ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
248006

ผลของความดันก๊าซไนโตรเจนต่อสมบัติของฟิล์มไทเทเนียมไนไตรด์ที่เตรียมด้วยเทคนิคการอาร์คของแคโทดในสุญญากาศสำหรับไบโพลาร์เพลตในเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตรอน

ดาราวรรณ เพ็ชร์ช้าง

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

บัณฑิตวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ตุลาคม 2554

b00252765

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
248006

ผลของความดันก๊าซไนโตรเจนต่อสมบัติของฟิล์มไทเทเนียมไนไตรด์ที่เตรียมด้วยเทคนิคการอาร์คของแคโทดในสุญญากาศสำหรับไบโพลาร์เพลตในเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน

ดาราวรรณ เพ็ชร์ช้าง

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัยเพื่อเป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

บัณฑิตวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ตุลาคม 2554

ผลของความดันก๊าซไนโตรเจนต่อสมบัติของฟิล์มไทเทเนียมไนไตรด์ที่เตรียมด้วยเทคนิคการอาร์คของแคโทดในสุญญากาศสำหรับไบโพลาร์เพลตในเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน

ดาราวรรณ เพ็ชร์ช้าง

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
ดร.บุญรัตน์ โล่ห์วงศ์วัฒน

.....กรรมการ
รองศาสตราจารย์ ดร.ธีรวรรณ บุญญวรรณ

.....กรรมการ
อาจารย์ ดร.มิญช์ เมธีสุวกุล

คณะกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

.....อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
อาจารย์ ดร.มิญช์ เมธีสุวกุล

.....อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
รองศาสตราจารย์ ดร.ธีรวรรณ บุญญวรรณ

25 ตุลาคม 2554

© ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลงได้ด้วยความกรุณาจาก อาจารย์ ดร.มิญช์ เมธีสุวกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ซึ่งกรุณาให้ความรู้ คำแนะนำ คำปรึกษา และตรวจแก้ไขจนวิทยานิพนธ์เสร็จสมบูรณ์ ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ธีรวรรณ บุญญวรรณ และดร. บุญรัตน์ โล่ห์-วงศ์วัฒน ที่กรุณารับเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และให้คำแนะนำเป็นอย่างดีตลอดมา

ขอขอบคุณอาจารย์ดร. นิติศักดิ์ ปาสาจะ และ อาจารย์ ดร. สกล แสนทรงสิริ ที่กรุณาให้ความรู้และคำแนะนำเกี่ยวกับเครื่องกำเนิดพลาสมาแบบฟิลเตอร์แคโทดิกอาร์คในสุญญากาศ ชนิดไม่ใช้ทริกเกอร์อิเล็กโทรด รวมทั้งนายช่างเทคนิค ได้แก่ นายชาญวิทย์ ศรีพรหม นายวิษณุ บุญสุข และพี่ๆ ช่างเทคนิคอีกหลายท่านในศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์ และศูนย์วิจัยฟิสิกส์ของพลาสมาและลำอนุภาค ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ผู้ให้ความรู้คำปรึกษาตลอดจนเทคนิคเกี่ยวกับเครื่องมือในห้องปฏิบัติการอย่างครบถ้วน

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ในห้องปฏิบัติการพลาสมาและห้องปฏิบัติการเซลล์เชื้อเพลิง ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ และเพื่อนๆ ภาควิชาโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ คำปรึกษาและเป็นกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

ขอขอบคุณทุนพัฒนาและส่งเสริมผู้มีความสามารถทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (พสวท.) ที่ได้สนับสนุนทุนการศึกษาแก่ผู้เขียนในระดับปริญญาโท

สุดท้ายนี้หากมีสิ่งใดผิดพลาดหรือบกพร่อง ผู้เขียนใคร่ขออภัยเป็นอย่างสูง และหวังว่างานวิจัยและวิทยานิพนธ์นี้จะให้ความรู้และประโยชน์แก่ผู้อ่าน ตลอดจนรายละเอียดเกี่ยวกับเครื่องมือเพื่อต่อยอดและพัฒนางานวิจัยต่อไปในภายหน้า

ดาราวรรณ เพ็ชร์ช้าง

ชื่อเรื่องวิทยานิพนธ์	ผลของความดันก๊าซไนโตรเจนต่อสมบัติของฟิล์มไทเทเนียมไนไตรด์ ที่เตรียมด้วยเทคนิคการอาร์คของแคโทดในสุญญากาศสำหรับไบโพลาร์เพลตในเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน
ผู้เขียน	นางสาวดาราวรรณ เพ็ชร์ช้าง
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ดร. มิญช์ เมธีสุวกุล

บทคัดย่อ

248006

งานวิจัยนี้มีเป้าหมายเพื่อผลิตฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) เคลือบผิวบนโลหะสเตนเลสสตีลชนิด 304 โดยใช้เทคนิคการอาร์คของโลหะในสุญญากาศ แคโทดทำจากแท่งไทเทเนียม การกำเนิดพลาสมาทำโดยการให้แรงดันไฟฟ้าขนาด 450 V ระหว่างขั้วแอโนดและแคโทดในบรรยากาศของไนโตรเจน ความดันของไนโตรเจนอยู่ในช่วงตั้งแต่ 10^{-5} to 10^{-3} torr และให้ศักย์ไฟฟ้า -1 kV กับแท่นรับ จากนั้นตรวจสอบคุณสมบัติเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ได้เคลือบผิว ได้แก่ โครงสร้างทางจุลภาคโดยเครื่องเอ็กซเรย์โฟโตอิเล็กตรอน (XPS) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนด้วยวิธีไฟฟ้าเคมี โดยการจุ่มชิ้นงานในสารละลายกรดซัลฟุริก 1 M ที่อุณหภูมิ 25°C และทดสอบความต้านทานทางไฟฟ้าด้วยการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงสัมผัส (ICR) ตามวิธีการของ Davies

ฟิล์มบางที่ผลิตได้มีความหนาแน่นและเรียบ มีความหนาประมาณ 35 – 62 nm เนื้อฟิล์มประกอบด้วย TiN, TiON และ TiO_2 ยกเว้นชิ้นงานที่สร้างภายใต้ความดันก๊าซไนโตรเจน 5.0×10^{-3} torr ที่มีเพียง TiON และ TiO_2 ค่า ICR ของชิ้นงานเคลือบผิวทั้งหมดเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานไม่เคลือบผิว ชิ้นงานที่เคลือบผิวมีค่าความต้านทานการกัดกร่อนสูงกว่าแบบไม่เคลือบ เนื่องมาจากการผลิตแพสซีฟฟิล์มหลังจากการทดสอบโพเทนติโอไดนามิกส์ โพลาไรเซชัน จากกราฟโพลาไรเซชัน ณ ศักย์ -0.1 V กระแสไฟฟ้ามีค่าน้อยกว่าค่าที่ DOE กำหนด ในขณะที่ศักย์ 0.6 V มีค่ากระแสไฟฟ้าของทุกชิ้นงานที่เคลือบผิวสูงเกินกว่าค่าที่ DOE กำหนด เนื่องมาจากไม่สามารถ

248006

สร้างแพสซีฟฟิล์มให้เสถียรได้ ชิ้นงานที่สร้างภายใต้ความดันก๊าซไนโตรเจน 5.0×10^{-4} torr เป็นชิ้นงานที่ดีที่สุดเพราะเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานอื่นแล้วพบว่า มีความหนามากที่สุด มีค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงสัมผัสน้อยที่สุดและมีค่าความต้านทานการกัดกร่อนอยู่ในเกณฑ์ดี

Thesis Title	Effects of N_2 Pressure on Properties of Titanium Nitride Films Prepared by Cathodic Vacuum Arc Technique for Bipolar Plates in Proton Exchange Membrane Fuel Cells
Author	Miss Darawan Pejchang
Degree	Master of Science (Applied Physics)
Thesis Advisor	Dr. Min Medhisuwakul

ABSTRACT

248006

This research is aimed to synthesize titanium nitride (TiN) thin films on stainless steel 304 using metal vacuum arc surface coating technique. A titanium rod is used as cathode. Plasma is generated by applying an arc pulse voltage of 450 V between the electrodes in N_2 atmosphere. The pressure of N_2 is varied from 10^{-5} to 10^{-3} torr. The bias voltage for substrate is -1 kV. Then the properties of the films are investigated and compared with the untreated substrate. The microstructure of TiN thin films is identified by X-ray photoelectron (XPS) and scanning electron microscopy (SEM). The corrosion resistance is examined by electrochemical test in 1 M H_2SO_4 solution at 25°C. The electrical resistivity is analyzed by interfacial contact resistance (ICR) measurements by following the Davies method.

The TiN thin films are very dense and smooth. Their thickness is around 35 – 62 nm. The fabricated films contain TiN, TiON and TiO_2 species homogeneously except TiN6 specimen that has only TiON and TiO_2 content. The ICR of all coated specimens are increased compared with uncoated one. The coated surfaces have higher corrosion resistance than the uncoated one due to the formation of the passive films after potentiodynamics polarization. The current from polarization curve at -0.1 V is less than the DOE value, while the current at 0.6 V of all coated specimen exceed the DOE value because their passive films are not stable. The film coated under

248006

a nitrogen gas pressure of 5.0×10^{-4} torr is the best as a result of its thickest, lowest ICR and good corrosion resistance.

สารบาญ

		หน้า
กิตติกรรมประกาศ		ค
บทคัดย่อภาษาไทย		ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ		ฉ
สารบาญตาราง		ฎ
สารบาญภาพ		ฏ
บทที่ 1	บทนำ	1
	1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
	1.2 แนวคิดในการวิจัย	2
	1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	4
	1.4 ขอบเขตของการวิจัย	4
	1.5 ประโยชน์ที่จะได้รับจากการวิจัย	4
บทที่ 2	ทฤษฎี	6
	2.1 เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cell)	6
	2.2 เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน	7
	2.2.1 แผ่นเยื่อ (Membrane)	8
	2.2.2 ไบโพลาร์ เพลต (Bipolar Plates)	9
	2.3 คุณสมบัติของไทเทเนียมไนโตรเจน และไทเทเนียมไนไตรด์	11
	2.3.1 ไทเทเนียม (Titanium)	11
	2.3.2 ไนโตรเจน (Nitrogen)	12
	2.3.3 ไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN)	13
	2.4 หลักการของเครื่องฟิลเตอร์แคโทดิกอาร์ค (FCVA)	14
	2.5 เครื่องวิเคราะห์ผิววัสดุ (X – ray Photoelectron Spectroscopy: XPS)	17
	2.5.1 หลักการทำงานโดยสังเขป	18
	2.6 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)	21

2.6.1 ข้อแตกต่างระหว่าง OM และ SEM 21

2.6.2 การทำงานของ SEM 22

2.7 การทดสอบการกัดกร่อน (Corrosion Test) 23

2.7.1 เครื่องมือในการทดสอบ (Instrumentation) 23

2.7.2 ระบบสามอิเล็กโทรด (Three – electrode system) 25

2.7.3 กราฟโพลาไรเซชัน (Polarization Curves) 26

2.7.4 ฟิล์มพาสซีฟออกไซด์ (passive oxide film) 28

บทที่ 3 วิธีการวิจัย 30

3.1 อุปกรณ์การทดลอง 31

3.1.1 แหล่งกำเนิดพลาสมา 31

3.1.2 ฟิลเตอร์ 33

3.1.3 ชิ้นงาน 33

3.2 การเคลือบผิวชิ้นงาน 35

3.2.1 รีเจนเนอเรตไครโอเจนนิก 35

3.2.2 ดูดอากาศภายในอุโมงค์ทดลองด้วยโรตารี่ 36

3.2.3 ดูดอากาศภายในอุโมงค์ทดลองด้วยไครโอเจนนิก 36

3.2.4 ปล่อยก๊าซไนโตรเจนเข้าสู่อุโมงค์ทดลอง 36

3.2.5 เริ่มเข้าสู่ขั้นตอนของระบบไฟฟ้า 36

3.3 วิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์ม 37

3.3.1 ตรวจสอบโครงสร้างโดยการวัดจำนวนโฟโตอิมิชชันด้วยเทคนิค XPS (X-ray Photoelectron Spectroscope) 37

3.3.2 ตรวจสอบความหนาและลักษณะทางกายภาพ 38

3.3.3 ทดสอบความต้านทานไฟฟ้าเชิงสัมผัส (interfacial contact resistance ; ICR) 38

3.3.4 ทดสอบการกัดกร่อนโดยวิธีโพเทนติโอไดนามิกส์ 41

บทที่ 4 ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผล 43

4.1 ผลการตรวจสอบโครงสร้างโดยการวัดจำนวนโฟโตอิมิชชันโดยเครื่อง XPS (X-ray Photoelectron Spectroscopy) 43

4.2 ผลการตรวจสอบความหนาและลักษณะทางกายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) 56

4.3 ผลการทดสอบความต้านทานไฟฟ้าเชิงสัมผัส (interfacial contact resistance ; ICR) ระหว่างผิวของตัวอย่างชิ้นงานกับกระดาษคาร์บอน (carbon paper) 60

4.4 ผลทดสอบการกัดกร่อน ในสารละลายกรดซัลฟูริคหนึ่งโมลา (1M H_2SO_4) ที่อุณหภูมิห้องโดยวิธี โพลาไรเซชันในสารละลายกรด (polarization measurement, G5-94 standard) 62

บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง 69

เอกสารอ้างอิง 71

ประวัติผู้เขียน 76

สารบาญตาราง

ตาราง		หน้า
2.1	Bipolar Plates Design Criteria	10
2.2	คุณสมบัติของไทเทเนียม	11
2.3	คุณสมบัติของไนโตรเจน	12
2.4	คุณสมบัติของไทเทเนียมไนไตรด์	13
3.1	เงื่อนไขของการทดลองในแต่ละชิ้นงาน	36
3.2	ตัวแปรที่ใช้ในการเคลือบผิวชิ้นงาน	37
3.3	แสดงค่าคงที่และความต้านทานของแผ่นทองแดง กระดาษคาร์บอน และแผ่นสเตนเลส	40
4.1	แสดงพีคหลักของการส่องแบบ high resolution และการวิเคราะห์ ของชิ้นงานต่างๆ	55
4.2	แสดงค่าตัวแปรต่างๆ ที่เกิดขึ้นหลังจากการวิเคราะห์ Tafel slope	65

สารบาญภาพ

รูป		หน้า
2.1	แสดงการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงในเชิงอุณหพลศาสตร์	7
2.2	แสดงภาพตัดขวางของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์	7
2.3	แสดงโครงสร้างของ Nafion®	9
2.4	จำลองระบบสุญญากาศ	14
2.5	ไดอะแกรมแสดงการจัดการทดลองเคลือบฟิล์มไทเทเนียมไนไตรด์ด้วยคาโทดิกอาร์ค	15
2.6	ไดอะแกรมแสดงภาคตัดขวางของแหล่งกำเนิดพลาสมา	16
2.7	วงจรไฟฟ้าระหว่างอุปกรณ์ต่างๆ	16
2.8	ฟิลเตอร์กรองอนุภาคขนาดใหญ่ (Macroparticle filter)	17
2.9	แผนภาพแสดงปรากฏการณ์ที่อาจเกิดขึ้นในอะตอมที่ถูกกระตุ้นด้วยรังสีเอ็กซ์	18
2.10	แผนภาพสรุปการทำงานหลักๆ ของเครื่อง XPS (2)	20
2.11	ตัวอย่างการวิเคราะห์สเปคตรัม XPS ของโพลีสไตรีน $[C_8H_8)_n]$	21
2.12	ส่วนประกอบและหลักการทำงานของ SEM	22
2.13	แผนภาพอุปกรณ์ในการหาโพลาไรเซชัน	24
2.14	เซลล์อิเล็กโทรเคมี	24
2.15	ตัวอย่างการติดตั้งเครื่องมือสำหรับทดลองหาโพราไรเซชัน	25
2.16	กราฟโพราไรเซชันของชิ้นงานอุดมคติ	27
2.17	กราฟโพราไรเซชันที่ระดับศักย์ไฟฟ้าค่าต่างๆ ของ 1080 eutectoid steel ในสารละลายกรดซัลฟุริค 1N	28
2.18	กราฟโพราไรเซชันของ RSA Ni – Mo base อัลลอยด์ ในสารละลายกรดซัลฟุริก	29
3.1	แหล่งกำเนิดพลาสมา	31
3.2	ฉนวนที่ทำจากเซรามิค (ก) เซรามิคชิ้นที่ 1 (ข) เซรามิคชิ้นที่ 2 (ค) และ (ง) แท่งไทเทเนียมและเซรามิคทั้งสองชิ้นประกบกัน	32

3.3	การติดตั้ง source (ก) ติดตั้งเซรามิคใส่ในแท่น source (ข) การยึดจับโดยน็อต	32
3.4	ฟิลเตอร์กรองอนุภาคขนาดใหญ่	33
3.5	แผนภาพการติดตั้งชิ้นงานกับแท่นรับ	34
3.6	แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ภายในอุโมงค์ทดลอง	34
3.7	วงจรไฟฟ้าระหว่างอุปกรณ์	35
3.8	เครื่อง X-ray Photoelectron Spectroscopy	38
3.9	วงจรไฟฟ้าเพื่อทดสอบความต้านทานไฟฟ้าเชิงสัมผัส	39
3.10	แผนภาพของชิ้นงาน	39
3.11	แผนภาพการทดลองเพื่อหาค่า ICR (ก) ชิ้นงานถูกประกบด้วยการดาษคาร์บอนและแผ่นทองแดง (ข) กระดาษคาร์บอนถูกประกบด้วยแผ่นทองแดง (ค) แผ่นสเตนเลส 304 ถูกประกบด้วยกระดาษคาร์บอนและแผ่นทองแดง	40
3.12	แผนภาพการทดสอบการกัดกร่อน	41
3.13	เครื่องมือและอุปกรณ์ขณะทำการทดสอบหาค่าความกัดกร่อน (1)	42
3.14	เครื่องมือและอุปกรณ์ขณะทำการทดสอบหาค่าความกัดกร่อน (2)	42
4.1	สเปกตรัมแบบ survey ของชิ้นงานไทเทเนียมไนไตรด์ทั้งหกชิ้น	44
4.2	สเปกตรัมแบบ high resolution ของธาตุ C1s	45
4.3	สเปกตรัมแบบ high resolution ของธาตุ O1s	47
4.4	สเปกตรัมแบบ survey ของชิ้นงานไทเทเนียมไนไตรด์ทั้งหกชิ้นหลัง Sputtering	48
4.5	สเปกตรัมแบบ high resolution ของธาตุ Ti2p หลัง Sputtering	50
4.6	กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ของโมเลกุล TiN, TiON และ TiO_2	51
4.7	สเปกตรัมแบบ high resolution ของธาตุ N1s หลัง Sputtering	52
4.8	สเปกตรัมแบบ high resolution ของธาตุ O1s หลัง Sputtering	53
4.9	เปรียบเทียบสเปกตรัมชิ้นงาน TiN3 ที่ไม่ได้ Sputtering, Sputtering หนึ่งครั้ง, Sputtering สองครั้ง และ Sputtering สามครั้ง	54
4.10	ลักษณะผิวหน้าและภาพตัดขวางของฟิล์มบางบนซิลิกอนเวเฟอร์ของ 6 ชิ้นงาน	57
4.11	กราฟแสดงความหนาของฟิล์มบางของแต่ละชิ้นงาน	59
4.12	กราฟระหว่าง ICR ของชิ้นงานทั้งหมดและชิ้นงานที่ไม่ได้เคลือบกับค่าแรงกด (compaction force)	61

4.13	กราฟเปรียบเทียบค่า ICR ที่แรงกด 150 N/cm^2 ของชิ้นงานทั้งหมดและชิ้นงานที่ไม่ได้เคลือบ	61
4.14	กราฟโพลาไรเซชันของ ss 304 ในสารละลายกรด 1M H_2SO_4	64
4.15	กราฟโพลาไรเซชันและ tafel slope ของ ss 304 ในสารละลายกรด 1M H_2SO_4	64
4.16	กราฟโพลาไรเซชันเปรียบเทียบชิ้นงาน ss 304 ที่ไม่ได้เคลือบผิวและชิ้นงานเคลือบผิวทั้งหก	66
4.17	กราฟเปรียบเทียบความหนาแน่นกระแสกัดกร่อนของชิ้นงาน ss 304 ที่ไม่ได้เคลือบผิวและชิ้นงานเคลือบผิวทั้งหก	67
4.18	กราฟเปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าจากกราฟโพลาไรเซชันที่ศักย์ 0.6 V ของชิ้นงาน ss 304 ที่ไม่ได้เคลือบผิวและชิ้นงานเคลือบผิวทั้งหก	68
4.19	กราฟเปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าจากกราฟโพลาไรเซชันที่ศักย์ -0.1 V ของชิ้นงาน ss 304 ที่ไม่ได้เคลือบผิวและชิ้นงานเคลือบผิวทั้งหก	68