

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

รายงานโครงการวิจัย

เงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์

ประจำปีงบประมาณ 2551

ชื่อโครงการวิจัย

การกัดเคมีไฟฟ้าของเข็มวัดทั้งสแตนเลสสำหรับงานไมโครอิเล็กทรอนิกส์
Electrochemical etching of tungsten probe for microelectronics

หัวหน้าโครงการวิจัย

นายโยธิน วงศ์ประเสริฐ

ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

RCH
TK

7878.4
๒842ก

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 105791
วัน,เดือน,ปี..... - 2 S.ค. 2552

b. 1216085x
i.....

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้เสร็จอย่างสมบูรณ์ได้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณทุนอุดหนุนโครงการวิจัยโดยใช้เงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์ ประจำปีงบประมาณ 2551 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

โยธิน วงศ์ประเสริฐ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทคัดย่อ

เข็มวัดเป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างยิ่งในการวัดสัญญาณทางไฟฟ้าของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ เนื่องจากสมบัติทางไฟฟ้าจะขึ้นต่อสมบัติของเข็มวัดที่ดี คุณภาพของสัญญาณทางไฟฟ้าระหว่างการวัดจะปรากฏรวมอยู่กับสมบัติทางไฟฟ้าของตัวอุปกรณ์ด้วย สัญญาณที่ได้รับจากเข็มวัดจึงควรไม่มีผลกระทบต่อสมบัติทางไฟฟ้า หรือเข็มวัดต้องเข้ากับวงจรส่งผลกระทบต่อการทำงานของวงจรมินที่สุดเพื่อที่จะได้สัญญาณที่ทำการวัดมานั้นใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด

จากการทดลองสามารถสรุปเงื่อนไขที่ดีที่สุดคือ ขั้วโลหะที่ดีที่สุดคือ ลวดทองคำบริสุทธิ์ แต่มีราคาแพง ขั้วโลหะที่ทนต่อการกัดมากที่สุดคือ ลวดสเตนเลส ขั้วแบบวงแหวนทำให้เข็มวัดได้สมมาตร ขั้วโลหะแบบวงแหวนอยู่ที่ผิวสารละลายจะมีการกัดที่ดีที่สุด ทั้งสแตนต้องอยู่ในสารละลายน้อยที่สุด การไบอัสแรงดันต่ำ(3 V. 150mA)ให้ปลายวัดวัดที่สั้นแต่แหลม การไบอัสแรงดันสูง(13V 1000 mA) ให้ปลายเข็มยาวแต่ไม่แหลม และเข็มวัดมีความต้านทานต่ำมาก ๆ ($\sim 0 \Omega$)



ABSTRACT

Microelectronics probe is main of electrical properties testing, because micro probe properties are parasitic of resistance or capacitance in electrical characteristic. The best probe has not noise for measuring or lest noise as it can. The result of electrochemical etching by electrolyte such as hydrogen fluoride or potassium hydroxide are: the best of metal electrode is gold wire in ring shape, stainless electrode is potential corrosive by electrolyte, the best position of electrode is surface of solution, electrochemical polishing can do by put tungsten in deep of solution, long probe (L_p) is used low bias voltage (3 V. 150mA), diameter of porbe (D_p) is used by high bias voltage(13V 1000 mA) and resistance of tungsten probe is very low ($\sim 0 \Omega$).



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญเรื่อง

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	I
บทคัดย่อภาษาไทย.....	II
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	III
สารบัญเรื่อง.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญภาพ.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	5
2.1 เข็มวัด.....	5
2.1.1 คำแนะนำในการใช้เข็มวัด.....	7
2.1.2 ผลกระทบของเข็มวัดต่อการวัดสัญญาณ.....	8
2.2 การกักเคมีไฟฟ้า.....	9
2.2.1 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้า.....	10
2.2.2 ลักษณะแถบพลังงานที่บริเวณผิวสัมผัส.....	14
2.2.3 การกระจายตัวของศักดาไฟฟ้าภายในเซลล์เคมีไฟฟ้า.....	15
2.3 โครงสร้างโลหะของจรรยา.....	17
2.3.1 ชนิดของโลหะ.....	18
2.3.2 โลหะชั้นป้องกัน.....	22
2.3.3 ซิลิไซด์.....	23
2.3.4 ขั้วโลหะ.....	26
บทที่ 3 การออกแบบและสร้างชุดทดลอง.....	27
3.1 ชุดเครื่องกักเคมีไฟฟ้า.....	27
3.2 การเตรียมสารละลายอิเล็กโทรไลต์.....	29

สารบัญเรื่อง (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 การทดลองและวิเคราะห์ผล.....	30
4.1 การทดลองกักเคมีไฟฟ้า.....	30
4.2 การไปอัสและเวลาในการทดลอง.....	32
บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์.....	35
บรรณานุกรม.....	36
ภาคผนวก.....	37



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ลักษณะสำคัญที่เกิดขึ้น เนื่องจากการไบอัสเซลล์เคมีไฟฟ้าที่แตกต่างกัน..... 12
2.2	สมบัติของโลหะต่างๆที่นำมาใช้ในกระบวนการผลิตวงจรรวม..... 19
2.3	สมบัติของโลหะทองแดง/อลูมิเนียมที่การผลิตวงจรรวมขนาดวิกฤติต่างๆ..... 21
2.4	เปรียบเทียบสมบัติของโลหะทองแดงและอลูมิเนียม..... 22
2.5	เปรียบเทียบสมบัติของซิลิไซด์ที่มีความเสถียรในอุณหภูมิสูงถึง 1000 °C..... 24
4.1	เงื่อนไขการทดลอง..... 32



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญภาพ

รูปที่	หน้า
1.1	การวัดสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเข็มวัด.....1
1.2	ชุดเครื่องมือกักเคมีไฟฟ้า.....3
1.3	ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวของเข็มวัดทั้งสแตน.....4
2.1	ลักษณะการไบอัสเซลล์เคมีไฟฟ้าในลักษณะต่างๆ.....10
2.2	ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์เคมีไฟฟ้าระหว่างแผ่นซีลีคอน.....11
2.3	ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์เคมีไฟฟ้าในส่วนที่มีการไบอัสแบบแอนดิก.....13
2.4	ลักษณะแถบพลังงานที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างแผ่นซีลีคอน.....14
2.5	การกระจายตัวของศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณต่างๆ ภายในเซลล์เคมีไฟฟ้า.....15
2.6	โครงสร้างโลหะในวงจรรวม.....17
2.7	กระบวนการสร้างโลหะในวงจรรวม.....18
2.8	ภาพถ่าย SEM ชั้นโลหะในวงจรรวม.....18
2.9	ชั้นโลหะอลูมิเนียมในวงจรรวม.....19
2.10	ชั้นโลหะ Barrer ในวงจรรวม.....20
2.11	การเกิดสไปค์ของชั้นโลหะในวงจรรวม.....20
2.12	การเกิดเกิดความเสียหายของโลหะอลูมิเนียมของชั้นโลหะอลูมิเนียม.....21
2.13	ชั้นโลหะ Barrer สำหรับทองแดง.....23
2.14	ชั้นโลหะไททาเนียมทำหน้าที่โลหะ Barrer สำหรับทองแดง.....23
2.15	ชั้นโลหะซิลิไซด์ในรอยระหว่างรอยต่อซอร์ซ และเดรน.....24
2.16	ชั้นโลหะไททาเนียมโพลีไซด์.....24
2.17	ความต้านทานของชั้นโลหะซิลิไซด์ในที่อุณหภูมิแอนนิลต่างๆ.....25
2.18	ขนาดชั้นโลหะซิลิไซด์ในรอยระหว่างรอยต่อซอร์ซ และเดรนขนาดเล็ก.....25
2.19	กระบวนการสร้างชั้นโลหะซิลิไซด์.....26
2.20	ชั้นโลหะในชั้นต่างๆ ในวงจรรวม.....26
3.1	ชุดเครื่องมือกักเคมีไฟฟ้า.....27
3.2	ลวดทั้งสแตนบริสุทรี ขนาดต่างๆ28
3.3	หัวอิเล็กโตรดโลหะชนิดต่างๆ28
3.4	สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก และโปรเทสเซียมไฮดรอกไซด์.....29

สารบัญญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1	ลักษณะของขั้วโลหะแบบแท่งและแบบวงแหวน30
4.2	ลักษณะของเข็มวัดจากขั้วโลหะแบบแท่ง.....31
4.3	ลักษณะของเข็มวัดจากขั้วโลหะแบบวงแหวน.....31
4.4	ตำแหน่งของขั้วโลหะแบบวงแหวน.....32
4.5	เข็มวัดที่ได้ตามเงื่อนไขที่ 1.....33
4.6	เข็มวัดที่ได้ตามเงื่อนไขที่ 2.....33
4.7	เข็มวัดที่ได้ตามเงื่อนไขที่ 3.....33
4.8	เข็มวัดที่ได้ตามเงื่อนไขที่ 4.....33



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้าง VIII ถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

เข็มวัดเป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างยิ่งในการวัดสัญญาณทางไฟฟ้าของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ เนื่องจากสมบัติทางไฟฟ้าจะขึ้นต่อสมบัติของเข็มวัดที่ดี คุณภาพของสัญญาณทางไฟฟ้าระหว่างการวัดจะปรากฏรวมอยู่กับสมบัติทางไฟฟ้าของตัวอุปกรณ์ด้วย สัญญาณที่ได้รับจากเข็มวัดจึงควรไม่มีผลกระทบต่อสมบัติทางไฟฟ้า หรือเข็มวัดต้องเข้ากับวงจรส่งผลกระทบต่อการทำงานของวงจรน้อยที่สุดเพื่อที่จะได้สัญญาณที่ทำการวัดมานั้นใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด ถ้าวัดวัดทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณอินพุตไม่ว่าทางใดทางหนึ่งหรือทำให้การทำงานของวงจรเปลี่ยนไป จะทำให้ได้ผลลัพธ์ที่ผิดเพี้ยนไป ซึ่งต้องทำการศึกษาถึงจุดเด่นและจุดด้อยของหัววัดและวิธีการเลือกใช้วัดอย่างถูกต้อง

เข็มวัด

ในขั้นต้นจะกล่าวถึงพื้นฐานของทดสอบสมบัติทางไฟฟ้ากล่าวคือการต่อเข็มวัดเพื่อที่จะเชื่อมต่อทั้งทางกายภาพและทางไฟฟ้าระหว่างจุดทดสอบกับอุปกรณ์วัด ขึ้นอยู่กับชนิดของชิ้นงานว่ามีสมบัติอย่างไรเช่น ขนาดของจุดวัด ชนิดของวัสดุของจุดวัด ดังรูปที่ 1.1



(<http://aladin.artov.imm.cnr.it/images/ks%20probe.jpg>)

รูปที่ 1.1 การวัดสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเข็มวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างไรก็ตามในการใช้งานจริงนั้นเซมิเวดจะต้องสามารถใช้งานได้สะดวกและมีประสิทธิภาพในการต่อระหว่างการผลิต ซึ่งความสามารถในการเชื่อมต่อนั้นจะประกอบไปด้วยปัจจัยหลัก 3 ประการคือ ส่วนที่ใช้ยึดกับจุดทดสอบ, การส่งผลกระทบต่อการทำงานของวงจร และการส่งผ่านสัญญาณ

เซมิเวดในทางอุดมคติจะต้องมีลักษณะดังนี้

- สามารถต่อใช้งานได้ง่ายและสะดวก
- สามารถวัดสัญญาณได้ไม่ผิดเพี้ยน
- ไม่มีปัญหาเรื่องความต้านทานกับตัววงจรและอุปกรณ์
- ปราศจากสัญญาณรบกวน

สามารถต่อใช้งานได้ง่ายและสะดวก ความสามารถนี้เป็นหนึ่งในความต้องการพื้นฐานในการวัดสัญญาณที่จะต้องสามารถใช้งานได้ง่ายและสะดวก ซึ่งสำหรับวงจรที่มีขนาดเล็ก เช่น วงจรที่ใช้ Surface Mount Technology (SMT) จะต้องมีความสะดวกในการเคลื่อนย้ายเซมิเวดสัญญาณไปยังวงจรรายย่อยต่างๆ

ภายในแผ่นวงจรรวมนั้นได้ง่ายและสามารถเปลี่ยนหัวต่อของเซมิเวดในการวัดอุปกรณ์ SMT แต่ละชนิดได้ตามขนาดและชนิดของขั้วสัมผัส

สามารถวัดสัญญาณได้ไม่ผิดเพี้ยน เซมิเวดในทางอุดมคติจะต้องสามารถส่งผ่านทุกๆสัญญาณจากหัววัดสัญญาณของเซมิเวดไปยังเครื่องวัดได้อย่างไม่ผิดเพี้ยน อาจจะสามารถกล่าวได้ว่าสัญญาณที่เกิดขึ้นที่เซมิเวดสัญญาณของเซมิเวดควรจะมีลักษณะตรงกันกับสัญญาณที่เอาท์พุทของวงจรรวม

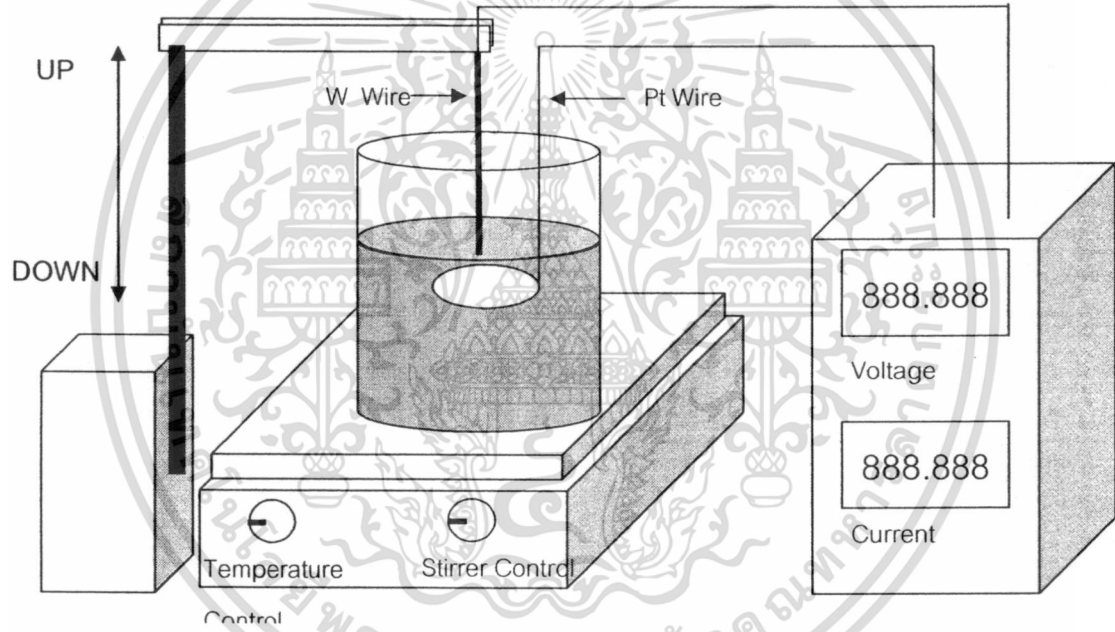
ไม่มีปัญหาเรื่องความต้านทานกับวงจรรวมและอุปกรณ์วัด การวัดด้วยเซมิเวดจะต่อกับแหล่งจ่ายสัญญาณไฟฟ้า ซึ่งอุปกรณ์ภายนอกที่นำไปต่อด้วยซึ่งจะเหมือนเป็นการเพิ่มความต้านทานของความต้านทานให้กับแหล่งกำเนิดสัญญาณเมื่อมีกระแสไหลเข้ามายังอุปกรณ์ เป็นผลให้การทำงานของวงจรที่ใช้เป็นจุดทดสอบเปลี่ยนไปและทำให้ลักษณะของสัญญาณที่ได้มีการเปลี่ยนแปลงไปด้วย ซึ่งในทางอุดมคติปัญหาเรื่องนี้ของเซมิเวดกับแหล่งกำเนิดสัญญาณจะต้องไม่เกิดขึ้น อาจจะสามารถกล่าวได้ว่าจะต้องไม่มีความต้านทานอนุกรมจากเซมิเวดเลย

ปราศจากสัญญาณรบกวน แสงจากหลอดไฟเป็นแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนทั่วไป ซึ่งสามารถที่จะทำให้เกิดสัญญาณรบกวนเข้าไปรวมกับสัญญาณจริงภายในวงจรรวมได้ ในทางอุดมคติจะต้องปราศจากสัญญาณรบกวนจากภายนอกทุกชนิด ทำให้ได้สัญญาณที่ต้องการวัดส่งผ่านไปยังเครื่องวัดโดยปราศจากสัญญาณรบกวน

จากเหตุผลจึงได้ทำการศึกษาค้นคว้าสร้างเซมิเวดที่เหมาะสมกับการใช้งานด้านไมโครอิเล็กทรอนิกส์ด้วยวิธีการกัดเคมีไฟฟ้า เป็นวิธีการที่น่าสนใจเป็นอย่างมาก โดยขบวนการทางไฟฟ้าเคมีเป็นปฏิกิริยาทางเคมีที่มีการถ่ายเทของอิเล็กตรอนเกิดขึ้นภายในระบบ โดยต้องคำนึงถึงสมบัติของเซมิเวดที่มีความจำเป็น

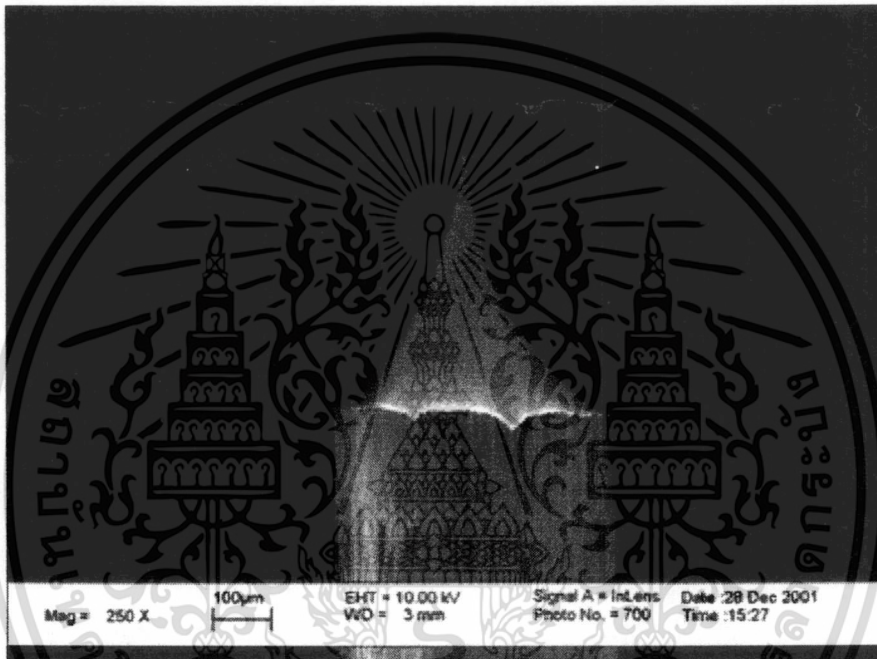
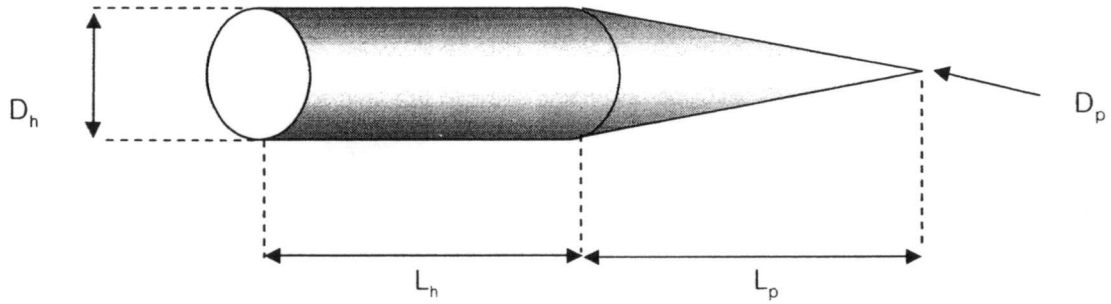
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการใช้งาน และเข็มวัดทั้งสแตนในการเป็นอุปกรณ์วัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าโดยตรงจากตัววงจรรวม ซึ่งตัวเข็มวัดนี้ต้องมีขนาดของหัววัดที่มีขนาดเล็กมาก (10 – 200 ไมโครเมตร) ทำให้เกิดความเสียหายได้ง่าย อีกทั้งตัวเข็มนั้นมีราคาแพง ในการทำวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการกัดเคมีไฟฟ้าของเข็มวัดทั้งสแตน เพื่อเป็นการลดค่าใช้จ่ายและเป็นองค์ความรู้ในการนำไปใช้ในห้องปฏิบัติการวัดคุณสมบัติของอุปกรณ์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ต่อไป การกัดเคมีไฟฟ้านั้นเป็นการกัดโดยสารละลายโดยมีการไบอัสกระแสตรงแบบคงที่ดังรูปที่ 1.2 การควบคุมขนาดของเข็มวัดนี้จะต้องทำการศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการกัด คือ ชนิดของสารละลาย ความเข้มข้นของสารละลาย ค่ากระแสตรงแบบคงที่ ขนาดของเข็มทั้งสแตน ความตึงผิวของสารละลาย อัตราการเคลื่อนที่ของทั้งสแตนขณะทำการกัด ซึ่งเมื่อทำการศึกษาตัวแปรต่างๆของการกัดเคมีไฟฟ้าแล้ว จะเป็นผลให้สามารถกำหนดตัวแปรเพื่อให้ได้ขนาดของเข็มวัด ซึ่งเข็มวัดแต่ละอันจะมีขนาดของตัวแปรที่แตกต่างกันออกไปดังรูปที่ 1.3



รูปที่ 1.2 ชุดเครื่องมือกัดเคมีไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(รูปอ้างอิงจากเว็บไซต์ <http://www.zyvex.com/>)

รูปที่ 1.3 ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวของเข็มวัดทั้งสแตน

วัตถุประสงค์โครงการวิจัย

1. สร้างชุดเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการกัดเคมีไฟฟ้า
2. ศึกษาเงื่อนไขต่างๆที่มีผลต่อการกัดเคมีไฟฟ้าของเข็มวัดทั้งสแตน
3. วิเคราะห์สมบัติของของเข็มวัดทั้งสแตนสำหรับงานไมโครอิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 เข็มวัด

ก่อนหน้านี้ได้พูดถึงเข็มวัดในทางอุดมคติไปแล้วซึ่งก็จะสัมพันธ์กับเข็มวัดในการใช้งานจริงโดยจะต้องเข้าใจก่อนว่าเข็มวัดจะสามารถส่งผลกระทบต่อการทำงานของวงจรได้อย่างไร ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษาการทำงานของเข็มวัดในการใช้งานจริงด้วย

ในขั้นแรก สิ่งที่สำคัญสำหรับเข็มวัดก็คือภายในสายเคเบิลของเข็มวัดจะประกอบไปด้วยวงจรที่มีความซับซ้อน สำหรับสัญญาณไฟตรง (DC ความถี่ 0 Hz) สายเข็มวัดจะมีลักษณะเหมือนเป็นค่าความต้านทานที่ต่ออนุกรมกับค่าความต้านทานที่ขั้วต่อของเครื่องวัด อย่างไรก็ตามในสัญญาณไฟสลับลักษณะภายในของสายเข็มวัดจะเปลี่ยนรูปไปเมื่อค่าความถี่เพิ่มขึ้น

เนื่องมาจากการที่มีค่าความเหนี่ยวนำ (L) และค่าความจุ (C) กระจายอยู่ทั่วไปภายในของสาย โดยที่ค่าอิมพีแดนซ์ของความเหนี่ยวนำจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่ของสัญญาณมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าอิมพีแดนซ์ของค่าความจุจะลดลง และจากปฏิกิริยาของทั้ง 2 ตัว (L และ C) รวมทั้งค่าความต้านทาน (R) จะทำให้ค่าอิมพีแดนซ์รวมของเข็มวัดเปลี่ยนแปลงไปตามค่าความถี่ และก็คือเป็นข้อดีของเข็มวัดอีกซึ่งจะทำให้เกิดปรากฏการณ์คือ

การลดทอนสัญญาณ (Attenuation) กระบวนการที่ทำให้ขนาดของสัญญาณมีค่าลดลง

เฟส (Phase) ความแตกต่างของสัญญาณ 2 สัญญาณที่มีความสัมพันธ์กันในเชิงของเวลา เช่น สัญญาณโคไซน์ที่ตำแหน่ง 0 องศา ซึ่งจะมีเฟสเลื่อนไปจากสัญญาณไซน์อยู่ 90 องศา

เฟสแบบเชิงเส้น (Linear phase) ลักษณะของวงจรหรือโครงข่ายที่มีการเลื่อนเฟสของสัญญาณไซน์เป็นแบบเชิงเส้นเมื่อความถี่ของสัญญาณไซน์มีค่าเพิ่มขึ้น

โหลด (Load) อิมพีแดนซ์ที่ต่ออยู่กับแหล่งจ่ายสัญญาณ เช่น เมื่อมีการเปิดวงจรก็หมายความว่าไม่มีโหลดต่ออยู่นั่นเอง

อิมพีแดนซ์ (Impedance) กระบวนการที่ขัดขวางการไหลของสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ มีหน่วยเป็นโอห์มและประกอบไปด้วยค่าความต้านทาน (R) และค่ารีแอคแตนซ์ (X) ได้แก่ ค่าความจุ (XC) และค่าความเหนี่ยวนำ (XL) ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์ (Z) จะมีรูปแบบเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Z = R + jX \quad (2.1)$$

มีขนาด (M) เป็น

$$M = \sqrt{R^2 + X^2} \quad (2.2)$$

และเฟส θ เป็น

$$\theta = \arctan (X/R) \quad (2.3)$$

Shielding การนำเอาส่วนที่เป็นกราวนด์ไปวางไว้ระหว่างทางเดินสัญญาณของวงจรกับแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน ซึ่งจะเป็นการตัดสัญญาณรบกวนออกไป

ในกรณีที่ไม่ตรงตามภาพคุณสมบัตินี้สามารถคำนวณหาค่า rise time (Tr) ได้จาก Bandwidth (BW) ดังนี้

ส่วนประกอบ R,L,C (R,L,C component) ค่าความต้านทานและค่ารีแอคแตนซ์ซึ่งจะแพร่กระจายไปตามความยาวของสายไฟฟ้าซึ่งโดยปกติจะมีค่าน้อยมาก

แหล่งจ่าย (Source) แหล่งกำเนิดของสัญญาณแรงดันหรือกระแสไฟฟ้า

Rise-time ในช่วงขอบขาขึ้นของสัญญาณ ค่า rise-time จะเป็นค่าเวลาที่อยู่ระหว่างช่วง 10 % ถึง 90% ของขนาดสูงสุดของสัญญาณพัลส์

ค่ารีแอคแตนซ์ เป็นค่าอิมพีแดนซ์ที่เกิดขึ้นเมื่อมีสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับซึ่งจะขัดขวางการไหลของกระแสไฟฟ้า โดยที่ตัวเก็บประจุ (C) จะสามารถหาค่ารีแอคแตนซ์ได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$X_c = 1 / 2\pi fC \quad (2.4)$$

เมื่อ X_c = ค่ารีแอคแตนซ์ของตัวเก็บประจุมีหน่วยเป็น โอห์ม

$\pi = 3.14159....$

f = ค่าความถี่มีหน่วยเป็น Hz

C = ค่าความจุมีหน่วยเป็น ฟารัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเหนี่ยวนำ (L) จะสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ดังสมการ

$$X_L = 2\pi fL \quad (2.5)$$

เมื่อ X_L = ค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเหนี่ยวนำมีหน่วยเป็น โอห์ม

$\pi = 3.14159\dots$

f = ค่าความถี่มีหน่วยเป็น Hz

L = ค่าความเหนี่ยวนำมีหน่วยเป็น เฮนรี่

เนื่องจากเครื่องวัดมีย่านการใช้งานที่หลากหลายขึ้นและมีเข็มวัดให้เลือกใช้งานอยู่มากในท้องตลาดจึงทำให้มีการนำเข็มวัดไปใช้ปะปนกันหลายหน้าที่ สิ่งหนึ่งที่สำคัญก็คือเข็มวัดแต่ละชนิดจะมีความแตกต่างกันทั้ง ขนาดปลายเข็ม มุมการวัด ความต้านทาน สารตัวนำที่ทำการเคลือบ เป็นต้น ซึ่งการจะใช้งานเครื่องวัดในการวัดสัญญาณให้เต็มความสามารถนั้นก็ต้องการเข็มวัดที่มีความเหมาะสมกันด้วย ดังนั้นควรจะเลือกใช้เข็มวัดให้ตรงกับความต้องการในการวัดสัญญาณ เช่น ระบบกราวนด์ เมื่อเข็มวัดทำการดึงกระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายสัญญาณเพื่อนำไปทำการวัดสัญญาณ ซึ่งจำเป็นจะต้องมีกระแสที่ไหลย้อนกลับมาเพื่อให้ครบวงจรการทำงาน โดยผ่านทางสายกราวนด์ของเข็มวัดที่ต่ออยู่กับกราวนด์ของวงจรที่ต้องการวัดสัญญาณนั่นเอง

2.1.1 คำแนะนำในการใช้เข็มวัด

การเลือกเข็มวัดให้เหมาะกับเครื่องวัดและการใช้งานแบบต่าง ๆ นั้นมีความจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับการวัดสัญญาณ ซึ่งความจริงแล้วการจะวัดสัญญาณและได้ผลลัพธ์ออกมาอย่างไรนั้นขึ้นอยู่กับวิธีการใช้เครื่องมือของแต่ละคน ดังนั้นจึงต้องมีข้อแนะนำในการใช้เข็มวัดเพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงการวัดสัญญาณที่ผิดพลาดดังต่อไปนี้

การปรับ Compensate ของเข็มวัด เข็มวัดส่วนมากจะถูกออกแบบมาให้เหมาะสมกับอินพุตของเครื่องวัดที่ระบุเท่านั้น อย่างไรก็ตามอาจเกิดความผิดพลาดเพิ่มขึ้นได้เมื่อมีการเปลี่ยนเครื่องวัดจากเครื่องหนึ่งไปยังอีกเครื่องหนึ่งหรืออาจเกิดจากความแตกต่างกันของช่องสัญญาณอินพุตในเครื่องวัดเครื่องเดียวกัน สิ่งที่จะต้องทำคือเมื่อเปลี่ยนการใช้งานของเข็มวัดที่มีอัตราที่เหมาะสม

การใช้หัววัดสัญญาณของเข็มวัดให้เหมาะสมกับงาน ควรจะใช้หัววัดสัญญาณของเข็มวัดให้เหมาะสมกับวงจรที่ต้องการวัดสัญญาณ คือสามารถต่อวัดได้เร็ว , สะดวก , เหมาะสมกับลักษณะของสัญญาณและมีความคงทนถาวร แต่โดยทั่วไปมักจะมีการนำเอาสายไฟมาใช้ในการวัดสัญญาณแทนหัววัด

สัญญาณของเข็มวัดซึ่งการนำเอาสายไฟที่มีความยาว 1 หรือ 2 นิ้วมาต่อที่ปลายของเข็มวัดนั้นอาจจะทำให้เกิดปัญหาขึ้นได้ คืออิมพีแดนซ์ของเข็มวัดจะเปลี่ยนแปลงไปเมื่อความถี่สูงขึ้น

ใช้สายกราวด์ที่มีขนาดสั้นและตรงที่สุด เมื่อตรวจสอบการทำงานของเข็มวัดโดยใช้จุดทดสอบที่เป็นสัญญาณพัลส์ควรจะใช้สายเข็มวัดที่มีความยาวของสายกราวด์ให้สั้นที่สุด เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดสัญญาณ ringing ที่มาจากค่าความเหนี่ยวนำที่เพิ่มขึ้นตามความยาวของสายกราวด์

2.1.2 ผลกระทบของเข็มวัดต่อการวัดสัญญาณ

โดยปกติเครื่องวัดจะทำหน้าที่ในการแสดงผลรูปร่างของสัญญาณ และจะต้องกันไม่ให้สัญญาณชนิดอื่นๆปะปนเข้ามาที่อินพุตของเครื่องวัดด้วย

- **ผลกระทบที่เกิดจากอิมพีแดนซ์ของแหล่งกำเนิดสัญญาณ** ค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งกำเนิดสัญญาณจะส่งผลกระทบไปถึงการนำเข็มวัดมาต่อที่จุดทดสอบด้วย ตัวอย่างเช่น แหล่งกำเนิดสัญญาณที่มีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำๆ

- **ผลกระทบที่เกิดกับ rise-time** ในกรณีนี้ให้พิจารณาที่แหล่งกำเนิดพัลส์ที่มี rise-time เร็วมากๆ ค่า rise-time ที่แท้จริงจะเกิดจากความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานและค่าความจุที่เป็นโหลดของแหล่งกำเนิดสัญญาณ ซึ่งค่า RC จะทำให้เกิด rise-time ที่ 10 ถึง 90 %

- **ผลกระทบที่เกิดกับขนาดและเฟส** นอกเหนือจากผลกระทบที่เกิดกับค่า rise-time แล้ว ค่าความจุของเข็มวัดยังส่งผลกระทบต่อขนาดและเฟสของสัญญาณที่มีส่วนประกอบของความถี่สูงอีกด้วย ซึ่งจะสำคัญมากสำหรับรูปคลื่นที่มีสัญญาณไซน์เป็นส่วนประกอบ เช่นสัญญาณสี่เหลี่ยม 50 MHz ก็จะมีส่วนประกอบของความถี่ที่มีฮาร์โมนิคสูงกว่า 100MHz อีกด้วย เป็นต้น ดังนั้นปัญหาของ loading effect จึงต้องไม่พิจารณาเฉพาะที่ความถี่มูลฐานของสัญญาณเท่านั้นแต่จะต้องพิจารณาที่ความถี่ประกอบด้วย โดยปกติ

- **ผลกระทบที่เกิดจากสายกราวด์** เมื่อทำการวัดสัญญาณโดยใช้กราวด์อ้างอิงจะต้องมีการต่อสายสัญญาณกับวงจรหรืออุปกรณ์ที่ต้องการทดสอบทั้งหมด 2 เส้นด้วยกัน เส้นแรกจะต่อผ่านหัววัดสัญญาณของเข็มวัดซึ่งจะทำการตรวจจับแรงดันหรือสัญญาณชนิดอื่น ๆ ที่ต้องการวัด ส่วนอีกเส้นหนึ่งจะต้องต่อกับกราวด์ ทั้งของเครื่องวัดและวงจรที่ต้องการวัดสัญญาณ เพื่อให้กระแสไฟฟ้าสามารถไหลได้ครบวงจร ในกรณีที่วงจรทดสอบต่อปลั๊กที่มีกราวด์ต่อรวมกันกับเครื่องวัดอยู่นั้น สัญญาณจะสามารถไหลย้อนจากเครื่องวัดกลับไปยังวงจรทดสอบได้โดยผ่านทางกราวด์ของปลั๊กซึ่งจะค่อนข้างอ้อมและมีระยะทางไกล จึงทำให้ได้สัญญาณที่ไม่ชัดเจนนักเนื่องจากกราวด์จะมีลักษณะเป็นเหมือนตัวเหนี่ยวนำค่าต่ำๆ นั่นเอง ซึ่งกฎโดยทั่วไปจะกล่าวไว้ว่า เมื่อทำการวัดสัญญาณโดยใช้เครื่องวัดควรจะใช้สายกราวด์ที่สั้นที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ดังนั้นในที่สุดจึงมีการออกแบบ อาจจะสามารถกล่าวได้ “สายกราวด์ของจะต้องสั้นและตรงที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้”

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 การกัดเคมีไฟฟ้า

การสร้างเข็มวัดด้วยวิธีการกัดทางเคมีไฟฟ้าเป็นวิธีการที่น่าสนใจเป็นอย่างมาก โดยขบวนการทางเคมีไฟฟ้าเป็นปฏิกิริยาทางเคมีที่มีการถ่ายเทของอิเล็กตรอนเกิดขึ้นภายในระบบ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

1. **ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation reaction)** เป็นปฏิกิริยาที่อะตอมของสารมีการสูญเสียอิเล็กตรอนเกิดขึ้น ดังตัวอย่างเช่น สาร M มีวาเลนซ์อิเล็กตรอนเท่ากับ n คือ มีอิเล็กตรอน n อนุภาคโคจรอยู่ในวงนอกสุดของอะตอม สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดังนี้ คือ



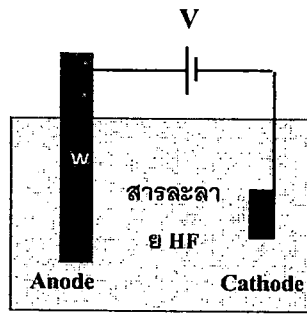
โดยบริเวณที่ซึ่งปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดขึ้นจะถูกเรียกว่า แอโนด (Anode) ดังนั้นปฏิกิริยาออกซิเดชันจึงเรียกเป็น ปฏิกิริยาแอโนดิก (Anodic reaction)

2. **ปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction reaction)** เป็นปฏิกิริยาที่อิเล็กตรอนที่เกิดจากแต่ละอะตอมของสารชนิดหนึ่งถูกถ่ายเท และเข้าร่วมเป็นส่วนหนึ่งของสารอีกชนิดหนึ่ง ดังตัวอย่างเช่น ไอออนของโลหะในสารละลายปฏิกิริยารีดักชันสามารถเกิดขึ้นได้ดังนี้ คือ

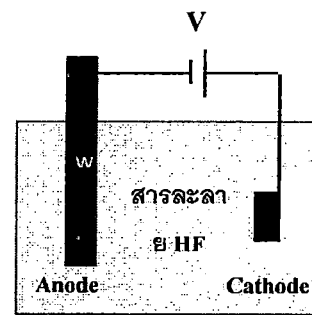


โดยบริเวณที่ซึ่งปฏิกิริยารีดักชันเกิดขึ้นจะถูกเรียกว่า แคโทด (Cathode) ดังนั้นปฏิกิริยารีดักชันจึงเรียกเป็น ปฏิกิริยาแคโทดิก (Cathodic reaction)

เมื่อพิจารณาปฏิกิริยาทั้งระบบแล้ว ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะต้องประกอบด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันอย่างละหนึ่งปฏิกิริยาเป็นอย่างน้อย ดังเช่นในระบบของเคมีไฟฟ้าที่ประกอบด้วยสาร 2 ชนิด ที่ต่อกันในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยสารอันหนึ่งจะเป็นแอโนดหรือสารที่ถูกกัด ส่วนสารอีกชนิดหนึ่งจะเป็นแคโทด



(ก)แบบบแอนดิก



(ข) แบบบแคโทดิก

รูปที่ 2.1 ลักษณะการไบอัสเซลล์เคมีไฟฟ้าในลักษณะต่างๆ

พิจารณาเซลล์ไฟฟ้าในรูปที่ 2.1 ทางด้านซ้ายจะเป็นขั้วไฟฟ้าของแผ่นวัสดุทังสเตน (Tungsten : W) ซึ่งจะถูกรวมอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยในที่นี้ได้แก่ สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ส่วนทางด้านขวาจะเป็นขั้วไฟฟ้า ซึ่งเป็นขั้วอิเล็กโทรดที่ถูกรวมอยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกเช่นกัน จากรูปจะเห็นได้ว่ามีลักษณะในการไบอัสเซลล์เคมีไฟฟ้า มีอยู่ 2 ลักษณะด้วยกัน คือ

1. การไบอัสเคมีไฟฟ้าแบบแอนดิก (Anodic bias)

เป็นการไบอัสในลักษณะที่ขั้วไฟฟ้าของวัสดุจะอยู่ทางขั้วบวก ส่วนขั้วไฟฟ้าที่จมอยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกจะอยู่ทางขั้วลบ การไบอัสในลักษณะเช่นนี้ แผ่นซิลิคอนจะเป็นขั้วแอโนด มีผลทำให้วัสดุถูกกัดได้

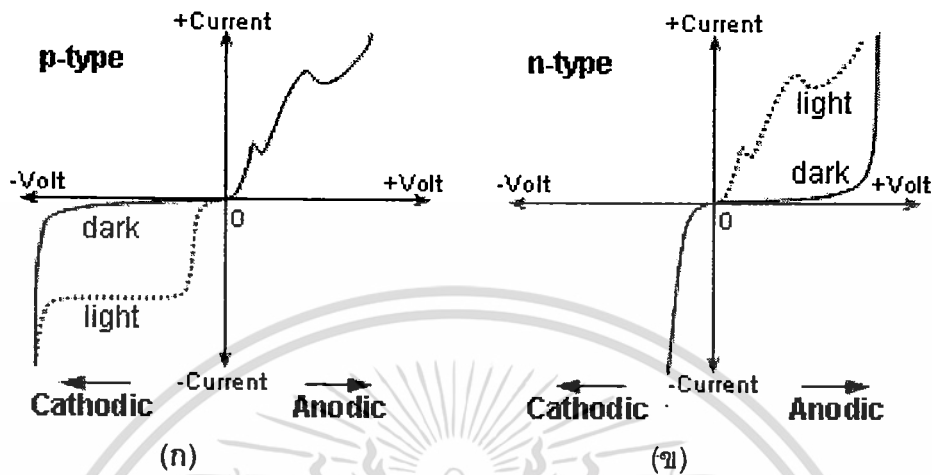
2. การไบอัสเคมีไฟฟ้าแบบแคโทดิก (Cathodic bias)

เป็นการไบอัสในลักษณะที่ขั้วไฟฟ้าของแผ่นซิลิคอนจะอยู่ทางขั้วลบ ส่วนขั้วไฟฟ้าที่จมอยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกจะอยู่ทางขั้วบวก การไบอัสในลักษณะเช่นนี้ แผ่นซิลิคอนจะเป็นขั้วแคโทด ทำให้ไม่เกิดการกัดแผ่นซิลิคอน

2.2.1 ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าภายในการกัดเคมีไฟฟ้า

ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์เคมีไฟฟ้าที่ใช้สำหรับกัดทังสเตน สร้างชั้นพอร์ซซิลิคอนมีลักษณะและพฤติกรรมเป็นแบบซ็อดทกีไดโอด (schottky diode) ที่เกิดขึ้นจากการสัมผัสกันระหว่างวัสดุสองชนิด คือ แผ่นซิลิคอนกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งในที่นี้ได้แก่ สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก โดยจะพิจารณาถึงลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าภายในเซลล์

เคมีไฟฟ้า ระหว่างแผ่นซิลิคอนชนิดพีและเอ็นในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ภายใต้เงื่อนไขในการถูกฉายแสงและไม่ถูกฉายแสง แสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์เคมีไฟฟ้าระหว่างแผ่นซิลิคอน (ก) ชนิดพี และ (ข) ชนิดเอ็น ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก

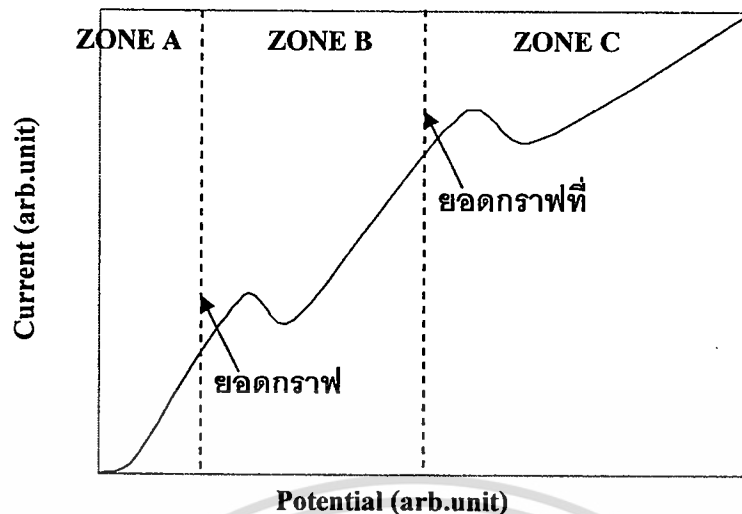
จากรูปที่ 2.2 แสดงถึงลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์เคมีไฟฟ้าระหว่างแผ่นซิลิคอนชนิดพี และเอ็นในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก โดยจะเห็นได้ว่ามีลักษณะในการไบอัสเซลล์เคมีไฟฟ้าอยู่สองลักษณะด้วยกัน คือ การไบอัสเซลล์ไฟฟ้าแบบแอโนดิก และการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าแบบแคโทดิก สำหรับแผ่นซิลิคอนชนิดพี การไบอัสเซลล์ไฟฟ้าแบบแอโนดิก ลักษณะของกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่ได้จะมีลักษณะเช่นเดียวกันกับการไบอัสแบบตรง (forward bias) ส่วนการไบอัสเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบแคโทดิก ลักษณะของกระแส และแรงดันไฟฟ้าจะมีลักษณะเหมือนกับการไบอัสแบบย้อนกลับ (reverse bias) โดยจะมีกระแสรั่วซึ่งเกิดขึ้นจากผลของพาหะส่วนน้อยภายในแผ่นซิลิคอนชนิดพี และจากผลของการฉายแสงเช่นเดียวกันกับไดโอดทั่วไป ส่วนในแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าจะมีลักษณะตรงกันข้ามกับแผ่นซิลิคอนชนิดพี โดยการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าแบบแอโนดิกสำหรับแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็นจะมีลักษณะเช่นเดียวกันกับการไบอัสแบบย้อนกลับ ส่วนการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าแบบแคโทดิก ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่ได้จะมีลักษณะเดียวกันกับการไบอัสแบบตรง

ตารางที่ 2.1 ลักษณะสำคัญที่เกิดขึ้น เนื่องจากการไบอัสเซลล์เคมีไฟฟ้าที่แตกต่างกัน

ชนิดของแผ่น ซิลิคอน	ลักษณะการไบอัสเซลล์เคมีไฟฟ้า
ชนิดพี แบบแคโทดิก	- เนื้อของแผ่นซิลิคอนไม่ถูกกัด - ลักษณะการไบอัสเป็นย้อนกลับ
ชนิดพี แบบแอโนดิก	- เนื้อของแผ่นซิลิคอนถูกกัด - จะเกิดการกัดผิวหน้าของแผ่นซิลิคอนที่ศักย์ไฟฟ้ามีค่าสูงๆ - ลักษณะการไบอัสเป็นแบบตรง
ชนิดเอ็น แบบแคโทดิก	- เนื้อของแผ่นซิลิคอนไม่ถูกกัด - ลักษณะการไบอัสแบบตรง
ชนิดเอ็น แบบแอโนดิก	- เนื้อของแผ่นซิลิคอนถูกกัดก็ต่อเมื่อทำการฉายแสง โดย - จะเกิดการกัดผิวหน้าของแผ่นซิลิคอนที่ศักย์ไฟฟ้ามีค่าสูงๆ - ลักษณะการไบอัสเป็นแบบย้อนกลับ

จากตารางที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าการไบอัสเซลล์เคมีไฟฟ้าทั้งสองมีลักษณะเป็นรอยสัมผัสซีอติ๊กเหมือนกัน โดยการเกิดการกัดนั้นจะเกิดขึ้นเฉพาะเงื่อนไขในการไบอัสแบบย้อนกลับคือแบบแอโนดิกเท่านั้น ส่วนการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าแบบแคโทดิก จะไม่เกิดการกัดขึ้นไม่ว่าชนิดของแผ่นซิลิคอนจะเป็นชนิดพี หรือชนิดเอ็นก็ตาม โดยส่วนของแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น เนื่องจากการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าแบบแอโนดิกนั้น เป็นการไบอัสแบบย้อนกลับ ดังนั้นในระหว่างการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าแบบแอโนดิกจึงจำเป็นต้องทำการฉายแสงลงบนผิวด้านหน้าของแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็นด้วย ทั้งนี้ก็เพื่อทำให้เกิดพาหะส่วนน้อย (โฮล) ขึ้นภายในแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น โดยโฮลจะเป็นตัวการที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากในกลไกในการกัดซิลิคอน

จากการพิจารณาลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์เคมีไฟฟ้าเฉพาะในส่วนที่มีการไบอัสแบบแอโนดิกของทั้งแผ่นซิลิคอนชนิดพี และชนิดเอ็น (ที่ได้ทำการฉายแสงขณะไบอัส) พบว่า มีลักษณะความสัมพันธ์ แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์เคมีไฟฟ้าในส่วนของไอส์แบบแอนโนดิก

จากรูปที่ 2.3 ลักษณะความสัมพันธ์ดังกล่าวจะประกอบไปด้วยยอดกราฟอยู่ 2 จุดด้วยกัน โดยยอดกราฟทั้งสองจุดนี้จะเป็นตัวชี้และแบ่งแยกบริเวณที่มีลักษณะการกัดเนื้อของแผ่นซิลิคอนที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 บริเวณ ได้แก่ บริเวณ A, B และ C ตามลำดับ โดยในบริเวณ A เป็นช่วงในการเริ่มกัด (porous silicon formation regions) จะเป็นบริเวณที่เนื้อของแผ่นซิลิคอนจะถูกกัดเป็นรูพรุนขนาดเล็กๆ ซึ่งจะมีผลทำให้เกิดโครงสร้างของชั้นพอร์สซิลิคอนขึ้นมาเรื่อยๆ ต่อเมื่อค่ากระแส ภายในเซลล์เคมีไฟฟ้าจะต้องมีค่าน้อยกว่าค่าของกระแสสูงสุดที่ยอดกราฟแรก ส่วนในบริเวณ B เป็นช่วงการกัดที่ทำให้เกิดพอร์สซิลิคอน ส่วนช่วงที่อยู่ถัดมาจะเป็นบริเวณที่เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะการกัดเนื้อของซิลิคอน จากลักษณะการกัดที่ทำให้เกิดโครงสร้างของชั้นพอร์สซิลิคอนไปสู่ลักษณะช่วงการกัดแบบขัดผิวหน้า (electropolishing regions) ซึ่งอยู่ในบริเวณ C โดยโครงสร้างของชั้นพอร์สซิลิคอนที่เกิดขึ้นในบริเวณ B นี้ จะมีลักษณะเป็นรูพรุนเช่นเดียวกับพอร์สซิลิคอนที่เกิดขึ้นในบริเวณแรก แต่จะมีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนที่ใหญ่กว่าและสามารถเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นได้อย่างรวดเร็ว เมื่อความต่างศักย์ของเซลล์เคมีไฟฟ้ามีค่าเพิ่มสูงขึ้นจนเข้าสู่การกัดในลักษณะแบบขัดผิวหน้า ณ ตำแหน่งที่ค่าของกระแสมีค่าสูงสุดที่ยอดกราฟที่สอง และเมื่อพิจารณาจากยอดกราฟทั้งสองจุดในรูปจะสังเกตเห็นได้ว่า เมื่อทำการเพิ่มค่าความต่างศักย์ของเซลล์เคมีไฟฟ้าให้มีค่ามากขึ้นจนกระแสภายในเซลล์ไฟฟ้ามีค่าสูงสุดแล้ว หลังจากนั้นกระแสก็จะเริ่มมีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องมาจากเกิดปรากฏการณ์ อิมพีแดนซ์เชิงลบ (negative impedance) ขึ้น โดยจากรูปที่ 2.3

- ในส่วนของยอดกราฟแรก

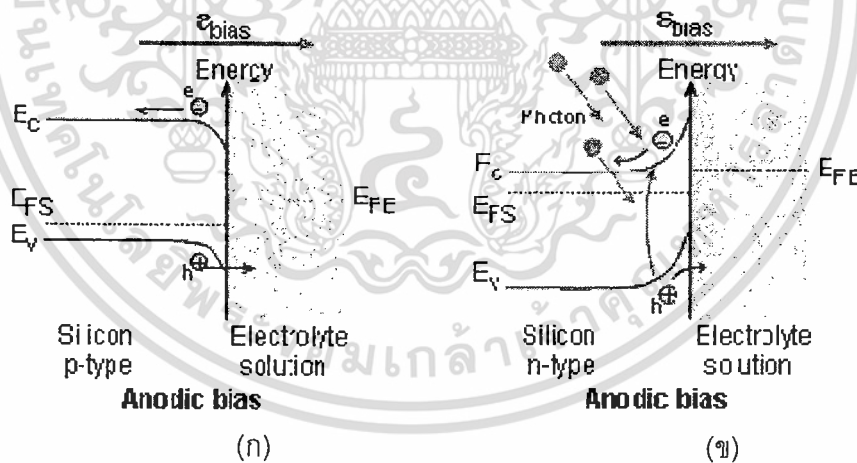
สำหรับแผ่นซิลิคอนชนิดพี จะเป็นผลมาจากการเกิดปรากฏการณ์ ผลของขนาดควอนตัม ขึ้นภายในโครงสร้างของพอร์ซซิลิคอน มีผลทำให้ช่องว่างพลังงานภายในมีความกว้างมากขึ้นกว่าเดิมได้ จนกระทั่งทำให้พาหะนำกระแสไม่สามารถผ่านเข้าไปในโครงสร้างส่วนนั้นได้ ทำให้ค่าความต้านทานภายในของชั้นพอร์ซซิลิคอนมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งนำไปสู่การที่กระแสมีค่าลดลง

สำหรับแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น จะเป็นผลมาจากการเกิดบริเวณปลอดพาหะนำกระแสขึ้นรอบๆ โครงสร้างของพอร์ซซิลิคอน และเมื่อโครงสร้างของพอร์ซซิลิคอนมีขนาดเล็กลงไปเรื่อยๆ จนบริเวณปลอดพาหะนำกระแสสามารถครอบคลุมโครงสร้างของพอร์ซซิลิคอนได้ทั้งหมด มีผลทำให้พาหะนำกระแสไม่สามารถผ่านเข้าไปในบริเวณนั้นได้ ทำให้ค่าความต้านทานภายในชั้นพอร์ซซิลิคอนมีค่าเพิ่มขึ้น

ในส่วนยอดกราฟที่สอง ซึ่งอยู่ระหว่างบริเวณช่วงการกัดที่ทำให้เกิดพอร์ซซิลิคอน กับช่วงการกัดแบบขัดผิวหน้า การที่กระแสมีค่าลดลงเป็นผลมาจากการเกิดออกไซด์ที่บริเวณผิวของพอร์ซซิลิคอนในระหว่างกระบวนการกัดนั่นเอง

2.2.2 ลักษณะแถบพลังงานที่บริเวณผิวสัมผัส

บริเวณผิวสัมผัสระหว่างแผ่นซิลิคอนกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกภายในเซลล์เคมีไฟฟ้า จะมีลักษณะเป็นแบบซีกตักโดยจะมีลักษณะของแถบพลังงานที่บริเวณผิวสัมผัส แสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ลักษณะแถบพลังงานที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างแผ่นซิลิคอน (ก) ชนิดพี และ (ข) ชนิดเอ็น กับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก

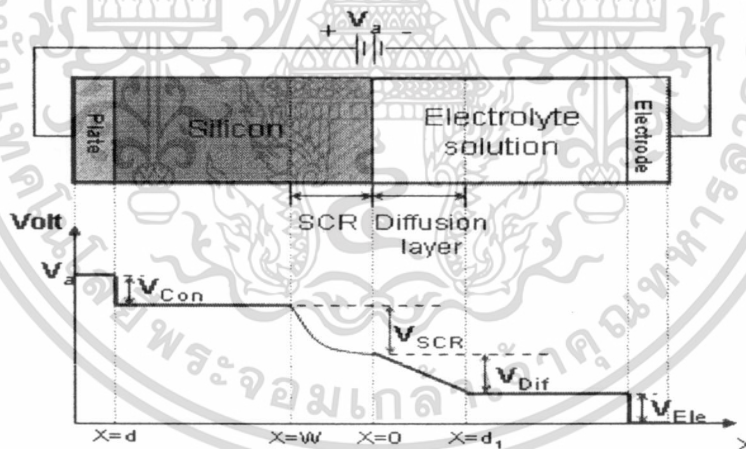
จากภาพข้างต้นจะเห็นได้ว่า มีการโค้งงอของแถบพลังงานเกิดขึ้นที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างแผ่นซิลิคอนกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก โดย

ในแผ่นซิลิคอนชนิดพี การโค้งงอของแถบพลังงาน ณ บริเวณผิวสัมผัสจะมีลักษณะโค้งงอลง ซึ่งภายใต้การไบอัสเซลล์ไฟฟ้าแบบแอนนดิก กระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านผิวสัมผัสได้ เนื่องจากเป็นการไบอัสแบบตรง ทำให้เกิดกระบวนการกักเนื้อของแผ่นซิลิคอนอย่างต่อเนื่องขึ้นได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.4

ในแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น การโค้งงอของแถบพลังงาน ณ บริเวณผิวสัมผัสจะมีลักษณะโค้งงอขึ้น โดยการโค้งงอจะมีค่ามากขึ้นกว่าเดิมเมื่อแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็นอยู่ภายใต้การไบอัสแบบ แอนนดิก ทำให้กระแสไฟฟ้าไม่สามารถไหลผ่านกำแพงศักย์ไปที่ผิวสัมผัสได้ ทำให้ไม่เกิดกระบวนการกักเนื้อของแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น ดังนั้นในระหว่างการสร้างชั้นพอร์ซซิลิคอน จึงจำเป็นที่จะต้องทำการฉายแสงให้กับแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น ทั้งนี้ก็เพื่อเพิ่มจำนวนพาหะนำกระแสขึ้นภายในแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น เพื่อให้เกิดกระบวนการกักเนื้อของแผ่นซิลิคอน ดังแสดงในรูปที่ 2.4

2.2.3 การกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้าภายในเซลล์เคมีไฟฟ้า

เซลล์เคมีไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการกักพอร์ซซิลิคอน จะประกอบด้วยแผ่นซิลิคอนถูกจุ่มอยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก โดยมีกรไบอัสเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบแอนนดิก ซึ่งมีผลทำให้ที่บริเวณผิวสัมผัสต่างๆ ภายในเซลล์เคมีไฟฟ้าจะมีศักย์ไฟฟ้าตกคร่อม และมีการกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้าภายในเซลล์เคมีไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณต่างๆ ภายในเซลล์เคมีไฟฟ้า โดยที่ d เป็นความหนาของแผ่นซิลิคอน, W เป็นความกว้างของบริเวณปลอดพาหะนำกระแส และ d_1 เป็นความกว้างของบริเวณชั้นที่เกิดการแพร่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก

จากรูปที่ 2.5 จะเห็นได้ว่ามีศักดาไฟฟ้าคร่อมบริเวณต่างๆ ภายในเซลล์เคมีไฟฟ้า ดังนี้คือ ในเนื้อของแผ่นซิลิคอน จะมีศักดาไฟฟ้าตกคร่อมบริเวณดังต่อไปนี้ คือ

1. ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณขั้วสัมผัสระหว่างขั้วโลหะกับแผ่นซิลิคอน
2. ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณหลอดพาหะนำกระแส

ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก จะมีศักดาไฟฟ้าตกคร่อมบริเวณดังต่อไปนี้ คือ

3. ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณขั้วสัมผัสระหว่างขั้วอิเล็กโทรด กับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก
4. ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณชั้นที่เกิดการแพร่ (diffusion layer)

ถ้าให้ V_a เป็นศักดาไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่เซลล์เคมีไฟฟ้า เราสามารถเขียนสมการศักดาไฟฟ้ารวมของระบบได้ดังนี้ คือ

$$V_a = V_{diff} + V_{SCR} + V_{Con} + V_{Elec} \quad (2.8)$$

โดย V_{diff} คือ ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณชั้นที่เกิดการแพร่
 V_{SCR} คือ ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณหลอดพาหะ
 V_{Con} คือ ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณขั้วสัมผัสระหว่างขั้วโลหะกับแผ่นซิลิคอน
 V_{Elec} คือ ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณขั้วสัมผัสระหว่างขั้วอิเล็กโทรดกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก

ศักดาไฟฟ้า V_{con} กับ V_{elec} ในเซลล์เคมีไฟฟ้าที่มีเงื่อนไขในการสร้างชั้นของพอร์ซซิลิคอนแบบเดียวกันจะมีค่าคงที่เสมอ ดังนั้นจึงทำให้สมการที่ (2.8) สามารถเขียนได้เป็น

$$V_a = V_{diff} + V_{SCR} + Constant \quad (2.9)$$

จากสมการที่ (2.9) จะเห็นได้ว่าศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณชั้นที่เกิดการแพร่ (V_{diff}) กับศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณหลอดพาหะ เป็นตัวแปรที่สำคัญภายในเซลล์เคมีไฟฟ้า ซึ่งจะเป็นตัวควบคุมพาหะและปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น โดย

ในแผ่นซิลิคอนชนิดพี เนื่องจากเป็นการไบอัสแบบตรง ทำให้ไม่เกิดบริเวณหลอดพาหะขึ้นในแผ่นซิลิคอน ดังนั้นศักดาไฟฟ้าหลักที่ตกคร่อมอยู่ในเซลล์เคมีไฟฟ้า ก็คือ ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

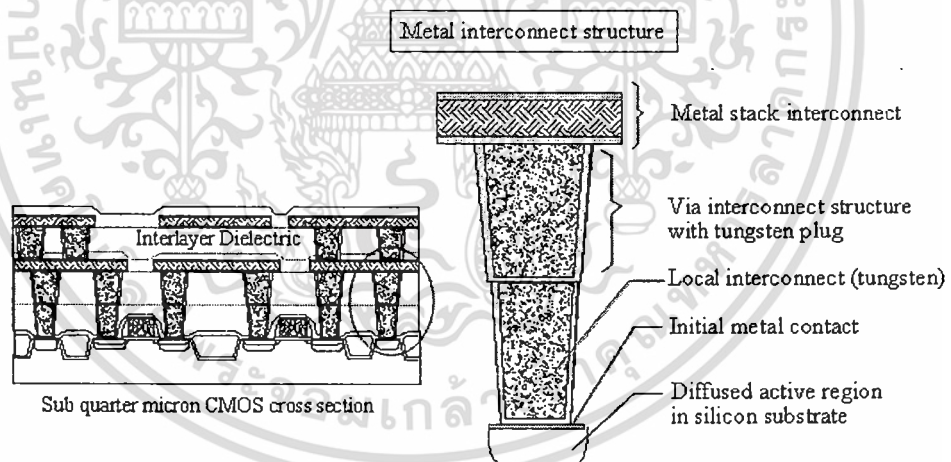
สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ที่เกิดการแพร่ โดย V_{diff} นี้จะควบคุม อีออนลบของฟลูออรีนที่อยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกตรง บริเวณชั้นที่เกิดการแพร่

ในแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น เนื่องจากการไบอัสแบบย้อนกลับ ทำให้ที่บริเวณผิวสัมผัสของแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็นเกิดบริเวณปลอดพาหะขึ้น และเกิดศักดาไฟฟ้าตกคร่อมบริเวณปลอดพาหะตกคร่อมบริเวณนี้ โดยบริเวณปลอดพาหะนี้จะเป็นตัวควบคุมพาหะนำกระแสภายในแผ่นซิลิคอน ซึ่งจะมีผลต่อปฏิกิริยาเคมีในการกัด และโครงสร้างของพอร์ซซิลิคอนที่ถูกสร้างขึ้น

2.3 โครงสร้างโลหะของจรรวม

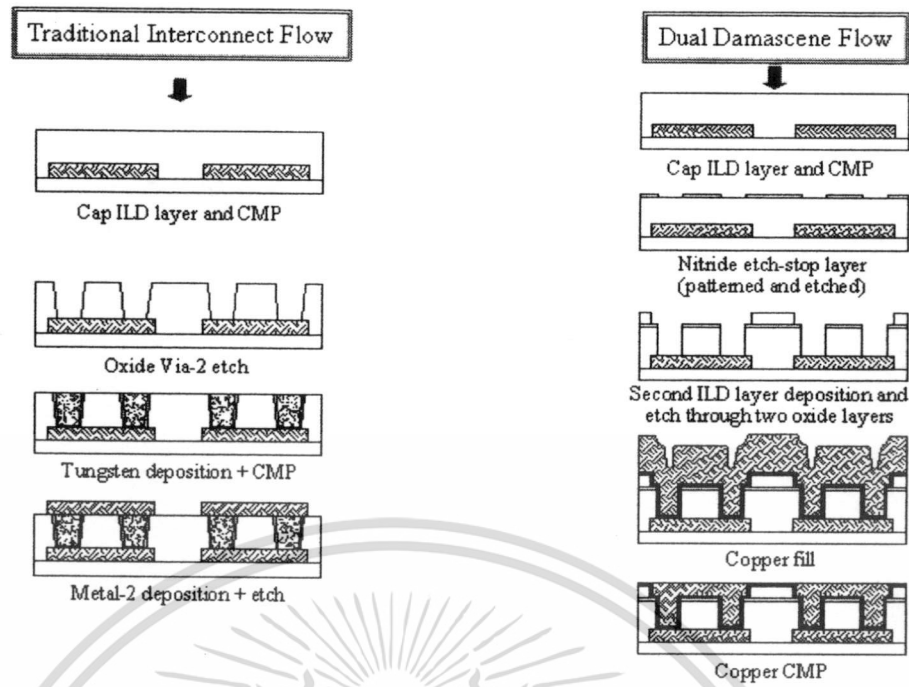
การเชื่อมต่อระหว่างส่วนประกอบต่าง ๆ ในวงจรรวมสามารถทำได้โดยสร้างฟิล์มโลหะ (หนา $\sim 0.5\mu m$) ให้เป็นทางเดินกระแสไฟฟ้าบนชั้นฉนวน SiO_2 ที่สร้างอยู่บนผิวหน้าเวเฟอร์ การทำทางเดินกระแสระหว่างส่วนประกอบต่าง ๆ อาจกระทำด้วยฟิล์มโลหะมากกว่า 1 ชั้นได้ แต่ต้องมีการสร้างชั้นฉนวนคั่นระหว่างชั้นฟิล์มโลหะแต่ละชั้น การสร้างชั้นโลหะหลายชั้นได้นั้นเป็นการเพิ่มความซับซ้อนของวงจรมีประสิทธิภาพมากขึ้น กระบวนการผลิตส่วนใหญ่จะใช้ชั้นฟิล์มโลหะเชื่อมต่อ 3-5 ชั้น โดยที่แต่ละชั้นแยกจากกันด้วยชั้นฉนวนที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกต่ำ (Low-k) และ ณ ตำแหน่งใดที่จะทำการเชื่อมต่อระหว่างชั้นโลหะแต่ละชั้นจะทำการเปิดช่องด้วยเทคนิคโฟโวลติโอกราฟีให้โลหะเชื่อมกันได้



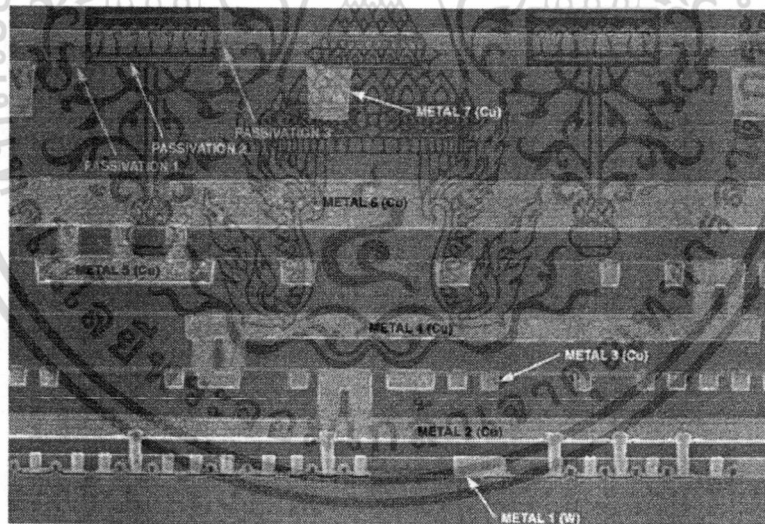
รูปที่ 2.6 โครงสร้างโลหะในวงจรรวม

ในปัจจุบันได้มีการเปลี่ยนชนิดของโลหะจากอลูมิเนียมเป็นทองแดงเนื่องจากทองแดงมีสมบัติในการนำไฟฟ้าได้ดีกว่าจึงได้เปรียบอลูมิเนียมและเมื่อเปรียบเทียบกระบวนการในการสร้างจะสามารถสร้างขั้วและลวดลายเชื่อมต่อภายในเป็นเนื้อเดียวกันได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 กระบวนการสร้างโลหะในวงจรรวม



รูปที่ 2.8 ภาพถ่าย SEM ชั้นโลหะในวงจรรวม

2.3.1 ชนิดของโลหะ (TYPE OF METALS)

การแบ่งชนิดของโลหะและโลหะผสมในกระบวนการผลิตวงจรรวมต้องมีสมบัติดังนี้

1. ความนำไฟฟ้า (Conductivity) : ต้องมีความนำไฟฟ้าสูงและนำกระแสสูงได้อย่างสม่ำเสมอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

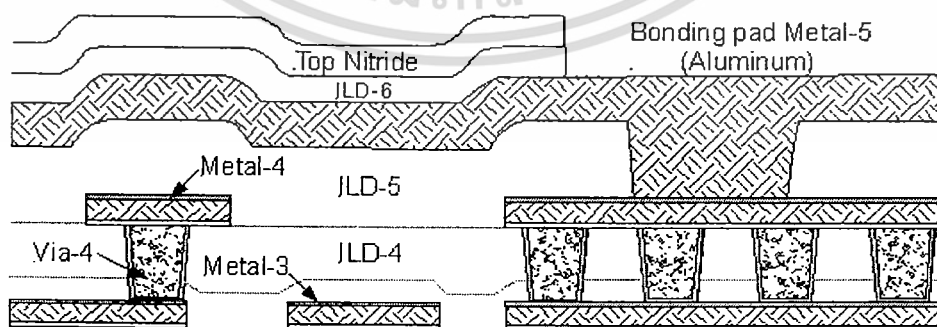
2. การยึดเกาะ (Adhesion): ต้องสามารถยึดเกาะกับฐานรองได้ดีและมีความต้านทานต่ำ
3. การเกิดฟิล์ม (Deposition): มีการเกิดอย่างรวดเร็วและสม่ำเสมอที่อุณหภูมิต่ำ
4. การเลือกพื้นที่ (Patterning/Planarization): สามารถกำหนดพื้นที่ในขนาดเล็กๆ ได้ดี
5. ความคงทน (Reliability): มีความคงทนต่ออุณหภูมิในกระบวนการผลิตและการใช้งาน
6. ทนการกัดกร่อน (Corrosion): ทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมี
7. ความเครียด (Stress) ทนแรงกลจากฐานรองได้ดี

ตารางที่ 2.2 สมบัติของโลหะต่างๆที่นำมาใช้ในกระบวนการผลิตวงจรรวม

Material	Melting Temperature (°C)	Resistivity ($\mu\Omega\text{-cm}$)
Silicon (Si)	1412	$\approx 10^9$
Doped Polysilicon (Doped Poly)	1412	$\approx 500 - 525$
Aluminum (Al)	660	2.65
Copper (Cu)	1083	1.678
Tungsten (W)	3417	8
Titanium (Ti)	1670	60
Tantalum (Ta)	2996	13 - 16
Molybdenum (Mo)	2620	5
Platinum (Pt)	1772	10

อลูมิเนียม (Aluminum)

ในกระบวนการสร้างวงจรมีขนาดเล็กถึงพื้นที่ของรอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำมีพื้นที่หน้าสัมผัสที่เล็กลงตามไปด้วย ผลของความต้านทานบริเวณรอยสัมผัสของรอยต่อโลหะกับสารกึ่งตัวนำมีค่าเพิ่มขึ้นเกิดเป็นรอยสัมผัสโอห์มมิกที่ไม่ดีทำให้ประสิทธิภาพของวงจรรวมลดน้อยลง จึงได้มีการเปลี่ยนวัสดุจากอลูมิเนียมเป็นทองแดง แต่อย่างไรก็ตามอลูมิเนียมก็เป็นพื้นฐานของการปลูกฟิล์มอยู่ในปัจจุบัน

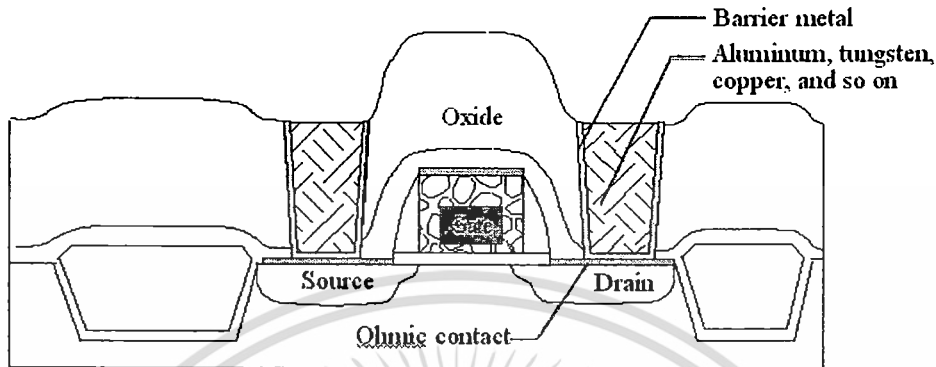


Metal-4 is preceded by other vias, interlayer dielectric, and metal layers.

รูปที่ 2.9 ชั้นโลหะอลูมิเนียมในวงจรรวม

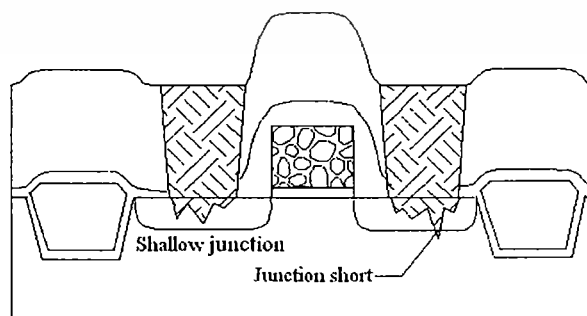
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สร้างรอยสัมผัส (Contact) ระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำที่เป็นส่วนต่างๆของวงจรรวม ซึ่งรอยสัมผัสของสารกึ่งตัวนำกับโลหะในลักษณะนี้ปกติจะมีคุณสมบัติเป็น"รอยสัมผัสโอห์มมิก"กล่าวคือจะไม่มีผลเกี่ยวข้องกับทิศทางการไหลของกระแสโดยกระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านได้ทั้งสองทิศทาง



รูปที่ 2.10 ชั้นโลหะ Barrier ในวงจรรวม

รอยสัมผัสโอห์มมิกที่ดีจะต้องมีความต้านทานต่ำแต่เนื่องจากผิวของสารกึ่งตัวนำมักจะมีชั้นของฉนวนปกคลุมอยู่ระหว่างชั้นของโลหะและชั้นสารกึ่งตัวนำจึงถูกแยกจากชั้นฉนวนออกไซด์ในกรณีเช่นนี้จะทำให้รอยสัมผัสที่ค่าความต้านทานสูงนั้นจึงไม่เหมาะที่จะนำไปใช้งาน เพื่อป้องกันปัญหาดังกล่าวหลังจากสร้างชั้นโลหะบนผิวซิลิคอนที่มีความเข้มสูงบริเวณที่เป็นรอยสัมผัสแล้วรอยสัมผัสที่จะถูกนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงค่าหนึ่งเพื่อให้อะตอมของโลหะสามารถแพร่ผ่านออกไซด์บางและเข้าไปในชั้นสารกึ่งตัวนำได้ จะทำให้รอยสัมผัสโอห์มมิกที่ดีมีค่าความต้านทานต่ำ วิธีการเช่นนี้ถูกเรียกว่า"การแอนนีส" (Annealing) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า การซินเตอร์ (Sintering) แต่เนื่องจากในปัจจุบันความลึกของชั้นพีเอ็นมีความลึกน้อยกว่า 1 ไมครอน เมื่อมีการแอนนีสเข้าไปอะตอมของอลูมิเนียมที่แพร่ลึกเข้าไปในส่วน Source และ Drain ไม่สม่ำเสมอทำให้เกิดมีส่วนลึกตื้นไม่เท่ากันเรียกว่า"สไปค" (spiking) ซึ่งส่วนที่เป็นสไปคอาจลึกลงไปถึงบริเวณรอยสัมผัสพีเอ็นทำให้เกิดความเสียหายเพราะถูกลัดวงจร

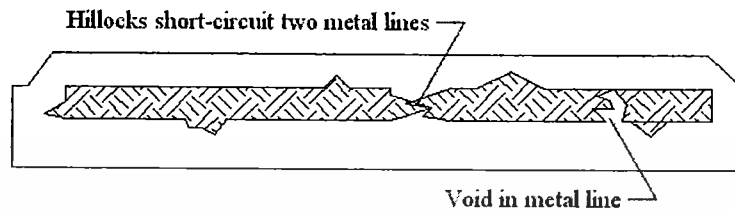


รูปที่ 2.11 การเกิดสไปคของชั้นโลหะในวงจรรวม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โลหะผสมอลูมิเนียม-ทองแดง (Aluminum-Copper Alloys)

การใช้โลหะอลูมิเนียมเป็นชั้นฟิล์มโลหะนั้น เมื่อมีการใช้งานนานๆจะพบว่า จะเกิดการเสื่อมของอุปกรณ์เนื่องจากการเกิดความเสื่อมของโลหะอลูมิเนียมนั่นเอง จึงมีการนำโลหะทองแดงมาผสมเพื่อให้การทำงานนั้นคงทนและเที่ยงตรงยิ่งขึ้นประมาณ 0.5 - 4 % เพื่อควบคุมการเกิด Hillock และ Void ในชั้นฟิล์มโลหะ



รูปที่ 2.12 การเกิดเกิดความเสื่อมของโลหะอลูมิเนียมของชั้นโลหะอลูมิเนียม

ทองแดง (Copper)

การนำวัสดุทองแดงมาใช้แทนอลูมิเนียมนั้นเนื่องจากมีสมบัติที่ดีดังนี้

1. ลดความต้านทานจาก 2.65 ไมโครโอมเซนติเมตรของอลูมิเนียมเป็น 1.678 ไมโครโอมเซนติเมตรของทองแดง
2. ลดการกินกระแสของอุปกรณ์
3. เพิ่มความหนาแน่นของวงจร
4. ไม่เกิดการเสื่อมของโลหะ
5. ลดกระบวนการผลิต

เมื่อเปรียบเทียบกับเทคโนโลยีที่ขนาดต่างๆได้ดังตาราง

ตารางที่ 2.3 สมบัติของโลหะทองแดง/อลูมิเนียมที่การผลิตวงจรรวมขนาดวิกฤติต่างๆ

Technology	0.25 μm	0.18 μm	0.13 μm
Conventional Interconnect Technology:			
• Al/Cu Interconnect Alloy and TiN Barrier Metal	0	+21%	+93%
New Technology Introduced by Generation:			
• Reduced Barrier Thickness	-10%	-27%	
• Low- k (3.0) dielectric			-16%
• Dual Damascene Cu Interconnect and plugs			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเปรียบเทียบสมบัติของทองแดงกับอลูมิเนียม

ตารางที่ 2.4 เปรียบเทียบสมบัติของโลหะทองแดงและอลูมิเนียม

Property/Process	Al	Cu
Resistivity ($\mu\Omega\text{-cm}$)	2.65 (3.2 for Al-0.5%Cu)	1.678
Electromigration resistance	Low	High
Corrosion resistance (in air)	High	Low
CVD processing	Yes	No
CMP (chemical mechanical planarization) processing	Yes	Yes

ในกระบวนการผลิตวงจรรวมเมื่อนำทองแดงมาใช้ในชั้นฟิล์มโลหะนั้นต้องมีการพัฒนาอีกหลายด้านคือ

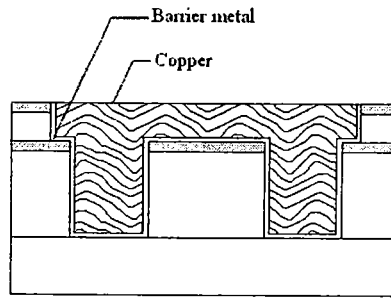
- ทองแดงมีการแพร่ยังซิลิคอนและซิลิคอนไดออกไซด์ได้อย่างรวดเร็ว
- การเลือกพื้นที่ด้วยการกัดนั้นยาก
- เกิดออกไซด์บนผิวทองแดงอย่างรวดเร็ว

2.3.2 โลหะชั้นป้องกัน (Barrier Metals)

เทคนิคการสร้างโลหะชั้นป้องกันนี้เพื่อให้รอยต่อต่างๆเป็นรอยต่อแบบโอห์มมิกและมีความต้านทานต่ำ อีกทั้งยังสามารถป้องกันการแพร่ผ่านมาผสมกันระหว่างโลหะกับวัสดุอื่นๆ เช่น การแพร่ของทองแดงในซิลิคอนไดออกไซด์ โดยวัสดุที่นำมาใช้ต้องมีสมบัติดังนี้

- ป้องกันการแพร่ของวัสดุทั้งสองด้านได้ดี
- มีค่าความนำสูง
- มีการยึดเกาะดีทั้งสองด้านของวัสดุ
- ทนต่อการเกิดการเสื่อมในการนำไฟฟ้า
- มีความเสถียรในอุณหภูมิสูง
- ทนต่อการกัดกร่อนและเกิดออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

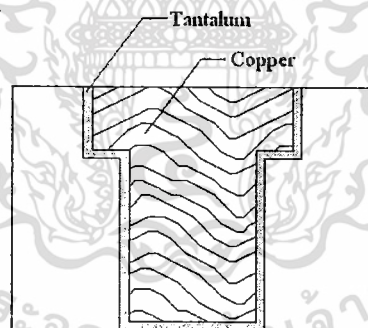


รูปที่ 2.13 ชั้นโลหะ Barrer สำหรับทองแดง

โลหะชั้นป้องกันของทองแดง (Copper Barrier Metals)

เมื่อมีการนำทองแดงมาใช้ในกระบวนการผลิตแล้วจึงต้องมีการหาโลหะชั้นป้องกันที่เหมาะสมสำหรับทองแดงต้องมีสมบัติดังนี้

1. ป้องกันการแพร่ของทองแดงได้
2. ความต้านทานฟิล์มต่ำ
3. สามารถยึดเกาะดีทั้งฟิล์มจนวนและทองแดง
4. ร่วมกระบวนการขัดได้กลเคมีได้ดี (CMP)
5. ต้องมีความสม่ำเสมอของฟิล์มรวมทั้งต้องสร้างในอุปกรณ์ที่มีค่า Aspect ratio สูงๆได้
6. มีความหนาแน่นน้อยๆ เพื่อให้ทองแดงทำหน้าที่ตัวนำมากที่สุด

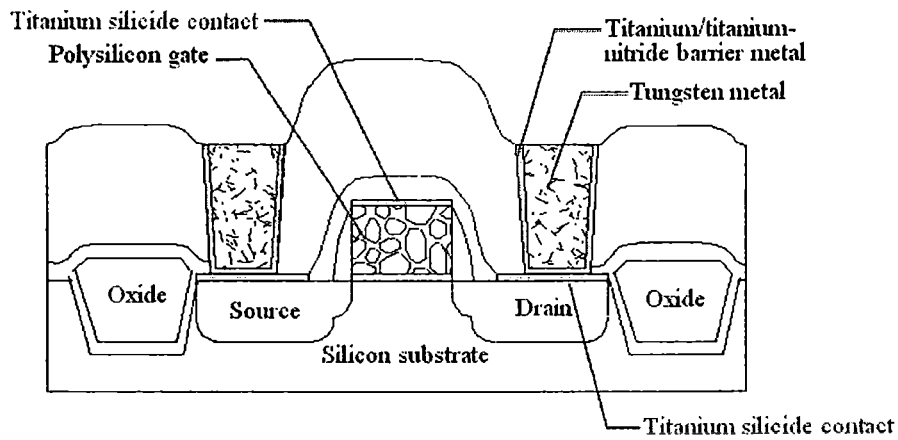


รูปที่ 2.14 ชั้นโลหะไททาเนียมทำหน้าที่โลหะ Barrer สำหรับทองแดง

2.3.3 ซิลิไซด์ (Silicide)

ซิลิไซด์เป็นโลหะผสมที่มีความเสถียรในอุณหภูมิสูงและมีความต้านทานต่ำ และเป็นโลหะที่มีความทนต่อความร้อน ซิลิไซด์เป็นวัสดุที่สำคัญในการนำมาใช้สร้างเป็นรอยต่อระหว่าง Source/ Drain และเกต ของวงจรร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

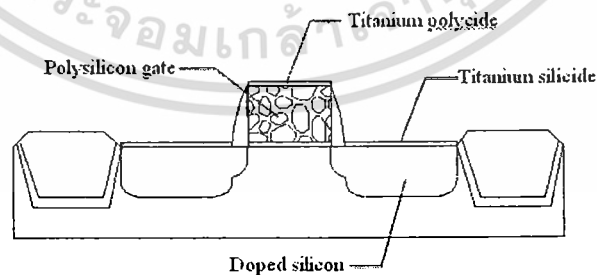


รูปที่ 2.15 ชั้นโลหะซิลิไซด์ในรอยระหว่างรอยต่อซอร์ส และเดรน

ถ้ากระบวนการสร้างขั้วเกตจากโพลีไซด์ (โพลีซิลิคอนที่มีการเติมสารเจือ) พบว่าจะมีค่าความต้านทานประมาณ 500 ไมโครโอมเซนติเมตร ซึ่งจะก่อให้เกิดค่า RC ทำให้การทำงานของวงจรถ้าลดลง

ตารางที่ 2.5 เปรียบเทียบสมบัติของซิลิไซด์ที่มีความเสถียรในอุณหภูมิสูงถึง 1000 °C

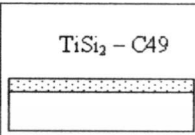
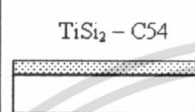
Silicide	Lowest Eutectic Temperature (°C)	Typical Forming Temperature 1 (°C)	Resistivity ($\mu\Omega\text{-cm}$)
Cobalt/silicon (CoSi_2)	900	550 – 700	10 – 18
Molybdenum/silicon (MoSi_2)	1410	900 – 1100	100
Platinum/silicon (PtSi)	830	700 – 800	28 – 35
Tantalum/silicon (TaSi_2)	1385	900 – 1100	35 – 45
Titanium/silicon (TiSi_2)	1330	600 – 800	13 – 25
Tungsten/silicon (WSi_2)	1440	900 – 1100	70



รูปที่ 2.16 ชั้นโลหะไททาเนียมโพลีไซด์

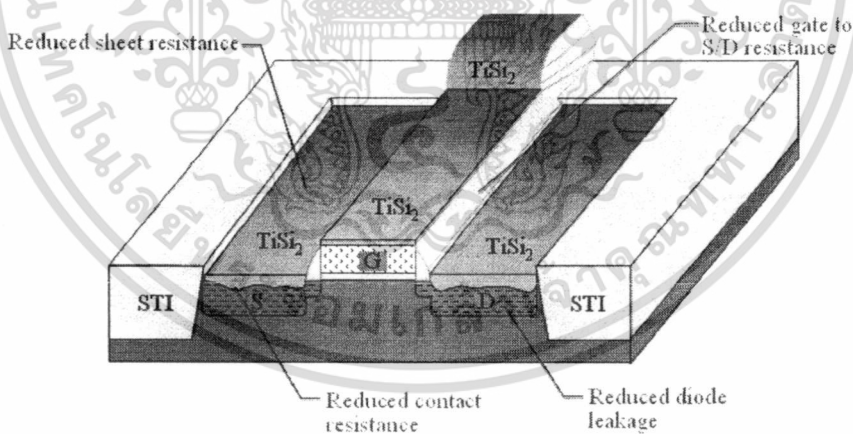
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อปลูกฟิล์มซิลิไซด์แล้วต้องมีการแอนนัล (Anneal) เพื่อให้ฟิล์มและซิลิคอนมีรอยสัมผัสแบบโอห์มมิก ซึ่งกระบวนการนั้นมีสองวิธีคือ แอนนัลที่อุณหภูมิสูง (C54) หรือ อุณหภูมิต่ำ (C49) ซึ่งจะได้พิกัดความต้านทานดังนี้

	Sintering Temperature	Resistivity
 TiSi ₂ - C49	625 - 675°C	60 - 65 μΩ-cm
 TiSi ₂ - C54	800°C	10 - 15 μΩ-cm

รูปที่ 2.17 ความต้านทานของชั้นโลหะซิลิไซด์ในอุณหภูมิแอนนัลต่างๆ

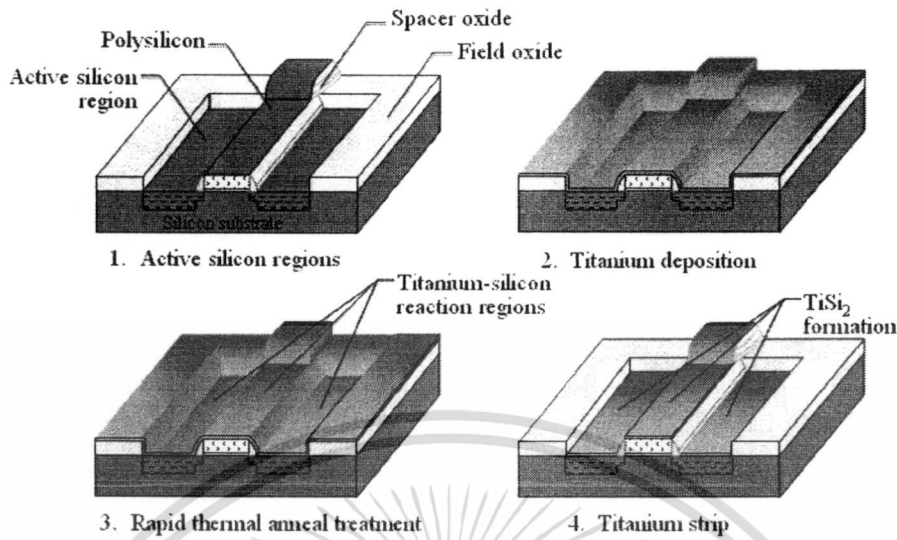
กระบวนการผลิตในเทคโนโลยีระดับ VLSI และ ULSI มีกระบวนการสร้างช่องทางเดินระหว่าง Source และ Drain มีขนาดเล็กมากทำให้มีความต้านทานสูง



รูปที่ 2.18 ขนาดชั้นโลหะซิลิไซด์ในรอยระหว่างรอยต่อซอร์ซ และเดรนขนาดเล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

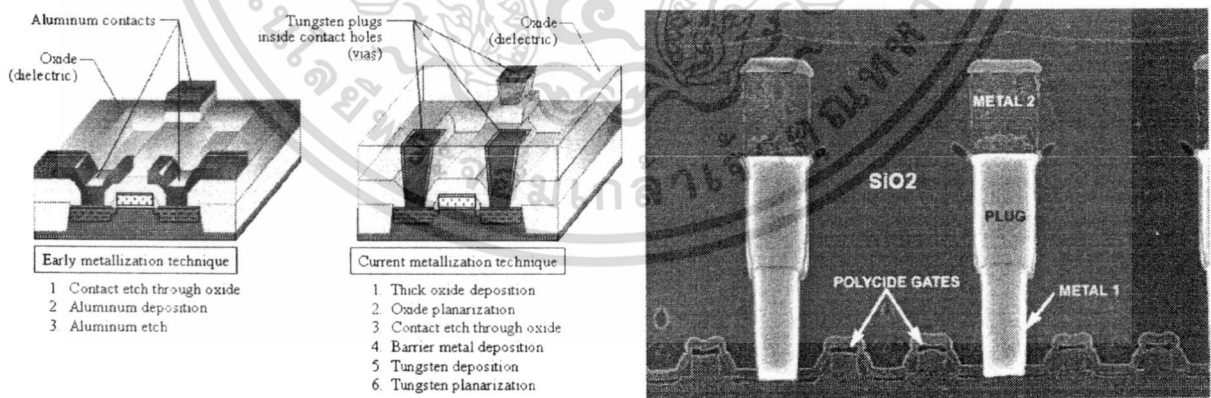
ซิลิไซด์สามารถนำมาใช้เป็นขั้วโลหะได้อย่างเหมาะสมด้วยกระบวนการดังนี้



รูปที่ 2.19 กระบวนการสร้างชั้นโลหะซิลิไซด์

2.3.4 ขั้วโลหะ (Metal Plug)

ในวงจรรวมนั้นมีการสร้างรอยต่อระหว่างซิลิคอนกับชั้นโลหะที่หนึ่งนั้นจำนวนมากๆ (มากกว่าหนึ่งพันล้านขั้ว) ในอุตสาหกรรมการผลิตได้เลือกโลหะทั้งสแตนเป็นขั้วโลหะนี้เนื่องจากมีความต้านทานต่ำและสร้างในพื้นที่ที่มี Aspect ratio สูงๆได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 2.20 ขั้วโลหะในชั้นต่างๆ ในวงจรรวม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

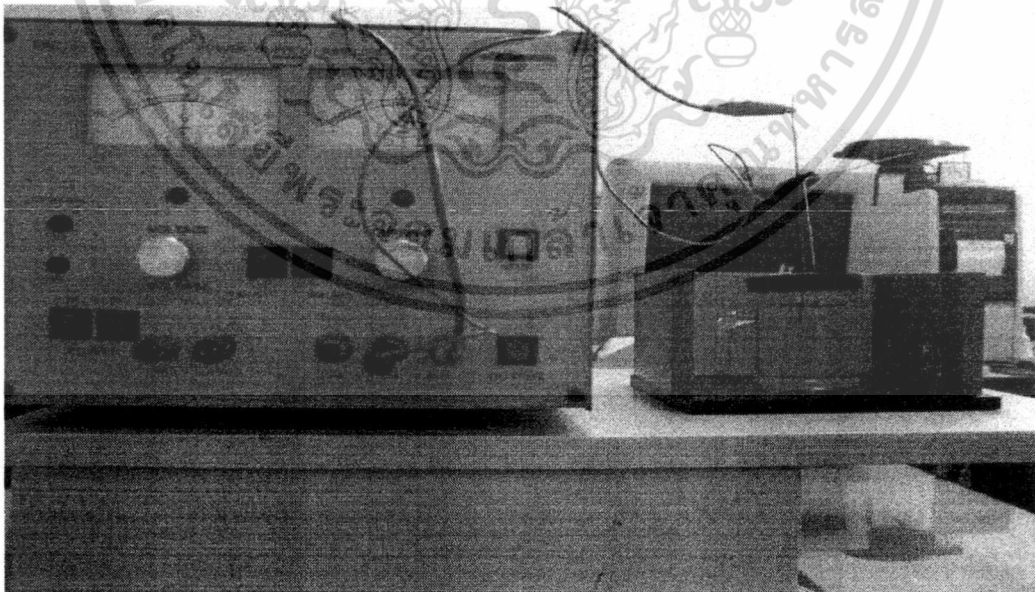
การออกแบบและสร้างชุดทดลอง

การออกแบบและสร้างชุดทดลองนั้นต้องมีการศึกษาถึงวัสดุที่ใช้ เนื่องจากวัสดุจะต้องทนต่อการกัดกร่อนของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งชุดเครื่องมือในการทดลองได้ออกแบบดังรูปที่ 3.1

3.1 ชุดเครื่องกักเคมีไฟฟ้า

อุปกรณ์เซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบเซลล์แท็งก์เดียวในแนวตั้งนี้จะประกอบด้วย ขั้วโลหะเป็นขั้วแอโนด ขั้วแคโทดจะจุ่มอยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ขั้วโลหะจะถูกนำไปวางอยู่ในสารละลายของเซลล์ไฟฟ้าเคมี ต่อจากนั้นก็ทำการเทสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกลงสู่เซลล์ไฟฟ้าเคมี และทำการป้อนกระแสไฟฟ้าบวกคงที่ให้กับขั้วไฟฟ้า และขั้วอิเล็กโทรดที่เป็นขั้วลบจะจุ่มอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ขณะที่ป้อนกระแสไฟฟ้านี้เองก็จะทำการฉายแสงเพื่อเร่งปฏิกิริยาในการกัดด้วย โดยเงื่อนไขต่างๆ ที่ใช้ในระหว่างกระบวนการแอโนไดซ์เซชันที่ได้ให้ความสนใจคือ ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า และเวลาในการแอโนไดซ์เซชัน ประกอบชุดกักเคมีไฟฟ้ามีอุปกรณ์พื้นฐานประกอบด้วย

1. แหล่งจ่ายกระแสไฟตรง 1–30 V 10 A
2. ชุดควบคุมความร้อนและกวนสารละลาย
3. ชุดปรับระยะฐานรองละเอียด



รูปที่ 3.1 ชุดเครื่องมือกักเคมีไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารละลายที่ใช้ในการกัดนั้น มีหลายชนิดซึ่งดังนี้

- สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก (ดูรายละเอียดภาคผนวก)
- สารละลายโปแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (ดูรายละเอียดภาคผนวก)

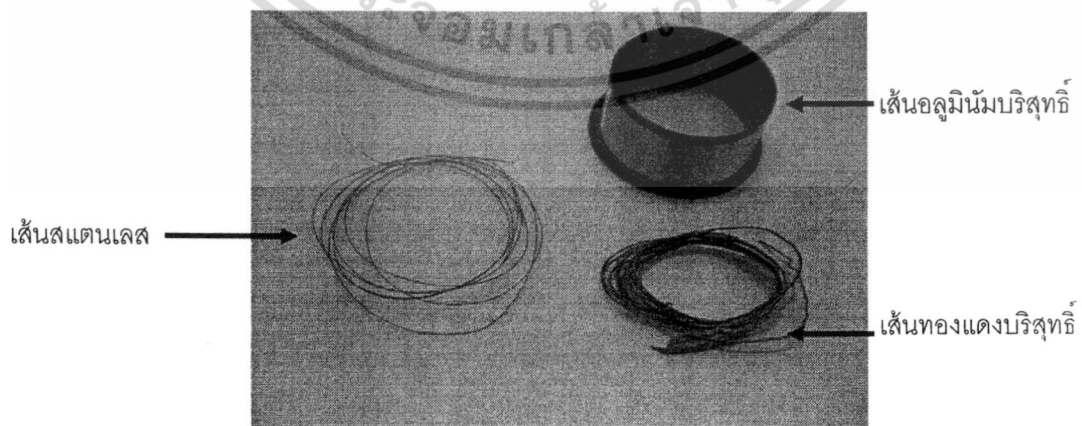
ลวดอิเล็กทรอนิกส์ชนิดต่างๆ ที่ทนต่อการกัดก่อนในการทดลองมีดังนี้

- ลวดอลูมิเนียมบริสุทธิ์
- ลวดทองแดงบริสุทธิ์
- ลวดทองคำ
- ลวดทองคำขาว
- ลวดสแตนเลส

ลวดทั้งสแตนเลสบริสุทธิ์ ใช้ทำเข็มวัดที่เส้นผ่านศูนย์กลางต่างๆ



รูปที่ 3.2 ลวดทั้งสแตนเลสบริสุทธิ์ ขนาดต่างๆ



รูปที่ 3.3 ขั้วอิเล็กทรอนิกส์ชนิดต่างๆ

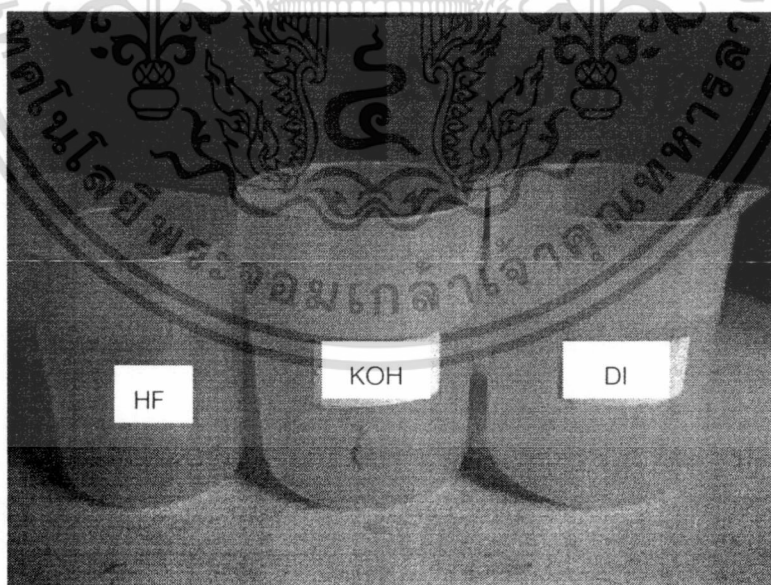
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การเตรียมสารละลายอิเล็กโทรไลต์

สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก เนื่องจากกรดไฮโดรฟลูออริก เป็นสารละลายที่ความเข้มข้น 47% vol ซึ่งมีความเข้มข้นมากจึงต้องทำการเจือจางด้วยน้ำปลอดประจุ (De-ionized water :DI) ให้มีความเข้มข้นที่ต้องการ โดยการนำเอาหลอดทั้งสแตนผ่านกระบวนการทำความสะอาดด้วยการแช่ในสารละลายสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกเจือจางเพื่อให้ออกไซด์ที่ผิวของหลอดทั้งสแตนออกและนำไปล้างด้วยน้ำ DI เพื่อล้างสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกเจือจางออก ต่อจากนั้นก็ทำการเทสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ลงไปในเซลล์ไฟฟ้าเคมี นำขั้วอิเล็กโทรดจุ่มลงในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก แล้วทำการป้อนกระแสไฟฟ้าขั้วบวกคงที่ให้กับขั้วไฟฟ้าที่อยู่ด้านหลังของขั้วโลหะ และป้อนกระแสไฟฟ้าขั้วลบให้กับขั้วอิเล็กโทรดที่จุ่มอยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีขึ้น ระหว่างกระบวนการแอนโนไดซ์เซชัน อันได้แก่

- ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก
- ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการแอนโนไดซ์เซชัน
- เวลาที่ใช้ในการแอนโนไดซ์เซชัน

สารละลายโปรเทสเซียมไฮดรอกไซด์ สารโปรเทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นของแข็งมีน้ำหนัก 59 g/mol ซึ่งความเข้มข้นที่ต้องการคือ 2 mol จึงใช้โปรเทสเซียมไฮดรอกไซด์หนัก 11.2 g ละลายในน้ำ DI ปริมาตร 100 cc.



รูปที่ 3.4 สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก โปรเทสเซียมไฮดรอกไซด์และ น้ำบริสุทธิ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดลองและวิเคราะห์ผล

4.1 การทดลองกักเคมีไฟฟ้า

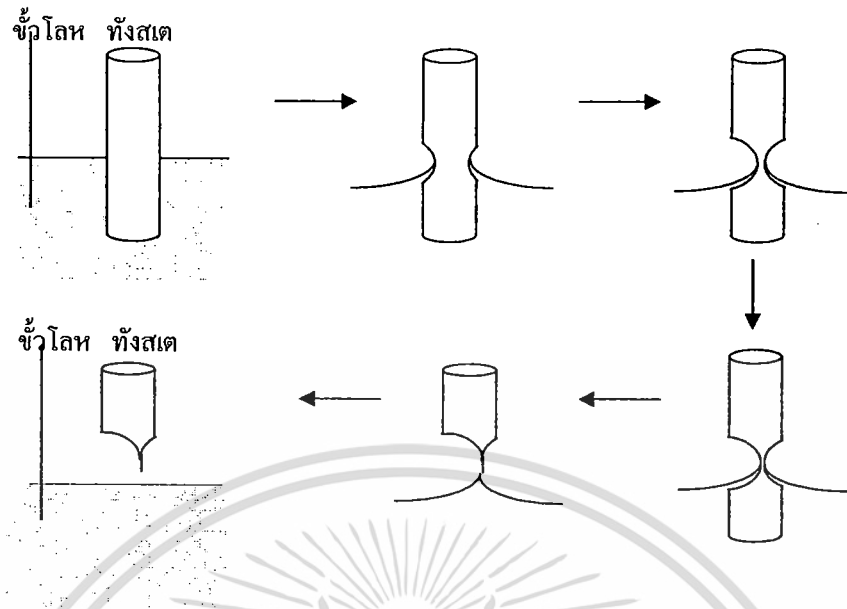
ในการกักเคมีไฟฟ้ามีตัวแปรที่ต้องศึกษาให้เหมาะสมเช่น ขั้วโลหะ การไปอัส การเติมสารอื่นๆ ซึ่งทั้งหมดจะมีผลต่อขนาดของปลายเข็มวัดที่ได้จึงสรุปเป็นข้อๆดังนี้

ขั้วโลหะ ลักษณะของขั้วโลหะที่เหมาะสมรูปแบบของขั้วโลหะ ตำแหน่งขั้วโลหะ ชนิดของโลหะ เป็นต้นซึ่งเมื่อมีการทดลองการกักพบว่ารูปร่างของขั้วโลหะมีผลต่อการกักเข็มวัด

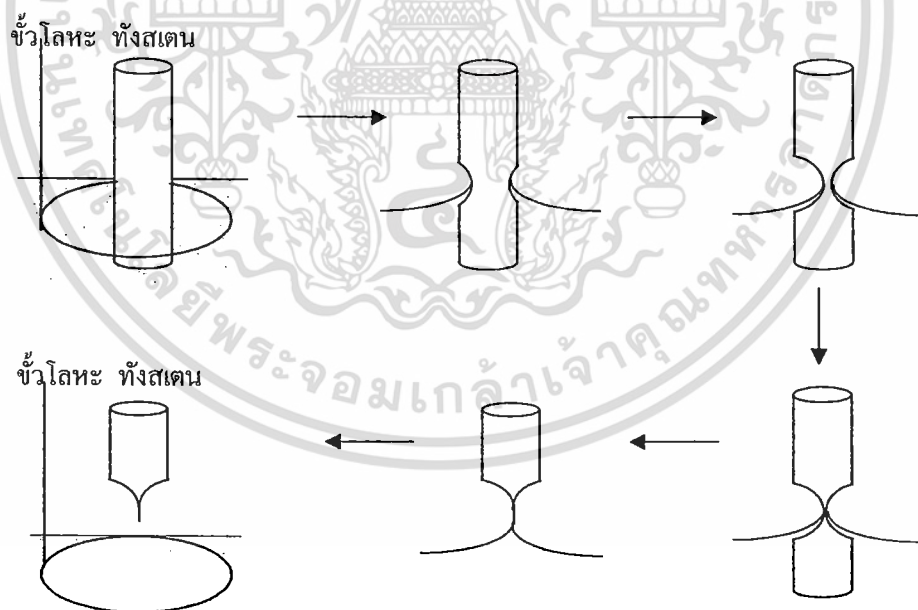


รูปที่ 4.1 ลักษณะของขั้วโลหะแบบแท่งและแบบวงแหวน

เมื่อทำการกักเคมีไฟฟ้าโดยใช้แท่งโลหะจะมีการกักในลักษณะด้านที่อยู่ใกล้กับแท่งขั้วโลหะมีการกักมากกว่าอีกด้านหนึ่งทำให้เข็มวัดไม่สมมาตร จะได้ทดลองทำขั้วโลหะแบบวงแหวนผลที่ได้เข็มวัดจะมีความสมมาตรเท่ากัน



รูปที่ 4.2 ลักษณะของเชื่อมวัดจากข้อโลหะแบบแท่ง



รูปที่ 4.3 ลักษณะของเชื่อมวัดจากข้อโลหะแบบวงแหวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทดลองปรับตำแหน่งของขั้วโลหะจะพบว่าขั้วโลหะแบบวงแหวน ณ ตำแหน่งผิวสารละลายจะทำให้ปลายของเข็มวัดจะมีขนาดเล็กแสดงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ตำแหน่งของขั้วโลหะแบบวงแหวน

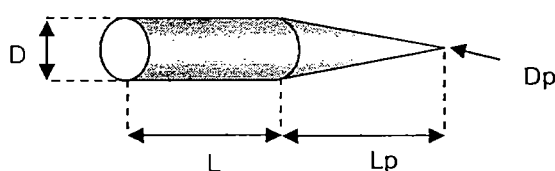
เนื่องจากเมื่อตำแหน่งของขั้วโลหะแบบวงแหวนอยู่ที่ผิวสารละลายจะทำให้กระแสไปอัสที่ให้กับชุดกักเคมีไฟฟ้ามีระยะสั้นที่สุดรวมถึงความตึงผิวของสารละลายจะมีผลให้มุมที่สารละลายสัมผัสกับทั้งสแตนต่างกัน

4.2 การไปอัสและเวลาในการทดลอง

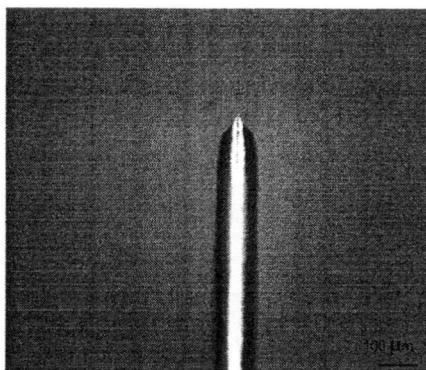
ในการทดลองเมื่อได้เงื่อนไขของขั้วโลหะที่ดีแล้วจึงได้ทำการทดลองการไปอัสชุดเคมีไฟฟ้าดังตาราง

ตารางที่ 4.1 เงื่อนไขการทดลอง

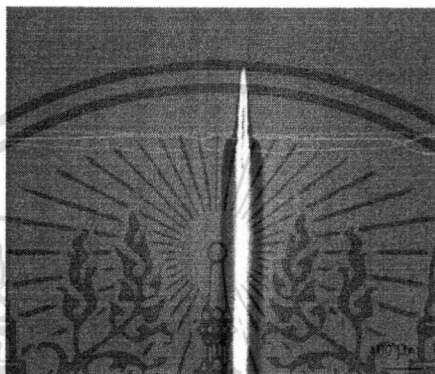
เงื่อนไข	แรงดันไปอัส (V.)	กระแส (mA)	เวลากัก (min.)	ลักษณะเข็ม (μm)	
				ความยาว (L_p)	เส้นผ่านศูนย์กลาง (D_p)
1	3	150	23	~ 1000	~ 5
2	5	500	10	~ 1300	~ 10
3	9	800	7	~ 1500	~ 15
4	13	1000	2.5	~ 2000	~ 20



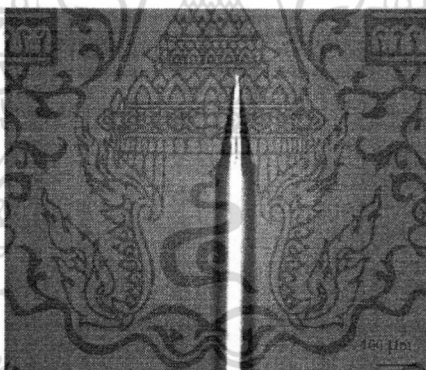
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



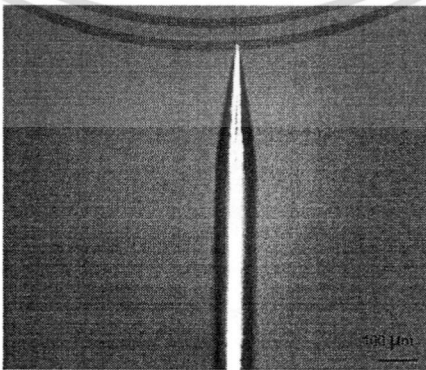
รูปที่ 4.5 เข็มวัดที่ได้ตามเงื่อนไขที่ 1



รูปที่ 4.6 เข็มวัดที่ได้ตามเงื่อนไขที่ 2



รูปที่ 4.7 เข็มวัดที่ได้ตามเงื่อนไขที่ 3



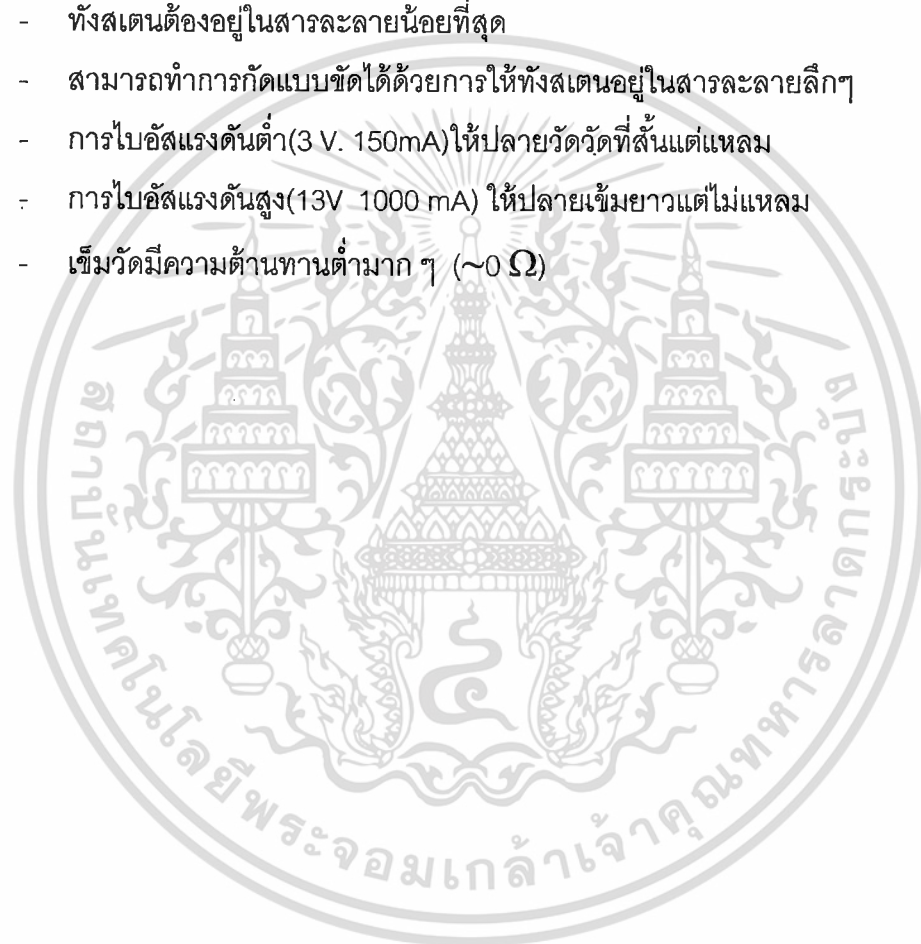
รูปที่ 4.8 เข็มวัดที่ได้ตามเงื่อนไขที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการกัดเคมีไฟฟ้าพบว่าเมื่อทั้งสแตนที่อยู่ในสารละลายจะมีการกัดแบบขีดหรือ Electrochemical polishing ซึ่งทำให้เข็มวัดหรือทั้งสแตนมันวาวเหมือนการกัดแบบเป็นระนาบลงไป

จากการทดลองสามารถสรุปเงื่อนไขที่ดีที่สุดคือ

- ขั้วโลหะที่ดีที่สุดคือ ลวดทองคำบริสุทธิ์ แต่มีราคาแพง
- ขั้วโลหะที่ทนต่อการกัดมากที่สุดคือ ลวดสแตนเลส
- ขั้วแบบวงแหวนทำให้เข็มวัดได้สมมาตร
- ขั้วโลหะแบบวงแหวนอยู่ที่ผิวสารละลายจะมีการกัดที่ดีที่สุด
- ทั้งสแตนต้องอยู่ในสารละลายน้อยที่สุด
- สามารถทำการกัดแบบขีดได้ด้วยการให้ทั้งสแตนอยู่ในสารละลายลึกๆ
- การไบอัสแรงดันต่ำ (3 V, 150mA) ให้ปลายวัดวัดที่สั้นแต่แหลม
- การไบอัสแรงดันสูง (13V, 1000 mA) ให้ปลายเข็มยาวแต่ไม่แหลม
- เข็มวัดมีความต้านทานต่ำมาก ๆ ($\sim 0 \Omega$)



บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์

จากการทดลองการกัดเคมีสามารถสร้างชุดเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการกัดเคมีไฟฟ้า และสามารถทำการปรับค่าตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อการกัดเคมีไฟฟ้าของเซมิเวดทั้งสแตนเลสได้ เซมิเวดที่มีความยาวหรือเส้นผ่านศูนย์กลางของปลายเซมิเวดได้ ซึ่งขนาดและความของเซมิเวดจะขึ้นอยู่กับชิ้นงานที่ต้องการนำไปวัดว่าเหมาะสมเพียงใด สมบัติทางไฟฟ้าของเซมิเวดทั้งสแตนเลสสำหรับงานไมโครอิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างขึ้นมีความต้านทานต่ำทำให้ไม่มีผลกระทบต่อการวัดสมบัติทางไฟฟ้า

เงื่อนไขของเครื่องกัดไฟฟ้าสามารถกำหนดจากการบอกซ์ของการกัด ส่วนเงื่อนไขที่ต้องทำการศึกษาต่อคือ ความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้ ชนิดของสารละลาย หรือสารเคมีที่จะทำให้มีการลดแรงดึงผิวของสารละลายกับผิวทั้งสแตนเลส



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม



1. Analysis of biological molecules : an introduction to principles, instrumentation and techniques / Geoffrey, W.H. Potter London : Chapman & Hall, c1995
2. Monk, Paul Fundamentals of electro-analytical chemistry / Paul Monk, Chichester : John Wiley, c2001
3. ไฟฟ้าเคมี (Electro chemistry) / สุรพงษ์ สุวจิตตานนท์ , กรุงเทพฯ : โอเดียนสโตร์, 2531.
4. ปฏิกริยาไฟฟ้าเคมี / เรียบเรียงโดย ศรีลักษณ์ มาโกมล, กรุงเทพฯ : สกอลลาร์ วิดีโอ, 2547.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

ชื่อเคมี IUPAC: Hydrofluoric Acid

ชื่อเคมีทั่วไป	Fluorhydric acid or Fluoric acid		
ชื่ออื่น ๆ	Hydrogen fluoride; Etching acid; HF A; Fluorohydric acid; Fluoric acid; Antisal 2B; Deuteriumfluoride;		
สูตรโมเลกุล	HF	สูตรโครงสร้าง	H—F
รหัส IMO			CAS No. 7664-39-3
			UN/ID No. 1052, 1790
		รหัส ECNO.	009-002-00-6
		รหัส RTECS	MW 7875000
รหัส EUEINECS/ELINCS	231-634-8	ชื่ออื่น	-
ชื่อผู้ผลิต/นำเข้า	Matheson Tri-gas Inc.		
แหล่งข้อมูลอื่น ๆ	-		

3. การใช้ประโยชน์ (Uses)

- สารคลอโรฟลูออโรคาร์บอน ใช้เป็นสารทำความเย็น สารขับเคลื่อน สารเป่าโฟม
- ใช้ทำความสะอาดผิวโลหะ ขุดโลหะด้วยไฟฟ้า กัดผิวตกแต่ง ซัดเครื่องแก้ว

4. ค่ามาตรฐานและความเป็นพิษ (Standard and Toxicity)

LD ₅₀ (มก./กน.) :	- (-)	LC ₅₀ (มก./ม ³) :	1276 / 1	ชั่วโมง (ชม)	
IDLH(ppm) :	30	ADI(ppm) :	-	MAC(ppm) :	-
PEL-TWA(ppm) :	3	PEL-STEL(ppm) :	-	PEL-C(ppm) :	-
TLV-TWA(ppm) :	-	TLV-STEL(ppm) :	6	TLV-C(ppm) :	3
พรม ส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อม พ.ศ. 2535(ppm) :	-				
พรม โรงงาน พ.ศ. 2535 (ppm) :	-				
พรม. ความคุ้มครองสัตว์ พ.ศ. 2530	✓ ชนิดที่ 1	ชนิดที่ 2	ชนิดที่ 3		
พรม. คุ้มครองแรงงาน พ.ศ. 2541 (ppm) :					
เฉลี่ย 8 ชั่วโมง	-	ระยะสั้น	-	ค่าสูงสุด	-
พรม. วัตถุอันตราย พ.ศ. 2535	✓ ชนิดที่ 1	ชนิดที่ 2	✓ ชนิดที่ 3	ชนิดที่ 4	
หน่วยงานที่รับผิดชอบ	กรมโรงงานอุตสาหกรรม				

5. คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี (Physical and Chemical Properties)

สถานะ :	ก๊าซ	สี :	ไม่มีสี	กลิ่น :	ฉุน	นพ. โมเลกุล :	20.01
จุดเดือด(°C) :	20					จุดหลอมเหลว/จุดเยือกแข็ง(°C) :	-83
ความถ่วงจำเพาะ(น้ำ=1) :	1.0			ความหนาแน่นไอ(อากาศ=1) :	0.7		
ความหนืด(mPa·sec) :	- ความดันไอ(มม.ปรอท) : 760 ที่ 20 ⁰ ซ.						
ความสามารถในการละลายน้ำที่(กรัม/100 มล.) :	ได้ดีมาก ที่ - 0 ⁰ ซ. ความเป็นกรด-ด่าง(pH) : - ที่ - 0 ⁰ ซ.						
แฟกเตอร์แปลงหน่วย 1 ppm = 0.82	มก./ม ³	หรือ 1 มก./ม ³ = 1.22	ppm	ที่ 25	0 ⁰ ซ.		

ข้อมูลทางกายภาพและเคมีอื่น ๆ :

- สารนี้ละลายได้ในแอลกอฮอล์ ตัวทำละลายอินทรีย์ ละลายได้เล็กน้อยในอีเธอร์ เบนซีน โทลูอีน ไวซีน เตตระไฮโดรนพราลีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

๖. อันตรายต่อสุขภาพอนามัย (Health Effect)

สัมผัสทางหายใจ	- การหายใจเข้าไปจะทำให้เกิดการระคายเคืองต่อเยื่อเมือก ทางเดินหายใจส่วนบน แผลไหม้ เจ็บหน้าอก หายใจติดขัด ผิวหนังเขียวคล้ำเนื่องจากขาดออกซิเจน ปอดอุดตัน ไตถูกทำลาย
สัมผัสทางผิวหนัง	- การสัมผัสถูกผิวหนัง จะทำให้เกิดการระคายเคือง ผื่นแดง ปวดแสบปวดร้อน และแผลไหม้ สารนี้สามารถซึมผ่านผิวหนังได้
กินหรือกลืนเข้าไป	- การกลืนหรือกินเข้าไปทำให้เกิดแผลไหม้ อาเจียน ปวดศีรษะ ระบบย่อยอาหารผิดปกติ ท้องร่วง สายตามล้ามัว ไตถูกทำลาย
สัมผัสถูกตา	- การสัมผัสถูกตา จะทำให้เกิดการระคายเคือง น้ำตาไหล ตาแดง เจ็บตา แผลไหม้ ตามอด
การข่มขู่แรง ความผิดปกติอื่น ๆ	- สารนี้ไม่ถูกจัดเป็นสารก่อมะเร็งของ OSHA, NTP, IARC - อวัยวะเป้าหมาย : ตับ ไต

๗. ความคงตัวและการเกิดปฏิกิริยา (Stability and Reaction)

- การเกิดปฏิกิริยา : สารนี้เป็นกรดอย่างแรงจะเกิดปฏิกิริยาขึ้นเมื่อสัมผัสถูกน้ำ ทำให้เกิดก๊าซพิษ กัดกร่อน ไอน้ำ และระเบิดได้
- สภาพที่ต้องหลีกเลี่ยง : ความร้อน เปลวไฟ ประกายไฟ
- สารที่เข้ากันไม่ได้ : ออกไซด์ของโลหะ โซดาในด วัสดุติดไฟได้ ฮาโลเจน โลหะ สารออกซิไดซ์ เกลของโลหะ สารรีดิวซ์
- อันตรายจากการสลายตัว : การสลายตัวเมื่อสัมผัสถูกน้ำหรือความชื้นจะทำให้เกิด ไฮโดรเจนฟลูออไรด์ การสลายตัวของความชื้นจะทำให้เกิดสารประกอบฮาโลเจน ไฮโดรเจน
- อันตรายจากการเกิดปฏิกิริยาออสซิเมอร์ : อาจเกิดขึ้นได้

๘. การเกิดอัคคีภัยและการระเบิด (Fire and Explosion)

จุดวาบไฟ(°C) :	-	จุดติดไฟได้เอง(°C) :	-
ค่า LEL % :	- UEL % :	-	-
LF % :	- UFL % :	-	-

NFPA Code :  2

NFPA 704 Code

- สารนี้ไม่ติดไฟ
- สารดับเพลิงให้ใช้ผงเคมีแห้ง คาร์บอนไดออกไซด์ ใช้น้ำฉีดเป็นฝอย หรือใช้โฟมชนิดที่เหมาะสม
- เพลิงไหม้รุนแรง ให้ใช้น้ำหรือใช้น้ำฉีดเป็นฝอย
- ภาชนะบรรจุอาจเกิดการระเบิดได้เมื่อสัมผัสถูกความร้อน
- เคลื่อนย้ายภาชนะบรรจุออกจากบริเวณไฟไหม้ถ้าทำได้โดยไม่เสี่ยงอันตราย
- ฉีดหล่อเย็นภาชนะบรรจุด้วยน้ำจนกว่าไฟจะดับสนิท
- อยู่ห่างจากด้านท้ายของภาชนะบรรจุ
- ให้อยู่ด้านเหนือลมและออกจากบริเวณที่ต่ำกว่า

๙. การเก็บรักษา/สถานที่เก็บ/เคลื่อนย้าย/ขนส่ง (Storage and Handling)

- เก็บในภาชนะบรรจุที่ปิดมิดชิด
- ป้องกันความเสียหายทางกายภาพ
- เก็บในบริเวณที่แห้ง เย็น และมีการระบายอากาศเป็นอย่างดี
- เก็บให้ห่างจากสารที่เข้ากันไม่ได้
- ใช้เฉพาะในบริเวณที่มีตู้ดูดสารเคมีเท่านั้น
- ติดตั้งที่อาบน้ำและฉีดล้างตาฉุกเฉิน
- รหัส UN / NA : 1052 (แอน ไฮดรอส) 1790 (สารละลาย)
- ประเภทการบรรจุหีบห่อ : กลุ่ม I

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

๑๐. การกำจัดกรณีรั่วไหล (Leak and Spill)

- ความคุมบุคคลที่ไม่มีหน้าที่เกี่ยวข้องให้ออกห่างจากบริเวณที่รั่วไหล
- กันแยกเป็นพื้นที่อันตราย
- ให้ดูดซับด้วยทราย หรือหินแร่เวอร์ไมคิวไลท์ (Vermiculite) และเก็บใส่ในภาชนะบรรจุที่มีฝาปิดมิดชิดสำหรับนำไปกำจัดต่อไป
- ฉีดน้ำให้เป็นฝอยเมื่อลดการเกิดไอระเหย
- อย่าสัมผัสวัสดุสารที่รั่วไหล
- สวมใส่อุปกรณ์ป้องกันอันตรายส่วนบุคคล (PPD/PPE) ที่เหมาะสม รองเท้าบูท และถุงมือยาง
- หยุดการรั่วไหลถ้าทำได้โดยปราศจากความเสียหายอันตราย
- ถ้ารั่วไหลมากให้ทำเขื่อนหรือห้ามกั้นเมื่อสูบน้ำไปกำจัดต่อไป
- การกำจัดให้เป็นไปตามที่กฎหมายกำหนด
- ประเภทของเสีย (EPA) : D 003

๑๑. อุปกรณ์ป้องกันอันตรายส่วนบุคคล (PPD/PPE)



ข้อแนะนำการเลือกใช้อุปกรณ์ป้องกันอันตรายส่วนบุคคล(PPD/PPE) :

- ความเข้มข้นของก๊าซหรือไอระเหยน้อยกว่า 20 ppm ให้ใช้หน้ากากแบบเต็มหน้าพร้อมตลับกรองไฮโดรฟลูออไรด์
- ความเข้มข้นของก๊าซหรือไอระเหยมากกว่า 20 ppm หรือในขณะฉุกเฉิน หรือไม่ทราบความเข้มข้นให้ใช้ อุปกรณ์ช่วยหายใจชนิดมีถังอากาศในตัว (SCBA) หรือหน้ากากชนิดมีท่อจ่ายอากาศ (SAR)
- ให้เลือกใช้ถุงมือชนิดที่ทำจากวัสดุไนไตรท์ นีโอพรีน PVC และยางธรรมชาติ ไม่แนะนำให้ใช้ชนิดไนล่อน แอลกอฮอล์ (PVA)

๑๒. การปฐมพยาบาล (First Aid)

ทาลงเข้าใจไป:

- ถ้าหายใจเข้าไป ให้เคลื่อนย้ายผู้ป่วยออกไปสู่ที่มีอากาศบริสุทธิ์ ถ้าผู้ป่วยหยุดหายใจช่วยผายปอด ถ้าหายใจติดขัดให้ออกซิเจนช่วยรักษาร่างกายให้อบอุ่น นำส่งไปพบแพทย์ทันที

ถึงหรือกลืนเข้าไป:

- ถ้ากลืนหรือกินเข้าไป ให้ดื่มน้ำหรือนม ถ้าผู้ป่วยหมดสติอย่ากระตุ้นทำให้อาเจียนหรือดื่มน้ำหรือนม ถ้าผู้ป่วยอาเจียนให้ก้มศีรษะลง นำส่งไปพบแพทย์

สัมผัสผิวหนัง:

- ถ้าสัมผัสผิวหนังให้ถอดเสื้อผ้า เครื่องประดับ รองเท้าที่เปื้อนสารเคมีออกทันทีล้างด้วยสบู่และน้ำปริมาณมาก ๆ อย่างน้อย 15-20 นาที

สัมผัสสายตา :

- ถ้าสัมผัสดวงตาให้ล้างตาด้วยน้ำปริมาณมาก ๆ กระพริบตาขึ้น-ลง บ่อย ๆ เพื่อให้มั่นใจว่าล้างออกหมด นำส่งไปพบแพทย์

อื่น ๆ :

- ใช้ทาผิวหนังด้วยเจลเคลือบผิวคอนกรีต 2.5 % หรือเอทิลีนไกลคอล 40

๑๓. ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Environmental Impacts)

- ห้ามทิ้งลงสู่ระบบน้ำ น้ำเสีย หรือดิน
- ไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อระบบนิเวศน์ หากมีการใช้และจัดการกับผลิตภัณฑ์อย่างเหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

14. การเก็บและวิเคราะห์ (Sampling and Analytical)

NMAM NO. : 7902, 7903, 7906 OSHA NO. : ID 110

วิธีการเก็บตัวอย่าง : กระดาษกรอง หลอดเก็บตัวอย่าง อิมมูโนแอสเซย์

วิธีการวิเคราะห์ : ซิงเกิ้ลทิวบ์ สเปกโตรโฟโตมิเตอร์

แก๊สโครมาโตกราฟี อะตอมมิกแอบซอร์ปชัน

ข้อมูลอื่น ๆ :

- ใช้กระดาษกรอง 0.8 ไมครอน ชนิด Cellulose ester membrane+Na₂CO₃-Treated cellulose pad
- วิธีการวิเคราะห์ ION-SPECIFIC ELECTRODE
- อัตราไหลในการเก็บตัวอย่าง 1-2 ลิตรต่อนาที

15. ขั้นตอนการปฏิบัติงานฉุกเฉิน (Emergency Response)

AVERS Guide : 07, 42

DOT Guide : 157, 125

- กรมฉุกเฉินโปรดใช้บริการระบบให้บริการข้อมูลการระงับอุบัติเหตุจากสารเคมีทางโทรศัพท์หรือสายด่วน AVERS ที่หมายเลขโทรศัพท์ 1650
- ต้องการทราบรายละเอียดเพิ่มเติมโปรดติดต่อ กองจัดการสารอันตรายและกากของเสีย กรมควบคุมมลพิษ โทร 0 2298 2447, 0 2298 2457

16. เอกสารอ้างอิง (Reference)

1. "Chemical Safety Sheet ,Samsom Chemical Publisher ,1991 ,หน้า 479-480 "
2. "NIOSH Pocket Guide to Chemical Hazards.US.DHHS ,1990 ,หน้า 168 "
3. "Lange'S Handbook of Chemistry McGrawHill ,1999 ,หน้า - "
4. "Fire Protection Guide to Hazardous Material ,NFPA ,1994 ,หน้า 1154, 418 "
5. "ITP. SAX'S Dangerous Properties of Industrial Materials ,1996 ,หน้า 1839 "
6. "สอป.มาตรฐานสารเคมีในอากาศและดัชนีวัดทางชีวภาพ ,นำอักษรการพิมพ์ ,2543 ,หน้า 36 "
7. "http://www.cdc.gov/NIOSH ,CISC Card ., 0283 "
8. "Firefighter 's Hazardous Materials Reference Book ,1997 ,หน้า 418, 423 "
9. "ACGIH. 2000 TLVs and BEIs Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents ,and Biological Exposure Indices. Ohio.,2000 ,หน้า 35 "
10. Source of Ignition หน้า - "
11. "อื่น ๆ" http://chemtrack.trf.or.th "

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อเคมี IUPAC: Potassium hydroxide

ชื่อเคมีทั่วไป	-			
ชื่อท้องถิ่น	Potassium hydrate; Caustic potash; Lye; Potassa; Caustic potash, liquid			
สูตรโมเลกุล	HKO	สูตรโครงสร้าง	K ⁺ OH ⁻	
รหัส IMO	CAS No.	1310-58-3	รหัส ECNO.	019-002-01-5
	UN/ID No.	1813, 1814	รหัส RTECS	TT 2100000
รหัส EUEINECS/ELINCS	215-181-3	ชื่อองค์กร	-	
ชื่อผู้ผลิต/นำเข้า	-			
แหล่งข้อมูลอื่น ๆ	-			

3. การใช้ประโยชน์ (Uses)

- ใช้ในกระบวนการผลิตแบตเตอรี่ เป็นอัลคาไลน์เซลล์

4. ค่ามาตรฐานและความเป็นพิษ (Standard and Toxicity)

LD ₅₀ (mg /kg) :	273 (หนู)	LC ₅₀ (mg./m ³) :	- / -	ซีไอเอ็ม :	(-)
IDLH(ppm) :	-	ADI(ppm) :	-	MAC(ppm) :	-
PEL-TWA(ppm) :	-	PEL-STEL(ppm) :	-	PEL-C(ppm) :	-
TLV-TWA(ppm) :	-	TLV-STEL(ppm) :	-	TLV-C(ppm) :	0.88
พรม. ส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อม พ.ศ. 2535(ppm) :	-				
พรม. โรงงาน พ.ศ. 2535 (ppm) :	-				
พรม. ควบคุมชุมชน พ.ศ. 2530 :	<input type="checkbox"/> ชนิดที่ 1 <input type="checkbox"/> ชนิดที่ 2 <input type="checkbox"/> ชนิดที่ 3				
พรม. คุ้มครองแรงงาน พ.ศ. 2541 (ppm) :	-				
เฉลี่ย 8 ชั่วโมง	-	ระยะสั้น	-	ค่าสูงสุด	-
พรม. วิกฤติ พ.ศ. 2535 :	<input checked="" type="checkbox"/> ชนิดที่ 1 <input type="checkbox"/> ชนิดที่ 2 <input type="checkbox"/> ชนิดที่ 3 <input type="checkbox"/> ชนิดที่ 4				
หน่วยงานที่รับผิดชอบ	กรมโรงงานอุตสาหกรรม				

5. คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี (Physical and Chemical Properties)

สถานะ :	ผงของแข็ง	สี :	ขาว	กลิ่น :	ไม่มีกลิ่น	พรม. โมเลกุล :	56.1	
จุดเดือด(°C) :	1324					จุดหลอมเหลว/จุดเยือกแข็ง(°C) :	361	
ความถ่วงจำเพาะ(น้ำ=1) :	2.044					ความหนาแน่นไค(อากาศ=1) :	-	
ความหนืด(mPa sec) :	- ความดันไอ(มม.ปรอท) : 1 ที่ 20 ⁰ ซ.							
ความสามารถในการละลายน้ำที่(กรัม/100 มล.) :	110 ที่ 25 ⁰ ซ.						ความเป็นกรด-ด่าง(pH) :	>13.5 ที่ 20 ⁰ ซ.
แฟกเตอร์อันตราย I ppm =	2.30	มก./ม ³ หรือ	1 มก./ม ³ = 0.44	ppm ที่	25	°ซ.		
ข้อมูลทางกายภาพและเคมีอื่น ๆ :	-							
	- สารนี้สามารถละลายได้ในแอลกอฮอล์							

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

๑๖ ๖. อันตรายต่อสุขภาพอนามัย (Health Effect)

สัมผัสทางหายใจ	- การหายใจเข้าไป เป็นอันตรายต่อเยื่อเมือกและทางเดินหายใจส่วนบน ทำให้คลื่นไส้ อาเจียน มึนงง ปวดศีรษะ หายใจติดขัด โรคปอดอักเสบ
สัมผัสทางผิวหนัง	- การสัมผัสผิวหนังจะก่อให้เกิดการระคายเคือง และดูดซึมผ่านผิวหนัง
กินหรือกลืนเข้าไป	- การกลืนเข้าไปจะเป็นอันตราย ทำให้ไอ มึนงง ปวดศีรษะ คลื่นไส้ อาเจียน คอหอยอักเสบ ท้องอืด อาหารอืด
สัมผัสลูกตา	- การสัมผัสลูกตาจะก่อให้เกิดการระคายเคือง
การก่อมะเร็ง ความผิดปกติอื่น ๆ	

๑๗ ๗. ความคงตัวและการเกิดปฏิกิริยา (Stability and Reaction)

- สารที่เข้ากันไม่ได้ : ความร้อนเหนือจุดหลอมเหลว, ดับุก, สารประกอบไนโตร, สังกะสี, สารอินทรีย์, แมกนีเซียม, ทองแดง
- สภาวะที่ควรหลีกเลี่ยง : ดูดซึม CO₂ จากอากาศ, ความร้อนจากการติดของสารระสูงมาก
- สารเคมีอันตรายที่เกิดจากการสลายตัว : คาร์บอนมอนอกไซด์
- อันตรายจากการเกิดปฏิกิริยาโพลีเมอร์ : ไม่เกิดขึ้น

๑๘ ๘. การเกิดอัคคีภัยและการระเบิด (Fire and Explosion)

จุดวาบไฟ(°C) :	-	จุดจุดติดไฟได้เอง(°C) :-
ค่า LEL % :	- UEL % :	NFPA Code :
LFL % :	- UFL % :	

- สารนี้ไม่สามารถเผาไหม้ได้

- การเกิดเพลิงไหม้ที่เลือกใช้สารดับเพลิง/วิธีการดับเพลิง ที่เหมาะสมสำหรับสถานการณ์การเกิดเพลิงโดยรอบ

- การเกิดเพลิงไหม้ให้สวมใส่อุปกรณ์ช่วยหายใจชนิดมีถังอากาศในตัว (SCBA)

- ในขณะที่เกิดเพลิงไหม้จะเกิดน้ำ/ก๊าซพิษซึ่งจะทาปฏิกิริยารุนแรงกับโลหะ จะปล่อยก๊าซ ไฮโดรเจนซึ่งเป็นก๊าซที่สามารถลุกติดไฟได้

๑๙ ๙. การเก็บรักษา/สถานที่เก็บ/เคลื่อนย้าย/ขนส่ง (Storage and Handling)

- เก็บในภาชนะบรรจุที่ปิดมิดชิด
- เก็บในบริเวณที่เย็นและแห้ง
- เก็บในบริเวณที่มีการระบายอากาศเพียงพอ
- เก็บห่างจากการสัมผัสกับน้ำ
- ให้สังเกตค่าเตือนและข้อควรระวังทั้งหมดที่ให้ไว้สำหรับสารนี้
- ให้ล้างทำความสะอาดร่างกาย ให้ทั่วถึงภายหลังทำการเคลื่อนย้าย

๒๐ ๑๐. การกำจัดกรณีรั่วไหล (Leak and Spill)

- วิธีปฏิบัติเมื่อสารหกั่วไหล : กั้นแยกบริเวณที่สารหกั่วไหล
- เก็บส่วนที่หกั่วไหลในภาชนะบรรจุที่ปิดมิดชิดเพื่อนำไปกำจัด
- ให้สวมใส่อุปกรณ์ป้องกันอันตรายที่เหมาะสม
- หลีกเลี่ยงการทำให้เกิดฝุ่น
- ป้องกันไม่ให้สารเคมีที่หกั่วไหล ไหลลงสู่ท่อระบายน้ำ แม่น้ำ และแหล่งน้ำอื่น ๆ
- สัมบริเวณสารหกั่วไหล หลังจากสารเคมีถูกเก็บกวาดเรียบร้อยแล้ว
- การพิจารณาการกำจัด : ปฏิบัติให้เป็นไปตามกฎระเบียบที่ทางราชการกำหนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

● 11. อุปกรณ์ป้องกันอันตรายส่วนบุคคล (PPD/PPE)



ขอแนะนำการเลือกใช้อุปกรณ์ป้องกันอันตรายส่วนบุคคล(PPD/PPE) :

- การเลือกประเภทถุงมือ : แนะนำให้ใช้ถุงมือที่ทำมาจากวัสดุประเภท Nitrile ซึ่งควรมีระยะเวลาที่จะทำให้เกิดการซึมผ่านผนังของถุงมือ (Permeation Breakthrough time) มากกว่า 360 นาที และ แนะนำให้ใช้ถุงมือที่ทำมาจากวัสดุประเภท Unsupported Neoprene ซึ่งควรมีระยะเวลาที่จะทำให้เกิดการซึมผ่านผนังของถุงมือ (Permeation Breakthrough time) มากกว่า 480 นาที และแนะนำให้ใช้ถุงมือที่ทำมาจากวัสดุประเภท Natural Rubber ซึ่งควรมีระยะเวลาที่จะทำให้เกิดการซึมผ่านผนังของถุงมือ (Permeation Breakthrough time) มากกว่า 360 นาที และแนะนำให้ใช้ถุงมือที่ทำมาจากวัสดุประเภท Polyvinyl Chloride ซึ่งควรมีระยะเวลาที่จะทำให้เกิดการซึมผ่านผนังของถุงมือ (Permeation Breakthrough time) มากกว่า 360 นาที และ แนะนำให้ใช้ถุงมือที่ทำมาจากวัสดุประเภท Neoprene/Natural Rubber Blend ซึ่งควรมีระยะเวลาที่จะทำให้เกิดการซึมผ่านผนังของถุงมือ (Permeation Breakthrough time) มากกว่า 360 นาที และไม่แนะนำให้ใช้ถุงมือที่ทำมาจากวัสดุประเภท Supported Polyvinyl Alcohol

● 12. การปฐมพยาบาล (First Aid)

หายใจเข้าไป :

- ถ้าหายใจเข้าไป ให้เคลื่อนย้ายผู้ป่วยไปที่อากาศบริสุทธิ์ ถ้าผู้ป่วยหยุดหายใจให้เครื่องช่วยหายใจ ถ้าหายใจติดขัดให้ออกซิเจน นำส่งไปพบแพทย์

กินหรือกลืนเข้าไป :

- ถ้ากลืนหรือกินเข้าไป ให้นำส่งไปพบแพทย์ทันที

สัมผัสถูกผิวหนัง :

- ถ้าสัมผัสถูกผิวหนัง ให้ล้างด้วยน้ำปริมาณมากๆทันทีอย่างน้อย 15 นาที ถอดเสื้อผ้าและรองเท้าที่ปนเปื้อนสารเคมีออก นำส่งไปพบแพทย์

สัมผัสถูกตา :

- ถ้าสัมผัสถูกตา ให้ล้างด้วยน้ำปริมาณมากๆทันที อย่างน้อย 15 นาที พร้อมกระพริบตาถี่ๆ นำส่งไปพบแพทย์

อื่นๆ

● 13. ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Environmental Impact)

- ห้ามทิ้งลงสู่ระบบน้ำ น้ำเสีย หรือดิน
- สารนี้อาจเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม ควรให้ความสนใจเป็นพิเศษต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ
- สารนี้จะส่งผลที่เป็นอันตราย เนื่องจาก การเปลี่ยนแปลงเมือข มีฤทธิ์กัดกร่อนเมือในสถานที่เจือจาง
- เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ LC50 : 10 mg/l/96 hr.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

๑๔. การเก็บและวิเคราะห์ (Sampling and Analytical)

NMAM NO. : 7401

OSHA NO. :

วิธีการเก็บตัวอย่าง : กระดาษกรอง หลอดเก็บตัวอย่าง อิมมูโนเจอร์

วิธีการวิเคราะห์ : ชั่งน้ำหนัก สเปกโตรโฟโตมิเตอร์

แก๊สโครมาโตกราฟี อะตอมมิกแอบซอร์ปชัน

ข้อมูลอื่น ๆ :

- วิธีการวิเคราะห์ที่ใช้การไตเตรท (acid - base titration)
- การเก็บตัวอย่างใช้ : 1 um PTFE membrane
- อัตราการไหลสำหรับเก็บตัวอย่าง : 1 ถึง 4 ลิตรต่อนาที
- ปริมาณเก็บตัวอย่างต่ำสุด-สูงสุด : ต่ำสุด 10 ลิตร สูงสุด 1000 ลิตร

๑๕. ขั้นตอนการปฏิบัติงานฉุกเฉิน (Emergency Response)

AVERS Guide : 39

DOT Guide : 154

- กรมฉุกเฉินโปรดใช้บริการระบบให้บริการข้อมูลการระงับอุบัติเหตุจากสารเคมีทางโทรศัพท์หรือสายด่วน AVERS ที่หมายเลขโทรศัพท์ 1650
- ต้องการทราบรายละเอียดเพิ่มเติมโปรดติดต่อ กองจัดการสารอันตรายและกากของเสีย กรมควบคุมมลพิษ โทร 0 2298 2447, 0 2298 2457

๑๖. เอกสารอ้างอิง (Reference)

1. "Chemical Safety Sheet ,Samsom Chemical Publisher ,1991 ,หน้า 734 "
2. "NIOSH Pocket Guide to Chemical Hazards.US.DHHS ,1990 ,หน้า 262 "
3. "Lange'S Handbook of Chemistry McGrawHill ,1999 ,หน้า - "
4. "Fire Protection Guide to Hazardous Material ,NFPA ,1994 ,หน้า - "
5. "TTP. SAX'S Dangerous Properties of Industrial Materials ,1996 ,หน้า 2764 "
6. "สอบมาตรฐานสารเคมีในอากาศและดัชนีวัดทางชีวภาพ ,นำอักษรการพิมพ์ ,2543 ,หน้า 49 "
7. "http://www.cdc.gov/NIOSH ,CISC Card. , 0351 "
8. "Firefighter 's Hazardous Materials Reference Book ,1997 ,หน้า - "
9. "ACGIH. 2000 TLVs and BEIs Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents ,and Biological Exposure Indices. Ohio.,2000 ,หน้า 49 "
10. Source of Ignition หน้า - "
11. "อื่น ๆ" http://chemtrack.trf.or.th "

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้