สารบาญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ค
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
สารบาญตาราง	ซ
สารบาญภาพ	ฌ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 แนวคิดในการวิจัย	2
1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	4
1.4 ขอบเขตการวิจัย	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย	5
บทที่ 2 ทฤษฎี	6
2.1 รูปแบบโครงสร้าง ของ คาร์บอน	6
2.2 ท่อนาโนคาร์บอน(Carbon Nanotubes)	8
2.3 การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน	12
2.4 ทฤษฎีการปลูกท่อนาโนคาร์บอน (Growth mechanism)	17
2.5 คุณสมบัติ และการประยุกต์ใช้	19
2.6 การประยุกต์ใช้ท่อนาโนคาร์บอน (Applications)	21
2.7 การปลดปล่อยอิเล็กตรอนแบบฟิลด์อิมิสชัน (Field emission)	23
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการการทดลอง	28
3.1 การปลูกท่อนาโนคาร์บอนโดยใช้วิธีการตกสะสมไอเคมี (CVD) ลงบนลวดทังสเตน	28
3.2 วิธีการทดลองการปลูกท่อนาโนคาร์บอนบนลวดทังสเตน	39

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

3.3 การทดสอบการปลดปล่อยอิเล็กตรอนแบบฟิลด์อิมิสชัน (Field emission) 40

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง 45
4.1 การหาอัตราการไหลของก๊าซ 45
4.2 ผลการวิเคราะห์ลวดทังสเตนก่อนทำการทดลองปลูกท่อนาโนคาร์บอน 49
4.3 ผลการทดลอง และวิเคราะห์การทดลองปลูกท่อนาโนคาร์บอน
โดยเทคนิควิธีการตกสะสมไอเคมี(CVD) 51
4.4 การทดสอบการปลดปล่อยอิเล็กตรอนแบบฟิลด์อิมิสชัน (Field emission) 62

บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ 68
5.1 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง 68
5.2 ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการทดลอง 69

เอกสารอ้างอิง 70
ภาคผนวก 76
ประวัติผู้เขียน 83

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบาญตาราง

ตาราง	หน้า
4.1 ผลการหาอัตราการไหลของก๊าซอะเซทิลีน	45
4.2 ผลการหาอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน	46
4.3 แสดงผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณของลวดทังสเตนที่ยังไม่ทดลอง	50
4.4 แสดงผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณของท่อนาโนคาร์บอน	54
4.5 แสดงผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณของพื้นผิวลวดทังสเตนทดลองที่อุณหภูมิ 700 เคลวิน	55
4.6 แสดงค่าต่างๆของกระแสอิเล็กตรอนที่ได้เมื่อค่าความต่างศักย์ที่ใช้กับลวดทังสเตนตั้งแต่ 50-500 โวลต์ ที่ความดัน 5×10^{-6} มล.ปรอท ของลวดทังสเตนที่ยังไม่ปลูกท่อนาโนคาร์บอนกับที่ปลูกท่อนาโนคาร์บอนโดยระห่างระหว่างขั้วแคโทดกับแอโนดเท่ากับ 2 มิลลิเมตร	62
4.7 แสดงค่าต่างๆของกระแสอิเล็กตรอนที่ได้เมื่อค่าความต่างศักย์ที่ใช้กับลวดทังสเตนตั้งแต่ 50-500 โวลต์ ที่ความดัน 5×10^{-6} มล.ปรอท ของลวดทังสเตนที่ปลูกท่อนาโนคาร์บอนโดยปรับระยะห่างระหว่างขั้วแคโทดกับแอโนดเป็น 0.5 1.0 1.5 และ2.0 มิลลิเมตร ตามลำดับ	64
4.8 แสดงแสดงค่าต่างๆของกระแสอิเล็กตรอนที่ได้เมื่อค่าความต่างศักย์ที่ใช้กับลวดทังสเตนตั้งแต่ 50-300 โวลต์ ที่ความดัน 5×10^{-6} มล.ปรอท ของลวดทังสเตนที่ปลูกท่อนาโนคาร์บอนที่อุณหภูมิ 700 เคลวิน 800 เคลวิน และ 900 เคลวิน ตามลำดับ	66

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบาญภาพ

รูป	หน้า
2.1 โครงสร้างของเพชร (a) และ กราไฟต์ (b)	6
2.2 โครงสร้างคาร์บอน หกสิบ (C_{60})	7
2.3 โครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอน	7
2.4 ลักษณะพื้นฐานของท่อนาโนคาร์บอน	8
2.5 รูปแบบโครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอน	9
2.6 ท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียว ในรูปแบบต่างๆ	10
2.7 ดัชนีบ่งบอกรูปแบบการจัดเรียงตัวของอะตอมบนท่อนาโนคาร์บอน	10
2.8 ตัวอย่างภาพท่อนาโนชนิดคาร์บอนที่ถ่ายโดยกล้องจุลทรรศน์ชนิด Transmission Electron Microsopy (TEM)	11
2.9 แผนภาพ อย่างง่าย ในกระบวนการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน โดยวิธี อาร์กดิสชาร์จ	12
2.10 ภาพของชนิดของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดจากเติมตัวเป็น ตัวคะตะลิสติก (metal catalyst) และไม่เติม	13
2.11 วิธีระเหยด้วยแสงเลเซอร์ (Laser Vaporization)	13
2.12 เทคนิคการตกสะสมไอเคมีด้วยพลาสมา (Plasma enhanced chemical vapor deposition)	15
2.13 เทคนิคการตกสะสมไอเคมีด้วยความร้อน (Thermal chemical vapor deposition)	15
2.14 เทคนิคการตกสะสมไอเคมีโดยใช้แอลกอฮอล์เป็นตัวเร่งปฏิกริยา (Alcohol catalytic chemical vapor deposition,ACVD)	16
2.15 เทคนิคการแบ่งเฟสในการปลูก (Vapor phase growth)	16
2.16 เทคนิคการตกสะสมไอเคมีโดยใช้แสงเลเซอร์เป็นแหล่งความร้อน (Laser-assisted thermal chemical vapor deposition ,LCVD)	17
2.17 ลักษณะการเกิดท่อนาโนคาร์บอน	18
2.18 ลักษณะการเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนทำให้สมบัติต่างกันไป	19

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2.19 การใช้ใช้กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscopy , AFM) หาค่าโมดูลัสของยัง 19
2.20 การเปรียบเทียบค่า Tensile Strength ของท่อนาโนคาร์บอน กับวัสดุต่างๆ สเกลของกราฟเป็นสเกล log 20
2.21 การนำท่อนาโนคาร์บอนไปประยุกต์ใช้ 21
2.22 การนำท่อนาโนคาร์บอนไปประยุกต์ใช้เป็นตัวเก็บประจุ 22
2.23 ไดอะแกรมแสดงการนำท่อนาโนคาร์บอนไปประยุกต์ใช้เป็น Transistor 22
2.24 การนำท่อนาโนคาร์บอนไปประยุกต์ใช้เป็น Transistor 22
2.25 แผนภาพแสดงพลังงานเมื่อให้ความร้อนแก่โลหะเพื่อให้อิเล็กตรอนหลุดออกมา (Thermionic emission) 23
2.26 แผนภาพแสดงการปลดปล่อยอิเล็กตรอน แบบฟิลด์อิมิสชัน (Field Emission) 24
2.26 การปลดปล่อยอิเล็กตรอนของท่อนาโนคาร์บอนเมื่อให้สนามไฟฟ้าเข้าไป 24
3.1 แผนผังของชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน โดยเทคนิคการตกสะสมไอเคมี (CVD) 28
3.2 อุปกรณ์ควบคุมควบคุมความดันที่ถังก๊าซ (gas regulator) 29
3.3 ชุดอุปกรณ์หาอัตราการไหลและควบคุมก๊าซ 30
3.4 ส่วนประกอบต่าง ๆ ของชุดห้องเผา 32
3.5 ชุดอุปกรณ์เตาเผา 34
3.6 ท่อเกลียวเซรามิกพันด้วยเกลียวขดลวดความร้อน 35
3.7 อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิเตา 36
3.8 ปั๊มสุญญากาศ 37
3.9 ปั๊มอากาศ 37
3.10 นาฬิกาจับเวลา 38
3.11 อุปกรณ์การทดสอบการปลดปล่อยอิเล็กตรอนแบบฟิลด์อิมิสชัน (Field emission) 40
3.12 ห้องสุญญากาศ 41
3.13 ขายึดอุปกรณ์และขั้วไฟฟ้าในห้องสุญญากาศ 42
3.14 แผนภาพแสดงวงจรไฟฟ้าที่ใช้ในการวัดปริมาณอิเล็กตรอน 42
3.15 ปั๊มกลสุญญากาศ 43

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

3.16 ปั๊มไอน้ำมันสุญญากาศ (Diffusion pump) 43
4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Log(Q,ml/s) กับ Log(ΔH,cm) ของก๊าซอะเซทิลีน 47
4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Log(Q,ml/s) กับ Log(ΔH,cm) ของก๊าซอาร์กอน 47
4.3 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 150 เท่าแสดงลวดทังสเตนที่นำมาทดลอง 49
4.4 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 5000 เท่าแสดงพื้นผิวของลวดทังสเตน 49
4.5 กราฟที่วิเคราะห์โดย EDX ของลวดทังสเตน 50
4.6 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 10,000 เท่าแสดงพื้นผิวของลวดทังสเตน ที่นำไปทำการทดลองที่อุณหภูมิ 700 เคลวิน และอัตราการไหลของ ก๊าซอะเซทิลีนและอาร์กอน เป็น 0.2 และ10 มล.ต่อวินาที ตามลำดับ 51
4.7 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 50,000 เท่าแสดงพื้นผิวของลวดทังสเตน ที่นำไปทำการทดลองที่อุณหภูมิ 800 เคลวิน และอัตราการไหลของ ก๊าซอะเซทิลีนและอาร์กอน เป็น 0.2 และ10 มล.ต่อวินาที ตามลำดับ 52
4.8 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 10,000 เท่าแสดงพื้นผิวของลวดทังสเตน ที่นำไปทำการทดลองที่อุณหภูมิ 900 เคลวิน และอัตราการไหลของ ก๊าซอะเซทิลีนและอาร์กอน เป็น 0.2 และ10 มล.ต่อวินาที ตามลำดับ (ก) กำลังขยาย 5,000 เท่า (ข) กำลังขยาย 10,000 เท่า 53
4.9 ภาพ SEM ของตำแหน่งจุดที่วิเคราะห์ EDX 54
4.10 กราฟที่วิเคราะห์โดย EDX ของท่อนาโนคาร์บอน 54
4.11 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 5,000 เท่าแสดงพื้นผิวของลวดทังสเตน ที่นำไปทำการทดลองที่อุณหภูมิ 700 เคลวิน และอัตราการไหลของ ก๊าซอะเซทิลีนและอาร์กอน เป็น 0.1 และ10 มล.ต่อวินาที ตามลำดับ 55
4.12 กราฟที่วิเคราะห์โดย EDX พื้นผิวลวดทังสเตนที่ทดลองที่อุณหภูมิ 700 เคลวิน 55
4.13 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 10,000 เท่าแสดงพื้นผิวของลวดทังสเตน ที่นำไปทำการทดลองที่อุณหภูมิ 800 เคลวิน และอัตราการไหลของ ก๊าซอะเซทิลีนและอาร์กอน เป็น 0.1 และ10 มล.ต่อวินาที ตามลำดับ 56
4.14 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 75,000 เท่าแสดงพื้นผิวของลวดทังสเตน ที่นำไปทำการทดลองที่อุณหภูมิ 900 เคลวิน และอัตราการไหลของ ก๊าซอะเซทิลีนและอาร์กอน เป็น 0.1 และ10 มล.ต่อวินาที ตามลำดับ 56

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

4.15 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 50,000 เท่าแสดงพื้นผิวของลวดทังสเตน ที่นำไปทำการทดลองที่อุณหภูมิ 900 เคลวิน และอัตราการไหลของ ก๊าซอะเซทิลีนและอาร์กอน เป็น 0.1 และ10 มล.ต่อวินาที ตามลำดับ แสดงขนาดและความยาวของท่อนาโนคาร์บอน 57

4.16 ภาพถ่ายของตำแหน่งที่วิเคราะห์ด้วย EDX ของเส้นใยที่พื้นผิวของ ลวดทังสเตนที่นำไปทำการทดลองที่อุณหภูมิ 900 เคลวิน และอัตราการไหลของ ก๊าซอะเซทิลีนและอาร์กอน เป็น 0.1 และ10 มล.ต่อวินาที ตามลำดับ 58

4.17 ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบธาตุเชิงปริมาณของพื้นผิว ลวดทังสเตนกับท่อนนาโนคาร์บอนที่ 900 เคลวิน และอัตราการไหลของ ก๊าซอะเซทิลีนและอาร์กอน เป็น 0.1 และ10 มล.ต่อวินาที ตามลำดับ (ก) ที่ตำแหน่งบนท่อนาโนคาร์บอน (ข) ที่ตำแหน่งบนลวดทังสเตน 58

4.18 ภาพถ่ายจากกล้อง TEM โดยใช้ความต่างศักย์เร่งอิเล็กตรอน 200 กิโลโวลต์ กำลังขยาย 60,000 เท่า แสดงพื้นผิวของลวดทังสเตนที่นำไปทดลองปลูก ท่อนาโนคาร์บอนที่อุณหภูมิ 900 เคลวิน และอัตราการไหลของก๊าซอะเซทิลีน และอาร์กอน เป็น 0.1 และ10 มล.ต่อวินาที 59

4.19 ภาพถ่ายจากกล้อง TEM โดยใช้ความต่างศักย์เร่งอิเล็กตรอน 200 กิโลโวลต์ กำลังขยาย 120,000 เท่า แสดงพื้นผิวของลวดทังสเตนที่นำไปทดลองปลูก ท่อนาโนคาร์บอนที่อุณหภูมิ 900 เคลวิน และอัตราการไหลของก๊าซอะเซทิลีน และอาร์กอน เป็น 0.1 และ10 มล.ต่อวินาที ตามลำดับ 60

4.20 ภาพถ่ายจากกล้อง TEM โดยใช้ความต่างศักย์เร่งอิเล็กตรอน 200 กิโลโวลต์ กำลังขยาย 500,000 เท่า แสดงพื้นผิวของลวดทังสเตนที่นำไปทดลองปลูก ท่อนาโนคาร์บอนที่อุณหภูมิ 900 เคลวิน และอัตราการไหลของก๊าซอะเซทิลีน และอาร์กอน เป็น 0.1 และ10 มล.ต่อวินาที 61

4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง I(μA) กับ V(V) ของลวดทังสเตน (a)ไม่ปลูกท่อนาโนคาร์บอน (b) ปลูกท่อนาโนคาร์บอน 63

4.22 กราฟ Fowler-Nordheim แสดงการปลดปล่อยอิเล็กตรอนของลวดทังสเตน (a)ไม่ปลูกท่อนาโนคาร์บอน (b) ปลูกท่อนาโนคาร์บอน 63

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง I(μA) กับ V(V) ของลวดทังสเตน
ที่ปลูกท่อนาโนคาร์บอนแล้วนำมาทดสอบปรับระยะห่างระหว่างขั้วแคโทดกับแอโนด
เป็น 0.5 1.0 1.5 และ2.0 มิลลิเมตร ตามลำดับ 65

4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าต่างๆของกระแสอิเล็กตรอนที่ได้เมื่อ
ค่าความต่างศักย์ที่ใช้กับลวดทังสเตนตั้งแต่ 50-300 โวลต์ ที่ความดัน 5×10^{-6} มล.ปรอท
ของลวดทังสเตนที่ปลูกท่อนาโนคาร์บอนที่อุณหภูมิ 700 เคลวิน 800 เคลวิน
และ 900เคลวิน ตามลำดับ 66

4.22 กราฟ Fowler-Nordheim แสดงการปลดปล่อยอิเล็กตรอนของลวดทังสเตนที่
อุณหภูมิ 700 เคลวิน 800 เคลวิน และ 900 เคลวิน ตามลำดับ 67

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved