หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาและการสร้างหัวตรวจวัดก๊าซแบบซิลิคอน
	ใดออกไซด์-ท่อนาโนการ์บอนชนิดผนังหลายชั้น
นักศึกษา	นายศรีสัชนา เรื่องเพชร
รหัสประจำตัว	45060801
ປຣີູູູູູູູູູູູູູູ່	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์
พ.ศ.	2550
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.สมศักดิ์ เชียร์ศิริกุล

บทคัดย่อ

้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอ การศึกษาและการสร้างหัวตรวจวัดก๊าซแบบซิลิคอนได ้ออกไซด์-ท่อนาโนการ์บอนชนิดผนังหลายชั้น หัวตรวจวัดก๊าซซึ่งประกอบด้วยท่อนาโนการ์บอน ้ชนิดผนังหลายชั้นและซิลิคอนไดออกไซด์ ที่เตรียมมาจากสารละลายโซลเจลซิลิคอนไดออกไซด์ ้โดยวิธีสปินโกตติง ลงบนชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ของฐานรองซิลิกอน ขั้ววัดกุณสมบัติทางไฟฟ้า ้สร้างขึ้นจากโลหะแพลทินัมและไททาเนียม จากการเคลือบด้วยเครื่อง ดี ซี สปัตเตอร์ริ่ง โดยมีไท ทาเนียมทำหน้าที่เป็นชั้นประสานระหว่างแพลทินัมและซิลิคอนไคออกไซด์ หัวตรวจวัดก๊าซถูก ้นำมาทคสอบการตรวจจับก๊าซออกซิเจน. เอทิลแอลกอฮอล์ และแอมโมเนีย โคยได้ทำการวิเคราะห์ ้ผล ด้วยการวัดการเปลี่ยนแปลงก่าความจุไฟฟ้า สำหรับการทดสอบก๊าซออกซิเจนวัดที่ความเข้มข้น ของก๊าซในช่วง 500-10,000 ppm ส่วนการทดสอบเอทิลแอลกอฮอล์และแอมโมเนียละลายในน้ำ บริสุทธิ์ วัดที่ความเข้มข้นในช่วง 0.1-20% โดยปริมาตร ผลจากการทดสอบพบว่าหัวตรวจวัดก๊าซ ตามลักษณะโครงสร้างแบบอินเทอร์ดิจิตอล ซึ่งมีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 30 ไมครอน ตอบสนองต่อก๊าซทั้ง 3 ชนิดได้ดีที่สุด ศึกษาสัดส่วนซิลิกอนไดออกไซด์-ท่อนาโนการ์บอนชนิด ้ผนังหลายชั้น ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ สรุปได้ว่าที่อัตราส่วนผสม 100:1 โดยน้ำหนัก ชั้นฟิล์มมีอัตรา การเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าสูงสุด จากการตอบสนองต่อก๊าซออกซิเจน 10,000 ppm, เอทิลแอลกอฮอล์ 20% และแอม โมเนีย 20% ชั้นฟิล์มมีการเปลี่ยนก่าความจุไฟฟ้า ประมาณ 34, 60 และ 70 เปอร์เซ็นต์ ส่วนชั้นฟิล์มที่ไม่ได้ผสมท่อนาโนการ์บอนชนิดผนังหลายชั้นมีการ เปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้า ประมาณ 28, 53 และ 60 เปอร์เซ็นต์ ตามลำคับ ศึกษาอุณหภูมิใช้งาน ในช่วง 10-90 องศาเซลเซียส จากการตอบสนองต่อก๊าซออกซิเจน 10,000 ppm, เอทิลแอลกอฮอล์ 20% และแอม โมเนีย 20% พบว่าชั้นฟิล์มมีการเปลี่ยนแปลงความจุไฟฟ้าสูงสุด ที่อุณหภูมิ 90 องศา เซลเซียส มีอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าประมาณ 38, 66 และ 74 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

Thesis Title	Study and Fabrication of SiO_2 -Multiwalled Carbon Nanotube
	Based Gas Sensor
Student	Mr. Srisuchana Ruangphet
Student ID.	45060801
Degree	Master of Engineering
Program	Micro Electronic Engineering
Year	2007
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Somsak Cheirsirikul

ABSTRACT

This thesis presents the study and fabrication of multiwalled carbon nanotube-based gas sensors. The gas sensor consists of multiwalled carbon nanotubes (MWCNTs) and silicon dioxide (SiO₂) prepared from silicon dioxide sol-gel solution on a silicon dioxide layer of silicon substrate by spin coating method. The electrode is constructed from platinum and titanium metals by coating using dc-sputtering device. The titanium layer functions to adhere between platinum and silicon dioxide. The gas sensors is used for detecting oxygen gas, ethyl alcohol, and ammonia by measuring the change of their electrical capacitance. Oxygen gas can be measured at the concentrations 500-10,000 ppm. whereas the concentrations of between ethyl alcohol and ammonia content in DI water, can be analysed between 0.1-20% by volume. The test result shows found that the gas sensor having the interdigital structure with 30 µm spacing between electrodes is effectively sensitive to three kinds of gases. The study on the proportion of silicon dioxide and multiwalled carbon nanotube in different ratios appears that the electrical capacitance of the film layer has changed at the highest rate in the ratio of 100:1 by weight. By the response to oxygen gas with a concentration of 10,000 ppm, 20% of ethyl alcohol and 20% of ammonia, it is found that the electrical capacitance of the film layer has changed about 34%, 60% and 70% respectively. Meanwhile the film layer without multiwalled carbon nanotube has changed the electrical capacitance about 28%, 53% and 60% respectively according to the response to these gases. In addition the sensitivity to oxygen gas with a concentration of 10,000 ppm, 20% of ethyl alcohol and 20% of ammonia under working conditions in a range of 10-90 °C are also studied. It is evident that the electrical capacitance of the film layer forwards those gases has changed at the highest rate at 90 °C with the change of about 38%, 66% and 74% respectively.

กิตติกรรมประกาศ

ในการดำเนินการจัดทำวิทยานิพนธ์ "การศึกษาและการสร้างหัวตรวจวัดก๊าซแบบซิลิกอน ใดออกไซด์-ท่อนาโนการ์บอนชนิดผนังหลายชั้น" ผู้เขียนขอขอบพระกุณ รศ.สมศักดิ์ เชียร์ศิริกุล ในฐานะอาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้กรุณาให้แนวทาง ข้อมูลทางด้านวิชาการและข้อกิดด้านการปฏิบัติ ตั้งแต่เริ่มต้นจนกระทั้งเสร็จสมบูรณ์ ทำให้ทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้เขียน ขอขอบพระกุณเป็นอย่างสูงยิ่ง

ขอขอบคุณ อาจารย์ และเจ้าหน้าที่ ศูนย์วิจัยเล็กทรอนิกส์ ทุกท่าน สำหรับคำแนะนำทาง วิชาการ ตลอดจนความช่วยเหลือในการใช้เครื่องมือและเทคนิคต่างๆ

ขอขอบคุณ คุณปทิตตา เทียนส่องใจ โครงการเคมี กรมวิทยาศาสตร์บริการ เจ้าหน้าที่และ เพื่อน ๆ ทุกท่าน สำหรับคำแนะนำทางวิชาการตลอดจนความช่วยเหลือในการใช้วัสดุอุปกรณ์และ เครื่องมือต่างๆ

สุดท้ายนี้ขออำนาจคุณพระศรีรัตนตรัยและสิ่งศักดิ์สิทธิ์ได้โปรดอภิบาลประทานพรให้คุณ บิดามารดา และครูอาจารย์ ผู้ให้พลังทางปัญญาแห่งความกิดและรากฐานการศึกษาแก่ผู้จัดทำ จงประสบแต่กวามสุขและกวามเจริญก้าวหน้าในหน้าที่การงาน ในการคำเนินชีวิตตลอดไป

ศรีสัชนา เรื่องเพชร

สารบัญ

หน้า
บทคัดย่อภาษาไทยI
บทคัดย่อภาษาอังกฤษII
กิตติกรรมประกาศIII
สารบัญIV
สารบัญตารางVIII
สารบัญรูปIX
รายการสัญลักษณ์XIV
ศัพท์เทคนิคXVI
บทที่ 1 บทนำ 1
1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย 1
1.2 ซิถิกอนไดออกไซด์-ท่อนาโนการ์บอน (SiO ₂ –CNTs)
1.2.1 ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO ₂)2
1.2.2 ท่อนาโนคาร์บอน (CNTs)
1.3 นิยามของเซนเซอร์
1.4 วัตถุประสงค์และขอบเขตการวิจัย4
1.5 วิธีการดำเนินงานวิจัย4
1.6 การประยุกต์ใช้งาน5
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ
2.2 ท่อนาโนคาร์บอน (carbon nanotubes)
2.2.1 โครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอน
2.2.2 การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน12
2.2.2.1 วิธีอาร์คดีสชาร์จ (Arc Discharge)12
2.2.2.2 Laser abation vaporization
2.2.2.3 วิธีดีโพสิชันทางเคมี (chemical vapor deposition, CVD
2.3 การประยุกต์ใช้ท่อนาโนคาร์บอนในเซนเซอร์เคมีและฟิสิกส์
2.4 Carbon Nanotube Chemical Sensors16

สารบัญ (ต่อ)

		หน้า
	2.4.1 การดูดกลืนก๊าซ	16
	2.4.2 หลักการพื้นฐานของท่อนาโนคาร์บอนสำหรับเซนเซอร์เกมี	18
	2.5 วิธีวิเคราะห์คุณสมบัติของซิลิคอนไคออกไซค์-ท่อนาโนคาร์บอน	
	ชนิดผนังหลายชั้น (SiO ₂ -MWCNTs)	20
	2.5.1 การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง (Fourier Transform Infrared Spectrometer:	
	FT-IR)	20
	2.5.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกจากการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	26
	2.5.3 การวิเคราะห์พื้นผิวด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope	
	(SEM)	
	2.5.4 การวิเคราะห์คุณสมบัติฟิล์มบางด้วยเครื่อง Ellipsomter	32
	2.6 การปลูกฟิล์มบางค้วยระบบสปัตเตอร์ริง	
	2.6.1 ทฤษฎีการปลูกฟิล์มบางค้วยระบบสปัตเตอร์ริง	
	2.6.2 อันตรกิริยาระหว่างไอออนและผิวเป้าสารเคลือบ	
	2.6.3 กระบวนการชนกันในบริเวณที่ก๊าซเกิดการแตกตัว	
	2.6.4 อัตราการเคลือบฟิล์มของระบบสปัตเตอร์ริง	
	2.7 ระบบดีซี สปัตเตอร์ริง	40
บทที่ 3	การออกแบบและกระบวนการสร้าง	41
	 3.1 การออกแบบขั้ววัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า 	41
	3.2 การออกแบบพื้นที่ของแผ่นชั้นรับสัญญาณก๊าซ	43
	3.3 การสร้างกระจกมาส์กต้นแบบ	43
	3.4 กระบวนการสร้างหัวตรวจวัดก๊าซ	44
	3.4.1 การทำความสะอาดและเตรียมแผ่นเบื้องต้น	44
	3.4.2 การสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO ₂)	45
	3.4.3 การสร้างขั้ววัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า	46
	3.4.4 การการสร้างชั้นฟิล์มซิลิคอนใดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอน	50
	3.4.5 การเปิดช่องขั้ววัคคุณสมบัติทางไฟฟ้า	51

สารบัญ (ต่อ)

หน้า
ทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง56
4.1 การศึกษากุณสมบัติของฟิล์มบางซิลิคอนไดออกไซด์
4.1.1 การเตรียมสารละลายโซล-เจลซิลิคอนไดออกไซค์
4.1.2 การเตรียมฟิล์มบางซิลิคอนไดออกไซด์57
4.1.3 การทคสอบสารละลายโซล-เจลซิลิคอนใคออกไซค์
4.1.4 การหาก่ากวามหนาของฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์
4.1.5 การศึกษาผิวหน้าของฟิล์มบางซิลิคอนไดออกไซด์60
4.1.5.1 กล้องจุลทรรศน์แบบแกนนิ่งบางซิลิคอนไดออกไซด์60
4.1.5.2 เครื่องวัดการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์61
4.1.6 การศึกษาคุณสมบัติทางแสงของฟิล์มบางซิลิคอนไดออกไซด์62
4.1.7 การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางซิลิคอนไดออกไซด์63
4.2 การจัดเตรียมท่อนาโนคาร์บอน63
4.3 การศึกษาระยะห่างขั้วไฟฟ้า64
4.4 การเตรียมชั้นฟิล์ม SiO ₂ -MWCNTs
4.4.1 การศึกษาผิวหน้าของชั้นฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์-ท่อนาโนการ์บอน
ชนิดผนังหลายชั้น66
4.5 การตอบสนองที่มีต่อก๊าซของหัวตรวจวัคก๊าซ
4.5.1 การศึกษาความไวในการตรวจจับก๊าซ
4.6 การตอบสนองต่อก๊าซออกซิเจน (O ₂)69
4.7 การตอบสนองต่อเอทิลแอลกอฮอล์ (C ₂ H5OH)74
4.7.1 การตอบสนองต่อเอทิลแอลกอฮอล์ที่ความเข้มข้นต่างๆ
4.8 การตอบสนองต่อแอมโมเนีย (NH ₃)79
4.8.1 การตอบสนองต่อแอม โมเนียที่ความเข้มข้นต่างๆ
4.9 การศึกษาความหนาของชั้นฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์-ท่อนาโนการ์บอน
ต่อการตอบรับก๊าซ
4.10 ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการตอบสนองต่อก๊าซ86

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์ผลการทคลอง	
เอกสารอ้างอิง	91
ประวัติผู้เขียน	92

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ช่วงต่างๆ ของอินฟราเรคสเปกตรัม	22
3.1 เงื่อนไขการสปัตเตอร์ริง Ti ด้วยเครื่องดีซี สปัตเตอร์ริง	46
3.2 เงื่อนไขการสปัตเตอร์ริง Pt ด้วยเครื่องดีซี สปัตเตอร์ริง	47
3.3 เงื่อนไขการซินเตอร์ริง	48
3.4 ขั้นตอนการโฟโตลิโชกราฟีน้ำยาไวแสงชนิดบวก	
3.5 ขั้นตอนการกัดชั้นฟิล์มแพลทินัม (Pt)	
3.6 ขั้นตอนการกัดชั้นฟิล์มไททาเนียม (Ti)	49
3.7 เงื่อนไขการสร้างชั้นฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์-ท่อนาโนการ์บอนโดยวิธีสปินโคตติง	50
3.8 เงื่อนไขการอบฟิล์ม	51
3.9 ขั้นตอนการกัดชั้นฟิล์มซิลิคอนใดออกไซด์-ท่อนาโนการ์บอนเพื่อทำการเปิดขั้ว	51
4.1 การเจือความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจน	69
4.2 ผลการทคลองแสดงค่าความจุที่วัดได้จากการตรวจจับก๊าซออกซิเจน (O ₂)	69
4.3 อัตราส่วนของเอทิลแอลกอฮอล์ : น้ำ DI (cc) ที่ความเข้มข้นต่าง	74
4.4 ผลการทดลองแสดงก่าความจุที่วัดได้จากการตรวจจับเอทิลแอลกอฮอล์ ($\mathrm{C_2H_5OH}$)	75
4.5 ผลการทคลองแสดงค่าความจุที่วัดได้จากการตรวจจับก๊าซแอมโมเนีย (NH ₃)	80

สารบัญรูป

รูปที่	ห	น้ำ
1.1	แบบจำลองของหน่วยซิลิคอนไดออกไซด์ซึ่งอยู่ในรูปแบบของแข็งสี่มุมที่เรียกว่า	
	ทรงเหลี่ยมสี่หน้า	.2
1.2	การจัดเรียง โมเลกุลของซิลิกอนไดออกไซด์ในควอตซ์จะมีการยึดติดระหว่างกันมีแรงดึง	
	ออกทุกทิศทาง	.2
1.3	การจัดกลุ่มอุปกรณ์ทรานสดิวเซอร์ (Transducers)	.4
2.1	โครงสร้างของ (a) เพชร (b) แกร ไฟต์ และ (c) ฟูลเลอร์รีน	8
2.2	ท่อนาโนการ์บอนผนังชั้นเดียว (SWCNT)	9
2.3	ลักษณะการม้วนแผ่นแกรไฟต์เป็นท่อนาโน และโครงสร้างของท่อนาโนที่ได้	9
2.4	Chiral angle ซึ่งกำหนด โดยเวกเตอร์ Ch และ T	11
2.5	การเป็นโลหะและสารกึ่งตัวนำของท่อนาโนคาร์บอน	11
2.6	ท่อนาโนการ์บอนผนังหลายชั้น (MWCNTs)	12
2.7	วิธีอาร์คดีสชาร์จ (Arc Discharge)	13
2.8	រិតិ៍ Laser abation vaporization	14
2.9	แผ่นภาพระบบ Hot Filament activated CVD	15
2.10	แบบจำลอง Lennard-Jones การดูดกลื่นทางฟิสิกส์และการดูดกลื่นทางเคมี	17
2.11	ปริมาณการดูดกลืนก๊าซที่อุณหภูมิค่าต่าง ๆ	17
2.12	แผนภาพแสดงการกระจายของอิเล็กตรอนบน plane graphene และ CNT	18
2.13	แสดง โมเคลการยึดเกาะ โมเลกุลของก๊าซจำนวน 3 โมเลกุล กับ SWCNT	18
2.14	แสดงความสัมพันธ์ของพลังงานการยึดเหนื่ยวกับระยะทางการยึดเหนื่ยว	
	ของ NO ₂ กับ SWCNT	19
2.15	เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer(FT-IR)	21
2.16	แสดงแผนภาพองค์ประกอบของเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์	24
2.17	การตกกระทบของการสะท้อนของรังสีเอ็กซ์ตามกฎของแบรกก์	27
2.18	เครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD)	28
2.19	ส่วนประกอบภายในเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)	31
2.20	เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)	31
2.21	ส่วนประกอบภายในของเครื่อง Ellipsomter	33

รูปที่	หา	น้ำ
2.22	เครื่อง Ellipsomter	34
2.23	เทคโนโลยีการสร้างฟิล์มบาง	35
2.24	กลไกการเคลือบฟิล์มระบบสปัตเตอร์ริง	36
2.25	เปรียบเทียบลักษณะการชนของลูกบิลเลียตกับการสปัตเตอร์ริง	37
2.26	การถ่ายทอดโมเมนตัมในกระบวนการสปัตเตอร์ริง	38
2.27	ระบบดีซี สปัตเตอร์ริง	40
3.1	ลักษณะลวดลายของขั้ววัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า	41
3.2	โครงสร้างของวงจรชักนำไฟฟ้าแบบต่างๆ (ก) โครงสร้าง A (ข) โครงสร้าง B (ค)	
	โครงสร้าง C (ง) โครงสร้าง D (ง) โครงสร้าง E และ (ฉ) โครงสร้างของส่วนขยาย	42
3.3	ลักษณะลวคลายของพื้นที่แผ่นชั้นสัญญาณก๊าซ	43
3.4	ลักษณะภาพถ่ายโปรแกรม LEDIT	43
3.5	ลักษณะกระจกด้นแบบ มาส์กที่ 1	44
3.6	ลักษณะกระจกต้นแบบ มาส์กที่ 2	44
3.7	ภาพถ่ายของ (ก) เครื่อง Ultra sonic และ (ข) manual bench	45
3.8	ภาพถ่ายของเตาออกซิเคชัน	46
3.9	ภาพถ่ายเครื่องคีซี สปัตเตอร์ริง	47
3.10	ภาพถ่ายเตาซินเตอร์ริง	48
3.11	ภาพถ่ายของ (ก) เครื่อง Mask Aligner และ (ข) เครื่อง Spinner	49
3.12	ลำดับขั้นตอนของกระบวนการสร้างหัวตรวจวัดก๊าซแบบซิลิกอนไดออกไซด์-ท่อนาโน	
	คาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น	54
3.13	ลักษณะภาพตัดขวางของหัวตรวจวัดก๊าซแบบซิลิคอนไดออกไซด์-ท่อนาโนการ์บอน	
	ชนิดผนังหลายชั้น	54
3.14	ลักษณะ โครงสร้างหัวตรวจวัดก๊าซแบบซิลิคอนไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอน	
	ชนิดผนังหลาย ชั้น	54
3.15	ภาพถ่ายหัวตรวจวัดก๊าซแบบซิถิคอนใดออกใซด์-ท่อนาโนการ์บอนที่สร้างเสร็จ	55
3.16	ภาพถ่ายหัวตรวจวัดก๊าซแบบซิถิคอนใดออกใซด์-ท่อนาโนคาร์บอน	55
4.1	ขั้นตอนการเตรียมสารละลายโซลเจลซิลิกอนไดออกไซด์	56

รูปที่	หน้า
4.2	ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางซิลิคอนไดออกไซด์57
4.3	กราฟแสดงคุณสมบัติมาตรฐานของซิลิคอนไดออกไซด์
4.4	กราฟแสดงคุณสมบัติของซิลิคอนไดออกไซด์ที่เตรียมได้
4.5	ภาพถ่ายภาคตัดขวางของฟิล์มบางซิลิคอนไดออกไซด์ที่ความหนา 5000 อังสตรอม59
4.6	ความสัมพันธ์ของความหนาต่อจำนวนชั้นในการเกลือบที่ความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที59
4.7	ผิวหน้าของฟิล์มบางซิลิคอนไดออกไซด์ หลังจากการแอนนี้ลที่อุณหภูมิ (ก) 400, (ข) 500,
((ค) 600 และ (ง) 700 องศาเซลเซียส
4.8	การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกฟิล์มบางซิลิคอนไดออกไซด์ด้วยเครื่อง XRD หลังจากการ
	แอนนีลที่อุณหภูมิ 400, 500, 600, และ 700 องศาเซลเซียส
4.9	แสดงก่าดัชนี้หักของแสงหลังการแอนนี้ลที่อุณหภูมิ 400 , 500 , 600 และ
	700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที
4.10	กราฟ I-V แสดงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางซิลิคอนไดออกไซด์63
4.11	ภาพถ่ายผิวหน้า MWCNTs ด้วยเครื่อง SEM
4.12	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของฟิล์มแพลทินัมและไททาเนียมกับเวลา
	การสปัตเตอร์ริง
4.13	ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบาง SiO ₂ -MWCNTs65
4.14	ภาพถ่ายผิวหน้าชั้นฟิล์ม SiO2-MWCNTs ด้วยเครื่อง SEM
4.15	การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกฟิล์มบางซิลิคอนไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอนด้วยเครื่อง XRD
	ที่ความหนา 2000, 3000, 4000, และ 5000 อังสตรอม67
4.16	แผนผังระบบวัดผลการทคลอง
4.17	การตอบสนองต่อก๊าซออกซิเจน ความเข้มข้น 5,00 ppm ของชั้นฟิล์มซิลิกอน
	ใดออกไซด์-ท่อนาโนการ์บอนชนิดผนังหลายชั้น ที่อัตราส่วนผสม 100:1
	โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส โครงสร้าง A, B, C, D และ E
4.18	การตอบสนองต่อก๊าซออกซิเจน ความเข้มข้น 1,000 ppm ของชั้นฟิล์มซิลิคอน
	ใดออกไซด์-ท่อนาโนการ์บอนชนิดผนังหลายชั้น ที่อัตราส่วนผสม 100:1
	โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส โครงสร้าง A, B, C, D และ E

รูปที่ หน้า
4.19 การตอบสนองต่อก๊าซออกซิเจน ความเข้มข้น 5,000 ppm ของชั้นฟิล์มซิลิคอน
ใดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น ที่อัตราส่วนผสม 100:1
โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสโครงสร้าง A, B, C, D และ E
4.20 การตอบสนองต่อก๊าซออกซิเจน ความเข้มข้น 1,0000 ppm ของชั้นฟิล์มซิลิคอน
ใดออกไซด์-ท่อนาโนการ์บอนชนิดผนังหลายชั้น ที่อัตราส่วนผสม 100:1
โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส โครงสร้าง A, B, C, D และ E
4.21 การตอบสนองต่อก๊าซออกซิเจน ความเข้มข้น 500, 1,000, 5,000 และ 10,000 ppm
ของชั้นฟิล์มซิลิคอนไคออกไซค์บริสุทธิ์ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส โครงสร้าง
A, B, C, D และ E73
4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้ากับความเข้มข้นของก๊าซ
ออกซิเจน (O2) ของชั้นฟิล์ม SiO2-MWCNTs และ SiO2 บริสุทธิ์ โครงสร้าง A
4.23 แผนผังระบบวัคผลการทดลอง75
4.24 การตอบสนองต่อเอทิลแอลกอฮอล์ (C ₂ H5OH) ความเข้มข้น 0.1% ของชั้นฟิล์ม
ซิลิคอนไดออกไซด์-ท่อนาโนการ์บอนชนิดผนังหลายชั้น ที่อัตราส่วนผสม 100:1
โคยน้ำหนัก อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส โครงสร้าง A, B, C, D และ E
4.25 การตอบสนองต่อเอทิลแอลกอฮอล์ (C ₂ H5OH) ความเข้มข้น 1% ของชั้นฟิล์ม
ซิลิกอน ใคออกไซค์-ท่อนาโนการ์บอนชนิดผนังหลายชั้น ที่อัตราส่วนผสม 100:1
โคยน้ำหนัก อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส โครงสร้าง A, B, C, D และ E
4.26 การตอบสนองต่อเอทิลแอลกอฮอล์ (C ₂ H5OH) ความเข้มข้น 10% ของชั้นฟิล์ม
ซิลิคอนไดออกไซด์-ท่อนาโนการ์บอนชนิดผนังหลายชั้น ที่อัตราส่วนผสม 100:1
โคยน้ำหนัก อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส โครงสร้าง A, B, C, D และ E
4.27 การตอบสนองต่อเอทิลแอลกอฮอล์ (C ₂ H5OH) ความเข้มข้น 20% ของชั้นฟิล์ม
ซิลิคอนไดออกไซด์-ท่อนาโนการ์บอนชนิดผนังหลายชั้น ที่อัตราส่วนผสม 100:1
โคยน้ำหนัก อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส โครงสร้าง A, B, C, D และ E
4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้ากับความเข้มข้นของเอทิลแอลกอ
ฮอล์ (C $_2$ H $_5$ OH) ของชั้นฟิล์ม SiO $_2$ -MWCNTs และ SiO $_2$ บริสุทธิ์ โครงสร้าง A
4.29 แผนผังระบบวัคผลการทคลอง

รูปที่ หน้า
4.30 การตอบสนองต่อแอมโมเนีย (NH3) ความเข้มข้น 0.1% ของชั้นฟิล์ม
ซิลิคอนไดออกไซด์-ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น ที่อัตราส่วนผสม 100:1
โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส โครงสร้าง A, B, C, D และ E
4.31 การตอบสนองต่อแอมโมเนีย (NH3) ความเข้มข้น 1% ของชั้นฟิล์ม
ซิลิคอนไดออกไซด์-ท่อนาโนการ์บอนชนิดผนังหลายชั้น ที่อัตราส่วนผสม 100:1
โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส โครงสร้าง A, B, C, D และ E
4.32 การตอบสนองต่อแอมโมเนีย (NH3) ความเข้มข้น 10% ของชั้นฟิล์ม
ซิลิคอนไดออกไซด์-ท่อนาโนการ์บอนชนิดผนังหลายชั้น ที่อัตราส่วนผสม 100:1
โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส โครงสร้าง A, B, C, D และ E
4.33 การตอบสนองต่อแอมโมเนีย (NH3) ความเข้มข้น 20% ของชั้นฟิล์ม
ซิลิคอนไดออกไซด์-ท่อนาโนการ์บอนชนิดผนังหลายชั้น ที่อัตราส่วนผสม 100:1
โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส โครงสร้าง A, B, C, D และ E
4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้ากับความเข้มข้นของแอมโมเนีย
(NH3) ของชั้นฟิล์ม SiO2-MWCNTs และ SiO2 บริสุทธิ์ โครงสร้าง A
4.35 การตอบสนองต่อก๊าซออกซิเจน (O ₂) ความเข้มข้น 10,000 ppm ที่ความหนาต่างๆ
4.36 การตอบสนองต่อก๊าซแอมโมเนีย (NH3) ความเข้มข้น 20% ที่ความหนาต่างๆ
4.37 การตอบสนองต่อก๊าซแอมโมเนีย (NH ₃) ความเข้มข้น 20% ที่ความหนาต่างๆ
4.38 การตอบสนองต่อก๊าซออกซิเจน (O ₂) ความเข้มข้น 10,000 ppm ที่อุณหภูมิต่างๆ
4.39 การตอบสนองต่อก๊าซเอทิลแอลกอฮล์ (N ₂ H5OH) ความเข้มข้น 20% ที่อุณหภูมิต่างๆ87
4.40 การตอบสนองต่อก๊าซแอมโมเนีย (NH3) ความเข้มข้น 20% ที่อุณหภูมิต่างๆ

รายการสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
С	ค่าความจุไฟฟ้า	ฟารัด
C_{air}	ค่าความจุไฟฟ้าของชั้นฟิล์มในบรรยากาศปกติ	นาโนฟารัด
C_{gas}	ค่าความจุไฟฟ้าของชั้นฟิล์มในบรรยากาศของก๊าซ	นาโนฟารัด
°C	อุณหภูมิ	องศาเซลเซียส
C ₂ H ₅ OH	เอทิลแอลกอฮอล์	-
CNTs	ท่อนาโนการ์บอน	-
e	ประจุของอิเล็กตรอน	คูลอมบ์
ΔG	พลังงานที่ใช้ในการย่อยสลายโมเลกุลออกซิเจน	อิเล็กตรอน โวลต์
I _S	กระแสดิสชาร์จ	ใมโครแอมแปร์
MWCNTs	ท่อนาโนการ์บอนชนิดผนังหลายชั้น	-
NH ₃	แอมโมเนีย	-
i _s	ความหนาแน่นกระแสที่เป้าสารเคลือบ	แอมป์ต่อตารางเมตร
j	ความหนาแน่นกระแสที่ขั้วแคโทด	แอมป์ต่อตารางเมตร
К	ค่าคงที่ Lattice Scattering Mode (3π/8)	-
K ₁	ค่าคงที่	-
Ι	ระยะห่างระหว่างคู่อิเล็กโทรด	เซนติเมตร
Ν	ความหนาแน่นของประจุที่สถานะผิว	(cm ⁻³)
N(E)	ความหนาแน่นของระดับพลังงาน	(cm ⁻³)
N _D	ความหนาแน่นของผู้ให้ในสาร	(cm ⁻³)
N _s	ความหนาแน่นของประจุบนผิว	(cm ⁻³)
O_2	ออกซิเจน	-
Р	ความคันก๊าซ	Kg/cm ²
q	ประจุไฟฟ้า	คูลอมบ์
ΔC	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้า	-
r _e	รัศมีแคโทด	เซนติเมตร
S	สัมประสิทธิ์ในการสปัตเตอร์ริง	-
SWCNTs	ท่อนาโนการ์บอนชนิดผนังชั้นเดียว	-
t	ความหนา	ນີດຄືເນຕຽ

รายการสัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
Т	อุณหภูมิ	เคลวิน
t	ເວລາ	นาที
X _o	ความหนาแน่นของชั้น	-
Ψ	ศักดาที่ Double layer	โวลต์
ψ_{S}	ศักดาที่ผิวสัมผัสกับเนื้อสาร	โวลต์
3	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก	-
ε _O	ค่าเพอร์มิติวิตีในอากาศ	F/cm
$\mu_{ m H}$	ก่ากวามกล่องตัวของพาหะ	cm ² /V-s
λ	ความยาวกลิ่น	นาโนเมตร
λ_{O}	ก่า Mean free path	-

ศัพท์เทคนิค

การดูดกลื่น Absorption การดูดซับ Adsorption อะซิโตน Aceton แอมโมเนีย Ammonia ระยะทางการยึดเหนี่ยว Binding distance พลังงานการยึดเหนี่ยว Binding energy พันธะ Bond ท่อนาโนคาร์บอน Cabon nanotube พันธะ โควาเลนท์ Covalent band น้ำบริสุทธิ์ปราศจากไอออน Deionized water ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก Dielectric constant อิเล็กตรอน Electron เอทิลแอลกอฮอล์ Ethernal ฟูลเลอรีน Fullerence หัวตรวจวัดก๊าซ Gas sensors แกรฟืน Graphene แกรไฟต์ Graphite ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น Multiwalled carbon nanotubes ออกซิเจน Oxigen ผลึกหลายรูป Poly crystalline ซิลิคอนไดออกไซด์ Silicon dioxide ท่อนาโนการ์บอนชนิดผนังชั้นเดียว Singlewalled carbon nanotubes สเปกตรัม Spectrum สปัตเตอร์ริ่ง Sputtering ฐานรอง Substrate สังเคราะห์ Synthesis อุลตราโซนิค Ultrasonic รังสีเอ็กซ์ X-ray