สารบาญ

		หน้า
กิตติกรรมประกาศ		ค
บทคัดย่อภาษาไทย		ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ		จ
สารบาญตาราง		ญ
สารบาญภาพ		ฎ
บทที่1 บทนำ		1
1.1	ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
1.3	วัตถุประสงค์ของการวิจัย	14
1.4	ขอบเขตของการวิจัย	14
1.5	ผลที่ได้จากการวิจัย	14
บทที่ 2 ทฤษฎี		15
2.1	นาโนและนาโนเทคโนโลยี	15
2.1.1	นาโน และนาโนเทคโนโลยี	15
2.1.2	สมบัติพิเศษของนาโนเทคโนโลยี	16
2.1.3	ประเภทของนาโนเทคโนโลยี	17
2.1.4	วิธีสร้างผลิตภัณฑ์และสิ่งของระดับนาโน	18

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2.2 เซ็นเซอร์แบบต่างๆ 19

2.2.1 หัวตรวจวัดทางชีวภาพ 20

2.2.2 หัวตรวจวัดก๊าซ 24

2.2.3 สภาพไว (Sensitivity) 26

2.2.4 เวลาการตอบสนอง (Response time, τ_{90}^{-}) 26

2.2.5 เวลาการคืนตัว (Recovery time, τ_{90}^{+}) 27

บทที่ 3 วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการทดลอง 28

3.1 อุปกรณ์หลัก 28

3.2 วัสดุ อุปกรณ์ย่อย 31

3.3 การทดลอง 36

3.3.1 การศึกษาการใช้เครื่องโฟกัสไอออนบีม 37

3.3.2 การเตรียมแผ่นรองรับ 38

3.3.3 การเตรียมเงื่อนไขต่างๆ 39

3.3.4 ศึกษาผลของเวลากับเงื่อนไขของค่าความหนา Z 40

3.3.5 การวิเคราะห์ผลที่เงื่อนไขต่างๆ 40

3.3.6 การสร้างขั้วไฟฟ้าสำหรับการประยุกต์ใช้เป็นเซ็นเซอร์ชีวภาพ กับแบคทีเรียชนิด *E-coli* 40

3.3.7 การสร้างขั้วไฟฟ้าสำหรับการประยุกต์ใช้เป็นเซ็นเซอร์ก๊าซ 41

บทที่ 4 ผลการทดลอง 42

4.1 ผลการเตรียมแผ่นรองรับ 42

4.2 ผลการเตรียมขั้วไฟฟ้าทองคำขาวระดับนาโน 43

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

4.2.1 ผลการสร้างเส้นฟิล์มบางนาโนของทองคำขาว ในแต่ละจุดระหว่างพื้นที่ของทองคำ 44

4.2.2 ผลจากการตรวจพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) 53

4.2.3 ผลของเงื่อนไขค่าเวลาที่สัมพันธ์กับค่า Z 59

4.2.4 ผลจากการตรวจเครื่องสเปกโทรสโกปีแบบกระจายพลังงาน (EDS) 62

4.3 ผลการประยุกต์ใช้ขั้วไฟฟ้าทองคำขาวที่เตรียมด้วยโฟกัสไอออนบีม เป็นเซ็นเซอร์ 66

4.3.1 ผลการทดสอบเซ็นเซอร์ชีวภาพ 66

4.3.2 เปรียบเทียบผลของเซ็นเซอร์ชีวภาพ 71

4.3.3 ผลการทดสอบเป็นเซ็นเซอร์ก๊าซ 72

4.3.4 เปรียบเทียบผลของเซ็นเซอร์ก๊าซ 74

บทที่ 5 สรุป และข้อเสนอแนะ 75

5.1. สรุปผลการทดลอง 75

5.1.1 สรุปการเตรียมแผ่นรองรับ 75

5.1.2 สรุปผลการทดลองเตรียมเส้นฟิล์มบางนาโนของทองคำขาว 75

5.1.3 สรุปผลการผลการใช้ขั้วไฟฟ้าทองคำขาวประยุกต์เป็นเซ็นเซอร์ 76

5.1.3.1 สรุปผลการประยุกต์เป็นเซ็นเซอร์ชีวภาพ 76

5.1.3.2 สรุปผลการประยุกต์เป็นเซ็นเซอร์ก๊าซ 76

5.2 ข้อเสนอแนะ 77

เอกสารอ้างอิง 78

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ภาคผนวก 83

ภาคผนวก ก รายละเอียดของเครื่องโฟกัสไอออนบีม 84

ภาคผนวก ข รายละเอียดของกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม 119

ภาคผนวก ค วิธีการเตรียมขั้วไฟฟ้า 124

ภาคผนวก ง ผลการวิเคราะห์ด้วย AFM 128

ภาคผนวก จ ผลงานวิชาการ 137

ประวัติผู้เขียน 159

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบาญตาราง

ตาราง	หน้า
3.1 ค่ากระแสกับค่าพลังงานของเครื่อง โฟกัสไอออนบีม รุ่น Quanta 200 3D ของบริษัท FEI Company	38
4.1 ผลการนำไฟฟ้าของพื้นที่สี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ถูกเชื่อมด้วยเส้นฟิล์มบางนาโนของทองคำขาวที่เงื่อนไขต่างๆ	46
4.2 เปรียบเทียบขนาดความกว้างแถบเส้นโลหะทองคำขาวที่วัดจาก SEM กับ AFM	57
4.3 แสดงค่าของ Atomic % บริเวณเส้นฟิล์มบางนาโนของทองคำขาวของตัวอย่างที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 30 kV และค่ากระแสไฟฟ้าที่50 pA โดยแปรค่าศักย์ไฟฟ้าของแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนที่ค่าต่างๆ	62
4.4 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองเซ็นเซอร์ชีวภาพกับผลการทดลองของคณะนักวิจัยอื่นๆ	71
4.5 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองเซ็นเซอร์ก๊าซกับผลการทดลองของคณะนักวิจัยอื่นๆ	74
ผ.ก. 1 ตารางเปรียบเทียบสมบัติของแคโทดชนิดต่างๆ	89
ผ.ก. 2 เปรียบเทียบธาตุหลักที่นำมาใช้ทำเป็น LMIS	105
ผ.ก. 3 เปรียบเทียบระหว่างลำอิเล็กตรอนกับลำไอออน	117

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบาญภาพ

รูป	หน้า
1.1 การสร้างรูปเข็ม โดยใน (ก)เทคนิค EB-CVD และ (ข) เทคนิค FIB-CVD	3
1.2 เส้นนาโนคาร์บอนเชื่อมระหว่างขั้วไฟฟ้าทองคำโดยเทคนิค FIB-CVD และ EB-CVD	5
1.3 แสดงโครงสร้างสามมิติรูปสปริงนาโนที่สร้างโดย (ก) เทคนิค FIB-CVD และ (ข) เทคนิค EB-CVD	5
1.4 แบบจำลองการประดิษฐ์ Immunosensor	9
1.5 กระบวนทางเคมีการติดแอนตีบอดีกับผิวของขั้วไฟฟ้าทองคำ	11
1.6 (ก) การจำลองการกระจายเชื้อแบคทีเรีย *E-coli* และ (ข) วงจรไฟฟ้าของเซลล์ *E-coli* ที่ติดอยู่บนช่องขั้วไฟฟ้าทองคำแบบ interdigital	12
2.1 การเปรียบเทียบขนาดของวัสดุทางชีวภาพกับวัสดุอุปกรณ์ต่างๆที่มนุษย์สร้างขึ้น	16
2.2 ส่วนประกอบของหัวตรวจวัดทางชีวภาพ	20
2.3 ลำดับขั้นการเกิดปฏิกิริยาของ Amperometric biosensor	22
2.4 แผนผังการทำงานของเซ็นเซอร์ชีวภาพ	23
2.5 ภาพแสดงลักษณะโมเลกุลของออกซิเจนไอออนที่เกาะอยู่ที่ผิวของผลึกจะทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของไอของก๊าซ	25
2.6 แผนผังแสดงหลักการทำงานของเซ็นเซอร์ก๊าซ	25
3.1 (ก) เครื่องโฟกัสไอออนบีม (ข) ส่วนประกอบภายในเครื่องโฟกัสไอออนบีม	28
3.2 การพอกผิวด้วยเทคนิค FIB-CVD	29

