสซิลเลเตอร์โดยใช้วงจร DDCC** *อนุสรณ์ อัตพุฒ อภิชัย ชนะสุข มนตรี คำเงิน กอบชัย เดชหาญ* *สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง*	**779**
EL010	**วงจรถอดรากสัญญาณโหมดกระแสที่สามารถควบคุมได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ โดยใช้ MO-CCCTTA เพียงตัวเดียว** *สุรศักดิ์ อินทร์จันทร์[1] ประชารัฐ สัตถาผล[2] และ มนตรี ศิริปรัชญานันท์[3]* *[1]มหาวิทยาลัยราชภัฏหมู่บ้านจอมบึง* *[2]โรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ* *[3]มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*	**783**
EL011	**A Generalized Floating-Gate Integrator for Sampled-Data Filtering Applications** *Panavy Pookaiyaudom and Apisak Worapishet* *Mahanakorn University of Technology*	**787**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบและกระบวนการสร้างหัววัดความชื้นแบบตัวเก็บประจุ

The Capacitive Humidity sensor: Design and Fabrication

อาคม ศรีหาเพท[1,2], วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง[2], พุทธพล เพ็งพัด[1], นิภาพรรณ กลั่นเงิน[1], ชาญเดช หรูอนันต์[1] และ อัมพร โพธิ์ใย[1]

[1] ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ

51/4 หมู่ที่ 1 วังตะเคียน อำเภอเมือง ฉะเชิงเทรา 24000 โทร. 038-857-100 ถึง 9 E-mail: Arckom.srihapat@nectec.or.th

[2] สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

3 หมู่ที่ 2 ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 โทร. 0-2326-4550

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบและกระบวนการสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้นแบบตัวเก็บประจุ (Capacitive Humidity Sensor) พัฒนาโดยศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) ใช้เทคนิคการสร้างบนพื้นฐานเทคโนโลยีกระบวนการผลิตซีมอส โดยมีชั้น Aluminum ชั้นเดียว เป็นโครงสร้างแบบซี่หวีสลับที่มีการออกแบบให้เป็นเครือข่ายรวมของส่วนย่อยๆ 600 ส่วน โดยมีชั้นฟิล์มซิลิคอนไนไตรด์หนา 50 nm เป็นชั้นป้องกันขั้วโลหะและใช้ช่วยในการดูดซับความชื้นด้วย

การสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้น เป็นแบบตัวเก็บประจุโดยวัดจากค่าความจุทางไฟฟ้าซึ่งค่าความจุทางไฟฟ้าขึ้นอยู่กับความหนาของชั้นไดอิเล็กตริกและค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของฉนวนระหว่างขั้วโลหะ ขั้นตอนในการสร้างตัวเก็บประจุลงบนแผ่นเวเฟอร์คือทำการปลูกฟิล์มโลหะบนชั้นซิลิคอนไดออกไซด์และทำการกัดชั้นโลหะให้มีลวดลายคล้ายซี่หวี โดยใช้หลักการวัดค่าความจุไฟฟ้าบริเวณระหว่างขั้วของซี่หวี (Interdigitated) ซึ่งออกแบบให้สามารถสัมผัสกับอากาศที่มีความชื้น ซึ่งบริเวณร่องระหว่างขั้วโลหะของซี่หวีจะทำหน้าที่เป็นไดอิเล็กทริกให้กับตัวเก็บประจุ แล้วจากนั้นก็ต่อขั้วไฟฟ้าเข้ากับคู่โลหะ และทำการวัดค่าทางไฟฟ้า โดยเปรียบเทียบค่าที่วัดได้กับตัวผลิตความชื้นมาตรฐานที่ค่าความชื้น 12%RH, 33%RH, 75%RH และ100%RH จะพบว่าความจุไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นตามความชื้นในอากาศโดยที่ความชื้นที่ได้มีค่าความจุไฟฟ้าได้เฉลี่ย 67.7pF, 78.5 pF, 122.7pF และ 142.8 pF ตามลำดับ หัววัดความชื้นมีความไวในการตอบสนองที่ 1pF/%RH

คำสำคัญ: หัวความชื้นแบบตัวเก็บประจุ,ไดอิเล็กทริก,ฟิล์มซิลิคอนไนไตรด์,ซี่หวีสลับ

Abstract

This paper presents the capacitive humidity sensor developed by Thai Microelectronics Center (TMEC). The device was an integrated Aluminum interdigitated cells, in which included around 600 cells and silicon nitride film 50 nm thick was used as a protection and an absorption layer. The interdigitated design was implemented as capacitive plates and the space between the plates was opened to humid air. This technique gives a simple relationship between %RH and the sensor capacitance. Electrical characteristic of the device was done and calibrated with 3 standard humidity generators 12%RH, 33%RH, 75%RH, 100%RH which were corresponded to the sensor value of 67.7pF, 78.5 pF, 122.7pF และ 142.8 pF respectively. Humidity sensor with high sensitivity in response to 1pF /% RH.

Keywords: Humidity sensor, Capacitive, Interdigitated

1. บทนำ

ปัจจุบันสิ่งประดิษฐ์ตัวตรวจวัดความชื้นของอากาศได้มีการพัฒนาไปหลายรูปแบบ และมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น ได้มีการนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมด้านต่างๆมากขึ้น ซึ่งการวัดความชื้นโดยทั่วไปจะมีสองหลักการหลักๆคือ การวัดความชื้นโดยใช้หลักการระเหยของไอน้ำ จะวัดจากผลต่างของอุณหภูมิที่เป็นค่าปกติกับอุณหภูมิที่วัดจากส่วนที่มีการระเหยของของเหลว ผลที่ได้จากการวัดอาจมีความคลาดเคลื่อนสูง ส่วนเซนเซอร์วัดความชื้นอีกแบบจะใช้หลักการของตัวเก็บประจุ โดยอากาศจะทำหน้าที่เป็นไดอิเล็กทริก ซึ่งค่าไดอิเล็กทริกของอากาศและของน้ำจะมีค่าแตกต่างกัน ซึ่งค่าไดอิเล็กทริกที่เปลี่ยนไปก็จะทำให้ค่าความจุทางไฟฟ้าเปลี่ยนไป ทำให้มีความแม่นยำและรวดเร็ว

เพื่อออกแบบเซนเซอร์ให้มีลักษณะที่มีโครงสร้างเหมือนกับตัวเก็บประจุและทำงานได้ดี มีความไวในการวัดสูง มีขนาดเล็กและมีค่าความจุไฟฟ้าต่อขนาดสูง จึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจ ซึ่งในกระบวนการสร้างวงจรรวมในแผ่นเวเฟอร์จึงเป็นหนึ่งวิธีที่เหมาะสำหรับการสร้างเซนเซอร์ให้มีขนาดเล็กระดับไมครอนซึ่งจากการศึกษาพบว่าสามารถออกแบบตัวเก็บประจุให้มีขนาดเล็กให้ต่อขนานกันซึ่งจะทำให้มีค่าความจุไฟฟ้าสูงขึ้น เพิ่มความไวในการวัด โดยแนวคิดในการสร้างตัวเก็บประจุในแผ่นเวเฟอร์คือ การปลูกฟิล์มโลหะบนชั้นซิลิคอนไดออกไซด์และทำการกัดชั้นโลหะให้เป็นร่องสำหรับอากาศมาคั่นทำหน้าที่เป็นไดอิเล็กทริกให้กับตัวเก็บประจุ ต่อขั้วเข้ากับคู่โลหะทั้งสองก็จะทำให้ชั้นโลหะทำหน้าที่เปรียบเสมือนแผ่นเพลตของตัวเก็บประจุ โดยในการทดลองนี้จะ

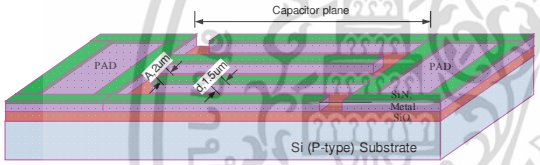
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สร้างเซนเซอร์วัดความชื้นด้วยการปลูกโลหะอะลูมิเนียมบนชั้นซิลิคอนไดออกไซด์และปลูกฟิล์มซิลิคอนไนไตรด์ปิดทับเพื่อป้องกันการลัดวงจรของแผ่นเพลต โดยกระบวนการสร้างตัวเซนเซอร์ทั้งหมดจะอยู่ในห้องที่มีการควบคุมปริมาณฝุ่น ความชื้นซึ่งเป็นห้องสะอาด ดังนั้นจึงมีความสนใจที่จะสร้างเครื่องมือวัดความชื้น ที่ใช้หลักการวัดที่ไม่ซับซ้อน สะดวกในการใช้งานและสามารถผลิตจำนวนมากได้ โดยที่มีราคาย่อมเยาว์ ซึ่งเหมาะสมกับงานทางด้านวิจัยและพัฒนา ที่มีความจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์วัดความชื้นอากาศ เพื่อพัฒนาสู่เชิงพาณิชย์ต่อไป

2. โครงสร้างและหลักการทำงาน

2.1 โครงสร้างของอุปกรณ์

หัววัดความชื้นในอากาศสามารถแสดงรูปแบบโครงสร้างดังรูปที่ 1 ใช้ชั้นโลหะชั้นเดียวแบบซี่หวีสลับ (Interdigitated) โดยใช้เทคโนโลยีการสร้างกระจกต้นแบบในการสร้างเส้นลายโลหะขนาดเล็ก (เล็กได้ถึง 0.5 ไมครอน) ซึ่งเป็นลักษณะโครงสร้างหัววัดแบบ Capacitive โดยทั่วไป มีค่าการเก็บประจุที่ 50 pF และมีขนาดชิปที่เล็กกว่าอุปกรณ์ทั่วๆไปในท้องตลาด (ขนาดชิป ~ 2*4 mm)



รูปที่ 1 รูปแบบโครงสร้างหัววัดความชื้น

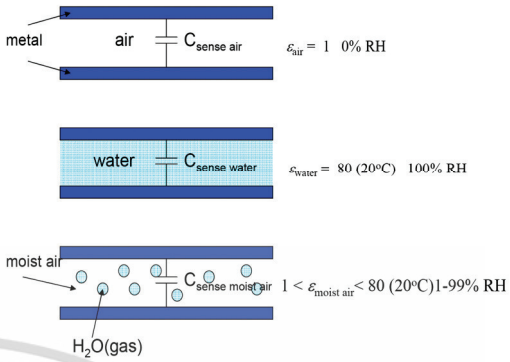
2.2 หลักการทำงาน

อุปกรณ์วัดความชื้นแบบตัวเก็บประจุนี้ใช้คุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงค่าตัวเก็บประจุที่ขึ้นอยู่กับค่า Relative permittivity ของ dielectric ของตัวเก็บประจุนั้น แสดงดังสมการที่ 1 ค่าตัวเก็บประจุเท่ากับ

$$C = \frac{\varepsilon_o \varepsilon_s A}{d} \qquad (1)$$

โดยที่ ε_o คือค่า absolute permittivity ของอากาศแห้งซึ่งมีค่าเท่ากับ 8.85E-12 F/m, ε_s คือค่า relative permittivity ของ dielectric ที่ใช้ในตัวเก็บประจุ (ไม่มีหน่วย), A คือพื้นที่ของตัวเก็บประจุ และ d คือความหนาของชั้น dielectric ที่ขั้นกลางระหว่างขั้วตัวนำไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ

การนำตัวเก็บประจุวัดค่า relative humidity (%RH) นี้แสดงกระบวนการดังรูปที่ 2 ดังจะเห็นจากการเปรียบเทียบค่า relative permittivity ของอากาศแห้งและน้ำ ซึ่งสามารถเทียบเคียงได้กับค่า 0%RH และค่า 100%RH ตามลำดับ (ที่ทุกๆอุณหภูมิถ้าค่า relative permittivity มีค่าเท่ากับ 100% ไอน้ำในอากาศจะถูกควบแน่นให้อยู่ในสถานะเป็นของเหลว) ดังนั้นอากาศที่มีความชื้นระหว่าง 0 ถึง 100%RH จึงมีผลทำให้ค่าของตัวเก็บประจุนี้มีค่าแตกต่างกันในลักษณะเชิงเส้นได้ ซึ่งแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศให้เป็นค่าทางไฟฟ้าได้โดยตรง



รูปที่ 2 หลักการใช้ตัวเก็บประจุวัดค่าความชื้นในอากาศ

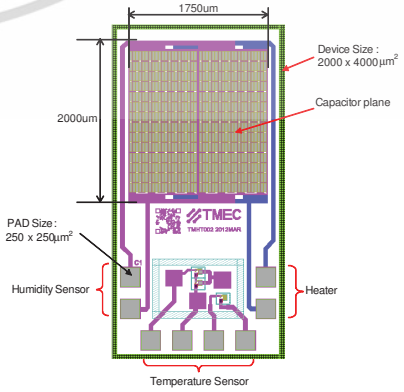
โดยทั่วไปแล้วความชื้นในอากาศที่เราเรียกกันสั้นๆ ว่าความชื้น ซึ่งมาจากคำเต็มๆว่า ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity หรือ RH) หมายถึงอัตราส่วนระหว่างปริมาณความชื้น (ไอน้ำ) ที่มีอยู่จริงในอากาศกับปริมาณความชื้น (ไอน้ำ) ที่อากาศขณะนั้นจะรองรับได้เต็มที่ ณ อุณหภูมิเดียวกัน [1] หากปริมาณความชื้นมีมากกว่าจะกลั่นตัวเป็นหยดน้ำหน่วยของความชื้นสัมพัทธ์จึงออกมาเป็นเปอร์เซ็น (%) ดังสมการที่ 2

$$RH = \frac{r}{r_s} \times 100 \qquad (2)$$

เมื่อ RH คือ ความชื้นสัมพัทธ์มีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์, r คือ อัตราส่วนผสม, r_s คือ อัตราส่วนผสมในภาวะอิ่มตัว

3. การออกแบบและกระบวนการสร้างหัววัดความชื้น

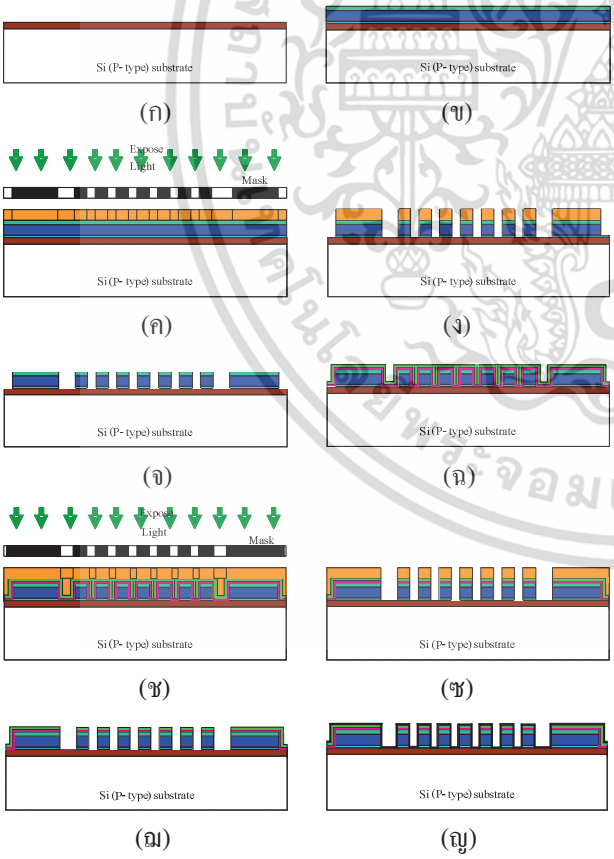
ออกแบบอุปกรณ์วัดความชื้นด้วยโปรแกรม L-Edit จากนั้นนำลวดลายต้นแบบที่ได้ไปทำกระบวนการสร้างเป็นกระจกต้นแบบ โดยได้ทำการออกแบบหัววัดวัดความชื้น (Humidity sensor) ให้อยู่ร่วมกันกับฮีทเตอร์(Heater)และหัววัดอุณหภูมิ (Temperature Sensor) แสดงในรูปที่ 3

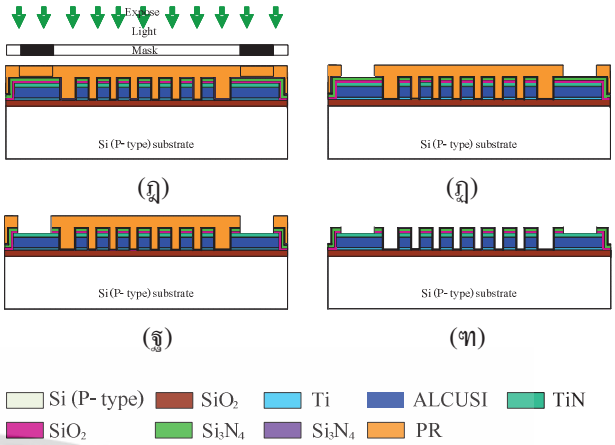


รูปที่ 3 รูปแบบโครงสร้างหัววัดความชื้นที่ออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกแบบให้มีพื้นที่ตรวจรับความชื้นขนาด 1750um*2000um ระยะห่างระหว่างชี่หวี 1.5 um ขนาดของขั้วที่ต่อใช้งาน 250um*250um กระบวนการสร้างหัววัดความชื้นโดยอาศัยเทคโนโลยีกระบวนการผลิตแบบซีมอส เริ่มจากการนำแผ่นซิลิคอนชนิดพี ทำความสะอาดด้วยเครื่องทำความสะอาดแบบอัตโนมัติ สร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ด้วยเครื่อง LPCVD หนา 560 อังสตรอม จากนั้นสร้างฟิล์มโลหะด้วยกระบวนการสปัตเตอริ ต่อด้วยการสร้างลวดลายวงจรชั้นโลหะด้วยกระบวนการถ่ายย่อแบบประกอบด้วย การเคลือบฟิล์มไวแสง การฉายแสง และการล้างน้ำยาไวแสงตรงที่ไม่ต้องการออก แล้วทำการกัดลวดลายวงจรชั้นโลหะและลอกฟิล์มไวแสงออก สร้างฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์ และฟิล์มซิลิคอนไนไตรด์ หนา 3,000 อังสตรอมด้วยกระบวนการ PEVCD เป็นชั้น Passivation ชั้นแรก จากนั้นทำกระบวนการโฟโต้ลิโธกราฟฟี่ สร้างลวดลายส่วนหัววัดความชื้นบนชั้นฟิล์ม เปิดส่วน SENSE (Sensor open) และกัดลวดลายวงจรชั้นส่วนหัววัดความชื้น แล้วปลูกชั้นฟิล์มซิลิคอนไนไตรด์ สำหรับดูดซับความชื้นและเป็นชั้นป้องกันการขีดข่วนของผิวหน้าของชิ้นงาน แล้วเปิดขั้วด้วยกระบวนการถ่ายย่อแบบ เพื่อเปิดบริเวณขั้วสำหรับวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าและต่อใช้งาน แล้วซินเตอร์ริ่งที่ 400°C 30 นาที ในบรรยากาศไนโตรเจน ดังแสดงในรูปที่ 4 (ก)-(ฑ)





รูปที่ 4 กระบวนการสร้างหัววัดความชื้น, (ก) สร้างฟิล์ม SiO_2 ด้วย LPCVD, (ข) สร้างชั้นฟิล์มโลหะด้วยกระบวนการสปัตเตอริง, (ค)-(จ) กระบวนการโฟโต้ลิโธกราฟฟี่ สำหรับสร้างลวดลายวงจรและกัดลวดลายวงจรชั้นโลหะ, (ฉ) สร้างฟิล์ม SiO_2 และฟิล์ม Si_3N_4 โดย PEVCD , (ช)-(ฌ) กระบวนการโฟโต้ลิโธกราฟฟี่ และกัดชั้นฟิล์มสำหรับ Passivation 1, (ญ)-(ฑ) ปลูกฟิล์ม Si_3N_4 เป็นชั้น Passivation 2 และกัดเปิดทำขั้วไว้ต่อใช้งาน

4. การทดลองและผลการทดลอง

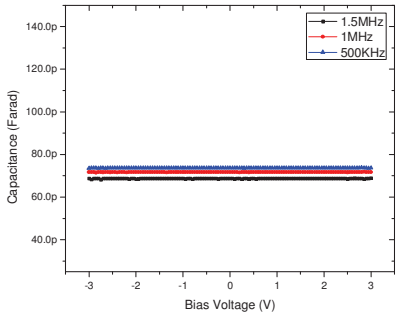
4.1 การวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของหัววัดความชื้น

วัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเครื่องโพรบสเตชั่น จากนั้นนำแผ่นไปทำการตัดแบ่งอุปกรณ์แต่ละตัวและนำชิปไปเชื่อมต่อสาย IC ด้วยลวดทองคำแล้วก็นำไปทำการบรรจุภัณฑ์สำหรับนำไปใช้งานต่อไป นำอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้นมาวัดกระแส , แรงดันและความจุไฟฟ้า ซึ่งจะทำการต่ออุปกรณ์ โดยเครื่องมือประกอบด้วยหัวเข็มวัดชิ้นงาน (Probe Station) ต่อกับ Precision Semiconductor Parameter Analyzer ควบคุมการทำงานและบันทึกผลด้วยโปแกรม Easy Expert โดยป้อนแรงดันไบอัสกระแสตรงที่มีแรงดัน 30mV กระแสสลับใช้ในกระบวนการวัดค่าความจุไฟฟ้า จะถูกปรับเปลี่ยนจาก -3V ถึง 3V วัดคุณสมบัติความจุไฟฟ้าและแรงดันของหัววัดความชื้นที่ค่าความถี่ไฟฟ้าต่างๆ ที่ 500KHz, 1MHz และ 1.5MHz แล้ววัดคุณสมบัติความจุไฟฟ้าของหัววัดความชื้นที่อุณหภูมิต่างๆ ตั้งแต่ 25 °C – 50 °C และทดสอบหัววัดความชื้นด้วยชุดทดสอบค่าความชื้นมาตรฐานที่ความชื้นในอากาศเท่ากับ 12%RH, 33%RH, 75%RH และ 100 %RH

4.2 ผลการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าระหว่างกระแสและแรงดันของหัววัดความชื้น

ผลการวัดความจุไฟฟ้าและแรงดันไฟตรงของหัววัดความชื้นที่ค่าความถี่ไฟฟ้าค่าต่างๆ

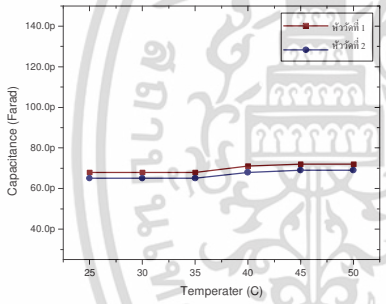
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5 ผลค่าความจุไฟฟ้าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่ไฟฟ้า

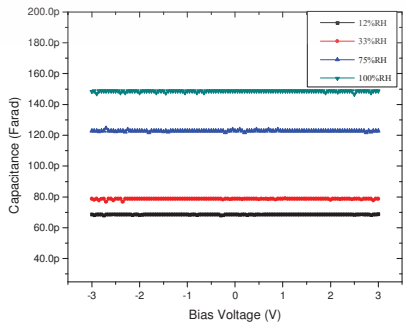
จากรูปที่ 5 จะพบว่าเมื่อป้อนแรงดันไบอัสกระแสตรง ความจุไฟฟ้ามีค่าคงที่ในทุกๆ แรงดันไฟตรง และเมื่อเพิ่มค่าความถี่ไฟฟ้า จะเห็นว่าค่าความจุไฟฟ้ามีค่าลดลงด้วย เนื่องจากอากาศที่อยู่ระหว่างขั้วมีค่าความต้านทางค่าหนึ่ง จึงเป็นเหตุทำให้ค่าความจุไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงขึ้นกับความถี่ในการวัด โดยจากการวัดที่ค่าความถี่ 500KHz , 1MHz และ 1.5 MHz จะมีค่าความจุไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 73.6 , 71.7 และ 68.5pF ตามลำดับ

ผลการวัดความจุไฟฟ้าและแรงดันของหัววัดความชื้นที่อุณหภูมิต่างๆ

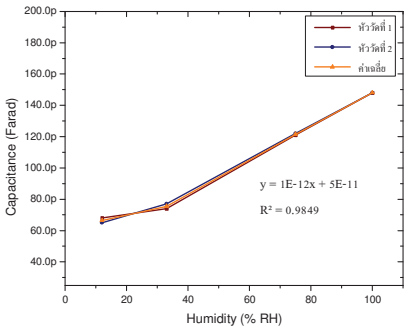


รูปที่ 6 ผลของค่าความจุไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ

จากรูปที่ 6 ผลการทดสอบหัววัดความชื้นด้วยชุดทดสอบค่าความชื้นมาตรฐาน 1 ค่า 75%RH ที่อุณหภูมิระหว่าง 25°C - 50°C ค่าความจุไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยที่ 4 pF อันเนื่องมากจาก อุณหภูมิที่สูงขึ้นจะมีส่วนที่สามารถระเหยเป็นไอ จากไอส่วนนี้เอง ที่ทำให้หัววัดความชื้นอ่านค่าคลาดเคลื่อนไปเล็กน้อย จึงสรุปได้ว่าค่าความจุไฟฟ้าของหัววัดความชื้นที่ผลิตจะไม่แปรผันตามอุณหภูมิ



รูปที่ 7 ผลของค่าความจุไฟฟ้าและแรงดันที่ค่าความชื้นมาตรฐานต่างๆ



รูปที่ 8 ผลของค่าความจุไฟฟ้าและค่าความชื้น

จากรูปที่ 7 และ 8 จะพบว่า ค่าความจุไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นตามค่าความชื้นในอากาศที่เพิ่มขึ้น โดยที่ความชื้นในอากาศเท่ากับ 12%RH , 33%RH,75%RH และ 100 %RH จะมีค่าความจุไฟฟ้าเท่ากับ 67.7pF, 78.5 pF, 122.7pF และ 142.8 pF ตามลำดับ หัววัดความชื้นมีความไวในการตอบสนองที่ 1pF/%RH

5. สรุปผลการทดลอง

จากการออกแบบและกระบวนการสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้นแบบตัวเก็บประจุ (Capacitive Humidity Sensor) พัฒนาโดยศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) แล้วทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าพบว่า ความถี่และอุณหภูมิไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของความชื้น การวัดความชื้นเทียบกับมาตรฐานที่ค่าความชื้น 12%RH, 33%RH ,75%RHและ100%RH จะพบว่าคุณสมบัติทางไฟฟ้า ความจุไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นตามความชื้นในอากาศโดยที่ความชื้นที่ได้มีค่าความจุไฟฟ้าได้เฉลี่ย 67.7pF, 78.5 pF, 122.7pF และ 142.8 pF ตามลำดับมีค่าใกล้เคียงกับที่ออกแบบไว้ มีความไวในการตอบสนองที่ 1pF/%RH จะทำการวิจัยและพัฒนา สู่เชิงพาณิชย์ต่อไป

เอกสารอ้างอิง

[1] Adamo, F. et. al, “Design and Development of a sensor prototype for Soil Moisture Measurement: First Experimental Results”, Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings, 2007. IMTC 2007, IEEE, pp 1-5, 2007

[2] Kummer, A.M.; Hierlemann, A., “Configurable electrodes for capacitive-type sensors and chemical sensors” Sensor Journal, IEEE, vol. 6 Issue 1, 3-10, 2006.

[3] Sakai, Y. et. al, “Water resistive humidity sensor composed of interpenetrating polymer networks of hydrophilic and hydrophilic and hydrophobic methacrylate ”, Solid-State Sensors and Actuators, 562-565, 1991.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

บทความกลุ่มอิเล็กทรอนิกส์(EL)

IP-EL1	**ศักยภาพการผลิตซิลิกอนเซ็นเซอร์ในประเทศไทย** *นิภาพรรณ กลั่นเงิน และอัมพร โพธิ์ใย* *ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ*	**743**
EL001	**การออกแบบและการสร้างหัววัดความชื้นสาหรับงานวัดความชื้นในดิน** *อาคม ศรีมหาเพท[1,2], วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง[2], พุทธพล เพ็งพัด[1], นิภาพรรณ กลั่นเงิน[1],* *ชาญเดช หรูอนันต์[1] และ อัมพร โพธิ์ใย[1]* *[1]ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ* *[2]สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง*	**747**
EL002	**The Optimization of P-buried Layer to Breakdown Voltage of Trench gate IGBT** *อมรรัตน์ เกิดประดิษฐ์[1] มนตรี แสนละมูล[2] วิสันต์ ตั้งวงษ์เจริญ[1]* *อัมพร โพธิ์ใย[2] และ วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง[1]* *[1]สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง* *[2]ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ*	**751**
EL003	**The Design and Fabrication to NPT-IGBT with Trench Gate Structure** *สันติพงศ์ เตชนราวงศ์[1] มนตรี แสนละมูล[2]* *อัมพร โพธิ์ใย[2] และ วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง[1]* *[1]สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง* *[2]ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ*	**755**
EL004	**Effect of Electron Irradiation on DC Characteristics of Silicon PiN Power Diode** *สธน ผ่องอำไพ[1], จิรวัฒน์ ปราบเขต[1], วิวัฒน์ อิทธิกุสุมาลย์[1],* *ภาสกณ มโนสุกฤตกูล[1], อัมพร โพธิ์ใย[2] และ วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง[1]* *[1]สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง* *[2]ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ*	**759**
EL005	**DC Characterization of Merged PiN Schottky Silicon Diodes** *สุกฤต วัฒนศรี[1], จิรวัฒน์ ปราบเขต[1], วิวัฒน์ อิทธิกุสุมาลย์[1],* *อัมพร โพธิ์ใย[2] และ วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง[1]* *[1]สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง* *[2]ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ*	**763**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบและการสร้างหัววัดความชื้นสำหรับงานวัดความชื้นในดิน

The Capacitive Soil moisture sensor: Design and Assembly

อาคม ศรีหาเพท[1,2],วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง[2], พุทธพล เพ็งพัด[1], นิภาพรรณ กลั่นเงิน[1], ชาญเดช หรูอนันต์[1]และ อัมพร โพธิ์ใย[1]

[1] ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ

51/4 หมู่ที่ 1 วังตะเคียน อำเภอเมือง ฉะเชิงเทรา 24000 โทร. 038-857-100 ถึง 9 E-mail: Arckom.srihapat@nectec.or.th

[2] สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

3 หมู่ที่ 2 ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 โทร. 0-2326-4550

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนออุปกรณ์ตรวจวัดความชื้นแบบตัวเก็บประจุ (Capacitive Humidity Sensor) ออกแบบให้เหมาะสมสำหรับการใช้วัดค่าความชื้นในดิน พัฒนาโดยศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) โดยใช้เทคนิคการสร้างชั้น Aluminum ชั้นเดียว เป็นโครงสร้างแบบหวีสลับที่มีการออกแบบให้เป็นเครือข่ายรวมของส่วนย่อยๆ 300 ส่วน โดยมีชั้นฟิล์มซิลิคอนไนไตรด์หนา 100 nm เป็นชั้นป้องกันขั้วโลหะ เพื่อนำมาประยุกต์ใช้วัดความชื้นในดิน โดยอาศัยการวัดความชื้นของโพรงอากาศในดิน ซึ่งการทดลองนี้ได้นำตัวอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้นแบบตัวเก็บประจุนี้ใช้งานร่วมกับวงจรสร้างคลื่นความถี่ (Oscillator) โดยอุปกรณ์ตรวจวัดนี้จะควบคุมค่า Time constant ของวงจรนี้ ชุดหัววัดถูกประกอบโดยปิดบริเวณส่วนที่เปิดรับอากาศด้วยแผ่นกรอง (Filter) ป้องกันไม่ให้เนื้อดินสัมผัสกับอุปกรณ์ตรวจวัดโดยตรงจึงมีลักษณะเป็นโพรงอากาศ และเพียงความชื้นหรือน้ำเท่านั้นที่จะผ่านเข้ามาสัมผัสกับขั้วโลหะของตัวอุปกรณ์ ผลการตอบสนองต่อความชื้นในดินของกลุ่มตัวอย่างอุปกรณ์มีลักษณะเป็นเชิงเส้น ให้ค่าการเปลี่ยนแปลงความถี่ (Δf) ~200 Hz ในช่วงเปอร์เซ็นต์ความชื้นดินจาก 10-50% $W_{น้ำ}/W_{ดิน}$ โดยการตอบสนองของความถี่กับความชื้นในดินเป็นแบบเชิงลบ โดยมีความละเอียดการวัดความชื้นดินที่ 1% $W_{น้ำ}/W_{ดิน}$

คำสำคัญ: หัววัดความชื้น, ตัวเก็บประจุ, ความชื้นสัมพัทธ์

Abstract

This paper presents the capacitive humidity sensor designed to suit soil moisture measurement developed by Thai Microelectronics Center (TMEC). The device is an integrated Aluminum interdigitated cells, in which includes around 300 cells and silicon nitride film 100 nm thick was used as a protection layer. The sensor combined with an oscillator circuit provides frequency output in which the output frequency related to relative humidity. The sensor was packaged with soil filter preventing soil contents come to contact with the sensing area. This structure also create air void which contain only air moisture or filtered water for the sensor's sensing process. Group of the sensors show a good linear negative response to soil humidity with Δf of ~200 Hz at the range of 10% to 50% soil weight/water weight (W/W) with measuring resolution of 1% W/W.

Keywords: Soil moisture sensor, Capacitive

1. บทนำ

เทคนิคการวัดความชื้นในดินในปัจจุบันมีอยู่สองแบบ แบบโดยตรง และแบบโดยอ้อม การวัดแบบโดยตรงมีแม่นยำสูง ซึ่งเป็นวิธีการวัดชั่งน้ำหนักดินเปียกเทียบกับดินที่ผ่านการอบแห้ง เมื่อรู้น้ำหนักของน้ำที่หายไปจึงคำนวณออกมาเป็นค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักของน้ำในดินต่อน้ำหนักดิน แต่เทคนิคนี้จะใช้เวลานานในการตรวจสอบต่อหนึ่งตัวอย่าง ดังนั้นการวัดความชื้นดินโดยอ้อม ซึ่งใช้อุปกรณ์หลายชนิดเช่น เครื่องวัดการนำไฟฟ้าของดิน (Electrical conductivity, Electrical resistance) เครื่องวัดความเครียดเมตริกของความชื้นในดิน (Tensiometer) หรือ เครื่องวัดการแผ่รังสีนิวตรอน (Neutral meter gauge) โดยเทคนิคการวัดการนำไฟฟ้าของดินนั้น จะขึ้นอยู่กับชนิดของดินในแต่ละพื้นที่ ส่วนเครื่องวัดความเครียดเมตริกของความชื้นในดิน ตัวอุปกรณ์จะถูกประกอบขึ้นอย่างซับซ้อนและมีราคาแพง ซึ่งเหมือนกับเครื่องวัดการแผ่รังสีนิวตรอนซึ่งมีราคาสูงเช่นเดียวกัน

ดังนั้นศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์จึงมีความสนใจที่จะสร้างเครื่องมือวัดความชื้นในดินที่ใช้หลักการวัดที่ไม่ซับซ้อน สะดวกในการใช้งานและสามารถผลิตจำนวนมากได้ โดยที่มีราคาย่อมเยาว์ ซึ่งเหมาะสมการงานทางด้านวิจัยและพัฒนา ที่มีความจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์วัดความชื้นดินจำนวนมาก หรือจำเป็นต้องใช้ในตำแหน่งที่ต้องติดตั้งนอกอาคารแบบถาวร

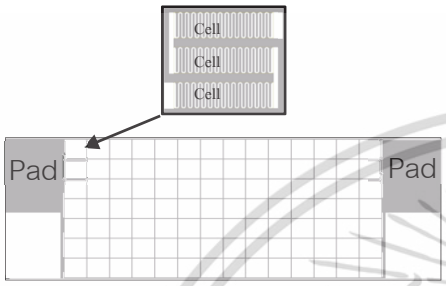
2. โครงสร้างและหลักการทำงาน

2.1 โครงสร้างของอุปกรณ์

หัววัดความชื้นในอากาศสามารถแสดงรูปแบบโครงสร้างดังรูปที่ 1 โดยยึดโครงสร้างที่มีกระบวนการผลิตไม่ซับซ้อนคือใช้ชั้นโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชั้นเดียวแบบหวีสลับ (Interdigitated) โดยใช้เทคโนโลยีการสร้างกระจกต้นแบบในการสร้างเส้นลายโลหะขนาดเล็ก (เล็กได้ถึง 0.5 ไมครอน) ซึ่งเป็นลักษณะโครงสร้างหัววัดแบบ Capacitive โดยทั่วไป แต่จากการที่สามารถทำให้ลายวงจรมีขนาดเล็กทำให้สามารถสร้างให้อุปกรณ์มีค่าการเก็บประจุที่สูงอยู่ในระดับ 10 - 40 pF ซึ่งอยู่ในระดับที่สามารถทำให้วงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้สร้างความถี่ตอบสนองได้ และมีขนาดชิปที่เล็กกว่าอุปกรณ์ทั่วๆ ไปในท้องตลาด (ขนาดชิป ~ 2*4 mm)



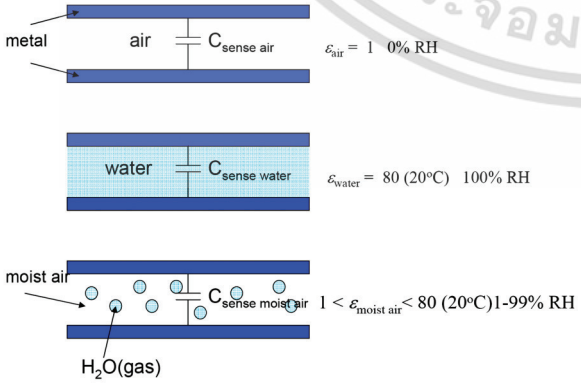
รูปที่ 1 รูปแบบโครงสร้างหัววัดความชื้น

2.2 หลักการทำงาน

หลักการทำงานของอุปกรณ์วัดความชื้นแบบตัวเก็บประจุนี้ใช้คุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงค่าตัวเก็บประจุที่ขึ้นอยู่กับค่า relative permittivity ของ dielectric ของตัวเก็บประจุนั้น แสดงดังสมการที่ 1 ค่าตัวเก็บประจุเท่ากับ

$$C = \frac{\varepsilon_o \varepsilon_s A}{d} \qquad (1)$$

โดยที่ ε_o คือค่า absolute permittivity ของอากาศแห้งซึ่งมีค่าเท่ากับ 8.85E-12 F/m, ε_s คือค่า relative permittivity ของ dielectric ที่ใช้ในตัวเก็บประจุ (ไม่มีหน่วย), A คือพื้นที่ของตัวเก็บประจุ และ d คือความหนาของชั้น dielectric ที่ขั้นกลางระหว่างขั้วตัวนำไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ



รูปที่ 2 หลักการใช้ตัวเก็บประจุวัดค่าความชื้นในอากาศ

ในการนำตัวเก็บประจุวัดค่า Relative humidity (%RH) นี้แสดงกระบวนการดังรูปที่ 2 ดังจะเห็นจากการเปรียบเทียบค่า relative permittivity ของอากาศแห้งและน้ำซึ่งสามารถเทียบเคียงได้กับค่า 0%RH และค่า 100%RH ตามลำดับ (ที่ทุกๆอุณหภูมิถ้าค่า relative permittivity มีค่าเท่ากับ 100% ไอน้ำในอากาศจะถูกควบแน่นให้อยู่ในสถานะเป็นของเหลว) ดังนั้นอากาศที่มีความชื้นระหว่าง 0 ถึง 100%RH จึงมีผลทำให้ค่าของตัวเก็บประจุนี้มีค่าแตกต่างกันในลักษณะเชิงเส้นได้ ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศให้เป็นค่าทางไฟฟ้าได้โดยตรง

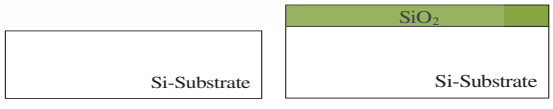
ความชื้นในดิน (soil moisture) คือปริมาณน้ำที่ถูกอนุภาคของดินดูดยึดไว้ ทำให้น้ำที่แทรกซึมลงในดินยังคงค้างอยู่ตามช่องของเนื้อดิน (capillary water)หรือเคลือบเป็นฟิล์มรอบอนุภาคดิน (hygroscopic water) การวัดปริมาณน้ำในดิน เก็บตัวอย่างดินที่ต้องการทดสอบปริมาณน้ำในดิน นำอบแห้งให้สนิทที่อุณหภูมิ 105 – 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลาไม่ต่ำกว่า 15 ชั่วโมง จนกระทั่งน้ำหนักดินไม่เปลี่ยนแปลง แล้วจึงนำดินไปชั่งน้ำหนักอีกครั้ง น้ำหนักที่หายไปจะเป็นค่าปริมาณน้ำที่อยู่ในดินนั่นเอง การวัดปริมาณน้ำด้วยวิธีนี้สามารถบอกค่าเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งหมายถึงน้ำหนักของน้ำคิดเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักดินที่แห้งสนิท และสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2

$$S_w = \frac{W_w}{W_s} \times 100 \qquad (2)$$

โดย S_w คือปริมาณน้ำในดินมีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักW_wคือน้ำหนักของน้ำในดิน(กรัม), W_s คือน้ำหนักของดินที่แห้งสนิท(กรัม),

3. กระบวนการสร้างหัววัดความชื้น

กระบวนการสร้างหัววัดความชื้นโดย อาศัยเทคโนโลยีกระบวนการผลิตแบบซีมอส เริ่มจากการนำแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น สภาพความต้านทาน 2-4 Ω-cm ทำการทำความสะอาดด้วยเครื่องทำความสะอาดแบบอัตโนมัติแสดงดังในรูปที่ 3(ก) สร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ด้วยเครื่องปลูกฟิล์มบางแบบไอสารเคมีแบบพลาสมา (PECVD) ที่ความหนา 20,000 อังสตรอม แสดงดังในรูปที่ 3(ข)

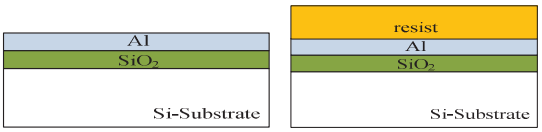


(ก.) (ข.)

รูปที่ 3 กระบวนการสร้าง (ก) การทำความสะอาดและ (ข) การสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

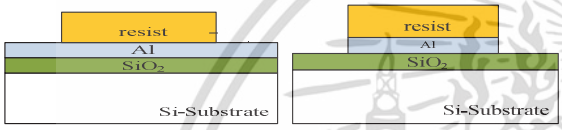
จากนั้นสร้างชั้นโลหะอะลูมินั่มด้วยวิธีการสปัตเตอร์ริ่งแสดงดังในรูปที่ 4 (ก) และเคลือบน้ำยาไวแสงแสดงดังในรูปที่ 4 (ข) ในกระบวนการโฟโต้ลิโธกราฟฟี่เพื่อสำหรับการสร้างลวดลาย



(ก.) (ข.)

รูปที่ 4 กระบวนการสร้างชั้นฟิล์ม (ก) การสร้างชั้นโลหะและ (ข) กระบวนการเคลือบน้ำยาไวแสง

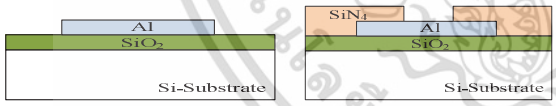
ในขั้นตอนของการฉายแสง (Expose) และขั้นตอนการล้างลาย (Developer) ซึ่งเป็นผลให้เกิดลวดลายสำหรับตัวอุปกรณ์แสดงดังรูปที่ 5 (ก) จากนั้นกัดชั้นโลหะด้วยกระบวนการกัดแบบพลาสมาดังรูปที่ 5(ข)



(ก.) (ข.)

รูปที่ 5 กระบวนการสร้างชั้นฟิล์ม (ก)กระบวนการโฟโต้ลิโธกราฟฟี่และ (ข) กระบวนการกัดชั้นโลหะ

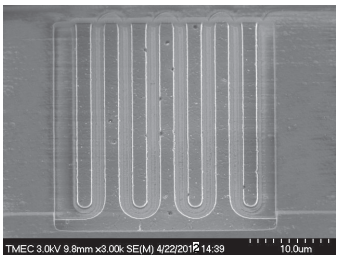
แล้วซินเตอร์ริ่งและสร้างชั้นซิลิคอนไนไตรด์ด้วยเครื่องปลูกฟิล์มบางแบบไอสารเคมีแบบพลาสมา (PECVD) แล้วทำการโฟโต้ลิโธกราฟฟี่สำหรับการสร้างลวดลายในการกัดชั้นซิลิคอนไนไตรด์เพื่อทำชั้นฉนวนป้องกัน แสดงดังในรูปที่ 6 (ก) และ (ข)



(ก.) (ข.)

รูปที่ 6 กระบวนการสร้าง (ก) กระบวนการซินเตอร์ริ่ง, (ข) การสร้างซิลิคอนไนไตรด์และการสร้างลวดลายในการกัดชั้นซิลิคอนไนไตรด์

รูปที่ 7 แสดงภาพถ่ายหัววัดความชื้นที่ผ่านกระบวนการผลิตที่เสร็จสมบูรณ์

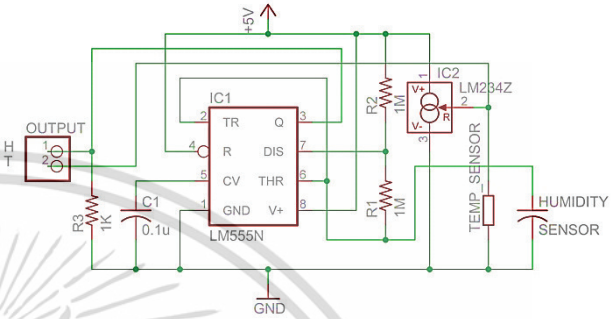


รูปที่ 7 ภาพถ่ายหัววัดความชื้นที่ผ่านกระบวนการผลิตที่เสร็จสมบูรณ์

4. การทดลองและผลการทดลอง

4.1 วงจรวัดผลการทดลอง

วงจรวัดผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 8 โดยวงจรประกอบด้วยส่วนของวงจรสร้างความถี่จาก IC 555 เนื่องจากค่าความถี่ที่สร้างจากวงจรนี้ถูกควบคุมด้วยตัวเก็บประจุค่าหนึ่งๆจากรูปแสดงภาพวงจรที่ใช้สร้างความถี่จากหัววัดความชื้นที่สร้าง



รูปที่ 8 วงจรที่ใช้สร้างความถี่จากหัววัดความชื้นที่สร้างขึ้น

โดยที่สมการความถี่ที่สร้างจากวงจรนี้แสดงได้ดังสมการที่ 3

$$f = \frac{1.44}{(R_2 + 2R_1)C_{sensor}} \quad (3)$$

โดยที่ R คือความต้านทานที่ต่อ

รูปที่ 8 ชุดหัววัดความชื้นที่ประกอบร่วมเข้ากับวงจรรวม

วงจรนี้สร้างความถี่เป็นลักษณะสัญญาณฐานเวลาดังนั้นนำไปประมวลผลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR ถูกนำมาใช้เนื่องจากมี Port digital เพียงพอที่จะใช้เป็นช่องนำสัญญาณขาเข้าจากวงจรสร้างความถี่ และใช้เป็นสัญญาณขาออกไปควบคุมจอแสดงผลแบบ LCD ใช้สถาปัตยกรรมของบอร์ด Arduino กับไมโครคอนโทรลเลอร์ ATMEGA 168 และLCD shield ที่ออกแบบขึ้นมาเฉพาะเพื่อใช้กับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์

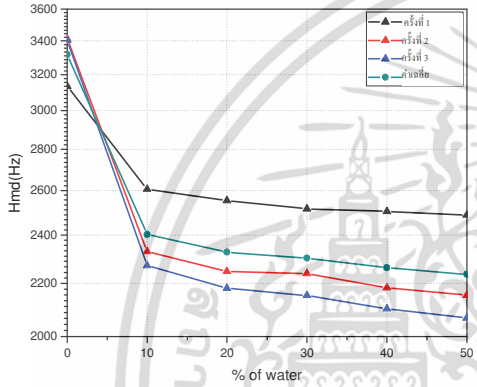
ใช้หัววัด 2 ชุดวัดแล้วทำการวัดซ้ำ 3 ครั้ง ทดสอบกับดินที่ค่าความชื้นต่างๆ ที่ 10, 20, 30, 40, 50 $W_{น้ำ}/W_{ดิน}$ แสดงดังในรูปที่ 9 แสดงผลเป็นค่าความถี่ที่อ่านได้จากหัววัดความชื้น และนำหัววัดไปทดสอบกับความชื้นอากาศมาตรฐานด้วย เพื่อเปรียบเทียบค่าการตอบสนองของหัววัดที่ทำการผลิตขึ้นมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 9 ดินตัวอย่างที่ค่าความชื้นต่างๆ ที่ใช้ในการวัด

4.2 ผลการตอบสนองต่อความชื้นในดินของหัววัดที่ 1

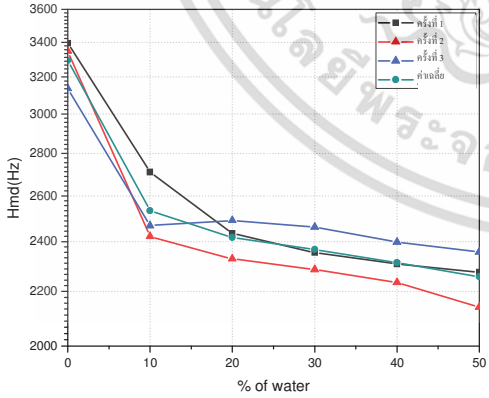
รูปที่ 10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นในดินและค่าที่ได้จากการวัดของหัววัดที่ 1 ทำการวัดซ้ำ 3 ครั้ง ความชันของการกราฟคือค่าความไวในการตอบสนองของหัววัด (Sensitivity)



รูปที่ 10 การตอบสนองของหัววัดความชื้นดินหัวที่ 1

4.3 ผลการตอบสนองต่อความชื้นในดินของหัววัดที่ 2

รูปที่ 11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นในดินและค่าที่ได้จากการวัดของหัววัดที่ 2 ทำการวัดซ้ำ 3 ครั้ง



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นในดินหัวที่ 2 และค่าที่ได้การวัด

จะเห็นได้ว่าการตอบสนองทั้งสองหัววัดมีลักษณะเชิงเส้นในช่วง 10-50 % $W_{น้ำ}/W_{ดิน}$ การตอบสนองของความถี่กับความชื้นในดินเป็นแบบเชิงลบ โดยมีความละเอียดการวัดความชื้นดินที่ 1% $W_{น้ำ}/W_{ดิน}$

ความชื้นมาตรฐาน	เซนเซอร์ หัวที่ 1	เซนเซอร์ หัวที่ 2
75%RH (NaCl)	2105.33	2148.67
33%RH ($MgCl_2$)	5983.67	5739.33
12%RH (LiCl)	7154.33	6989.67

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบการตรวจวัดค่าความชื้นอากาศมาตรฐานต่างๆ ระหว่างหัววัดความชื้น 2 ชุด

จะเห็นได้ว่าที่ความชื้นอากาศสูง (มากกว่า 75%RH) มีผลการวัดที่อยู่ในย่านเดียวกันกับผลการวัดค่าความชื้นในดินช่วงประมาณ 30% ถึง 50% ความชื้นดิน

5. สรุปผลการทดลอง

จากการวัดความชื้นในดินที่เปอร์เซนของน้ำต่อดินต่างๆ กัน จะเห็นว่าที่เปอร์เซ็นของน้ำในดินเท่ากัน ค่าความชื้นที่วัดได้ในแต่ละครั้งจะไม่เท่ากันแต่จะอยู่ในระดับที่ใกล้เคียงกันและมีแนวโน้มที่ค่าความชื้นจะลดลง คือ เมื่อเปอร์เซนของน้ำต่อดินเพิ่มขึ้นค่าความชื้นที่วัดได้จะลดต่ำลงแต่ในช่วงการวัดหลังๆค่าความชื้นที่วัดได้บางค่าไม่เป็นไปตามช่วงแรกคือมีบางค่าความชื้นที่เพิ่มขึ้นและลดลงสลับกัน ทั้งนี้เนื่องมาจากแผ่นฟิลเตอร์ที่ใช้ในการป้องกันผิวหน้าชิปและเป็นตัวกรองน้ำนั้นมีลักษณะเป็นรูพรุนซึ่งอาจทำให้เศษดินเข้าไปติดอยู่นั้นไม่สามารถถอดออกมาเพื่อทำความสะอาดได้ทั้งหมดเมื่อนำไปเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซนของน้ำกับค่าความชื้นได้กราฟลักษณะเป็นเส้นตรงและเมื่อหาความชันจากกราฟจะได้ความชันของหัวที่ 1 เท่ากับ 6.9 Hz/%ของน้ำ และหัวที่ 2 เท่ากับ 4.2 Hz/%ของน้ำ เปรียบเทียบกับความชื้นอากาศมาตรฐานพบว่าที่ความชื้นอากาศสูง (มากกว่า75%RH) มีผลการวัดที่อยู่ในย่านเดียวกันกับผลการวัดค่าความชื้นในดินช่วงประมาณ 10-50% $W_{น้ำ}/W_{ดิน}$ การตอบสนองของความถี่กับความชื้นในดินเป็นแบบเชิงลบ มีความละเอียดการวัดความชื้นดินที่ 1% $W_{น้ำ}/W_{ดิน}$ นำผลที่ได้ไปพัฒนาเพื่อให้ใช้งานจริงต่อไป

เอกสารอ้างอิง

[1] Adamo, F. et. al, “Design and Development of a sensor prototype for Soil Moisture Measurement: First Experimental Results”, Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings, 2007. IMTC 2007, IEEE, pp 1-5, 2007

[2] Kummer, A.M.; Hierlemann, A., “Configurable electrodes for capacitive-type sensors and chemical sensors” Sensor Journal, IEEE, vol. 6 Issue 1, 3-10, 2006.

[3] Sakai, Y. et. al, “Water resistive humidity sensor composed of interpenetrating polymer networks of hydrophilic and hydrophilic and hydrophobic methacrylate ”, Solid-State Sensors and Actuators, 562-565, 1991.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้