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

3.3 เครื่องเคลือบทองคำและคาร์บอน 30

3.4 กล้องจุลทรรศน์แบบสเตอร์ริโอไมโครสโคป 30

3.5 กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) 31

3.6 (ก) แผ่นกระจกสไลด์, (ข) แผ่นกระจกสไลด์ที่ถูกเคลือบด้วยทองคำ 31

3.7 Copper grid 32

3.8 คาร์บอนเทป 32

3.9 สายแพร์สำเร็จรูป จากฮาร์ดดิสค์คอมพิวเตอร์ 33

3.10 (ก) เอทานอล, (ข) ขวดแก้ว 33

3.11 Socket IC 34

3.12 Alcohol Simulator Model 34C 34

3.13 แผนภาพการดำเนินงานวิจัย 36

4.1 (ก) ภาพจากกล้องสเตอร์ริโอไมโครสโคปของกระจกแผ่นรองรับถูกเคลือบ
ด้วยทองคำ (ข) ภาพขยายด้วย SEM ของแผ่นรองรับถูกเคลือบด้วยทองคำ 42

4.2 ลักษณะการนำไฟฟ้าของแต่ละพื้นที่สี่เหลี่ยมทองคำบนแผ่นรองรับ (ก) ก่อน และ (ข)
หลังจากทำการเชื่อมทางเดินของอิเล็กตรอนด้วยทองคำขาวด้วยเทคนิคFIB-CVD 44

4.3 ภาพจาก FIB แสดงตำแหน่งเส้นฟิล์มบางนาโนทองคำขาวที่เชื่อม
ระหว่างพื้นที่ของทองคำ 45

4.4 ภาพ SEM แสดงตำแหน่งเส้นฟิล์มบางนาโนทองคำขาวที่เชื่อม
ระหว่างพื้นที่ของทองคำ 45

4.5 ภาพ SEM แสดงลักษณะของเส้นฟิล์มบางนาโนของทองคำขาวที่เตรียมด้วยค่าศักย์
ไฟฟ้า 10 kV และแปรค่าขนาดของ ลำไอออนในย่าน 10-400 pA ตามลำดับ 47

4.6 ภาพ SEM แสดงลักษณะของเส้นฟิล์มบางนาโนของทองคำขาวที่เตรียมด้วยค่าศักย์
ไฟฟ้า 20 kV และแปรค่าขนาดของ ลำไอออนในย่าน 4-90 pA ตามลำดับ 48

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

4.7 ภาพ SEM แสดงลักษณะของเส้นฟิล์มบางนาโนของทองคำขาวที่เตรียมด้วยค่าศักย์ไฟฟ้า 30 kV และแปรค่าขนาดของ ลำไอออนในย่าน 10-500 pA ตามลำดับ 49

4.8 แสดงลักษณะของบริเวณพื้นที่ A และ B ของเงื่อนไข 30 kV-500 pA (ผลจาก SEM) 50

4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของเส้นฟิล์มบางนาโนของทองคำขาวที่วัดขนาดจากขอบนอกบริเวณพื้นที่ (A) ของเส้นกับค่ากระแสของลำไอออนบีมที่ใช้ 51

4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของเส้นฟิล์มบางนาโนของทองคำขาวที่วัดขนาดจากขอบใน (B) ของเส้นกับค่ากระแสของลำไอออนบีมที่ใช้ 51

4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการพอกเส้นฟิล์มบางนาโนของทองคำขาวกับค่ากระแสลำไอออน 52

4.12 ภาพ AFM แสดงลักษณะของเส้นฟิล์มบางนาโนของทองคำขาวที่เตรียมด้วยค่าศักย์ไฟฟ้า 10 kV และแปรค่าขนาดของ ลำไอออนในย่าน 10-400 pA ตามลำดับ 53

4.13 ภาพ AFM แสดงลักษณะของเส้นฟิล์มบางนาโนของทองคำขาวที่เตรียมด้วยค่าศักย์ไฟฟ้า 20 kV และแปรค่าขนาดของ ลำไอออนในย่าน 4-90 pA ตามลำดับ 54

4.14 ภาพ AFM แสดงลักษณะของเส้นฟิล์มบางนาโนของทองคำขาวที่เตรียมด้วยค่าศักย์ไฟฟ้า 30 kV และแปรค่าขนาดของ ลำไอออนในย่าน 10-50 pAตามลำดับ 55

4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของเส้นฟิล์มบางนาโนของทองคำขาวกับค่ากระแสลำไอออน 56

4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของเส้นฟิล์มบางนาโนของทองคำขาวกับค่ากระแสลำไอออน 57

4.17 (ก) แสดง ภาพจาก SEM บริเวณของเงื่อนไขความหนา Z
(ข) ภาพจาก FIB ที่ 30 kV, 50 pA บริเวณของเงื่อนไขความหนา Z 59

4.18 แสดงผลของเวลามีความสัมพันธ์กับความหนา Z ที่ 30 kV, 50 pA 60

4.19 แสดงผลความกว้าง A และ B ที่สัมพันธ์กับความหนา Z ที่ 30 kV,50 pA 60

4.20 แสดงผลความกว้างของบริเวณ B ที่สัมพันธ์กับความหนา Z ที่ 30 kV,50 pA 61

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

4.21 ตำแหน่งบริเวณเส้นฟิล์มบางนาโนของทองคำขาวที่ถูกวิเคราะห์ด้วย EDS การวิเคราะห์แบบจุด ของตัวอย่างที่ค่าพลังงาน 30 kV และแปรค่าขนาดของลำไอออนในย่าน 50 pA 62

4.22 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วย EDS บริเวณแผ่นทองคำที่เคลือบบนแผ่นรองรับกระจก 64

4.23 แสดงค่า Atomic% ของทองคำที่ถูกเคลือบบนแผ่นรองรับ และซิลิกอนที่เป็นองค์ประกอบของแผ่นกระจกรองรับ 64

4.24 (ก) ภาพจาก SEM แสดงขั้วไฟฟ้าทองคำขาวแบบแบบอินเตอร์ดิจิตอล (ข) สายแพร์ที่นำมาประยุกต์ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าสำหรับเตรียมเซ็นเซอร์ *E-Coli* 66

4.25 ตัวอย่างความเปลี่ยนแปลงของหัววัดเซ็นเซอร์ในอากาศและในความเข้มข้นของ *E-Coli* 10^6 cfu/ml 67

4.26 ผลค่า I-V Curve ของเซ็นเซอร์ชีวภาพ 67

4.27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง sensitivity ของเซ็นเซอร์กับความหนาแน่นของ *E-coli* 69

4.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าของหัววัดเซ็นเซอร์ในสารละลาย *E-Coli* กับความเข้มข้นของสารละลาย *E-Coli* ในช่วง 10^4- 10^8 cfu/ml 70

4.29 ผลการเตรียมขั้วไฟฟ้าสำหรับประยุกต์ทำเป็นเซ็นเซอร์ก๊าซแบบ 4 ขั้วไฟฟ้า 72

4.30 ผลการทดสอบเซ็นเซอร์ก๊าซกับไอเอทานอล ความเข้มข้น 1000 ppm 73

ผ.ก. 1 (ก) องค์ประกอบและลักษณะการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) (ข) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ที่มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 86

ผ.ก. 3 แสดงลักษณะของ Electron gun ที่มีไส้หลอดเป็นทังสเตน 87

ผ.ก. 4 ภาพภาคตัดขวางของเลนส์อิเล็กตรอน แสดงให้เห็นการเลี้ยวเบนของลำอิเล็กตรอนเนื่องจากสนามแม่เหล็ก 90

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ผ.ก. 5 แสดงตัวอย่างการควบคุมลำอิเล็กตรอนโดยการควบคุมปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ให้แก่ขดลวดทองแดง รูป (A) ไม่ให้กระแสไฟฟ้าลำอิเล็กตรอนจะไม่เกิดการโฟกัส (B) ให้กระแสไฟฟ้าเล็กน้อยลำอิเล็กตรอนมีความยาวโฟกัสมาก (C) ให้กระแสไฟฟ้ามากขึ้น ลำอิเล็กตรอนจะมีความยาวโฟกัสที่สั้นลง 91

ผ.ก. 6 แสดงการตรวจจับ Secondary electrons ด้วยหัวตรวจวัด photomultiplier 92

ผ.ก. 7 การทำงานและลักษณะของ Photomultiplier ใช้ขยายสัญญาณที่รับมา Scintillator 92

ผ.ก. 8 อันตรกิริยาที่เกิดขึ้นเมื่อลำอิเล็กตรอนตกกระทบกับผิวของสารตัวอย่าง 94

ผ.ก. 9 อันตรกิริยาระหว่างอนุภาคกับอิเล็กตรอนในอะตอมที่ทำให้เกิดรังสีเอกซ์ 98

ผ.ก. 10 ลักษณะสเปกตรัมที่วัดได้จากเครื่องวิเคราะห์รังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน 99

ผ.ก. 11 หัววัดสำหรับตรวจวิเคราะห์รังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน พร้อมถังทรงกระบอกด้านบนใช้บรรจุไนโตรเจนเหลวเพื่อลดอุณหภูมิหัววัด 100

ผ.ก. 12 ผลึกซิลิกอน Si(Li) ที่เป็นหัวตรวจวัดรังสีเอกซ์ 101

ผ.ก. 13 แสดงส่วนประกอบของหัวตรวจวัดรังสีเอกซ์ 101

ผ.ก. 14 แสดงส่วนประกอบการทำงานในระบบทำงานของเครื่องสเปกโตมิเตอร์รังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน 102

ผ.ก. 15 แสดงอันตรกิริยาระหว่างรังสีเอกซ์กับหัววัดที่ทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล 102

ผ.ก. 16 ระบบของไอออนบีม(FIB) และระบบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) 103

ผ.ก. 17 ปลายหัวของ LMIS (Tip) ที่เกิดขึ้นจาก Cone ที่อยู่ในสนามไฟฟ้าและรัศมีของปลาย LMIS 106

ผ.ก. 18 ส่วนประกอบของ Ion beam column 109

ผ.ก. 19 หัวตรวจจับอิเล็กตรอนและไอออน และหลักการทำงาน 113

ผ.ก. 20 Gas injection system 115

ผ.ก. 21 ลักษณะการชนของลำไอออนบนผิวชิ้นงาน 116

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ผ.ข. 1 หลักการทำงานของเครื่อง AFM 119

ผ.ข. 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานศักย์แรง Van der Waals ต่อระยะห่างระหว่าง tip และชิ้นงาน 120

ผ.ข. 3 ด้านซ้ายแสดงลักษณะของปลาย tip ที่มีขนาดใหญ่กว่ารายละเอียดของชิ้นงาน และด้านขวา แสดงภาพที่ได้จากกล้อง AFM 122

ผ.ข. 4 ด้านซ้ายแสดง tip ขณะสัมผัสกับชิ้นงานที่มีความสูง ด้านขวา แสดงภาพที่ได้จาก AFM ซึ่งจะเพี้ยนไปจากความเป็นจริง 123

ผ.ค. 1 ขั้นตอนการทำงานตามวิธีการของ EBL 125

ผ.ค. 2 แผนภาพรายละเอียดกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่ถูกนำมาใช้ ในการสร้างโครงสร้างนาโนโดยวิธีการ EBL 126

ผ.ค. 3 เทคนิคการพอกโดยไอสารเคมีด้วยลำไอออนบีม (FIB-CVD) ของ FIB และ Gas injection system 127

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved