

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธีซีวีดีแบบขดลวดความร้อน
และการนำไปประยุกต์ใช้

SYNTHESIS OF CARBON NANOTUBES BY HOT FILAMENT CHEMICAL
VAPOR DEPOSITION AND APPLICATION



โดย

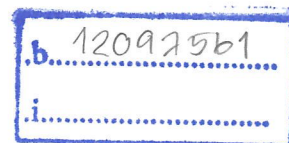
นางสาวศรีอนงค์ แสงจันทร์

นายสมคะเน คำพล

นายอัสสุชล แสงนวล

๒/๗
๑๖ ๒๗๕/๗
๒๕๕๑

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 103050
วัน,เดือน,ปี..... 24 ส.ค. 2552



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2551

การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธีชีวิตแบบขดลวดความร้อน
และการนำไปประยุกต์ใช้

SYNTHESIS OF CARBON NANOTUBES BY HOT FILAMENT CHEMICAL
VAPOR DEPOSITION AND APPLICATION

โดย

นางสาวศรีอนงค์ แสงจันทร์

นายสมคะเน คำพล

นายอัสสุชล แสงนวล

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร.เดิมาพงษ์ เพ็ชรกุล

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2551

ปริญญาานิพนธ์ ปีการศึกษา 2551

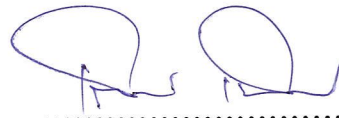
ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่องการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธีซีวีดีแบบขดลวดความร้อนและการนำไปประยุกต์ใช้

ผู้จัดทำ

1. นางสาวศรีอึ้งค์ แสงจันทร์
2. นายสมคะเน คำพล
3. นายอัสนุชล แสงนวล



(รศ.ดร. เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล)

อาจารย์ที่ปรึกษา

การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธี ซีวีดี แบบขดลวดความร้อน และการนำไปประยุกต์ใช้

นางสาว ศรีอนงค์ แสงจันทร์ รหัส 49015165
นาย สมคะเน คำพล รหัส 49015168
นาย อัสสุชล แสงนวล รหัส 49015222
รศ.ดร.เคิมพงษ์ เพ็ชรภูธ อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2551

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอการนำคาร์บอนนาโนทิวบ์ไปประยุกต์ใช้งานเป็นเซนเซอร์เคมี สำหรับตรวจจับไอระเหยของเอทานอลและแก๊สไฮโดรเจน โดยใช้ซิลิคอนไดออกไซด์เป็นฐานรอง ใช้นิกเกิลเป็นโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) โดยการสปีดเตอริงเป็นกลุ่มก้อน (Cluster) มีขั้วไฟฟ้าเป็นทองแดง โดยการสปีดเตอริงเป็นแผ่นบาง (Thin film) ทำการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธีซีวีดี แบบขดลวดความร้อน ที่ความดันบรรยากาศ ในระบบใช้ไอระเหยของเอทานอลเป็นสารแหล่งจ่ายคาร์บอนผสมกับแก๊สไฮโดรเจนจากนั้นฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์จะถูกวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope), เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุ ระบบ Energy Dispersive X-ray สุดท้ายนำไปประยุกต์เป็นเซนเซอร์เคมี

SYNTHESIS OF CARBON NANOTUBES BY
HOT FILAMENT CHEMICAL VAPOR DEPOSITION AND
APPLICATION

Miss Srianong	Sangjan	ID.49015165
Mr. Somkane	Kumpon	ID.49015168
Mr. Assuchol	Sangnual	ID.49015222

Assoc.Prof.Dr. Toempong Phetchakul Advisor
Educational Year 2008

Abstract

This report presents the chemical sensors from carbon nanotube and applied for detecting ethanol vapor and hydrogen gas. Carbon nanotubes synthesised on silicon dioxide substrate. Nickel is used for catalyst material that is deposited on the substrate by sputtering method (Cluster). Copper is used for electrode which deposited on the substrate by sputtering method (Thin film). Carbon nanotubes is synthesis by hot filament vapor deposition (HFCVD) at atmospheric pressure. In our system, ethanol and hydrogen are used as carbon source material. Carbon nanotube film is characterized by Scanning Electron Microscope, Energy Dispersive X – ray. Finally, It is applied for chemical sensor.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรนี้สำเร็จได้จากความกรุณาของ รศ.ดร.เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ให้คำปรึกษา แนวทางในการดำเนินงาน รวมทั้งสนับสนุนเครื่องมือเครื่องใช้ต่างๆ และสนับสนุนการศึกษาค้นคว้าของนักศึกษาอย่างยิ่ง ขอขอบคุณ นาย รัฐพงษ์ นาคาไชย หรือพี่เป้ ของน้องๆ ที่ช่วยฝึกสอนการใช้เครื่องมือต่างๆ รวมทั้งวิทยานิพนธ์มหัศจรรย์ของพี่เป้ ที่ให้ข้อมูลต่างๆ ที่เป็นประโยชน์อย่างมาก ขอขอบคุณ นาย ชลินทร์ สุทธิเนตร นักศึกษาปริญญาโท สำหรับ คำปรึกษาที่มีประโยชน์และแนวทางในการแก้ปัญหาต่างๆ ขอขอบคุณ อาจารย์ อำนวย แสงนวล คุณพ่อของ นาย อัสสุชล แสงนวล (เบส) สำหรับคำปรึกษาด้านเคมี และการตรวจวัดแก๊ส

คณะผู้จัดทำ จัดทำปริญญาบัตรนี้ด้วยความอุทิศสาคะ คาดหวังว่าปริญญาบัตรนี้จะเป็นข้อมูลที่มีประโยชน์ในการประกอบการวิจัยสำหรับนักศึกษารุ่นต่อไป เพื่อให้คาร์บอนนาโนทิวบ์เป็นวัสดุที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อพัฒนาวงการวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ไทยให้ก้าวหน้าต่อไป

นางสาวศรีอนงค์ แสงจันทร์
นายสมคะเน คำพล
นายอัสสุชล แสงนวล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 นาโนเทคโนโลยี คาร์บอนนาโนทิวส์และเครื่องมือวิเคราะห์	2
2.1 นาโนเทคโนโลยี	2
2.1.1 กำเนิดของนาโนเทคโนโลยี	3
2.1.2 ประโยชน์ของนาโนเทคโนโลยี	3
2.1.3 นาโนเทคโนโลยีในประเทศไทย	4
2.2 วัสดุการ์บอน	5
2.2.1 คุณสมบัติของวัสดุการ์บอน	5
2.2.2 โครงสร้างของคาร์บอน	5
2.3 คาร์บอนนาโนทิวส์	7
2.3.1 การค้นพบคาร์บอนนาโนทิวส์	7
2.3.2 โครงสร้างและลักษณะการม้วนตัวของคาร์บอนนาโนทิวส์	8
2.3.3 ชนิดของคาร์บอนนาโนทิวส์	9
2.3.4 คุณสมบัติของคาร์บอนนาโนทิวส์	12
2.3.5 การนำคาร์บอนนาโนทิวส์ไปใช้งาน	13
2.4 การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวส์	15
2.4.1 วิธี อาร์คด้วยไฟฟ้า (Arc Discharge)	15
2.4.2 วิธี Laser Ablation	17
2.4.3 วิธีการปลูกด้วยไอเคมี (Chemical Vapor Deposition (CVD))	18
2.5 กลไกการเกิดคาร์บอนนาโนทิวส์	23
2.5.1 Root Growth	23
2.5.2 Tip Growth	24

สารบัญ (ต่อ)

2.6 เครื่องมือวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์	25
2.6.1 การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)	26
2.6.2 การวิเคราะห์ธาตุด้วยระบบ Energy Dispersive X-ray (EDX)	30
2.6.3 การวิเคราะห์คุณภาพของธาตุด้วยเทคนิค Raman spectroscopy	32
2.7 หลักการพื้นฐานของคาร์บอนนาโนทิวบ์สำหรับเซนเซอร์เคมี	36
2.8 แก๊สเซนเซอร์ (Gas sensor)	38
2.8.1 ธรรมชาติของแก๊สและคุณสมบัติทั่วไป	38
2.8.2 โมเลกุลและไอออน (Molecules and Ions)	38
2.8.3 กฎการรั่วไหลและการแพร่กระจายของแกรแฮม	39
2.8.4 แก๊สที่มีความสำคัญต่อมนุษย์	39
2.8.5 หลักการตรวจวัดแก๊สแบบต่างๆ	42
บทที่ 3 กระบวนการสร้างและเทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ที่เกี่ยวข้องในการ สร้างฐานรอง	62
3.1 การทำความสะอาดแผ่นซิลิคอน	63
3.2 การสร้างชั้นฉนวนด้วยวิธีออกซิเดชัน (Oxidation)	63
3.3 การเคลือบโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา(Catalyst)และทำขั้วไฟฟ้าโดยการสปีดเตอริง	64
3.4 การสร้างลวดลายโดยใช้หน้ากากป้องกัน	66
บทที่ 4 กระบวนการสร้างฐานรองและผลการสร้างฐานรอง	69
4.1 การทำความสะอาดแผ่นซิลิคอน	69
4.2 การสร้างชั้นฉนวนหรือชั้นซิลิคอนไดออกไซด์โดยการออกซิเดชัน	69
4.3 การเคลือบโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีสปีดเตอริง	71
4.4 การทำขั้วไฟฟ้าทองแดงโดยการสปีดเตอริง	72
บทที่ 5 กระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์และผลการสังเคราะห์	79
5.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการสังเคราะห์	79
5.2 ขั้นตอนการสังเคราะห์	80
บทที่ 6 การทดลองนำคาร์บอนนาโนทิวบ์ไปประยุกต์เป็นเซนเซอร์เคมีและผลการทดลอง	93
6.1 การต่อขั้วไฟฟ้าเพื่อใช้วัดความต้านทาน	94
6.2 การทดลองตรวจวัดแก๊ส	95

สารบัญ (ต่อ)

6.2.1 การนำไปทดลองตรวจวัดไอระเหยของเอทานอล	96
6.2.2 การนำไปทดลองตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจน (ทดลองเบื้องต้น)	99
6.3 ผลการทดลองการตรวจวัดแก๊ส	101
6.3.1 ผลการทดลองตรวจวัดไอระเหยของเอทานอลที่อุณหภูมิห้อง	101
6.3.2 ผลการทดลองตรวจวัดไอระเหยของเอทานอลโดยการให้ความร้อนในระบบ	119
6.3.3 ผลการตอบสนองของตัวตรวจวัดจากการเพิ่ม ลดอัตราการไหล	123
6.3.4 ผลการทดลองตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจน	127
6.4 ชนิดรอยสัมผัสและความต้านทานรอยสัมผัสระหว่างคาร์บอนนาโนทิวบ์กับโลหะ	129
6.5 การนำอุปกรณ์ตรวจวัดมาประกอบเป็นวงจรเพื่อนำไปประยุกต์ใช้	131
บทที่ 7 สรุปผลการทดลอง	132
บรรณานุกรม	137
ผนวก ก	140
ผนวก ข	146
ผนวก ค	172

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงคุณสมบัติของคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังเดี่ยว เปรียบเทียบกับวัสดุอื่น	12
2.2 แสดงค่า Resolution สำหรับอุปกรณ์ต่างๆ	26
2.3 เปอร์เซ็นต์ปริมาตรของแก๊สหลายๆชนิดในอากาศที่สะอาดและแห้ง	38
2.4 การแยกคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (The Electromagnte Spectrum)	50
2.5 ความยาวคลื่นต่ำสุดที่สามารถใช้ได้สำหรับสารละลายทั่วไป	52
2.6 สถานะการทำงานของตัวเซนเซอร์แก๊สแบบฟิล์มหนาของไซเมริก	55
2.7 ตัวอย่างของคุณลักษณะจำเพาะของตัวเซนเซอร์แก๊สรุ่นต่างๆ ของยี่ห้อ HEIMANN	58
4.1 แสดงค่าความต้านทานของฐานรอง	77
5.1 แสดงข้อมูลต่างๆ ในการสังเคราะห์	84
5.2 แสดงกำลังงานและเวลาในขณะที่เกิดฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์เ้มลวดลายตามที่ต้องการ	85
5.3 แสดงค่าความต้านทานก่อนสังเคราะห์เปรียบเทียบกับค่าความต้านทานหลังการสังเคราะห์	91
5.4 แสดงค่าความต้านทานหลังสังเคราะห์เปรียบเทียบกับเวลาในการสังเคราะห์และกำลังงาน	92
6.1 แสดงการเปรียบเทียบค่าความต้านทานก่อนการสังเคราะห์ หลังการสังเคราะห์และหลังการต่อขั้ว	94
6.2 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของแผ่นตัวอย่าง กรณีไม่มีการอบฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวก่อนการตรวจวัด	104
6.3 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของแผ่นตัวอย่าง กรณีอบฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวก่อนการตรวจวัดด้วยอุณหภูมิ 50 องศา 25 นาที	108
6.4 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของแผ่นตัวอย่าง กรณีอบฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวก่อนการตรวจวัดด้วยอุณหภูมิ 70 องศา 25 นาที	111
6.5 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของแผ่นตัวอย่าง กรณีอบฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวก่อนการตรวจวัดด้วยอุณหภูมิ 85 องศา 25 นาที	114
6.6 แสดงการเปรียบเทียบแต่ละแผ่นตัวอย่าง	115
6.7 แสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยคุณสมบัติต่างๆ ของเซนเซอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ	118
6.8 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของแผ่นตัวอย่าง กรณีให้ความร้อนในระบบวัด	121

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	5
2.2	6
2.3	6
2.4	7
2.5	8
2.6	9
2.7	10
2.8	11
2.9	11
2.10	14
2.11	15
2.12	16
2.13	17
2.14	18
2.15	19
2.16	20
2.17	20
2.18	21
2.19	23
2.20	24
2.21	25
2.22	27
2.23	30
2.24	31
2.25	32
2.26	33
2.27	34
Scattering	

สารบัญรูป (ต่อ)

2.28	กราฟรามานที่ได้จากคาร์บอนนาโนทิวบ์	35
2.29	แสดงการกระจายของอิเล็กตรอนบนระนาบแผ่นกราฟีนที่ผนังท่อคาร์บอนนาโนทิวบ์	36
2.30	แสดงโมเดลการยึดเกาะโมเลกุลของแก๊สจำนวน 3 โมเลกุล กับ SWCNT	36
2.31	แสดงความสัมพันธ์ของพลังงานการยึดเหนี่ยวกับระยะทางการยึดเหนี่ยวโมเลกุลของแก๊สกับคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังเดี่ยว	37
2.32	หลักการวัดค่าออกซิเจนที่ถูกละลายแบบเซลล์ของคลาร์ก	43
2.33	หลักการวัดค่าออกซิเจนแบบเวอร์โคเนีย	44
2.34	แสดงตัวอย่างของส่วนประกอบภายในหัวของเซนเซอร์แก๊ส	46
2.35	ตัวอย่างของหัวเซนเซอร์วัดค่าออกซิเจน	46
2.36	หลักการวัดออกซิเจนแบบลูกตุ้มแกว่ง	47
2.37	แสดงหลักการวัดแก๊สแบบใช้รังสีอินฟราเรด	53
2.38	เซนเซอร์แก๊ส	54
2.39	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ในการส่งผ่านแก๊สต่อความยาวคลื่นที่ได้จากสเปกตรัมแก๊สบางอย่าง	55
2.40	ตัวเซนเซอร์แบบฟิล์มหนา	56
2.41	ความสัมพันธ์ระหว่างความไวในการเปลี่ยนค่าความต้านทานของเซนเซอร์แก๊สแบบฟิล์มหนาต่อความเข้มข้นของแก๊สที่ปริมาณต่างๆ	57
2.42	ตัวอย่างของวงจรตรวจจับการรั่วของแก๊ส LP	59
2.43	การวัดแก๊สในกระบวนการแบบโครมาโตกราฟ	60
2.44	การแยกส่วนประกอบของแก๊สในกระบวนการโครมาโตแกรม	61
3.1	โพลีคาร์บอเนตการสร้างฐานรอง	63
3.2	แผ่นซิลิคอนขนาด 2.5 ซม. x 2.5 ซม.	63
3.3	หลังจากการออกซิเดชัน ได้ชั้นออกไซด์หนาประมาณ 5000 อังสตรอม	64
3.4	การเคลือบโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา (นิกเกิล)	64
3.5	แสดงส่วนสำคัญต่างๆของเครื่อง SPE - 210 ไดโอดสปีดเตอร์	65
3.6	รูปแบบของฐานรองที่เสร็จสมบูรณ์ รูป ก โครงสร้าง 1 รูป ข โครงสร้าง 2	66
3.7	การสร้างทวดลายด้วยวิธีหน้ากากป้องกัน	67
3.8	ภาพถ่ายด้วย SME แสดงฐานรองบริเวณที่เคลือบด้วยนิกเกิลโดยวิธีหน้ากากป้องกัน	68

สารบัญรูป (ต่อ)

3.9	ภาพถ่ายจาก SME ของคาร์บอนนาโนทิวป์ตรงบริเวณขอบเขตของลวดลายวงกลม	68
4.1	แผ่นซิลิคอนขนาด 2.5 x 2.5 ซม. หลังการทำความสะอาด	69
4.2	แผ่นซิลิคอนก่อนและหลังการออกซิเดชัน	70
4.3	เครื่องออกซิเดชันด้วยความร้อน	71
4.4	ฐานรองก่อนและหลังเคลือบโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา (นิเกิล) แบบกลุ่มก้อน	72
4.5	ภาพขยายหน้าฉากที่ใช้ในการสปีดเตอร์ข้าวไฟฟ้า	73
4.6	ภาพหน้าฉากที่ใช้ในการสปีดเตอร์ข้าวไฟฟ้าโครงสร้างที่ 1	73
4.7	ภาพหน้าฉากที่ใช้ในการสปีดเตอร์ข้าวไฟฟ้าโครงสร้างที่ 2	74
4.8	ฐานรองก่อนและหลังการสปีดเตอร์ข้าวไฟฟ้าโครงสร้างที่ 1	74
4.9	ฐานรองก่อนและหลังการสปีดเตอร์ข้าวไฟฟ้าโครงสร้างที่ 2	75
4.10	ภาพถ่ายของฐานรองที่เสร็จสมบูรณ์แล้ว	75
4.11	เครื่อง SPE - 210 ไดโอดสปีดเตอร์	76
5.1	โพลีเมอร์ที่แสดงขั้นตอนการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์	80
5.2	แสดงการไล่อากาศภายในระบบโดยใช้แก๊สไฮโดรเจนเป็นเวลา 15 นาที	81
5.3	ให้สารแหล่งจ่ายคาร์บอนแก่ระบบโดยการปรับวาล์ว 2 ใช้เวลา 10 นาที	82
5.4	ให้ความร้อนแก่ชุดลวด	83
5.5	เครื่องสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ แบบ HF-CVD	87
5.6	ภาพถ่ายแสดงฐานรองก่อนการสังเคราะห์และหลังการสังเคราะห์	88
5.7	ภาพถ่าย SEM ของฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวป์ที่ใช้สารแหล่งจ่ายเป็นเอทานอล และโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นนิเกิล	88
5.8	ภาพจาก EDX แสดงถึงองค์ประกอบของธาตุบนฐานรองซิลิคอนที่เคลือบด้วยนิเกิลก่อนการสังเคราะห์	89
5.9	ภาพจาก EDX แสดงถึงองค์ประกอบของธาตุบนฐานรองซิลิคอนที่เคลือบด้วยนิเกิลหลังการสังเคราะห์	89
6.1	แสดงรายละเอียดการต่อหัวออกไปใช้งาน	94
6.2	แสดงระบบที่ใช้ในการตรวจวัดแก๊ส	96
6.3	การไล่อากาศออกจากครอบแก้ว	97
6.4	เปิดวาล์ว 2 เพื่อให้ไอระเหยของเอทานอล	97

สารบัญรูป (ต่อ)

6.33	กราฟแสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัดไอระเหยเอทานอลแผ่นตัวอย่างที่ 8	120
6.34	กราฟแสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัดไอระเหยเอทานอลแผ่นตัวอย่างที่ 9	120
6.35	กราฟแสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัดไอระเหยเอทานอลแผ่นตัวอย่างที่ 16	121
6.36	กราฟแสดงคุณลักษณะของเซนเซอร์คาร์บอนมอนอกไซด์	123
6.37	กราฟแสดงคุณลักษณะของแก๊สเซนเซอร์ อัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงความต้านทานต่อความเข้มข้นของแก๊ส	124
6.38	กราฟคุณลักษณะของแก๊สเซนเซอร์ แสดงผลของอุณหภูมิ	124
6.39	แสดงผลการตอบสนองของแก๊สเซนเซอร์ต่อการเพิ่มอัตราการไหล	125
6.40	แสดงผลผลการทดลองวัดในกระบวนการวัดที่เหมาะสม	126
6.41	แสดงผลผลการทดลองวัดในกระบวนการวัดที่เหมาะสม (2)	127
6.42	กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงความต้านทานตามเวลาในการตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจน	128
6.43	กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงความต้านทานตามเวลาในการตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจน	128
6.44	กราฟคุณลักษณะ I – V ของตัวตรวจวัดแก๊ส	130
6.45	วงจรแก๊สเซนเซอร์แสดงผลด้วยไดโอดเปล่งแสง	131
ก.1	แผ่นตัวอย่างที่ 16 ตรวจวัดเอทานอลอุณหภูมิ ต่ำกว่า 0 องศาเซลเซียส	141
ก.2	แผ่นตัวอย่างที่ 8 ตรวจวัด อะซิโตน อุณหภูมิ ต่ำกว่า 0 องศาเซลเซียส	142
ก.3	แผ่นตัวอย่างที่ 8 ตรวจวัด อะซิโตน ทดลองที่อุณหภูมิห้อง	142
ก.4	แผ่นตัวอย่างที่ 8 ตรวจวัด อะซิโตน ทดลองที่อุณหภูมิห้องและมีการให้ความร้อนในระบบวัด	143
ก.5	แผ่นตัวอย่างที่ 8 ตรวจวัด อะซิโตน ทดลองที่อุณหภูมิห้องและมีการให้ความร้อนในระบบวัด	143
ก.6	แผ่นตัวอย่างที่ 16 ตรวจวัด อะซิโตน ทดลองที่อุณหภูมิห้อง	144
ก.7	แผ่นตัวอย่างที่ 16 ตรวจวัด อะซิโตน ทดลองที่อุณหภูมิห้องและมีการให้ความร้อนในระบบวัด	144
ก.8	แผ่นตัวอย่างที่ 16 ตรวจวัด อะซิโตน ทดลองที่อุณหภูมิห้องและมีการให้ความร้อนในระบบวัด	145

บทที่ 1

บทนำ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีได้ถูกพัฒนา ก้าวหน้าไปถึงการงานที่เล็กมากๆ ในระดับนาโนเมตร ที่เรียกว่านาโนเทคโนโลยี ซึ่งเข้าไปมีบทบาทในการสร้างหรือพัฒนาสิ่งของเครื่องใช้ให้ดีขึ้นและตรงตามความต้องการมากยิ่งขึ้น รวมถึงเข้าไปพัฒนาเครื่องมือต่างๆ ในการปฏิบัติงาน ดังเช่น อุปกรณ์ที่มีความสามารถในการรับรู้แทนประสาทสัมผัสของมนุษย์ เครื่องป้องกันอันตรายต่างๆ ที่อาจก่อให้เกิดอันตราย เช่นแก๊สพิษและสารเคมีต่างๆ ในโรงงานอุตสาหกรรมหรือห้องปฏิบัติการวิจัย โดยสร้างจากวัสดุในระดับนาโนที่มีคุณลักษณะที่เหมาะสมกับงาน

คาร์บอนนาโนทิวป์เป็นวัสดุนาโน ที่ได้รับความสนใจ มีคุณสมบัติที่โดดเด่นหลายประการ คุณสมบัติประการหนึ่งคือ สามารถตอบสนองโดยมีการเปลี่ยนแปลงความนำไฟฟ้าของคาร์บอนนาโนทิวป์เมื่อทำปฏิกิริยากับ โมเลกุลของแก๊สหรือไอระเหยของสารเคมี ได้อย่างฉับไว ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นเซนเซอร์เคมี

ปริญญานิพนธ์นี้มีจุดประสงค์เพื่อสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดแก๊ส ซึ่งสร้างจากคาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีซีวีดีแบบขดลวดความร้อน บนฐานรองซิลิคอนไดออกไซด์ โดยมีความหนาชั้นออกไซด์ประมาณ 5000 อังสตรอม สร้างชั้นออกไซด์จากกระบวนการออกซิเดชันด้วยความร้อน ใช้หนักเป็นโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา สร้างโดยกระบวนการสปีดเตอริง ใช้ขั้วไฟฟ้าเป็นทองแดงสร้างโดยกระบวนการสปีดเตอริง ใช้เอทานอลเป็นสารแหล่งจ่ายคาร์บอน โดยใช้แก๊สไฮโดรเจนเป็นสารนำพาไอระเหยของเอทานอลเข้าสู่ระบบ มีอัตราส่วนไอระเหยของเอทานอลต่อแก๊สไฮโดรเจน โดยปริมาตรประมาณร้อยละ 10 โดยใช้อัตราการไหลของแก๊สนำพา คือแก๊สไฮโดรเจน 100 cc/min และใช้อัตราการไหลผ่านสารแหล่งจ่ายคาร์บอนคือเอทานอลประมาณ 10 cc/min สังเคราะห์ที่ความดันบรรยากาศ ต่อบนอุปกรณ์ตรวจวัดแก๊สที่สังเคราะห์ได้ ไปทดลองตรวจวัดไอระเหยของเอทานอลและแก๊สไฮโดรเจน โดยจะศึกษาถึงผลของอุณหภูมิในระบบวัด การให้ความร้อน (อบ) ตัวตรวจวัดแก๊สที่อุณหภูมิต่างๆ กัน ก่อนนำเข้าสู่ระบบวัด รวมถึงผลพื้นที่ของคาร์บอนนาโนทิวป์ในการตรวจจับแก๊ส การทดลองตรวจวัดแก๊ส จะกระทำในบรรยากาศภายในครอบแก้วเป็นแก๊สไนโตรเจน สุดท้ายอุปกรณ์ตรวจวัดหรือฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์ได้ จะถูกนำไปวิเคราะห์ลักษณะด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope) วิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วยระบบ Energy Dispersive X – ray

บทที่ 2

นาโนเทคโนโลยี การบอนนาโนทิวส์และเครื่องมือวิเคราะห์

2.1 นาโนเทคโนโลยี

นาโนเทคโนโลยีเป็นวิทยาการสมัยใหม่ที่มีความก้าวหน้าอย่างรวดเร็ว เกิดจากการบรรจบรวมของศาสตร์หลายสาขา เช่น อิเล็กทรอนิกส์ ฟิสิกส์ เคมี ชีววิทยาและวัสดุศาสตร์ แต่เป็นภาคที่เกี่ยวข้องในระดับนาโนเมตร ในช่วง 0.1-100 นาโนเมตร

การสร้างสร้งงานในระดับนาโนเมตรนั้น ต้องอาศัยความรู้และจินตนาการที่ลึกซึ้ง เพราะต้องนึกคิดถึงโครงสร้างของวัสดุในขนาดจิ๋ว หรือ จุลวิจุณ นั่นคือ ต้องรู้จักอะตอม โมเลกุลและโครงสร้างของสสารต่างๆ เป็นอย่างดี และเครื่องมือที่ใช้ต้องมีความแม่นยำสูงมากๆ จึงจะตรวจผลงานนาโนเทคโนโลยีได้

“นาโน”เป็นภาษากรีกโบราณแปลว่า “คนแคระ” นาโนมักใช้ประกอบในหน่วยมาตรวัดต่างๆ โดยมีขนาดเท่ากับ พันล้านส่วน (สิบยกกำลังลบเก้า) เช่น 1 นาโนเมตร มีปริมาณเท่ากับ 1 ใน พันล้านส่วนของเมตร ดังนั้น นาโนเทคโนโลยีจึงหมายถึง เทคโนโลยีที่มีขนาดเล็กมาก ในระดับเป็นพันล้านส่วน ซึ่งอยู่ในระดับของอะตอมของสสารต่างๆ

นักวิทยาศาสตร์ทราบกันมานานแล้วว่า ถ่าน ถ่านหิน ใส่ดินสอดำและเพชร นั้นมีองค์ประกอบอย่างเดียวกัน คือ คาร์บอน แต่มีความแตกต่างกันที่โครงสร้าง ที่ทำให้เพชรเป็นสสารที่แข็งที่สุด ขณะที่กราไฟต์ หรือใส่ดินสอดำมีความอ่อน การจัดโครงสร้างของสสารที่ไม่เหมือนกันทำให้ชิปของคอมพิวเตอร์ (computer chip) แตกต่างจากทรายชายหาด ทั้งๆที่เป็นซิลิคอนธาตุเดียวกันและแม้แต่ในธรรมชาติ เซลล์มะเร็งกับเซลล์อวัยวะปกติ ก็มีโครงสร้างของเซลล์เหมือนกัน ต่างกันแต่เฉพาะการจัดเรียงอะตอมบางส่วนเท่านั้น

จากฐานความคิดดังกล่าวข้างต้น ทำให้นักวิทยาศาสตร์ หันมามองโมเลกุล หรืออนุภาคในขนาดใหญ่กว่าธาตุ อาจมองเห็นได้ว่า น้ำมันเบนซิน หรือน้ำมันดีเซล ก็เป็นสารกลุ่ม “ไฮโดรคาร์บอน” เช่นกัน จึงเป็นเหตุให้มีการคิดค้นเพิ่มเติม ทำให้มีการผลิตแก๊สโซฮอลและไบโอดีเซลขึ้นได้

ดีเอ็นเอ (DNA) ที่เป็นรหัสพันธุกรรมของสิ่งมีชีวิต ก็จัดเป็นโมเลกุลขนาดใหญ่ แต่อยู่ในระดับนาโน เป็นตัวบ่งชี้ถึงความมหัศจรรย์ของธรรมชาติ เพราะจากเซลล์เล็กๆของมนุษย์นั้นมีความแตกต่างกันไปทุกรูปนามและทำให้เกิดแนวทาง ผลิตสายพันธุ์สิ่งมีชีวิตใหม่ ที่คัดเฉพาะส่วนที่ดีไว้ ที่เรียกว่าการตัดต่อยีน (GMD)

องค์ความรู้ที่ประมวลมาเป็น “นาโนเทคโนโลยี” มิใช่เกิดมาชั่วข้ามคืนแต่สร้างสมประสบการณ์จากวิทยาการเดิม ในสาขาวิชาต่างๆ และนำมาทบทวนเป็นระบบ โดยเน้นเฉพาะเรื่องที่เกี่ยวข้องกับมิติระดับนาโนเมตร ดังนั้นวิทยาการนาโนเทคโนโลยีจึงเป็นเวทีที่เปิดกว้างสำหรับนักวิทยาศาสตร์และผู้ทำงานในแวดวงเทคโนโลยีสาขาต่างๆ สร้างนวัตกรรมใหม่ในระดับนาโนได้

2.1.1 กำเนิดของนาโนเทคโนโลยี

นาโนเทคโนโลยี เกิดขึ้นที่ห้องแล็บของซีร็อกซ์ ที่ชื่อว่า PARC (Xerox's Palo Alto Research Center) ซึ่งเป็นแหล่งต้นกำเนิด ของเทคโนโลยีที่ก้าวหน้าด้านต่างๆ ของโลกในปัจจุบัน โมเสค (Mosaic) ซึ่งต่อมากลายเป็น เนทสเคป (Netscape) ก็เป็นตัวอย่างหนึ่ง โดยย้อนกลับไปเมื่อปี พ.ศ. 2519 นาย Ralphe Merkle กับบัณฑิตจากสแตนฟอร์ดจำนวนหนึ่งพัฒนาเทคโนโลยีเข้ารหัสในคอมพิวเตอร์ ที่ต่อมาชื่อ ปริตตี้กู๊ด ไพรวาซี (Pretty Good Privacy) ขึ้น ขณะเดียวกันก็ใช้เวลาว่างจำลองสิ่งต่างๆ ในระดับโมเลกุลขึ้นมาโดยคิดว่าอุตสาหกรรมควรสร้างสิ่งต่างๆ มาจากระดับโมเลกุล เพื่อให้ได้สิ่งที่ถูกต้องสมบูรณ์ อาทิ เครื่องมือผ่าตัดในปัจจุบันมีขนาดใหญ่เกินไป ถ้าเราสามารถสร้างเครื่องมือที่มีขนาดเท่าโมเลกุล สามารถตัดสินใจเองได้ ด้วยคอมพิวเตอร์ระดับโมเลกุลจะทำให้เราฉีกเข้าไปในร่างกาย เพื่อรักษาโรคมะเร็ง หม่าแบคทีเรีย ไวรัสหรือกำจัดไขมันอุดตันในเส้นเลือดได้แต่ความจริงความคิดนี้ได้ ถูกเผยแพร่มาตั้งแต่ปี พ.ศ.2502 แล้วโดยนักวิทยาศาสตร์ ชื่อ Richard P. Feynman แต่ใช้คำว่า Minimanufacturing ยิ่งกว่านั้น ในปี พ.ศ.2532 สถาบันโฟร์ไซท์ (Foresight Institute) ได้ตัดสินใจมุ่งเน้นวิจัยนาโนเทคโนโลยีอย่างจริงจังซึ่งสร้างความสงสัยและได้รับคำเยาะเย้ยจากผู้ที่ยังมองภาพไม่ออกพอสมควร แต่ทันทีที่เปิดสัมมนาขึ้นกลับมีนักวิทยาศาสตร์จากทั่วโลก เข้าร่วมกว่า 300 คน และในปี พ.ศ.2534 มีการค้นพบคาร์บอนนาโนทิวบ์ ซึ่งคาดว่าจะสามารถนำมาทำอุปกรณ์ต่างๆ ได้ในอนาคตอันใกล้นี้ ทำให้นาโนเทคโนโลยีได้รับความสนใจจากบุคคลทั่วไป และสื่อต่างๆ มากขึ้น

2.1.2 ประโยชน์ของนาโนเทคโนโลยี

นาโนเทคโนโลยีเป็นเทคโนโลยีจากในหลากหลายสาขารวมเข้าด้วยกัน ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้ในงานทางวัสดุศาสตร์ (nanomaterials) อิเล็กทรอนิกส์ (nanoelectronics) และวิทยาศาสตร์ชีวภาพ (nanobiotechnology) ก่อให้เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ๆ ที่ได้รับการออกแบบและควบคุมตั้งแต่การจัดเรียง อะตอมหรือโมเลกุล ไปจนกลายเป็นชิ้นส่วนขนาดใหญ่ ตัวอย่างหนึ่งของ nanomaterial ซึ่งปัจจุบันกำลังเป็นที่สนใจคือ "คาร์บอนนาโนทิวบ์ (Carbon nanotube)" มีรูปร่างเป็นโครงตาข่ายของคาร์บอน ม้วนเชื่อมติดกันเป็นรูปทรงกระบอก

และมีเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงไม่กี่นาโนเมตร สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้อย่างกว้างขวาง เช่น ใช้เป็นสายไฟจิ๋วในเครื่องใช้ไฟฟ้า (nano wire) ใช้ทอเป็นเส้นใยที่มีความละเอียดสูงและทนทานกว่าไหมเทียม เป็นต้น

ตัวอย่างทางด้าน nanoelectronics เช่น การผลิตเป็น ชิปความจำ (memory chip) ที่ใช้โมเลกุลของสารเป็นทรานซิสเตอร์ แทนที่จะเป็นซิลิคอนทรานซิสเตอร์ ดังที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน หรือแม้กระทั่งการผลิตหุ่นยนต์จิ๋วที่มีขนาดเท่าเม็ดเลือดแดง ซึ่งสามารถเข้าไปรักษาโรค ทำลายไขมันที่อุดตันในเส้นเลือด หรือมะเร็งเนื้อร้ายในจุดที่เราต้องการได้ โดยไม่ต้องใช้การผ่าตัดแต่อย่างใด เป็นต้น

ส่วนประโยชน์ที่ได้จาก nanobiotechnology ที่เห็นได้ชัดเจนและคาดว่าจะมีอิทธิพลต่อการดำรงชีวิตของเราเป็นอย่างมาก คงได้แก่เทคโนโลยีทางการแพทย์และยา เช่น การทำวิศวกรรมเนื้อเยื่อ (tissue engineering) เพื่อสร้างอวัยวะ (เนื้อเยื่อหรือกระดูก) ขึ้นมาทดแทน อวัยวะส่วนที่เสื่อมสภาพไป การผลิตยาที่สามารถทำการรักษาเฉพาะจุด (drug target) เพื่อลดปัญหาการดื้อยา และผลข้างเคียงของยา การผลิต เซนเซอร์ชีวภาพ (biosensor) ที่สามารถวัดปริมาณสารต่างๆ ในเลือด ในปัสสาวะ หรือในสภาพแวดล้อมได้อย่างฉับไว หรือการผลิต "ดีเอ็นเอชิพ" ซึ่งจะใช้ร่วมกับข้อมูลชีวสารสนเทศ (bioinformatics) เพื่อตรวจหาชิ้นที่ผิดปกติซึ่งอาจก่อให้เกิดโรคในอนาคต หรือเพื่อใช้เป็นข้อมูลพันธุกรรมพื้นฐานส่วนบุคคลในการรักษาพยาบาลยามเจ็บไข้ได้ป่วย ซึ่ง แพทย์จะสามารถสั่งยาที่ตอบสนองต่อร่างกายของผู้ป่วย ได้อย่างถูกต้อง และมีประสิทธิภาพ

2.1.3 นาโนเทคโนโลยีในประเทศไทย

กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ได้ดำเนินงานจัดตั้งหน่วยงาน “ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ” ขึ้นภายใต้สังกัดสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ โดยคณะรัฐมนตรีได้ให้ความเห็นชอบแล้ว เมื่อวันที่ 13 สิงหาคม 2545 และมีวัตถุประสงค์ที่จะพัฒนานาโนเทคโนโลยี 3 สาขาหลัก ได้แก่

1. นาโนเทคโนโลยีชีวภาพ เช่น การพัฒนาอุปกรณ์รับรู้ชีวภาพ (biosensor) การสร้างเครื่องส่งยารักษาโรคผ่านระบบท่อนาโน (nanotubes) การวิจัย ปรับปรุงโครงสร้างระดับโมเลกุลของยารักษาโรค
2. นาโนอิเล็กทรอนิกส์ (nano-electronics) เช่น การพัฒนาเครื่องจักรกล การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ และเซลล์เชื้อเพลิง

3. วัสดุนาโน (nanomaterials) เช่น การพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาในอุตสาหกรรม การพัฒนาฟิล์มนาโนคอมโพสิต การผลิตจุลเมมเบรน และการผลิตเจลเพื่อใช้ในกิจการแพทย์และอุตสาหกรรมครีมนันแคคและเครื่องสำอาง

2.2 ธาตุคาร์บอน

2.2.1 คุณลักษณะของธาตุคาร์บอน

ธาตุคาร์บอนเป็นธาตุในหมู่ 4 ของตารางธาตุ มีการจัดเรียงอิเล็กตรอน 2s, 2s, 2p มีหลายไอโซโทป ไอโซโทปที่พบมากที่สุดคือ C12 มีคุณสมบัติคือ มีจุด Melting Point 3550 องศาเซลเซียส มีความหนาแน่น (Density) 2.25 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

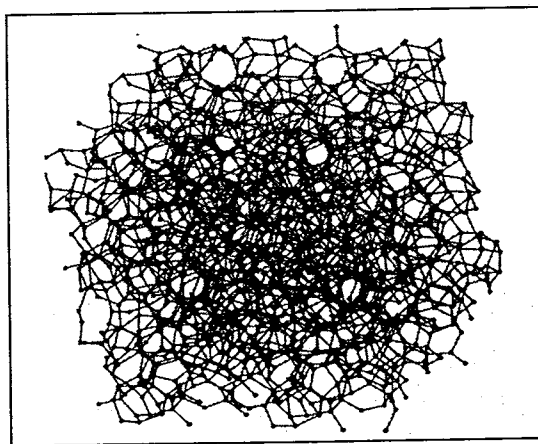
คาร์บอน (Carbon) เป็นธาตุหลักหนึ่งในสี่แห่งสิ่งมีชีวิต (ธาตุที่เป็นองค์ประกอบพื้นฐานของสิ่งมีชีวิตบนโลกคือ ไฮโดรเจน คาร์บอน ไนโตรเจนและออกซิเจน) สิ่งมีชีวิตทุกชนิดบนโลก ถือได้ว่าเป็นสิ่งมีชีวิตในรูปแบบ Carbon-Based คือ มีคาร์บอนเป็นพื้นฐานของชีวิต หรือโมเลกุลที่เป็นสารอินทรีย์ทุกชนิดนั้น มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ นอกจากนี้ คาร์บอนยังมีอยู่ในอาหารที่รับประทาน เสื้อผ้าที่สวมใส่ น้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้กับรถยนต์และในสิ่งอื่นๆ อีกมากมาย ที่กล่าวมานี้เป็นเพียงบทบาทบางส่วนของคาร์บอนเท่านั้น เมื่ออยู่ในสภาพคาร์บอนบริสุทธิ์

2.2.2 โครงสร้างของคาร์บอน

คาร์บอนมีโครงสร้าง 4 แบบ ดังนี้

2.2.2.1 อัญฐาน (Amorphous Carbon)

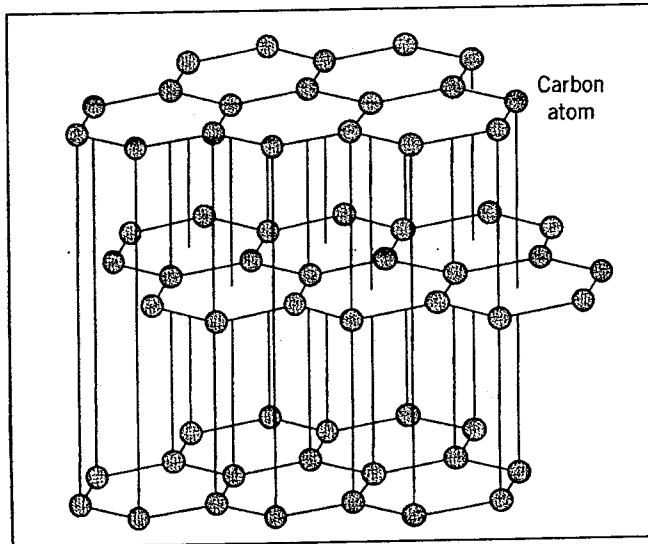
มีลักษณะการจัดเรียงตัวของอะตอมที่ไม่มีรูปแบบที่แน่นอน อะตอมมีการจัดเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ ไม่ซ้ำรูปแบบ เช่น เหมะควัน โดยทั่วไป มีลักษณะดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 อัญฐานของคาร์บอน (Amorphous carbon)

2.2.2.2 โครงสร้างแบบกราไฟต์ (Graphite)

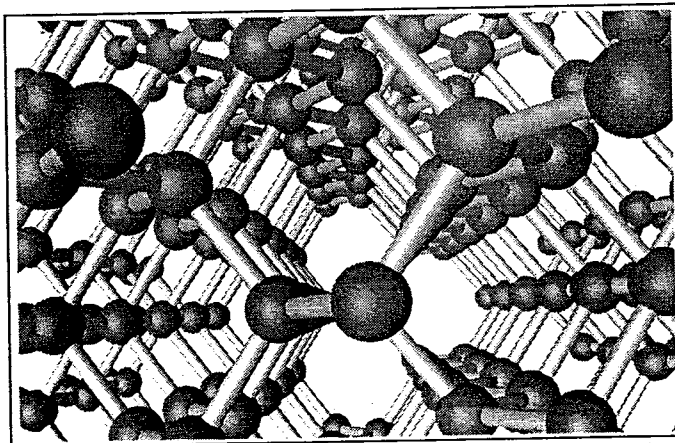
เป็นโครงสร้างที่ประกอบด้วยคาร์บอนเชื่อมต่อกันเป็นรูปหกเหลี่ยมซ้อนกันเป็นแผ่น เรียกว่าแผ่นกราฟีน (Grapheme) ซ้อนกันเป็นชั้นๆ เนื่องจากพันธะในแผ่นกราฟีนมีพันธะที่แข็งแรงมากแต่พันธะในระหว่างชั้นเป็นพันธะที่ไม่แข็งแรงแผ่นกราฟีนในแต่ละชั้นจึงสามารถเลื่อนไปมาได้



รูปที่ 2.2 โครงสร้างแบบกราไฟต์ (Graphite)

2.2.2.3 โครงสร้างแบบเพชร (Diamond)

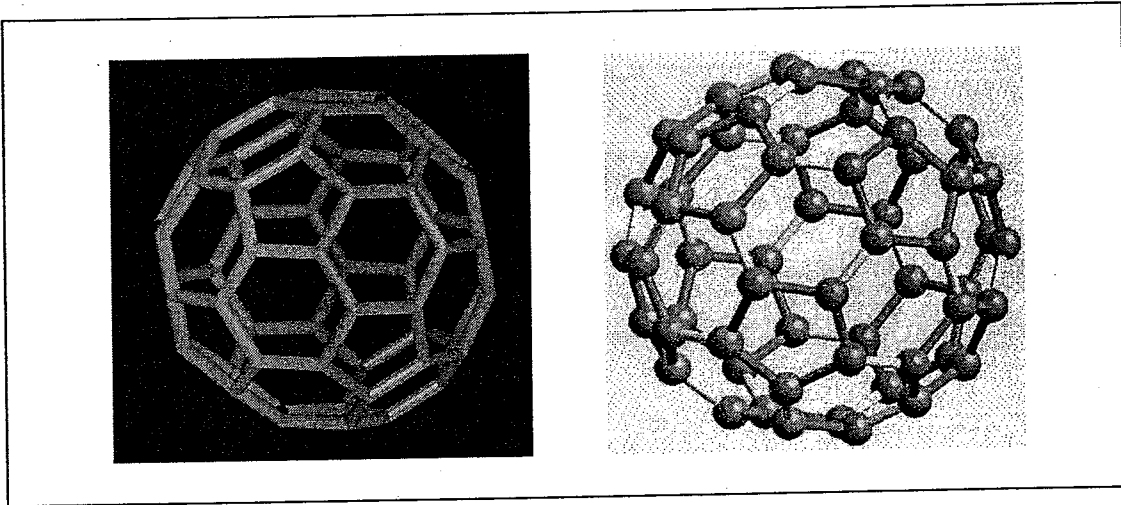
เพชรเป็นโครงสร้างที่มีความแข็งแรงมากที่สุด โครงสร้างแบบเพชรจะมีคาร์บอนเกาะเกี่ยวกันแน่นเป็นรูปทรง 3 มิติ



รูปที่ 2.3 โครงสร้างแบบเพชร (Diamond)

2.2.2.4 โครงสร้างแบบบัคมิสเตอร์ฟูลเลอร์ีน (Buckminster Fullerene)

เรียกอีกชื่อว่า บัคกี้บอล (Bucky Ball) เป็นโครงสร้างที่เพิ่งค้นพบไม่นานนี้ ประกอบด้วยคาร์บอนจำนวน 60,70 หรือ 80 อะตอม (C₆₀,C₇₀,C₈₀) ต่อกันเป็นทรงกลมเหมือนลูกฟุตบอล



รูปที่ 2.4 โครงสร้างแบบบัคมิสเตอร์ฟูลเลอร์ีน (Buckminster Fullerene)

โครงสร้างอีกแบบหนึ่งของคาร์บอนคือ คาร์บอนนาโนทิวบ์ รายละเอียดในหัวข้อต่อไป

2.3 คาร์บอนนาโนทิวบ์

คาร์บอนนาโนทิวบ์เป็นอีกหนึ่งโครงสร้างของคาร์บอน มีรูปร่างเป็นโครงตาข่ายม้วนตัวเชื่อมติดกันเป็นทรงกระบอก มีเส้นผ่านศูนย์กลางในระดับ 0.1 ถึง 100 นาโนเมตร มีคุณสมบัติที่แข็งแรงและเหนียวกว่าเหล็กกล้า สามารถนำไฟฟ้าหรือเป็นฉนวนก็ได้ ขึ้นอยู่กับทิศทางการจัดเรียงตัวของอะตอม

2.3.1 การค้นพบคาร์บอนนาโนทิวบ์

การค้นพบคาร์บอนนาโนทิวบ์ ค้นพบในปี พ.ศ.2534 เกิดจากความบังเอิญที่ ซุมิโอะ อิจิมา (Sumio Iijima) นักวิจัยจากห้องปฏิบัติการของบริษัท NEC ในญี่ปุ่น ขณะที่กำลังใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนกำลังขยายสูง ตรวจสอบเขม่าที่ได้จากการสังเคราะห์ฟูลเลอร์ีน โดยวิธี Arc-Evaporation แล้วพบว่าที่ขั้วคาโทดเกิดมีวัสดุโครงสร้างแบบกราฟไฟต์ที่เป็นทั้งอนุภาคนาโนและท่อนาโน ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ไม่เคยมีผู้ใดสังเกตเห็นมาก่อน

ต่อมาทีมงานของอิจิมา สามารถสังเคราะห์วัสดุดังกล่าวในปริมาณมาก โดยปรับสภาวะของการทำ Arc-Evaporation ท่อนาโนที่เกิดขึ้นนี้มีลักษณะเป็นท่อกราฟไฟต์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง

3-10 นาโนเมตร และมีความยาวในช่วง 1 ไมโครเมตร เป็นท่อซ้อนกัน 2-50 ชั้น เรียกว่า คาร์บอนนาโนทิวส์แบบหลายผนัง (Multi-Walled Carbon Nanotubes (MWNT))

จากนั้นในปี พ.ศ.2536 อิจิมาและนักวิจัยของบริษัทไอบีเอ็ม ชื่อ ดอน เบทูน (Don Bethune) ได้นำเสนอรายงานวิจัยว่าสามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวส์แบบผนังชั้นเดียวได้ (โดยไม่ได้วิจัยร่วมกันแต่อย่างใด) โดยการเติมโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณเล็กน้อยในระหว่างการสังเคราะห์เพื่อป้องกันการม้วนตัวของแผ่นกราฟีนและป้องกันการเกิดฟูลเลอร์รีนขนาดเล็ก



รูปที่ 2.5 ซุมิโอะ อิจิมา (Sumio Iijima) ชาวญี่ปุ่นผู้ค้นพบคาร์บอนนาโนทิวส์

2.3.2 โครงสร้างและลักษณะการม้วนตัวของคาร์บอนนาโนทิวส์

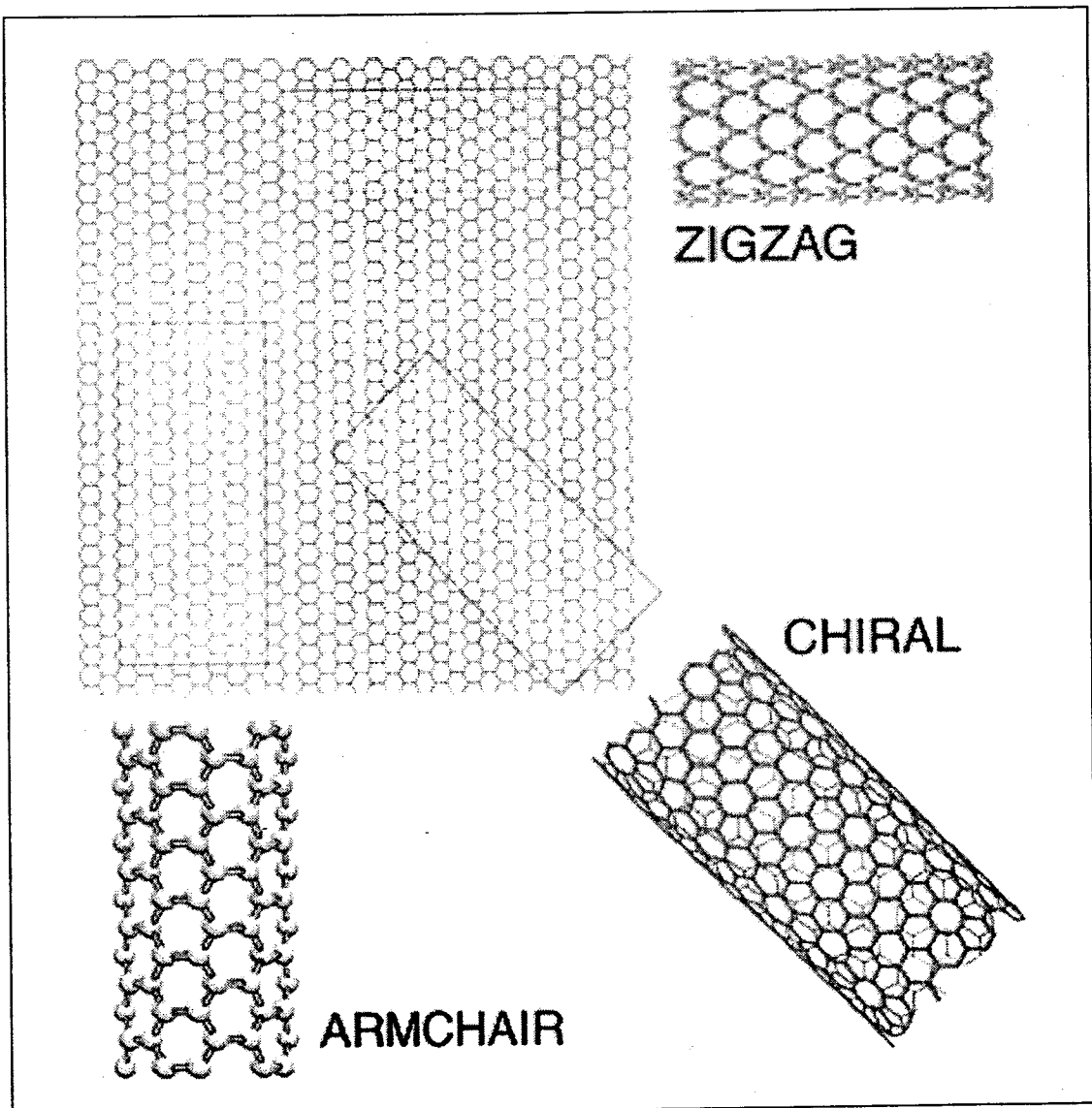
โครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวส์เกิดจากการม้วนตัวของแผ่นกราฟีนเป็นผนังของท่อและมีฝาปิดเป็นครึ่งทรงกลมที่ได้จากฟูลเลอร์เร็นซ์ C₆₀ หรือ C₇₀

การม้วนตัวของแผ่นกราฟีน จะมีการม้วนตัวในทิศทางต่างๆ กัน เพื่อสร้างเป็นทรงกระบอกที่สมมาตร โดยแผ่นจะหมุนจนกระทั่งอะตอมของคาร์บอนมาบรรจบกันโดยเวกเตอร์จากอะตอมแรกไปยังอีกอะตอมหนึ่งเรียกว่า ไชรอลเวกเตอร์ (Chiral vector) ความยาวของไชรอลเวกเตอร์ จะมีขนาดเท่ากับเส้นรอบวงของคาร์บอนนาโนทิวส์ โดยทิศทางของแกนนาโนทิวส์จะตั้งฉากกับไชรอลเวกเตอร์ ไชรอลเวกเตอร์นี้ทำให้คาร์บอนนาโนทิวส์มีคุณสมบัติที่ต่างกันออกไป ตามลักษณะการม้วนตัว เช่นคุณสมบัติทางแสง คุณสมบัติทางกล คุณสมบัติทางไฟฟ้า

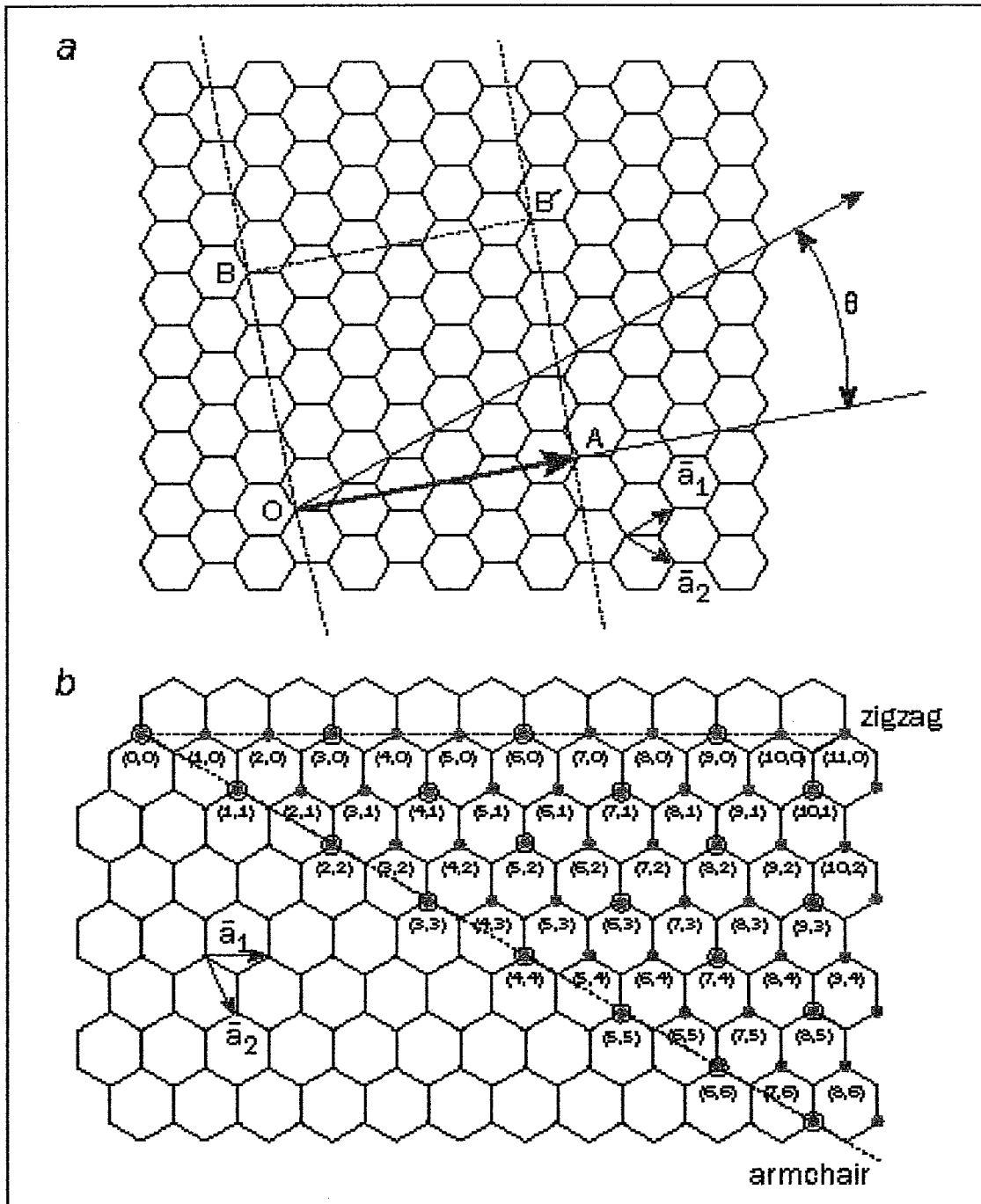
กรณีที่เป็นการม้วนตัวในแนวอน $\theta = 0^\circ$ จะได้ท่อแบบ ซิกแซก (Zig-Zag) ถ้าม้วนตัวทำมุม $\theta = 45^\circ$ จะได้ท่อแบบเก้าอี้วางแขน (Armchair)

สาเหตุที่คาร์บอนนาโนทิวส์มีความแข็งแรงมากมาจากธรรมชาติของการสร้างพันธะระหว่างอะตอมของคาร์บอน ซึ่งเป็นสาเหตุเดียวกับที่เพชรเป็นของที่แข็งที่สุด ในกรณีของเพชร

อะตอมของคาร์บอนมีการเรียงตัวแบบพีระมิดฐานสี่เหลี่ยม (Tetrahedral) ซึ่งมีแกนพันธะสี่แกนยื่นออกจากแต่ละอะตอม แต่ในกรณีของคาร์บอนนาโนทิวบ์อะตอมจะเรียงกันแบบหกเหลี่ยม (Hexagonal) โดยอะตอมคาร์บอนจะสร้างพันธะกับคาร์บอนรอบข้างเพียง 3 อะตอมเท่านั้น ซึ่งมีลักษณะเหมือนกับการสร้างพันธะของกราฟไฟต์ สาเหตุของการเรียงตัวแบบเป็นท่อยังไม่สามารถอธิบายได้ในปัจจุบัน แต่หนึ่งในสมมุติฐานคือมาจากการที่อะตอมแต่ละตัวมาทำพันธะต่อยอดที่ปลายท่อ



รูปที่ 2.6 แสดงการม้วนตัวแบบต่างๆ

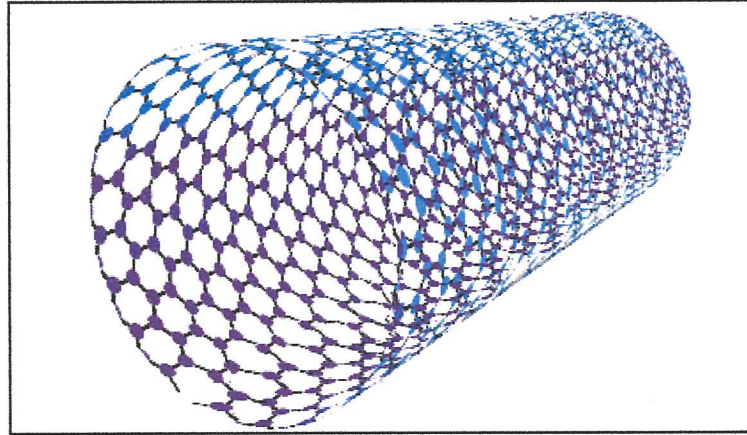


รูปที่ 2.7 แสดงมุมการม้วนตัวแบบต่างๆ

2.3.3 ชนิดของคาร์บอนนาโนทิวบ์

2.3.3.1 แบบผนังเดี่ยว (Single – walled Carbon Nanotube (SWNT))

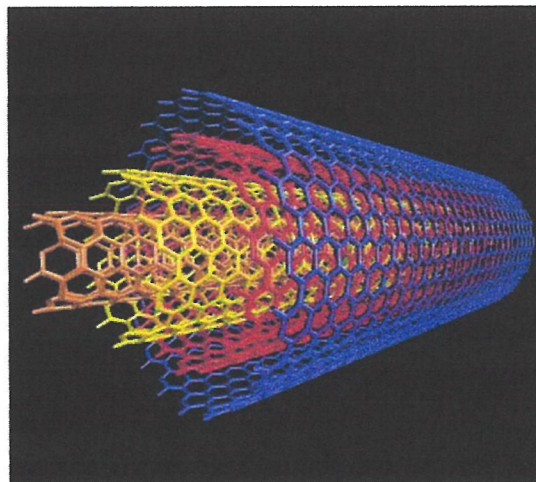
เป็นท่อกลวงเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.4 – 2.0 นาโนเมตร มีคุณสมบัติที่ต่างกันไปตามแต่ลักษณะของการม้วนตัว



รูปที่ 2.8 คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผนังเดี่ยว (Single – walled Carbon Nanotube (SWNT))

2.3.3.2 แบบหลายผนัง (Multi – walled Carbon Nanotube (MWNT))

มีลักษณะเป็นคาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผนังเดี่ยว ม้วนตัวซ้อนกันตั้งแต่ 2 ท่อขึ้นไป โดยมีแกนกลางร่วมกัน มีระยะห่างระหว่างท่อประมาณ 0.34 – 0.39 นาโนเมตร ซึ่งใกล้เคียงกับระยะห่างในแต่ละชั้นของแผ่นกราฟีนที่ซ้อนกันอยู่ในกราไฟต์ (0.355 นาโนเมตร) ความยาว ความสมบูรณ์ของการเรียงตัวและการม้วนตัว ไม่สามารถควบคุมอย่างแม่นยำได้ มีปริมาณจุดบกพร่องสูง ทำให้ความแข็งแรงต่ำกว่าท่อแบบผนังเดี่ยว



รูปที่ 2.9 คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบหลายผนัง (Multi – walled Carbon Nanotube (MWNT))

2.3.4 คุณสมบัติของคาร์บอนนาโนทิวบ์

ทราบกันมานานแล้วว่าเพชรมีความแข็งแกร่งมาก เนื่องด้วยโครงสร้างตาข่าย 3 มิติจากการเชื่อมต่อระหว่างพันธะของอะตอมคาร์บอนที่มี 4 ตำแหน่ง ในกราฟไฟต์คาร์บอนอะตอมหนึ่งจะมีพันธะกับ 3 อะตอมในระนาบเดียวกันที่เหลืออีก 1 พันธะ จะจับยึดกับระนาบถัดไป พันธะในระนาบเดียวกันของกราฟไฟต์หรือในแผ่นกราฟีนจะมีความแข็งแกร่งมากกว่าเพชร แต่พันธะระหว่างระนาบไม่แข็งแรงสามารถเลื่อนไหลได้ พันธะบนผนังท่อของคาร์บอนนาโนทิวบ์ก็มีลักษณะคล้ายแผ่นกราฟีนและพันธะของคาร์บอนที่ยาวเพียง 0.14 นาโนเมตร (สั้นกว่าเพชร) จึงทำให้คาร์บอนนาโนทิวบ์แข็งแกร่งกว่าเพชรและกราฟไฟต์

ค่าความยืดหยุ่น (Young's modulus of elasticity) ของคาร์บอนนาโนทิวบ์มีค่าสูงถึง 1 เทอราปาสคาล สามารถนำความร้อนได้ดีมากตามแนวยาวของท่อ แต่ก็เป็นฉนวนความร้อนได้ดีมากเช่นกันตามแนวขวางของท่อ

ตารางที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติของคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังเดี่ยว เปรียบเทียบกับวัสดุอื่น

คุณสมบัติ	คาร์บอนนาโนทิวบ์ ชนิดผนังเดี่ยว	เปรียบเทียบกับวัสดุอื่น
เส้นผ่านศูนย์กลาง	0.6 - 1.8 นาโนเมตร	เส้นผม 50 - 200 ไมโครเมตร
ความหนาแน่น	1.33 - 1.40 g/cm^3	อะลูมิเนียม 2.7 g/cm^3
ความทนแรงดึง	45×10^9 ปาสคาล	Steel alloy 2×10^9 ปาสคาล
ความยืดหยุ่น	สามารถโค้งงอและ คืนสภาพได้ดี	ไฟเบอร์ที่ทำจากโลหะหรือคาร์บอน จะเกิดรอยแยกที่เกรนบอนด์ (grain boundary) เมื่อเกิดการงอ
การนำไฟฟ้าสูงสุด	$10^9 A/cm^2$	ทองแดง $10^6 A/cm^2$
การปล่อยอิเล็กตรอน ด้วยสนามไฟฟ้าที่ ความห่าง 1 ไมโครเมตร จากฟอสเฟอรั ในสุญญากาศ	ใช้ศักดาไฟฟ้า 1 - 3 ไมโครเมตร	โมลิบดีนัม (Molybdenum) 50 - 100 โวลต์
การนำความร้อน (300°K)	ประมาณ 6000 W/mK	เพชร 3320 W/mK
เสถียรภาพเชิงอุณหภูมิ	ในสุญญากาศถึง 2500°C ในอากาศได้ถึง 750°C	ไอซีอินเตอร์คอนเนคตลอสที่ 600° - 1000°C

2.3.5 การนำคาร์บอนนาโนทิวป์ไปใช้งาน

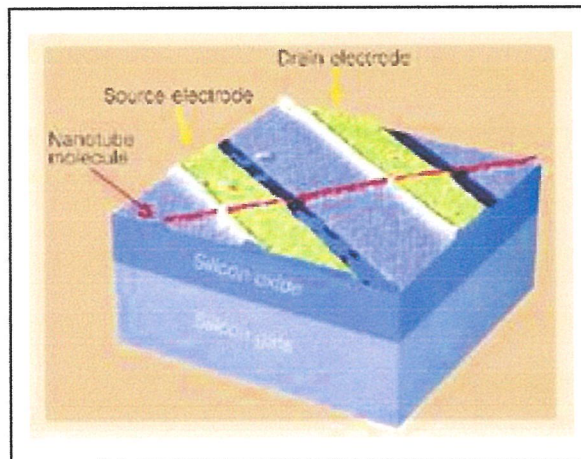
จากคุณสมบัติของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่มีความโดดเด่นหลายประการ เป็นได้ทั้งตัวนำและสารกึ่งตัวนำมีความแข็งแรงสูง น้ำหนักเบา มีความยืดหยุ่นดี มีเสถียรภาพสูง สามารถจับยึดกับโมเลกุลของแก๊สได้ดี จึงได้มีการนำเอาคาร์บอนนาโนทิวป์ไปประยุกต์ใช้ในงานหลากหลายด้าน ดังเช่น

1. งานทางด้านไมโครอิเล็กทรอนิกส์

การที่จะก้าวเข้าสู่ยุคนาโนอิเล็กทรอนิกส์นั้น ต้องลดขนาดชิ้นส่วนอุปกรณ์ลง 10 ถึง 1,000 เท่าจากเดิมที่เป็นไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (ขนาดของชิ้นส่วนเป็นไมโครเมตร) ดังนั้นต้องมีการลดขนาดของชิ้นส่วนอุปกรณ์ของอิเล็กทรอนิกส์ให้เป็นขนาดระดับนาโนเมตร ทั้งทรานซิสเตอร์ ไดโอด รีเลย์และลอจิกเกตต้องเปลี่ยนใหม่ เช่น ทรานซิสเตอร์ที่เป็นซิลิคอนเซมิคอนดักเตอร์ จากเดิมมีขนาดระดับไมครอน ต้องหันมาใช้โครงสร้างโมเลกุลอินทรีย์ (Organic Molecules) หรืออนินทรีย์ (Inorganic) ในระดับนาโน มีการใช้ คาร์บอนนาโนทิวป์เป็นช่อง (Channel) ให้อิเล็กตรอนผ่านระหว่างซอส - แดรน (Source-Drain) อิเล็กโทรดสำหรับทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้า (Field-Effect Transistor (FET)) ดังลักษณะในรูปที่ 2.10 โดยสามารถเปิด/ปิดสวิตช์ด้วย Voltage Gate ตามปกติ แต่สิ่งที่แตกต่างจากซิลิคอน FETs ทั่วไป คือ ขนาดและการนำไฟฟ้าผ่านคาร์บอนนาโนทิวป์ สูงมากกว่าถึง 1 ล้านเท่าด้วยกำลังไฟฟ้าน้อยกว่าและให้ความเร็วสัญญาณนาฬิกา (Clock Speed) ในระดับสูงกว่าถึง 1 teraHz. รวมถึงการสร้างลอจิกเกตด้วยคาร์บอนนาโนทิวป์ (CNT-FETs) โดยมีการได้ปด้วยสารเพื่อที่จะเติมหรือเอาอิเล็กตรอนออกทำให้ได้ n-type หรือ p-type เกิดขึ้น

ถึงแม้จะสามารถสร้างอุปกรณ์เหล่านั้นได้ในระดับนาโน แต่สิ่งที่ยากกว่าคือการเชื่อมต่อ (Wire) อุปกรณ์เหล่านี้เข้าด้วยกันเพื่อจะปฏิบัติการเชิงคณิตศาสตร์หรือลอจิกได้ จึงเกิดแนวคิดที่ต้องทำให้คาร์บอนนาโนทิวป์ เป็นทั้งตัวเชื่อมและเป็นอุปกรณ์ในตัวเดียวกัน อย่างไรก็ตามสิ่งนี้ยังไม่รวมถึงในระดับโครงสร้างของระบบวงจรเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์หรือระบบการทำงานอิสระอื่นๆ

เนื่องจากคาร์บอนนาโนทิวป์มีขนาดเล็กมาก ดังนั้นการจะจัดเรียงอนุภาคของคาร์บอนนาโนทิวป์ให้ได้ตามต้องการนั้นเป็นสิ่งที่ยาก แต่ได้มีรายงานออกมาว่าสามารถใช้ลำแสงเลเซอร์สองเส้นทำงานคล้ายตะเกียบคือ จะจับและเคลื่อนย้ายอนุภาคของคาร์บอนนาโนทิวป์ได้ตามต้องการ ซึ่งเรียกเทคนิคนี้ว่า Optical Trapping จึงคาดว่าน่าจะสามารถนำคาร์บอนนาโนทิวป์มาใช้ในการสร้างไมโครชิปที่มีความไวสูงและใช้พลังงานต่ำได้ในอนาคต



รูปที่ 2.10 แสดงการใช้คาร์บอนนาโนทิวป์เป็นช่องทางเดินกระแสในทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้า (FET)

2. นำไปเป็นส่วนผสมของวัสดุอื่นๆ เพื่อให้เกิดคุณสมบัติที่ตรงตามความต้องการมากขึ้น องค์การนาซา (NASA) สามารถสังเคราะห์คอมโพสิตของ SWNT-polyimide ที่สามารถเพิ่มคุณสมบัติทางกายภาพทั้งความแข็งแรง การทนอุณหภูมิและการนำไฟฟ้า ซึ่งทั้งหมดนี้มีความสำคัญมากสำหรับวัสดุประกอบเครื่องบินและยานอวกาศ กล่าวคือ คาร์บอนนาโนทิวป์สามารถช่วยเสริมความแข็งแรง (Reinforce) ของวัสดุเดิมให้มากยิ่งขึ้น น้ำหนักเบาและสามารถสร้างได้หลายรูปแบบได้แก่ ฟิล์มบาง ใยเบอร์ โฟม สารเคลือบและผง เป็นต้น

ปัจจุบันมีการผลิตวัสดุคอมโพสิตของคาร์บอนนาโนทิวป์ได้ปริมาณมาก อาทิเช่น พลาสติกเสริมคาร์บอนนาโนทิวป์ เช่น เสริมใน Ethylene Tetrafluoroethylene หรือ Polyvinylidene Fluoride เพื่อนำมาใช้ในรถยนต์ ใช้เป็นชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์หรือเครื่องใช้ไฟฟ้า ด้วยคุณสมบัติที่ทนต่อสารเคมี ทนต่อการหลุดลอก รวมถึงป้องกันไฟฟ้าสถิตย์ได้มากขึ้น

3. งานทางการแพทย์

ในทางการแพทย์แนวคิดสำคัญที่จะใช้ประโยชน์จากคาร์บอนนาโนทิวป์ คือการที่ท่อนาโนนี้สามารถเข้าถึงโครงสร้างในระดับเซลล์ได้ นั่นคือสามารถใช้เป็นหัววัด (Probe) ตรวจวัดหรือใช้เป็นปิเปตขนาดเล็่มากสำหรับปลดปล่อยสารหรือโมเลกุล (Ultrasmall Pipette) เข้าสู่เซลล์เป้าหมายได้ อันหลังนี้คือศักยภาพของคาร์บอนนาโนทิวป์ ในการขนถ่ายและปลดปล่อยยาเข้าสู่อวัยวะเป้าหมาย (Targeted Drug Delivery)

4. ใช้เป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน

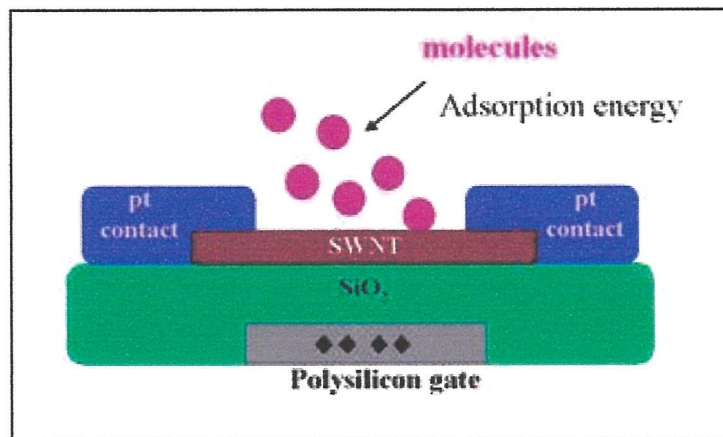
เนื่องจากคาร์บอนนาโนทิวป์ มีอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางกับความยาวน้อยมากๆ (ค่า Aspect-ratio สูง) ทั้งยังสามารถนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดีทำให้ คาร์บอนนาโนทิวป์

มีเสถียรภาพที่ดีและทำให้คาร์บอนนาโนทิวบ์สามารถจ่ายอิเล็กตรอนได้โดยใช้แรงขับเคลื่อนไฟฟ้าต่ำ จึงเหมาะสมที่จะประยุกต์ใช้เป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนในอุปกรณ์เช่น จอแสดงผล หลอดไฟฟ้า ประหยัดพลังงานแหล่งกำเนิด X-ray ขนาดเล็กและแหล่งกำเนิดไมโครเวฟขนาดเล็ก

5. งานทางด้านเซนเซอร์เคมี (Chemical sensors)

การที่คาร์บอนนาโนทิวบ์สามารถทำให้อยู่ในรูปของสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) โดยที่สารกึ่งตัวนำนี้สามารถตอบสนองต่อสารพวกอัลคาไลน์ ฮาโลเจนและแก๊สต่างๆ ได้ โดยการเปลี่ยนแปลงความต้านทานทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ดังนั้นเมื่อเป็น Semiconducting Carbon Nanotube จะสามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงความต้านทานได้ดีขึ้นอย่างมาก ทำให้เซนเซอร์ที่ใช้คาร์บอนนาโนทิวบ์ นี้มีความไวมากขึ้น ซึ่งก็มีการพัฒนาเป็นเซนเซอร์ตรวจวัด Cytochrome C, Methane, Krypton และ โมเลกุลของ Alkylamine แบบสารกึ่งตัวนำ เป็นต้น

แต่การประยุกต์ใช้ Semiconducting Carbon Nanotube เป็นเซนเซอร์แบบนี้มีปัญหา คือไม่สามารถแยกชนิดของแก๊สที่ความเข้มข้นต่ำได้และยังไวต่อการเปลี่ยนแปลงสภาวะแวดล้อมได้แก่ ความชื้น อุณหภูมิและความเร็วแก๊สที่ไหลผ่าน ทำให้ขาดความสามารถเชิงจำเพาะหรือคัดเลือกเฉพาะที่เป็นคุณสมบัติที่สำคัญของเซนเซอร์



รูปที่ 2.11 แสดงการประยุกต์ใช้คาร์บอนนาโนทิวบ์เป็นเซนเซอร์เคมี

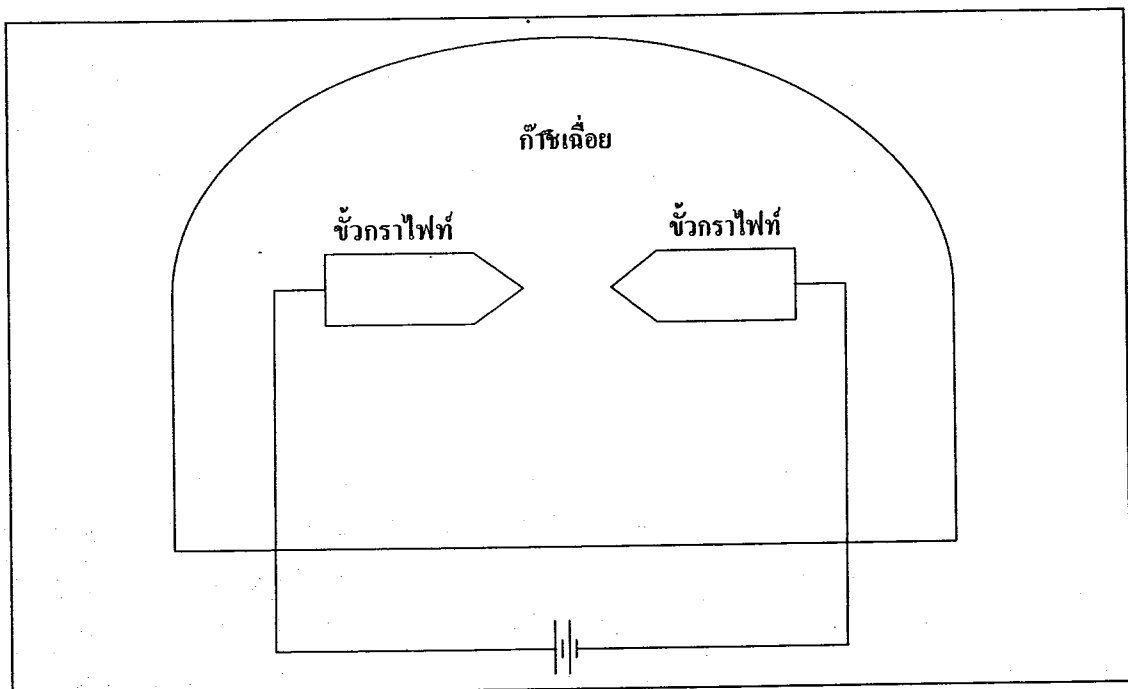
2.4 การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์

2.4.1 วิธี อาร์คด้วยไฟฟ้า (Arc Discharge)

วิธี อาร์คด้วยไฟฟ้า (Arc discharge) เป็นการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ โดยการอาร์คที่ปลายทั้ง 2 ของแท่งกราไฟต์(หรือแท่งคาร์บอน) 2 แท่ง ภายในระบบซึ่งเป็นบรรยากาศของแก๊สเฉื่อยเช่น ฮีเลียม (Helium) ผสมกับอาร์กอน (Argon) หรือไนโตรเจนเหลวที่ความดันต่ำโดยใช้ไฟฟ้ากระแสสูงเพื่อไปอาร์คแท่งกราไฟต์ ทำให้บริเวณที่ถูกอาร์คมีอุณหภูมิสูงมากพอที่จะทำ

อะตอมคาร์บอนแตกตัวออกมาก่อตัวเป็นคาร์บอนนาโนทิวบ์ เกาะอยู่บนบางส่วนของแท่งกราไฟต์ ที่หลุดกระเด็นออกมาและรอบบริเวณแท่งกราไฟต์ที่ถูกอาร์ค ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ได้จะขึ้นอยู่กับส่วนผสมระหว่าง แก๊สฮีเลียมกับ แก๊สอาร์กอน ซึ่งเป็นปัจจัยที่ทำให้สัมประสิทธิ์การแพร่และการนำความร้อนมีค่าต่างกัน จึงมีผลกระทบกับความเร็วในการแพร่ของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา

การเย็นตัวของแท่งคาร์บอนและอนุภาคของโลหะตัวเร่ง เป็นผลให้คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ได้ มีขนาดต่างกันออกไปไม่สม่ำเสมอ วิธีอาร์คด้วยไฟฟ้าสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.12 และด้วยวิธีการนี้ยังสามารถที่จะเลือกให้คาร์บอนนาโนทิวบ์ส่วนมากที่สังเคราะห์ได้ ให้เป็นชนิดผนังเดี่ยว (SWCNTs) หรือชนิดหลายผนัง (MWCNTs) โดยหากต้องการให้คาร์บอนนาโนทิวบ์ ส่วนมากที่สังเคราะห์ได้เป็นชนิด ผนังเดี่ยว ก็สามารถใช้แท่งกราไฟต์ ที่เจือด้วยอนุภาคของโลหะตัวเร่ง เช่น เหล็ก (Fe), โคบอลต์ (Co), นิกเกิล (Ni) หรือ โมลิบดีนัม (Mo) ที่ขั้วแอโนดและถ้าต้องการให้คาร์บอนนาโนทิวบ์ส่วนมากที่สังเคราะห์ได้เป็นชนิดหลายผนัง ก็สามารถใช้แท่งกราไฟต์บริสุทธิ์ เท่านั้น ก็พอ ไม่จำเป็นต้องผสมโลหะตัวเร่งก็ได้ ซึ่งเป็นข้อดีของวิธีนี้ ด้วยวิธีอาร์คด้วยไฟฟ้านี้ จะทำให้ได้คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ไม่สะอาด ปะปนกับเขม่า โลหะตัวเร่งปฏิกิริยาและอะตอมคาร์บอนที่มีรูปร่างไม่แน่นอน จึงต้องผ่านการแยกให้เหลือเฉพาะคาร์บอนนาโนทิวบ์ ซึ่งจะยุ่งยากและคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ได้ยังมีคุณภาพต่ำอยู่คือจะมีขนาดไม่สม่ำเสมอสั้นบ้างยาวบ้าง

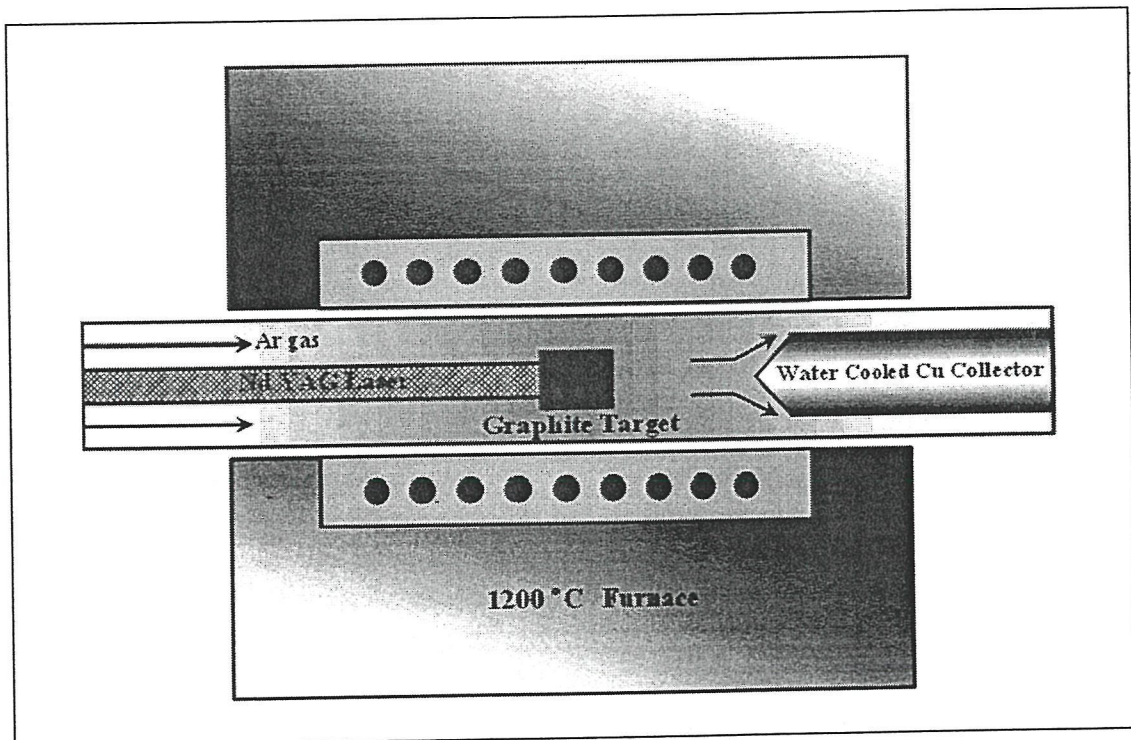


รูปที่ 2.12 วิธีอาร์คด้วยไฟฟ้า (Arc Discharge)

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

2.4.2 วิธี Laser Ablation

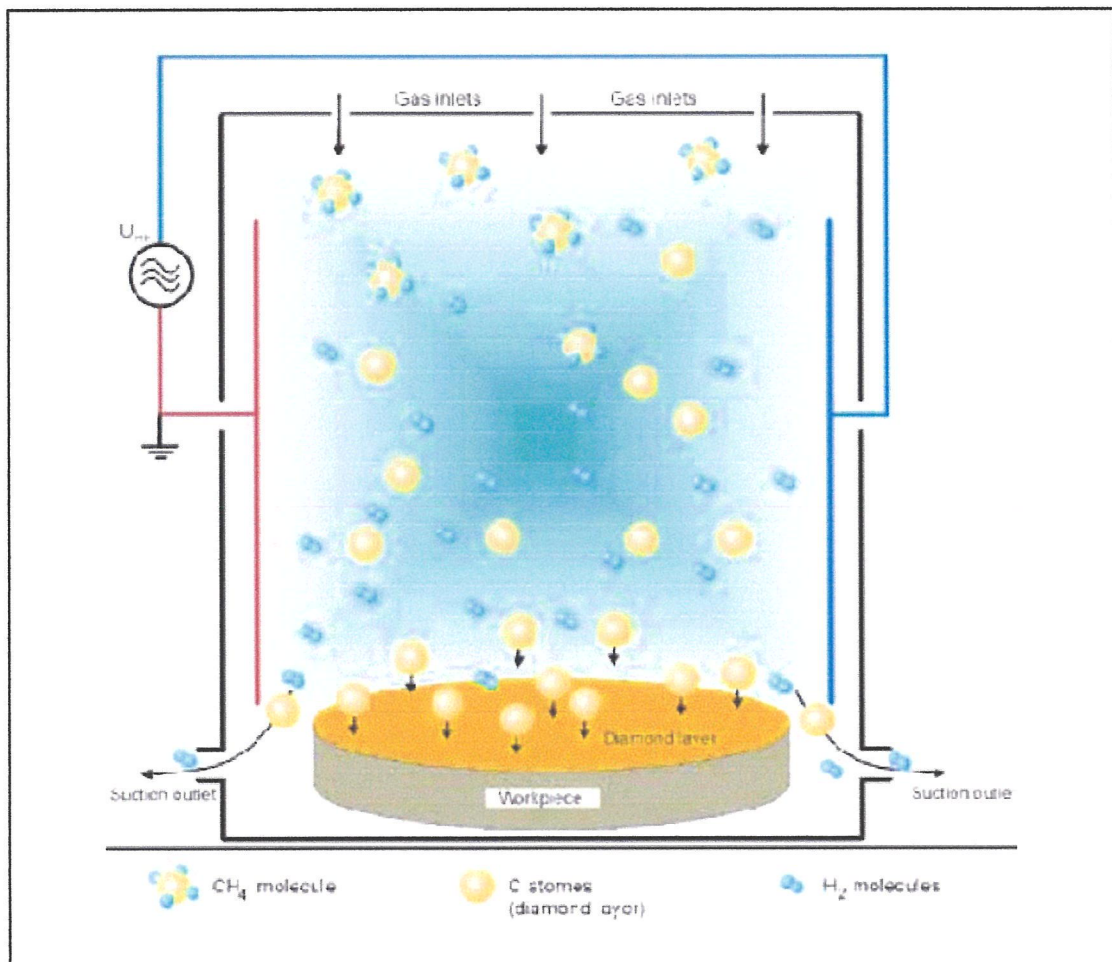
ในปี พ.ศ.2538 ทีมวิจัยของ Prof. Smalley ได้ทำการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์โดยการใช้แสงเลเซอร์พลังงานสูง หลักการคือใช้แสงเลเซอร์พลังงานสูงยิงไปที่เป้าหมายซึ่งเป็นแท่งกราไฟต์ที่อยู่ภายในระบบซึ่งเป็นห้องทำปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิประมาณ 1200°C ภายในเป็นบรรยากาศของแก๊สฮีเลียมหรือแก๊สอาร์กอน ทำให้แท่งกราไฟต์ระเหยออกเป็นไอของคาร์บอนโดยแสงเลเซอร์ที่ใช้จะมี 2 ชนิดคือ พัลส์เลเซอร์ (pulsed laser) และเลเซอร์ต่อเนื่อง (continuous laser) สิ่งที่แตกต่างกันระหว่าง พัลส์เลเซอร์และเลเซอร์ต่อเนื่อง คือ พัลส์เลเซอร์ต้องใช้ความเข้มของแสงสูงมากแต่จะยิงเลเซอร์ไปเป้าหมายเป็นจังหวะไม่ต่อเนื่องส่วน เลเซอร์ต่อเนื่องนั้น จะใช้ความเข้มแสงน้อยกว่า แต่จะยิงเลเซอร์ไปเป้าหมายอย่างต่อเนื่องปริมาณของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ได้จากวิธีการนี้จะมีมากกว่า 70 % และมีความบริสุทธิ์สูงมากส่วนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคาร์บอนนาโนทิวบ์ ที่ได้จะอยู่ในช่วง 1-2 nm เนื่องจากวิธีนี้เป็นวิธีที่ต้องใช้ค่าใช้จ่ายสูงจึงนิยมใช้ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดซิงเกิลวอลล์เท่านั้น วิธี Laser Ablation ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 วิธี Laser Ablation

2.4.3 วิธีการปลูกด้วยไอเคมี (Chemical Vapor Deposition (CVD))

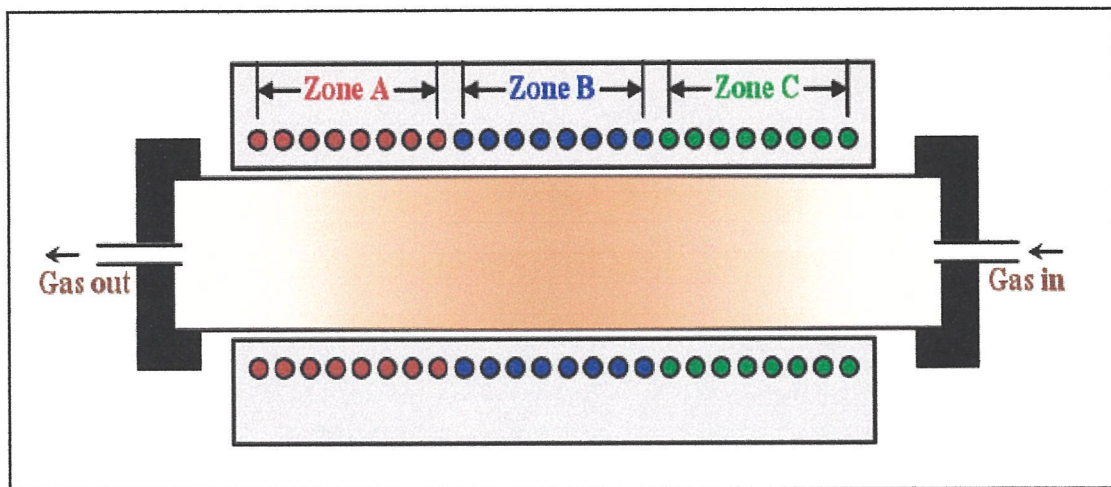
วิธีการสังเคราะห์แบบการปลูกด้วยไอเคมีหรือซีวีดี (Chemical Vapor Deposition (CVD)) เป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากในปัจจุบัน เนื่องจากสามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ได้ทั้งชนิดที่เป็นผนังชั้นเดียวและผนังหลายชั้น มีต้นทุนในการผลิตที่ต่ำ สามารถสังเคราะห์ได้ในปริมาณมาก โดยใช้หลักการของกระบวนการการแยกแก๊สที่มีคาร์บอนเป็นส่วนผสม (เช่น แก๊สมีเทน เอทิลแอลกอฮอล์ อะซีโตน เป็นต้น) และสามารถเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์ได้บนโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา (เช่น Fe, Ni, Co) โดยใช้ความร้อนหรือพลาสมา (Plasma) เข้าช่วย อุณหภูมิอยู่ระหว่าง 400-1200 °C ซึ่งต่ำกว่าวิธีอื่น ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ข้อดีของวิธีนี้คือสามารถควบคุมขนาดและความยาวของทิวป์ได้ง่าย สามารถสังเคราะห์ทิวป์ให้ขึ้นตรงตำแหน่งที่ต้องการบนวัตถุได้และที่สำคัญที่สุดวิธีนี้สามารถนำมาใช้ในการสังเคราะห์เชิงพาณิชย์ได้ วิธีซีวีดี ยังสามารถแยกย่อยตามความแตกต่างของวิธีการแยกแก๊สและวิธีการเตรียมโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาออกเป็น 5 วิธีใหญ่คือ



รูปที่ 2.14 วิธีการปลูกด้วยไอเคมี (Chemical Vapor Deposition (CVD))

2.4.3.1 วิธีเทอร์มอลซีวีดี (Thermal Chemical Vapor Deposition)

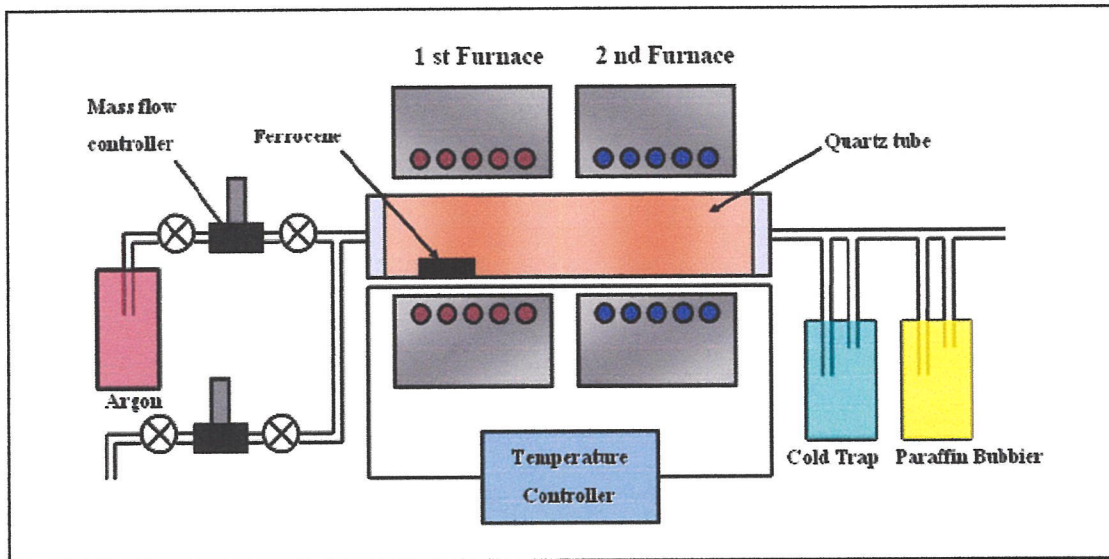
วิธีเทอร์มอลซีวีดี ที่แสดงในรูปที่ 2.15 เป็นวิธีในกระบวนการสร้างสารกึ่งตัวนำที่ใช้ในการเตรียมชั้นออกไซด์ของซิลิคอน (Si) และเป็นวิธีการสังเคราะห์ที่นิยมใช้กันมากในปัจจุบันเนื่องจากสามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ได้ทั้งชนิดผนังเดี่ยวและผนังหลายชั้น ใช้โลหะตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น เหล็ก (Fe), โคบอลต์ (Co), นิกเกิล (Ni), โมลิบดีนัม (Mo) หรืออัลลอยของโลหะเหล่านี้ โดยส่วนมาก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อจะขึ้นอยู่กับความหนาของชั้นเคลือบโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา โดยความหนาของชั้นเคลือบอยู่ที่ 13 นาโนเมตร จะให้เส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยประมาณ 30-40 นาโนเมตร เมื่อความหนาของชั้นเคลือบอยู่ที่ 2-3 นาโนเมตร จะได้เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อประมาณ 1 นาโนเมตร คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ได้จากวิธีนี้จะมีความยาวอยู่ในช่วง 0.6-4 นาโนเมตร



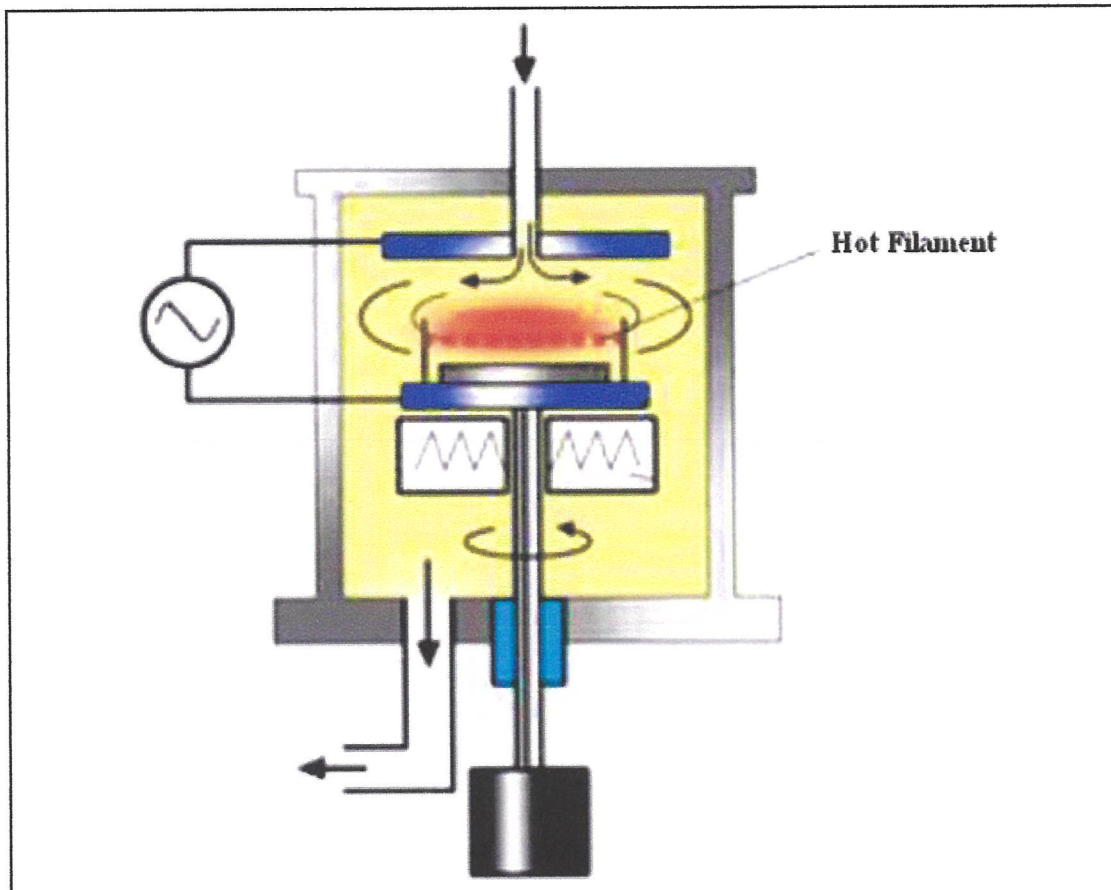
รูปที่ 2.15 วิธีเทอร์มอลซีวีดี (Thermal Chemical Vapor Deposition)

2.4.3.2 วิธี Vapor Phase Growth

จากรูปที่ 2.16 เป็นวิธีการสังเคราะห์ที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นแก๊สของโลหะ เช่น Ferrocene ซึ่งเป็นสารประกอบของเหล็ก วิธีนี้เป็นวิธีที่สามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ได้ครั้งละเป็นจำนวนมากๆ และทิวบ์ที่ได้จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางยาวมาก (มากกว่า 20 μm) และมีความบริสุทธิ์มากกว่า 80 % แต่เนื่องจากวิธีนี้นักจะใช้แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ซึ่งเป็นอันตรายต่อร่างกายจึงต้องระมัดระวังอย่างมากนอกจากนี้วิธีนี้ยังยากที่จะควบคุมทิศทางและตำแหน่งที่จะเกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์อีกด้วย



รูปที่ 2.16 วิธี Vapor Phase Growth



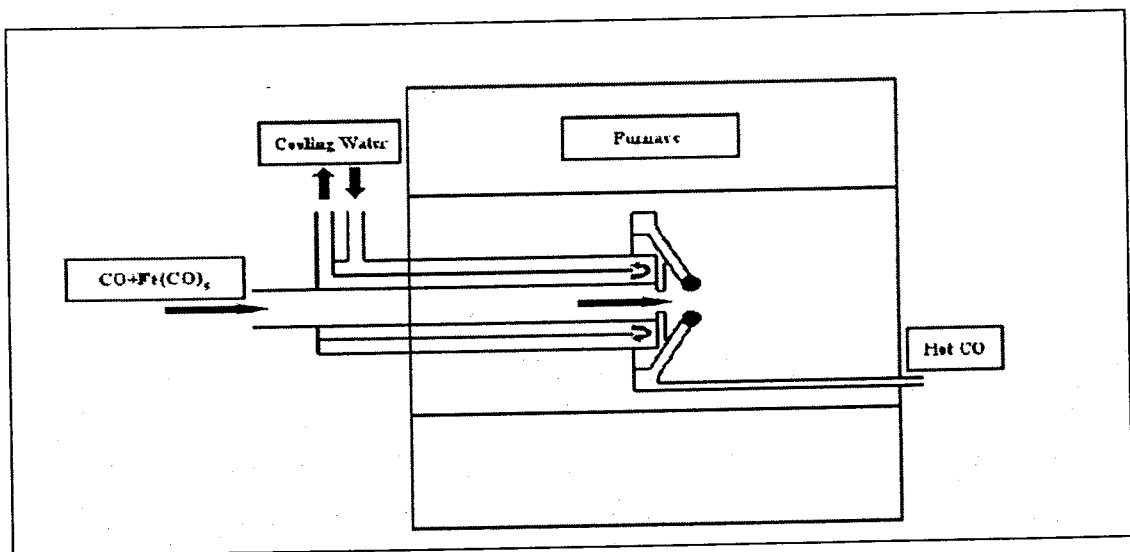
รูปที่ 2.17 วิธี Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition (PE-CVD)

2.4.3.3 วิธี Plasma enhanced Chemical Vapor Deposition (PE-CVD)

วิธีพลาสมาซีวีดี (Plasma CVD) เป็นวิธีที่สามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 400°C โลหะตัวเร่งที่ใช้คือ เหล็ก (Fe), นิกเกิล (Ni) และโคบอลต์ (Co) นอกจากนี้ วิธีนี้ยังเป็นวิธีที่สามารถกำหนดทิศทางการเกิดของทิวบ์ให้ทิวบ์ตั้งฉากกับฐานรองได้ง่ายอีกด้วย แต่ข้อเสียของวิธีนี้คือ โดยส่วนมากจะสังเคราะห์ได้แต่คาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดหลายผนัง ไม่สามารถสังเคราะห์ชนิดผนังเดี่ยวได้ แต่ปัจจุบันมีรายงานว่าสามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังเดี่ยวได้แล้ว ดังแสดงในรูปที่ 2.17

2.4.3.4 วิธี High Pressure CO Disproportionate Process

วิธีนี้จะคล้ายกับวิธี Vapor phase growth คือใช้แก๊สของโลหะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและใช้แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน (Carbon source) แล้วปล่อยให้เข้ามาอย่างต่อเนื่องเพื่อให้เข้าไปทำปฏิกิริยาร่วมกับก๊าซโลหะ เช่น Ferrocene, $\text{Fe}(\text{CO})_5$ จนเกิดเป็นคาร์บอนนาโนทิวบ์ ดังนั้นจึงต้องระมัดระวังอันตรายจากก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) เนื่องจากเป็นอันตรายต่อร่างกายอย่างยิ่ง ในระหว่างกระบวนการสังเคราะห์ การควบคุมทิศทางและตำแหน่งที่จะเกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์นั้นทำได้ยาก แต่คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้จะเป็นชนิดผนังเดี่ยว มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางค่อนข้างเล็กและมีปริมาณที่มาก โดยที่ขนาดของท่อเล็กสุดอยู่ที่ประมาณ 0.7 นาโนเมตร ซึ่งคาดว่าวิธีนี้เป็นวิธีที่สามารถสังเคราะห์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อได้เล็กที่สุด โดยมีขนาดเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ที่ประมาณ 1.1 นาโนเมตร มีความบริสุทธิ์ประมาณ 80% และมีสิ่งเจือปนน้อย ดังแสดงรูปที่ 2.18



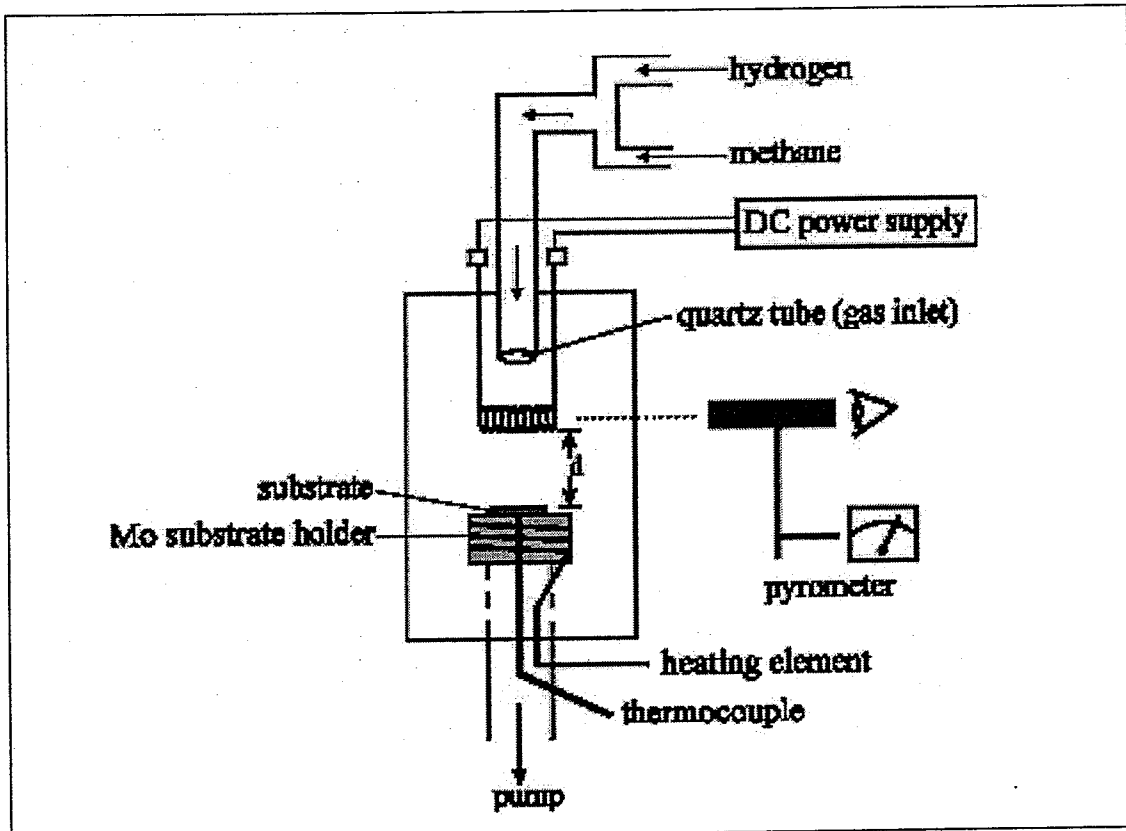
รูปที่ 2.18 วิธี High Pressure CO Disproportionate Process

2.4.3.5 วิธี Hot Filament Chemical Vapor Deposition (HF-CVD)

จากรูปที่ 2.19 วิธีซีวีดีแบบขดลวดความร้อน (Hot filament CVD) นี้ ซึ่งจะมีหลักการคล้ายกับวิธีเทอร์มอลซีวีดี เพียงแต่จะใช้ขดลวดความร้อน (filament) ในการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงกับแก๊ส วิธีซีวีดีแบบขดลวดความร้อนนี้เป็นวิธีที่ใช้กันอย่างกว้างขวางทั้งในห้องปฏิบัติการและในเชิงพาณิชย์ หลักการคือใช้ไฟฟ้ากระแสสูงจ่ายให้ขดลวดความร้อน เพื่อให้เกิดความร้อนขึ้นที่ขดลวด มีฐานรองรับสำหรับวางแผ่นตัวอย่าง ใช้โลหะตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น เหล็ก (Fe) โคบอล (Co) หรือ นิกเกิล (Ni) ภายในระบบซึ่งเป็นห้องทำปฏิกิริยา (Chamber) จะมีท่อนำแก๊สซึ่งเป็นแก๊สที่มีคาร์บอนเป็นส่วนประกอบเช่น ไอรอะเซทของแอลกอฮอล์ อะซีโตน หรือมีเทน เป็นต้นไหลผ่านเข้ามาภายในระบบ ความร้อนจากขดลวดความร้อน ซึ่งมีอุณหภูมิสูงประมาณ 1600–2000°C ซึ่งทำให้มีอุณหภูมิฐานรองอยู่ในช่วงประมาณ 550 – 750°C อุณหภูมิสูงจะทำให้อะตอมคาร์บอนขนาดเล็กๆ แยกตัวออกจากโมเลกุลของแก๊สและไปจับตัวกันที่โลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้เตรียมไว้บนแผ่นตัวอย่าง เกิดเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์

ในการสังเคราะห์แต่ละวิธีมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน วิธีเทอร์มอลซีวีดี จะเป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากในปัจจุบันเนื่องจากสามารถสังเคราะห์ได้ทั้งชนิดผนังเดี่ยวและหลายผนัง ส่วน PE-CVD นั้นสามารถสังเคราะห์ ได้ที่อุณหภูมิต่ำ (ต่ำกว่า 400°C) แต่คาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์ได้ส่วนมากจะเป็นชนิดหลายผนังเท่านั้น ส่วนวิธีซีวีดีแบบขดลวดความร้อน นั้นมีหลักการเดียวกันกับวิธีเทอร์มอลซีวีดี เพียงแต่ใช้ขดลวด ที่มีอุณหภูมิสูงในการแยกแก๊สเท่านั้น ข้อดีของวิธีนี้คือง่ายและค่าใช้จ่ายต่ำ แต่โดยส่วนมากแล้วคุณภาพของคาร์บอนนาโนทิวป์ ที่สังเคราะห์ได้โดยวิธีนี้ยังมีคุณภาพที่ต่ำ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ เช่น ความดันภายในระบบ ชนิดของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิฐานรองหรืออัตราการไหลของแก๊สที่เป็นแหล่งกำเนิดสารประกอบคาร์บอน เป็นต้น ส่วนวิธี Vapor Phase Growth นั้น ใช้แก๊สของโลหะ เช่น Ferrocene , $Fe(CO)_5$ ซึ่งเป็นสารประกอบของเหล็ก สองวิธีหลังนี้สามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ ที่ละจำนวนมากได้ แต่มีข้อเสียคือไม่สามารถควบคุมทิศทางและตำแหน่งของทิวป์ได้ง่ายนักและก๊าซที่ใช้ส่วนมากเป็นก๊าซที่มีพิษ (เช่น CO เป็นต้น)

ปริญญาณิพนธ์นี้ ศึกษาสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ด้วยวิธีซีวีดีแบบขดลวดความร้อน (HF-CVD) โดยใช้ไอรอะเซทของเอทธานอลเป็นสารแหล่งกำเนิดคาร์บอนใช้แก๊สไฮโดรเจนเป็นตัวนำพา อัตราส่วนของไฮโดรเจนผ่านสารแหล่งจ่ายต่อไฮโดรเจนรวมประมาณ 10 % โดยปริมาตร ขดลวดความร้อนมีอุณหภูมิประมาณ 2000°C ทำให้ได้อุณหภูมิฐานรองในช่วงประมาณ 550-750°C โดยสังเคราะห์ที่ความดันบรรยากาศ ใช้ซิลิคอนเป็นฐานรอง ใช้นิกเกิลเป็นโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst)



รูปที่ 2.19 วิธีชีวิตแบบขดลวดความร้อน (Hot Filament Chemical Vapor Deposition (HF-CVD))

2.5 กลไกการเกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์

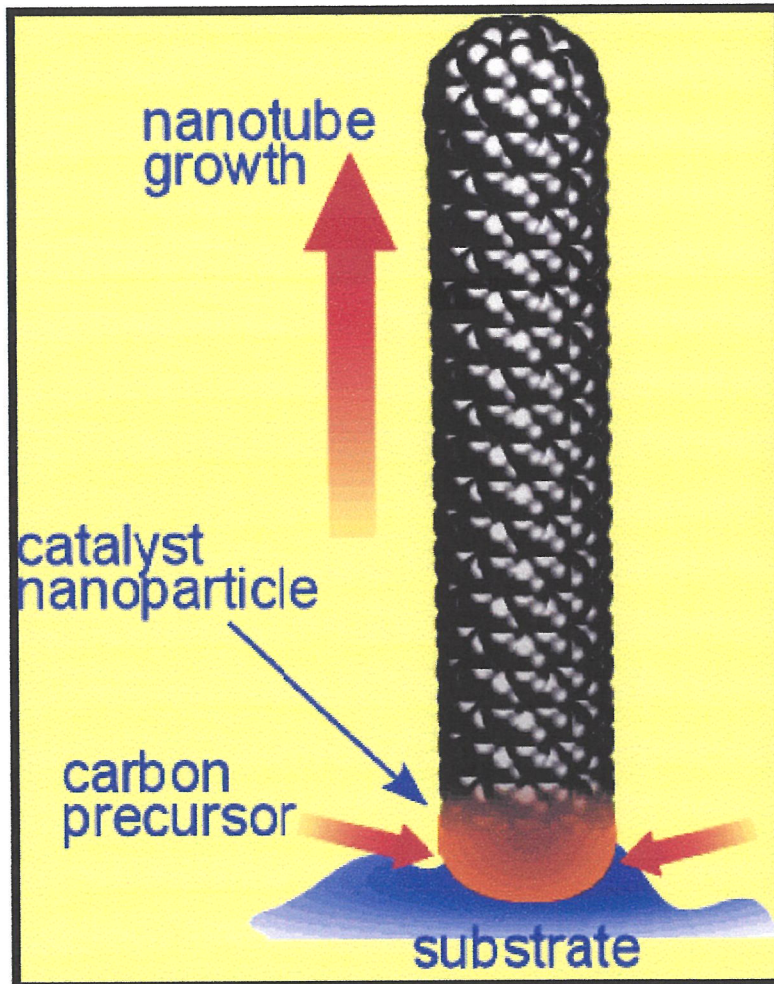
กลไกของการเกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์นั้น ในปัจจุบันยังไม่สามารถหาข้อสรุปที่แน่ชัดได้ว่าเกิดลักษณะใด ซึ่งจะทราบได้ในช่วงระหว่างที่คาร์บอนนาโนทิวบ์ก่อตัวขึ้น ลักษณะการก่อตัวเป็นคาร์บอนนาโนทิวบ์ จะสามารถแบ่งออกได้ 2 ลักษณะคือ

- 1) กลไกการเกิดแบบ Root Growth
- 2) กลไกการเกิดแบบ Tip Growth

2.5.1 Root Growth

เป็นการเกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์ในลักษณะที่อะตอมคาร์บอนก่อตัวเป็นคาร์บอนนาโนทิวบ์บนโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ดังแสดงในรูปที่ 2.20 อธิบายได้คือที่อุณหภูมิสูงพอเหมาะ จะทำให้อะตอมคาร์บอนแตกตัวออกมาจากแหล่งกำเนิดคาร์บอน (Carbon source) และอุณหภูมิสูงจนทำให้โลหะตัวเร่งอยู่ในสถานะของเหลว อะตอมคาร์บอนที่แตกตัวออกมาจะเข้าไปละลายในโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาและเนื่องจากอุณหภูมิด้านล่างของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาสูงกว่าอุณหภูมิด้านบน

จึงทำให้อะตอมคาร์บอนที่เข้าไปละลายในโลหะตัวเร่งลอยขึ้นด้านบนของโลหะตัวเร่งและก่อตัวเป็นคาร์บอนนาโนทิวบนโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา

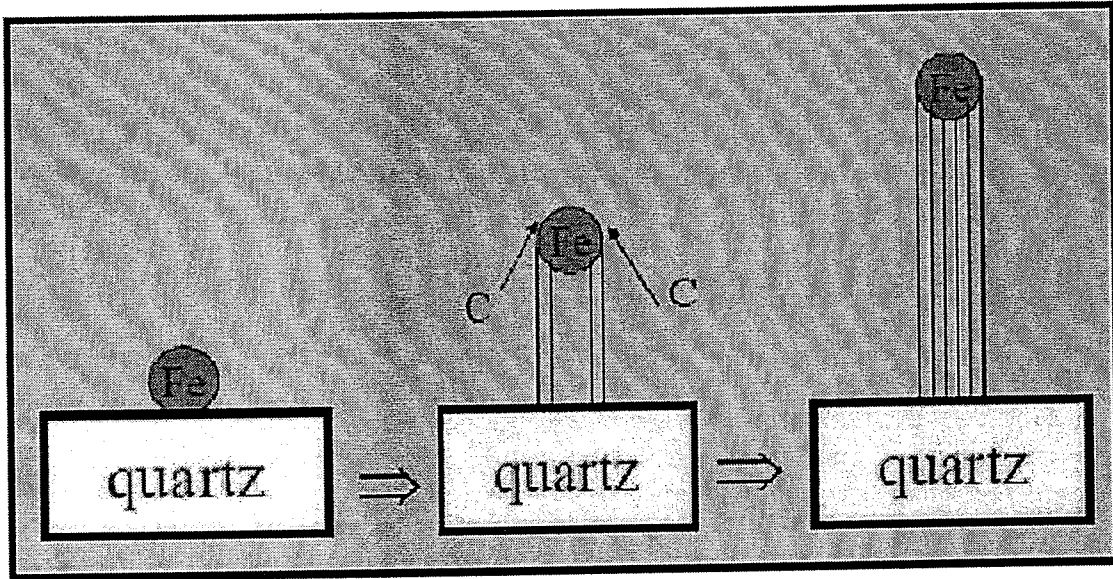


รูปที่ 2.20 กลไกการเกิดคาร์บอนนาโนทิวแบบ root grow

2.5.2 Tip Growth

เป็นการเกิดคาร์บอนนาโนทิวในลักษณะที่อะตอมคาร์บอนก่อตัวเป็นคาร์บอนนาโนทิวด้านล่างของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ทำให้มีโลหะตัวเร่งอยู่ที่ปลายทิว ดังแสดงในรูปที่ 2.21 อธิบายได้คือ ที่อุณหภูมิสูงมากพอที่จะทำให้อะตอมคาร์บอนแตกตัวออกจากแหล่งกำเนิดคาร์บอนและอุณหภูมิสูงจะทำให้โลหะตัวเร่งอยู่ในสถานะของเหลว อะตอมคาร์บอนที่แตกตัวออกมาจะเข้าไปละลายในโลหะตัวเร่งและเนื่องจากอุณหภูมิด้านบนของโลหะตัวเร่งสูงกว่า

อุณหภูมิด้านล่าง จึงเป็นผลให้อะตอมคาร์บอนที่เข้าไปละลายในโลหะตัวเร่งตกลงมาด้านล่างของโลหะตัวเร่งและก่อตัวเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์ด้านล่างของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา



รูปที่ 2.21 กลไกการเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์แบบ Tip Growth

จากกลไกการเกิดของคาร์บอนนาโนทิวป์ทั้ง 2 ลักษณะ จะเห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ควรมีจุดหลอมที่ต่ำ เพื่อไม่ให้สิ้นเปลืองพลังงานความร้อนในการทำให้โลหะตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ในสถานะของเหลวและโลหะตัวเร่งควรมีความสามารถในการละลายคาร์บอนที่ดี เพื่อให้อะตอมคาร์บอนสามารถละลายในโลหะตัวเร่งได้จำนวนมากๆ

2.6 เครื่องมือวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์

เนื่องจากการศึกษาด้านนาโนเทคโนโลยีเป็นการศึกษาเกี่ยวกับสิ่งที่มีขนาดเล็กมากในระดับนาโนเมตร ในการวิเคราะห์จึงจำเป็นต้องใช้เครื่องมือซึ่งสามารถเข้าถึงสิ่งเล็กมากๆ เหล่านี้ได้ ซึ่งกล้องจุลทรรศน์แบบแสงมีขีดจำกัดในกำลังขยายเนื่องจากการแทรกสอดของแสง ดังตารางที่ 2.2 จะแสดงค่า Resolution สำหรับอุปกรณ์ต่างๆ

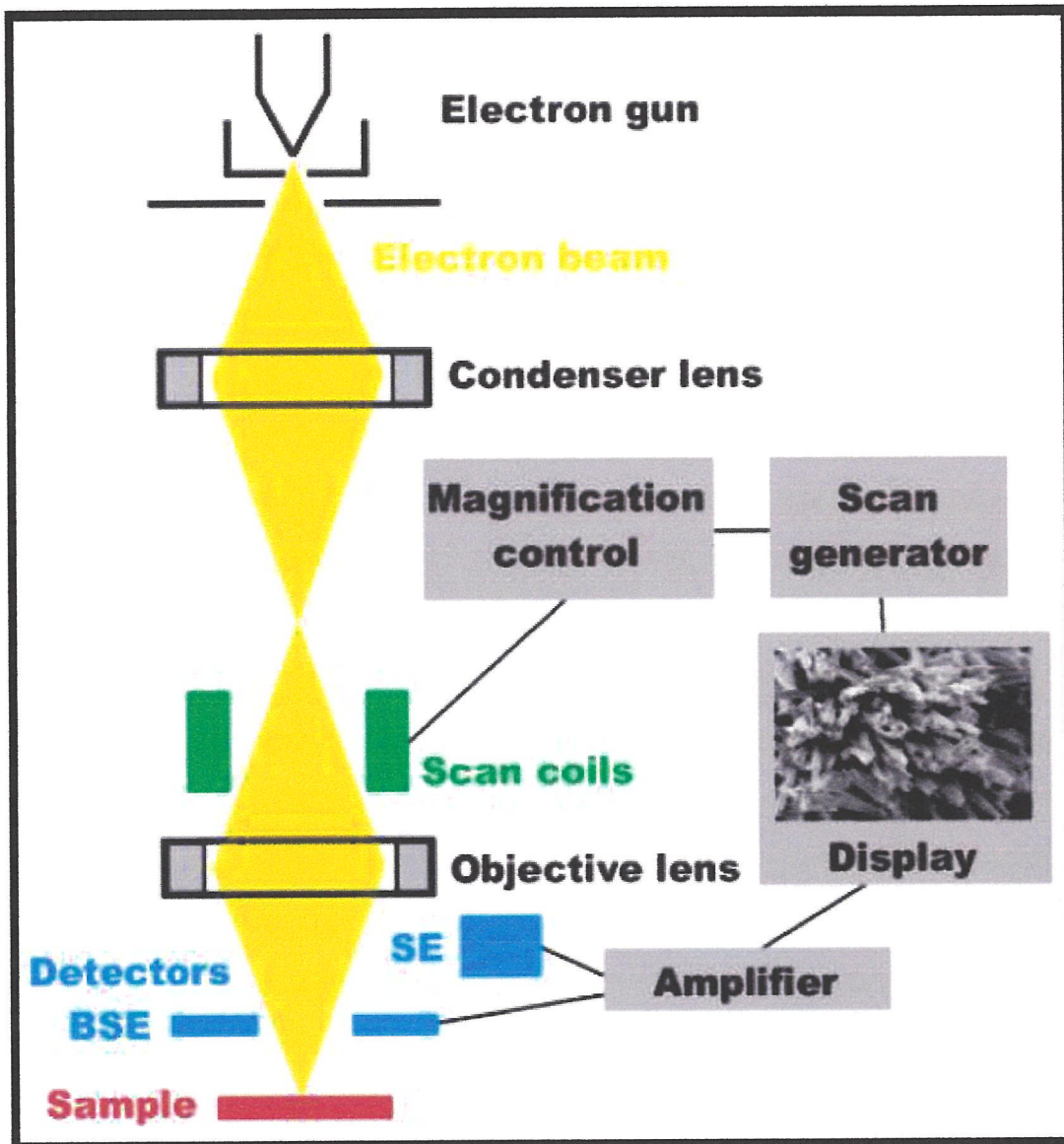
ตารางที่ 2.2 แสดงค่า Resolution สำหรับอุปกรณ์ต่างๆ

เทคนิค	ข้อจำกัด	Resolution
คา	เรตินา	70,000 อังสตรอม
กล้องจุลทรรศน์แบบแสง	การเลี้ยวเบนของแสง	3,000 อังสตรอม
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	การเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอน	30 อังสตรอม
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน	การเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอน	1 อังสตรอม
กล้องจุลทรรศน์แบบ field ion	ขนาดอะตอม	3 อังสตรอม
near-field scanning probe microscopies	ขนาด "aperture"	0.1-100 อังสตรอม

จากตารางที่ 2.2 จะเห็นได้ว่า งานวิจัยด้านนาโนเทคโนโลยี มีความจำเป็นอย่างมากที่ต้องอาศัยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงเครื่องมือที่จำเป็นสำหรับการวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ได้จากการสังเคราะห์ เพื่อศึกษาถึงคุณสมบัติ ขนาดและความบริสุทธิ์ ซึ่งประกอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) สำหรับวิเคราะห์ลักษณะของคาร์บอนนาโนทิวบ์ EDX สำหรับวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุต่างๆ บนฐานรองและ Raman Spectroscopy สำหรับวิเคราะห์คุณภาพของฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์

2.6.1 การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope (SEM))

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ดังแสดงในรูปที่ 2.22 จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่าน Condenser lens เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอนซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก จากนั้น ลำอิเล็กตรอนจะถูกโฟกัสโดย Objective lens ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษาและกราดในระนาบ xy หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) ขึ้น ซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึกแปลงเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์และถูกนำไปสร้างเป็นภาพต่อไป



รูปที่ 2.22 โค้ดแกรมการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

2.6.1.1 องค์ประกอบพื้นฐานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนส่วนใหญ่จะมีส่วนประกอบสำคัญ คือ แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน และเลนส์อิเล็กตรอน แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (Electron Source) แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน หรือ ปืนอิเล็กตรอน (Electron Gun) ซึ่งเป็นอุปกรณ์สำคัญของ SEM โดยทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนที่สามารถผลิตกระแสจำนวนมาก วัสดุที่ใช้ทำปืนอิเล็กตรอนนี้ต้องมีเสถียรภาพสูง ซึ่งพารามิเตอร์ที่สำคัญมี 3 ตัวได้แก่ ขนาดของลำอิเล็กตรอน ณ จุดตกกระทบ ปริมาณกระแส ณ จุดตกกระทบ และมุมคอนเวอร์เจนต์ ภาคตัดขวางของลำอิเล็กตรอนที่ส่งออกไปต้องเป็นจุดที่เล็กๆ ในปัจจุบันมีปืนอิเล็กตรอนที่นิยมใช้งานอยู่ 4 ประเภทหลักๆ ได้แก่

1. ลวดทังสแตน (Tungsten Filament) เป็นอิเล็กตรอนชนิดนี้เป็นแบบที่นิยมมากที่สุด เนื่องจากมีราคาถูกและไม่ต้องการสภาพสุญญากาศ ใช้หลักการปลดปล่อยอิเล็กตรอนเนื่องจากความร้อน หรือเรียกว่าแบบเทอร์มิออนิกอิมิชชัน (Thermionic emission)

2. ผลึก LaB6 (Lanthanum Hexaboride Crystal) เป็นอิเล็กตรอนชนิดนี้ทำจากทังสแตน ใช้หลักการทำงานแบบเทอร์มิออนิกอิมิชชัน เช่นเดียวกัน แต่สามารถให้ความสว่าง (Brightness) สูงกว่า 10 เท่า มีอายุการทำงานนานกว่า แต่มีข้อเสียคือ ราคาแพง และต้องการสภาพการทำงานที่เป็นสุญญากาศที่พิเศษ

3. แหล่งกำเนิดแบบฟิลด์ฟิลด์อิมิชชัน (Cold Field Emission Source) แหล่งกำเนิดชนิดนี้ทำจากทังสแตนเช่นกัน แต่ใช้หลักการทำงานของการทะลุผ่านกำแพงศักย์แบบควอนตัม (Quantum tunneling) และสามารถให้ความสว่างสูงมาก ทำงานที่อุณหภูมิห้อง

4. แหล่งกำเนิดแบบช็อตคีย์ฟิลด์อิมิชชัน (Schottky Field Emission Source) แหล่งกำเนิดชนิดนี้ ใช้หลักการทำงานของการทะลุผ่านกำแพงศักย์แบบควอนตัม เช่นเดียวกัน แต่ต่างกันตรงที่ป็นอิเล็กตรอนชนิดนี้ ทำจากทังสแตน ที่เคลือบด้วย ZnO และต้องทำงานที่อุณหภูมิสูงประมาณ 1800°K เชนส์อิเล็กตรอนเนื่องจากอิเล็กตรอนเป็นอนุภาคที่มีประจุลบ เมื่อเคลื่อนที่ผ่านสนามแม่เหล็กจะมีแรงมากระทำกับลำอิเล็กตรอน ดังนั้นเราสามารถนำหลักการนี้ในการโฟกัสลำอิเล็กตรอนได้ ซึ่งเราจะเรียกเครื่องมือที่สร้างสนามแม่เหล็กสำหรับโฟกัสลำอิเล็กตรอนนี้ว่า Condenser lens โดยจะประกอบด้วยขั้วแม่เหล็กสองขั้วและอาศัยขดลวดทองแดงสำหรับสร้างสนามแม่เหล็กเมื่อให้กระแสไฟฟ้า กลางเลนส์แม่เหล็กจะมีช่องสำหรับให้ลำอิเล็กตรอนผ่าน แรงแม่เหล็กจะบีบลำอิเล็กตรอนไปโฟกัสที่จุดโฟกัส ส่วนเลนส์วัตถุ (Objective lens) ซึ่งเป็นเลนส์อันสุดท้ายนั้น ทำหน้าที่โฟกัสลำอิเล็กตรอนให้ไปตกกระทบบที่ผิวของวัตถุเป้าหมายโดยมีคอยล์กวาดภาพ (Scan coil) ทำหน้าที่กวาดลำอิเล็กตรอนบนผิววัตถุอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron) เมื่อลำอิเล็กตรอนพุ่งเข้าชนชิ้นงานจะถ่ายเทพลังงานให้อะตอมในสารตัวอย่าง ซึ่งหากพลังงานที่อิเล็กตรอนได้รับสูงกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอะตอม อิเล็กตรอนก็จะหลุดออกจากอะตอมกลายเป็นอิเล็กตรอนทุติยภูมิ ซึ่งสัญญาณชนิดนี้มีความสำคัญมากในการศึกษาลักษณะพื้นผิวของชิ้นงาน เนื่องจากโอกาสการเกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิจะขึ้นอยู่กับความลึกที่อิเล็กตรอนปฐมภูมิที่พุ่งชนสามารถเคลื่อนที่ผ่านชิ้นงาน หากอิเล็กตรอนปฐมภูมิสามารถแทรกผ่านชิ้นงานได้ลึก โอกาสเกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิก็จะน้อยลง ดังนั้นอิเล็กตรอนทุติยภูมิส่วนใหญ่จะเกิดจากบริเวณพื้นผิวของชิ้นงาน หัววัดสัญญาณอิเล็กตรอน (Electron Detector) จะเลือกเฉพาะสัญญาณที่ต้องการเนื่องจากบริเวณผิวจะมีสัญญาณที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่างอะตอมของชิ้นงานและอิเล็กตรอนที่พุ่งเข้าชนหลายชนิดหากสัญญาณที่ต้องการนำไปสร้างภาพคืออิเล็กตรอนทุติยภูมิ อิเล็กตรอน

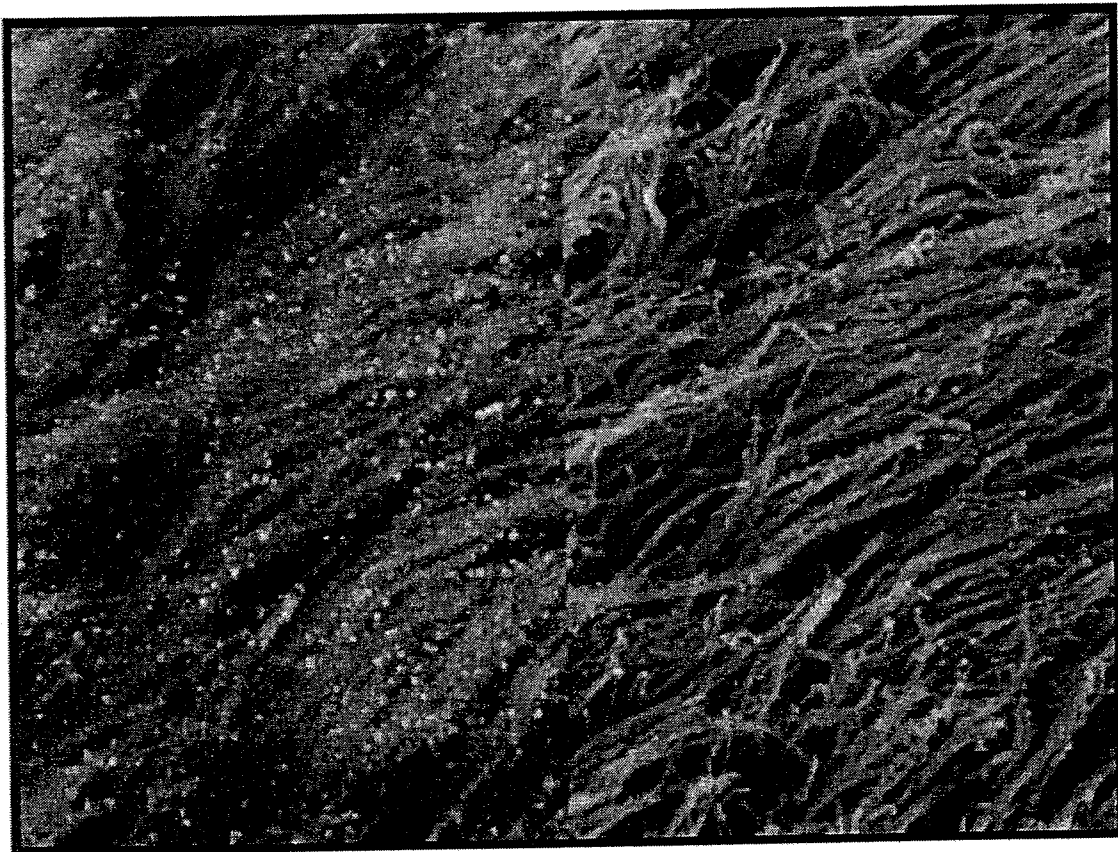
ทุติยภูมิ จะถูกดึงด้วยสนามไฟฟ้าจากหัววัดสัญญาณ ซึ่งอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะมีพลังงานต่ำจึงเคลื่อนที่อยู่บริเวณผิวของชิ้นงาน เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนเข้าสู่หัววัดสัญญาณจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่เข้าชน Scintillator (ทำมาจาก CaF₂) ทำให้เกิดโฟตอน ซึ่งจะถูกส่งไปตาม Light guide เพื่อเปลี่ยนสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้าและนำไปขยายสัญญาณต่อไป

2.6.1.2 การเกิดภาพของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

เมื่ออิเล็กตรอนปฐมภูมิตกกระทบผิวชิ้นงานจะทำให้เกิดผลจากอันตรกิริยาต่างๆภายในระบบ หัววัดสัญญาณจะตรวจวัดสัญญาณต่างๆที่เกิดขึ้น เช่น อิเล็กตรอนทุติยภูมิหรือ Backscatter electron และนำสัญญาณไปแสดงออกบนจอ Cathode Ray Tube (CRT) โดย SEM จะมีระบบชุด Scanning coil ซึ่งเป็นขดลวดที่ใช้สร้างสนามแม่เหล็กสำหรับควบคุมการกราดของลำอิเล็กตรอนไปบนผิวของชิ้นงาน ซึ่งสัญญาณที่ควบคุมการกราดของลำอิเล็กตรอนนี้จะทำงานเข้าจังหวะกับชุดควบคุมการแสดงผลตำแหน่งบนจอภาพแบบจุดต่อจุด ปริมาณของสัญญาณอิเล็กตรอนจะถูกนำไปควบคุมความสว่างบนจอ รูปที่ 3.3 เป็นภาพตัวอย่างของคาร์บอนนาโนทิวบ์ เนื่องจากพื้นที่ในการกราดลำอิเล็กตรอนบนชิ้นงานมีขนาดเล็กกว่าพื้นที่แสดงผลบนจอภาพ ดังนั้นเราจะได้กำลังขยายของกล้อง SEM คือ

$$\text{กำลังขยาย} = \frac{\text{พื้นที่แสดงผลบน CRT}}{\text{พื้นที่กราดลำอิเล็กตรอนบนชิ้นงาน}}$$

สำหรับความละเอียดของภาพจะขึ้นอยู่กับความเร็วของการกราดลำอิเล็กตรอน ถ้าใช้ความเร็วในการกราดมีค่าสูงก็จะทำให้ภาพมีความละเอียดต่ำ และหากใช้ความเร็วในการกราดลำอิเล็กตรอนต่ำก็จะทำให้ภาพมีความละเอียดสูง ซึ่งเราสามารถควบคุมความเร็วของการกราดลำอิเล็กตรอนด้วยอุปกรณ์ Scanning coil



รูปที่ 2.23 ภาพถ่าย SEM ของคาร์บอนนาโนทิวบ์

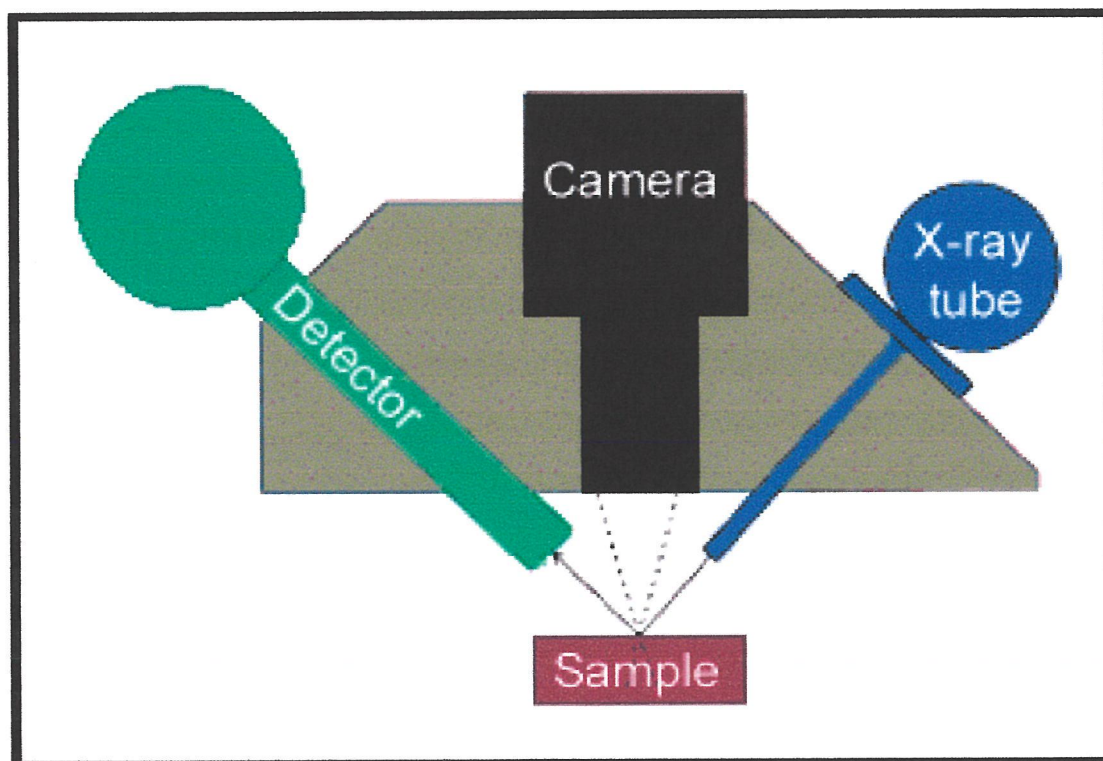
2.6.2 การวิเคราะห์ธาตุด้วยระบบ Energy Dispersive X-ray (EDX) จากสัญญาณ X-Ray

EDX หรือ EDS เป็นเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์หาองค์ประกอบของธาตุ ในของแข็งและของเหลวโดยการฉายด้วยรังสีเอกซ์ เพื่อวิเคราะห์การกระจายของพลังงานของรังสีเอกซ์ที่ได้จากอะตอมของชิ้นงาน โดยจะแสดงความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ตรวจวัดได้บนแกนตั้งและแสดงค่าพลังงานบนแกนนอน เป็นค่าพลังงานที่ได้จากการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนวงนอกเข้าสู่วงในซึ่งจะมีความเฉพาะเจาะจงของอะตอมแต่ละธาตุ ในการวิเคราะห์ ชิ้นงานที่ต้องการตรวจสอบ จะถูกฉายด้วยรังสีเอกซ์ ซึ่งจะทำให้ชิ้นงานปลดปล่อย รังสีเอกซ์ซึ่งมีลักษณะเฉพาะตัวของแต่ละธาตุออกมา จากนั้น Energy dispersive detector จะตรวจสอบสเปกตรัมของรังสีที่ถูกปล่อยออกมาแล้วนำไปแสดงผลต่อไป

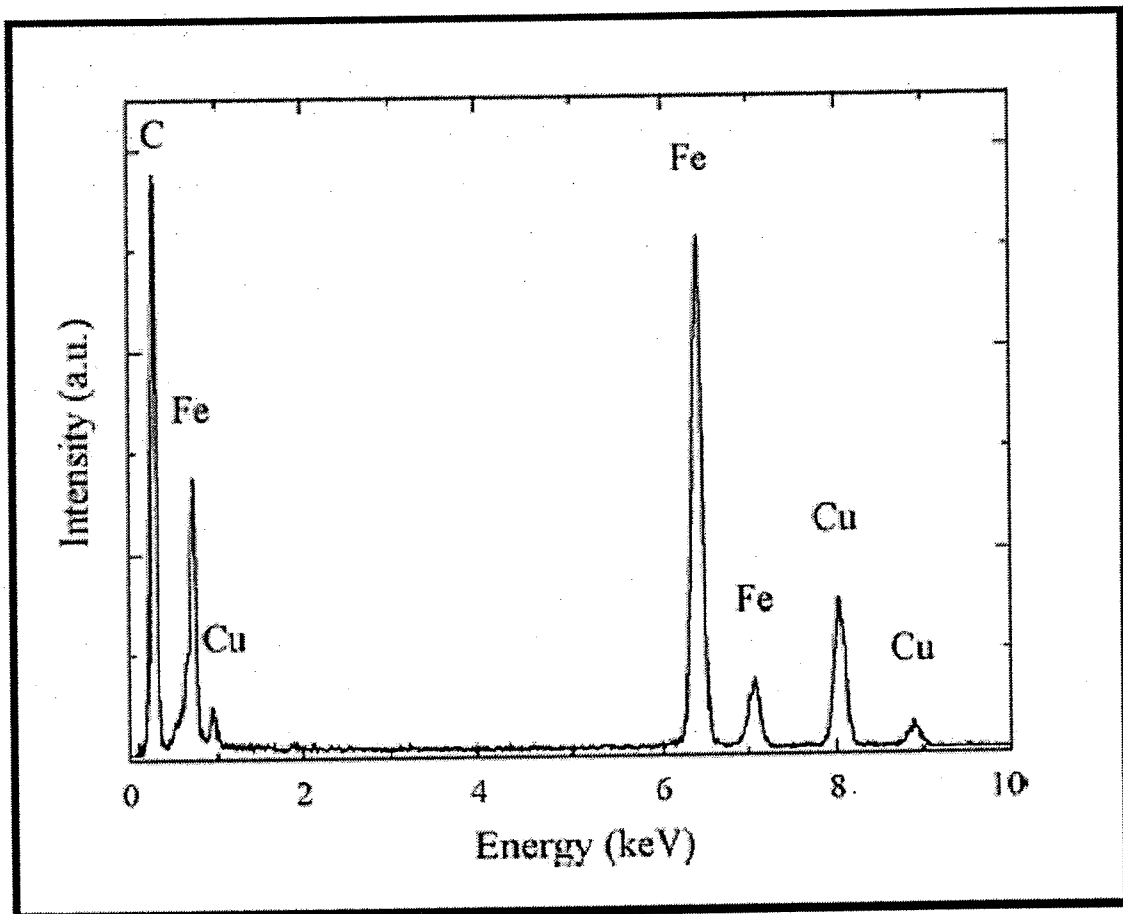
2.6.2.1 หลักการทำงานของ Energy Dispersive X-Ray (EDX)

รูปที่ 2.24 ไคอะแกรมการทำงานของเครื่องระบบ Energy dispersive X-ray เมื่อรังสีเอกซ์กระทบชิ้นงานจะมีอันตรกิริยากับอิเล็กตรอนชั้นใน เนื่องจากรังสีเอกซ์มีพลังงานมากกว่าพลังงานยึด

เหนี่ยวของอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนจะดูดกลืนพลังงานจลน์และหลุดออกไปจากอะตอม ทำให้เกิดที่ว่างในวงโคจร หลังจากนั้นอิเล็กตรอนตัวอื่นที่อยู่ในระดับพลังงานที่สูงกว่าจะเข้ามาแทนที่ อิเล็กตรอนวงนอกนี้ เรียกว่า Relaxation และอะตอมจะปล่อยรังสีเอกซ์ที่มีลักษณะเฉพาะของแต่ละอะตอมออกมาในระดับพลังงานที่สูงกว่าจะตกเข้าไปแทนที่และปลดปล่อยพลังงาน ผลของพลังงานนี้ จะทำให้อิเล็กตรอนที่อยู่ในระดับพลังงานที่สูงกว่าหลุดออกไป เรียกว่า Auger electron ซึ่งเป็นอิเล็กตรอนตัวสุดท้ายที่ได้จากกระบวนการ Auger emission โดยรังสีเอกซ์จะทำให้อิเล็กตรอนตัวแรกหลุดออกไปจากวงใน ทำให้เกิดที่ว่างของอิเล็กตรอนตัวที่สอง รูปที่ 2.25 เป็นภาพถ่ายตัวอย่างจาก EDX ขององค์ประกอบธาตุต่างๆ



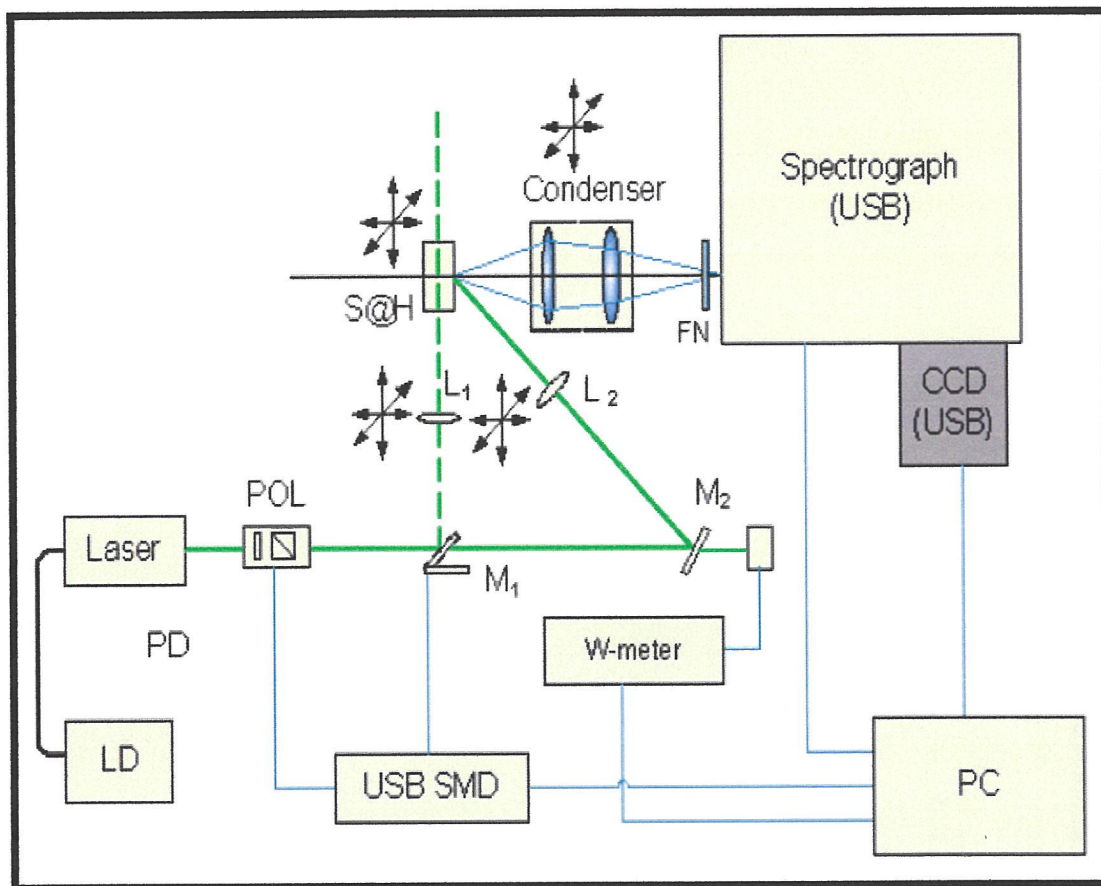
รูปที่ 2.24 ไดอะแกรมการทำงานของเครื่อง ระบบ Energy Dispersive X-Ray (EDX)



รูปที่ 2.25 ภาพจาก EDX ขององค์ประกอบธาตุต่างๆ

2.6.3 การวิเคราะห์คุณภาพของธาตุด้วยเทคนิค Raman spectroscopy

Raman Spectroscopy เป็นรูปแบบหนึ่งของ Vibration Spectroscopy เช่นเดียวกับ Infrared (IR) Spectroscopy แต่แถบอินฟราเรดเกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนโมเมนต์ขั้วคู่ (dipole moment) ส่วนแถบรามานเกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยน ความเป็นขั้วได้ (polarizability) มีหลายกรณีที่การทรานซิชันเกิดขึ้นได้ในกรณีของรามาน แต่ไม่สามารถเกิดขึ้นได้ในกรณีของอินฟราเรด



รูปที่ 2.26 องค์ประกอบพื้นฐานของเครื่อง Raman Spectrometer

รูปที่ 2.26 แสดงองค์ประกอบพื้นฐานของเครื่อง Raman Spectrometer โดยทั่วไป เครื่อง Raman Spectrometer จะมีส่วนประกอบพื้นฐาน 3 ส่วน คือ ส่วนเลเซอร์ ส่วนของ Probe และ ส่วน Spectrograph

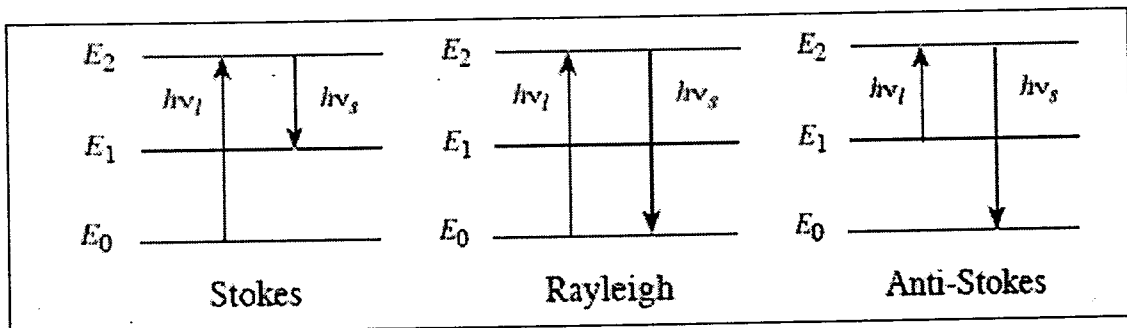
Laser : เลเซอร์จะถูกใช้ในระบบของ Raman Spectrometer เนื่องจากเป็นแสงที่มีความยาวคลื่นค่าเดียว

Probe : โพรบจะทำหน้าที่วัดปริมาณของโฟตอนที่กระเจิงออกมา โดยกรอง Rayleigh scatter และสัญญาณอื่นๆ ออกไป แล้วส่ง Raman scatter ไปยัง spectrograph มี Probe บางชนิดที่ทำหน้าที่โพกัสลำแสงเลเซอร์ซึ่งตกกระทบชิ้นงานด้วย

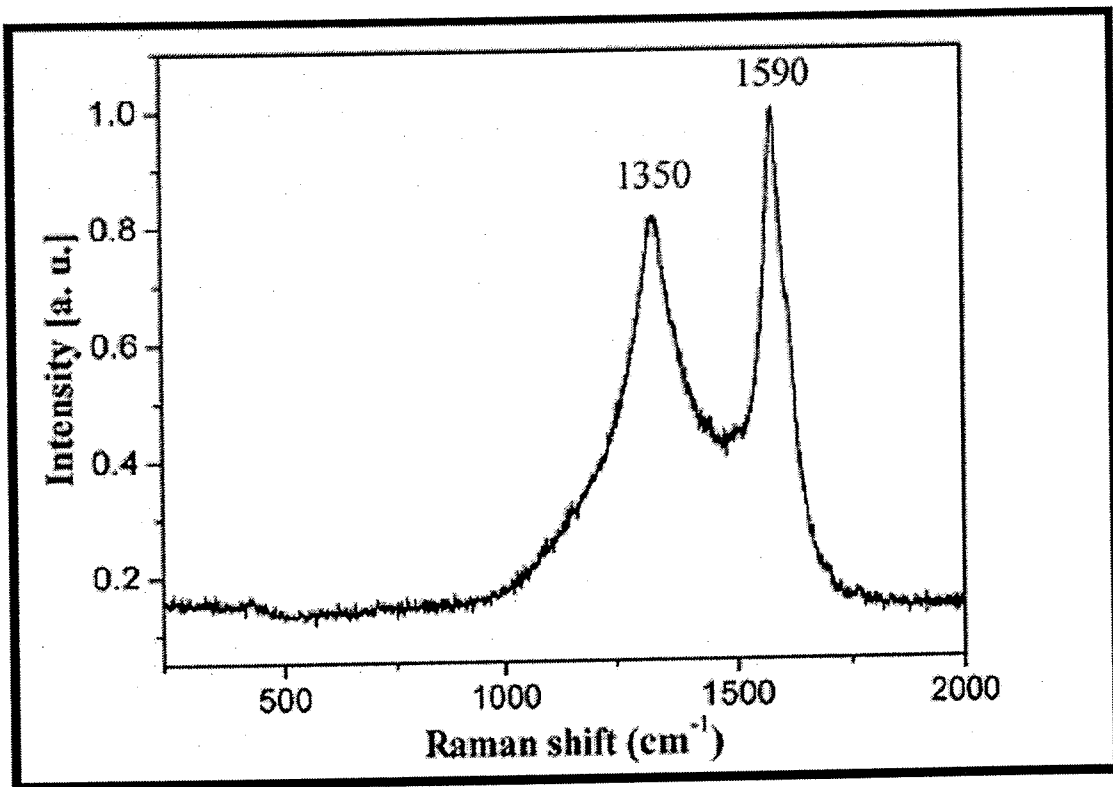
Spectrograph : เมื่อ Spectrograph ได้รับ Raman scatter ก็จะส่งต่อผ่านเกรตติงเพื่อแยกตามความถี่ แล้วส่งต่อไปยัง detector ซึ่งจะทำการบันทึกความเข้มของ Raman scatter ในแต่ละค่าความยาวคลื่น ซึ่งข้อมูลที่ได้จะนำมา เขียนลักษณะของ Raman Spectrum

2.6.3.1 หลักการทำงานของ Raman Spectroscopy

เมื่อลำแสงกระทบสารตัวอย่าง โฟตอนจะถูกดูดกลืนและกระเจิงออกมา ส่วนใหญ่โฟตอนที่กระเจิงออกมามีความยาวคลื่นเดียวกันกับความยาวคลื่นที่ตกกระทบ เรียกส่วนนี้ว่า Rayleigh scatter ซึ่งอิเล็กตรอนจะกลับสู่ระดับพลังงานเดิม ก่อนที่จะได้รับการกระตุ้นจากโฟตอน แต่มีโฟตอนบางส่วน (ประมาณ 1 ใน 107) ที่กระเจิงออกมามีความยาวคลื่นเปลี่ยนไป โฟตอนที่มีความยาวคลื่นเปลี่ยนไปนี้เรียกว่า Raman scatter โฟตอนที่เป็น Raman scatter นี้ ส่วนใหญ่จะมีความยาวคลื่นมากกว่า ความยาวคลื่นของโฟตอนที่ตกกระทบ (Stokes shift) แต่ก็มีส่วนน้อยที่มีความยาวคลื่นน้อยกว่าความยาวคลื่นของโฟตอนที่ตกกระทบ (anti-Stokes shift) Raman scattering ทั้งสองแบบ อิเล็กตรอนจะไม่ได้กลับมาสู่ระดับพลังงานเดิม Stokes Raman scattering ระดับพลังงานสุดท้ายของอิเล็กตรอนสูงกว่าระดับพลังงานเริ่มต้น ส่วน anti-Stokes Raman scattering ระดับพลังงานสุดท้ายของอิเล็กตรอนมีพลังงานต่ำกว่าระดับพลังงานเริ่มต้น Stokes scattering จะมีปริมาณมากกว่า anti-Stokes scattering จากรูปที่ 2.27 แสดงระดับพลังงานของ Rayleigh Scattering, Stokes Raman scattering และ anti-Stokes scattering แต่ละกรณี โฟตอนที่ตกกระทบจะกระตุ้นอิเล็กตรอนให้ขึ้นไปอยู่ในระดับพลังงานที่สูงกว่า (virtual state) เมื่ออิเล็กตรอนกลับสู่ระดับพลังงานที่ต่ำกว่า ก็จะปล่อยโฟตอนออกมาสเปกตรัมแบบรามานจะเป็นกราฟระหว่าง ความเข้มของรังสีรามานที่กระเจิงออกมา เทียบกับความถี่ที่แตกต่างออกไปจากความถี่ของแสงตกกระทบ (นิยมใช้หน่วยของเลขคลื่น, cm^{-1}) ซึ่งความแตกต่างของความถี่นี้จะเรียกว่า Raman Shift ค่าที่ใช้ในการสร้างกราฟนิยมใช้ความถี่ในย่านของ Stokes รูปที่ 2.28 เป็นตัวอย่างของกราฟรามานที่ได้จากการบอมนาโนทิวส์



รูปที่ 2.27 ระดับพลังงานของ Rayleigh Scattering, Stokes Raman scattering และ anti-Stokes scattering



รูปที่ 2.28 กราฟรามานที่ได้จากคาร์บอนนาโนทิวบ์

โดยทั่วไปแล้ว ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยเทคนิครามาน มีความถี่ที่สนใจอยู่ 3 ย่านคือ

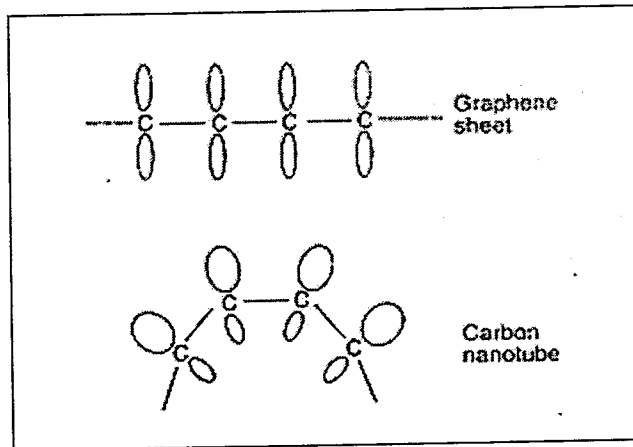
1) ความถี่ที่อยู่ในช่วง $<200 \text{ cm}^{-1}$ จะเรียกย่านความถี่นี้ว่า RBM (radial breathing mode) หากมีความถี่ในช่วงนี้เกิดขึ้น แสดงว่าเป็นคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังชั้นเดียว

2) ความถี่เฉลี่ยประมาณ 1340 cm^{-1} เรียกว่าย่าน D-Band ซึ่งเป็นย่านที่เกี่ยวข้องกับการเกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่มีพันธะไม่สมบูรณ์หรือมี Defect ในย่านนี้ ไม่ควรจะมีค่าสูงของพีคมากนัก เพราะเป็นย่านที่แสดงถึงความไม่สมบูรณ์หรือมีสิ่งเจือปนที่อยู่ในรูปแบบของผลึกที่เราไม่ต้องการให้เกิดขึ้น

3) ความถี่เฉลี่ยประมาณ $1500 - 1600 \text{ cm}^{-1}$ เรียกว่าย่าน G-Band ซึ่งเป็นย่านที่เกี่ยวข้องกับการเกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่มีพันธะสมบูรณ์ ในส่วนของพีคที่แสดงถึงความบริสุทธิ์นั้น ความกว้างของแถบ G-band ยังบ่งบอกถึงคุณสมบัติการเป็นตัวนำที่ดีหรือสารกึ่งตัวนำของคาร์บอนนาโนทิวบ์อีกด้วย ดังนั้น การวิเคราะห์คุณภาพของคาร์บอนนาโนทิวบ์ จะหาได้จากการนำค่าพื้นที่ใต้กราฟของพีค G มาหารกับพีค D หรืออัตราส่วนของ $I(G)/I(D)$ ซึ่งค่าที่มากจะแสดงถึงความบริสุทธิ์ของคาร์บอนนาโนทิวบ์

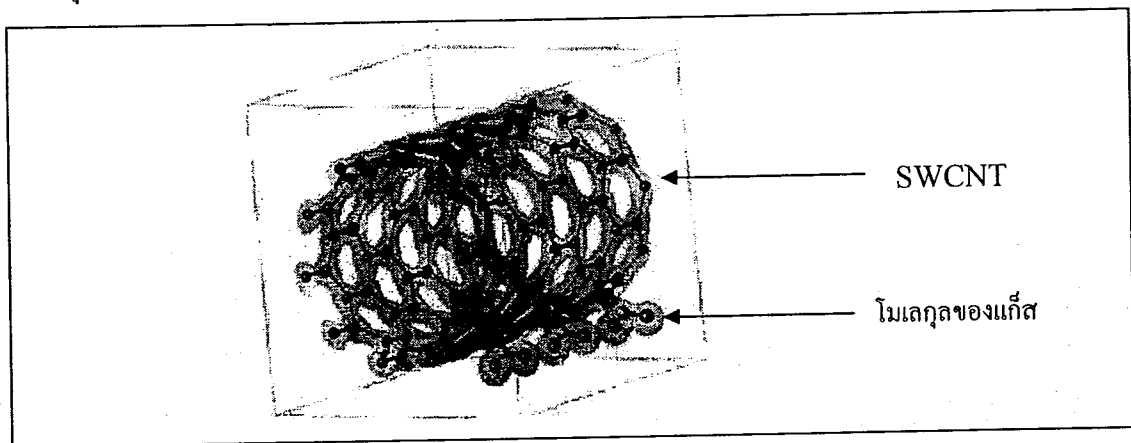
2.7 หลักการพื้นฐานของคาร์บอนนาโนทิวบ์สำหรับเซนเซอร์เคมี

ไฟฟ้าเคมี (electrochemistry) เกิดจากการถ่ายประจุจากขั้วหนึ่งไปยังอีกขั้วหนึ่ง เซลล์ไฟฟ้าเคมีอันหนึ่งจึงต้องประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าอย่างน้อย 2 ขั้วจึงเกิดเป็นวงจรปิดได้ ประจุที่ถ่ายเทในขั้วตัวอย่างอาจเป็นทั้งอิเล็กตรอนหรือโฮลหรือทั้งสองอย่าง แผ่นกราฟีนที่ประกอบกันเป็นผนังท่อคาร์บอนนาโนทิวบ์ มีลักษณะโค้ง อิเล็กตรอนจึงสามารถเปลี่ยนรูป จากที่กระจายตัวอย่างสม่ำเสมออยู่รอบๆ C-C backbone เป็นการกระจายตัวอย่างไม่สมดุลทั้งด้านในท่อและนอกท่อ คาร์บอนนาโนทิวบ์ทรงกระบอก (cylindrical sheet) ดังแสดงในรูปที่ 2.29



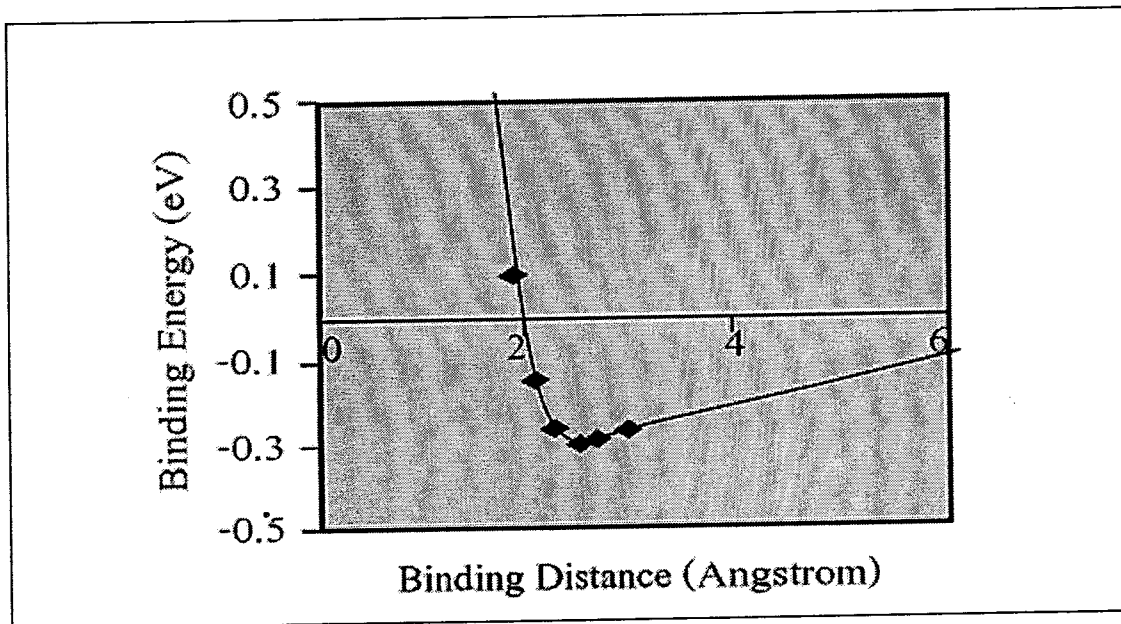
รูปที่ 2.29 แสดงการกระจายของอิเล็กตรอนบน ระนาบแผ่นกราฟีนที่ผนังท่อคาร์บอนนาโนทิวบ์

เนื่องจากอิเล็กตรอนมีการผิดรูปด้านนอกท่อ จึงมีเฉพาะ π - electron ส่งผลให้เกิดไฟฟ้าเคมี คาร์บอนนาโนทิวบ์ขึ้นกับโมเลกุลของแก๊ส $CO_2, NO_2, NH_3, O_2, C_2H_5OH$ เป็นต้น โดยมีโมเลกุลของการยึดเกาะโมเลกุลของแก๊สกับคาร์บอนนาโนทิวบ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.30



รูปที่ 2.30 แสดงโมเดลการยึดเกาะ โมเลกุลของแก๊สจำนวน 3 โมเลกุล กับ SWCNT

หลังการยึดเกาะ (Binding Energy) ของโมเลกุลแก๊สกับคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังเดี่ยว จะเป็นฟังก์ชันกับระยะทางจาก โมเลกุลของแก๊สถึงคาร์บอนนาโนทิวบ์ซึ่งจากการคำนวณกับ โมเลกุลแก๊สของ NO_2 ที่มีโครงสร้างการยึดเหนี่ยวกับคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังเดี่ยว ตาม โมเดลรูปที่ 2.30 จะมี adsorption Energy ประมาณ 0.3 อิเล็กตรอนโวลต์ ดังแสดงในรูปที่ 2.31



รูปที่ 2.31 แสดงความสัมพันธ์ของพลังงานการยึดเหนี่ยวกับระยะทางการยึดเหนี่ยวของ NO_2 กับ คาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังเดี่ยว

พบว่า โมเลกุลของแก๊สที่กล่าวข้างต้นมีการแพร่ที่สูงบนพื้นผิวคาร์บอนนาโนทิวบ์ จากการ วิเคราะห์ด้วยความหนาแน่นอิเล็กตรอนแสดงให้เห็นว่า ประจุอิเล็กตรอนที่เกิดจากการเหนี่ยวนำ จากอะตอมคาร์บอนกับโมเลกุลของแก๊ส จะถูกถ่ายหรือดึงจากคาร์บอนนาโนทิวบ์ ทำให้มีประจุ พาหะ (carrier) มากขึ้นหรือลดลง ทำให้การนำไฟฟ้าของคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังเดี่ยวและ ชนิดหลายผนัง เพิ่มขึ้นหรือลดลงตามลำดับ ปฏิริยาไฟฟ้าเคมีทั่วไปเขียนได้ดังนี้



เมื่อ δ คือ ตัวเลขแสดงจำนวนประจุที่ถูกถ่ายระหว่างเกิดปฏิกิริยา

คุณสมบัติทางไฟฟ้าของคาร์บอนนาโนทิวบ์ขึ้นอยู่กับ โครงสร้างอะตอมและกลไกการ ผิดรูป (Mechanical deformation) เป็นสำคัญ คุณสมบัติทั้งสองทำให้ คาร์บอนนาโนทิวบ์เหมาะที่จะ เป็นเซนเซอร์ประสิทธิภาพสูงเนื่องจากไวต่อสารเคมีและไวต่อความกดดันทางกลและกายภาพ อย่างมาก

2.8 แก๊สเซนเซอร์ (Gas sensor)

โลกของเราประกอบไปด้วยแก๊สหลายชนิด บางชนิดถูกนำมาใช้ในงานอุตสาหกรรมและบางชนิดก็มีผลโดยตรงต่อสภาวะแวดล้อมการดำรงอยู่ของมนุษย์และสิ่งมีชีวิตต่างๆ จึงต้องการวัดและควบคุมเพื่อให้แก๊สในส่วนต่างๆ ของกระบวนการในอุตสาหกรรมเป็นไปตามกระบวนการที่ต้องการ เพื่อความปลอดภัยของสิ่งมีชีวิตต่างๆ

จากความจำเป็นข้างต้น จึงได้มีการพัฒนาการในการสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดปริมาณแก๊สต่างๆ และใช้ในงานหลายด้าน เช่น การตรวจจับปริมาณออกซิเจนในเตาเผาเพื่อให้การลุกไหม้ของเปลวไฟเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ การวัดปริมาณออกซิเจนในระบบบำบัดน้ำเสียเพื่อให้ปริมาณออกซิเจนในน้ำอยู่ในค่าที่ปลอดภัยต่อการบริโภค หรือการวัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ออกจากท่อไอเสียของเครื่องยนต์สันดาปเพื่อควบคุมให้เกิดมลภาวะทางอากาศต่ำที่สุด เป็นต้น

2.8.1 ธรรมชาติของแก๊สและคุณสมบัติทั่วไป

ธรรมชาติของแก๊สได้ถูกค้นพบมาเป็นเวลากว่า 300 ปีแล้ว พบว่า อากาศที่ไม่มีมลภาวะที่ระดับน้ำทะเลจะมีแก๊ส (หรือธาตุ) ต่างๆ มากมาย ดังตารางที่ 2.3 ซึ่งพบว่าจะมีไนโตรเจน (N_2) อยู่ราว 78 % แก๊สออกซิเจน (O_2) อยู่ประมาณ 21 % ที่เหลือเป็นแก๊สอาร์กอนส่วนใหญ่ราว 1% และก็มีจำนวนของแก๊สต่างๆ เช่น CO_2 และ H_2O (ในรูปของไอน้ำ) อยู่เล็กน้อย

ตารางที่ 2.3 เปอร์เซนต์ปริมาตรของแก๊สหลายๆ ชนิดในอากาศที่สะอาดและแห้ง

แก๊ส	เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร	แก๊ส	เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร	แก๊ส	เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร
N_2	78.09	CH_4	0.00015	O_3	0.000002
O_2	20.94	Kr	0.0001	NH_3	0.000002
Ar	0.93	H_2	0.00005	NO_2	0.00001
CO_2	0.032	N_2O	0.000025	SO_2	0.00000002
Ne	0.0018	CO	0.00001		
He	0.00052	Xe	0.000008		

2.8.2 โมเลกุลและไอออน (Molecules and Ions)

แก๊สที่มีสมบัติและจำนวนของอะตอมที่แน่นอนเฉพาะตัว จะเรียกว่า “โมเลกุล” ทั้งอะตอมเดี่ยวและ โมเลกุลที่สามารถได้รับอนุภาคจากตัวอื่นหรือเปลี่ยน ไปเป็นอนุภาคอื่น เรียกว่า “ไอออน”

โมเลกุล (Molecules) คือ อะตอมจำนวนหนึ่งที่ต่อเข้าด้วยกันกลายเป็นอนุภาคที่เล็กที่สุดของสาร ที่รักษาส่วนประกอบและคุณสมบัติของสารนั้นไว้ โมเลกุลจึงเป็นการรวมตัวทางเคมีของอะตอมหนึ่งตัวหรือมากกว่า แต่แก๊สเฉื่อยซึ่งไม่รวมตัวกับธาตุใดๆ จะไม่ใช่โมเลกุล เราจะเรียกอนุภาคที่เล็กที่สุดของแก๊สเฉื่อยว่า อะตอม พบว่าในอุณหภูมิสูงๆ โมเลกุลจะแยกตัวออกจากกันอยู่ในรูปของอะตอม

สารไอออน (Ionic Substances) นอกจากอะตอมและ โมเลกุล ยังมีอนุภาคชนิดที่ 3 ที่เกิดในสาร โดยเรียกอนุภาคนี้ว่า “ไอออน” คือ อะตอมหรือกลุ่มของอะตอมที่สามารถนำประจุไฟฟ้าได้

2.8.3 กฎการรั่วไหลและการแพร่กระจายของแกรแฮม (Graham's Law of Effusion and Diffusion)

การเคลื่อนที่ของอนุภาคแก๊สตรวจจับได้ 2 วิธีด้วยกัน

1. การรั่วไหล (Effusion) คือ การผ่านของแก๊สที่สามารถผ่านสิ่งกีดขวางที่มีรู เช่น ลูกโป่งที่บรรจุฮีเลียมเมื่อตั้งไว้นานจะมีขนาดไม่เท่าเดิมเนื่องจากมีฮีเลียมบางส่วนที่เล็ดลอดออกไปจากโครงสร้างธรรมชาติของยางที่ใช้ทำ

2. การแพร่กระจาย (Diffusion) หากมีใครก็ตามที่สามารถดมหรือรับรู้กลิ่นของฮีเลียมที่รั่วไหลออกมาจากข้อแรกได้ นั่นก็คือ เกิดการแพร่กระจายของแก๊สนั่นเอง

ก. อัตราการรั่วไหลและการแพร่กระจาย โมเลกุลของแก๊สที่แตกต่างกันจะเคลื่อนที่ที่อัตราแตกต่างกัน โมเลกุลที่เบากว่าจะเคลื่อนที่ได้เร็วกว่าโมเลกุลที่หนักกว่า หรืออาจกล่าวได้ว่า แก๊สไฮโดรเจนที่บรรจุในลูกโป่งจะเล็ดลอดออกมาได้เร็วกว่าแก๊สฮีเลียมและ เล็ดลอดออกมาได้เร็วกว่าแก๊สไนโตรเจน

ข. กฎของแกรแฮม กล่าวว่าการรั่วไหลของแก๊สจะแปรผกผันกับรากที่สองของมวลโมลาร์ ตามกฎของแกรแฮม อัตราการรั่วไหล (r) ของแก๊สสองตัวที่อุณหภูมิและความดันเดียวกันจะสัมพันธ์กันดังสมการ

$$\frac{r_1}{r_2} = \frac{\sqrt{MM_2}}{\sqrt{MM_1}}$$

2.8.4 แก๊สที่มีความสำคัญต่อมนุษย์

ก่อนจะทำการวัดหรือตรวจจับแก๊ส ต้องมีความเข้าใจคุณสมบัติและความสำคัญของแก๊สที่จะตรวจวัดก่อน ต่อไปจะเป็นตัวอย่างแก๊สที่มีความสำคัญ ซึ่งมีผลต่อมนุษย์

2.8.4.1 ออกซิเจน (Oxygen)

ออกซิเจน เป็นธาตุที่มีอยู่มากบริเวณเปลือกโลก แม้กระทั่งน้ำประกอบด้วยออกซิเจนถึง 88.9 % ของมวล แร่ส่วนใหญ่ก็ประกอบด้วยออกซิเจนที่อยู่ในรูปของสารประกอบออกซิเจน ซึ่งเมื่อรวมกับธาตุอื่นๆ แล้วก่อให้เกิดรูปสารประกอบใหม่ที่เรียกว่า “ออกไซด์” แก๊สออกไซด์ ได้แก่ $\text{CO}_2, \text{CO}, \text{N}_2\text{O}_4, \text{N}_2\text{O}_3, \text{NO}_2, \text{NO}, \text{N}_2\text{O}, \text{SO}_2, \text{F}_2\text{O}, \text{Cl}_2\text{O}_2, \text{ClO}_2$ และ Cl_2O (อยู่ที่ตำแหน่งด้านขวาบนของตารางธาตุ)

ออกซิเจนในอากาศจะไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ตัวมันเองจะไม่ติดไฟ แต่ช่วยให้ไฟติด ออกซิเจนในเชิงพาณิชย์ทำได้โดยการกลั่นจากอากาศแต่ก็มีจำนวนน้อย หรือไม่ก็หาจากสถานะที่บริสุทธิ์มาก นั่นคือ การแยกด้วยไฟฟ้าของสารละลายที่เป็นของเหลว หรือโดยการใช้ความร้อนแยก (Oxidation, peroxide) หรือ เกลือออกไซด์ (oxide salt)

บทบาทของออกซิเจนต่อความปลอดภัยของมนุษย์มีตัวอย่างที่เห็นได้ชัดเจน เช่น ผลกระทบ Atmospheric anoxia ที่ขาดออกซิเจนอันเนื่องจากการขึ้นไปที่สูง หรืออยู่ในที่ ที่มีออกซิเจนน้อย เป็นต้น ตัวอย่างนี้คือ ภาวะในการขาดออกซิเจนเนื่องจากกลไกต่างๆ ของมนุษย์

นอกจากนี้อันตราย จากออกซิเจนที่มีความเข้มข้นสูง อาจจะทำให้เกิดการลุกไหม้ จึงไม่ควรให้ออกซิเจนที่มีความเข้มข้นสูงอยู่ใกล้เปลวไฟ หรือในทางการรักษาผู้ป่วยพบว่าการใช้ ออกซิเจนที่มีความดันสูง อาจจะทำให้เกิดอาการชักได้ และเชื่อว่าออกซิเจนจะมีพิษต่อเอ็นไซม์ในสมอง นอกจากนี้ภาวะ Retrolental hyperplasia ในทารกซึ่งทำให้ตาบอด เป็นอาการแทรกซ้อนจากการรักษาด้วยออกซิเจนที่สำคัญด้วย ดังนั้น ในทางการพยาบาลจึงต้องมีการควบคุมความกดดันและความเข้มข้นของออกซิเจนตามความเหมาะสมของแต่ละกรณี

ส่วนบทบาทของแก๊สออกซิเจนเบื้องต้นในงานอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น การสร้างวงจรรวม การทำเหล็ก งานเชื่อม งานรักษาสิ่งแวคล้อม การบำบัดน้ำเสีย เป็นต้น

2.8.4.2 แก๊สตระกูลคาร์บอน (Carbon Species)

คาร์บอน มีอยู่ด้วยกัน 2 รูปที่เป็นแก๊สออกไซด์ซึ่งมีความเสถียรคือ คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2)

1. คาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon Monoxide) คาร์บอนมอนอกไซด์ เป็นแก๊สที่ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส นอกจากนี้มันยังมีพิษอีกด้วย เพราะว่ามันจะเข้าไปแทนที่ออกซิเจนในฮีโมโกลบิน (Hb) ในเส้นเลือดของมนุษย์ คาร์บอนมอนอกไซด์เป็นผลมาจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของเชื้อเพลิงที่มีคาร์บอนเป็นฐาน ประมาณ 80% ของ CO ในบรรยากาศมาจากรถยนต์ ส่วนการใช้ในงานอุตสาหกรรม เช่น การใช้ออกซิเจนในการถลุงเหล็กจากแร่ เป็นต้น

1.1 ระดับแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่กำหนดให้มีได้สถานประกอบการ

ระดับควบคุมการสัมผัสคาร์บอนมอนอกไซด์ในสถานประกอบการ ให้อยู่ในระดับความเข้มข้นไม่เกิน 35 พีพีเอ็ม Time Weighted Average, TWA โดยอาศัยการวัดด้วยเครื่องมือวัดคาร์บอนมอนอกไซด์ชนิด hopcalite

ระดับคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ผู้ปฏิบัติการสัมผัสต้องไม่เกิน 200 พีพีเอ็ม เป็นอันตราย ถ้าพบระดับสูงกว่านี้ต้องสั่งหยุดการทำงานและเมื่อระดับเกิน 500 พีพีเอ็ม ให้รีบอพยพคนออกจากสถานที่นั้นโดยทันที

2. คาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon Dioxide) คาร์บอนไดออกไซด์เป็นแก๊สที่ไม่มีสี ไม่ช่วยให้ติดไฟ CO_2 เป็นแก๊สเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า -78°C ที่ความดัน 1 atm CO_2 จะเป็นของแข็งมากกว่าจะเป็นของเหลว CO_2 เป็นผลมาจากการไหม้ที่สมบูรณ์ของถ่านหิน น้ำมัน แก๊สธรรมชาติ หรือเชื้อเพลิงที่มีฐานของคาร์บอน CO_2 เป็นแก๊สที่ช่วยในการดำรงชีพของมนุษย์ ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องดื่มและในเครื่องดับเพลิง ขณะที่สารอาหารในร่างกายมนุษย์ไม่ทำงาน ผลผลิตของ CO_2 บางส่วนจะช่วยให้ความเป็นกรดของเลือดเหมาะสม ความผิดปกติหนึ่งของกลไกการหายใจของมนุษย์คือ การสะอึก วิธีการรักษาคือ ให้หายใจเข้าออกถุงกระดาษเพื่อสร้างระดับ CO_2 เข้าไปในปอด CO_2 จะเข้าไปเป็นตัวกระตุ้นให้หยุดการสะอึก แต่หากมีระดับของ CO_2 ในร่างกายสูงเกินไปก็ไม่มีประโยชน์ โดยหากหายใจ CO_2 ในอากาศที่เกินกว่า 10% อาจทำให้คนหมดสติ และหากรับ CO_2 ที่ระดับสูงต่อเนื่องไปอีก อาจทำให้การหายใจล้มเหลวและตายในที่สุด

ในส่วนที่เกี่ยวข้องกับงานสิ่งแวดล้อม ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ จะถูกใช้เป็นตัวบอกระดับคุณภาพของอากาศในห้อง ถ้าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในห้องมากเกินไป (อยู่ที่ระดับไม่เกิน 1000 ppm) จะทำให้รู้สึกว้าว “อบอ้าวและอับ” คุณภาพของอากาศในห้องที่ไม่ดีเป็นเหตุให้เกิดอาการโรคอ่อนล้า สูญเสียสมาธิและเจ็บป่วยและเป็นเหตุให้เกิดความไม่สบาย

2.8.4.3 มีเทน (Methane)

เป็นรูปแบบหนึ่งของสารอินทรีย์ที่มีคาร์บอนไฮโดรเจน (ไฮโดรคาร์บอน) เป็นส่วนประกอบ มีสูตรเคมีเป็น CH_4 เกิดจากธรรมชาติจากการนำหมักหมมในหนองบึง หรือการสลายตัวของโปรตีน มีเทนเป็นแก๊สไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่เป็นพิษ แต่ติดไฟได้ ให้คาร์บอนไดออกไซด์กับน้ำ ใช้เป็นแก๊สเชื้อเพลิง เช่นเดียวกับ อีเทน โพรเพน และบิวเทน

2.8.4.4 เบนซีน (Benzene)

มีสูตรเคมี C_6H_6 เป็นไฮโดรคาร์บอนที่มีกลิ่นและติดไฟง่าย เป็นพวกริงคอมปาวด์ ใช้ละลายไขมันและสารอินทรีย์ต่างๆ และใช้สังเคราะห์สารเคมีมากมายหลายชนิด

2.8.4.5 เมทานอลและเอทานอล (Methanol and Ethanol)

1. เมทานอล หรือเรียกว่าแอลกอฮอล์ไม้ เมทิลแอลกอฮอล์ หรือคาร์บินอลเป็นของเหลวที่ไม่มีสี คิดไฟง่าย ผสมกับน้ำได้ดี เป็นพิษต่อประสาทโดยตรง กินไม่ได้ อาจทำให้ตาบอดได้ เมื่อเป็นของเหลวจะเดือดกลายเป็นไอที่ 65°C เมทานอลใช้เป็นตัวทำละลายของสารอินทรีย์ต่างๆ และใช้ในการสังเคราะห์สารอินทรีย์ ใช้เป็นเชื้อเพลิงแทนน้ำมันเบนซินได้เป็นตัวทำละลายวัสดุอินทรีย์ เช่น เซลลูลอสและวานิช ใช้ทำพลาสติก กาวเรซินและกรดอะเซติก

2. เอทานอล หรือเอทิลแอลกอฮอล์ ระเหยกลายเป็นไอที่ 78°C เป็นของเหลวที่ไม่มีสี ไม่ติดไฟไม่เป็นพิษต่อร่างกาย นอกจากรับประทานเข้าไปมากๆ ใช้เป็นตัวทำละลายและเป็นตัวทำปฏิกิริยาในการเตรียมสารอินทรีย์ ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากเอทานอลได้แก่ การเจือจางในส่วนผสมของยาทำพลาสติก เหล้า แอลกอฮอล์และเครื่องสำอาง นอกจากนี้ยังสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงรถยนต์ได้อีกด้วย โดยในแก๊สโซลีนจะผสมเอทานอลประมาณ 10% แอลกอฮอล์ที่บริสุทธิ์ 100% จะถูกเรียกว่า “แอลกอฮอล์สัมบูรณ์” (absolute alcohol)

2.8.4.6 ไฮโดรเจน (Hydrogen)

ส่วนประกอบที่เห็นส่วนใหญ่ของไฮโดรเจนคือ น้ำ พบอยู่ในน้ำมัน แก๊สธรรมชาติ ในอนาคตจะถูกนำมาใช้ทำเป็นเซลล์เชื้อเพลิง ไฮโดรเจนมีอยู่ที่อุณหภูมิห้องแต่สามารถจะเปลี่ยนไปเป็นของเหลวที่อุณหภูมิต่ำและความดันสูง ปฏิกิริยาระหว่างออกซิเจนและไฮโดรเจนสามารถนำมาทำเป็นเซลล์เชื้อเพลิงได้ ไฮโดรเจนนั้นสามารถถูกคิดไฟได้ง่ายและได้รับความเชื่อใจให้ถูกเลือกเป็นเชื้อเพลิงในอนาคตสำหรับรถยนต์และอากาศยาน ปฏิกิริยาของมันจะทำให้ผลิตน้ำออกมา เป็นผลให้ไม่เกิดมลภาวะ

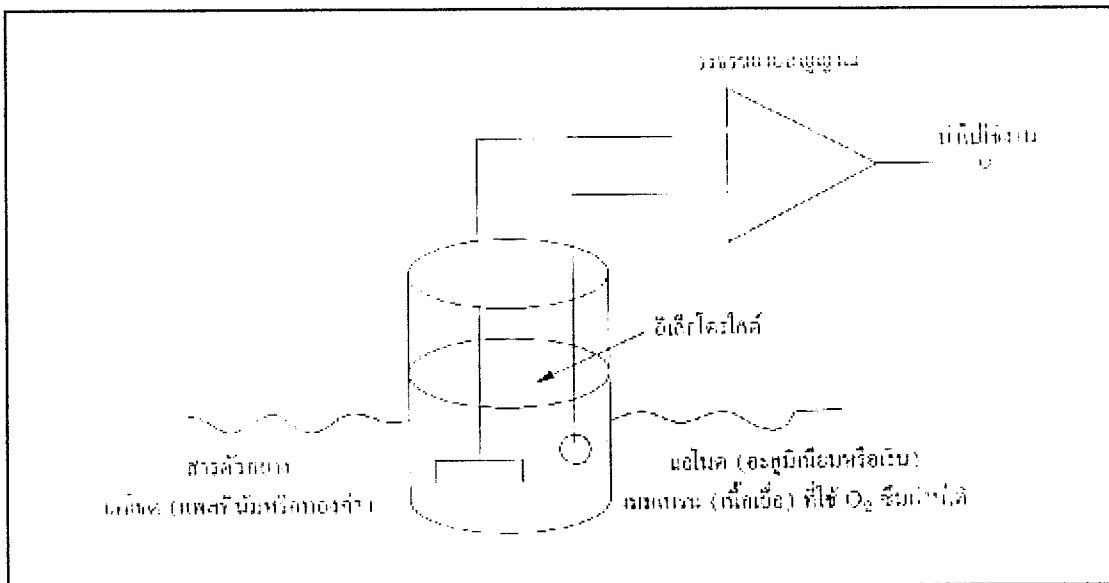
2.8.5 หลักการตรวจวัดแก๊สแบบต่างๆ

เราพบว่าส่วนมากการวัดปริมาณแก๊สในอุตสาหกรรมแทบทุกชนิด จะใช้หลักการทางไฟฟ้าทั้งสิ้น ดังนั้นเราจึงต้องรู้คุณสมบัติทางไฟฟ้าดังกล่าวของมัน ซึ่งพอจะแบ่งออกได้ดังต่อไปนี้

2.8.5.1 การวัดปริมาณออกซิเจนที่ถูกละลาย (Dissolve Oxygen)

หลักการนี้ใช้สำหรับการวัดแก๊สออกซิเจนแบบ polarographic โดยใช้เซลล์ของคลาร์ค จากรูปที่ 2.32 การวัดค่าแบบนี้อาศัยการสลายตัวของออกซิเจน (การลดออกซิเจน) ที่เกิดขึ้นที่แคโทดซึ่งเป็นโลหะ ออกซิเจนที่อยู่ในกลุ่มแก๊สที่ต้องการวัดจะถูกทำให้ผ่านเนื้อเยื่อ เพื่อทำให้มันไปอยู่ในรูปของเซลล์ O_2 ที่อิเล็กโทรด หลังจากนั้นมันจะซึมเข้าไปอยู่ในเนื้อเยื่อชั่วระยะเวลาหนึ่ง

จนสามารถอ่านค่าได้ การวัดแบบนี้ต้องป้อนศักย์ไฟฟ้าค่าหนึ่งเข้าไปในโพลารोगราฟิอิลีโทรด เพื่อทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้น กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยานี้จะเปลี่ยนการนำไฟฟ้าของ สารละลายอิเล็กโทรไลต์ ศักย์ไฟฟ้าบริเวณดังกล่าวจะทำให้เกิดปฏิกิริยาเฉพาะกับออกซิเจน เกิด กระแสไฟฟ้าที่ไหลแปรผันตรงกับปริมาณออกซิเจนในสารละลายนั้น ในการวัดแบบโพลารोगราฟิอิลีโทรดดังกล่าว จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนเอาต์พุตคงที่ออกมาค่าหนึ่งอันเนื่องมาจากอิเล็กโทรด DO ที่ หมักซึ่งจัดเป็นกระบวนการสเตอริไลซ์แล้วทำให้เกิดค่าความร้อนและกลายเป็นค่าความต้านทาน ไปในที่สุด



รูปที่ 2.32 หลักการวัดค่าออกซิเจนที่ถูกละลายแบบเซลล์ของคลาร์ก

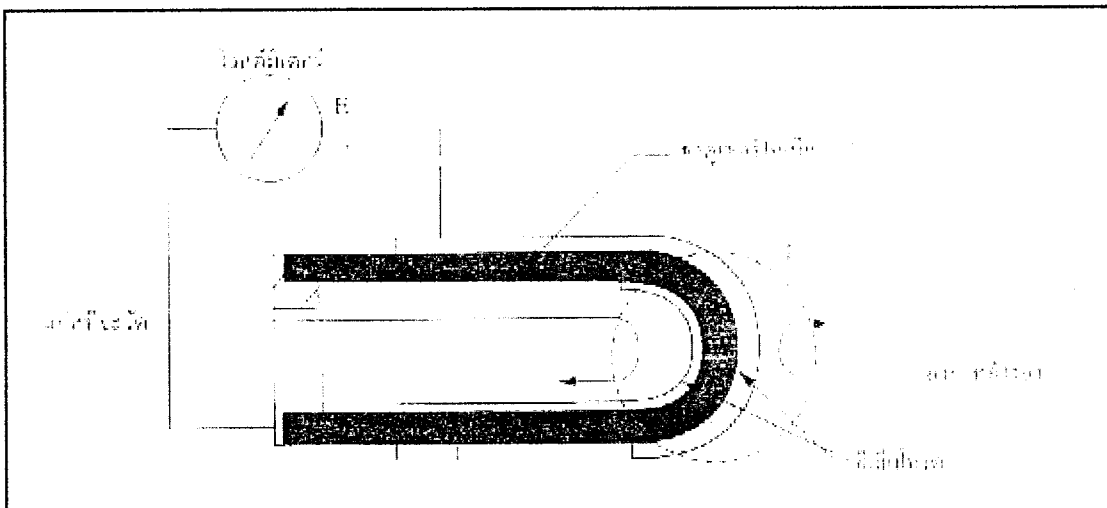
ถ้าแก๊สที่วัดมีออกซิเจนเข้มข้นน้อยกว่า 50% จะใช้วิธีการสอบเทียบค่ากับออกซิเจน ในห้อง อากาศในห้องจะมีออกซิเจนอยู่ 20.93% แต่ถ้าต้องการวัดออกซิเจนที่มีความเข้มข้นสูง กว่านี้ ต้องทำการสอบเทียบกับออกซิเจนที่ 100% แต่ในการวัดค่าแบบดังกล่าว ต้องระวังและ บำรุงรักษาเนื้อเยื่อของอิเล็กโทรดและสารที่เป็นอิเล็กโทรไลต์ เพื่อให้ผลของการวัดมีค่าแม่นยำ

สำหรับวงจรใช้งาน ตามความจริงอิเล็กโทรดของคลาร์กก็คือเซลล์ไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วย แคโทดคือ แพลทินัมและแอโนดคืออะลูมิเนียม เมื่อศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นก็ทำให้กระแสเพิ่มขึ้น แต่ จะมีช่วงหนึ่งที่เรียกว่า plateau voltage range คือช่วงที่กระแสไฟฟ้าจะไม่เพิ่มไปตามศักย์ไฟฟ้า แต่จะเพิ่มตามแรงดึงในเซลล์ ในวงจรดังกล่าวจึงต้องมีแบตเตอรี่เป็นตัวจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ต่อ ร่วมกับอิเล็กโทรดและด้านแอโนด โดยมีเนื้อเยื่อที่จะยอมให้ออกซิเจนแพร่ผ่าน เมื่อออกซิเจน แพร่ผ่านมันก็จะทำปฏิกิริยากับแคโทดให้ไฮดรอกไซด์ไอออนออกมา

ข้อควรจำในการวัดออกซิเจนแบบเซลล์ของคลาร์ก

1. เนื้อเยื่อ O_2 ที่สกปรกจะเป็นเหตุให้เกิดความผิดพลาดในการวัดค่า
2. หากว่าเราใช้ถึงความดันจะต้องใช้การสมดุลความดัน
3. สารตัวอย่างที่จะวัดต้องมีการไหลอยู่เสมอ

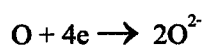
2.8.5.2 หลักการวัดออกซิเจน (O_2) โดยอาศัยหลักการของเซอร์โคเนีย



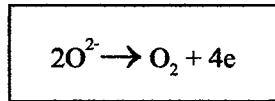
รูปที่ 2.33 หลักการวัดค่าออกซิเจนแบบเซอร์โคเนีย

จากรูปที่ 2.33 หลักการวัดออกซิเจนแบบดังกล่าวมีหลักการทำงานดังนี้ ที่อุณหภูมิสูงๆ เซอร์โคเนีย (Zirconia) ซึ่งเป็นอิเล็กโทรไลต์ที่เป็นของแข็ง จะแสดงค่าความนำด้วยไอออนของออกซิเจน โดยมีอิเล็กโทรดแพลทินัมต่อสัมผัสอยู่กับเซอร์โคเนียทั้งด้านในและด้านนอก เมื่อมีความเข้มข้นของออกซิเจนบางส่วนเพิ่มขึ้น การเคลื่อนตัวของออกซิเจนนี้จะผ่านไปยังอิเล็กโทรดของเซอร์โคเนียอีกอันหนึ่ง โมเลกุลของออกซิเจนจะได้รับอิเล็กตรอนมาจากไอออนออกซิเจนระหว่างด้านนอกและด้านในของท่อเซอร์โคเนียที่ถูกทำให้ร้อน ที่จุดนี้อิเล็กตรอนจะถูกปลดปล่อยออกมาในรูปของโมเลกุลออกซิเจน ปรากฏการณ์ดังกล่าวเป็นผลให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าจากความดันย่อยของออกซิเจน

ทางด้านข้างอิง อิเล็กโทรดซึ่งมีความดันย่อยของออกซิเจนสูง จะมีสมการเคมีเป็น



ส่วนทางด้านที่จะวัดค่าอิเล็กโทรดซึ่งมีความดันย่อยของออกซิเจนต่ำ มีสมการเคมีเป็น



เราสามารถนำสมการของ Nernst เพื่ออธิบายการคำนวณค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าโดยวัดจากค่า E ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสองเป็น

$$E = -\frac{RT}{nF} \log \frac{P_x}{P_a}$$

- เมื่อ R = ค่าคงที่ของแก๊ส
 T = อุณหภูมิสัมบูรณ์
 F = ค่าคงที่ของฟาราเดย์
 P_x = ความเข้มข้นออกซิเจนบนเซอร์โคเนียของแก๊สด้านที่จะวัด (%)
 P_a = ความเข้มข้นออกซิเจนบนเซอร์โคเนียของอากาศอ้างอิง (%)

ตัวอย่างเช่นถ้าเราใช้เซอร์โคเนียเบอร์ Z021 (ข้อมูลจากบริษัท โยโกกาว่า จำกัด) ซึ่งอุณหภูมิของเซลล์มีค่าเป็น 750° แรงเคลื่อนจากสมการ จะมีค่าเป็น

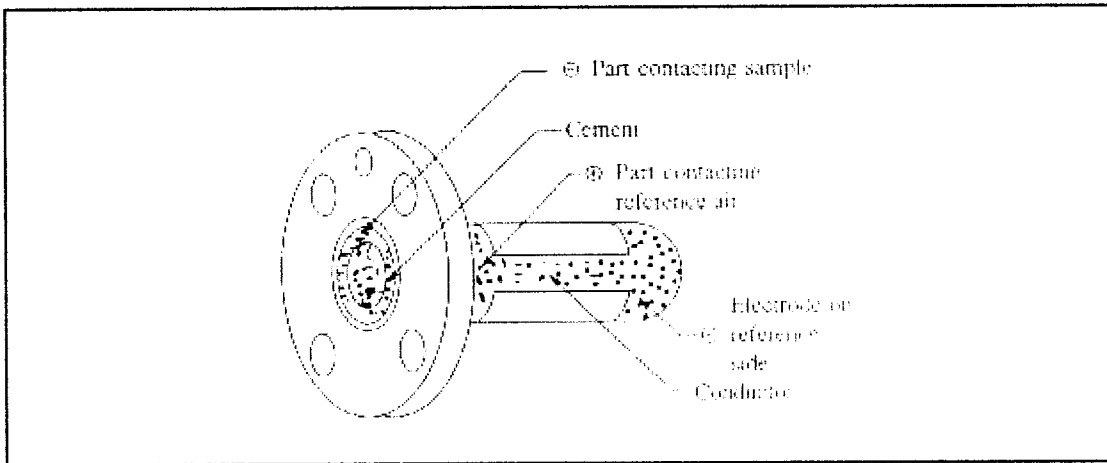
$$E = -50.74 \log \frac{P_x}{P_a}$$

แรงเคลื่อน E ที่ได้อยู่ในหน่วย มิลลิโวลต์

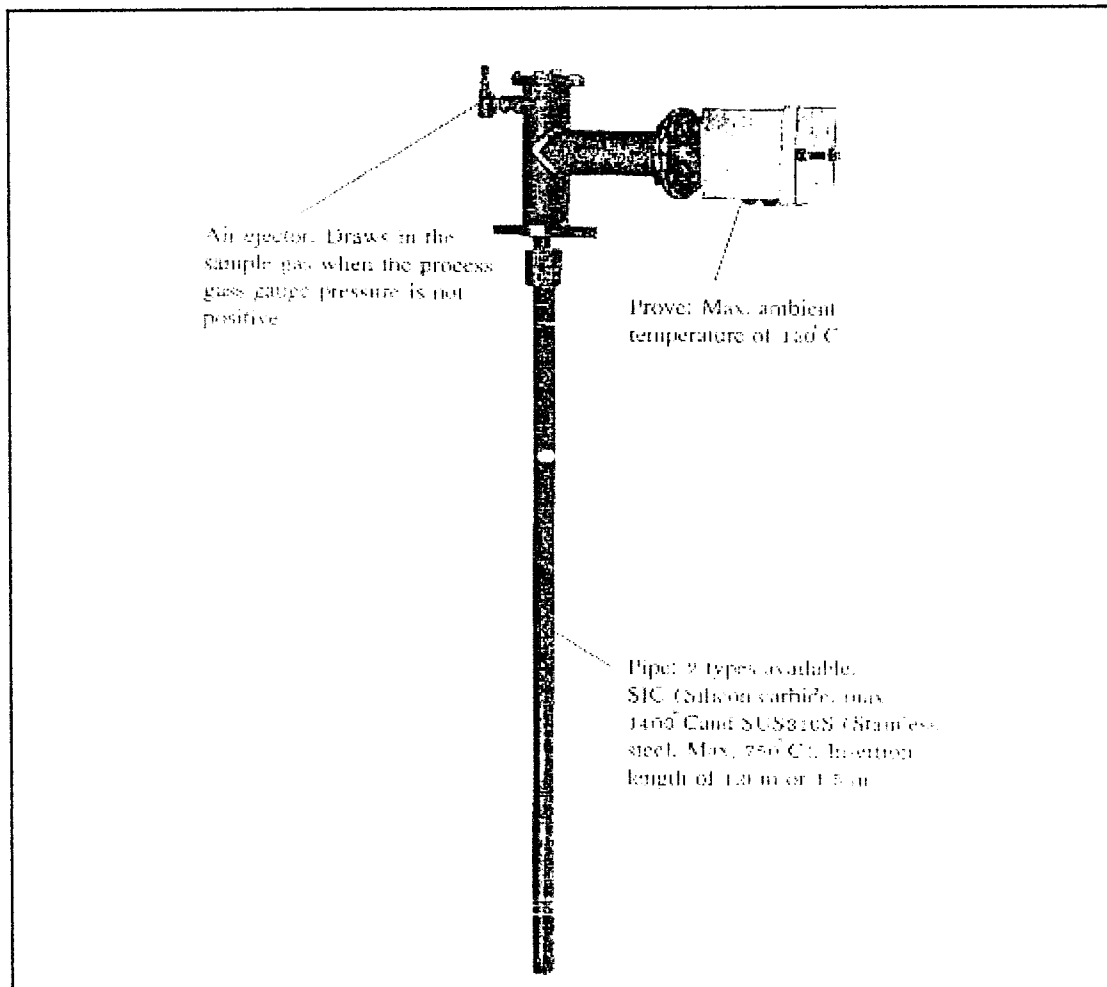
ในทางกลับกัน เราสามารถหาค่าความเข้มข้นบนเซอร์โคเนียของแก๊สด้านที่ทำการวัดได้ดังนี้

$$P_x = P_a \cdot 10^{\frac{E}{50.74}}$$

หลักการของการเซนเซอร์แบบนี้ ใช้งานกันแพร่หลายกับการวิเคราะห์แก๊ส O₂ ของปล่องไฟที่ท่อด้านในจะอยู่ร่วมกับออกซิเจน ส่วนท่อด้านนอกจะสัมผัสกับแก๊สตัวอย่างที่ต้องการวัด ยานในการวัดโดยใช้หลักการแบบนี้จะอยู่ในช่วง 0.1 – 20 % ในรูปที่ 9.5 จะแสดงลักษณะทางกายภาพของหัวตรวจวัดส่วนในรูปที่ 2.34 จะแสดงหัววัดที่ใช้งานจริงในทางอุตสาหกรรม



รูปที่ 2.34 แสดงตัวอย่างของส่วนประกอบภายในหัวเซนเซอร์แก๊ส



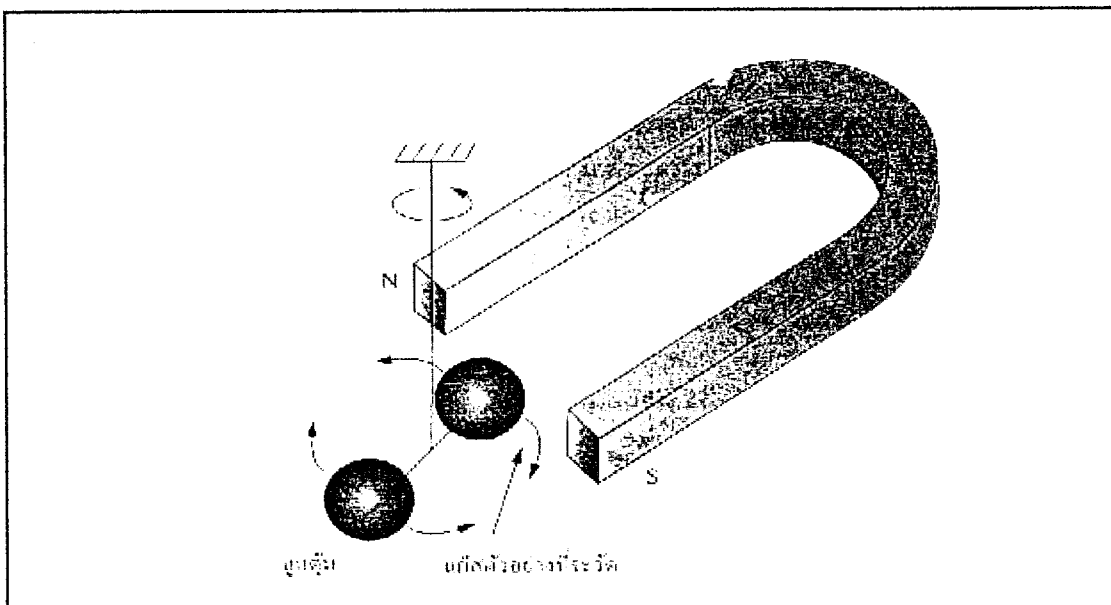
รูปที่ 2.35 ตัวอย่างของหัวเซนเซอร์วัดค่าออกซิเจน

ข้อควรจำในการวัดออกซิเจนแบบเซอร์โคเนีย

1. ขณะที่มีการเซนเซอร์จะถูกทำให้ร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า 600°C
2. การวัดแก๊สที่สามารถถูกติดไฟได้เช่น ไฮโดรเจน อาจจะทำให้การวัดเกิดความผิดพลาดได้
3. แรงดันทางด้านเอาต์พุต จะเป็นสัดส่วนแบบลอการิทึมกับความหนาแน่นของออกซิเจน

2.8.5.3 หลักการวัดออกซิเจนแบบลูกตุ้มแกว่ง (Dumbbell Type)

หลักการการวัดออกซิเจนแบบนี้จะอาศัยคุณสมบัติคือ แก๊สออกซิเจนจะไม่เหมือนแก๊สอื่นตรงที่มีคุณสมบัติเป็นแม่เหล็กแรงดึงดูดสูง จึงทำให้ออกซิเจนสามารถจะถูกดึงเข้าไปยังสนามแม่เหล็กได้ ส่วนแก๊สอื่นๆ จะมีคุณสมบัติเป็นแม่เหล็กอย่างอ่อนๆ หลักการวิเคราะห์แก๊สแบบนี้จึงถูกเรียกว่า Paramagnetic analyzer มีหลักการทำงานดังนี้คือ เมื่อนำลูกตุ้มเหล็กที่ทำจากโรเดียม (Rhodium) ไปแขวนห้อยระหว่างแม่เหล็กดังกล่าวดังรูปที่ 2.36 ลูกตุ้มจะถูกดูดเข้าหาแม่เหล็กโดยออกซิเจนที่มีอยู่ ถ้าเราป้อนสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสถิตเข้าไปเพื่อทำให้ออกซิเจนอยู่ในตำแหน่งสมดุล กระแสไฟฟ้าที่ลูกตุ้มเข้าก็จะเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของออกซิเจน ดังนั้นเราจึงสามารถตรวจจับออกซิเจนได้จากความแตกต่างของแรงบิดที่เกิดขึ้น ย่านการวัดที่สามารถวัดได้นี้จะอยู่ในช่วง 1.0 – 20 %



รูปที่ 2.36 หลักการวัดออกซิเจนแบบลูกตุ้มแกว่ง

ถึงแม้ว่าการวัดออกซิเจนด้วยวิธีนี้จะมีความแม่นยำสูง แต่ก็ยังมีข้อเสียตรงที่

1. ความเร็วในการไหลของแก๊สที่วัด ทำให้เกิดความผิดพลาดในการวัดให้
2. เครื่องมือมีโอกาสที่จะได้รับอันตรายและเสียหายง่าย
3. ความไวต่อน้ำในอากาศ มีโอกาสทำให้การวัดผิดพลาด
4. ใช้เวลาในการวัดนาน

2.8.5.4 การวัดแก๊สโดยใช้หลักการของรังสีอินฟราเรด

ก่อนที่จะเข้าหลักการในการเซนเซอร์แก๊สแบบดังกล่าวนี้ ต้องเข้าใจกระบวนการคุณสมบัติทางวิทยาศาสตร์ในการวิเคราะห์สเปกตรัมและคุณสมบัติของคลื่นแสงก่อนพอประมาณ

1. คุณสมบัติของแก๊สต่อการสเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Spectrum)

การวิเคราะห์คลื่นแสง เป็นการวัดและศึกษาผลกระทบของพลังงานที่อยู่ในสารใดๆ ซึ่งทำให้เราสามารถวิเคราะห์โครงสร้างและคุณสมบัติของอินทรีย์เคมีได้ นักวิทยาศาสตร์ที่ชื่อว่า แมกซ์ แพลงค์ (Max Planck) เป็นบุคคลที่ค้นพบความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานโฟตอนของแสงและความถี่ของมัน สมการพื้นฐานของพลังงานโฟตอนที่สัมพันธ์กับความถี่ (f) กำหนดได้เป็น

$$E = hf \quad (2.1)$$

เมื่อ h = ค่าคงที่ของแพลงค์ = 6.6242×10^{-34} J.s

f = ความถี่ของแสง (s^{-1})

หรือความสัมพันธ์อีกสมการจะได้ว่า

$$\lambda f = c \quad (2.2)$$

เมื่อ λ = ความยาวคลื่น

c = ความเร็วแสง = 2.998×10^8 m/s

หากแทนค่า $f = \frac{c}{\lambda}$ จากสมการที่ (2.2) ลงในสมการที่ (2.1) ก็จะได้

$$E = \frac{hc}{\lambda} = hc \sigma \quad (2.3)$$

เมื่อ σ = จำนวนคลื่น (รูปคลื่น / ซม. หรือ cm^{-1})

ในสมการที่ (2.1) และ (2.2) พลังงานที่ได้จะอยู่ในรูปของ จูลน์ / โฟตอน หรือ จูลน์ / โมล สมการนี้สามารถปรับปรุงใหม่ได้ดังสมการที่ (2.4)

$$E = N_0 hf = hc \sigma = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.4)$$

เมื่อ N = ตัวเลขอะโวกาโดร = 6.023×10^{23} /mol

เทคนิคในการวัดการสเปกตรัมแสง ส่วนใหญ่จะใช้โดยนักเคมีอินทรีย์ที่อาศัยผลกระทบในการฉายรังสีกับสสาร ในการดูดกลืนรังสีของสสารจะมีผลโดยทำการ “กระตุ้น” สสารและการแผ่รังสีจะเป็นผลทำให้เกิด “ความเหนื่อย” ของสสาร ธรรมชาติของปฏิกิริยาดังกล่าวนี้ ขึ้นอยู่กับพลังงานที่ฉายรังสีและความยาวคลื่นในการดูดกลืนการฉายรังสี การกระตุ้นนี้อาจทำให้เกิดพลังงานได้ในหลาย ๆ ระดับเช่น ระดับนิวเคลียร์ พลังงานระดับไฟฟ้าของอะตอมหรือโมเลกุล พลังงานระดับสันสะเทือน หรือพลังงานระดับต่ำ

ในงานอินทรีย์เคมีจะใช้การสเปกตรัมรังสีอัลตราไวโอเล็ต - แสงที่มองเห็นได้ เพื่อวัดสารละลายซึ่งจะทำให้เกิดการแข่งกันดูดกลืนการแผ่รังสีของอากาศและตัวทำละลาย ซึ่งจำกัดเวลาเพื่อให้ได้ความยาวคลื่นที่ประมาณ 200 นาโนเมตร ส่วนความยาวคลื่นที่สั้นกว่านี้ (หรือเรียกว่า “ความยาวคลื่นอัลตราไวโอเล็ตหนัก” หรือความยาวคลื่นอัลตราไวโอเล็ตสูญญากาศ) ต้องทำการวัดในสุญญากาศ โดยปกติการแผ่รังสีแสงในช่วงที่เห็นได้โดยตามนุษย์ซึ่งเห็นได้จากสีรุ้งจะมีช่วงความยาวคลื่นที่แคบมาก ๆ ประมาณ 350 นาโนเมตร (ม่วง) ถึงประมาณ 800 นาโนเมตร (สีแดง) กรแยกรังสีอัลตราไวโอเล็ต - แสงที่สามารถมองเห็นได้นี้ ถูกใช้ประโยชน์เพื่อหาโครงสร้างโมเลกุลทางไฟฟ้า ความยาวคลื่นที่ซึ่งดูดกลืนสูงสุดจะสามารถบอกรายละเอียดของจำนวนโมเลกุลสารอินทรีย์ได้ ในการแยกรังสีอัลตราไวโอเล็ต - แสงที่สามารถมองเห็นได้นี้ บางครั้งจะเรียกว่า “การวัดการสเปกตรัมทางไฟฟ้า”

ตารางที่ 2.4 การแยกคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (The Electromagnet Spectrum)

ชนิดของการแผ่รังสี	ความถี่ (Hz)	จำนวนคลื่น (cm^{-1})	ความยาวคลื่น (m)	พลังงาน (kJ / mol)	การส่งผ่านโมเลกุล
γ - ray	$\geq 10^{19}$	$\geq 10^{19}$	$\leq 10^{-11}$	$\leq 10^7$	พลังงานระดับนิวเคลียร์
X - ray	$10^{17} - 10^{19}$	$10^7 - 10^9$	$10^{-9} - 10^{-11}$	$10^5 - 10^7$	ละอองของแกนอิเล็กตรอน
Vacuum - UV	$1.5 \times 10^{15} - 3 \times 10^{15}$	$5 \times 10^4 - 10^5$	$1 \times 10^{-7} - 2 \times 10^{-7}$	600 - 1200	วาเลนซ์อิเล็กตรอน
UV	$9 \times 10^{14} - 1.5 \times 10^{15}$	$3 \times 10^4 - 5 \times 10^{10}$	$2 \times 10^{-7} - 2.5 \times 10^{-7}$	360 - 600	ระดับพลังงาน
Visible	$4 \times 10^{14} - 9 \times 10^{14}$	$1 \times 10^4 - 3 \times 10^4$	$3.5 \times 10^{-7} - 8 \times 10^{-7}$	120 - 360	(HOMOLUMO)
Infrared	$2 \times 10^{13} - 1.5 \times 10^{14}$	625 - 5000	$2 \times 10^{-6} - 1.6 \times 10^{-5}$	7 - 60	การสั่นสะเทือนของโมเลกุล
Microwave	$3 \times 10^8 - 3 \times 10^{10}$	0.01 - 1	0.01 - 1	$10^{-4} - 10^{-2}$	การหมุนของโมเลกุล
Radiofrequency	$\approx 10^6 - 10^8$	$10^{-3} - 10^{-5}$	1 - 100	$10^{-5} - 10^{-7}$	รีโซแนนซ์แม่เหล็กนิวเคลียร์

2. ความเข้มข้นสูงสุด การพิจารณาตามกฎของเบียร์ - แลมบอร์ต และความสมมาตรจุดสูงสุดแต่ละจุดในการสแกตริงของแสงอัลตราไวโอเล็ต - แสงที่มองเห็นได้ ยังสามารถจะกำหนดจากความหนาแน่นได้อีกด้วย ค่าดังกล่าวนี้สัมพันธ์กับตัวประกอบสามตัวด้วยกันคือ ความเข้มข้นของสารประกอบในสารละลาย ความหนาของสารตัวอย่างและประสิทธิภาพที่ซึ่งโครโมฟอร์ดูดกลืนแสง ความหนาแน่นในการดูดกลืนของสารประกอบอินทรีย์ส่วนใหญ่เป็นไปตามกฎของเบียร์ - แลมบอร์ต ซึ่งกล่าวว่าความหนาแน่นของการดูดกลืน จะวัดได้จากหน่วยของ

ความสามารถในการดูดกลืนได้ ดังนั้นความสามารถในการดูดกลืนได้ ก็จะแปรผันโดยตรงกับความเข้มข้นของสารละลาย และความหนาแน่นของมัน เราสามารถใช้กฎของเบียร์ – แลมเบิร์ต เขียนแสดงเป็นสมการคือ

$$A = \log_{10} \left(\frac{I_0}{I_t} \right) = \epsilon \cdot c \cdot l$$

- เมื่อ
- A = ความสามารถในการดูดกลืน
 - I_0 = ความเข้มข้นของแสงที่เกิดขึ้นบนสารตัวอย่าง
 - I_t = ความเข้มข้นของแสงที่ส่งมาจากสารตัวอย่าง
 - C = ความเข้มข้น โมลาร์ของสารตัวอย่าง
 - l = ความหนา (หรือความยาวของทางเดิน)
 - ϵ = ค่าคงที่ของทั้งสารประกอบและการส่งผ่านเฉพาะในปัญหานั้น ๆ

ค่า ϵ นี้บางครั้งเรียกว่า “สัมประสิทธิ์การดูดกลืนโมลาร์” เพื่อความสะดวกและคล่องตัวจึงไม่ค่อยแสดงหน่วยดังกล่าวนี้

การดูดกลืนโมลาร์ของการส่งผ่านอนุภาคเป็นตัววัดประสิทธิภาพการส่งผ่านของอนุภาคว่าดูดกลืนการแผ่รังสีได้คืออย่างไร หากมีประสิทธิภาพต่ำหมายความว่า การส่งผ่านของอิเล็กตรอนระหว่างวงโคจรไม่สมมาตรกัน

เทคนิคในการวัดการสเปกตรัมของสารอินทรีย์สมัยใหม่ แยกได้ออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ กลุ่มแรก คือ “เทคนิคแบบไม่ทำลาย” ซึ่งคุณสมบัติของโมเลกุลจะไม่เปลี่ยนแปลงไปหลังจากที่ทำการวัดการสเปกตรัม ส่วนกลุ่มที่สองคือ “เทคนิคแบบทำลาย” โดยโมเลกุลที่นำเข้ามาทดสอบจะถูกทำลายหลังจากที่ผ่านการวัดแล้ว

เทคนิคในการสเปกตรัมของสารอินทรีย์แบบไม่ทำลายยังแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทได้แก่

1. เทคนิคแบบ NMR (Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy) การวัดแบบนี้จะบอกรายละเอียดของโครงสร้างและรายละเอียดกลุ่มหน้าที่ของโมเลกุล ใช้การแผ่รังสีคลื่นความถี่วิทยุเพื่อการสเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (ที่ 50 ถึง 500 MHz ตรงกับช่วงพลังงานที่ประมาณ 0.02 ถึง 0.2 kJ/mol) กับสสารที่ต้องการวัด

2. เทคนิคแบบ IR (Infrared Spectroscopy) ปัจจุบันใช้มากขึ้นเรื่อย ๆ แบบนี้จะบอกรายละเอียดหน้าที่และโครงสร้างรอบๆ ด้านที่แน่นอนของโมเลกุล หรือสิ่งแวดล้อมรอบๆ ตัวมัน

ใช้ความยาวคลื่นประมาณ 2 ถึง 16 ไมโครเมตร (625 ถึง 5000 cm^{-1} ตรงกับช่วงพลังงานประมาณ 7.5 ถึง 60 kJ/mol)

3. เทคนิคแบบ Ultraviolet – visible Spectroscopy (UV - vis) ยังคงเป็นเทคนิคที่ใช้เพื่อตรวจสอบคุณสมบัติของสารประกอบระบบอิเล็กทรอนิกส์ที่มีคุณสมบัติของอิเล็กทรอนิกส์แบบหนึ่ง ขอบเขตความยาวคลื่นของช่วงอัลตราไวโอเล็ตที่สามารถมองเห็นได้ ซึ่งครอบคลุมกับงานทางอินทรีย์เคมีอยู่ในช่วงจาก 200 ถึง 800 นาโนเมตร (ช่วงของพลังงานประมาณ 150 ถึง 600 kJ/mol)

เทคนิคการตรวจวัดแบบทำลายโมเลกุลจะไม่กล่าวในที่นี้

ความยาวคลื่นต่ำสุดที่สามารถใช้กับสารละลายปกติส่วนใหญ่ ด้วยวิธีการแยกความยาวคลื่นของรังสีอัลตราไวโอเล็ต – แสงที่สามารถมองเห็นได้เป็น ดังตารางที่ 2.5 สารละลายที่เจือด้วยคลอรีน (ซึ่งอยู่ด้านล่างของเส้นประ) เทอมของความยาวคลื่นที่ใช้มีความใกล้เคียงกันมากกว่า สารละลายที่ไม่ได้เจือด้วยคลอรีน

ตารางที่ 2.5 ความยาวคลื่นต่ำสุดที่สามารถใช้ได้สำหรับสารละลายทั่วไป

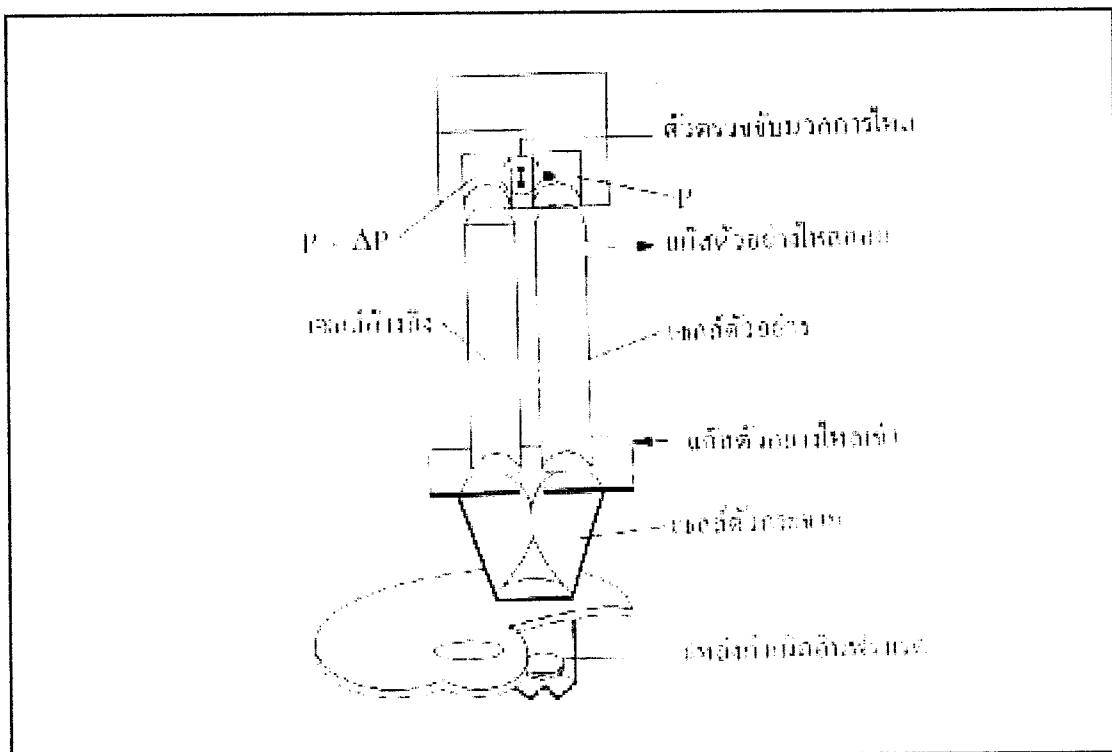
สารละลาย	ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)
อีธานอล	204
เมธานอล	203
น้ำ	191
ไซโคลเฮกเซน	195
อะเซโคโนไตร	190
เฮกเซน	201
อีเทอร์	215
เมธิลีนคลอไรด์	220
โคลโรฟอร์ม	237
คาร์บอนเตตระคลอไรด์	257

ส่วนที่จะกล่าวต่อไปนี้เป็นตัวเซนเซอร์ที่ใช้เทคนิคในการวัดด้วยการสเปกตรัมของแผ่รังสีอินฟราเรด

1. วัดการสเปกตรัมของรังสีอินฟราเรด (Infrared Spectroscopy) การแผ่รังสีแบบอินฟราเรด เป็นการกระตุ้นโมเลกุลและอิออนให้ไปสู่ระดับพลังงานสั้นสะท้อน ใช้งานกันอย่าง

มากในการสเปกตรัมสารอินทรีย์ ซึ่งจะตรงกับความยาวคลื่นประมาณ 2 ถึง 16 ไมโครเมตร (ช่วงความยาวคลื่น 625 ถึง 5000cm^{-1}) พลังงานระดับนี้จำเป็นต้องให้โมเลกุลเกิดการ “สั่น” และ ดูดกลืนการแผ่รังสีอินฟราเรดโดยโมเลกุลที่รวมกลุ่มกัน การวัดการสเปกตรัมของรังสีอินฟราเรด ดังกล่าว บ่อยครั้งจะถูกเรียกว่า “การวัดการสเปกตรัมแบบสั่นสะเทือน”

หลักการวัดแก๊สแบบนี้จะใช้รังสีอินฟราเรดที่ไม่กระจาย :NDIR หรือเรียกได้อีกอย่างหนึ่งว่าไฟโรอิเล็กทริกอินฟราเรดเซนเซอร์ เราพบว่ารังสีอินฟราเรดจะมีคุณสมบัติในการดูดกลืนแก๊ส แต่ละอย่างที่พิเศษออกไป จึงใช้ประโยชน์จากคุณสมบัติข้อนี้ในการวัดแก๊สต่าง ๆ เครื่องมือที่ใช้ วัดแสดงคังรูปที่ 2.37



รูปที่ 2.37 แสดงหลักการวัดแก๊สแบบใช้รังสีอินฟราเรด

ตัวอย่างของอุปกรณ์เซนเซอร์ที่ใช้หลักการแบบนี้ เป็นของยี่ห้อ HEIMANN ดังแสดงใน รูปที่ 2.38 ประกอบด้วยอุปกรณ์ตรวจจับแบบที่เคลือบพื้นผิว และ FET source follower โดยทำการซีลลงในตัวถังแบบ TO-5 พร้อมกับตัวกรองแสง คุณสมบัติในการกรองแสงของตัวกรองแสง จะเป็นการกำหนดย่านวัดและย่านในการวิเคราะห์แก๊ส ซึ่งครอบคลุมการดูดกลืนในช่วงการสเปกตรัมของรังสีอินฟราเรด โดยปกติการตรวจวัดแบบนี้สามารถแยกแยะแก๊สและสารประกอบ ได้หลายชนิด เช่น แอลกอฮอล์ ฟีนอล ไฮโดรเจน หรือสารประกอบอื่นๆ หลังจากนั้น จึงเอาผล

ในการดูดซับการแผ่รังสีที่อยู่ในรูปของความถี่หรือความยาวคลื่นมาแยกแยะและวิเคราะห์แก๊ส ตัวเซนเซอร์ที่ยกตัวอย่างนี้เหมาะสมสำหรับการวัดและวิเคราะห์แก๊ส CO CO₂ NO หรือ HC ข้อได้เปรียบในการวัดแบบนี้คือตัวเซนเซอร์ไม่ต้องสัมผัสกับแก๊สที่จะวัด

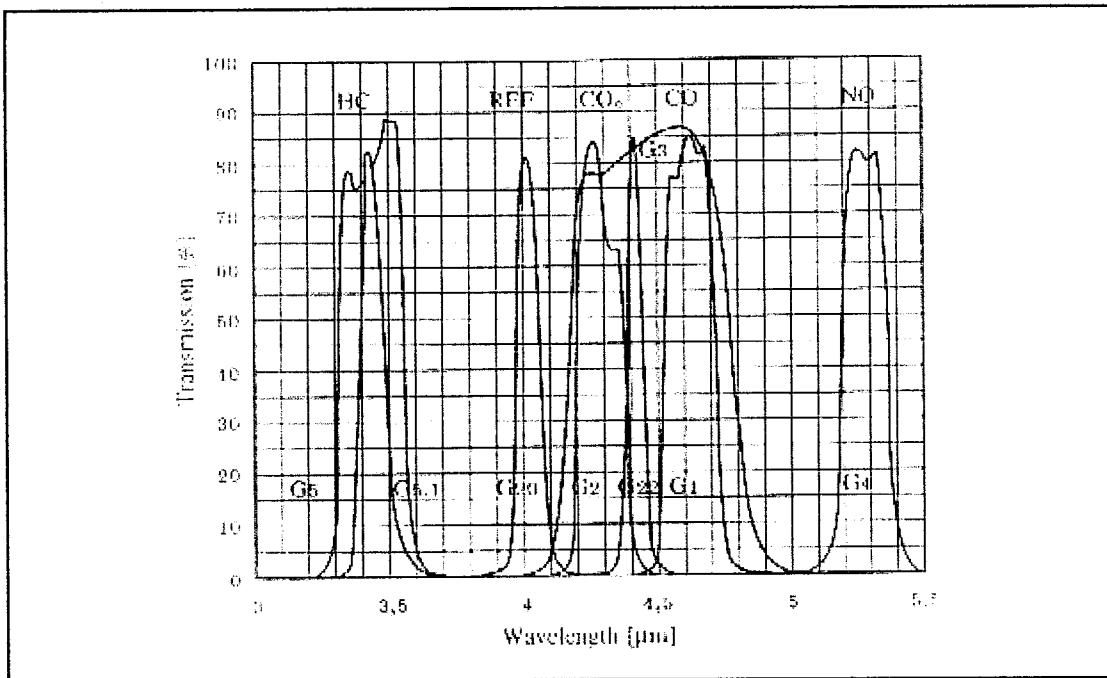
ช่วงในการสเปกตรัมรังสีอินฟราเรดที่น่าสนใจของสารอินทรีย์ อยู่ระหว่างความถี่ 4000 cm⁻¹ ถึง 650 cm⁻¹ หรืออาจพิจารณาจากการดูดกลืนรังสีตามหลักการเปออร์เซ็นต์การส่งผ่าน และความยาวคลื่นในการสเปกตรัมของแก๊สต่าง ๆ รูปที่ 2.39 เป็นการแสดงความสัมพันธ์ดังกล่าว ซึ่งเป็นช่วงใช้งานของผลิตภัณฑ์เซนเซอร์แก๊สบริษัท HEIMANN ที่ค่าต่าง ๆ



รูปที่ 2.38 เซนเซอร์แก๊ส

ข้อควรจำในการวัดแก๊สแบบนี้คือ

1. หลักการวัดแบบนี้ไม่สามารถวัดแก๊ส H₂ O₂ N₂ ฯ ได้
2. ไม่เหมาะที่จะวัดไฮโดรคาร์บอนที่มี C มากๆ
3. ต้องมีเทคนิคพิเศษในการวัดแก๊สที่มีไอน้ำอยู่ด้วยจำนวนมาก



รูปที่ 2.39 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ในการส่งผ่านแก๊สต่อความยาวคลื่นที่ได้จากการสเปกตรัมแก๊สบางอย่าง

2.8.5.4 หลักการเซนเซอร์แก๊สโดยวิธีฟิล์มหนา (Thick Film Gas Sensor)

ตัวเซนเซอร์แก๊สแบบนี้ใช้หลักการ “ฟิล์มหนาของไซแมเร็ก” เป็นแก๊สเซนเซอร์ชนิดใหม่ที่ใช้หลักการของสารกึ่งตัวนำ ตัวเซนเซอร์แบบนี้จะไม่เหมือนแบบใดตรงที่มีกระบวนการพิมพ์ลงบนระหว่างชั้นบางๆ ของฟิล์ม

ตัวเซนเซอร์แบบสารกึ่งตัวนำที่ใช้ในการตรวจจับ คลุมไว้ด้วยฟิล์มเซรามิกซึ่งมีรูให้แก๊สรั่วซึมได้หลังจากนั้นจึงให้ความร้อนอย่างรวดเร็วบนตัวตรวจจับแก๊ส โดยที่ทั้งตัวเซนเซอร์และตัวทำความร้อนจะถูกฝังไว้บนชั้นบางๆ นี้อย่างแน่นหนา เพื่อป้องกันการสั่นสะเทือนและการซ็อก

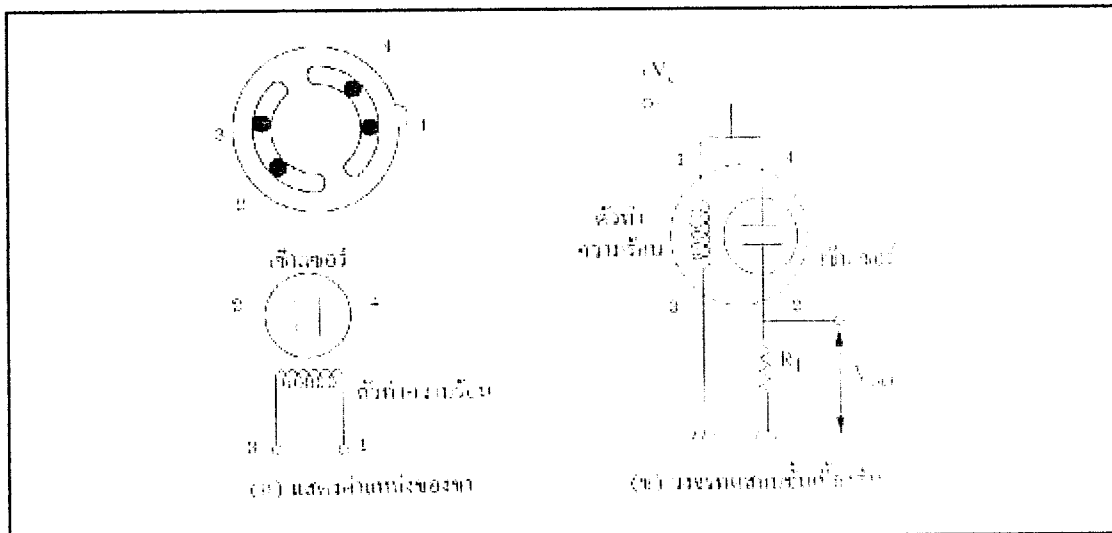
ตารางที่ 2.6 สภาวะการทำงานของตัวเซนเซอร์แก๊สแบบฟิล์มหนาของไซแมเร็ก

ตัวแปร	พิกัด
อุณหภูมิการปฏิบัติงาน	-10° C - 55° C
อุณหภูมิที่สะสม	-30° C - 85° C
ตัวต้านโหลด , RL	เปลี่ยนแปลงได้
อัตราการบริโภคกำลังของตัวเซนเซอร์ , P _s	≤ 15 mW
อัตราแรงดันทำงานของวงจร , V _c	AC หรือ DC 5 V (สูงสุด 12 V)
อัตราแรงดันทำงานของตัวทำความร้อน	AC หรือ DC 5 V ± 12 V

ตัวเซนเซอร์แก๊สแบบนี้ทำมาจากออกไซด์ของสารกึ่งตัวนำ มีหลักการทำงานงานคือ ตัวเซนเซอร์จะถูกทำให้ร้อนที่อุณหภูมิ 350°C เมื่อมันรับแก๊สเข้าไป ออกซิเจนก็จะถูกดูดเข้าไปบนผิวของฟิล์มเพื่อใช้ในการเผาไหม้ ทำให้มีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าค่าหนึ่ง

การดัดคร่อมของค่าความต้านทานดังกล่าวสามารถนำมาคาดคะเนและพล็อตเพื่อหาค่าการทำซ้ำได้ ดังนั้นหากใช้วงจรที่มีความเหมาะสม ก็สามารถนำมาค่าความต้านทานดังกล่าวมาประยุกต์ใช้เป็นวงจรเตือนภัย หรือประยุกต์ให้สามารถอ่านค่าออกโดยระบบทางแสงได้

จากรูปที่ 2.40 (ข) เป็นวงจรทดสอบเพื่อนำไปใช้งาน ส่วนในรูปที่ 2.40 (ข) เมื่อ ขา 1 และขา 3 ต่อเข้าไปยังตัวทำความร้อน ขา 2 และ ขา 4 จะต่อเข้ากับส่วนของเซนเซอร์ ซึ่งเซนเซอร์ในตัวอย่างนี้จะถูกกำหนดให้ใช้แรงเคลื่อนคงที่ 5 โวลต์



รูปที่ 2.40 ตัวเซนเซอร์แบบฟิล์มหนา

เมื่อตัวเซนเซอร์ตรวจพบแก๊ส ค่าความต้านทานของตัวเซนเซอร์ก็จะลดลงทันที โดยที่ค่าความต้านทานของตัวเซนเซอร์ (R_S) ดังกล่าวนี้นี้สามารถคำนวณได้จากแรงเคลื่อนทางด้านเอาต์พุต (V_{out}) ดังสูตรด้านล่างต่อไปนี้

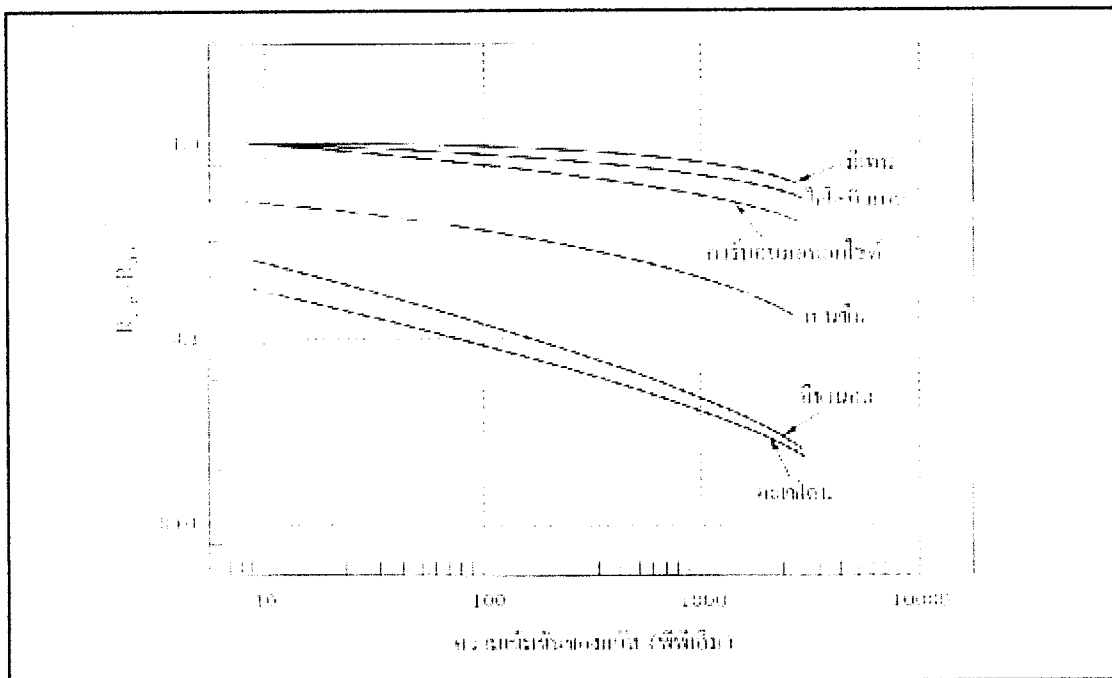
$$R_S = \frac{V_S - V_{out}}{V_{out}} R_L$$

ให้สังเกตว่าความไวของตัวเซนเซอร์ จะกำหนดด้วยอัตราส่วน (R_{GAS}/R_{AIR}) นั่นคือค่าของความต้านทานเซนเซอร์ในขณะที่อากาศมีแก๊ส (R_{GAS}) ต่อค่าความต้านทานของเซนเซอร์ที่อากาศบริสุทธิ์ (R_{AIR}) ที่ปราศจากแก๊สบริเวณอื่น ๆ

กำลังสูญเสียที่ตัวเซนเซอร์ จะสามารถหาได้จาก

$$P_s = \frac{V_c^2 \times R_s}{(R_s + R_L)^2}$$

เมื่อ R_s = ความต้านทานของตัวเซนเซอร์



รูปที่ 2.41 ความสัมพันธ์ระหว่างความไวในการเปลี่ยนค่าความต้านทานของเซนเซอร์แก๊สแบบฟิล์มหนาต่อความเข้มข้นของแก๊สที่ปริมาณต่าง ๆ

ในรูปที่ 2.41 แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแก๊สต่าง ๆ ชนิดต่อความไวในการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของเซนเซอร์ หากเราสามารถรักษาอากาศให้บริสุทธิ์ได้ ค่าความต้านทานเนื่องจากอากาศบริสุทธิ์ก็จะมีค่าคงที่ ดังนั้นหากมีแก๊สที่จะทำการวัดไหลเข้ามา ความไวที่ได้จากความเข้มข้นของแก๊สที่วัดนั้นก็เปลี่ยนแปลง ผลการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว มีผลให้แรงเคลื่อนที่เกิดจากวงจรแบ่งแรงเคลื่อนทางค่านเอาต์พุตในรูปที่ 2.40 เปลี่ยนแปลงไปด้วย

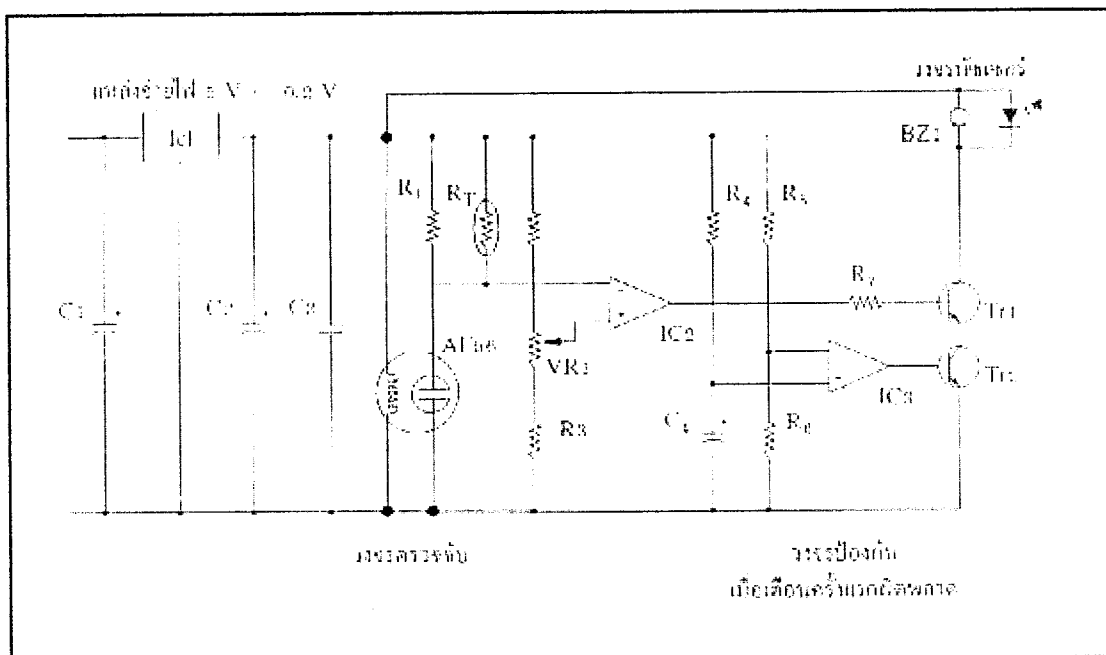
ข้อควรจำในการใช้งานตัวเซนเซอร์แบบฟิล์มหนา

1. หลังจากใช้ตัวเซนเซอร์แล้วปล่อยให้ทิ้งไว้ภายใต้ความชื้นสูงเป็นระยะเวลานาน ต้องใช้เวลาระยะหนึ่งเพื่อให้คุณสมบัติของมันถึงจุดที่มีความเสถียรภาพเสียก่อน
2. อุณหภูมิตัวเรือนของตัวเซนเซอร์แก๊ส จะถูกทำให้ร้อนด้วยตัวทำความร้อนโดยมีค่าเป็น 30°C ถึง 40°C ซึ่งจะสูงกว่าอุณหภูมิห้องในขณะที่กำลังปฏิบัติงาน
3. ต้องวัดคุณสมบัติของตัวเซนเซอร์แก๊ส หลังจากที่ใช้ปฏิบัติงานมาแล้วมากกว่า 24 ชั่วโมง เพื่อดูความเสถียรภาพของตัวเซนเซอร์
4. คุณสมบัติของตัวเซนเซอร์แก๊สที่ได้ดังกล่าว จะต้องทำการวัดในบริเวณที่อากาศสะอาดปราศจากแก๊สรบกวนอื่น ๆ

ตารางที่ 2.7 ตัวอย่างของคุณลักษณะจำเพาะของตัวเซนเซอร์แก๊สรุ่นต่างๆ ของยี่ห้อ HEIMANN

ชื่อชนิด	AF10	AF20	AF30	AF33	AF35	AF50	AF56	AF63	AF63P
แก๊สที่ตรวจจับ	ไฮโดรเจน	คาร์บอน-มอนอกไซด์	ควันทูหรี			มีเทน	แก๊ส LP (โพรเพน, บิวเทน)	ไอของแก๊สไฮลีนที่มีแอลกอฮอล์ทอลลูอิน	เอทานอลที่เป็นของเหลว
ย่านการตรวจจับ	10 ppm – 1000 ppm	50 ppm – 2000 ppm				500 ppm – 10000 ppm	500 ppm – 10000 ppm	100 ppm – 5000 ppm	
การสูญเสียกำลัง (mW) สูงสุด	530	780	535	680	530	690	690	680	
อุปกรณ์ที่ใช้ตรวจจับ	ออกไซด์ของสารกึ่งตัวนำ								
วัสดุขา	นิกเกิลอัลลอย								
โลหะที่เคลส	ไนลอน 66								พีทีเอส
ตัวป้องกันไฟ	ตะแกรงทำจากสแตนเลสสตีล (SUS 316) ขนาด 100 mesh 2 ชั้น								

ข้อมูลทางเทคนิคดังกล่าวนี้ได้จากการวัดตามสถานะของอากาศบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ $25^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ และความชื้นสัมพัทธ์ที่ $50 \pm 5\%$ แรงดันที่จ่ายให้วงจร 5 ± 0.05 โวลต์ แรงดันไฟฟ้าที่ตัวทำความร้อน 5 ± 0.05 โวลต์ ค่าความต้านทานโหลด 5 กิโลโอห์ม – 10 กิโลโอห์ม $\pm 1\%$ เวลาในการทำความร้อนล่วงหน้ามากกว่า 48 ชั่วโมง แต่หากไม่ตรงกับภาวะดังกล่าวนี้ ก็จะได้ค่าที่แตกต่างกันออกไป



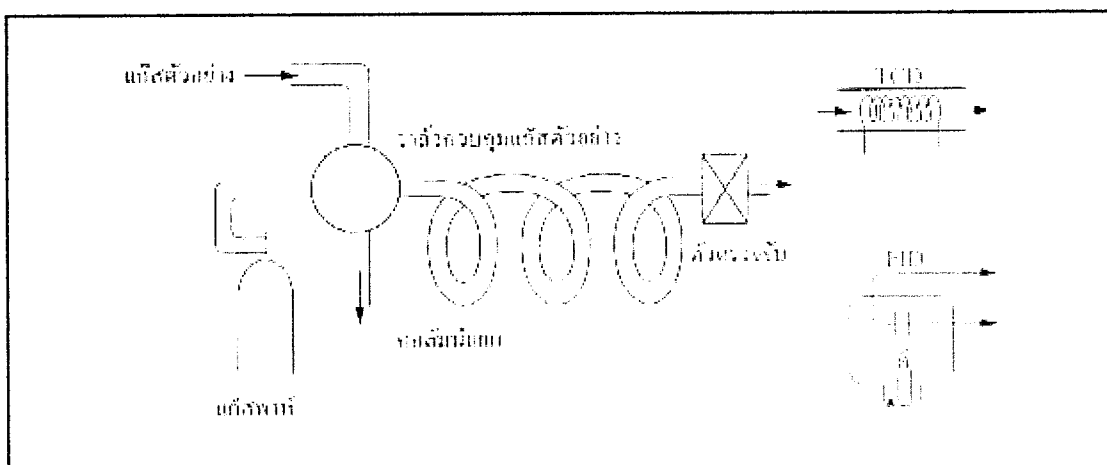
รูปที่ 2.42 ตัวอย่างของวงจรตรวจจับการรั่วของแก๊ส LP

วงจรรูปที่ 2.42 นี้แสดงหลักการพื้นฐานในการตรวจจับแก๊ส โดยใช้ตัวเซนเซอร์แก๊สแบบฟิล์มหนายี่ห้อ HEIMANN รุ่น AF56 ปกติตัวเซนเซอร์ที่ใช้ในวงจรนี้ จะสามารถตรวจจับแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจน มีเทน อีธานอล โพรเพน และไอโซบิวเทน ซึ่งแสดงผลเมื่อมีระดับการรั่วของแก๊สโดยตัวบ่งชี้เซอร์ ในวงจรดังกล่าวนี้ สามารถปรับความไวในการตรวจจับได้โดยตัวต้านทาน VR1 ความไวในการตรวจจับไว้ในวงจร หมายถึงหากเราเลือกวัดแก๊สตัวใดตัวหนึ่ง เช่น คาร์บอนมอนอกไซด์ จะต้องมีการปรับตัวต้านทาน VR1 เพื่อเลือกที่จะให้ไซเรนดังที่ปริมาณความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์มากหรือน้อย หรือกล่าวได้อีกอย่างว่า ให้การตรวจจับมีปฏิกิริยาต่อแก๊สที่ต้องการวัดซ้ำหรือเร็วเท่าใดนั่นเอง

2.8.5.5 หลักการวัดแก๊สในกระบวนการแบบโครมาโตกราฟ (Process Gas Chromatograph)

PGC

หลักการวัดแก๊สแบบนี้ใช้หลักการโครมาโตกราฟที่แสดงได้ดังรูปที่ 2.43 ส่วนประกอบของแก๊สต่างๆ สามารถแสดงได้โดยโครมาโตแกรม ดังรูป 2.43 เมื่อแก๊สต่างๆ ถูกฉีกเข้าไป ด้านในแก๊สพาท ก็จะถูกพาเข้าไปสู่คอลัมน์เพื่อแยกแก๊ส หลังจากนั้นก็จะใช้ TCD หรือ FID หรือตัวตรวจจับอื่นๆ เพื่อตรวจจับแก๊สต่างๆ ตามแต่ลักษณะงาน

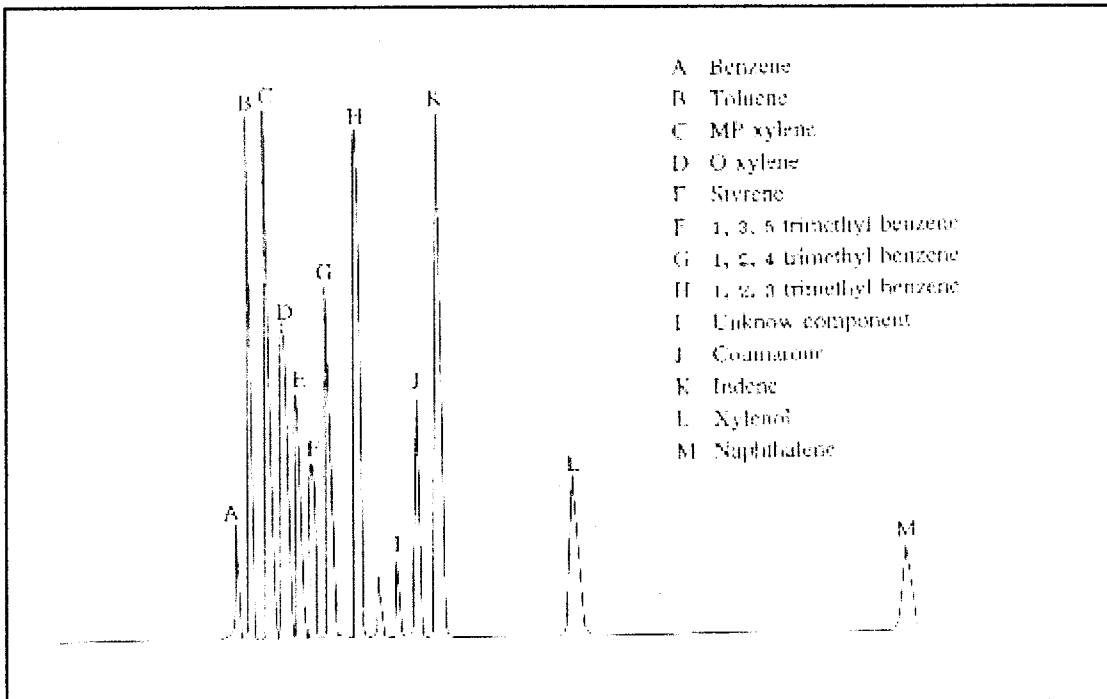


รูปที่ 2.43 การวัดแก๊สในกระบวนการแบบโครมาโตกราฟ

ข้อควรจำในการวัดแก๊สด้วยวิธีนี้คือ

1. หลักการวัดแบบ TCD จะใช้ในการวัดแก๊สที่เป็นอนินทรีย์ ส่วนหลักการ FID จะใช้สำหรับวัดไฮโดรคาร์บอน
2. การเลือกคอลัมน์แยกแก๊สต้องใช้เทคนิคที่มีประสิทธิภาพสูง ๆ
3. ต้องรักษาอุณหภูมิของคอลัมน์ให้คงที่อย่างมาก

จากหลักการที่ผ่านมาทั้งหมด จะเห็นว่าในการจะวัดแก๊สหรือตัวแปรใดๆ ต้องศึกษาคุณสมบัติที่เป็นไปได้ทางเคมีและฟิสิกส์ของมัน เพื่อให้สามารถนำหลักการดังกล่าวมาดัดแปลงให้เป็นตัวแปรทางไฟฟ้า ยังมีเซนเซอร์หลายประเภทที่ยังไม่ได้พัฒนาไปมากมาย เช่นการเซนเซอร์รสชาติอาหาร กลิ่นและรส หรือการค้นหาวัสตูที่จะนำมาใช้เป็นเซนเซอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงซึ่งนับเป็นสิ่งสำคัญ เพราะประเทศไทยมีอุตสาหกรรมต่างๆ เป็นจำนวนมาก จึงน่าจะมีนักวิทยาศาสตร์ หรือวิศวกร หรือองค์กรใด ๆ ที่เกี่ยวข้องซึ่งมีศักยภาพ ได้ประดิษฐ์หรือพัฒนาในส่วนดังกล่าวเพื่อจะให้ก่อให้เกิดผลประโยชน์ต่อไป

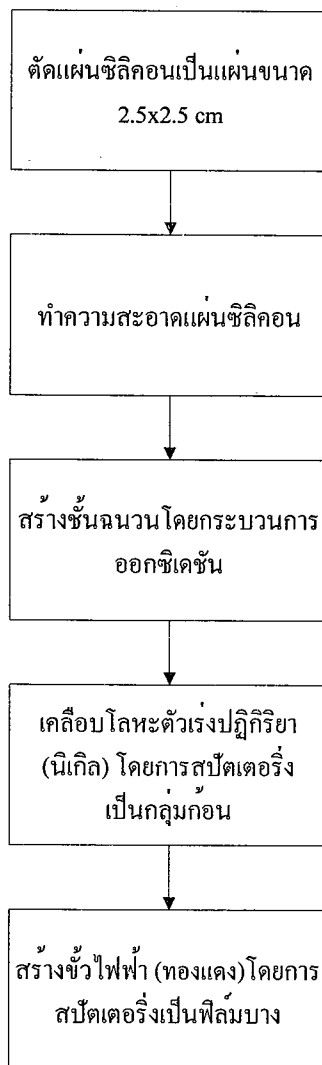


รูปที่ 2.44 การแยกส่วนประกอบของแก๊สในระบบโครมาโตแกรม

บทที่ 3

กระบวนการสร้างและเทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ที่เกี่ยวข้องในการสร้างฐานรอง

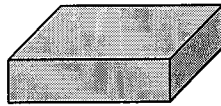
ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการสร้างฐานรอง รวมถึงหลักการและเครื่องมือต่างๆ ที่นำมาใช้ในการสร้าง ตั้งแต่การทำความสะอาดแผ่นซิลิคอน การสร้างชั้นฉนวน การเคลือบโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา การทำขั้วไฟฟ้า ต่อไปจะแสดงขั้นตอนการสร้างฐานรองเป็นโฟลว์ชาร์ท (Flow chart)



รูปที่ 3.1 โฟลว์ชาร์ทการสร้างฐานรอง

3.1 การทำความสะอาดแผ่นซิลิคอน

เพื่อทำความสะอาดผิวหน้าของแผ่นซิลิคอน กำจัดฝุ่น กำจัดเศษ โลหะและไขมันต่างๆ



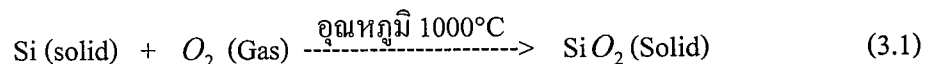
รูปที่ 3.2 แผ่นซิลิคอนขนาด 2.5 ซม. x 2.5 ซม.

3.2 การสร้างชั้นฉนวนด้วยวิธีออกซิเดชัน (Oxidation)

เพื่อควบคุมไม่ให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านเข้าไปในเนื้อสารซิลิคอน ชั้นฉนวนหรือซิลิคอนไดออกไซด์ จะสร้างจากการออกซิเดชันด้วยความร้อน (Thermal oxidation) โดยการให้แผ่นซิลิคอนทำปฏิกิริยากับออกซิเจนหรือไอน้ำ ที่อุณหภูมิสูง มี 2 วิธี คือ

1. การออกซิเดชันแบบแห้ง (Dry oxidation)

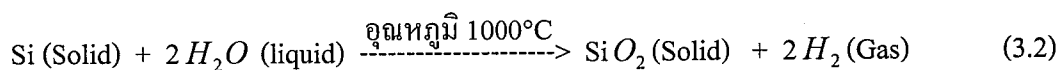
เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างอะตอมของแก๊สออกซิเจนบริสุทธิ์ กับซิลิคอน ใช้อุณหภูมิประมาณ 900°C ถึง 1100°C อะตอมของซิลิคอนจะรวมตัวกับออกซิเจนเกิดเป็นซิลิคอนไดออกไซด์ แสดงดังสมการ 3.1



วิธีนี้ให้ออกไซด์ที่มีคุณภาพดี แต่อัตราการเกิดช้ามาก

2. การออกซิเดชันแบบชื้น (Wet oxidation)

ต่างจากการออกซิเดชันแบบแห้งคือ จะใช้ไอน้ำในการทำปฏิกิริยาร่วมกับออกซิเจนด้วย เนื่องจากโมเลกุลของน้ำเล็กกว่าโมเลกุลของออกซิเจน อะตอมของซิลิคอนจึงทำปฏิกิริยากับไอน้ำได้เร็วกว่าอะตอมออกซิเจนบริสุทธิ์เพียงอย่างเดียว ผลคือจะทำให้เกิดชั้นออกไซด์ได้เร็วกว่าแบบแห้ง แสดงได้ดังสมการ 3.2



วิธีนี้ให้ออกไซด์ที่มีคุณภาพดีน้อยกว่าแบบแห้ง เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาแบบแห้งมีความหนาแน่นมากกว่าแบบชื้น การออกซิเดชันแบบชื้นจะทำให้เกิดชั้นออกไซด์ที่มีสภาพผลึก

ไม่สมบูรณ์ คือเกิดการบิดเบือนของผลึก (Crystal dislocation) หรือเกิดรูพรุนขึ้น ข้อดีของวิธีนี้คือมีอัตราการเกิดสูงกว่าแบบแห้งมาก

ปริญญานิพนธ์นี้ จะใช้การออกซิเดชันแบบแห้ง 1.5 ชม. ชั้น 1.5 ชม. และแห้ง 1.5 ชม. ในการออกซิเดชันแบบแห้งจะใช้อุณหภูมิประมาณ 1100°C อัตราการไหลของออกซิเจน 1200 cc/min ส่วนการออกซิเดชันแบบชื้นใช้อุณหภูมิประมาณ 1100°C อัตราการไหลของออกซิเจน 1100 cc/min เพื่อให้เกิดชั้นออกไซด์ที่มีความหนาประมาณ 5000 อังสตรอม จากนั้นนำไปเคลือบโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาต่อไป



รูปที่ 3.3 หลังจากการออกซิเดชัน ได้ชั้นออกไซด์หนาประมาณ 5000 อังสตรอม

3.3 การเคลือบโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) และทำขั้วไฟฟ้าโดยการสปีดเตอริง

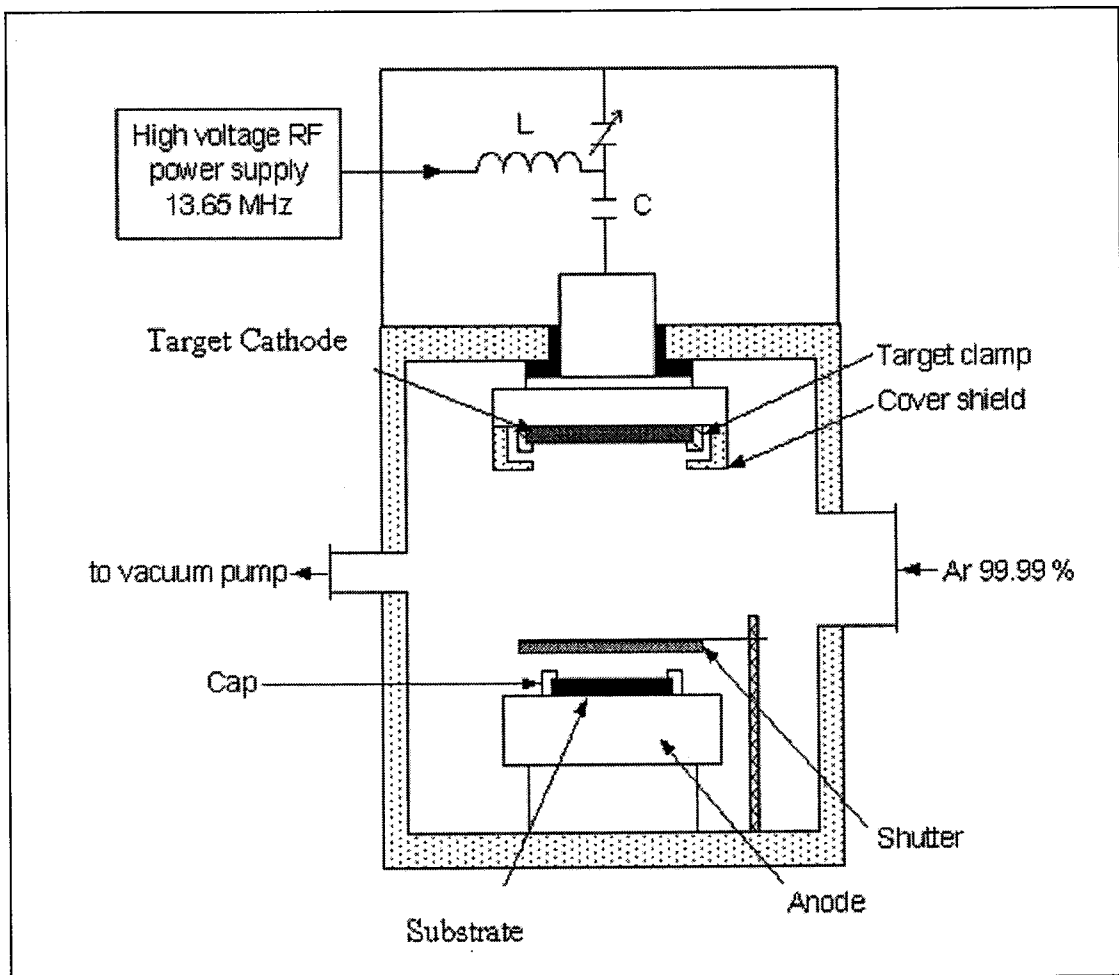
เพื่อเคลือบโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาลงไปบนฐานรองเพื่อให้เกิดคาร์บอนนาโนทิวบนโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา ใช้นิกเกิล (Ni) เป็นโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา เคลือบลงไปบนฐานรองเป็นกลุ่มก้อน (Cluster) เพื่อให้ขั้วของอุปกรณ์ขาดจากกันทางไฟฟ้า (นิกเกิลเป็นโลหะและนำไฟฟ้า) เนื่องจากต้องการศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของคาร์บอนนาโนทิวขณะตรวจจับแก๊ส จึงต้องการให้กระแสไฟฟ้าหรืออิเล็กตรอนเคลื่อนอยู่บนคาร์บอนนาโนทิว



รูปที่ 3.4 การเคลือบโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา (นิกเกิล)

อีกจุดประสงค์หนึ่งเพื่อทำขั้วไฟฟ้าเพื่อต่อออกไปใช้งาน โดยใช้ทองแดงเป็นขั้วไฟฟ้า สปีดเตอริงเป็นแผ่นบาง (Thin film) ลงไปที่ด้านข้างของฐานรอง ทั้ง 2 ข้าง ในการเคลือบโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาและทำขั้วไฟฟ้าจะใช้เครื่อง SPE - 210 โคโอดสปีดเตอริงในการสร้าง

ส่วนสำคัญต่างๆของเครื่อง SPE-210 ไดโอดสปีเตอร์ ประกอบไปด้วย แหล่งกำเนิดแรงดันสูง ซึ่งมีความถี่อยู่ในย่านความถี่วิทยุ (13.65 MHz), แหล่งจ่ายแก๊ส, ห้องสปีเตอร์ (sputtering chamber), และปั๊มสุญญากาศ (rotary and diffusion pump) ภายในห้องสปีเตอร์ ประกอบด้วย ขั้วคาโทด (cathode) ขั้วแอโนด (anode) และชัตเตอร์ (shutter) โดยแผ่น Target เป็นเป้าถูกติดไว้กับขั้วคาโทด การสปีเตอร์เกิดจากการป้อนกำลัง RF ผ่านวงจรแมทซ์ซึ่งเข้าสู่ห้องสปีเตอร์ซึ่งอยู่ในบรรยากาศของแก๊สอาร์กอน (Ar) ทำให้แก๊สแตกตัวเป็นไอออน เกิดเป็นพลาสมาขึ้นมาในบริเวณระหว่างขั้วคาโทดและขั้วแอโนด เนื่องจากขั้วแอโนดต่ออยู่กับผนังห้องสปีเตอร์ ทำให้พื้นที่ของขั้วแอโนดมากกว่าขั้วคาโทด จึงเกิดการเหนี่ยวนำขั้วคาโทดให้มีศักย์เป็นลบและดึงดูดไอออนบวกในพลาสมาให้พุ่งเข้าชนโดยนิเกิลที่ขั้วคาโทด ทำให้อะตอมของ Target กระเด็นออกมาและสะสมบนผิวฐานรองแผ่นตัวอย่างซึ่งวางที่ขั้วแอโนด จะเกิดเป็นฟิล์มโลหะเคลือบอยู่บนฐานรอง



รูปที่ 3.5 แสดงส่วนสำคัญต่างๆของเครื่อง SPE-210 ไดโอดสปีเตอร์

ปริมาณนี้ก็จะศึกษาผลจากขนาดพื้นที่ของฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ในการตรวจวัดแก๊ส ดังนั้นจึงออกแบบฐานรองเป็น 2 โครงสร้าง คือ

1. ให้มีขนาดของฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ขนาด กว้าง 21 มม. ยาว 25 มม. คือมีพื้นที่ 525 ตารางมิลลิเมตร ดังรูป 3.6 ก
2. ให้มีขนาดของฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ขนาด กว้าง 5 มม. ยาว 25 มม. คือมีพื้นที่ 125 ตารางมิลลิเมตร ดังรูป 3.6 ข



รูปที่ 3.6 รูปแบบของฐานรองที่เสร็จสมบูรณ์ รูป ก โครงสร้าง 1 รูป ข โครงสร้าง 2

ในขั้นตอนการทำขั้วไฟฟ้าต้องมีการใช้หน้ากาก (Mask) ในการสร้างด้วย เนื่องจากต้องการเลือกสร้างฟิล์มทองแดงในบริเวณที่ต้องการให้เป็นขั้วไฟฟ้าเท่านั้น การสร้างลวดลายโดยวิธีใช้หน้ากากป้องกัน (Shadow mask) มีดังนี้

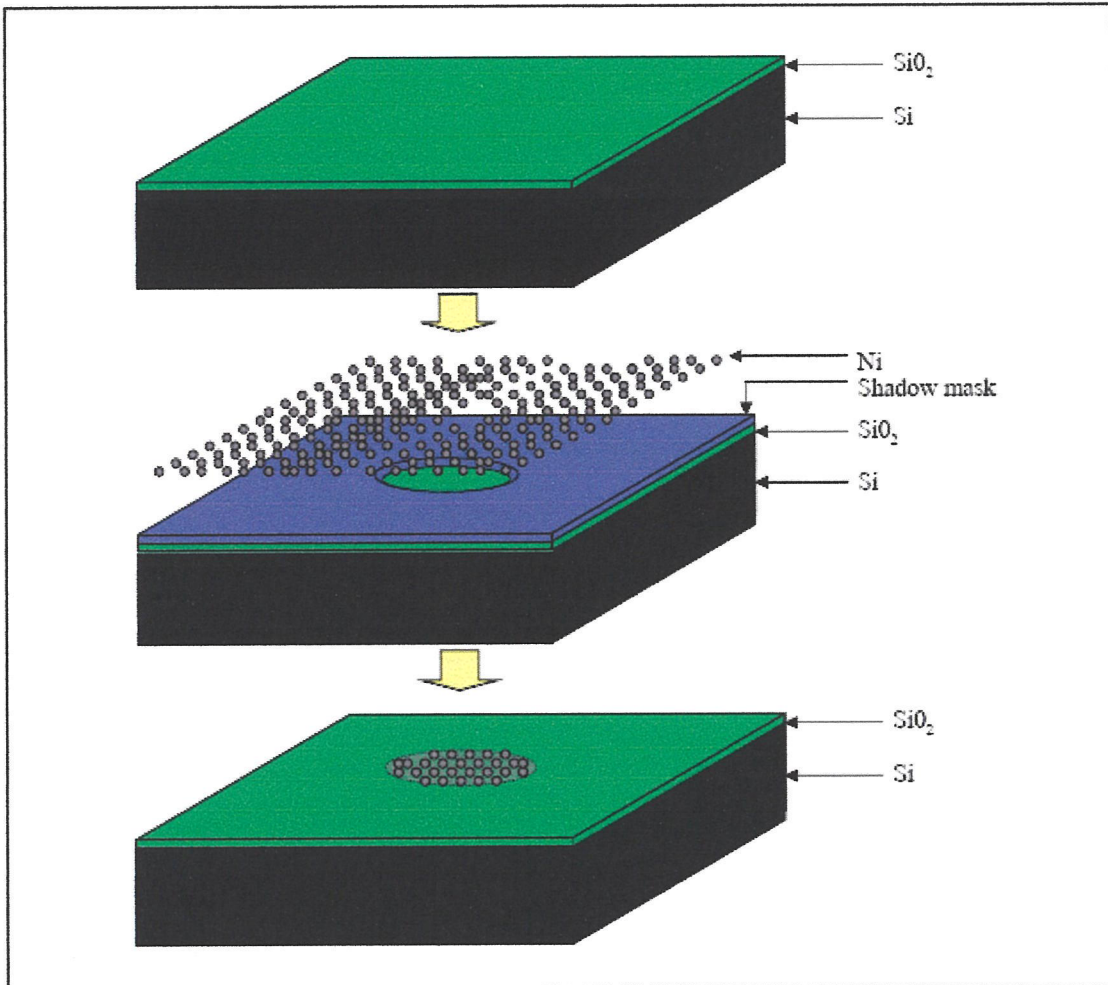
3.4 การสร้างลวดลายโดยใช้หน้ากากป้องกัน

ใช้ในการสร้างลวดลายลงบนฐานรอง วิธีนี้เป็นวิธีที่ทำได้ง่าย เพียงแค่ประกบแผ่นหน้ากากกับฐานรองแล้วนำไปสปัตเตอร์ริงตามปกติ แสดงวิธีการแสดงดังรูปที่ 3.7

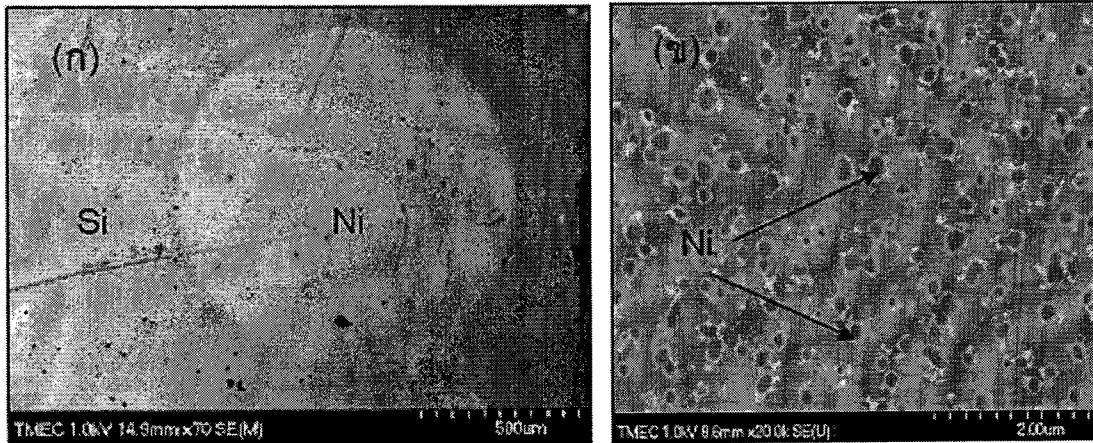
ในรูปที่ 3.7 เป็นตัวอย่างการสร้างลวดลายเป็นรูปวงกลม ลงบนแผ่นฐานรองซิลิคอนไดออกไซด์โดยการนำหน้ากากมาประกบกับฐานรองแล้วสปัตเตอร์ริงเกิดลงไป เมื่อนำหน้ากากออก ก็จะได้ลวดลายนิเกิดเป็นวงกลมตามรูปแบบของหน้ากาก วิธีนี้มีข้อดีก็คือทำได้ง่าย รวดเร็ว ไม่ยุ่งยากเหมือนกับการสร้างลวดลายด้วยวิธีโฟโตลิโธกราฟี แต่ก็มีข้อเสียคือลวดลายที่ได้ไม่คมชัด เนื่องจากในการสปัตเตอร์ริงจะมีอนุภาคของนิเกิดบางส่วนเล็ดลอดเข้าไปในบริเวณขอบหน้ากากได้ เพราะอนุภาคของนิเกิดมีขนาดเล็กมาก ทำให้ลวดลายไม่คมชัด รวมถึงเมื่อนำไปสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์แล้วจะมีขอบเขตที่ไม่คมชัด แสดงให้เห็นดังรูปที่ 3.8 และ 3.9

เนื่องจากจุดประสงค์ของปริมาณนี้คือการสร้างเซนเซอร์เคมีคือแก๊สเซนเซอร์ที่ต้องการพื้นที่ในการรับแก๊สมากเพื่อการศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของคาร์บอนนาโนทิวบ์ในการตรวจวัดแก๊สเบื้องต้น จึงไม่มีความจำเป็นจะต้องใช้การสร้างลวดลายที่ละเอียด

หรือขนาดเล็กมากๆ และไม่ต้องการความคมชัดของลวดลายมาก วิธีการสร้างลวดลายด้วยหน้ากากป้องกันจึงเหมาะสมที่จะนำมาใช้เพื่อความรวดเร็วในการสร้าง

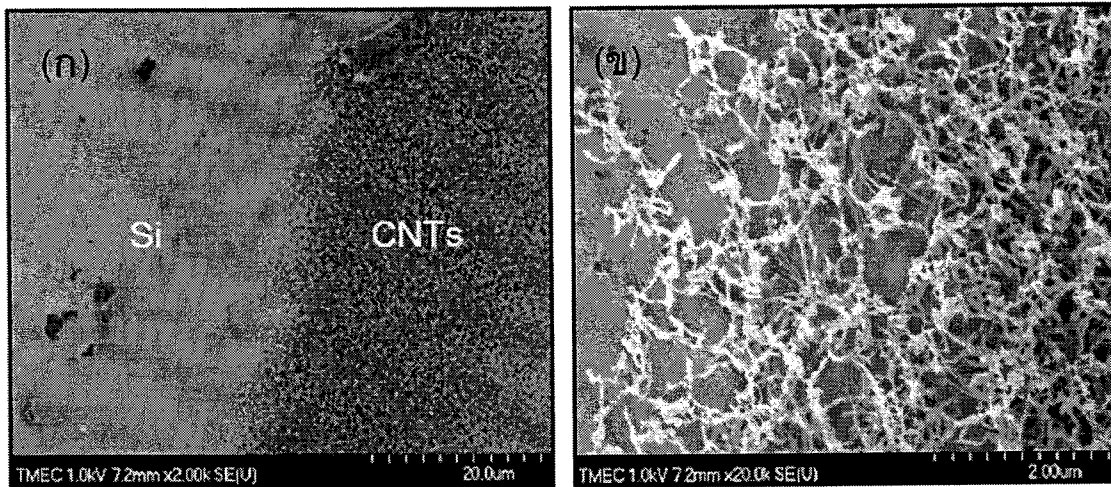


รูปที่ 3.7 การสร้างลวดลายด้วยวิธีหน้ากากป้องกัน (Shadow mask)



รูปที่ 3.8 ภาพขยายด้วย SEM แสดงฐานรองรับบริเวณที่เคลือบด้วยนิกเกิลโดยวิธีหน้ากากป้องกัน

- (ก) กำลังขยายต่ำ
(ข) กำลังขยายสูง



รูปที่ 3.9 ภาพถ่ายจาก SEM ของคาร์บอนนาโนทิวป์ตรงบริเวณขอบเขตของลวดลายวงกลม

- (ก) ที่กำลังขยายต่ำ
(ข) ที่กำลังขยายสูง

บทที่ 4

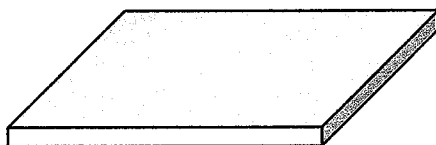
กระบวนการสร้างฐานรองและผลการสร้างฐานรอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงการสร้างฐานรองโดยละเอียด ตามขั้นตอนตามที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 ตั้งแต่การทำความสะอาดแผ่นซิลิกอน ไปจนถึงการสร้างขั้วไฟฟ้า

4.1 การทำความสะอาดแผ่นซิลิกอน

หลังจากตัดแผ่นซิลิกอนเป็นแผ่นขนาด 2.5 x 2.5 ซม. แล้วนำไปทำความสะอาดโดยมีขั้นตอนดังนี้

1. ต้มในกรด HNO_3 10 นาที
2. ต้มในน้ำ DI จำนวน 2 ครั้ง ครั้งละ 5 นาที
3. จุ่มในน้ำ DI แล้วเป่าให้แห้งด้วย N_2
4. ต้มใน Trichloroethylene 5 นาที
5. อัลตราโซนิกด้วยอะซิโตน 5 นาที
6. จุ่มในน้ำ DI จำนวน 2 แก้ว แล้วเป่าด้วย N_2



รูปที่ 4.1 แผ่นซิลิกอนขนาด 2.5 x 2.5 ซม. หลังการทำความสะอาด

4.2 การสร้างชั้นฉนวนหรือชั้นซิลิกอนไดออกไซด์โดยการออกซิเดชัน

เมื่อทำความสะอาดผิวหน้าแล้ว ต่อไปจะสร้างชั้นฉนวนโดยวิธีการออกซิเดชันด้วยความร้อน มีขั้นตอนดังนี้

1. นำแผ่นซิลิกอนเข้าเครื่องออกซิเดชัน การนำแผ่นซิลิกอนเข้าเครื่องออกซิเดชันจะต้องค่อยๆ เลื่อนแผ่นซิลิกอนเข้าไปในเตา เพื่อให้แผ่นซิลิกอนมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างช้าๆ เนื่องจากเตามีอุณหภูมิที่สูงมาก

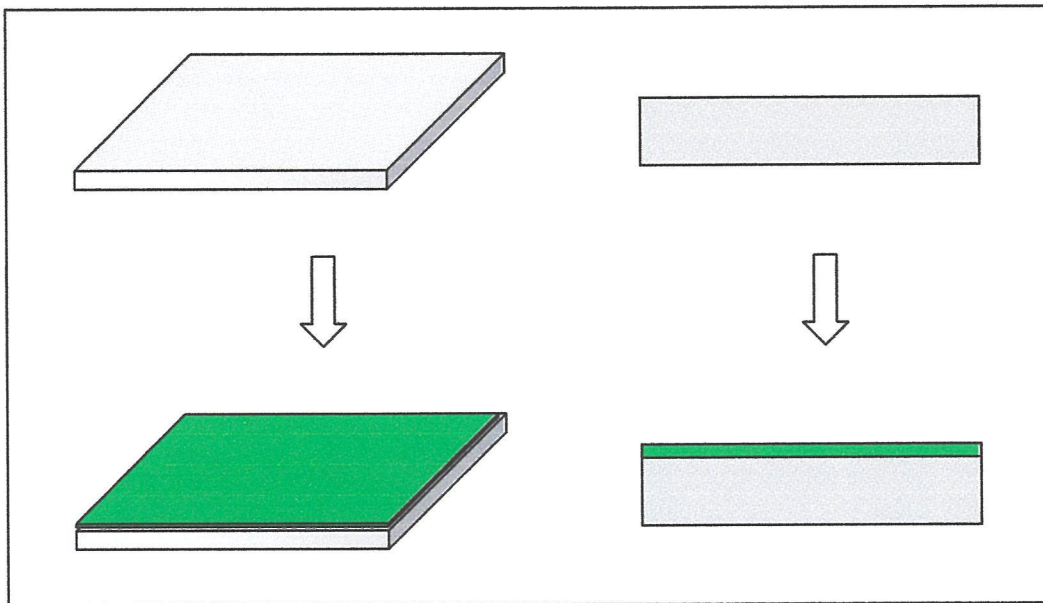
2. สร้างชั้นฉนวนด้วยวิธีออกซิเดชันแบบแห้ง ใช้อุณหภูมิ 1100°C เป็นเวลา 1.5 ชม. อัตราการไหลของออกซิเจน 1200 cc/min

3. สร้างชั้นฉนวนด้วยวิธีออกซิเดชันแบบชื้น ใช้อุณหภูมิ 1100°C เป็นเวลา 1.5 ชม.
อัตราการไหลของออกซิเจน 1100 cc/min

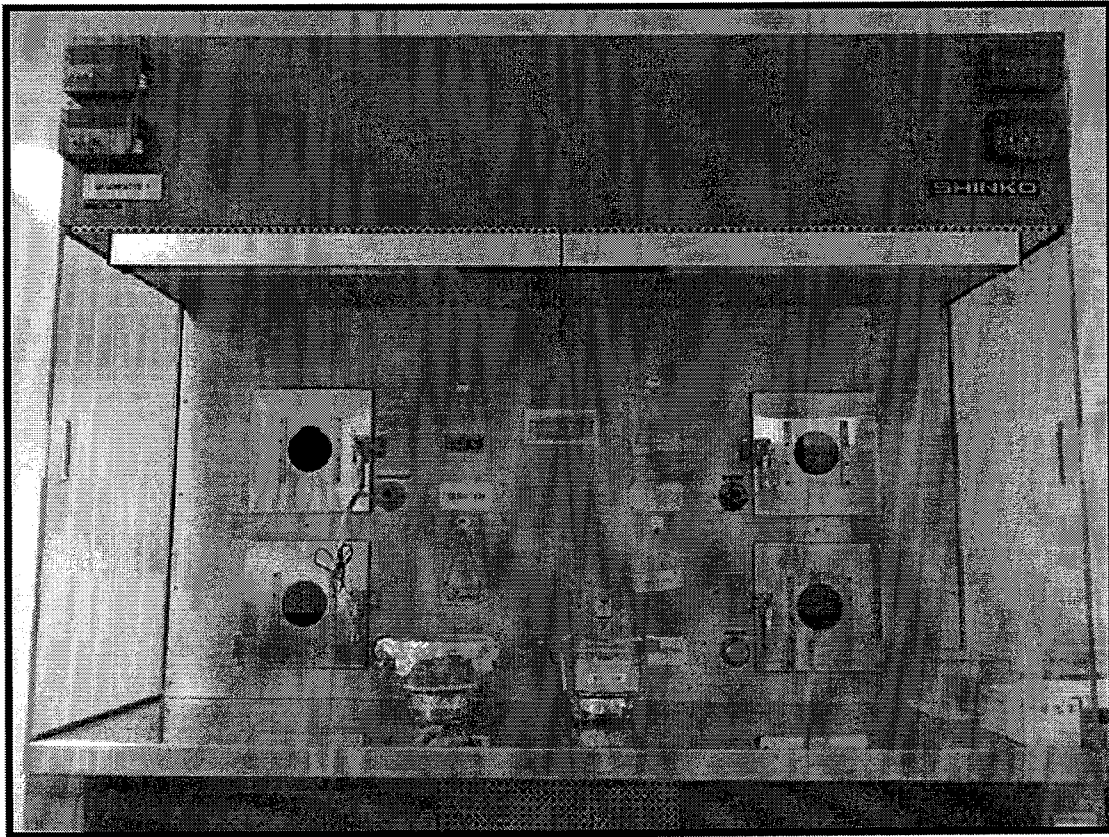
4. สร้างชั้นฉนวนด้วยวิธีออกซิเดชันแบบแห้ง ใช้อุณหภูมิ 1100°C เป็นเวลา 1.5 ชม.
อัตราการไหลของออกซิเจน 1100 cc/min

5. การนำแผ่นซิลิคอนออกจากเตาจะต้องค่อยๆ เลื่อนออกมา เหมือนในการนำเข้าไปเพื่อ
ไม่ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเร็วเกินไป

ผลที่ได้จากขั้นตอนนี้คือ ชั้นฉนวนหรือซิลิคอนไดออกไซด์ความหนาประมาณ 5000
อังสตรอม



รูปที่ 4.2 แผ่นซิลิคอนก่อนและหลังการออกซิเดชัน

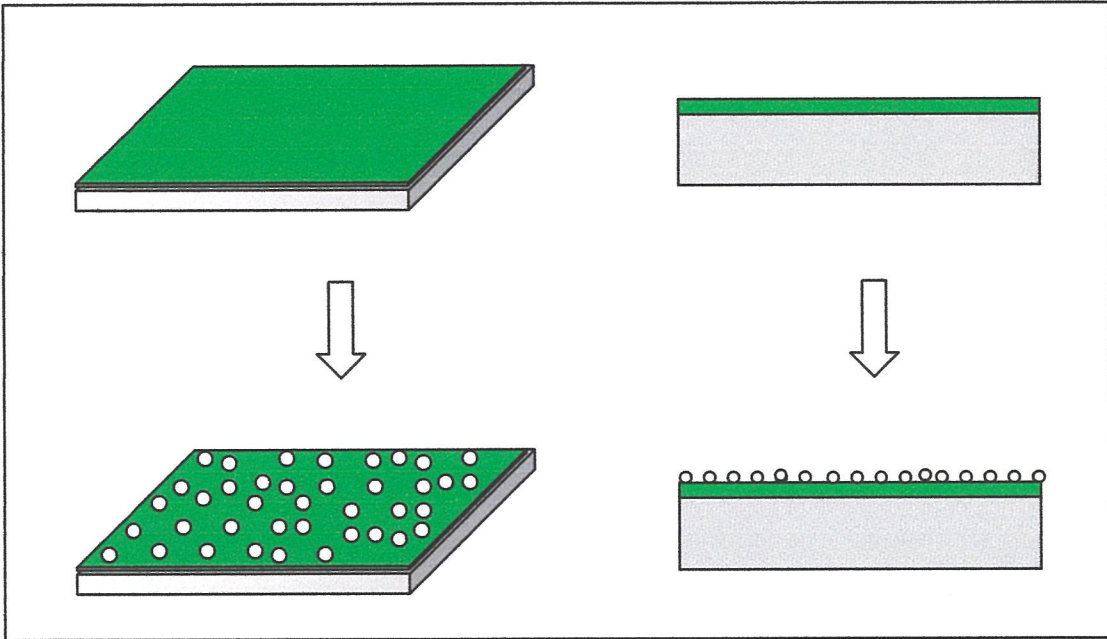


รูปที่ 4.3 เครื่องออกซิเดชันด้วยความร้อน

4.3 การเคลือบโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีสปัตเตอริง

เพื่อเคลือบโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา มีขั้นตอนดังนี้

1. นำแผ่นฟอยล์ (Foil) มาหุ้มที่ฐานรองของเครื่องเพื่อป้องกันสิ่งสกปรกหรือสารตกค้าง
 2. วางฐานรองซิลิคอนไดออกไซด์ ลงบนฟอยล์
 3. ใส่แผ่นชัตเตอร์ (Shutter)
 4. ใส่แผ่นเป้าหมาย (Target) แล้วปิดฝาเครื่อง
 5. ให้แก๊สอาร์กอนเป็นเวลา 5 ชม.
 6. สปัตเตอริง นิเกิลลงบนฐานรองเป็นกลุ่มก้อนโดยการเปิดชัตเตอร์เป็นเวลา 30 วินาที ความดันในขณะนั้นประมาณ 2×10^{-6} Torr
 7. นำฐานรองซิลิคอนไดออกไซด์ออก ดูดอากาศออกจากเครื่องเพื่อนำอนุภาคที่ตกค้างออก
- ผลคือได้โลหะตัวเร่งปฏิกิริยา (นิเกิล) เคลือบเป็นกลุ่มก้อนอยู่บนฐานรองซิลิคอนไดออกไซด์



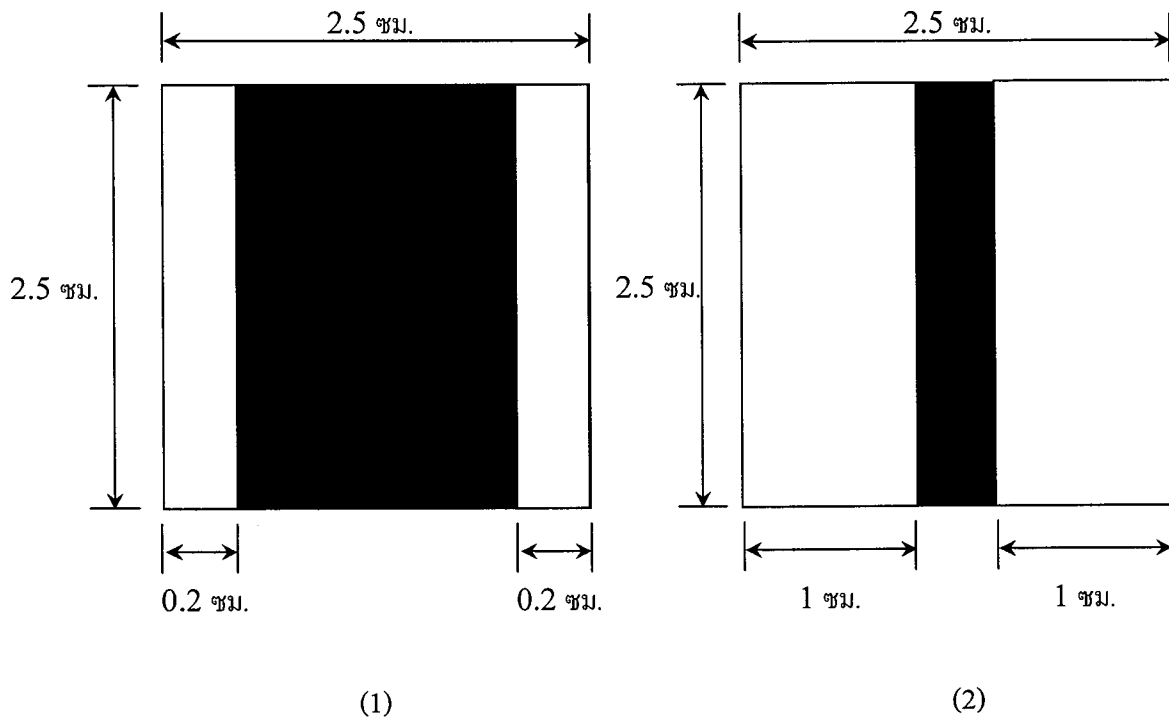
รูปที่ 4.4 ฐานรองก่อนและหลังเคลือบ โลหะด้วยวิธีปฏิบัติ (นิเกิล) แบบกลุ่มก้อน

4.4 การทำขั้วไฟฟ้าทองแดงโดยการสปีดเตอร์ริง

เพื่อเคลือบทองแดงที่ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าและเลือกเคลือบที่บริเวณด้านข้างเท่านั้น โดยใช้การสร้างลวดลายบนฐานรองด้วยวิธีหน้ากากป้องกัน (Shadow mask) มีขั้นตอนดังนี้

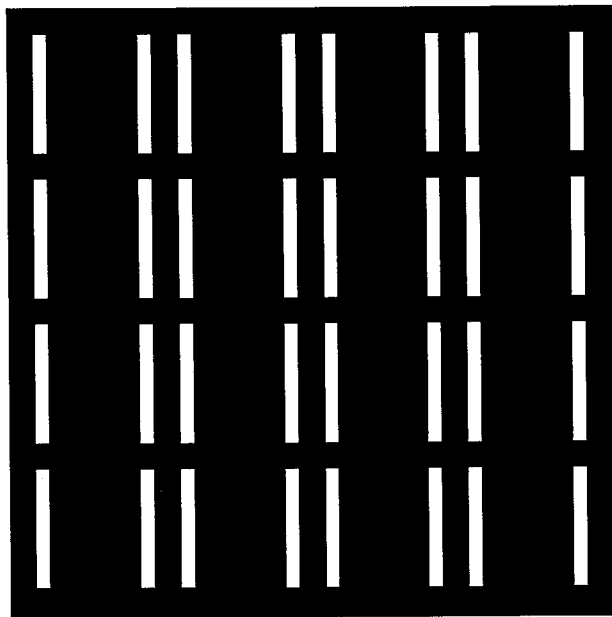
1. นำแผ่นฟอยล์ (Foil) มาหุ้มที่ฐานรองของเครื่องเพื่อป้องกันสิ่งสกปรกหรือสารตกค้าง
2. ประกบหน้ากาก (Shadow mark) กับฐานรองซิลิคอนไดออกไซด์
3. วางฐานรองซิลิคอนไดออกไซด์ ลงบนฟอยล์
4. ใส่แผ่นชัตเตอร์ (Shutter)
5. ใส่แผ่นเป้าทองแดง (Target) แล้วปิดฝาเครื่อง
6. ให้แก๊สอาร์กอนเป็นเวลา 5 ชม.
7. สปีดเตอร์ นิเกิลลงบนฐานรองเป็นแผ่นบางโดยการเปิดชัตเตอร์เป็นเวลา 90 วินาที ความดันในขณะนั้นประมาณ 2×10^{-6} Torr
8. เอาฐานรองซิลิคอนไดออกไซด์ออก ดูดอากาศออกจากเครื่องเพื่อดูคุณภาพที่ตกค้างออก

ผลคือได้ขั้วไฟฟ้าเป็นทองแดงเคลือบเป็นแผ่นบางอยู่บนฐานรองซิลิคอนไดออกไซด์ บริเวณด้านข้างทั้งสองด้าน

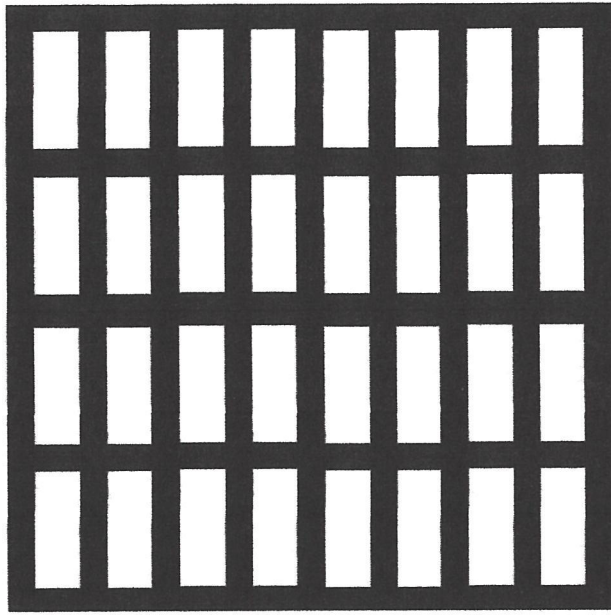


รูปที่ 4.5 ภาพขยายหน้ากาก (Mask) ที่ใช้ในการสปีดเตอร์ข้าวไฟฟ้า จะมี 2 โครงสร้าง คือ

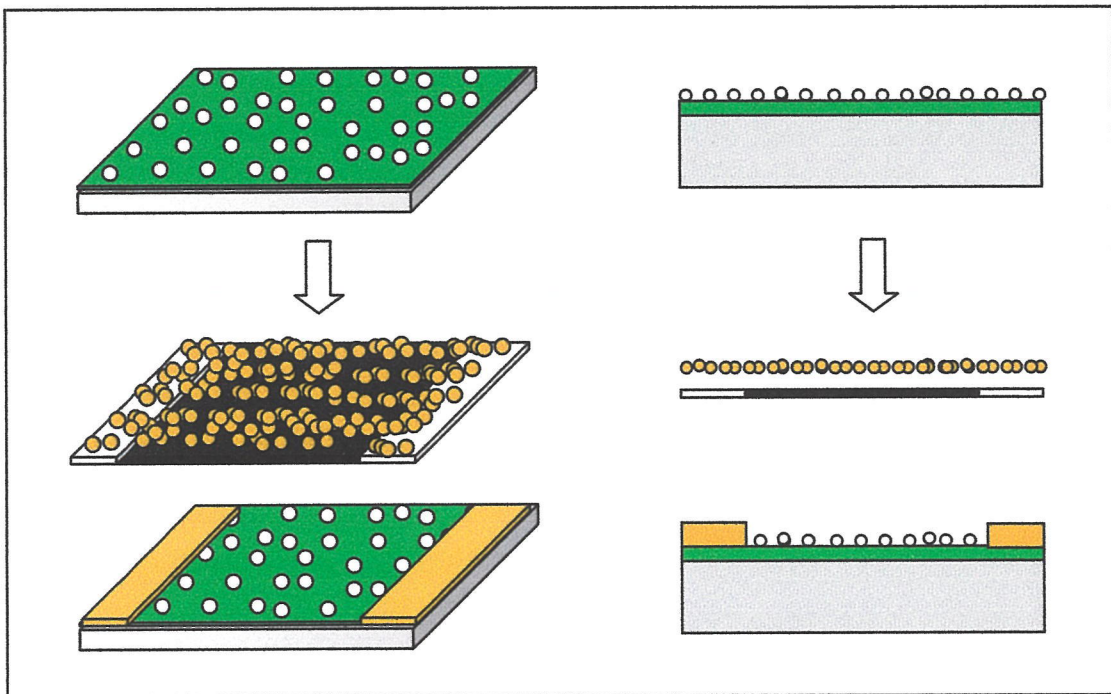
- (1) แบบขนาดพื้นที่ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ 525 ตารางมิลลิเมตร
- (2) แบบขนาดพื้นที่ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ 125 ตารางมิลลิเมตร



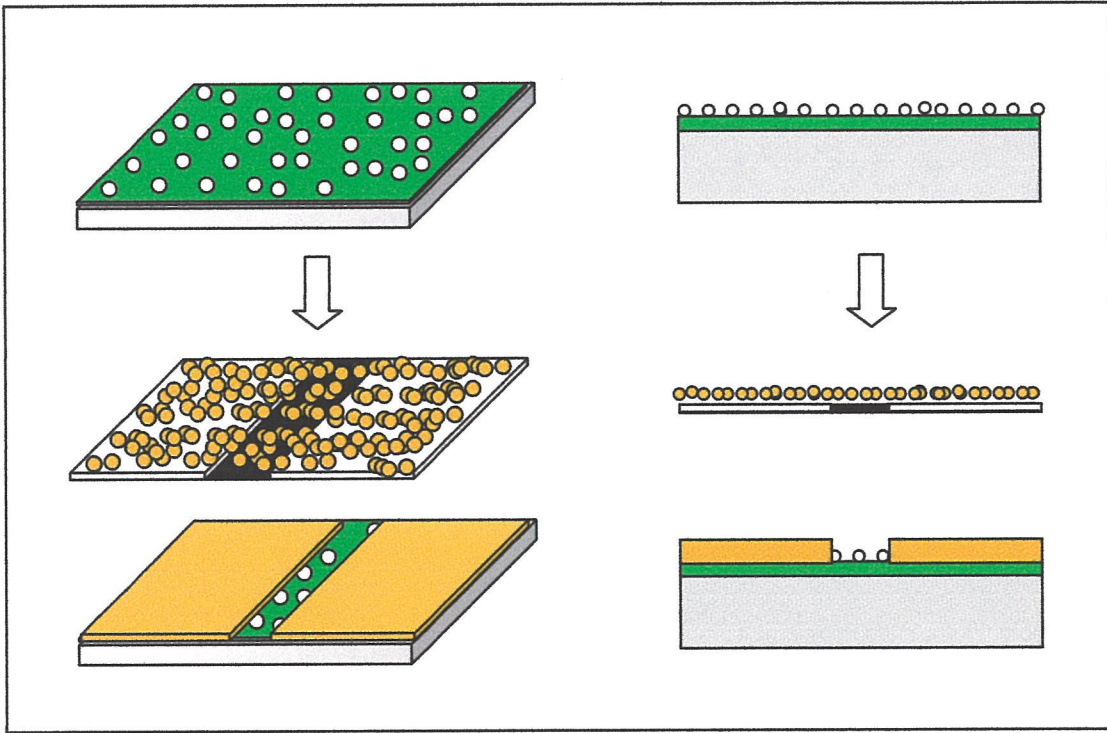
รูปที่ 4.6 ภาพหน้ากาก (mask) ที่ใช้ในการสปีดเตอร์ข้าวไฟฟ้า โครงสร้าง 1



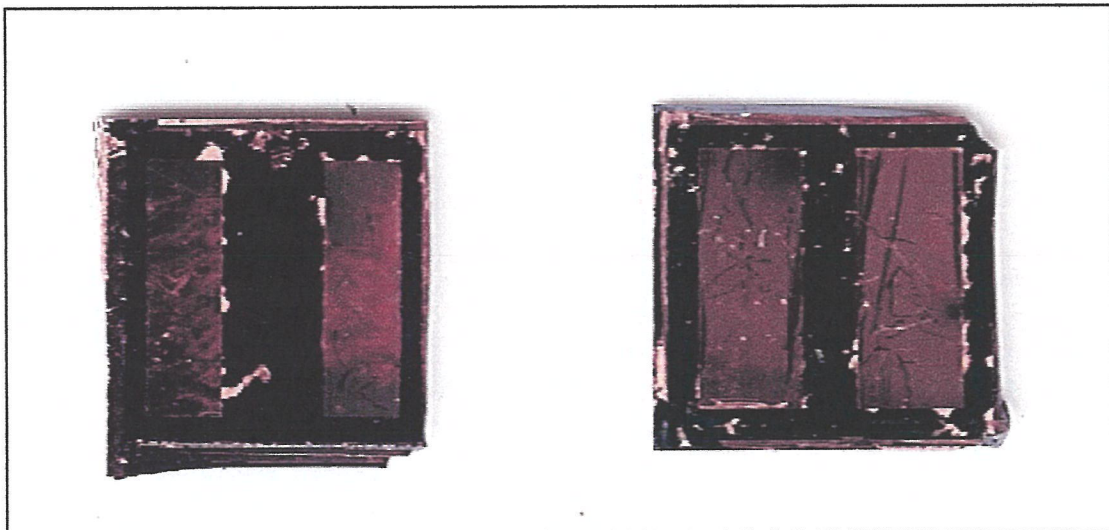
รูปที่ 4.7 ภาพหน้ากาก (mask) ที่ใช้ในการสปัดเตอร์ขั้วไฟฟ้า โครงสร้าง 2



รูปที่ 4.8 ฐานรองก่อนและหลังการสปัดเตอร์ขั้วไฟฟ้า โครงสร้างที่ 1



รูปที่ 4.9 ฐานรองก่อนและหลังการสปีดเตอริง ขั้วไฟฟ้า โครงสร้างที่ 2



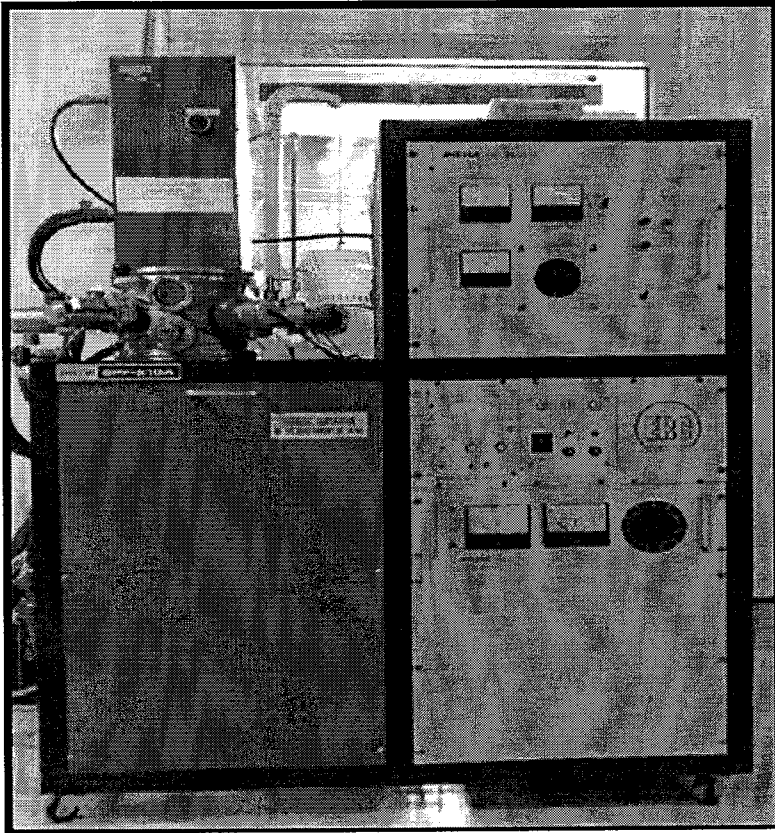
ก

ข

รูปที่ 4.10 ภาพถ่ายของฐานรองที่เสร็จสมบูรณ์แล้ว

(ก) โครงสร้างแบบที่ 1

(ข) โครงสร้างแบบที่ 2



รูปที่ 4.11 เครื่อง SPE – 210 ไดโอดสปีตเตอร์

ฐานรองซิลิคอนไดออกไซด์ที่ได้จะมีลักษณะเป็นตัวต้านทาน ซึ่งเมื่อวัดค่าความต้านทานระหว่างขั้วทั้งสองด้วยโอห์มมิเตอร์ได้ค่าความต้านทานดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความต้านทานของฐานรอง

ลำดับ	ค่าความต้านทาน (โอห์ม)	โครงสร้างที่
1	17.4	1
2	12.5	1
3	12.6	1
4	15.1	1
5	16.6	1
6	15.2	1
7	14.7	2
8	7.3	2
9	12.7	2
10	10	2
11	12.3	2
12	17.6	2
13	5	2
14	22.6	2
15	7.6	2
16	16.4	2

จากตารางที่ 4.1 จะเห็นว่า แม้ว่าจะทำการสปีดเตอริง โลหะตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิเกิลที่เป็นตัวนำไฟฟ้าเป็นแบบกลุ่มก้อนเพื่อให้ขาดจากกันทางไฟฟ้าแล้วก็ตาม แต่เมื่อทดลองวัดค่าความต้านทานกลับพบว่ากลุ่มก้อนของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา สามารถนำไฟฟ้าได้โดยมีค่าความต้านทานอยู่ในช่วง 5 -23 โอห์ม ซึ่งผิดกับที่คาดหมายไว้ว่าเมื่อสปีดเตอริงแบบกลุ่มก้อนแล้วกลุ่มก้อนของนิเกิลจะไม่นำไฟฟ้าเมื่อวัดค่าความต้านทานจะต้องได้ค่าความต้านทานเป็น กิโลโอห์มหรือเมกะโอห์ม ทั้งนี้อาจเกิดจากการในขั้นตอนการสปีดเตอริงมีการเปิดชุดเตอรัมนานเกินไปทำให้อนุภาคของนิเกิลอยู่ใกล้กันมากหรือหนาแน่นมากเกินไปทำให้เกิดปรากฏการณ์กระแสทะลุอุโมงค์ (Tunneling current) เป็นเหตุให้กลุ่มก้อนของนิเกิลสามารถนำไฟฟ้าได้ อีกเหตุผลหนึ่งคือ การสปีดเตอริงนั้น อะตอมของนิเกิลที่ถูกละลาย จะตกลงมาแบบสุ่ม (Random) ดังนั้นกลุ่มก้อนของนิเกิลจะไม่

สมัครสอบทั่วทั้งแผ่น เป็นเหตุให้มีเส้นทางเดินของอิเล็กตรอน จากขั้วถึงขั้วได้ในชั้นตอนต่อไปจะ
นำฐานรองที่ได้ไปสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ แสดงรายละเอียดในบทต่อไป

บทที่ 5

กระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์และผลการสังเคราะห์

ในบทนี้จะกล่าวถึงการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธีวิธีเคมีแบบขดลวดความร้อน (Hot filament Chemical vapor deposition) จุดประสงค์เพื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์เคมี การสังเคราะห์จะกระทำบนฐานรองซิลิคอนไดออกไซด์ ใช้เอทานอลเป็นสารแหล่งจ่ายคาร์บอน ใช้แก๊สไฮโดรเจนเป็นตัวนำพาสารแหล่งจ่ายคาร์บอน โดยมีส่วนผสมของไอระเหยเอทานอลต่อแก๊สไฮโดรเจน โดยปริมาตรประมาณร้อยละ 10 (โดยให้มีอัตราการไหลของไฮโดรเจน ประมาณ 100 cc/min และให้มีอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนผ่านเอทานอลประมาณ 10 cc/min) ให้ความร้อนกับขดลวดความร้อนโดยใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง กำลังงานขณะเกิดฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ประมาณ 103 – 215 วัตต์ หลักการที่ทำให้เกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์คือ เมื่อไอระเหยของสารแหล่งจ่ายคาร์บอนได้รับความร้อนสูงจากขดลวดจะทำให้อะตอมของคาร์บอนแตกตัวออกมาจากโมเลกุลของแก๊สและไปจับตัวกันที่โลหะตัวเร่งปฏิกิริยาบนฐานรองเกิดเป็นคาร์บอนนาโนทิวบ์

สาเหตุที่ผู้จัดทำเลือกใช้วิธีการสังเคราะห์ด้วยวิธีวิธีเคมีแบบขดลวดความร้อนเนื่องจาก

1. ใช้สารแหล่งจ่ายคาร์บอนที่ไม่เป็นอันตรายคือใช้ไอระเหยของเอทานอล
2. สังเคราะห์โดยมีอัตราการไหลของแก๊สดำ คือแก๊สไฮโดรเจน ประมาณ 100 cc/min และอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนผ่านเอทานอล ประมาณ 10 cc/min
3. สร้างได้ง่ายเนื่องจากเครื่องสังเคราะห์และอุปกรณ์ประกอบเป็นอุปกรณ์ที่หาได้ทั่วไป
4. ในการให้ความร้อนไม่กินกำลังงานมากเนื่องจากขดลวดมีขนาดเล็ก โดยในการสังเคราะห์จะใช้กำลังงานประมาณ 103 – 215 วัตต์

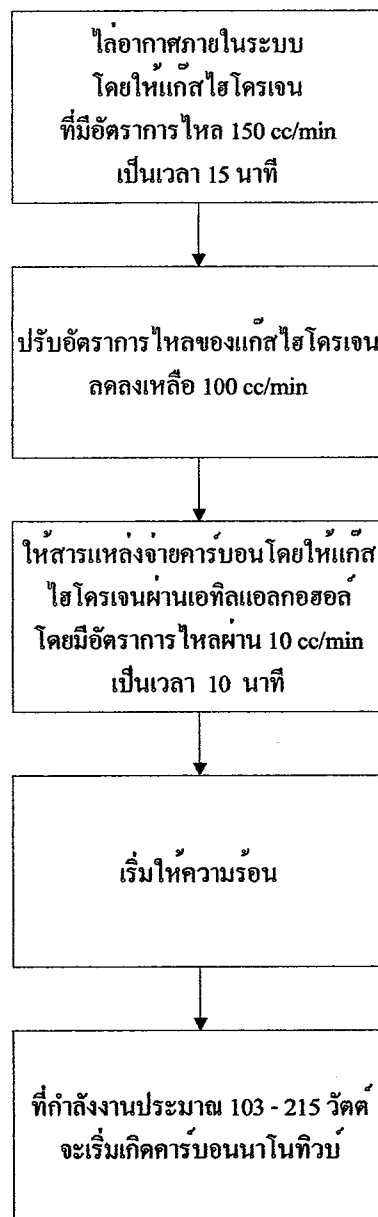
5.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการสังเคราะห์

1. ครอบแก้วควอตซ์ที่ใช้เป็นห้องทำปฏิกิริยา
2. เอทานอลใช้เป็นสารแหล่งจ่ายคาร์บอน
3. ขดลวดทังสเตนใช้เป็นขดลวดความร้อน
4. แก๊สไฮโดรเจน
5. เครื่องวัดอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนที่หัวถัง (Flow meter 1)
6. เครื่องวัดอัตราการไหลของแก๊สนำพาที่ผ่านแหล่งจ่ายคาร์บอน (Flow meter2)
7. วาล์วสำหรับปรับอัตราการไหล (วาล์ว 2)
8. แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า

9. พัฒนาระบายความร้อน
10. ฐานรองที่เตรียมไว้ในบทที่ 4
11. บีกเกอร์สำหรับใส่น้ำเปล่า, สายยางและข้อต่อต่างๆ

5.2 ขั้นตอนการสังเคราะห์

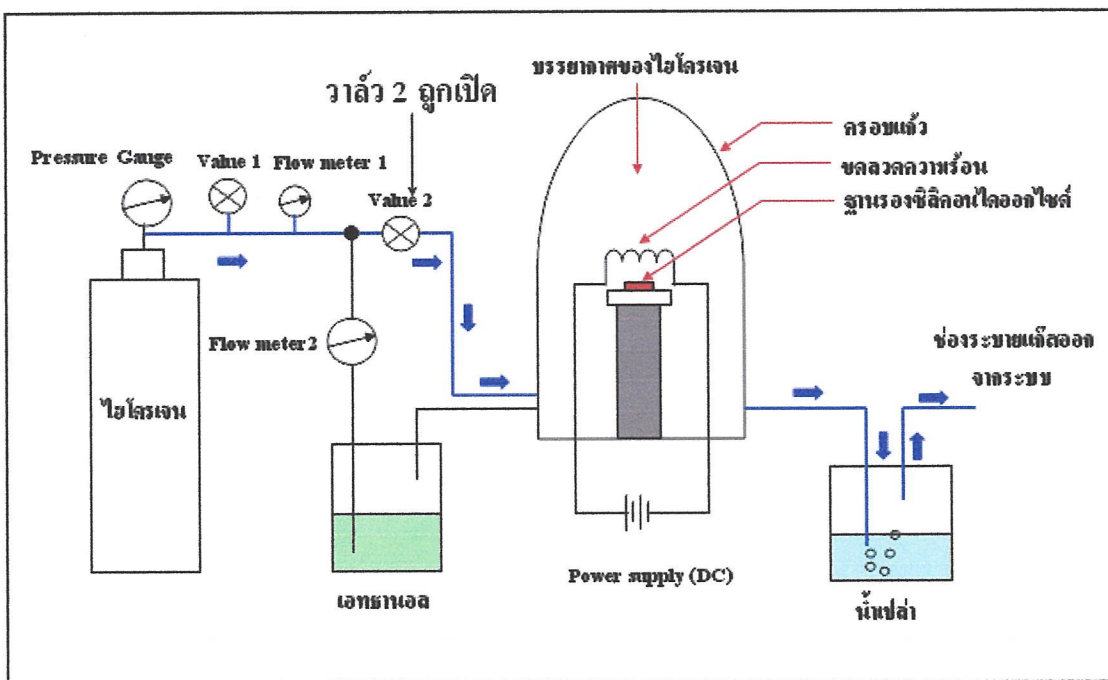
เพื่อแสดงให้เห็นขั้นตอนทั้งหมดในการสังเคราะห์จะแสดงเป็น โฟลว์ชาร์ตดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 โฟลว์ชาร์ตแสดงขั้นตอนการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์

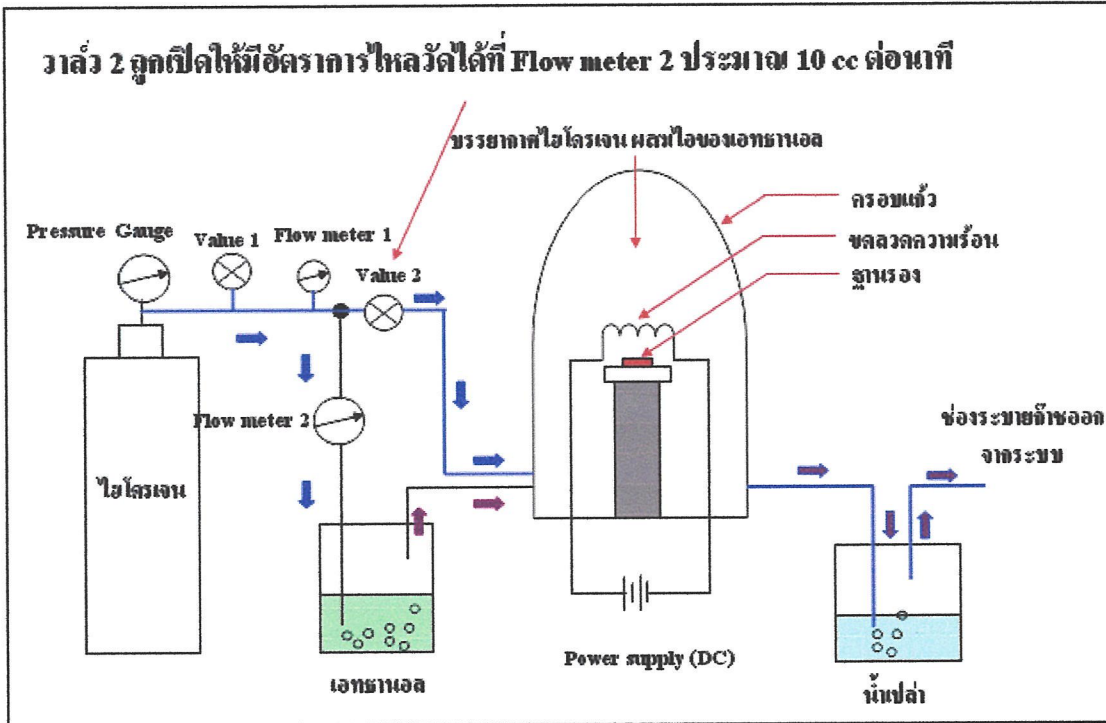
ในแต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดดังนี้

1. หลังจากวางฐานรองซิลิกอนไดออกไซด์ ลงบนฐานรองของเครื่องสังเคราะห์และปิดครอบแก้วแล้ว ให้ตรวจเช็คข้อต่อรวมถึงสายต่างๆ ก่อนการเปิดแก๊สไฮโดรเจน เมื่อตรวจสอบแล้วจะเป็นขั้นตอนการไล่อากาศออกจากระบบ โดยใช้แก๊สไฮโดรเจนที่มีอัตราการไหลประมาณ 150 cc/min (วัดได้ที่ Flow meter 1) เปิดวาล์ว 2 ให้สุด เพื่อให้แก๊สไฮโดรเจนไหลผ่านเข้าไปในระบบอย่างเดียว ใช้เวลา 15 นาที สาเหตุที่ต้องทำการไล่อากาศเนื่องจากการสังเคราะห์ต้องใช้ความร้อนสูงจากขดลวดประกอบกับแก๊สนำพาคือแก๊สไฮโดรเจนเป็นแก๊สที่ติดไฟ ดังนั้นจึงต้องทำการไล่อากาศที่มีส่วนผสมของแก๊สออกซิเจนซึ่งช่วยให้ไฟติดออกก่อนเพื่อป้องกันการลุกไหม้หรือการระเบิดของครอบแก้วแสดงดังรูปที่ 5.2



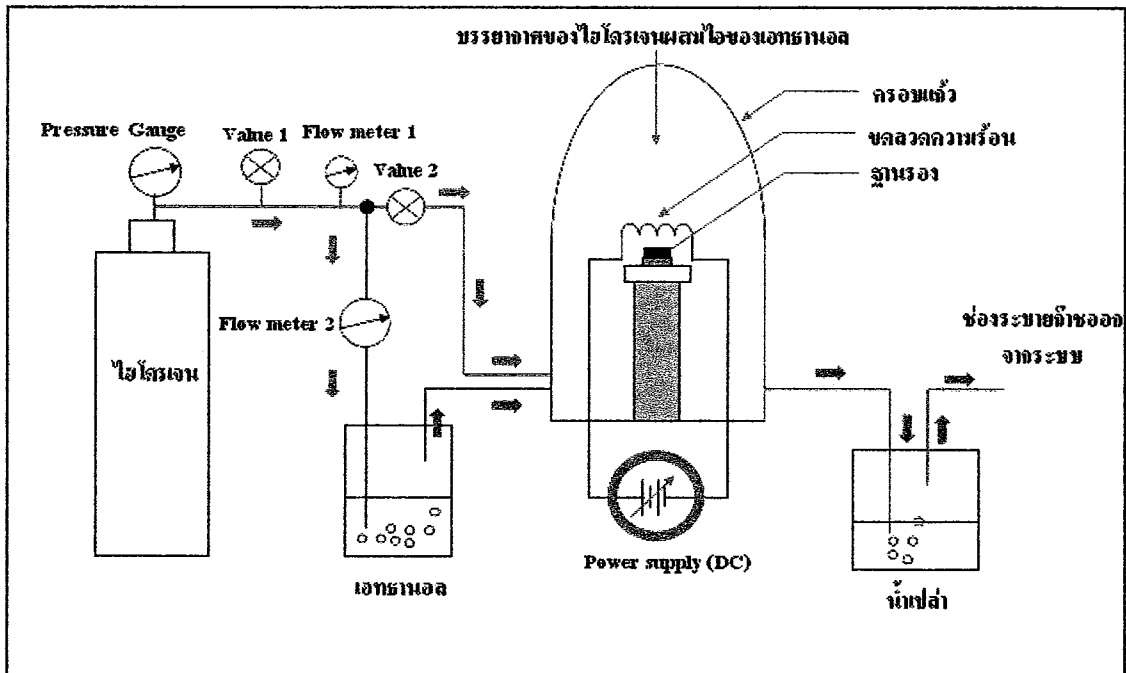
รูปที่ 5.2 แสดงการไล่อากาศภายในระบบโดยใช้แก๊สไฮโดรเจนเป็นเวลา 15 นาที

2. ปรับอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนที่วาล์ว 1 ให้ลดลงเหลือ 100 cc/min (วัดได้ที่ Flow meter 1) จากนั้นปิดวาล์ว 2 ปรับให้แก๊สไฮโดรเจนไหลผ่านเอทานอลด้วยอัตราการไหล 10 cc/min (วัดได้ที่ Flow meter 2) เป็นเวลา 10 นาที



รูปที่ 5.3 ให้สารแหล่งจ่ายคาร์บอนแก่ระบบโดยการปรับวาล์ว 2 ใช้เวลา 10 นาที

3. เปิดพัดลมระบายความร้อน แล้วเริ่มให้ความร้อน โดยการปรับแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง โดยทำการปรับเพิ่มค่ากระแสให้เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ คาร์บอนนาโนทิวบ์จะเกิดที่กำลังงานประมาณ 103 – 215 วัตต์



รูปที่ 5.4 ให้ความร้อนกับขดลวด

4. เมื่อสังเคราะห์เสร็จสิ้นแล้ว ให้ค่อยๆ ลดกระแสลงอย่างช้าๆ เพื่อให้อุณหภูมิในระบบค่อยๆ ลดลง ต่อมาให้ปิดแก๊สไฮโดรเจน แล้วเปิดวาล์ว 2 ให้สุด รอจนระบายแก๊สออกจากระบบหมดก่อนแล้วจึงเปิดครอบแก้ว

ต่อไปจะแสดงข้อมูลต่างๆ ในการสังเคราะห์โดยสรุปในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 แสดงข้อมูลต่างๆ ในการสังเคราะห์

สารแหล่งจ่ายคาร์บอน	เอทานอล
แก๊สนำพาสารแหล่งจ่ายคาร์บอน	แก๊สไฮโดรเจน
อัตราการไหลของแก๊สนำพาหรือแก๊สไฮโดรเจน	100 cc/min
อัตราการไหลของแก๊สนำพาผ่านสารแหล่งจ่ายคาร์บอน	10 cc/min
กำลังงานขณะเกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์	103 - 215 วัตต์
โลหะตัวเร่งปฏิกิริยา	นิกเกิล
ระยะห่างระหว่างขดลวดกับฐานรอง	ประมาณ 5 มิลลิเมตร
วัสดุที่ใช้ทำขดลวดและขนาดขดลวด	ทั้งสแตน ขนาด 0.30 มม.
ปริมาตรของครอบแก้ว	ประมาณ 2000 ลบ.ซม.
อุณหภูมิที่ฐานรอง	550 - 750 องศาเซลเซียส
เวลา	10 - 40 นาที

กำลังงานและเวลาในขณะเกิดฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์เต็มลวดลายตามที่ต้องการแสดง
ดังตาราง 5.2

ตารางที่ 5.2 แสดงกำลังงานและเวลาในขณะที่เกิดฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวส์เต็มหลอดตามที่ต้องการ

ลำดับ	โครงสร้าง	กระแสขณะเกิด CNTs (แอมแปร์)	แรงดันขณะเกิด CNTs (โวลต์)	กำลังงานขณะเกิด CNTs (วัตต์)	เวลา (นาที)
1	1	ไม่เกิดคาร์บอนนาโนทิวส์			
2	1	10.4	12.4	128	30
3	1	11.2	11.2	125	20
4	1	12.8	16.6	215.04	30
5	1	9.76	13.2	129	20
6	1	11.2	13.5	151.2	40
7	2	12	14.6	175.2	10
8	2	8.72	21.6	188.35	10
9	2	12.84	16.8	215.71	20
10	2	ไม่เกิดคาร์บอนนาโนทิวส์			
11	2	12.8	12	153.6	20
12	2	9.6	14	134.4	20
13	2	ไม่เกิดคาร์บอนนาโนทิวส์			
14	2	10.6	11	116.6	15
15	2	10.4	13.9	136	15
16	2	10.5	17.6	184.8	15

จากตารางที่ 5.2 พบว่า ใช้กำลังงานอยู่ระหว่าง 116 – 215 วัตต์ ในส่วนขนาดพื้นที่นั้น ไม่มีผลในการให้กำลังงาน (ความร้อน) โดยทั้ง 2 โครงสร้างใช้กำลังงานเกือบเท่ากัน เนื่องจากคาร์บอนนาโนทิวส์จะเกิดหรือก่อตัว ในช่วงอุณหภูมิหนึ่ง อุณหภูมิโดยประมาณ มากกว่า 500 องศาเซลเซียส

ในส่วนของเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ พบว่าโครงสร้างที่ 1 (พื้นที่มาก) ใช้เวลามากกว่า เนื่องจากพื้นที่การเกิดคาร์บอนนาโนทิวส์มากกว่าแบบโครงสร้างที่ 2 (มากกว่ากัน 5 เท่า) การควบคุมความหนาแน่นและความหนาของชั้นฟิล์ม จะสามารถควบคุมได้จากเวลาในการสังเคราะห์

แต่ต้องใช้กล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนกำลังขยายสูง ซึ่งเป็นเครื่องมือที่มีราคาแพงมาก ในการสังเกต ในปริศยานี้จึงไม่ได้ควบคุมในส่วนนี้ โดยใช้แค่ตาเปล่าในการสังเกตเท่านั้น ทำให้ความหนาของชั้นฟิล์มเป็นตัวแปรที่ควบคุมไม่ได้ ในการทดลอง

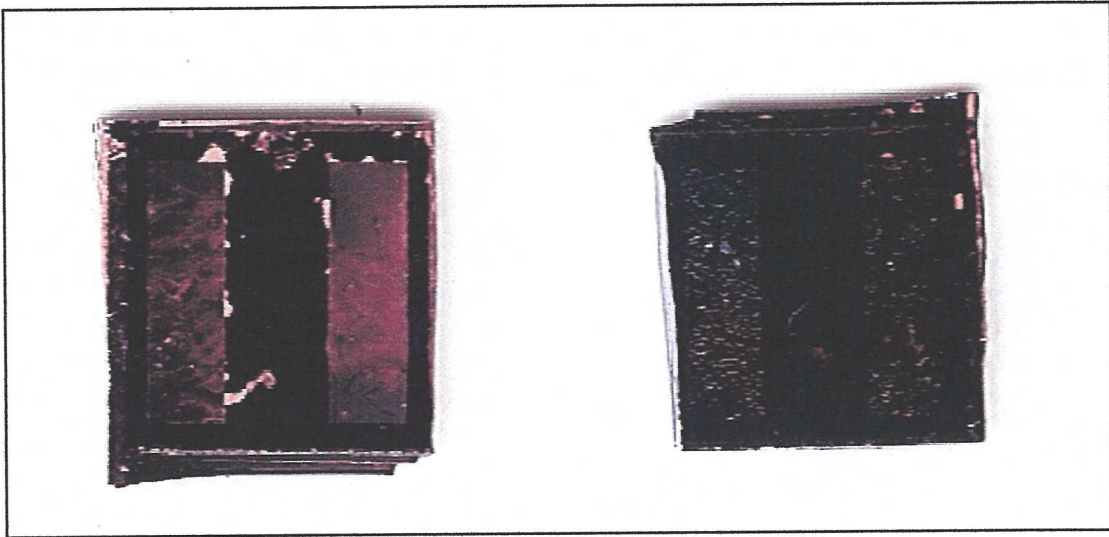
สำหรับแผ่นตัวอย่างลำดับที่ 1,10,13 ไม่เกิดการบอบนาโนทิวบ์เนื่องจาก ในการทดลองสังเคราะห์แผ่นตัวอย่างดังกล่าว ไม่สามารถเพิ่มกำลังงานได้ถึงจุดที่มีอุณหภูมิเพียงพอที่จะเกิดการบอบนาโนทิวบ์ โดยสามารถเพิ่มกำลังงานได้ไม่ถึง 100 วัตต์ แม้มีการให้ความร้อนกับขดลวดเพื่อให้ขดลวดอยู่ตัวเป็นเวลามากกว่า 1 ชั่วโมงแล้วก็ตาม ที่เป็นดังนี้สันนิษฐานได้คือ เนื่องจากมีการเปลี่ยนขดลวดม้วนใหม่ คุณสมบัติความต้านทาน ของลวดทั้งสแตนเปลี่ยนไปจากม้วนเดิม ถ้าพิจารณาให้ขดลวดเป็นความต้านทานตัวหนึ่งและความร้อนคือกำลังงานสูญเสียที่ความต้านทานนี้ ถ้าความต้านทานเปลี่ยน ไปจากเดิม คือมีค่าความต้านทานต่ำลง ค่ากำลังงานสูญเสีย (ความร้อน) จะต่ำลงด้วย ทั้งนี้ผู้จัดทำไม่สามารถทดลองให้เห็นจริงได้โดยการวัดค่าความต้านทานต่อความยาว (โอห์มต่อเมตร) ได้ เนื่องจากลวดทั้งสแตนม้วนเก่านั้นถูกใช้หมดไปแล้ว

ในการแก้ปัญหาดังกล่าวผู้จัดทำจึงทดลองใช้แหล่งจ่ายกระแส 6 ตัว ต่อขนานกัน (จากเดิมใช้ 4 ตัว) ผลปรากฏว่าสามารถเพิ่มกำลังงานได้มากกว่า 200 วัตต์ ตามปกติ ผู้จัดทำจึงให้ความร้อนทิ้งไว้เป็นเวลา 1 ชม. เพื่อให้คุณสมบัติของขดลวดอยู่ตัว แล้วจึงใช้แหล่งจ่ายกระแส 4 ตัวตามเดิมพบว่าค่ากระแส แรงดัน เปลี่ยนแปลงตามเวลา คือเมื่อให้กำลังงานแก่ขดลวดในช่วงแรก โดยให้กำลังงาน 90 วัตต์ (ตัวเลขกรณีสมมุติ) เมื่อปล่อยทิ้งไว้สักครู่ ค่ากระแส แรงดัน ที่จ่ายให้แก่ขดลวด จะเปลี่ยน ไปอีก อาจได้กำลังงาน 95 วัตต์ แต่ก็ยังไม่สามารถจ่ายกำลังงานได้เกิน 100 วัตต์ และยังพบว่าการใช้พัลสมระบายความร้อนให้กับกรอบแก้ว มีผลกับการเปลี่ยนแปลงกำลังงานด้วย ผู้จัดทำจึงทดลองปิดพัลสมระบายความร้อน พบว่า สามารถจ่ายกำลังงานได้มากกว่า 200 วัตต์ ตามปกติ แต่ยังคงมีปัญหาการเปลี่ยนแปลงกำลังงานตามเวลาอยู่

กรณีกำลังงานเปลี่ยนแปลงตามเวลานี้ ไม่เคยเกิดขึ้นในการสังเคราะห์ในภาค 1/2551 ทั้งที่ในภาค 2/2551 ไม่ได้เปลี่ยนระยะขดลวดกับแผ่นตัวอย่าง แหล่งจ่ายกระแส หรือเครื่องมือใดๆ เลย ในเครื่องสังเคราะห์ นอกจากขดลวดทั้งสแตนม้วนใหม่เท่านั้น ผู้จัดทำจึงสันนิษฐานสาเหตุของปัญหาคือขดลวดทั้งสแตนมีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงดังที่ได้กล่าวมาแล้ว



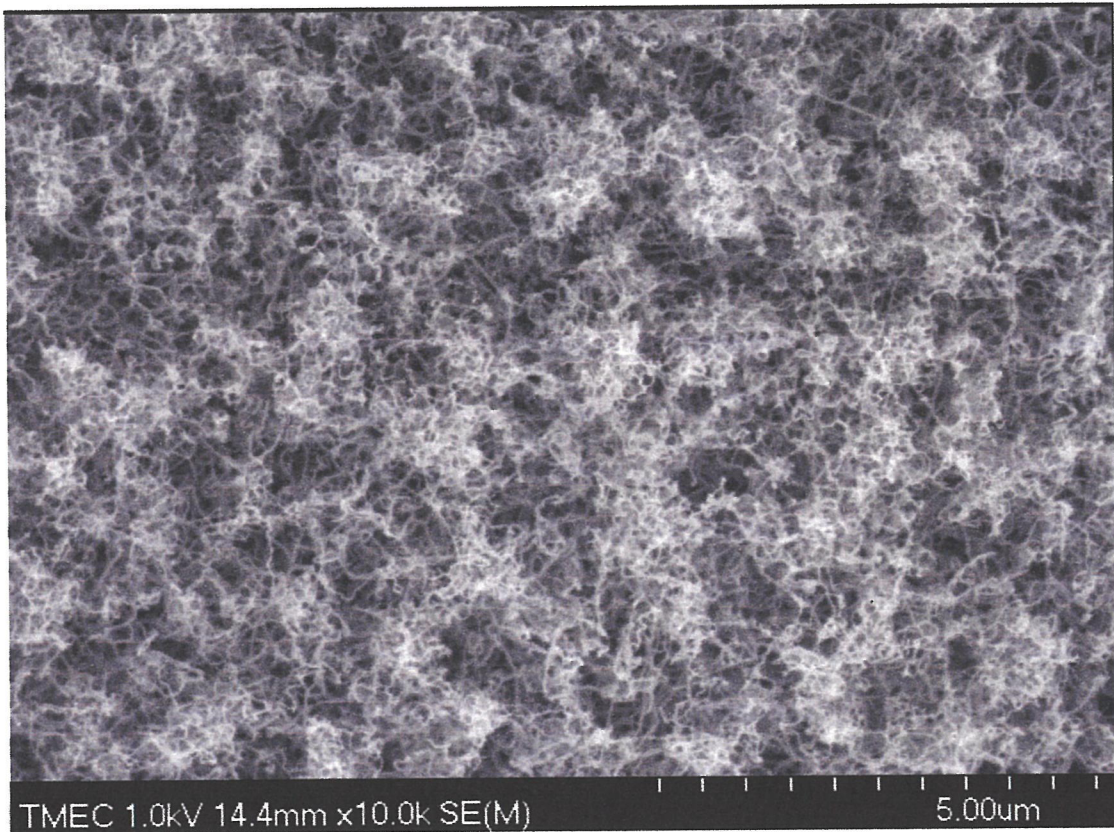
รูปที่ 5.5 เครื่องสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ แบบ HFCVD

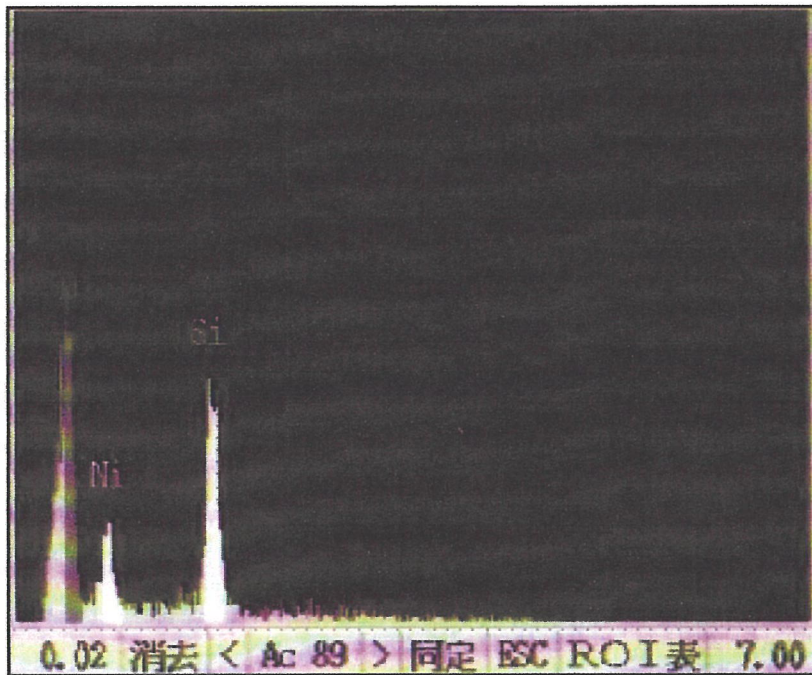


ก่อนการสังเคราะห์

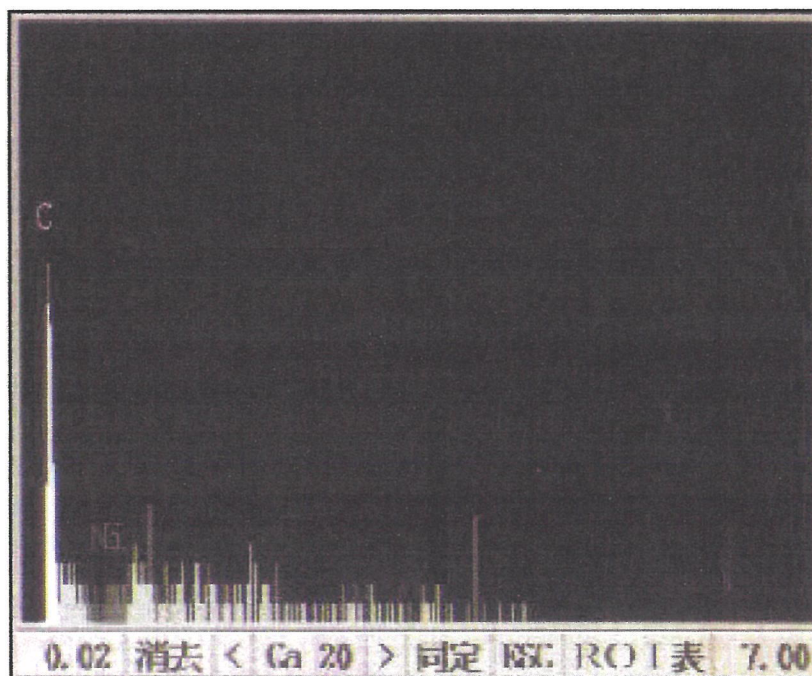
หลังการสังเคราะห์

รูปที่ 5.6 ภาพถ่ายแสดงฐานรองก่อนการสังเคราะห์และหลังการสังเคราะห์

รูปที่ 5.7 ภาพถ่าย SEM ของฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ใช้สารแหล่งจ่ายเป็นเอทานอลและโลหะ
ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นนิกเกิล



รูปที่ 5.8 ภาพจาก EDX แสดงถึงองค์ประกอบของธาตุบนฐานรองซิลิคอนที่เคลือบด้วยนิเกิล ก่อนการสังเคราะห์



รูปที่ 5.9 ภาพจาก EDX แสดงถึงองค์ประกอบของธาตุบนฐานรองซิลิคอนที่เคลือบด้วยนิเกิล หลังการสังเคราะห์

จากรูปที่ 5.6 จะเห็นได้ว่าหลังการสังเคราะห์จะสังเกตได้อย่างชัดเจนว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นบนฐานรองบริเวณที่เคลือบโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา คือจะมีลักษณะเป็นเขม่าสีดำ ลักษณะคล้ายผงถ่านและเกิดบริเวณที่เคลือบโลหะตัวเร่งเท่านั้น ที่หัวทองแดงจะไม่เกิดเขม่านี้ นอกจากนี้มีรอยไหม้จากอุณหภูมิสูง

เพื่อพิสูจน์ว่าการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธีชีวิตีแบบขดลวดความร้อนนี้สามารถสร้างคาร์บอนนาโนทิวบ์ได้จริง จำเป็นต้องนำไปทดสอบด้วยเครื่องมือต่างๆ ที่กล่าวมาแล้ว ในบทที่ 2

รูปที่ 5.7 แสดงภาพถ่าย SEM ของฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ใช้สารแหล่งจ่ายเป็นเอทานอลและโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นนิกเกิล พบว่ามีลักษณะเป็นเส้นหรือท่อยาว มีความหนาแน่นและดักไปมาโดยไม่มีทิศทาง

รูปที่ 5.8 ภาพจาก EDX แสดงถึงองค์ประกอบของธาตุบนฐานรองซัลฟอนที่เคลือบด้วยนิกเกิล ก่อนการสังเคราะห์ จะเห็นได้ว่ารูปที่ 5.8 จะสังเกตเห็นองค์ประกอบของธาตุที่แสดงเป็นพีกต่างๆ คือพีกของธาตุนิกเกิลและซัลฟอน ซึ่งเป็นชั้นฉนวนซัลฟอนไดออกไซด์และมีพีกของธาตุนิกเกิลเกิดขึ้นไม่สูงนักซึ่งได้จากการสเปกโตรริงที่เวลาน้อย แต่ไม่พบพีกที่เป็นธาตุคาร์บอน

รูปที่ 5.9 ภายหลังจากการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์แล้ว พบว่ามีพีกของธาตุคาร์บอนเกิดขึ้นมาอย่างชัดเจน

จากรูปที่ 5.7 – 5.8 สามารถยืนยันได้ว่าการสังเคราะห์นี้สามารถสร้างคาร์บอนนาโนทิวบ์บนบริเวณที่ต้องการได้

เมื่อสังเคราะห์ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ลงบนฐานรองแล้วต่อไปจะนำมาวัดค่าความต้านทานหลังการสังเคราะห์ แสดงในตาราง 5.3

ตารางที่ 5.3 แสดงค่าความต้านทานก่อนสังเคราะห์เปรียบเทียบกับค่าความต้านทานหลังการสังเคราะห์

ลำดับ	ค่าความต้านทานก่อนสังเคราะห์ (โอห์ม)	ค่าความต้านทานหลังสังเคราะห์ (โอห์ม)	โครงสร้างที่	หมายเหตุ
1	17.4	-	1	ไม่เกิด CNTs
2	12.5	370.3k	1	
3	12.6	206	1	
4	15.1	3.07k	1	
5	16.6	28	1	
6	15.2	321.2	1	
7	14.7	326.4	2	
8	7.3	307.77	2	
9	12.7	750	2	
10	10	-	2	ไม่เกิด CNTs
11	12.3	3.5k	2	
12	17.6	1.3k	2	
13	5	-	2	ไม่เกิด CNTs
14	22.6	370	2	
15	7.6	20.06k	2	
16	16.4	5.60k	2	

จะเห็นได้ว่าค่าความต้านทานหลังการสังเคราะห์มีค่าเพิ่มขึ้นมากเนื่องจากอิเล็คตรอนเปลี่ยนจากการเคลื่อนไปโดยปรากฏการณ์ทะลุอุโมงค์ เปลี่ยนมาเคลื่อนไปบนผนังของคาร์บอนนาโนทิวบ์แทน ซึ่งโดยทั่วไปคาร์บอนนาโนทิวบ์จะมีคุณสมบัติเป็นกึ่งตัวนำไฟฟ้า ความนำไฟฟ้าโดยรวมจึงมีค่าลดลง คือค่าความต้านทานมากขึ้นนั่นเอง ในส่วนของโครงสร้าง พบว่าไม่มีผลกับความต้านทาน

ต่อไปจะแสดงค่าความต้านทานเปรียบเทียบกับค่ากำลังงานและเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ เพื่อวิเคราะห์ดูว่ามีผลกับความต้านทานหรือไม่

ตารางที่ 5.4 แสดงค่าความต้านทานหลังสังเคราะห์เปรียบเทียบเวลาในการสังเคราะห์และกำลังงาน

ลำดับ	โครงสร้าง	กำลังงาน (วัตต์)	เวลา (นาท)	ความต้านทานหลังการสังเคราะห์ (โอห์ม)
1	1	-	-	-
2	1	128	30	370.3k
3	1	125	20	206
4	1	215.04	30	3.07k
5	1	129	20	28
6	1	151.2	40	321.2
7	2	175.2	10	326.4
8	2	188.35	10	307.77
9	2	215.71	20	750
10	2	-	-	-
11	2	153.6	20	3.5k
12	2	134.4	20	1.3k
13	2	-	-	-
14	2	116.6	15	370
15	2	136	15	20.06k
16	2	184.8	15	5.60k

จากตารางที่ 5.4 พบว่าค่าความต้านทานมีลักษณะสุ่มคือ ไม่ขึ้นกับเวลาในการสังเคราะห์และกำลังงานในการสังเคราะห์

จากข้อสรุปที่ได้จาก ตารางที่ 5.3 – 5.4 พบว่า ค่าต่างๆ ที่ได้นั้นมีลักษณะแบบสุ่ม ไม่มีแนวโน้มไปทางใดเลย ที่เป็นดังนี้เกิดจากการควบคุมตัวแปรต่างๆ ในการทดลองยังไม่ดีเพียงพอในด้านการควบคุมอุณหภูมิและความหนาของฟิล์ม ประกอบกับเครื่องมือต่างๆ ไม่มีความละเอียด ตัวแปรต่างๆ มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา อีกทั้งรูปแบบโครงสร้างที่ออกแบบยังไม่ต่างกันพอที่จะทำให้เห็นแนวโน้มได้ ในขั้นตอนต่อไปจะนำฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวป์ไปทดสอบตรวจวัดแก๊สรายละเอียดในบทความต่อไป

บทที่ 6

การทดลองนำคาร์บอนนาโนทิวป์ไปประยุกต์เป็นเซนเซอร์เคมีและผลการทดลอง

ในบทนี้จะเป็นการนำเอาคาร์บอนนาโนทิวป์ที่สังเคราะห์ได้จากบทที่ 5 มาประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์เคมี โดยนำมาทดลองตรวจวัดไอระเหยของเอทานอลและแก๊สไฮโดรเจน จุดประสงค์เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของคาร์บอนนาโนทิวป์โดยสังเกตจากค่าความต้านทานที่จะเปลี่ยนแปลงไปเมื่อตรวจพบแก๊สที่ปล่อยเข้ามาในระบบวัด โดยจะศึกษาการตรวจวัดแก๊สด้วยกัน 3 กรณี คือ

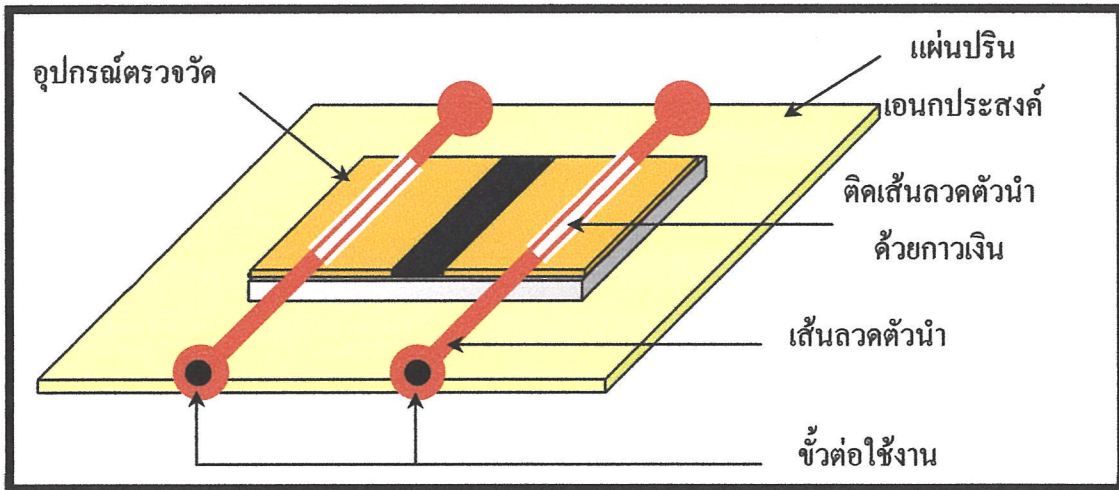
1. ศึกษาถึงผลของอุณหภูมิในระบบวัด โดยทำการตรวจวัดที่อุณหภูมิห้องและให้ความร้อนในระบบวัด
2. ศึกษาถึงผลของอุณหภูมิในการอบฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวป์ก่อนนำเข้าสู่ระบบวัด
3. ศึกษาถึงผลของขนาดพื้นที่ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวป์ในการตรวจวัดแก๊ส

ในการตรวจวัดนั้นจำเป็นที่จะต้องทราบชนิดของแก๊สตั้งต้นในระบบและต้องเป็นบรรยากาศของแก๊สชนิดเดียวเท่านั้น เนื่องจากคาร์บอนนาโนทิวป์ยังขาดคุณสมบัติทางการจำแนกประเภทของแก๊ส จึงทำการทดลองในอากาศปกติไม่ได้ เพราะคาร์บอนนาโนทิวป์จะทำปฏิกิริยากับแก๊สชนิดต่างๆ ในอากาศ ทำให้ไม่สามารถทราบได้เลยว่าขณะนั้นคาร์บอนนาโนทิวป์ทำปฏิกิริยากับแก๊สชนิดใดอยู่ ดังนั้นในการทดลองจะใช้แก๊สไฮโดรเจนเป็นแก๊สตั้งต้น เนื่องจากแก๊สไฮโดรเจนเป็นแก๊สเฉื่อย โดยจะต้องไล่อากาศหรือแก๊สอื่นๆ ออกจากระบบก่อนเป็นเวลา 20 นาที และถือว่าค่าความต้านทานของเซนเซอร์ที่เวลา 20 นาที นี้เป็นค่าความต้านทานตั้งต้น (R_0) แล้วจึงปล่อยแก๊สที่ต้องการตรวจวัดเข้าไป ในการทดลองตรวจวัดไอระเหยของเอทานอลใช้อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจน ประมาณ 400 ซีซีต่อนาทีและอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนผ่านเอทานอลเพื่อนำพาไอระเหยของเอทานอลเข้าสู่ระบบด้วยอัตราการไหล ประมาณ 200 ซีซีต่อนาที ในส่วนของการตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจน จะใช้อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจน ประมาณ 200 ซีซีต่อนาที และอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจน ประมาณ 200 ซีซีต่อนาที

ผลการทดลองการตรวจวัดจะแสดงในรูปกราฟความต้านทานและเวลา ซึ่งจะแสดงพฤติกรรมเปลี่ยนแปลงความต้านทานเมื่อคาร์บอนนาโนทิวป์เมื่อทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของแก๊ส

6.1 การต่อขั้วไฟฟ้าเพื่อใช้วัดความต้านทาน

จุดประสงค์เพื่อต่อขั้วไฟฟ้าจากขั้วทองแดงบนฐานรอง เพื่อใช้วัดค่าความต้านทาน



รูปที่ 6.1 แสดงรายละเอียดการต่อขั้วออกไปใช้งาน

ในบทที่ 5 หลังจากสังเคราะห์ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ลงบนฐานรองแล้วจะเห็นได้ว่าค่าความต้านทานที่วัดได้มีค่าเปลี่ยนแปลง (จากตารางที่ 5.3) เนื่องจากกระแสไฟฟ้าหรืออิเล็กทรอนิกส์เปลี่ยนจากการเคลื่อนไปบนโลหะตัวเร่งปฏิกิริยามาเคลื่อนอยู่บนผนังของคาร์บอนนาโนทิวบ์แทนเมื่อนำมาต่อขั้วใช้งานและทดลองวัดค่าความต้านทานอีกครั้งก็พบว่าค่าความต้านทานได้เปลี่ยนแปลงไปอีกแสดงดังตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 แสดงการเปรียบเทียบค่าความต้านทานก่อนการสังเคราะห์ หลังการสังเคราะห์และหลังการต่อขั้ว

ลำดับ	ค่าความต้านทาน ก่อนสังเคราะห์ (โอห์ม)	ค่าความต้านทาน หลังสังเคราะห์ (โอห์ม)	ค่าความต้านทาน หลังต่อขั้ว (โอห์ม)	โครงสร้างที่
1	ไม่เกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์			
2	12.5	370.3k	506.5k	1
3	12.6	206	167.2	1
4	15.1	3.078k	5.94k	1

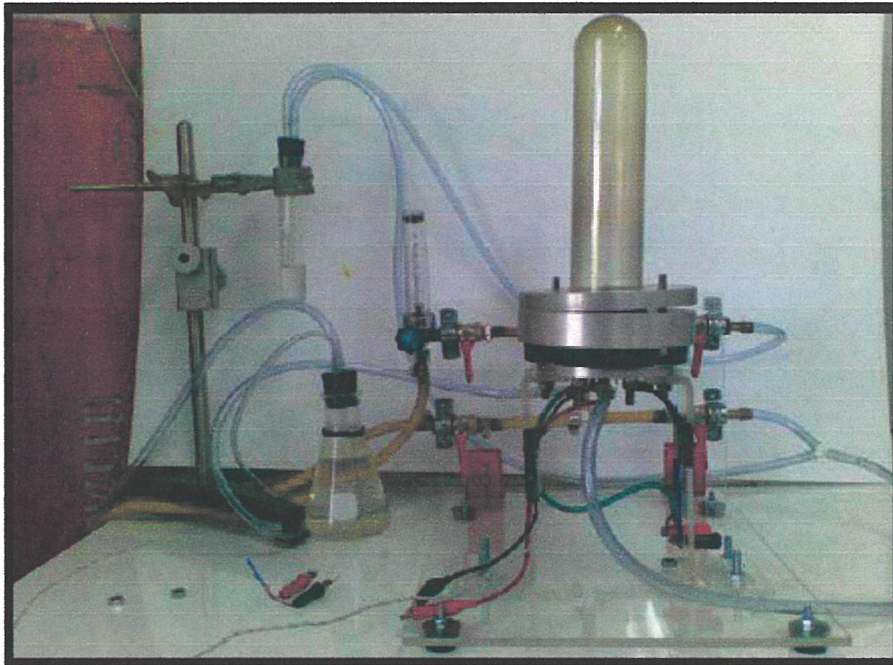
ตารางที่ 6.1 (ต่อ) แสดงการเปรียบเทียบค่าความต้านทานก่อนการสังเคราะห์ หลังการสังเคราะห์ และหลังการต่อข้อ

ลำดับ	ค่าความต้านทาน ก่อนสังเคราะห์ (โหน้ม)	ค่าความต้านทาน หลังสังเคราะห์ (โหน้ม)	ค่าความต้านทาน หลังต่อข้อ (โหน้ม)	โครงสร้างที่
5	16.6	28	54.7	1
6	15.2	321.2	716	1
7	14.7	326.4	1.22k	2
8	7.3	307.77	488.2	2
9	12.7	750	505	2
10	ไม่เกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์			
11	12.3	3.5k	16.64k	2
12	17.6	1.3k	275k	2
13	ไม่เกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์			
14	22.6	370	1.26k	2
15	7.6	20.06k	150k	2
16	16.4	5.60k	7.97k	2

จากตารางที่ 6.1 พบว่าหลังต่อข้อค่าความต้านทานมีการเปลี่ยนไป โดยมีค่ามากขึ้น เนื่องจากสาเหตุที่ค่าความต้านทานที่รอยสัมผัส มีการเปลี่ยนแปลง โดยจะอธิบายถึงสาเหตุดังกล่าวในข้อ 6.4

6.2 การทดลองตรวจวัดแก๊ส

ทำการทดลองตรวจวัดแก๊ส 2 ชนิด คือ ไอรระเหยของเอทานอลและแก๊สไฮโดรเจน และศึกษาถึงผลของอุณหภูมิในระบบวัด ศึกษาถึงผลของอุณหภูมิในการอบฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ ก่อนนำเข้าสู่ระบบวัด ศึกษาถึงผลของขนาดพื้นที่ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ในการตรวจวัดแก๊ส มีการทดลองดังนี้



รูปที่ 6.2 แสดงระบบที่ใช้ในการตรวจวัดแก๊ส

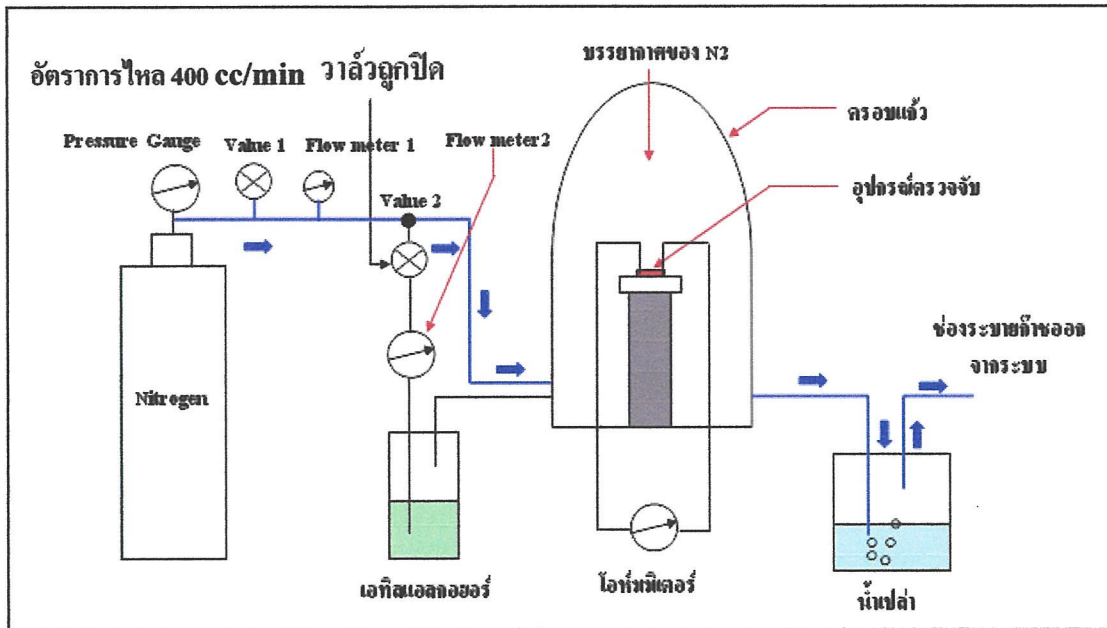
6.2.1 การนำไปทดลองตรวจวัดไอระเหยของเอทานอล

เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของคาร์บอนนาโนทิวบ์เมื่อทำปฏิกิริยากับไอระเหยของเอทานอล โดยจะทำการทดลอง 2 ลักษณะ คือ

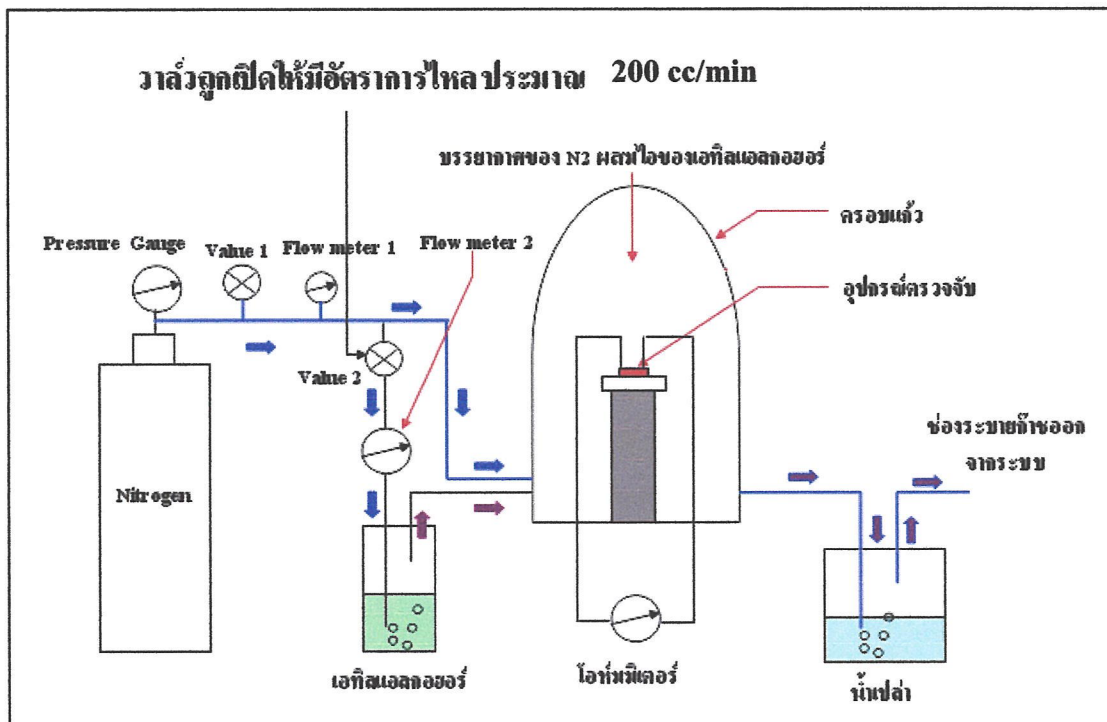
6.2.1.1 ทดลองตรวจวัดไอระเหยของเอทานอลที่อุณหภูมิห้อง

1. ขั้นตอนการไล่อากาศออกจากระบบวัดโดยปล่อยแก๊สไนโตรเจนเป็นเวลา 20 นาที ดังรูปที่ 6.3 เปิดวาล์ว 1 และปิดวาล์ว 2 ให้แก๊สไนโตรเจนไหลเข้าไปในระบบอย่างเดียว โดยมีอัตราการไหลประมาณ 400 ซีซีต่อนาที ใช้เวลา 20 นาที เพื่อให้บรรยากาศภายในครอบแก้วเป็นแก๊สไนโตรเจนเท่านั้น

2. เมื่อครบ 20 นาทีแล้วให้สังเกตค่าความต้านทานของอุปกรณ์ตรวจวัด จะมีค่าคงที่ค่าหนึ่งนั่นคือค่าความต้านทานในขณะที่คาร์บอนนาโนทิวบ์ทำปฏิกิริยากับแก๊สไนโตรเจนจะถือว่าค่าความต้านทานค่านี้เป็นค่าตั้งต้น (R_0) ต่อไปให้ไอระเหยของเอทานอล โดยการเปิดวาล์ว 2 แก๊สไนโตรเจนจะไหลไป 2 ทิศทางและนำพาไอระเหยของเอทานอลเข้าสู่ครอบแก้ว ด้วยอัตราการไหลประมาณ 200 ซีซีต่อนาที บรรยากาศในครอบแก้วในขณะนั้นจะประกอบไปด้วยแก๊สไนโตรเจนและไอระเหยของเอทานอล สังเกตและบันทึกค่าความต้านทานซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไป



รูปที่ 6.3 การไล่อากาศออกจากโครมแก้ว

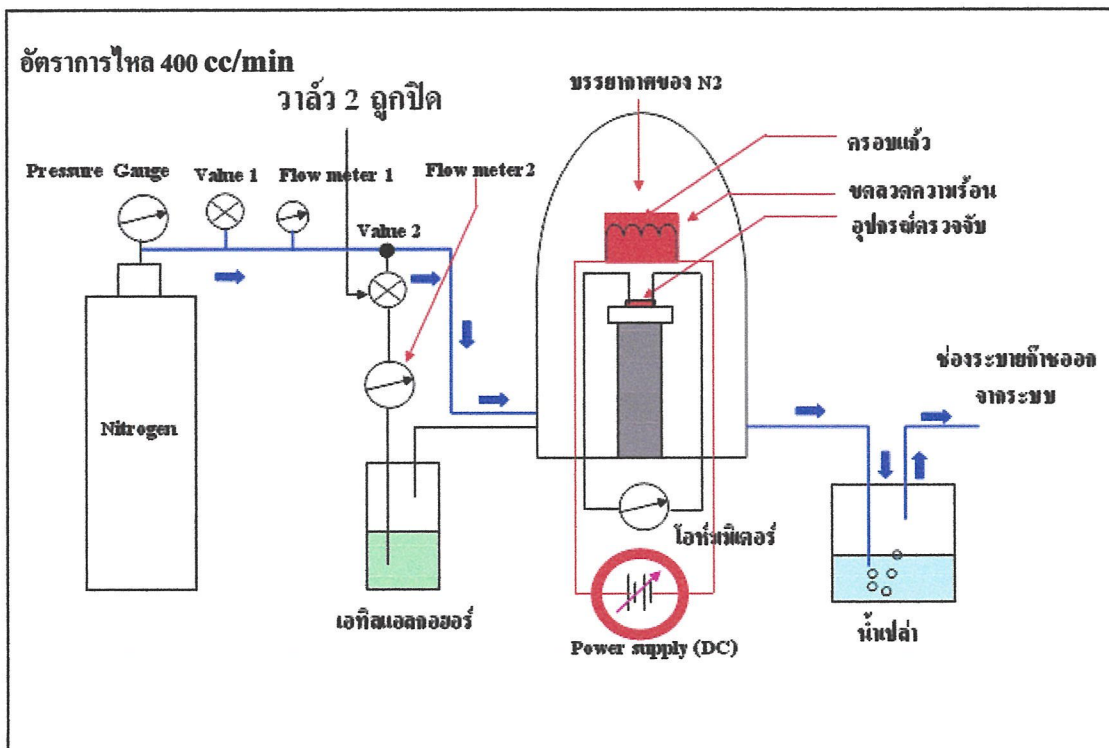


รูปที่ 6.4 เปิดวาล์ว 2 เพื่อให้ไอระเหยของเอทานอล

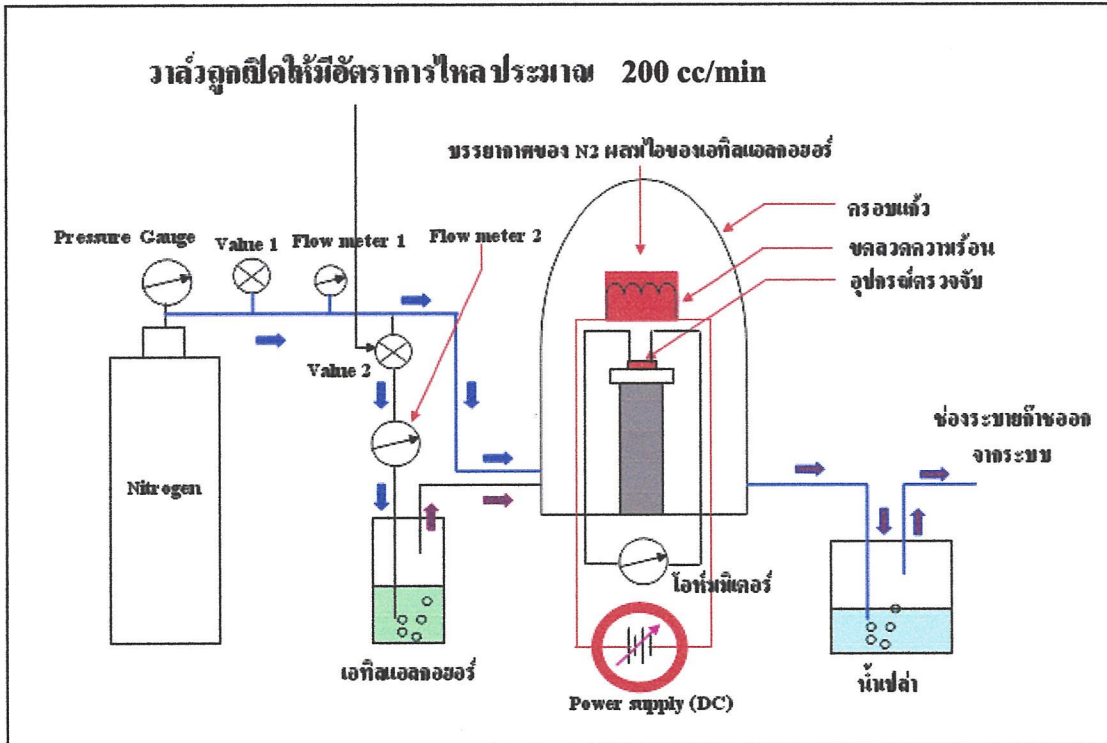
3. เมื่อให้ไอระเหยของเอทานอลจนอุปกรณ์ตรวจวัดมีค่าความดันทานคงที่ค่าหนึ่งแล้วต่อไปจะทำซ้ำอีกครั้งเพื่อศึกษาว่าอุปกรณ์ตรวจวัดมีคุณสมบัติในการตรวจซ้ำเหมือนเดิมหรือไม่ โดยการหยุดจ่ายไอระเหยของเอทานอลด้วยการปิดวาล์ว 2 แล้วปล่อยให้ค่าความดันทานคงที่อีกครั้งหนึ่งจึงเริ่มให้ไอระเหยของเอทานอลอีกครั้งด้วยการเปิดวาล์ว 2

6.2.1.2 ทดลองตรวจวัดไอระเหยของเอทานอลโดยให้ความร้อนในระบบวัด

เพื่อศึกษาถึงผลของอุณหภูมิต่อการตรวจวัด โดยกระทำเหมือนข้อ 6.2.1.1 แต่มีการให้ความร้อนในระบบโดยการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้กับขดลวด โดยให้กำลังงานกับขดลวดประมาณ 15 วัตต์ หรือมีอุณหภูมิประมาณ 50 – 60 องศาเซลเซียส



รูปที่ 6.5 การไล่อากาศออกจากครอบแก้ว



6.2.2 การนำไปทดลองตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจน (ทดลองเบื้องต้น)

เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของคาร์บอนนาโนทิวบ์เมื่อทำปฏิกิริยากับแก๊สไฮโดรเจน โดยมีขั้นตอนการทดลองดังนี้

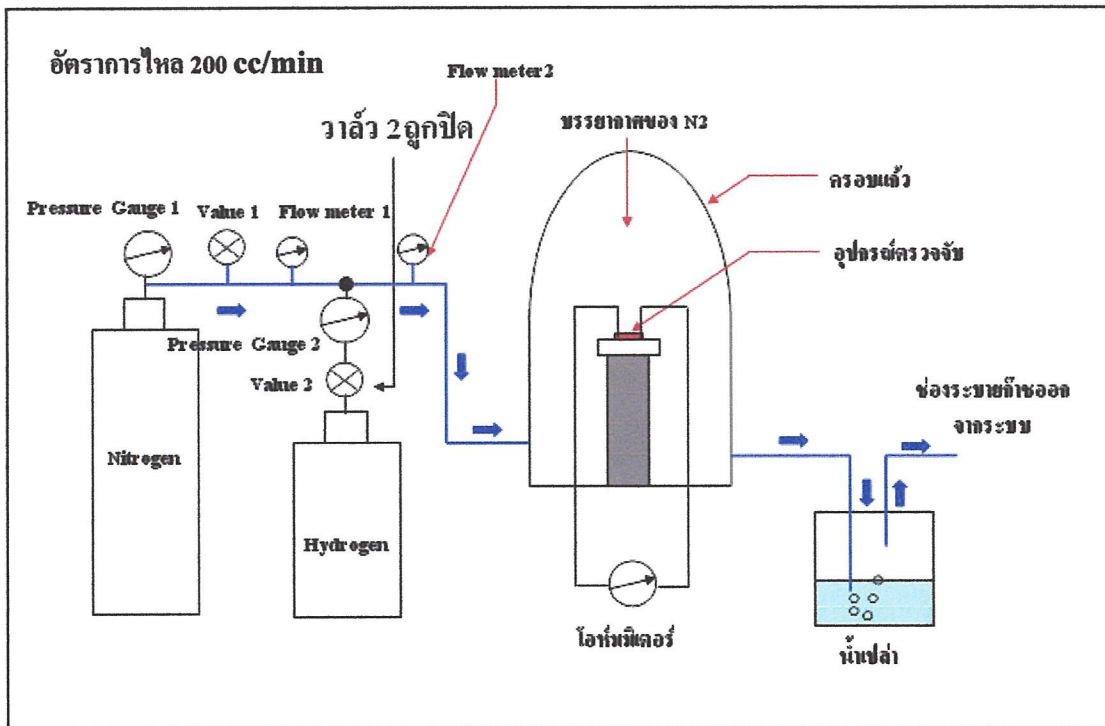
6.2.2.1 ทดลองตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจนที่อุณหภูมิห้อง

1. ขั้นตอนการไล่อากาศออกจากระบบวัดโดยปล่อยแก๊สไนโตรเจนเป็นเวลา 20 นาที ดังรูปที่ 6.7 เปิดวาล์ว 1 และปิดวาล์ว 2 ให้แก๊สไนโตรเจนไหลเข้าไปในระบบอย่างเดียว ใช้เวลา 20 นาที อัตราการไหลประมาณ 200 ซีซีต่อนาที เพื่อให้บรรยากาศภายในครอบแก้วเป็นแก๊สไนโตรเจนเท่านั้น

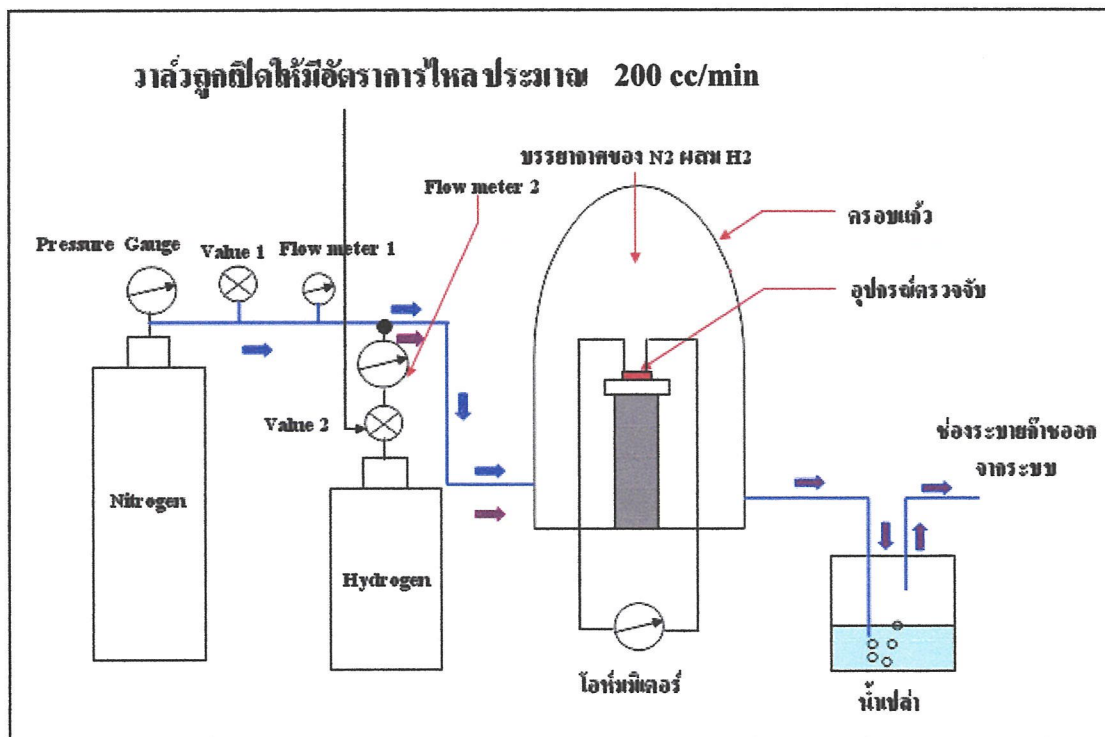
2. เมื่อครบ 20 นาทีแล้วให้สังเกตค่าความต้านทานของอุปกรณ์ตรวจวัด จะมีค่าคงที่ค่าหนึ่งนั่นคือค่าความต้านทานในขณะที่คาร์บอนนาโนทิวบ์ทำปฏิกิริยากับแก๊สไนโตรเจนจะถือว่าค่าความต้านทานค่านี้เป็นค่าตั้งต้น (R_0) ต่อไปให้แก๊สไฮโดรเจน โดยการเปิดวาล์ว 2 โดยให้มีอัตราการไหลประมาณ 200 ซีซีต่อนาที บรรยากาศภายในครอบแก้วในขณะนั้นจะประกอบไปด้วยแก๊สไนโตรเจนและแก๊สไฮโดรเจน สังเกตและบันทึกค่าความต้านทานซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไป

3. เมื่อให้แก๊สไฮโดรเจนจนอุปกรณ์ตรวจวัดมีค่าความต้านทานคงที่ค่าหนึ่งแล้ว ต่อไปจะทำซ้ำอีกครั้งเพื่อศึกษาว่าอุปกรณ์ตรวจวัดมีคุณสมบัติในการตรวจซ้ำเหมือนเดิมหรือไม่ โดยการ

หยุดจ่ายแก๊สไฮโดรเจนด้วยการปิดวาล์ว 2 แล้วปล่อยให้ค่าความดันทานคงที่อีกครั้งหนึ่งจึงเริ่มให้แก๊สไฮโดรเจนอีกครั้งด้วยการเปิดวาล์ว 2



รูปที่ 6.7 การไล่อากาศออกจากครอบแก้ว



รูปที่ 6.8 เปิดวาล์ว 2 เพื่อให้แก๊สไฮโดรเจน

6.3 ผลการทดลองการตรวจวัดแก๊ส

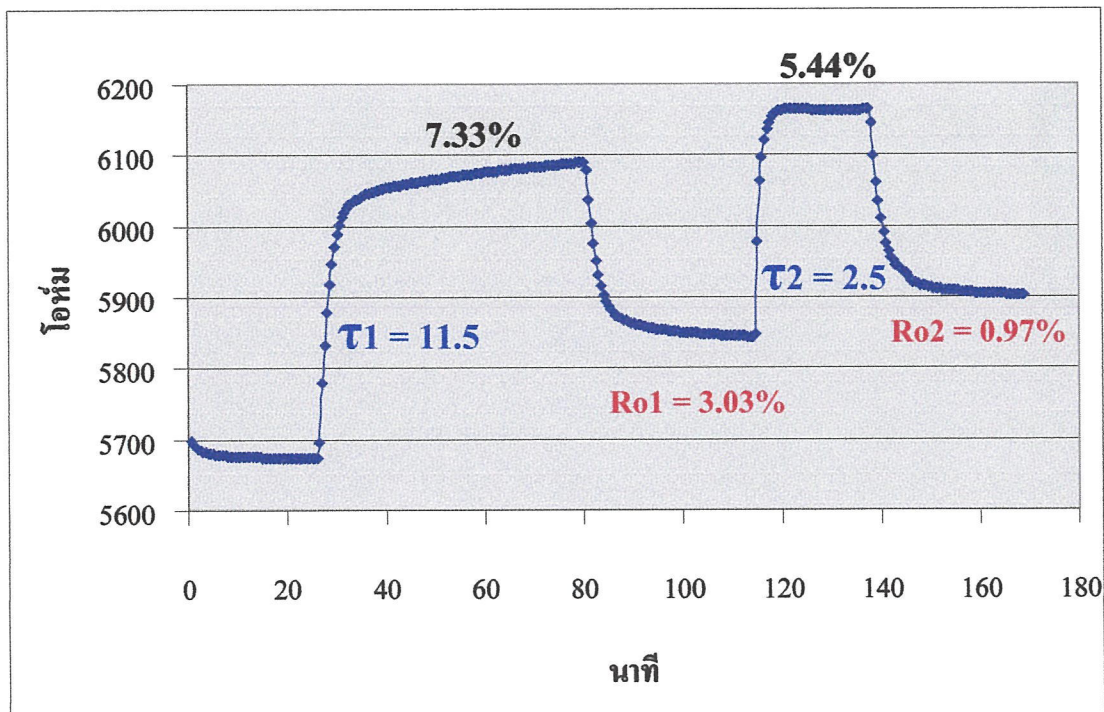
หลังจากทำการทดลองโดยมีขั้นตอนแสดงดังข้อ 6.2 แล้ว ต่อไปจะแสดงผลการทดลองตรวจวัดไอระเหยของเอทานอลในรูปกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงความต้านทานต่อเวลา โดยให้ค่าความต้านทานของตัวตรวจวัดในบรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน เป็นค่าความต้านทานตั้งต้น (R_0) และค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปของตัวตรวจวัดขณะตรวจพบไอระเหยของเอทานอล เป็นค่าความต้านทาน R_s

6.3.1 ผลการทดลองตรวจวัดไอระเหยของเอทานอลที่อุณหภูมิห้อง

ในการทดลองจะมีการอบตัวตรวจวัดเพื่อไล่ความชื้นหรือธาตุแปลกปลอมอื่นๆ ที่ตกค้างอยู่ในฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ ที่สามารถระเหยเป็นไอที่ อุณหภูมิ 50 – 85 องศาเซลเซียส ด้วยอุณหภูมิ ดังนี้คือ ไม่มีการอบตัวตรวจวัด, อบที่อุณหภูมิ 50,70,85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25 นาที

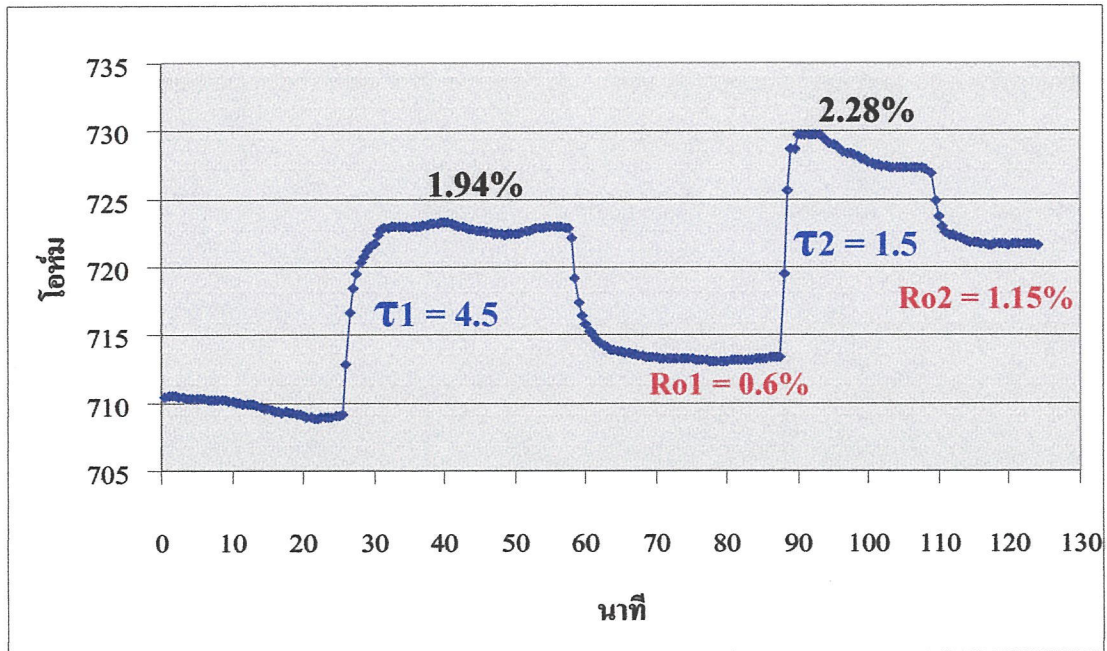
6.3.1.1 ผลการทดลองการตรวจวัดไอระเหยของเอทานอลที่อุณหภูมิห้องโดยไม่มี การอบตัวตรวจวัดก่อนนำเข้าระบบวัด

1. แผ่นตัวอย่างลำดับที่ 4 โครงสร้างที่ 1



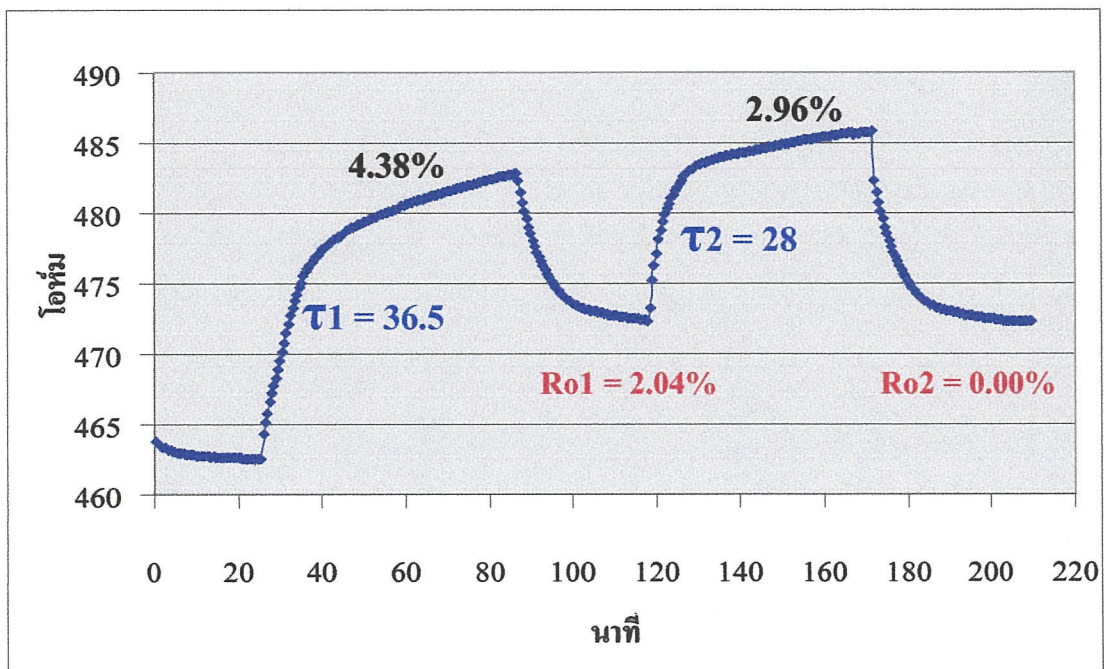
รูปที่ 6.9 กราฟแสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัดไอระเหยเอทานอล แผ่นตัวอย่างที่ 4

2. แผ่นตัวอย่างลำดับที่ 6 โครงสร้างที่ 1



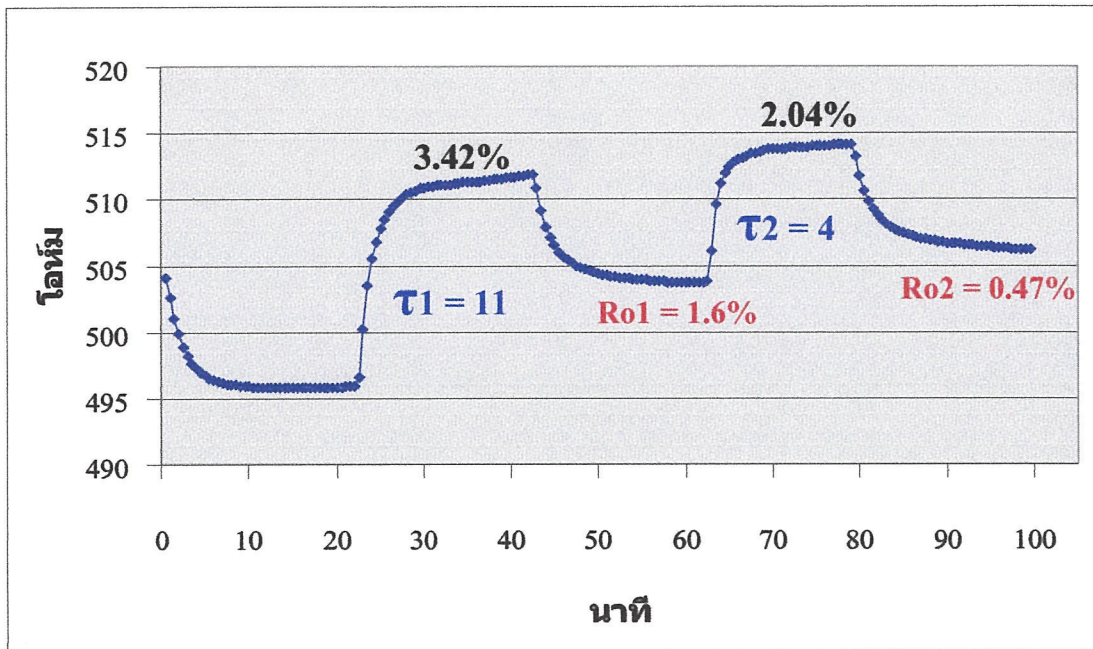
รูปที่ 6.10 กราฟแสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัดไอระเหยเอทานอลแผ่นตัวอย่างที่ 6

3. แผ่นตัวอย่างลำดับที่ 8 โครงสร้างที่ 2



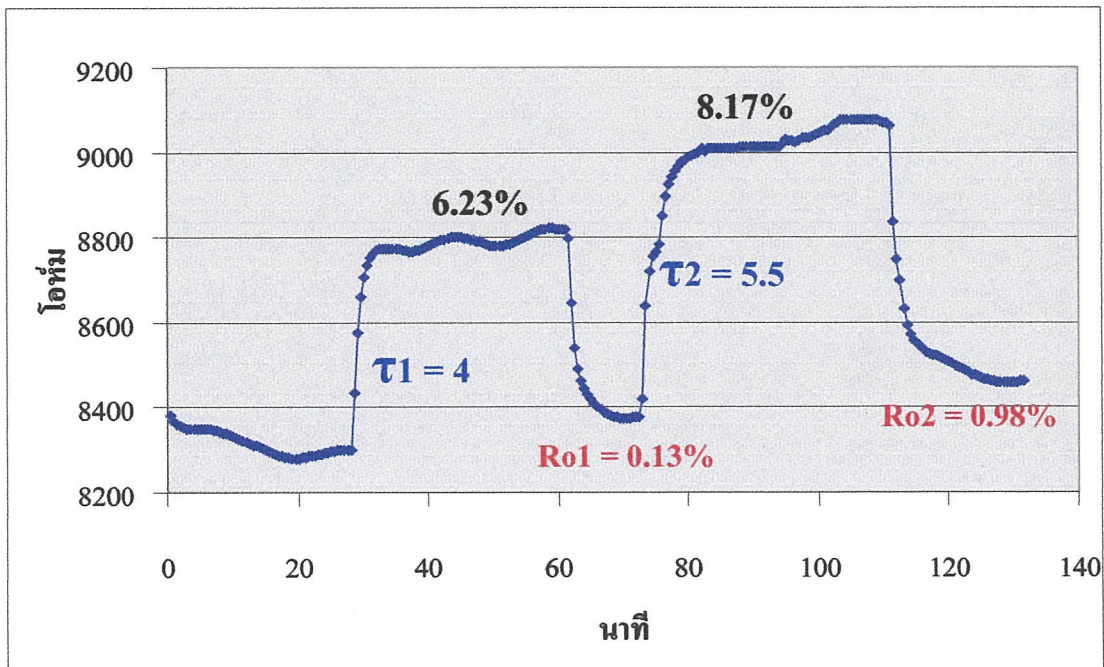
รูปที่ 6.11 กราฟแสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัดไอระเหยเอทานอลแผ่นตัวอย่างที่ 8

4. แผ่นตัวอย่างลำดับที่ 9 โครงสร้างที่ 2



รูปที่ 6.12 กราฟแสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัดไอระเหยเอทธานอลแผ่นตัวอย่างที่ 9

5. แผ่นตัวอย่างลำดับที่ 16 โครงสร้างที่ 2



รูปที่ 6.13 กราฟแสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัดไอระเหยเอทธานอลแผ่นตัวอย่างที่ 16

เพื่อให้เปรียบเทียบได้ง่ายจะแสดงข้อมูลเป็นตารางดังแสดงในตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.2 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของแผ่นตัวอย่าง กรณีไม่มีการอบฟิล์มคาร์บอนนาโน
ทิวก่อนการตรวจวัด

แผ่น ตัวอย่าง	โครงสร้าง	เปอร์เซ็นต์การ เปลี่ยนแปลง		เวลาการเปลี่ยนแปลง 0 - 90%		เปอร์เซ็นต์ส่วน ต่าง Ro	
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	τ_1	τ_2	Ro1	Ro2
4	1	7	5.44	11.5	2.5	3.03	0.97
6	1	1.94	2.28	4.5	1.5	0.6	1.15
8	2	4.38	2.96	36.5	28	2.04	0
9	2	3.42	2.04	11	4	1.6	0.47
16	2	6.23	8.17	4	5.5	0.93	0.98
ค่าเฉลี่ย		4.66	8.17	13.5	8.3	1.64	0.71
หน่วย		%	%	นาทึ	นาทึ	%	%

จากตารางที่ 6.2 พบว่ากรณีไม่มีการอบฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์มีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความต้านทานครั้งที่ 1 ในช่วง 1 – 7% ค่าเฉลี่ย 4.66% มีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานครั้งที่ 2 ในช่วง 2 – 8% ค่าเฉลี่ย 8.17 % เวลาการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน 0 – 90 % ครั้งที่ 1 มีค่าอยู่ในช่วง 4 – 36 นาทึ ค่าเฉลี่ย 13.5 นาทึ เวลาการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน 0 – 90 % ครั้งที่ 2 มีค่าอยู่ในช่วง 1.5 – 28 นาทึ ค่าเฉลี่ย 8.3 นาทึ ค่าเปอร์เซ็นต์ส่วนต่างค่าความต้านทานตั้งต้น (offset) ครั้งที่ 1 0.6 – 3 % ค่าเฉลี่ย 1.64 % ค่าเปอร์เซ็นต์ส่วนต่างค่าความต้านทานตั้งต้น (offset) ครั้งที่ 2 0.0 – 0.98 % ค่าเฉลี่ย 0.71 %

เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยโดยรวม คุณสมบัติของเซนเซอร์จะมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความต้านทานครั้งที่ 1 มากกว่าครั้งที่ 2 เวลาการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน 0 – 90 % ครั้งที่ 1 มีเวลามากกว่าครั้งที่ 2 ค่าเปอร์เซ็นต์ส่วนต่างค่าความต้านทานตั้งต้น (offset) ครั้งที่ 1 มีค่ามากกว่าครั้งที่ 2 และเปอร์เซ็นต์ส่วนต่างค่าความต้านทานตั้งต้น (offset) ครั้งที่ 2 มีค่าต่ำประมาณ 0 %

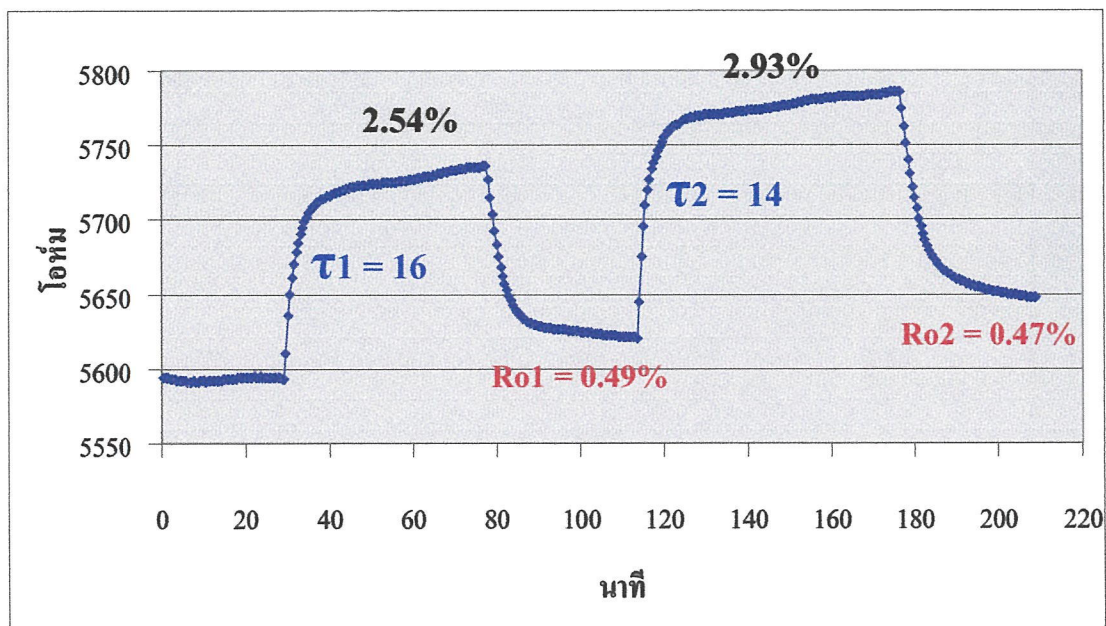
ในส่วนโครงสร้างของแผ่นตัวอย่างที่ออกแบบให้มีความต่างกันนั้น ไม่มีส่งผลใดๆ ถ้าพิจารณาในด้านโครงสร้างจะเห็นได้ว่ามีลักษณะเป็นแบบสุ่ม ไม่เห็นค่าความแตกต่างอย่างชัดเจน

เนื่องมาจากขนาดของทั้ง 2 โครงสร้างมีความต่างกันน้อยเกินกว่าที่จะส่งผลและปัจจัยตัวแปรต่างๆ ในการสังเคราะห์ยังไม่สามารถควบคุมได้อย่างถูกต้องแน่นอน

6.3.1.2 ผลการทดลองการตรวจวัดไอระเหยของเอทานอลที่อุณหภูมิห้อง โดยอบฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส 25 นาที ก่อนนำเข้าระบบวัด

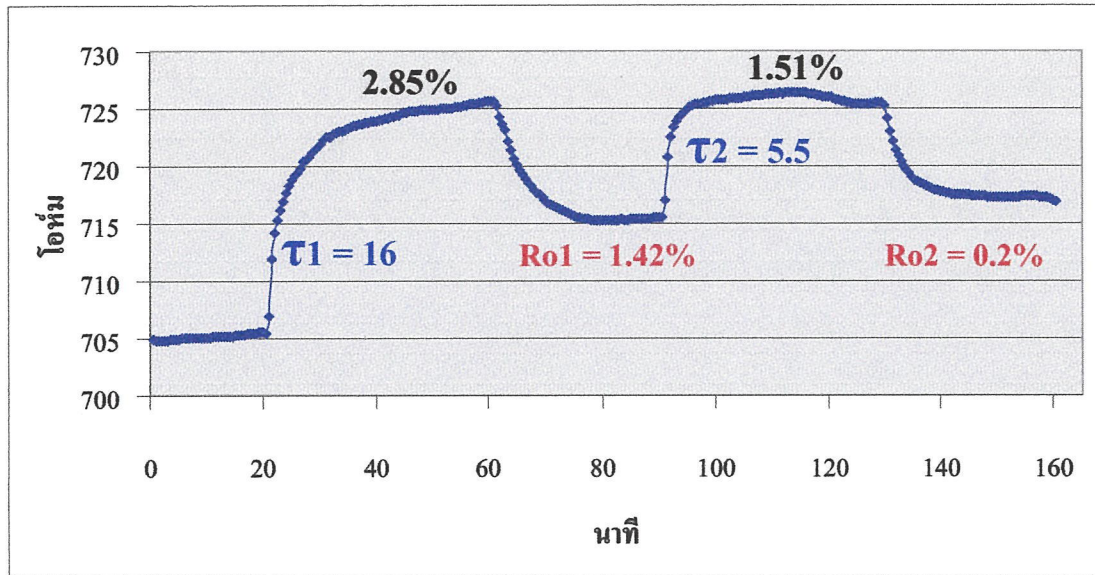
การทดลองในหัวข้อนี้ผู้ทดลองได้ทำการทดลองเป็นลำดับแรกเพื่อพิจารณาการตอบสนองของแผ่นตัวอย่างต่างๆ แผ่น เนื่องจากเป็นอุณหภูมิปานกลางของการทดลอง จากนั้นจึงคัดเลือกแผ่นตัวอย่างที่สมบูรณ์มากที่สุดเพื่อนำไปทำการทดลองในหัวข้อ 6.3.1.1 ที่ผ่านมา และ 6.3.3.3 ถึง 6.3.2 โดยการคัดเลือกจะพิจารณาจากเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความต้านทาน สภาพฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์จากตาเปล่า ซึ่งสามารถคัดเลือกได้ 5 แผ่นตัวอย่าง คือ แผ่นตัวอย่างที่ 4,6,8,9,16 ซึ่งในส่วนนี้จะแสดงเฉพาะแผ่นตัวอย่างที่ได้ถูกคัดเลือกเท่านั้น

1. แผ่นตัวอย่างลำดับที่ 4 โครงสร้างที่ 1



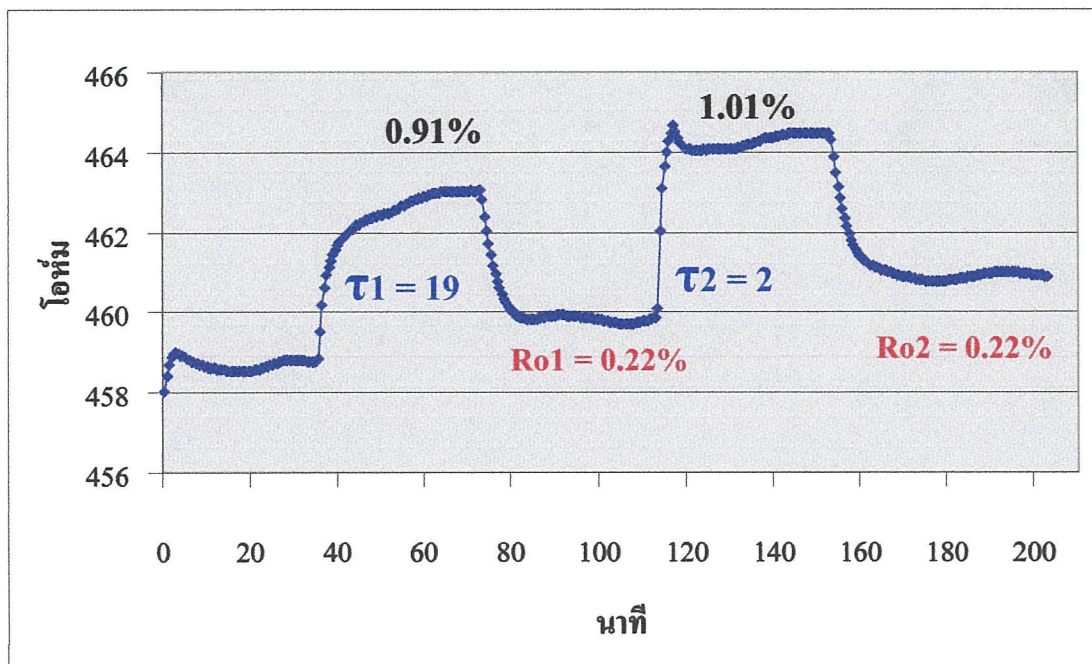
รูปที่ 6.14 กราฟแสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัดไอระเหยเอทานอลแผ่นตัวอย่างที่ 4

2. แผ่นตัวอย่างลำดับที่ 6 โครงสร้างที่ 1



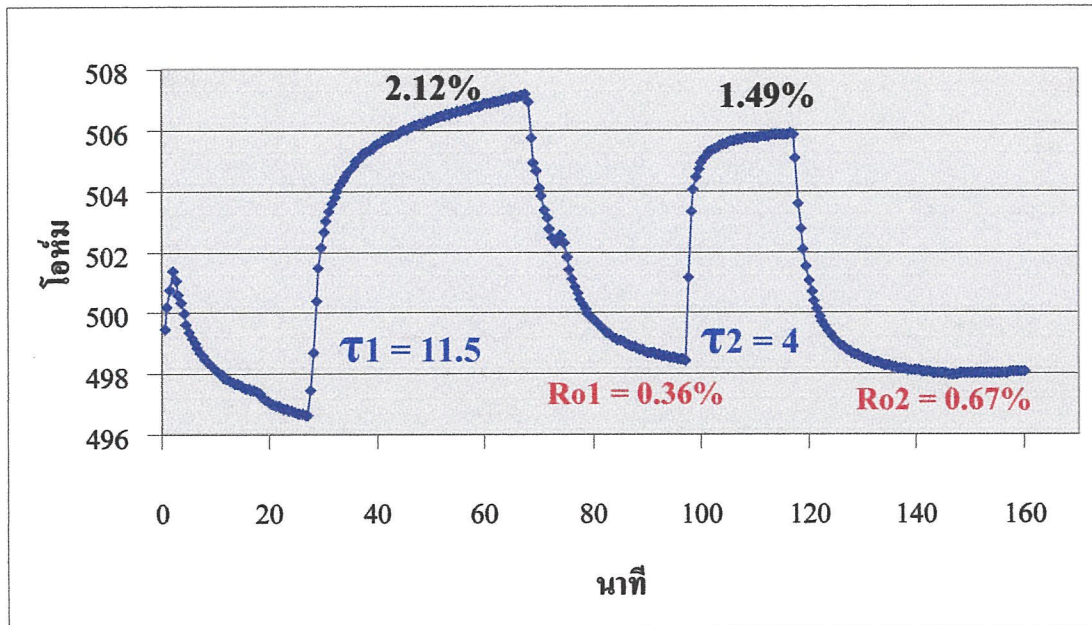
รูปที่ 6.15 กราฟแสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัดไอระเหยเอทานอลแผ่นตัวอย่างที่ 6

3. แผ่นตัวอย่างลำดับที่ 8 โครงสร้างที่ 2



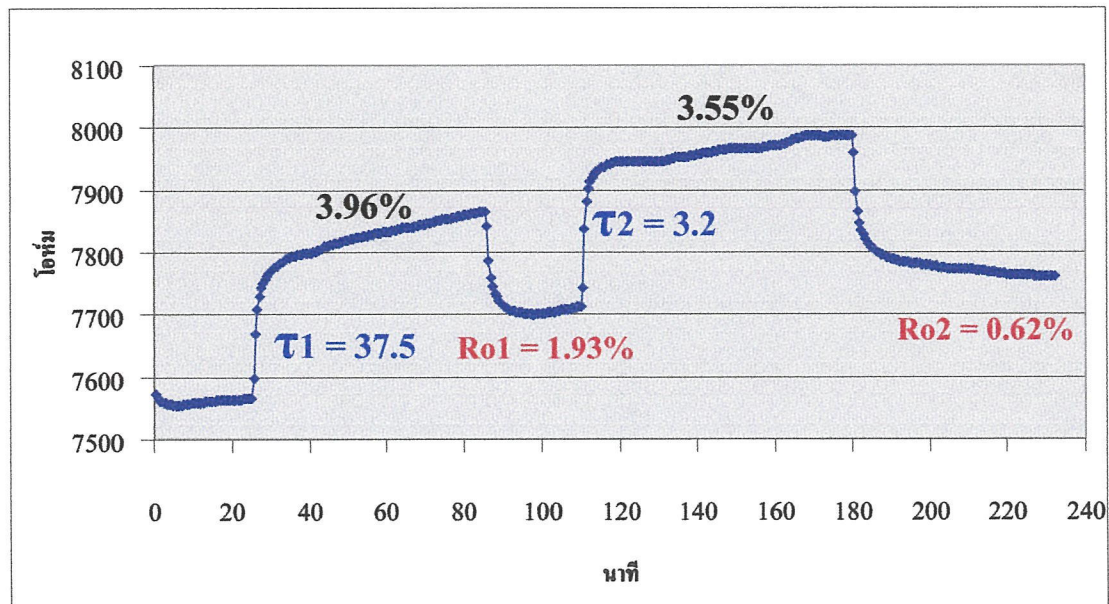
รูปที่ 6.16 กราฟแสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัดไอระเหยเอทานอลแผ่นตัวอย่างที่ 8

4. แผ่นตัวอย่างลำดับที่ 9 โครงสร้างที่ 2



รูปที่ 6.17 กราฟแสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัดไอระเหยเอทธานอลแผ่นตัวอย่างที่ 9

5. แผ่นตัวอย่างลำดับที่ 16 โครงสร้างที่ 2



รูปที่ 6.18 กราฟแสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัดไอระเหยเอทธานอลแผ่นตัวอย่างที่ 16

เพื่อให้เปรียบเทียบได้ง่ายจะแสดงข้อมูลเป็นตารางดังแสดงในตารางที่ 6.3

ตารางที่ 6.3 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของแผ่นตัวอย่าง กรณีอบฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์
ก่อนการตรวจวัดด้วยอุณหภูมิจานา 50 องศา 25 นาที

แผ่น ตัวอย่าง	โครงสร้าง	เปอร์เซ็นต์การ เปลี่ยนแปลง		เวลาการเปลี่ยนแปลง 0 - 90%		เปอร์เซ็นต์ส่วนต่าง Ro	
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	τ_1	τ_2	Ro1	Ro2
4	1	2.54	2.93	16	14	0.49	0.47
6	1	2.85	1.51	16	5.5	1.42	0.2
8	2	0.91	1.01	19	2	0.22	0.22
9	2	2.12	1.49	11.5	4	0.36	0.07
16	2	3.96	3.55	37.5	32	1.93	0.62
ค่าเฉลี่ย		2.52	2.00	20	11.5	1.05	0.38
หน่วย		%	%	นาที	นาที	%	%

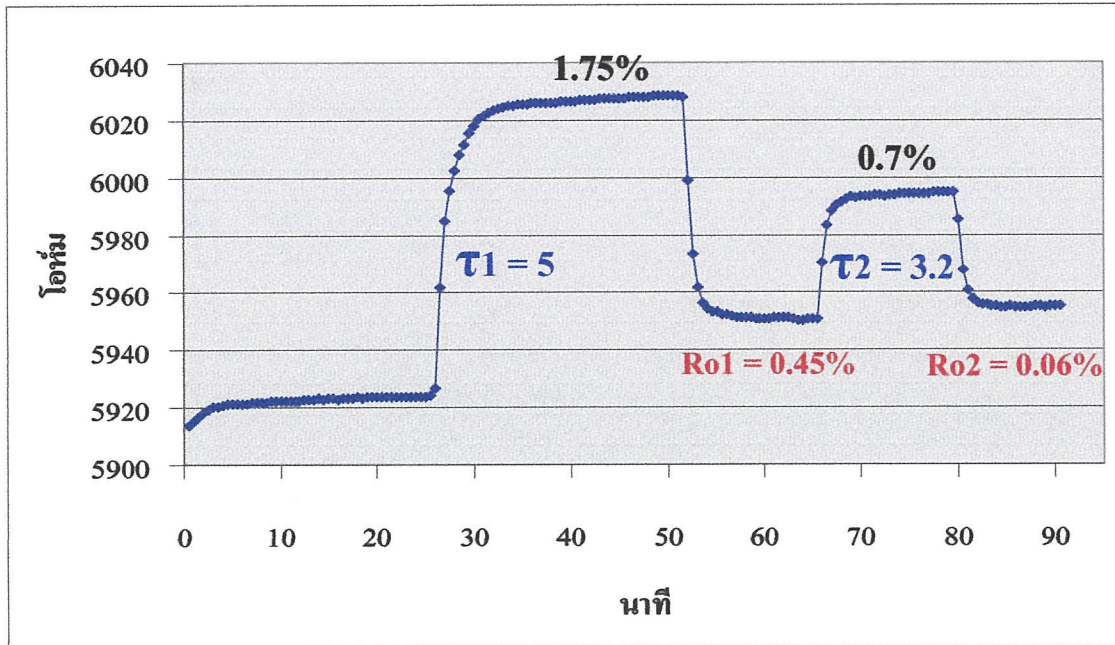
จากตารางที่ 6.3 พบว่ากรณีไม่มีการอบฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์มีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความต้านทานครั้งที่ 1 ในช่วง 0.91 – 3.96% ค่าเฉลี่ย 2.52% มีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานครั้งที่ 2 ในช่วง 1.01 – 3.55% ค่าเฉลี่ย 2.00 % เวลาการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน 0 – 90 % ครั้งที่ 1 มีค่าอยู่ในช่วง 16 – 37.5 นาที ค่าเฉลี่ย 20 นาที เวลาการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน 0 – 90 % ครั้งที่ 2 มีค่าอยู่ในช่วง 2 – 32 นาที ค่าเฉลี่ย 11.5 นาที ค่าเปอร์เซ็นต์ส่วนต่างค่าความต้านทานตั้งต้น (offset) ครั้งที่ 1 0.36 – 1.93 % ค่าเฉลี่ย 1.05% ค่าเปอร์เซ็นต์ส่วนต่างค่าความต้านทานตั้งต้น (offset) ครั้งที่ 2 0.07 – 0.62 % ค่าเฉลี่ย 0.38 %

เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยโดยรวม คุณสมบัติของเซนเซอร์จะมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความต้านทานครั้งที่ 1 มากกว่าครั้งที่ 2 เวลาการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน 0 – 90 % ครั้งที่ 1 มีเวลามากกว่าครั้งที่ 2 ค่าเปอร์เซ็นต์ส่วนต่างค่าความต้านทานตั้งต้น (offset) ครั้งที่ 1 มีค่ามากกว่าครั้งที่ 2 และเปอร์เซ็นต์ส่วนต่างค่าความต้านทานตั้งต้น (offset) ครั้งที่ 2 มีค่าประมาณ 0 %

ในส่วนโครงสร้างของแผ่นตัวอย่างที่ออกแบบให้มีความต่างกันนั้น ไม่มีส่งผลใดๆ ถ้าพิจารณาในด้านโครงสร้างจะเห็นได้ว่ามีลักษณะเป็นแบบสุ่ม ไม่เห็นค่าความแตกต่างอย่างชัดเจน เนื่องจากขนาดของทั้ง 2 โครงสร้างมีความต่างกันน้อยเกินกว่าที่จะส่งผลและปัจจัยตัวแปรต่างๆ ในการสังเคราะห์ยังไม่สามารถควบคุมได้อย่างถูกต้องแน่นอน

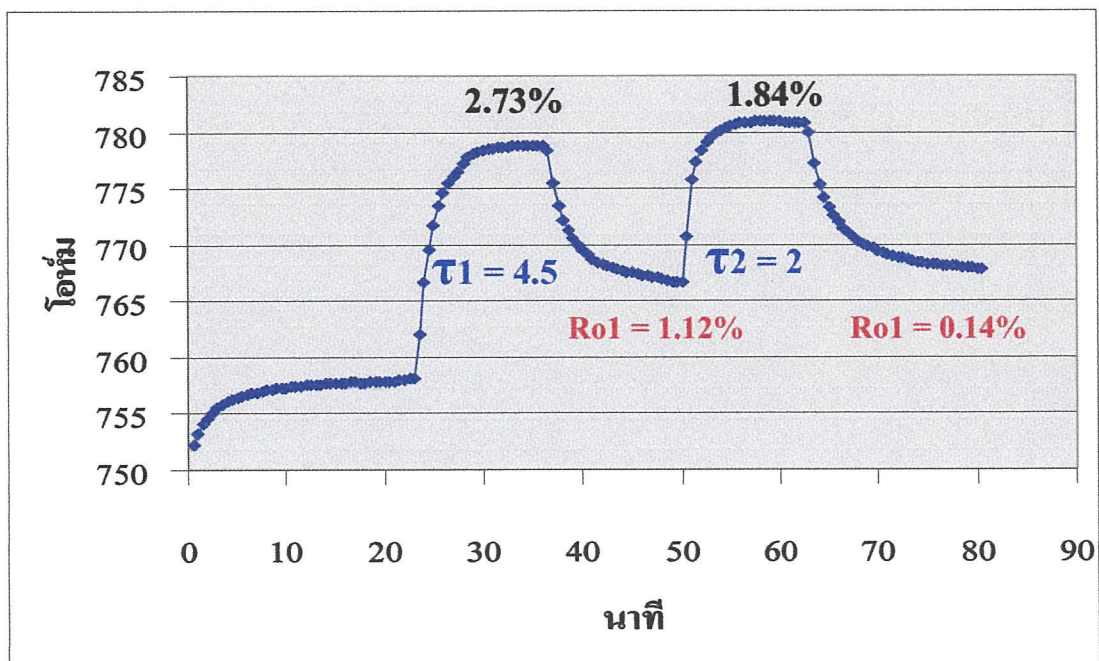
6.3.1.3 ผลการทดลองการตรวจวัดไอรยะเหยของเอทธานอลที่อุณหภูมิห้อง โดยอบฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส 25 นาที

1. แผ่นตัวอย่างลำดับที่ 4 โครงสร้างที่ 1



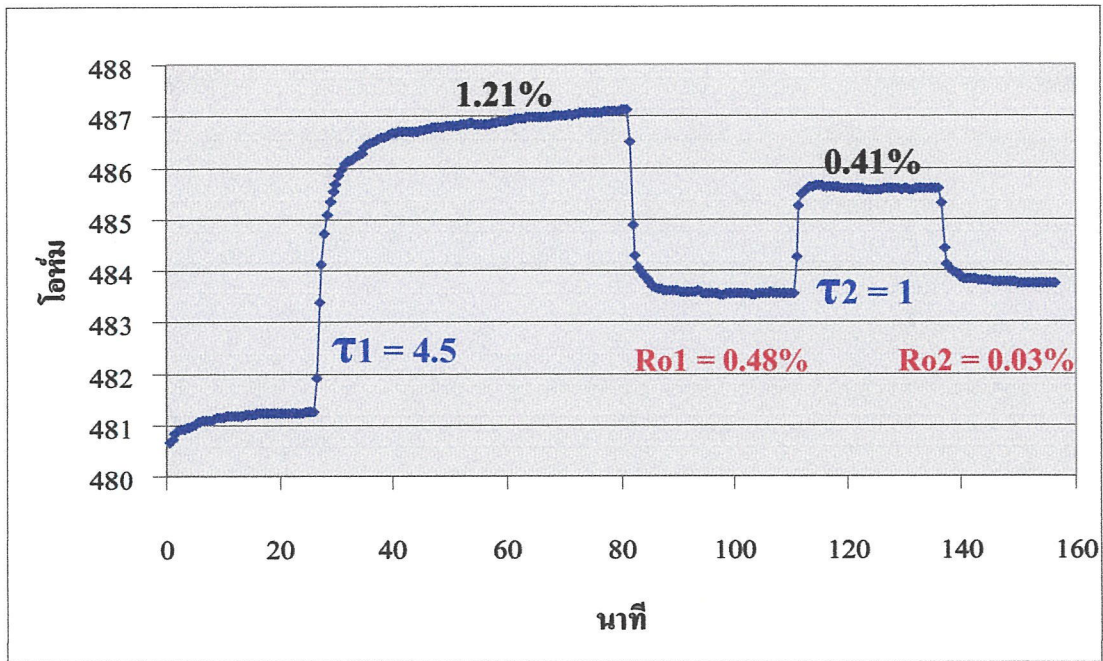
รูปที่ 6.19 กราฟแสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัดไอรยะเหยเอทธานอลแผ่นตัวอย่างที่ 4

2. แผ่นตัวอย่างลำดับที่ 6 โครงสร้างที่ 1



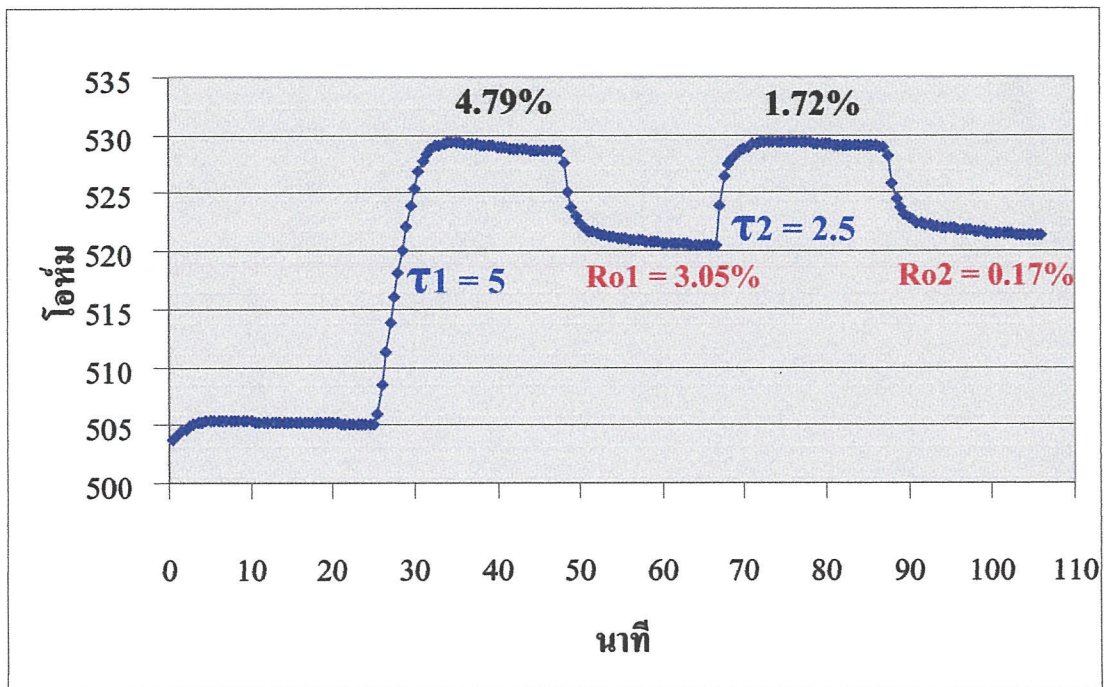
รูปที่ 6.20 กราฟแสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัดไอรยะเหยเอทธานอลแผ่นตัวอย่างที่ 6

3. แผ่นตัวอย่างลำดับที่ 8 โครงสร้างที่ 2



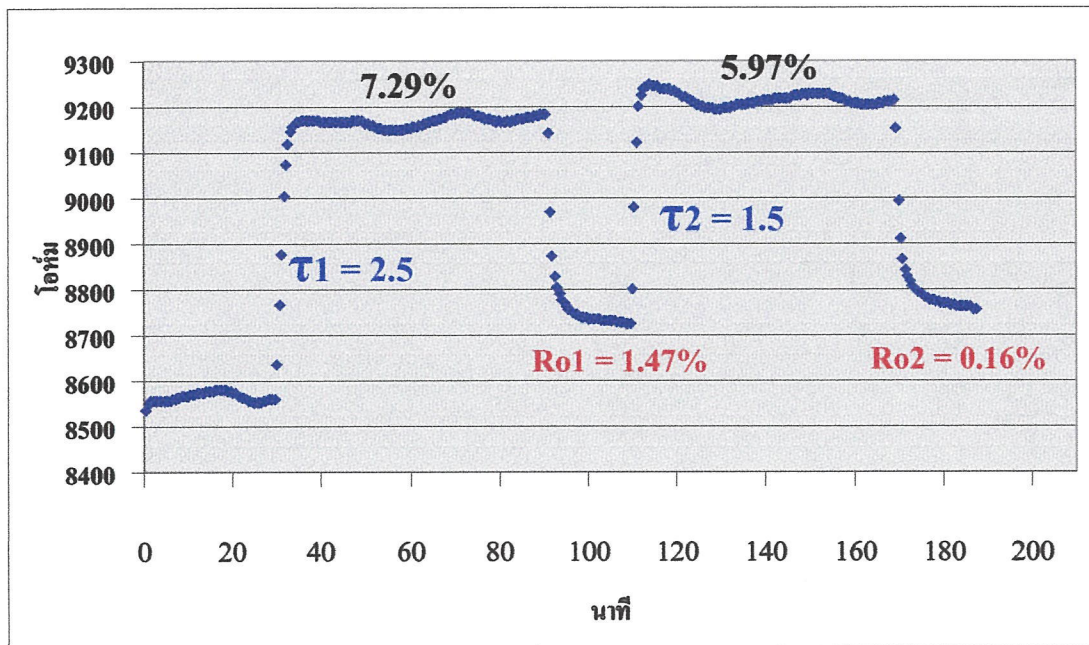
รูปที่ 6.21 กราฟแสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัดไอระเหยเอทานอลแผ่นตัวอย่างที่ 8

4. แผ่นตัวอย่างลำดับที่ 9 โครงสร้างที่ 2



รูปที่ 6.22 กราฟแสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัดไอระเหยเอทานอลแผ่นตัวอย่างที่ 9

5. แผ่นตัวอย่างลำดับที่ 16 โครงสร้างที่ 2



รูปที่ 6.23 กราฟแสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัดไอรยะเหยเอทธานอลแผ่นตัวอย่างที่ 16

เพื่อให้เปรียบเทียบได้ง่ายจะแสดงข้อมูลเป็นตารางดังแสดงในตารางที่ 6.4

ตารางที่ 6.4 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของแผ่นตัวอย่าง กรณิอบฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์
ก่อนการตรวจวัดด้วยอุณหภูมิ 70 องศา 25 นาที

แผ่น ตัวอย่าง	โครงสร้าง	เปอร์เซ็นต์การ เปลี่ยนแปลง		เวลาการเปลี่ยนแปลง 0 - 90%		เปอร์เซ็นต์ส่วน ต่าง Ro	
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	τ_1	τ_2	Ro1	Ro2
4	1	1.75	0.7	5	2	0.45	0.06
6	1	2.73	1.84	4.5	2	1.12	0.14
8	2	1.21	0.41	4.5	1	0.48	0.03
9	2	4.79	1.72	5	2.5	3.05	0.17
16	2	7.29	5.97	2.5	1.5	1.92	0.38
ค่าเฉลี่ย		3.76	2.2	4.25	1.75	1.47	0.16
หน่วย		%	%	นาที	นาที	%	%

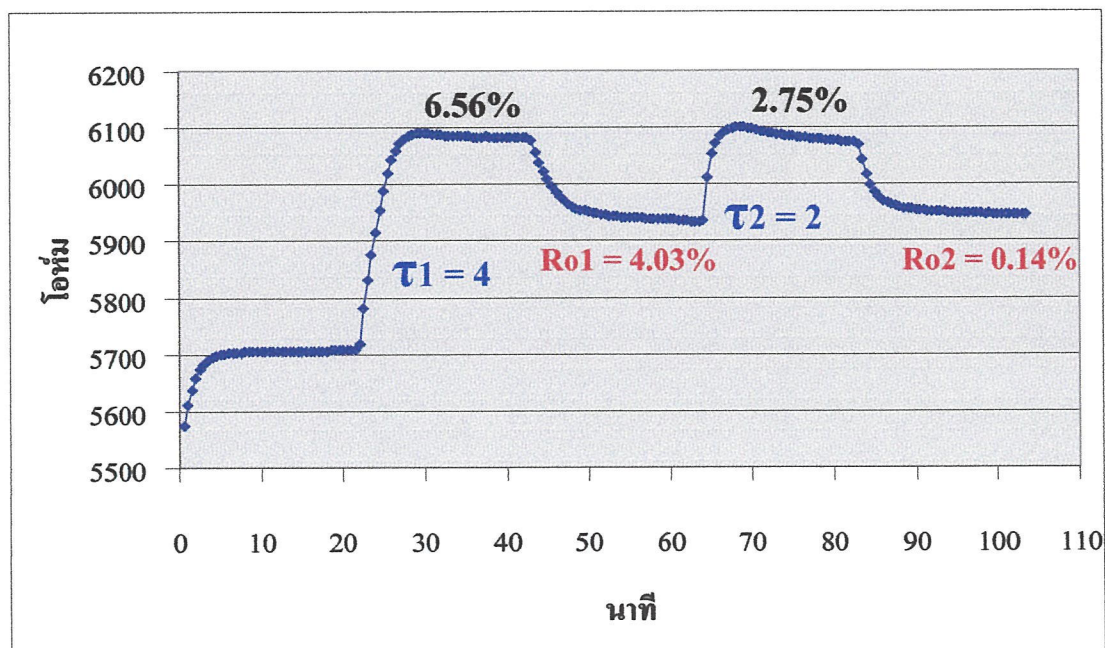
จากตารางที่ 6.4 พบว่ากรณีไม่มีการอบฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์มีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความต้านทานครั้งที่ 1 ในช่วง 1.21 – 7.29% ค่าเฉลี่ย 3.76% มีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานครั้งที่ 2 ในช่วง 0.7 – 5.97% ค่าเฉลี่ย 2.2 % เวลาการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน 0 – 90 % ครั้งที่ 1 มีค่าอยู่ในช่วง 2.5 – 5 นาที ค่าเฉลี่ย 4.25 นาที เวลาการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน 0 – 90 % ครั้งที่ 2 มีค่าอยู่ในช่วง 1 – 2.5 นาที ค่าเฉลี่ย 1.75 นาที ค่าเปอร์เซ็นต์ส่วนต่างค่าความต้านทานตั้งต้น (offset) ครั้งที่ 1 0.45 – 1.92 % ค่าเฉลี่ย 1.47% ค่าเปอร์เซ็นต์ส่วนต่างค่าความต้านทานตั้งต้น (offset) ครั้งที่ 2 0.03 – 0.38 % ค่าเฉลี่ย 0.16 %

เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยโดยรวม คุณสมบัติของเซนเซอร์จะมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความต้านทานครั้งที่ 1 มากกว่าครั้งที่ 2 เวลาการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน 0 – 90 % ครั้งที่ 1 มีเวลามากกว่าครั้งที่ 2 ค่าเปอร์เซ็นต์ส่วนต่างค่าความต้านทานตั้งต้น (offset) ครั้งที่ 1 มีค่ามากกว่าครั้งที่ 2 และเปอร์เซ็นต์ส่วนต่างค่าความต้านทานตั้งต้น (offset) ครั้งที่ 2 มีค่าต่ำประมาณ 0 %

ในส่วน โครงสร้างของแผ่นตัวอย่างที่ออกแบบให้มีความต่างกันนั้น ไม่มีส่งผลใดๆ ถ้าพิจารณาในด้านโครงสร้างจะเห็นได้ว่ามีลักษณะเป็นแบบส้อม ไม่เห็นค่าความแตกต่างอย่างชัดเจน เนื่องจากขนาดของทั้ง 2 โครงสร้างมีความต่างกันน้อยเกินกว่าที่จะส่งผลและปัจจัยตัวแปรต่างๆ ในการสังเคราะห์ยังไม่สามารถควบคุมได้อย่างถูกต้องแน่นอน

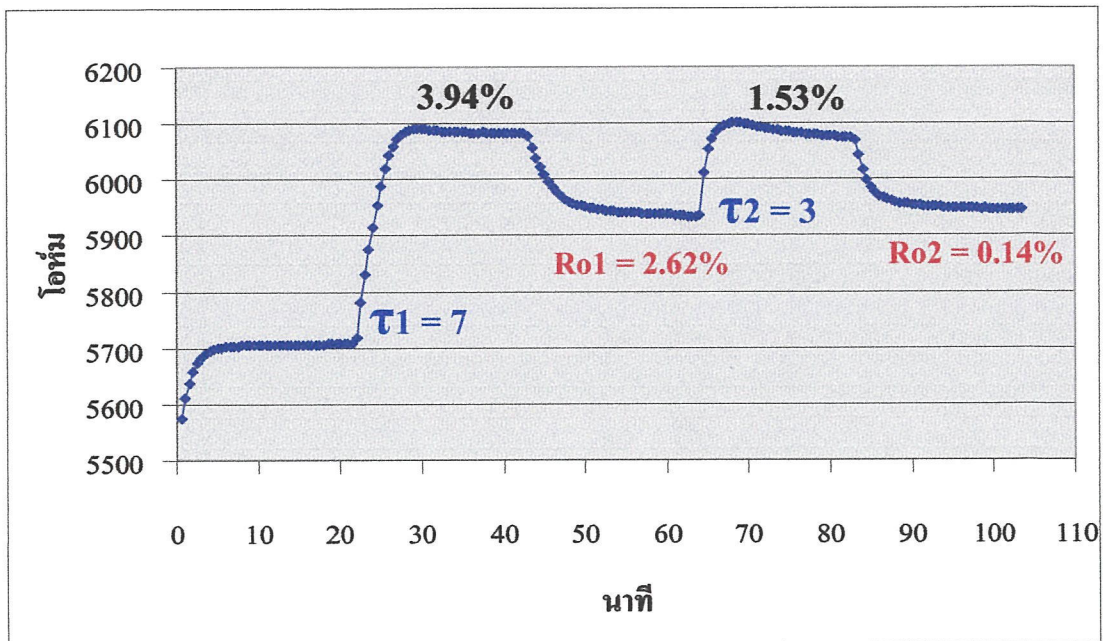
6.3.1.4 ผลการทดลองการตรวจวัดไอระเหยของเอทานอลที่อุณหภูมิห้องโดยอบฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส 25 นาที

1. แผ่นตัวอย่างลำดับที่ 4 โครงสร้างที่ 1



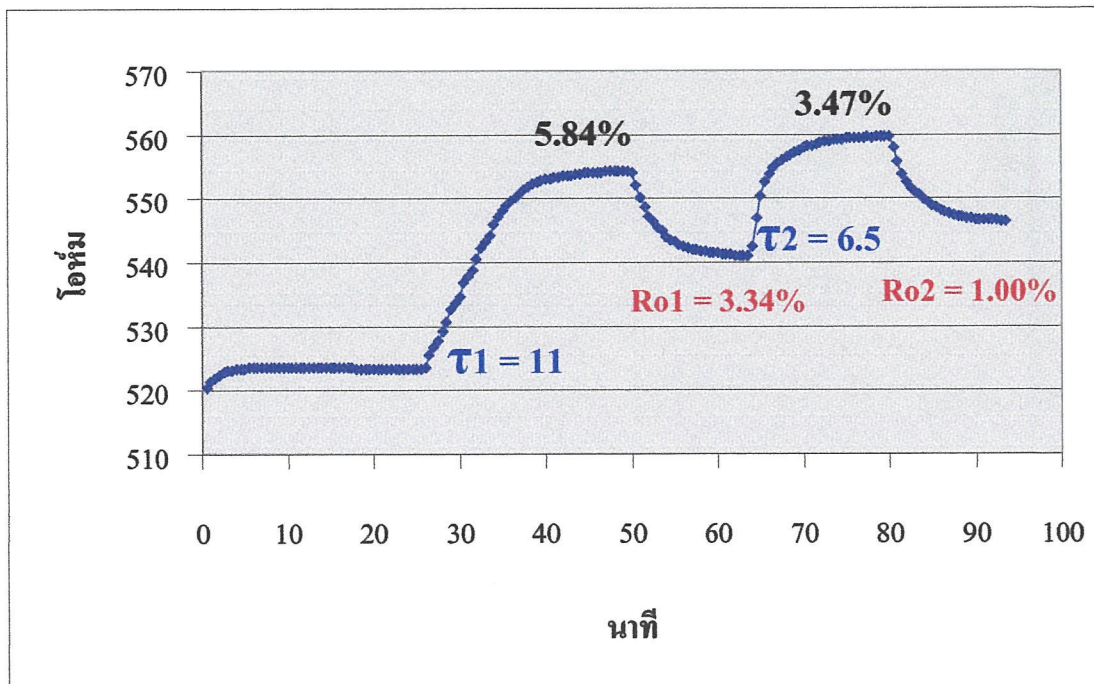
รูปที่ 6.24 กราฟแสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัดไอระเหยเอทานอลแผ่นตัวอย่างที่ 4

2. แผ่นตัวอย่างลำดับที่ 8 โครงสร้างที่ 2



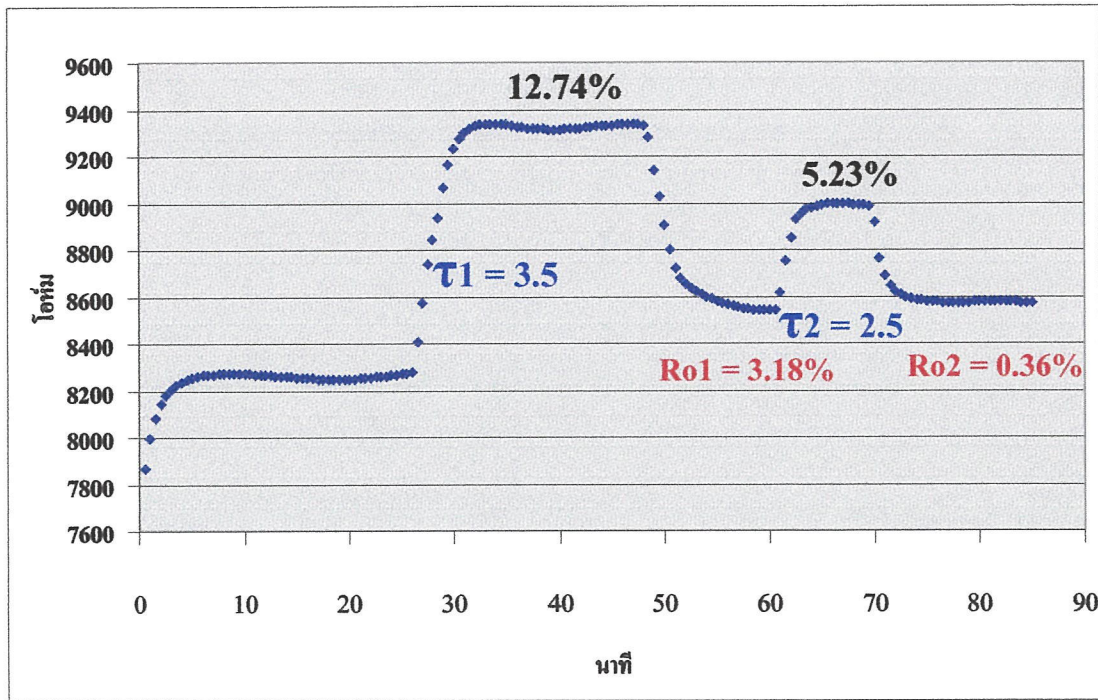
รูปที่ 6.25 กราฟแสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัดไอระเหยเอทานอลแผ่นตัวอย่างที่ 8

3. แผ่นตัวอย่างลำดับที่ 9 โครงสร้างที่ 2



รูปที่ 6.26 กราฟแสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัดไอระเหยเอทานอลแผ่นตัวอย่างที่ 8

4. แผ่นตัวอย่างลำดับที่ 16 โครงสร้างที่ 2



รูปที่ 6.27 กราฟแสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัดไอระเหยเอทธานอลแผ่นตัวอย่างที่ 16

เพื่อให้เปรียบเทียบได้ง่ายจะแสดงข้อมูลเป็นตารางดังแสดงในตารางที่ 6.5

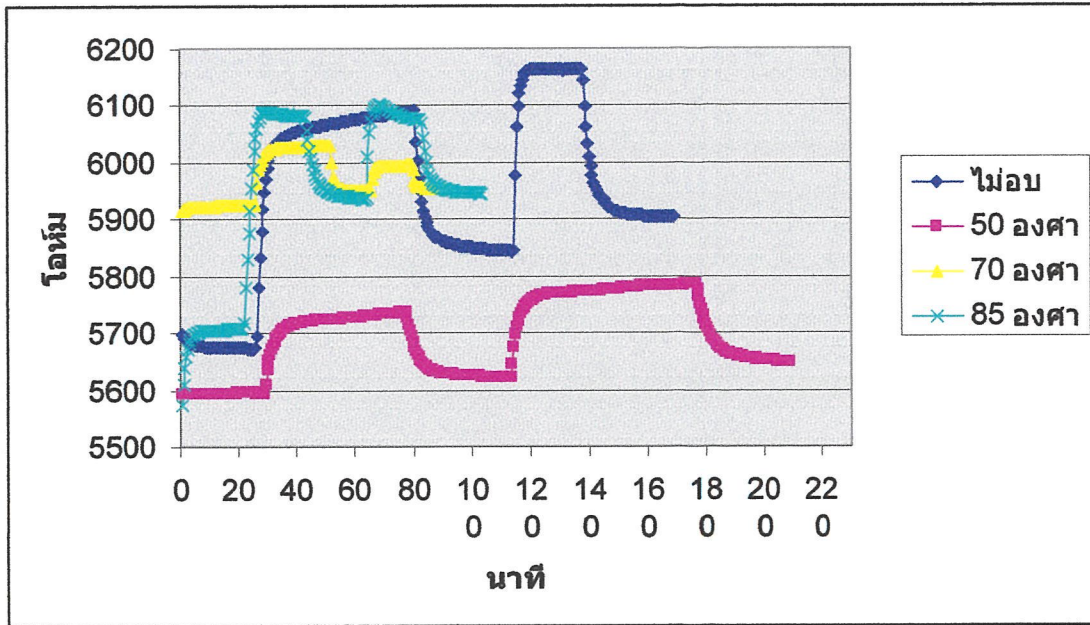
ตารางที่ 6.5 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของแผ่นตัวอย่าง กรณียอบฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ ก่อนการตรวจวัดด้วยอุณหภูมิตั้งที่ 85 องศา 25 นาที

แผ่นตัวอย่าง	โครงสร้าง	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลง		เวลาการเปลี่ยนแปลง 0 - 90%		เปอร์เซ็นต์ส่วนต่าง Ro	
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	τ_1	τ_2	Ro1	Ro2
4	1	6.56	2.75	4	2	4.03	0.14
8	2	3.94	1.53	7	3	2.62	0.14
9	2	5.84	3.47	11	6.5	3.34	1.00
16	2	12.74	5.23	3.5	2.5	3.18	0.36
ค่าเฉลี่ย		7.74	3.17	4.83	2.5	3.27	0.21
หน่วย		%	%	นาทึ	นาทึ	%	%

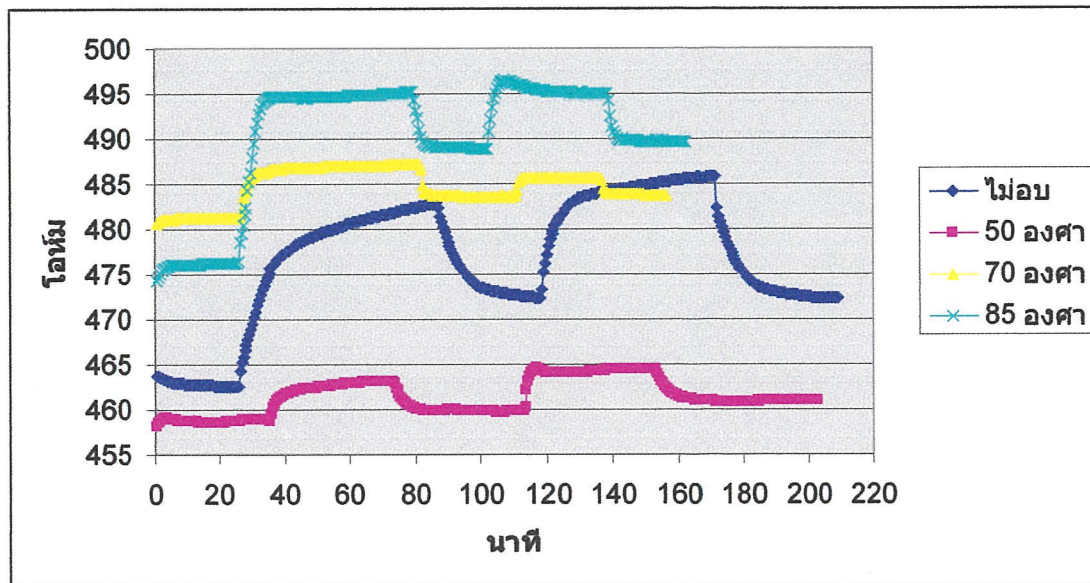
ต่อไปจะเปรียบเทียบในแต่ละแผ่นตัวอย่างที่อุณหภูมิต่างๆ และพิจารณาแนวโน้มของข้อมูลดังตาราง ที่ 6.6

ตารางที่ 6.6 แสดงการเปรียบเทียบแต่ละแผ่นตัวอย่าง

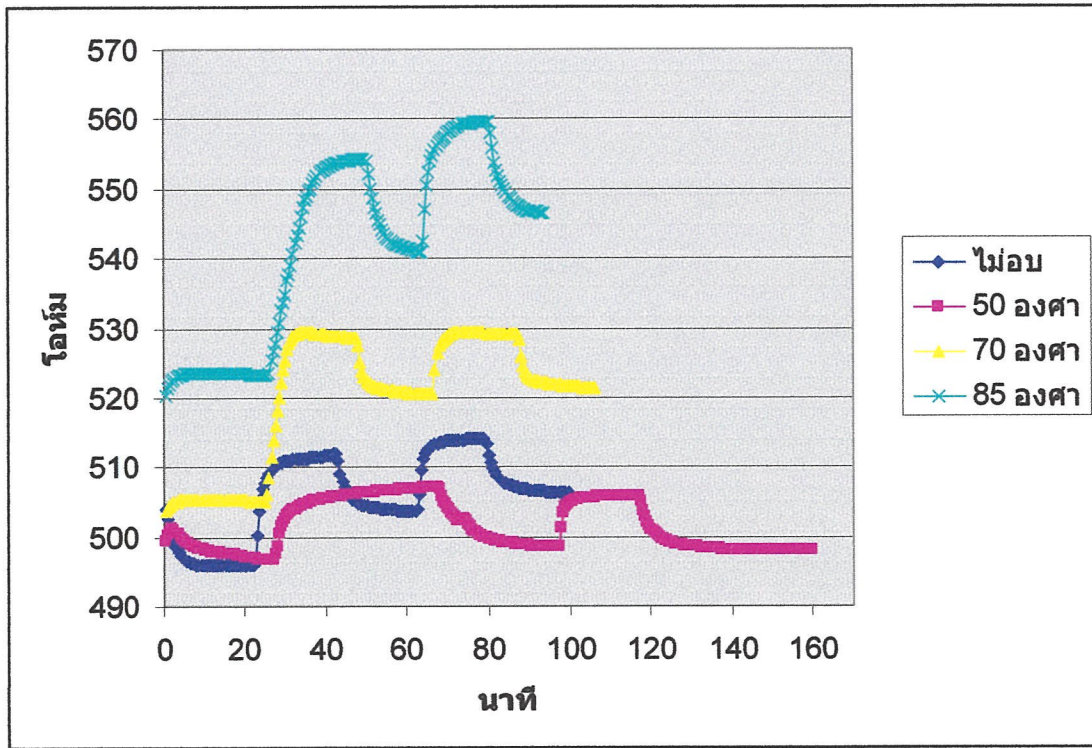
แผ่นตัวอย่าง	อุณหภูมิในการอบ	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลง		เวลาการเปลี่ยนแปลง 0 - 90%		เปอร์เซ็นต์ส่วนต่าง Ro	
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	τ_1	τ_2	Ro1	Ro2
4	0	7	5.44	11.5	2.5	3.03	0.97
	50	2.54	2.93	16	14	<u>0.49</u>	<u>0.47</u>
	70	1.75	0.7	<u>5</u>	<u>2</u>	<u>0.45</u>	<u>0.06</u>
	85	6.56	2.75	<u>4</u>	<u>2</u>	4.03	0.14
6	0	1.94	2.28	4.5	1.5	0.6	1.15
	50	2.85	1.51	16	5.5	1.42	0.2
	70	2.73	1.84	<u>4.5</u>	<u>2</u>	<u>1.12</u>	<u>0.14</u>
8	0	4.38	2.96	36.5	28	2.04	0
	50	0.91	1.01	19	2	<u>0.22</u>	<u>0.22</u>
	70	1.21	0.41	<u>4.5</u>	<u>1</u>	<u>0.48</u>	<u>0.03</u>
	85	3.94	1.53	<u>7</u>	<u>3</u>	2.62	0.14
9	0	3.42	2.04	11	4	1.6	0.47
	50	2.12	1.49	11.5	4	<u>0.36</u>	<u>0.07</u>
	70	4.79	1.72	<u>5</u>	<u>2.5</u>	<u>3.05</u>	<u>0.17</u>
	85	5.84	3.47	<u>11</u>	<u>6.5</u>	3.34	1.00
16	0	6.23	8.17	4	5.5	0.93	0.98
	50	3.96	3.55	37.5	32	<u>1.93</u>	<u>0.62</u>
	70	7.29	5.97	<u>2.5</u>	<u>1.5</u>	<u>1.92</u>	<u>0.38</u>
	85	12.74	5.23	<u>3.5</u>	<u>2.5</u>	3.18	0.36
	หน่วย	%	%	นาที	นาที	%	%



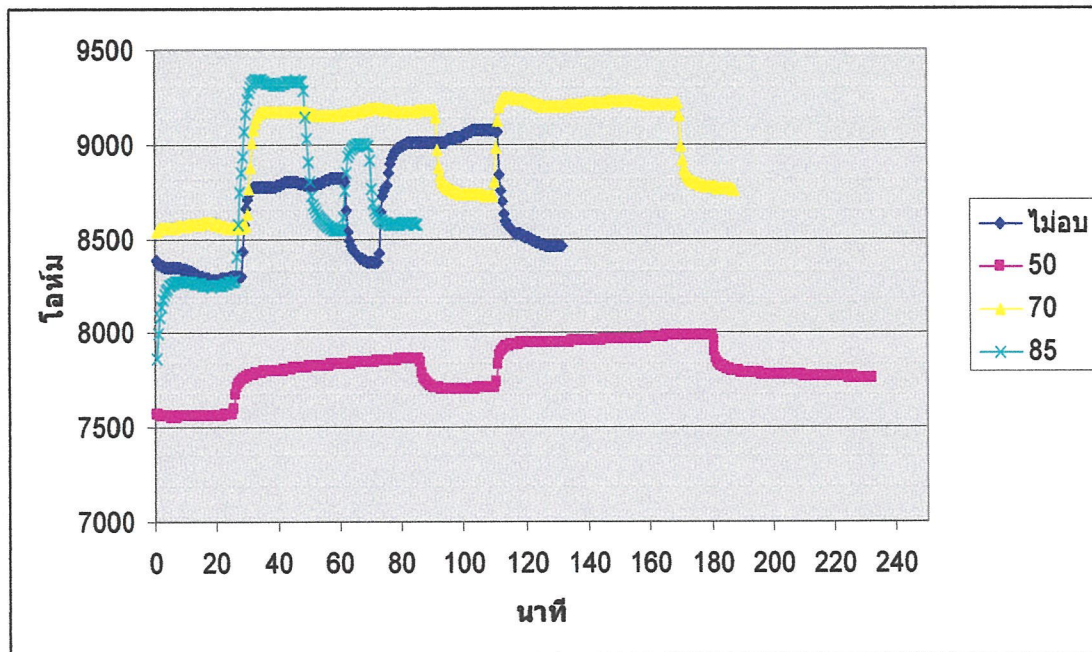
รูปที่ 6.28 กราฟแสดงค่าความต้านทานต่อเวลาที่อุณหภูมิการอบต่างๆ ของแผ่นตัวอย่างที่ 4



รูปที่ 6.29 กราฟแสดงค่าความต้านทานต่อเวลาที่อุณหภูมิการอบต่างๆ ของแผ่นตัวอย่างที่ 8



รูปที่ 6.30 กราฟแสดงค่าความต้านทานต่อเวลาที่อุณหภูมิการอบต่างๆ ของแผ่นตัวอย่างที่ 9



รูปที่ 6.31 กราฟแสดงค่าความต้านทานต่อเวลาที่อุณหภูมิการอบต่างๆ ของแผ่นตัวอย่างที่ 16

ตารางที่ 6.7 แสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยคุณสมบัติต่างๆ ของเซนเซอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลง		เวลาการเปลี่ยนแปลง 0 - 90%		เปอร์เซ็นต์ส่วนต่าง Ro	
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	τ_1	τ_2	Ro1	Ro2
ไม่มีการอบ	4.66	8.17	13.5	8.3	1.64	0.71
50	2.52	2.00	20	11.5	1.05	0.38
70	3.76	2.2	4.25	1.75	1.47	0.16
85	7.74	3.17	4.83	2.5	3.27	0.21
องศาเซลเซียส	%	%	นาทีก	นาทีก	%	%

จากข้อมูลในตารางที่ 6.6 และ 6.7 จะเห็นแนวโน้มได้ เมื่อพิจารณาจากคุณสมบัติต่างๆ ของแต่ละแผ่นตัวอย่าง ซึ่งสรุปได้ 3 กรณี ดังนี้คือ

1. เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความต้านทานครั้งที่ 1 จะมากกว่า ครั้งที่ 2 เนื่องจากเมื่อทำการตรวจวัดครั้งแรกโมเลกุลของเอทธานอลบางส่วนยังคงเกาะติดอยู่กับคาร์บอนนาโนทิวบ์ทำให้ค่าความต้านทานตั้งต้นในครั้งที่ 2 มีค่าเพิ่มขึ้น เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความต้านทานในครั้งที่ 2 จึงต่ำกว่า เมื่อพิจารณาพบว่ามีค่าเป็นไปแบบสุ่มดังนั้นจากตารางจึงไม่สามารถสรุปได้ว่ากรณีใดจะให้เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความต้านทานสูงที่สุด ซึ่งเซนเซอร์แต่ละตัวจะมีคุณสมบัติเฉพาะตัวต่างกันออกไป แต่จากการค้นคว้าแล้วคาร์บอนจะมีความต้านทานสูงที่อุณหภูมิต่ำๆ จึงพอจะสรุปได้ว่าในขณะวัดไม่ว่าจะมีการอบที่กรณีใดๆ ก็ตามควรให้ตัวเซนเซอร์เย็นตัวลงก่อนทำการวัด

2. เวลาการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน 0 – 90 % ครั้งที่ 1 จะใช้เวลานานกว่าครั้งที่ 2 และกรณีการอบด้วยอุณหภูมิ 70 – 85 องศาเซลเซียสจะมีค่าเวลาการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน 0 – 90 % น้อยกว่ากรณีอื่นๆ

3. ค่าเปอร์เซ็นต์ส่วนต่างความต้านทานตั้งต้น ครั้งที่ 1 จะมีความต่างมากกว่าครั้งที่ 2 นั่นคือ ค่าเปอร์เซ็นต์ส่วนต่างความต้านทาน จะมีค่าคงที่หรือลดเพิ่มเพียงเล็กน้อยในการวัดครั้งที่ 2 เป็นต้นไป เนื่องจากโมเลกุลของแก๊สบางส่วนยังคงเกาะอยู่ที่คาร์บอนนาโนทิวบ์ทำให้ค่าความต้านทานตั้งต้นมีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากขณะนั้นคาร์บอนนาโนทิวบ์ทำปฏิกิริยากับ โมเลกุลของแก๊สที่เกาะอยู่บางส่วนนั้นอยู่ก่อนแล้ว และจะมีค่าต่ำ ในกรณีการอบที่อุณหภูมิ 50 – 70 องศาเซลเซียส

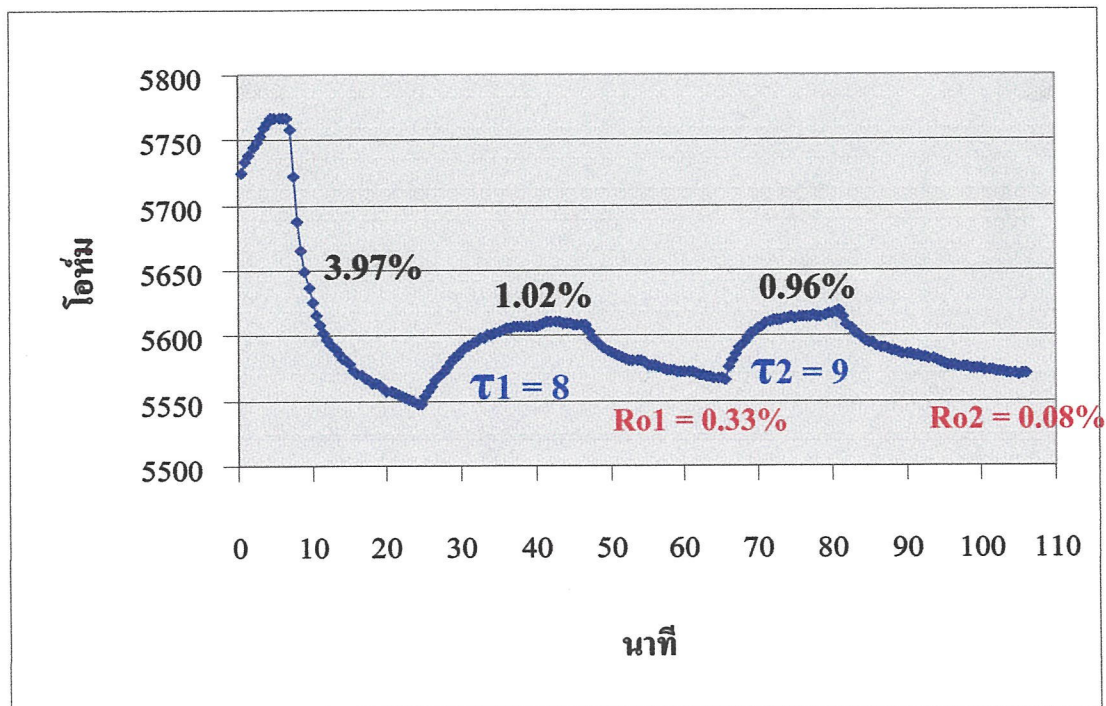
จาก 3 กรณีดังกล่าวจึงสรุปได้ว่า การนำคาร์บอนนาโนทิวบ์ไปใช้งานเป็นแก๊สเซนเซอร์นั้น ควรอบตัวตรวจวัดก่อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส จะให้การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน

0–90% ต่ำ และให้ค่าเปอร์เซ็นต์ส่วนต่างความต้านทานตั้งต้น ครั้งที่ 1 และ ครั้งที่ 2 ต่ำ และควรปล่อยให้เซนเซอร์เย็นตัวลงก่อนทำการวัด จะให้ค่าเปอร์เซ็นต์ส่วนต่างความต้านทานที่สูง

6.3.2 ผลการทดลองตรวจวัดไอรยะเหยของเอทานอลโดยการให้ความร้อนในระบบ

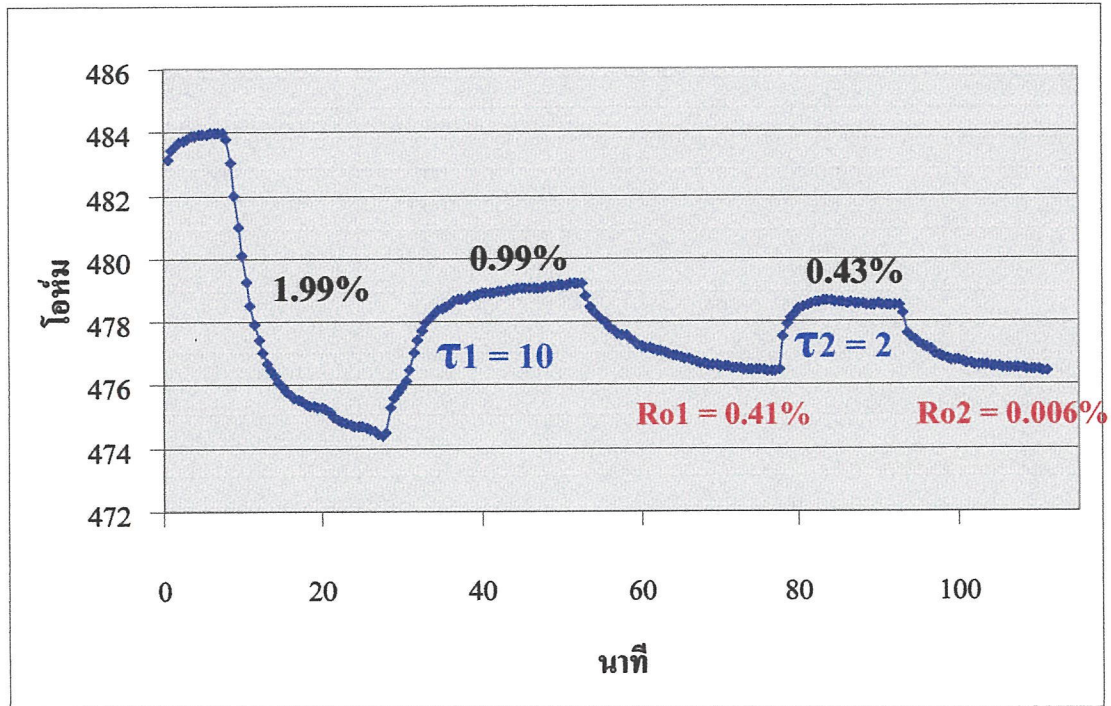
คาร์บอนนาโนทิวบ์เป็น โครงสร้างที่ประกอบจากอะตอมคาร์บอนเรียงตัวเป็นรูปท่อ ดังนั้นคุณสมบัติทางไฟฟ้าจึงมีความคล้ายคลึงกัน ซึ่งคาร์บอนจะมีความนำไฟฟ้าดีขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น นั่นคือเมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้นจะมีค่าความต้านทานต่ำลง ในหัวข้อนี้จะนำคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่แปรตามอุณหภูมิของคาร์บอนมาทำการทดลองเพื่อหาคุณสมบัติของเซนเซอร์ โดยให้อุณหภูมิในระบบวัดโดยให้กำลังงานแก่หลอดประมาณ 15 วัตต์ ทำให้มีอุณหภูมิภายในระบบวัดประมาณ 50 - 60 องศาเซลเซียส และก่อนทำการวัดจะอบตัวตรวจวัดด้วยอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส

1. แผ่นตัวอย่างลำดับที่ 4 โครงสร้างที่ 1



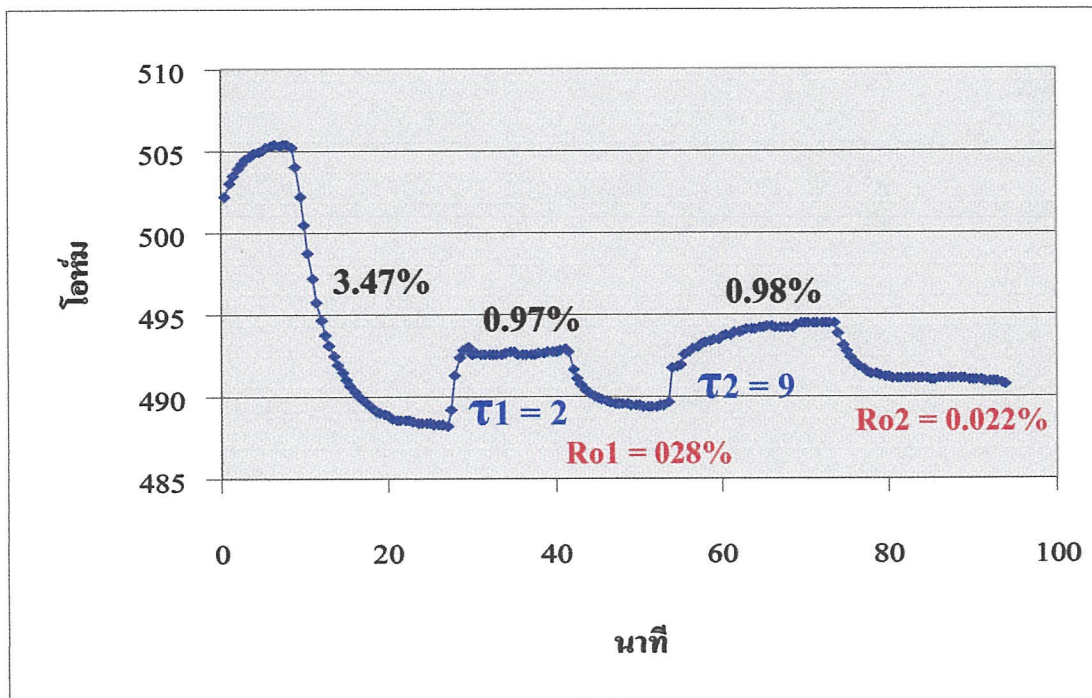
รูปที่ 6.32 กราฟแสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัดไอรยะเหยเอทานอลแผ่นตัวอย่างที่ 4

2. แผ่นตัวอย่างลำดับที่ 8 โครงสร้างที่ 2



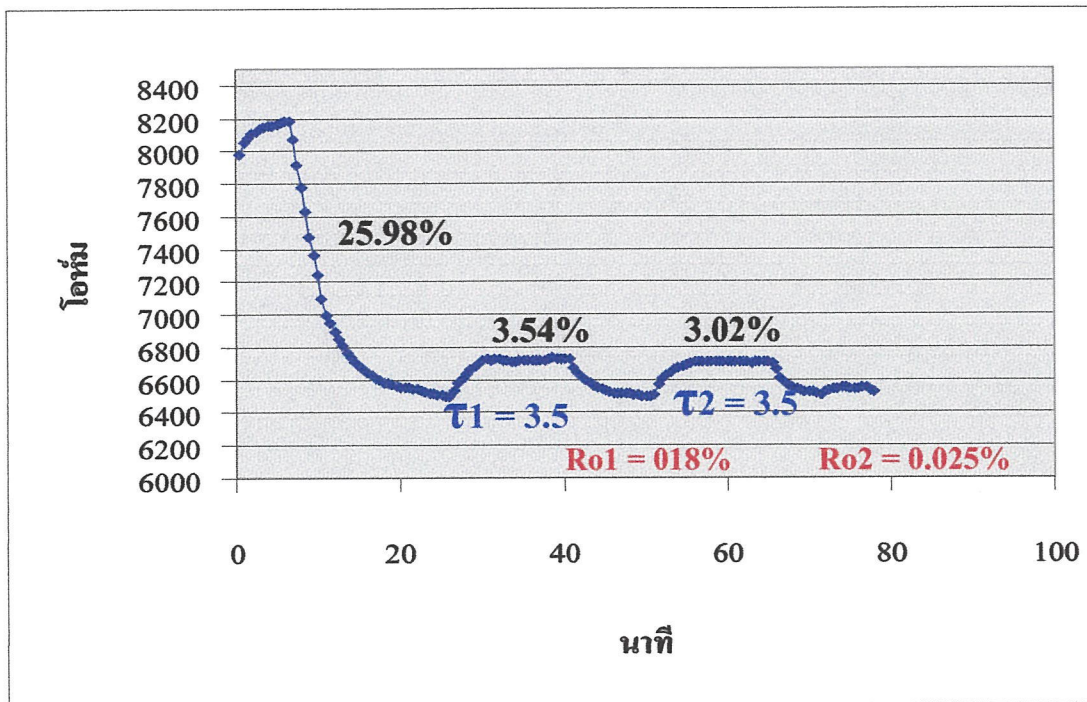
รูปที่ 6.33 กราฟแสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัดไอระเหยเอทธานอลแผ่นตัวอย่างที่ 8

3. แผ่นตัวอย่างลำดับที่ 9 โครงสร้างที่ 2



รูปที่ 6.34 กราฟแสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัดไอระเหยเอทธานอลแผ่นตัวอย่างที่ 9

4. แผ่นตัวอย่างลำดับที่ 16 โครงสร้างที่ 2



รูปที่ 6.35 กราฟแสดงค่าความต้านทานต่อเวลาในการตรวจวัดไอระเหยเอทธานอลแผ่นตัวอย่างที่ 16

เพื่อให้เปรียบเทียบได้ง่ายจะแสดงข้อมูลเป็นตารางดังแสดงในตารางที่ 6.7

ตารางที่ 6.8 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของแผ่นตัวอย่าง กรณีให้ความร้อนในระบบวัด

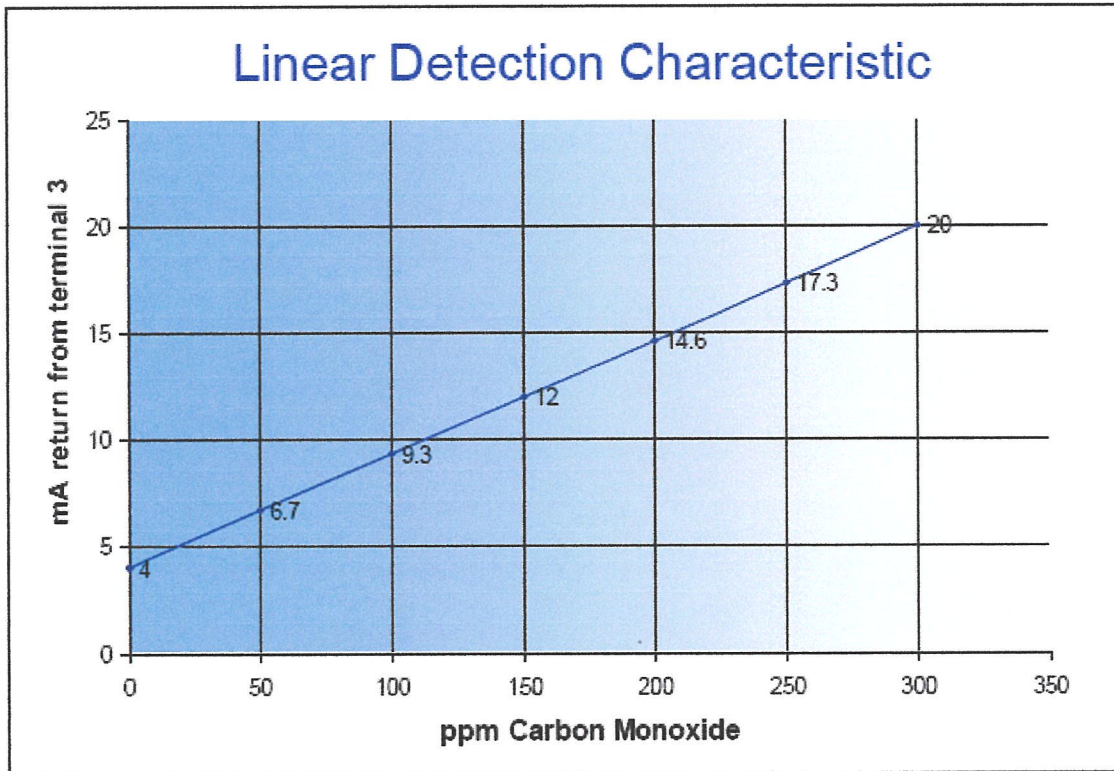
แผ่น ตัวอย่าง	โครง สร้าง	เปอร์เซ็นต์การ เปลี่ยนแปลง		เวลาการเปลี่ยน แปลง 0 - 90%		เปอร์เซ็นต์ ส่วนต่าง Ro		การ เปลี่ยนแปลง เมื่อให้ความ ร้อน
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	τ_1	τ_2	Ro1	Ro2	
4	1	1.02	0.96	8	9	0.33	0.08	3.97
8	2	0.99	0.43	10	2	0.41	0.006	1.99
9	2	0.97	0.98	2	9	0.28	0.22	3.47
16	2	3.54	3.02	3.5	3.5	0.18	0.25	25.98
ค่าเฉลี่ย		1.63	1.34	5.87	5.87	0.3	0.13	8.85
หน่วย		%	%	นาที	นาที	%	%	%

จากตารางที่ 6.8 พบว่าอุณหภูมิในระบบจะส่งผลต่อความต้านทานของเซนเซอร์ โดยเมื่ออุณหภูมิเพิ่ม ค่าความต้านทานจะลดลง (ความต้านทานแปรผกผันกับอุณหภูมิ) ซึ่งลดลงเป็นเปอร์เซ็นต์มากพอสมควร คือ ถึง 25 % และเมื่อพิจารณาคูณลักษณะต่างๆ แล้วเปรียบเทียบกับการตรวจวัดที่อุณหภูมิห้องกรณีอบตัวตรวจวัดที่ 70 องศา ก่อนนำเข้าระบบวัด จะพบว่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความต้านทานนี้ค่าลดลง เนื่องจากค่าความต้านทานตั้งต้นที่ต่ำลงเนื่องจากความต้านทานของคาร์บอนนาโนทิวบ์จะแปรผกผันกับอุณหภูมิ เวลาการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน 0 – 90 % มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และเปอร์เซ็นต์ส่วนต่างค่าความต้านทานตั้งต้น มีค่าน้อยลง ที่เป็นดังนี้เนื่องจากการให้ความร้อนในระบบวัด ทำให้โมเลกุลของเอทานอลหลุดออกไปจากฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ได้ดีกว่าที่อุณหภูมิห้อง

ในหัวข้อต่อไปจะแสดงถึงผลการตอบสนองจากความเข้มข้นของแก๊สที่มีการเปลี่ยนแปลง

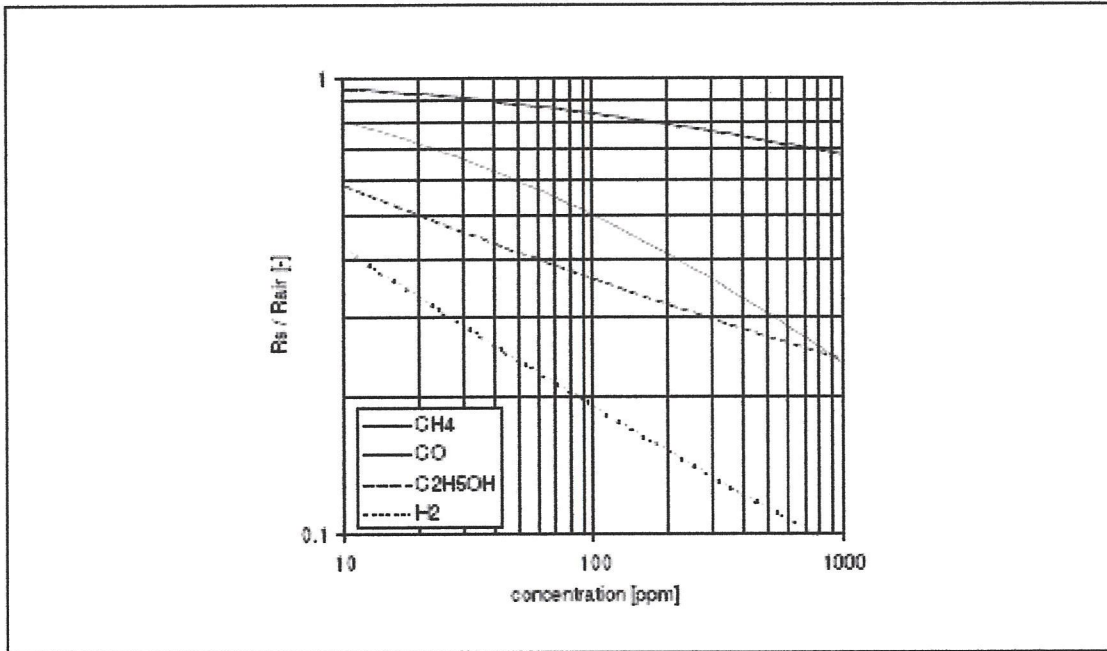
6.3.3 ผลการตอบสนองของตัวตรวจวัดจากการ เพิ่ม ลดอัตราการใช้

แก๊สเซนเซอร์โดยทั่วไปมักจะบอกอัตราการตอบสนองของตัวเซนเซอร์โดยเทียบกับความเข้มข้นของแก๊ส (หน่วยเป็น ppm) ดังรูปที่ 6.36

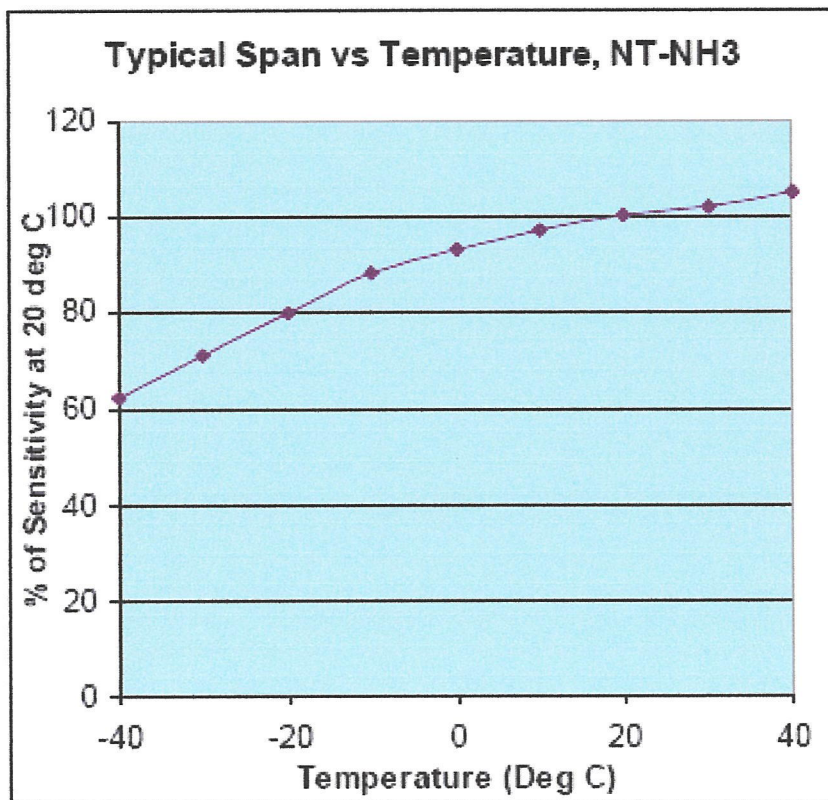


รูปที่ 6.36 กราฟแสดงคุณลักษณะของเซนเซอร์คาร์บอนมอนอกไซด์

จากรูปที่ 6.36 จะเห็นได้ว่าเป็นกราฟที่แสดงค่าอินพุตต่อเอาต์พุต ของเซนเซอร์คาร์บอนมอนอกไซด์ ที่ให้เอาต์พุตเป็นกระแส (มิลลิแอมป์) อินพุตเป็นค่าความเข้มข้นของแก๊ส (ppm) กราฟแสดงคุณลักษณะจะแสดงค่าความไวของเซนเซอร์และสามารถบอกย่านการตอบสนองของเซนเซอร์ได้ ดังนั้น Data Sheet ของแก๊สเซนเซอร์จึงควรมีกราฟที่แสดงคุณลักษณะในตัวแปรหลายๆ แบบ อย่างเช่น แสดงเอาต์พุตต่อความเข้มข้นของอินพุต แสดงผลของอุณหภูมิ แสดงผลการตอบสนองต่อเวลา เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถเลือกใช้ได้อย่างถูกต้องเหมาะสมกับงานมากที่สุด ตัวอย่างของกราฟต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 6.39 – 6.40



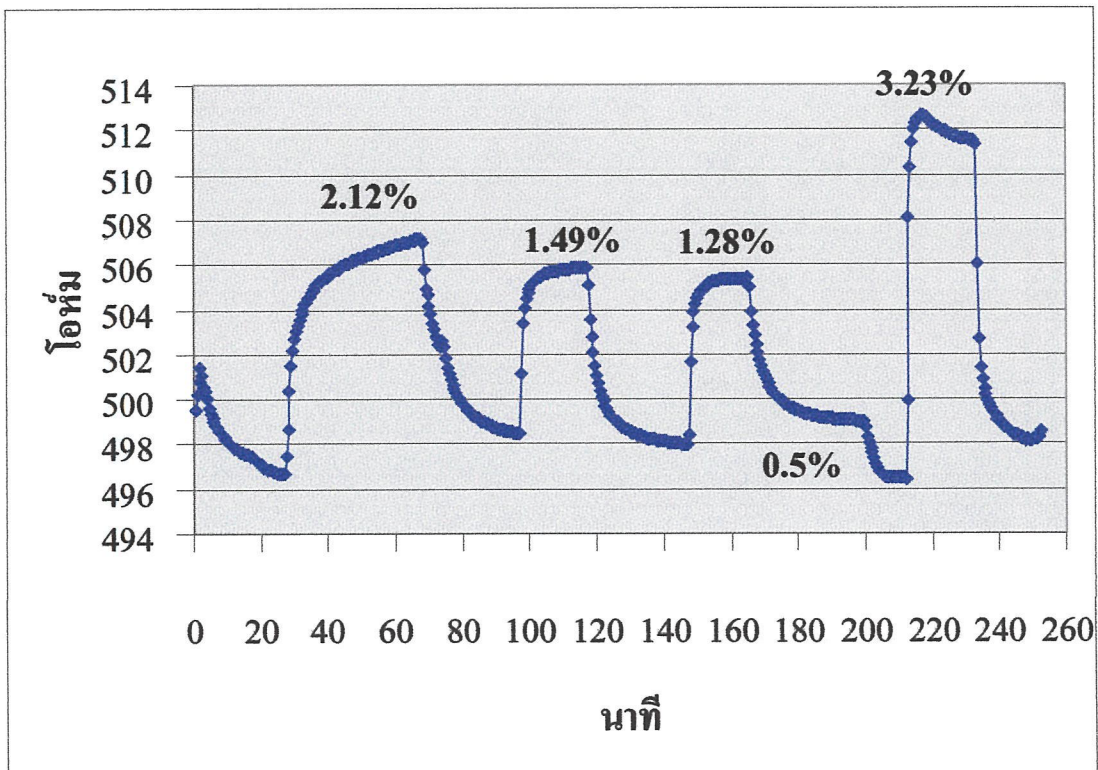
รูปที่ 6.37 กราฟแสดงคุณลักษณะของแก๊สเซนเซอร์ อัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงความต้านทาน ต่อความเข้มข้นของแก๊ส



รูปที่ 6.38 กราฟคุณลักษณะของแก๊สเซนเซอร์ แสดงผลของอุณหภูมิ

แต่เนื่องด้วยผู้จัดทำไม่สามารถบอกค่าความเข้มข้นของแก๊สได้ เนื่องจากไม่มีเครื่องมือวัดค่าความเข้มข้น ผู้จัดทำจึงใช้การควบคุมอัตราการไหลแทน ดังนั้นกราฟที่ได้จะเป็นเพียงพฤติกรรมที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของเซนเซอร์เท่านั้นเพราะไม่ทราบขนาดทางอินพุต

อย่างไรก็ตามยังคงต้องคำนึงถึงผลของความเข้มข้นแก๊สในการตรวจวัด ในการทดลองผู้จัดทำจึงใช้การเพิ่มลดอัตราการไหล เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของความเข้มข้นแก๊ส โดยมีผลการทดลองดังรูปที่ 6.39



รูปที่ 6.39 แสดงผลการตอบสนองของแก๊สเซนเซอร์ต่อการเพิ่มอัตราการไหล

จากรูปที่ 6.39 จะเห็นได้ว่าการวัด 3 ครั้งแรก ใช้อัตราการไหลเท่ากัน แนวโน้มของเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความต้านทานมีแนวโน้มต่ำลงเมื่อทำการวัดซ้ำ ในการวัดครั้งที่ 4 มีการปรับอัตราการไหลให้เพิ่มขึ้น จะเห็นว่าส่งผลให้ค่าความต้านทานตั้งต้นมีค่าต่ำลง 0.5% และเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความต้านทานก็เพิ่มมากขึ้นอีกด้วย จึงสรุปได้ว่าอัตราการไหลมีผลต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของเซนเซอร์ที่เป็นดังนี้เนื่องจาก เมื่อเพิ่มอัตราการไหลจะทำให้ค่าความเข้มข้นแก๊สสูงขึ้น จำนวนโมเลกุลในหน่วยพื้นที่จะมากขึ้น ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยน

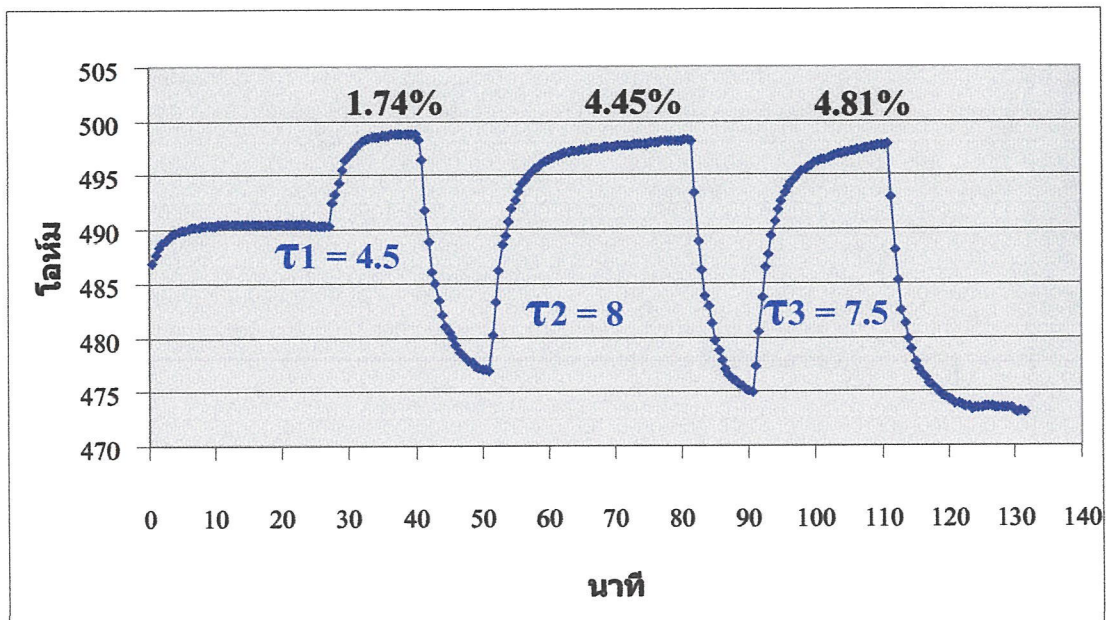
อิเล็กทรอนิกส์ระหว่างคาร์บอนนาโนทิวบ์กับโมเลกุลของแก๊สมากตามไปด้วย ความต้านทานของเซนเซอร์จึงมีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด

จากหัวข้อ 6.31 – 6.32 จะเห็นได้ว่าคาร์บอนนาโนทิวบ์ จะมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความต้านทานสูงกรณีฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์เย็นตัวลงก่อนทำการวัดหรือเมื่ออุณหภูมิในระบบวัดต่ำ และเมื่อมีการทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของแก๊ส โมเลกุลของแก๊สจะตั้งค้างอยู่ภายในชั้นฟิล์มที่มีลักษณะเป็นตาข่าย ในกรณีนี้การทำให้โมเลกุลนั้นหลุดออกไปได้หรือระเหยออกไปก็คือการให้ความร้อนในระบบวัด

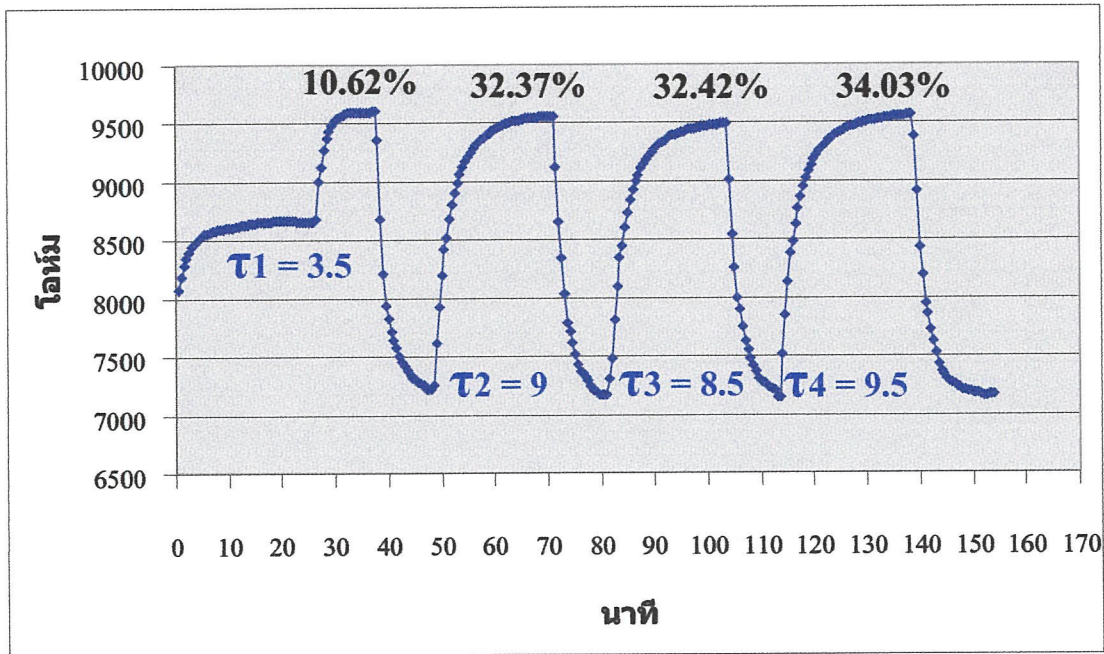
ผู้จัดทำจึงสรุปได้ว่าในการใช้คาร์บอนนาโนทิวบ์เป็นแก๊สเซนเซอร์ตรวจวัดไอระเหยของเอทานอลนั้นควรมีกระบวนการดังนี้

1. อบหรือให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส อย่างน้อย 20 นาที
2. ปล่อยให้เซนเซอร์เย็นตัวก่อนทำการวัด
3. หลังจากคาร์บอนนาโนทิวบ์ทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของแก๊สแล้ว ต้องมีการให้ความร้อนในระบบวัดอีกครั้งเพื่อให้ค่าความต้านทานตั้งต้นกลับเข้าสู่ค่าเดิม

ผลการทดลองวัดในกระบวนการวัดที่เหมาะสมแสดงได้ดังรูปที่ 6.40



รูปที่ 6.40 แสดงผลการทดลองวัดในกระบวนการวัดที่เหมาะสม

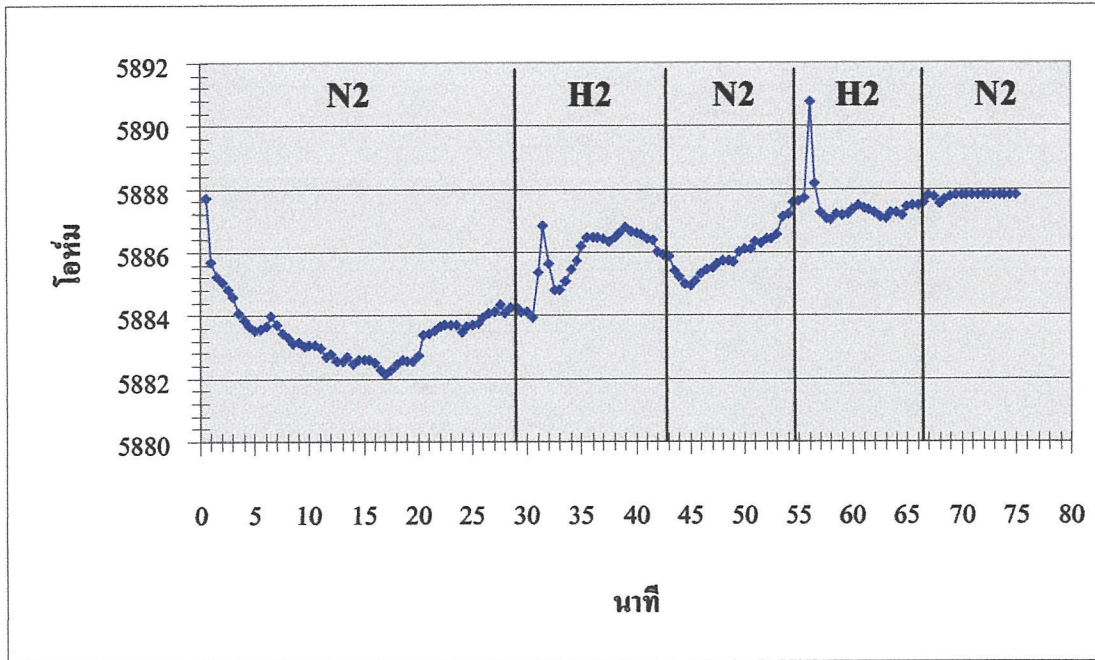


รูปที่ 6.41 แสดงผลผลการทดลองวัดในกระบวนการวัดที่เหมาะสม (2)

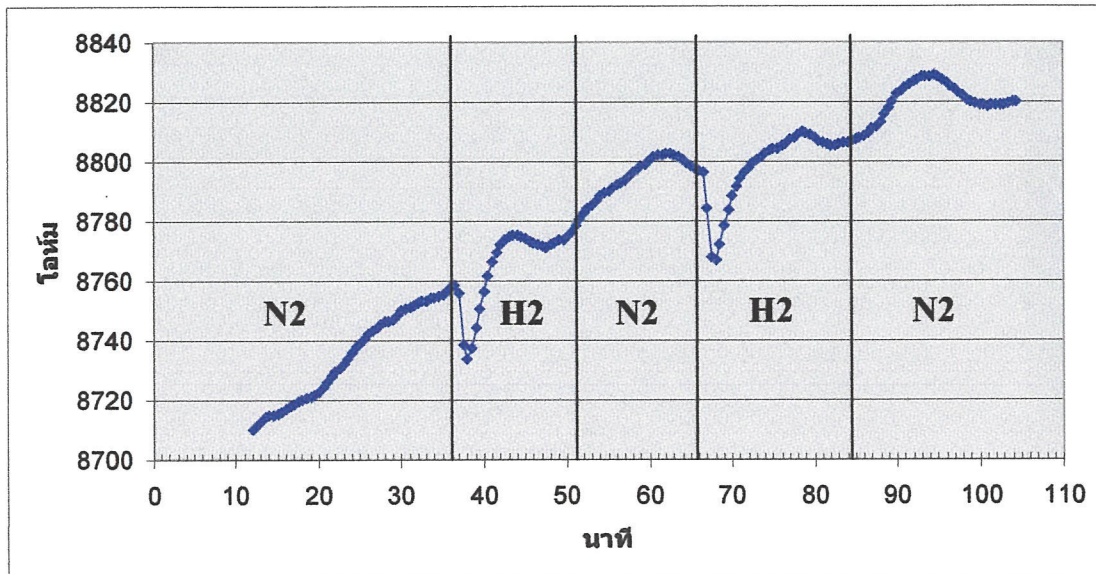
จากรูปที่ 6.40 – 6.41 จะเห็นได้ว่ามีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานสูงขึ้นมากกว่า 2 เท่า เนื่องจากค่าความต้านทานตั้งต้นลดลง แต่ส่วนค่าความต้านทานขณะตรวจพบแก๊สนั้นยังคงเท่าเดิมเนื่องจากเป็นจุดอิ่มตัวของคาร์บอนนาโนทิวบ์คือไม่ตอบสนองต่ออินพุตในปริมาณที่มากกว่านี้

6.3.4 ผลการทดลองตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจน

เนื่องจากปริญญานิพนธ์นี้จะเน้นในเรื่องการตรวจวัดไอระเหยของเอทานอล เนื่องจากเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน หรือเป็นจำพวกแอลกอฮอล์ ซึ่งเป็นจำพวกของสารประกอบที่มีอยู่หลากหลายชนิด อย่างเช่น จำพวกแอลกอฮอล์ เมธานอล เบนซีน ซึ่งผลตอบสนองของคาร์บอนนาโนทิวบ์จะมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน ทำให้สามารถนำผลการทดลองไปเป็นแนวทางในการทดลอง ศึกษาวิจัย ต่อๆ ไปได้ แต่สำหรับแก๊สไฮโดรเจนนั้นเป็นแก๊สที่มีการจับตัวเป็นโมเลกุลของอะตอมไฮโดรเจน 2 อะตอมของไฮโดรเจนมีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 1 ตัว ทำให้ไม่ทำปฏิกิริยาให้เห็นผลอย่างเด่นชัดเท่าเอทานอลและในการทดลองนี้ยังไม่สามารถควบคุมตัวแปรต่างๆ ได้อย่างแน่นอน ในการทดลองตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจน จึงเป็นการทดลองเพียงแค่เบื้องต้นเท่านั้น



รูปที่ 6.42 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงความต้านทานตามเวลาในการตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจน



รูปที่ 6.43 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงความต้านทานตามเวลาในการตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจน

ในการทดลองก่อนทำการวัดได้อุปฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ก่อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส และตรวจวัดที่อุณหภูมิห้อง จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานมีลักษณะทั้งเปลี่ยนแปลงมากขึ้นและแบบลดลง แต่จะมีพีคสูงสุดเพียงชั่วคราวประมาณ 2-3 นาทีเท่านั้น จากนั้นค่าความต้านทานจะกลับเข้าสู่ค่าเดิม และมีการแปรเปลี่ยนไปอีกรูป

จากผลการทดลองนั้นยังไม่สามารถสรุปได้ว่าคาร์บอนนาโนทิวบ์ไม่ตอบสนองต่อแก๊สไฮโดรเจน เนื่องจากผู้ทดลองได้ค้นคว้างานวิจัยอื่นๆ พบว่ามีงานวิจัยที่สามารถใช้คาร์บอนนาโนทิวบ์เป็นเซนเซอร์แก๊สไฮโดรเจนได้ แต่ต้องทำที่อุณหภูมิสูง คือ 250 องศาเซลเซียส เพื่อเร่งปฏิกิริยา หรือใช้เทคนิคการได้ปัสสาวะบางอย่างลงในคาร์บอนนาโนทิวบ์ แต่ในการทดลองนี้ไม่สามารถทำได้เนื่องจากตัวตรวจวัดประกอบขึ้นด้วยส่วนประกอบที่เป็นพลาสติกที่บริเวณขั้ว และยังมีการใช้ตะกั่วบักกรีจุดเชื่อมต่อกับขั้ว ดังนั้นจึงทำการทดลองที่อุณหภูมิสูงไม่ได้ ในหัวข้อนี้จึงสรุปได้เพียงว่า ไม่สามารถวัดแก๊สไฮโดรเจนที่อุณหภูมิห้องได้

6.4 ชนิดรอยสัมผัสและความต้านทานรอยสัมผัสระหว่างคาร์บอนนาโนทิวบ์กับโลหะ

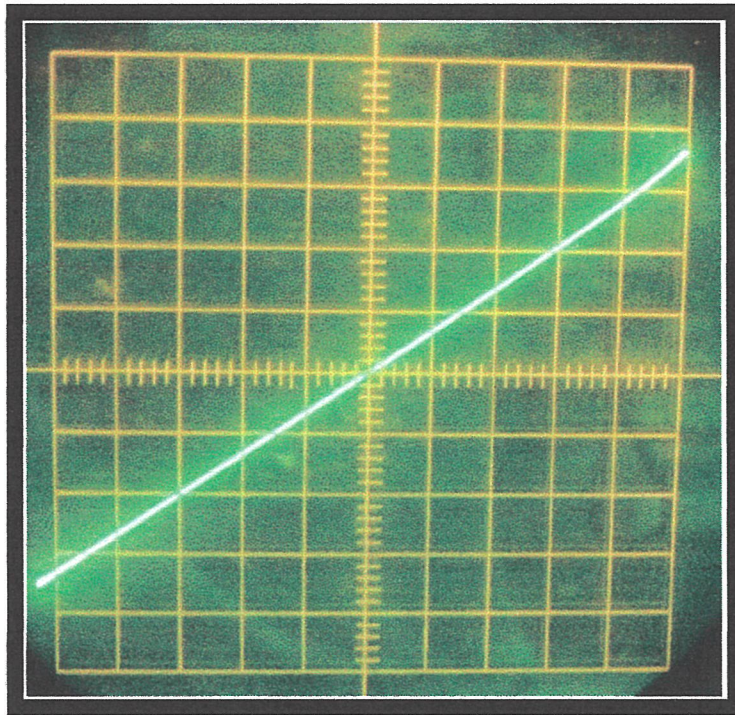
คาร์บอนนาโนทิวบ์ก็คือธาตุคาร์บอนที่มีการจับตัวเป็นรูปท่อ ธาตุคาร์บอนเป็นธาตุหมู่ 4 ในตารางธาตุ เป็นหมู่เดียวกับซิลิคอนจึงมีคุณลักษณะเป็นกึ่งตัวนำไฟฟ้า ซึ่งคาร์บอนนาโนทิวบ์อาจเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี หรือ ชนิดเอ็น ก็ได้ขึ้นอยู่กับปัจจัยในการสังเคราะห์ และรอยสัมผัสระหว่างคาร์บอนนาโนทิวบ์กับโลหะ อาจเกิดได้ทั้งแบบ รอยสัมผัสแบบ เรคตีไฟร์และรอยสัมผัสแบบ โอห์มมิก

จากการค้นคว้า งานวิจัยต่างๆ พบว่าส่วนใหญ่ คาร์บอนนาโนทิวบ์ทั้งแบบผนังเดี่ยวและแบบหลายผนัง มี work function ระหว่าง 4.7 ถึง 5 eV ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับธาตุคาร์บอน จากการวิจัยในเรื่อง Contact Resistance Properties Of Metal – Nanotube Interfaces ของ California Institute of Technology ประเทศสหรัฐอเมริกา โดยทดลองกับโลหะ 5 ชนิด คือ Ti, Pd, Pt, Cu และ Au ผลคือ Ti ให้ค่าความต้านทานรอยสัมผัสที่ต่ำที่สุดและเป็นรอยสัมผัสแบบ โอห์มมิก โดยโลหะชนิดอื่นๆ มีความต้านทานรอยสัมผัสมากขึ้นตามลำดับดังนี้ Pd Pt Cu Au และยังมีงานวิจัยของ Institute of Physics Academia Sinica Tapei ที่กล่าวว่า Cr เป็นโลหะที่ให้คุณสมบัติรอยสัมผัสระหว่างคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ดี คือมีความต้านทานรอยสัมผัสที่ต่ำ (ช่วงเป็นกิโล โอห์ม ที่อุณหภูมิห้อง) เป็น โอห์มมิก คอนแทค ผลกระทบจากอุณหภูมิต่ำ ผลกระทบจากสนามแม่เหล็กต่ำ และเหมาะสมที่จะเป็น อิเล็กโทรดของอุปกรณ์ที่ใช้คาร์บอนนาโนทิวบ์เป็นส่วนประกอบ

สำหรับปริณูณานิพนธ์นี้เป็นรอยสัมผัสระหว่างทองแดงกับคาร์บอนนาโนทิวบ์ สาเหตุที่เลือกใช้ทองแดงเป็นอิเล็กโทรดเนื่องจากทองแดงมีจุดหลอมเหลวประมาณ 1100 องศาเซลเซียส ซึ่งสูงกว่าอุณหภูมิในการสังเคราะห์ (550 – 750 องศาเซลเซียส) มาก เมื่อดูจากจุดหลอมเหลวแล้วแน่ใจว่าทองแดงจะไม่หลอมเหลวขณะสังเคราะห์ แต่ในการสังเคราะห์จริงนั้นพบว่า ทองแดงมีการหลุดล่อนจากแผ่นฐานรองซิลิคอนบางส่วน และอีกเหตุผลหนึ่งคือทองแดงไม่เป็นโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา คาร์บอนนาโนทิวบ์จะไม่เกิดบนทองแดงที่ต้องการให้เป็นขั้วไฟฟ้า แต่ข้อเสียของทองแดง

คือ ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศเกิดเป็นออกไซด์ได้ง่าย ออกไซด์นี้เป็นฉนวน จะส่งผลให้ความต้านทานที่รอยสัมผัสมีค่าสูงขึ้น เป็นรอยสัมผัสที่แย่ เพราะมีความต้านทานสูงและเมื่อนำแผ่นตัวอย่างไปทำการต่อขั้ว ต้องคิดลวดตัวนำกับอิเล็กทรอนิกส์ด้วยกาวเงิน เป็นเหตุให้มีค่าความต้านทานรอยสัมผัสมากขึ้นอีก เนื่องจากกาวเงินอาจติดได้ไม่สม่ำเสมอส่งผลให้ความต้านทานโดยรวมมากขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 6.1

ในการพิจารณาว่ารอยสัมผัสเป็นแบบโอห์มมิกหรือเรกติไฟร้นั้น ผู้จัดทำได้นำตัวตรวจวัดแก๊สที่ต่อขั้วเสร็จสมบูรณ์ มาวัด กราฟคุณลักษณะ I - V ด้วยเครื่อง Curve Tracer ได้ผล ดังรูปที่ 6.44



รูปที่ 6.44 กราฟคุณลักษณะ I - V ของตัวตรวจวัดแก๊ส

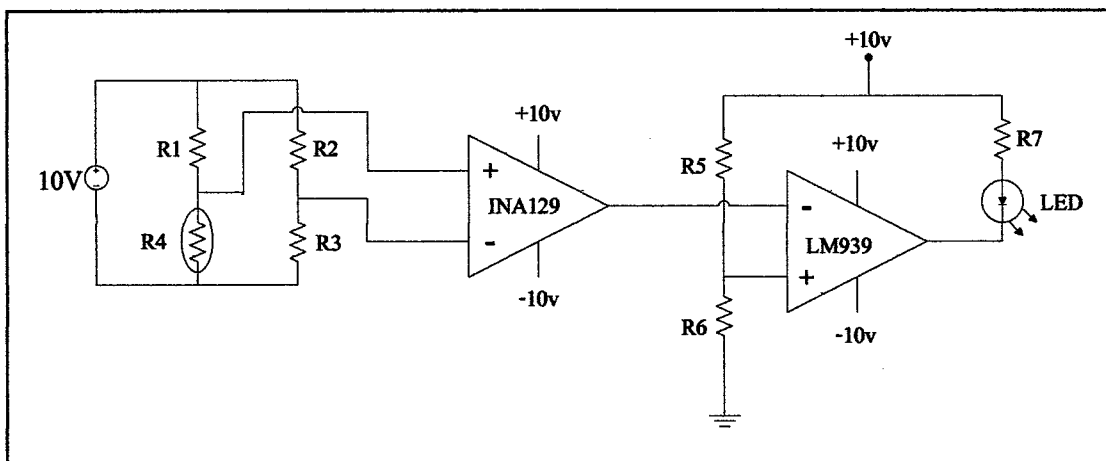
จากรูปที่ 6.44 พบว่าเป็นรอยสัมผัสแบบ โอห์มมิก ซึ่งผลการวัดทุกๆ แผ่นตัวอย่างเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิกทั้งสิ้น โดยมีความชันหรือความต้านทานแตกต่างกันออกไป

6.5 การนำอุปกรณ์ตรวจวัดมาประกอบเป็นวงจรเพื่อนำไปประยุกต์ใช้

จากหัวข้อที่ 6.2 จะเห็นแล้วว่าคาร์บอนนาโนทิวบ์มีคุณสมบัติที่เป็นเซนเซอร์ไวระเหยของเอทานอลได้ ในหัวข้อนี้จะนำตัวตรวจวัดมาประกอบเป็นวงจรเพื่อแสดงให้เห็นว่าสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้จริง

ตัวตรวจวัดมีเอาต์พุตเป็นค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไม่มาก (ไม่เกิน 8%) จึงเหมาะสมกับการประกอบเป็นวงจรบริดจ์เพื่อแปลงเอาต์พุตที่ได้ให้เป็นศักดาไฟฟ้าเพื่อความสะดวกในการจัดการ แล้วใช้ Instrumentation Amplifier ขยายสัญญาณ แล้วนำไปแสดงผล วงจรที่ใช้เป็นดังรูปที่

6.45



รูปที่ 6.45 วงจรแก๊สเซนเซอร์แสดงผลด้วยไดโอดเปล่งแสง

จากวงจรแบ่งเป็น 3 ส่วน ดังนี้

1. วงจรบริดจ์ โดยมีเซนเซอร์เป็นแขนของบริดจ์ที่ R4 โดยเมื่อความต้านทานเพิ่มขึ้นเนื่องจากการทำปฏิกิริยากับแก๊ส ศักดาที่ node นี้จะสูงกว่าอีก node หนึ่ง

2. Instrumentation Amplifier INA129 เพื่อขยายศักดาไฟฟ้าที่ได้จากวงจรบริดจ์ เนื่องจากถ้าค่าความต้านทานเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย เอาต์พุตของวงจรบริดจ์ จะมีขนาดเป็น มิลลิโวลต์ จึงต้องมีการขยายเพื่อนำไปใช้กับวงจรอื่นๆ เพื่อแสดงผลได้

3. คอมพาราเตอร์ LM939 จะถูกตั้งจุดทำงานไว้โดยการปรับค่า R6 ซึ่งเมื่อศักดาของขา inverting มีค่ามากกว่าขา non inverting คอมพาราเตอร์จะให้เอาต์พุตเป็นศักดา $-V_{sat}$ (-10V) จะทำให้ ไดโอดเปล่งแสงได้รับการไบอัสตรง ไดโอดเปล่งแสงจะติดสว่างแสดงสถานะว่ามีการตรวจพบแก๊ส

บทที่ 7

สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองจากบทที่ 4 - 6 สามารถสรุปได้ดังนี้ คือ

1. การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธีชีวิตแบบขดลวดความร้อน กระทำที่ความดันบรรยากาศ ใช้แหล่งจ่ายคาร์บอนเป็นเอทานอล ใช้แก๊สไฮโดรเจนเป็นแก๊สนำพาไอระเหยของเอทานอล โดยใช้อัตราการไหลของไฮโดรเจน 100 cc/min และอัตราการไหลของไฮโดรเจนผ่านเอทานอล 10 cc/min สังเคราะห์ลงบนฐานรองซิลิคอน ใช้ให้เกิดเป็นโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาและมีขั้วไฟฟ้าเป็นทองแดง คาร์บอนนาโนทิวบ์จะเกิดที่กำลังงาน 103 – 215 วัตต์ ใช้เวลาตั้งแต่ 10 – 40 นาที สังเกตจากตาเปล่าจะมีลักษณะเป็นเขม่าสีดำเคลือบเป็นชั้นฟิล์มอยู่บริเวณที่สปัดเตอร์นิเกิลลงไป ยืนยันผลการสังเคราะห์จากกล้อง SEM จะเห็น โครงสร้างของชั้นฟิล์มนั้นมีลักษณะเป็นเส้น ถักไปมา ไม่มีทิศทาง และยืนยันจากเครื่อง EDX ว่าเป็นธาตุคาร์บอนจริงโดยปรากฏพิคของคาร์บอนอย่างชัดเจน จึงสรุปได้ว่าสามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ลงบนฐานรองในบริเวณที่ต้องการได้

2. การนำคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้จากข้อ 1 ไปประยุกต์ใช้เป็นแก๊สเซนเซอร์ระบบวัดมีปริมาตร 2000 cc ใช้แก๊สไฮโดรเจนเป็นแก๊สตั้งต้น โดยทำการทดลองตรวจวัดแก๊ส 2 ชนิด คือ ไอระเหยของเอทานอลและแก๊สไฮโดรเจน ในการศึกษาการตรวจแก๊สนั้นจะเน้นในส่วนองศาของเอทานอลเนื่องจากเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนซึ่งสามารถนำแนวโน้มของข้อมูลไปศึกษาวิจัยต่อไปได้หลากหลาย ในกรณีของเอทานอลใช้อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจน 400 cc/min ไหลผ่านเอทานอลด้วยอัตราการไหล 200 cc/min ในกรณีแก๊สไฮโดรเจนใช้อัตราการไหลแก๊สไฮโดรเจน 200 cc/min และอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจน 200 cc/min ซึ่งมีกรณีศึกษาในส่วนองศาเอทานอลอยู่ด้วยกัน 3 กรณี

2.1 ศึกษาการอบ (HEAT) ตัวเซนเซอร์ก่อนนำเข้าสู่ระบบวัด ที่อุณหภูมิ 50, 70, 85 องศาเซลเซียสและไม่ทำการอบก่อนนำเข้าสู่ระบบวัด เพื่อหาอุณหภูมิในการอบเซนเซอร์ที่เหมาะสมที่สุด จากการทดลองพบว่า การอบตัวเซนเซอร์ที่อุณหภูมิ 70 องศา เป็นเวลา 25 นาที จะให้ผลการตอบสนองการเปลี่ยนค่าความต้านทาน 0 -90 % มีค่าต่ำ นั่นคือเซนเซอร์มีความไวว่าการอบด้วยกรณีอื่นๆ และเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานตั้งต้นครั้งที่ 1 และ 2 ต่ำกว่ากรณีอื่นๆ

2.2 ศึกษาอุณหภูมิในระบบวัด เพื่อหาอุณหภูมิในระบบวัดที่เหมาะสมที่สุด โดยกระทำที่อุณหภูมิ ต่ำกว่า 0 องศาเซลเซียส, อุณหภูมิห้อง, และให้ความร้อนในระบบด้วยขดลวดขนาดเล็กภายในห้องทำปฏิกิริยา โดยให้ค่ากำลังงานประมาณ 15 วัตต์ ก่อนทำการทดลองจะทำการอบตัวเซนเซอร์ที่อุณหภูมิ 70 องศา เป็นเวลา 25 นาที จากการทดลอง เมื่ออุณหภูมิต่ำ คาร์บอนนาโน

ทิวบ์จะมีค่าความต้านทานสูงตั้งคั้งสูงและมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความต้านทานสูงกว่ากรณีอื่นๆ

2.3 ศึกษาอัตราการตอบสนองของเซนเซอร์เมื่อขนาดของพื้นที่ของคาร์บอนนาโนทิวบ์มีค่าต่างกัน โดยจากการออกแบบฐานรองให้มี 2 โครงสร้าง มีขนาดพื้นที่คาร์บอนนาโนทิวบ์แตกต่างกัน 5 เท่า จากผลการทดลองพบว่าขนาดของพื้นที่ไม่ส่งผลให้เกิดความแตกต่างโดยเมื่อพิจารณาในด้านของโครงสร้างแล้วไม่พบว่ามีแนวโน้มไปทางใด ค่าต่างๆ ออกมาเป็นแบบสุ่มอาจเป็นไปได้ว่าขนาดของพื้นที่นั้นต่างกันไม่มากเพียงพอที่จะเห็นความแตกต่างของข้อมูล และต้องยอมรับว่าเซนเซอร์แต่ละตัวที่สังเคราะห์ได้มีจึงไม่สามารถสรุปได้ในส่วนนี้ อาจเป็นไปได้ว่าขนาดของพื้นที่นั้นต่างกันไม่มากเพียงพอที่จะเห็นความแตกต่างของข้อมูล

ในส่วนอัตราการไหลของแก๊สนั้นพบว่า มีผลกับการตอบสนองอย่างมาก โดยเมื่อมีอัตราการไหลเพิ่มขึ้นค่าความต้านทานตั้งคั้งจะลดลงและเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความต้านทานมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย

ในส่วนของไฮโดรเจนพบว่าเซนเซอร์ที่สังเคราะห์ได้มีการตอบสนอง โดยสังเกตเห็นค่าความต้านทานที่เปลี่ยนไปได้เพียงเล็กน้อยและเป็นเวลาเพียงสั้นๆ แสดงว่าตอบสนองได้ไม่ดี ไม่เพียงพอที่จะให้เอาที่พูดที่จะนำไปประยุกต์ใช้ได้ อย่างไรก็ตาม ผู้จัดทำจะไม่อาจสรุปว่าคาร์บอนนาโนทิวบ์ไม่สามารถตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจนได้ เนื่องจากในงานวิจัยต่างๆ สามารถทำได้แต่ต้องมีเทคนิคการวัดต่างๆ กันไป ในส่วนนี้ผู้จัดทำจึงสรุปได้เพียงว่าเซนเซอร์ที่สังเคราะห์ได้จากวิธีนี้ไม่สามารถตรวจวัดแก๊สไฮโดรเจนที่อุณหภูมิห้องได้

3. รอยสัมผัสระหว่างคาร์บอนนาโนทิวบ์และขั้วไฟฟ้าเป็นแบบ โอห์มมิกคอนแทค

ปริญญานิพนธ์นี้มีข้อผิดพลาดหลายประการจากตัวแปรที่ควบคุมไม่ได้หลายอย่าง เช่น การออกแบบโครงสร้างที่ขนาดพื้นที่แตกต่างกันน้อยเกินไป ทำให้ไม่สามารถศึกษาในหัวข้อดังกล่าวได้, การต่อขั้วโดยใช้กาวเงินยังไม่ดีพอมีการไหลเอะอะจาก การติดลวดตัวนำลงบนอิเล็กทรอนิกส์, การใช้ขดลวดขนาดเล็กในการให้ความร้อนทำให้ควบคุมอุณหภูมิได้ยากมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา, การควบคุมความหนาของชั้นฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ยังควบคุมไม่ได้, การใช้ทองแดงเป็นอิเล็กทรอนิกส์ข้อเสียตรงที่ทองแดงนั้นเกิดออกไซด์ได้ง่าย, ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์มักมีการหลุดล่อนออกเล็กน้อยทุกครั้งที่มีการทดลอง, ห้องทำปฏิกิริยาในระบบวัดมีปริมาตรมาก ทำให้เกิดการไหลวนของมวลแก๊สภายในระบบวัด ผลการตอบสนองที่ได้จึงไม่ใช่ผลการตอบสนองอย่างแท้จริง อย่างไรก็ตามก็ตีปริญญานิพนธ์นี้ก็ทำให้ข้อมูลที่มีแนวโน้มต่างๆ ที่อธิบายตามทฤษฎีอย่างมีเหตุผลและมีประโยชน์ในการศึกษาวิจัยต่อไปได้และถ้าขจัดข้อผิดพลาดต่างๆ ได้ ก็จะมีคุณภาพดีและสามารถหาเงื่อนไขที่ดีที่สุดในการนำคาร์บอนนาโนทิวบ์มาประยุกต์เป็นเซนเซอร์เคมีที่สามารถใช้จริงได้ต่อไป

ข้อเสนอแนะ

ในหัวข้อนี้คณะผู้จัดทำได้เขียนขึ้นมาเป็นหัวข้อพิเศษนอกเหนือจากการทดลอง เพื่อประกอบรายงานการศึกษาวิจัยในปฏิญานิพนธ์นี้ให้เกิดความสมบูรณ์

ปฏิญานิพนธ์นี้เป็นงานวิจัยแรกของคณะผู้จัดทำและถือเป็นประสบการณ์ครั้งแรกเช่นกันในเรื่องคาร์บอนนาโนทิวบ์ ซึ่งในประเทศไทยแล้วยังไม่แพร่หลายเท่าที่ควร ด้วยเหตุผลหลายประการ โดยเฉพาะข้อจำกัดด้านเครื่องมือซึ่งมีราคาแพง ผู้จัดทำเองได้พยายาม ค้นคว้ารวบรวมข้อมูลงานวิจัยจากประเทศต่างๆ มากพอสมควร เพื่อนำมาพิจารณาประกอบการทดลอง ในการทดลองต่างๆ ผู้จัดทำยอมรับว่ายังมีผลการทดลองบางประการที่อธิบายถึงสาเหตุไม่ได้อย่างถูกต้องตามหลักวิชาการ บางครั้งสรุปได้เป็นเพียงแค่มุมตื้น ซึ่งในการจะศึกษาให้ได้ผลจริงนั้นต้องใช้เครื่องมือประกอบและองค์ความรู้ขั้นสูง แต่ผู้จัดทำเองก็ได้พยายามควบคุมตัวแปรต่างๆ ให้ดีที่สุดเท่าที่เครื่องมือและความรู้จะอำนวย ในบทที่ 7 นั้นผู้จัดทำได้กล่าวโดยสรุปและกล่าวถึงข้อผิดพลาดต่างๆ แต่ยังมีได้เสนอในส่วนของ การแก้ปัญหา หรือวิธีการที่ดีกว่า ผู้จัดทำคิดว่ารายงานฉบับนี้จะไม่สมบูรณ์ได้เลยถ้าปราศจากการชี้แนะแนวทางที่ถูกต้องให้กับนักศึกษารุ่นต่อไปที่จะใช้รายงานฉบับนี้เป็นฐานข้อมูลประกอบการศึกษาวิจัย

จากการศึกษาทดลองต่างๆ ตลอด 1 ปีการศึกษา ทำให้ผู้จัดทำได้ทราบถึงรายละเอียดต่างๆ และข้อผิดพลาดของการทดลอง ซึ่งหลายประการเป็นความผิดพลาดจากการวางแผนของผู้จัดทำเอง แต่ด้วยเวลาจำกัดผู้จัดทำไม่สามารถที่จะย้อนกลับมาเพื่อแก้ไขปัญหาต่างๆ ที่พบในระหว่างทดลองได้ จำเป็นต้องทำการทดลองต่อไปจนจบ ซึ่งก็จวนเจียนจะไม่ทันการสอบจบการศึกษา ผู้จัดทำจึงขอใช้หัวข้อนี้บอกเล่าถึงความผิดพลาดและแนวทางการทดลองที่ถูกต้องอย่างละเอียด ที่ผู้จัดทำได้เรียนรู้จากการทำงาน การทดลองและการสอบปฏิญานิพนธ์ โดยในส่วนนี้ถือเป็นหัวข้อพิเศษ ผู้จัดทำจะไม่ผนวกเป็นส่วนหนึ่งของปฏิญานิพนธ์แต่จะถือเป็นส่วนเพิ่มเติมให้สมบูรณ์เท่านั้น

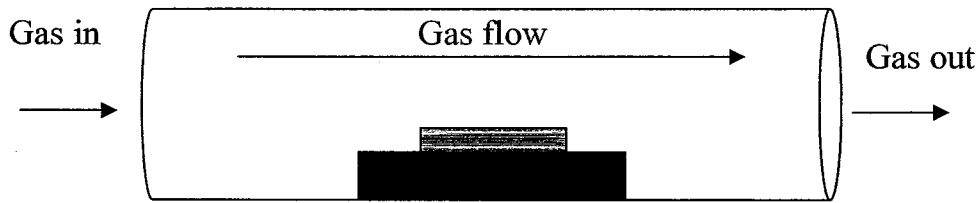
1. เครื่อง HFCVD นี้ไม่เหมาะกับการนำไปสร้างอุปกรณ์หรือเซนเซอร์ เนื่องจากการสังเคราะห์แบบ HFCVD ให้ความร้อนโดยใช้หลอดขนาดเล็ก ดังนั้นอุณหภูมิจึงไม่คงที่ แม้ควบคุมด้วยค่ากำลังงานก็ตาม เนื่องจากคุณสมบัติขดลวดเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา อีกทั้งอุณหภูมิในสภาพแวดล้อมภายในห้องทดลองยังส่งผลอย่างมากอีกด้วย คือไม่สามารถควบคุมกระบวนการสร้างได้เลยในเรื่องของอุณหภูมิ จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า ค่ากำลังงานในการสังเคราะห์แต่ละครั้งไม่เหมือนกัน รวมถึงเวลาในการสังเคราะห์ วิธีนี้จึงไม่ควรใช้สังเคราะห์หรือนำมาสร้างอุปกรณ์ เช่น เซนเซอร์ ที่ต้องการความแน่นอนของกระบวนการสังเคราะห์ เนื่องจากอุปกรณ์หรือฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ได้จะมีลักษณะเฉพาะตัว คือเกิดจากเงื่อนไขการสร้างต่างกัน ดังนั้นอุปกรณ์

แต่ละตัวจะต่างกันโดยสิ้นเชิง ผลการทดลองจะนำมาสรุปร่วมกันไม่ได้ คือเป็นข้อมูลที่ไม่เป็นประโยชน์ ในส่วนนี้ผู้จัดทำแนะนำให้ใช้วิธีอื่นเช่น Thermal CVD ทำการสังเคราะห์แทน เนื่องจากควบคุมอุณหภูมิได้อย่างคงที่และแม่นยำ ในการสังเคราะห์ควรศึกษากระบวนการ (Process) ให้แน่นอนที่สุดก่อน และต้องนำไปวิเคราะห์อย่างละเอียดด้วย SEM, EDX, raman และ TEM เพื่อศึกษาเงื่อนไขที่ดีที่สุดและทำกระบวนการสังเคราะห์ให้แน่นอนและคงที่ที่สุด ก่อนที่จะนำเงื่อนไขนั้นมาเป็นกระบวนการสังเคราะห์เซมิคอนดักเตอร์ ถ้าทำดังนี้จะทำให้ได้ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์หรือเซมิคอนดักเตอร์ที่เหมือนกันทุกประการ (Symmetry) เพื่อให้ได้คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่มีความบริสุทธิ์สูงสุด ดีที่สุด เท่าที่กระบวนการสังเคราะห์จะเอื้ออำนวย

2. พื้นที่ในการรับแก๊สหรือพื้นที่ฟิล์มไม่ควรมีขนาดกว้างเกินไป ควรมีขนาดเล็กๆ ซึ่งในการทดลองผู้จัดทำได้สร้างให้มีขนาดพื้นที่ที่กว้างมาก เนื่องจากคิดว่าถ้ามีพื้นที่รับแก๊สมากจะเห็นผลตอบสนองชัดเจนและเพื่อหลีกเลี่ยงกระบวนการ Photolithography ที่เป็นเรื่องยุ่งยาก ซึ่งเป็นความคิดที่ผิด เนื่องจากแนวโน้มในการพัฒนาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ นั้น มีแนวโน้มให้มีขนาดเล็กลงและหนาแน่นมากขึ้น อีกประการหนึ่งขนาดที่ใหญ่จะทำให้ผลการทดลองที่ออกมาอธิบายไม่ได้เพราะในพื้นที่ขนาดใหญ่แน่นอนจะมีสิ่งแปลกปลอมอยู่มาก ทำให้ไม่สามารถควบคุมตัวเซมิคอนดักเตอร์ได้และคาร์บอนนาโนทิวบ์ก็เป็นสิ่งเล็กๆ ขนาดเป็นนาโนเมตร ดังนั้นเพื่อให้เห็นผลตอบสนองอย่างแท้จริงควรมีขนาดพื้นที่ที่เล็กและบาง ควรเล็กในขนาดเป็น 100 ไมครอน หรือ 1 มิลลิเมตรก็ได้ แต่ขนาดพื้นที่ไม่ควรใหญ่เกิน 2 ตร.มม. ถ้าต้องการให้มีพื้นที่รับแก๊สมาก ควรทำให้เป็นลักษณะเซลล์เล็กๆ ต่ออนุกรมกัน เช่น ให้ 1 เซลล์มีขนาด 1 ตร.มม. อนุกรมกัน 100 ตัว เป็นต้น ซึ่งเราสามารถเลือก Bonding ที่เซลล์ใดก็ได้ตามแต่จะเลือกศึกษา

3. ขั้วไฟฟ้าควรใช้โลหะที่ไม่เกิด oxide ได้ง่าย และไม่ควรรู้ทองแดง เพราะทองแดงเกิด oxide ง่าย มี contact resistance สูง ควรใช้โลหะจำพวก Pt Ti จะให้ Contact Resistance ต่ำ และควรวัดคุณลักษณะของรอยสัมผัสจากเครื่อง Curve Tracer ด้วยว่าเป็น โอห์มมิกหรือไม่ ซึ่งวัดหลังจากการ Bonding ก็ได้ ในการ Bonding ถ้าขนาด Bonding Pad ใหญ่เพียงพอ ควรใช้ลวดตัวนำขนาดใหญ่ หรือใช้ลวดตัวนำขนาดเล็กแต่ใช้การตีเกลียวหลายๆ เส้น เพื่อให้ความนำไฟฟ้าดีขึ้นก็ได้ จะทำให้ค่าความต้านทานในเส้นลวดลดลง จะทำให้การวัดค่าความต้านทานขณะทดลองวัดแก๊สทำได้ง่ายขึ้นค่าที่วัดได้จะนิ่งไม่แกว่งมากนัก และห้ามใช้ตะกั่วในการต่อขั้วทุกกรณี เนื่องจากตะกั่วบัดกรีมีจุดหลอมเหลวต่ำ จะเป็นอุปสรรคในการใช้อุณหภูมิสูงในการทดลอง พยายามใช้เพียงกาวเงินเท่านั้น

4. ระบบวัดควรปรับปรุง ไม่ควรให้เกิดการหมุนวนของมวลแก๊สภายใน ควรใช้ระบบที่มีการ Flow ทิศทางเดียว ดังรูป



5. ควรใช้แก๊สเซนเซอร์ ที่มีจำหน่ายทั่วไปในท้องตลาด เป็นตัววัดเปรียบเทียบเพื่อให้ทราบขนาดทางอินพุต คือความเข้มข้นของแก๊ส เพื่อควบคุมตัวแปรนี้ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญมากของแก๊สเซนเซอร์ ไม่ควรใช้การควบคุมอัตราการไหลเพียงอย่างเดียว

6. การ Heat ตัวเซนเซอร์ในขณะที่ใช้งานหรือก่อนทำการวัดก็ดี ควรให้ความร้อนโดยการสร้างขดลวดติดอยู่ใต้แผ่นฐานรอง ไม่ควรนำมาอบในตู้อบอย่างที่ปริญญาณิพนธ์นี้ทำ ควรคิดการทดลองให้เหมือนกับงานจริงๆ มากที่สุด เนื่องจากในการใช้งานจริง ตัวเซนเซอร์จะถูกติดอยู่กับที่ ไม่ได้ถอดออก ถอดเข้าได้ง่าย ในกรณีของระบบที่ทำงานตลอด 24 ชม.

7. การให้ความร้อนในระบบวัดไม่ควรใช้ขดลวดขนาดเล็กภายใน ควรให้ความร้อนจากภายนอก โดยให้ความร้อนทั่วทั้ง Chamber อย่างสม่ำเสมอ (เหมือนเตาออกซิเดชัน หรือวิธีการ Thermal CVD) เนื่องจากสามารถควบคุมอุณหภูมิได้แม่นยำกว่ามาก

8. การเก็บรักษาเซนเซอร์หลังการทดสอบทุกครั้ง ต้องเก็บในที่ปราศจากความชื้นและให้สัมผัสอากาศภายนอกน้อยที่สุด ถ้าหาวิธีที่ทำให้ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ยึดติดกับฐานรองโดยไม่หลุดลอกออกจะดีมาก

แนวทางการแก้ปัญหาทั้ง 8 ข้อ ยังไม่ใช่แนวทางที่ดีที่สุด นักศึกษาหรือผู้ทำวิจัยรุ่นต่อไป ต้องศึกษาให้ลึกซึ้งมากกว่านี้ โดยใช้ข้อมูลจากปริญญาณิพนธ์นี้เป็นฐานความคิด แนวทางในการทดลองควรให้หัวข้อที่เลือกทำนี้มีความก้าวหน้า ควรพัฒนาและคิดเพิ่มเติมให้การทดลองดีขึ้น เพื่อไม่ให้งานวิจัยในเรื่องนี้หยุดนิ่งหรือทำการทดลองผิดซ้ำซาก ต้องทำให้มีการพัฒนาขึ้นในทุกๆ รุ่นที่ทำได้

บรรณานุกรม

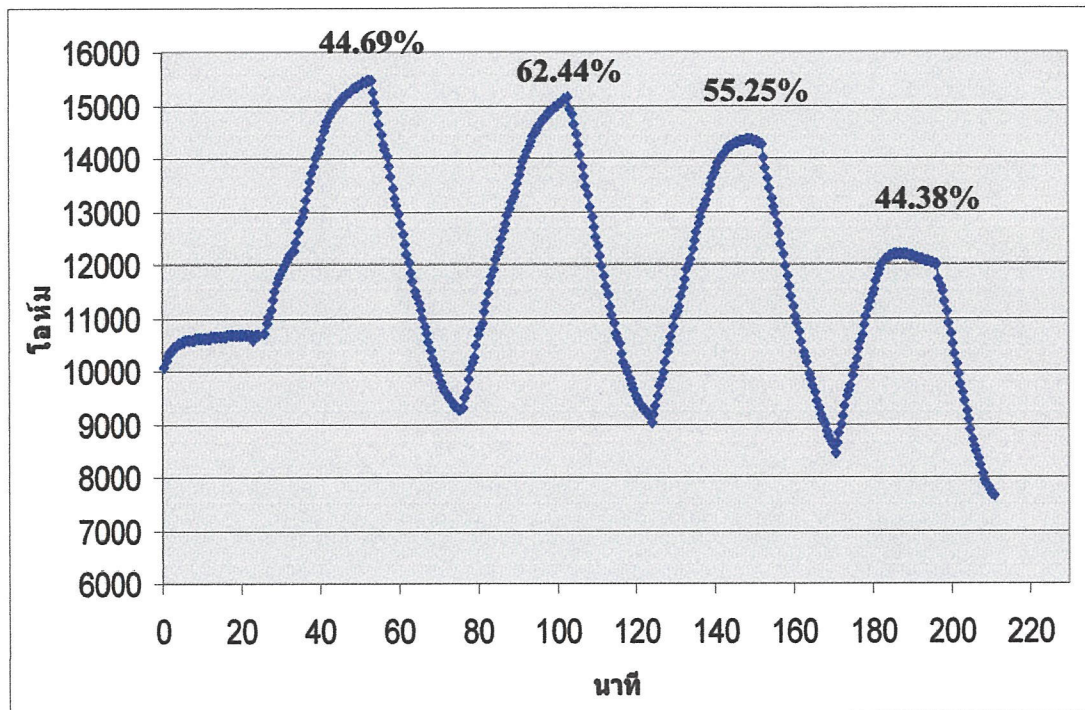
1. สมเกียรติ สุภเดช, “เซมิคอนดักเตอร์ดีไวซ์”, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 470 หน้า, 2549
2. สมเกียรติ สุภเดช, “เทคโนโลยีวงจรรวม 1”, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
3. สมเกียรติ สุภเดช, “เทคโนโลยีวงจรรวม 2”, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
4. ศักดา ไตรศักดิ์, “โครงสร้างอะตอมและพันธะเคมี”, คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 124 หน้า, 2547
5. วิสรุต ศรีรัตนะ, “เซนเซอร์และทรานสดิวเซอร์ในงานอุตสาหกรรม”, ซีเอ็ดดูเคชั่น, 392 หน้า 2547
6. ทรงพล กาญจนชูชัย, “นาโนอิเล็กทรอนิกส์เบื้องต้น”, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 348 หน้า, 2550
7. ประพันธ์ พิพัฒน์สุข, “ออปแอมป์และการใช้งาน”, สำนักพิมพ์ศูนย์ส่งเสริมอาชีวะ, 189 หน้า
8. เอกสารประกอบการบรรยาย “ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับกระบวนการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำระดับ 5 ไมโครเมตร”, ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
9. รัฐพงษ์ นาคาไชย, “การเลือกปลูกฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธีซีวีดีแบบลดอุณหภูมิ”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
10. กิตติ ชุกติรัตน, “คาร์บอนนาโนทิวบ์ : อีกบพาทหนึ่งของคาร์บอน”
11. ชีร์เกียรติ์ เกิดเจริญ, “นาโนเทคโนโลยี : ความเป็นไปได้และทิศทางในอนาคต”
12. T.Phetchakul, S.Cheirsirikul, S.Supadech, “Atmospheric pressure HFCVD Synthesis of carbon nanotube by using ethanol source”, The 10th International conference New Diamond Science and Technology (ICNDST – 10), May 11 – 14, 2005, AIST, Tsukuba, Japan
13. Yuki Matsuda, Wei-Qiao Deng & William A. Goddard III, “ Contact Resistance Properties of Metal-Nanotube Interfaces” Materials and Process Simulation Center (MC74-139) California Institute of Technology, California 91125, USA

14. W.S.Su, T.C.Leung, and C.T.Chan, "Work function of Single – walled and multiwalled carbon nanotubes : First – principles study" , Department of Physics, Hong Kong university.
15. C.Cantalini, L.Valentini, I.Armentano, J.M.Kenny, L.Loizzi, S,santucci, "Carbon nanotubes as new materials for gas sensing applications" , Department of chemistry University of L'Aquila Italy
16. Shu Peng, James O'Keeffe, Chengyu Wei, K. Cho, Jing Kong, Robert Chen, Nathan Franklin, H. Dai, "Carbon Nanotube Chemical and Mechanical Sensors" Conference Paper for the 3 rd International Workshop on Structural Health Monitoring
17. Meechai Tapnurat, Supab Choopun, Atcharawon Gardchareon, Pisith Singjai, Pongsri Mangkorntong and Nikorn Mangkorntong , "Thick Film of Carbon Nanotube Composite for Ethanol Sensor", Department of Physics, Faculty of Science, Chiang Mai University, Chiang Mai 50200, Thailand
18. Y. F. Hsiou,¹, Y. J. Yang,¹ L. Stobinski, Watson Kuo, and C. D. Chen , "On the Ohmic Contact between Multiwalled Carbon Nanotubes and Nano-electrodes" , Graduate Institute of Electronics Engineering and Department of Electrical Engineering, National Taiwan University, Taipei, R.O.C. Institute of Physical Chemistry, Polish Academy of Sciences, Institute of Physics, Academia Sinica, Taipei, Nankang 11529, Taiwan, R.O.C.
19. I. Sayagoa, E. Terradob, E. Lafuenteb, M.C. Horrilloa, W.K. Maserb, A.M. Benitob, R. Navarroc, E.P. Urriolabeitiac, M.T. Martinezb, J. Gutierrezza, "Hydrogen sensors based on carbon nanotubes thin films" , Laboratorio de Sensores, Instituto de F´ısica Aplicada, Spainb Instituto de Carboquimica, CSIC, Departamento de Qu´ımica Inorg´anica, Universidad de Zaragoza,
20. Junya Suehiro, Shinji Yamane, Kiminobu Imasaka, "Carbon nanotube – Based Hydrogen Gas Sensor Electrochemically Functionalized with Palladium", Graduate school of Information Science and Electrical Engineering Kyushu University Fukuoka, Japan

ภาคผนวก

ผนวก ก

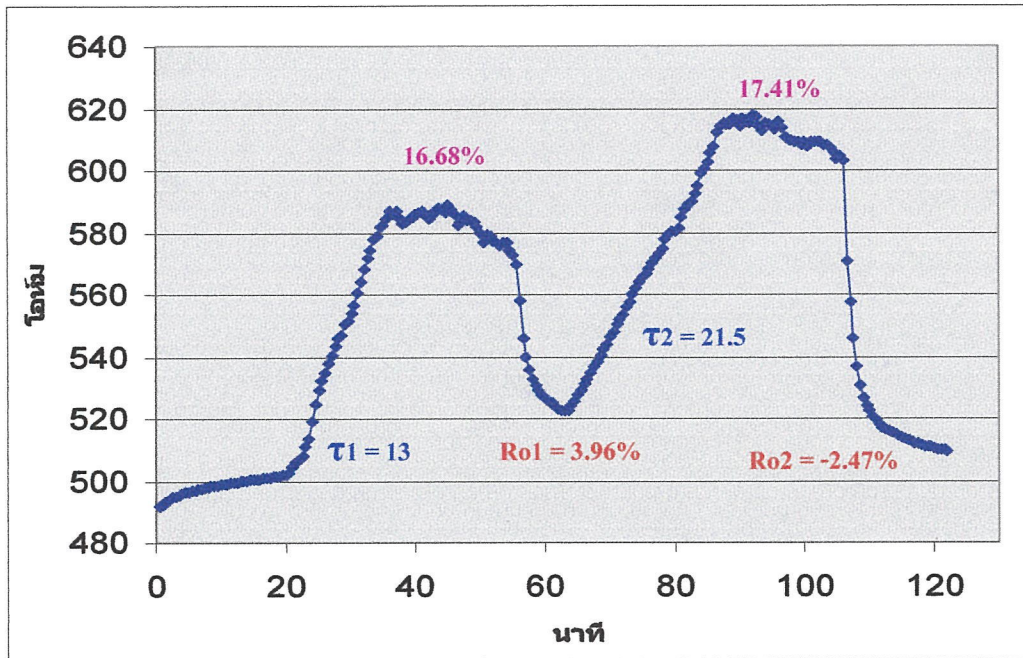
ในส่วนนี้จะเป็นการทดลองเพิ่มเติมโดยการทดลองตรวจวัดไอรยะเหยของเอทานอลในระบบวัดที่อุณหภูมิต่ำกว่า 0 องศาเซลเซียส โดยการใช้ใน โตรเจนเหลว เพื่อทดลองว่าคาร์บอนนาโนทิวบ์นั้นมีคุณสมบัติการตอบสนองที่ดีในอุณหภูมิต่ำๆ ซึ่งจากผลการทดลองจากรูปที่ ก.1 พบว่ามีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความต้านทานสูงมากถึง 62.44 %



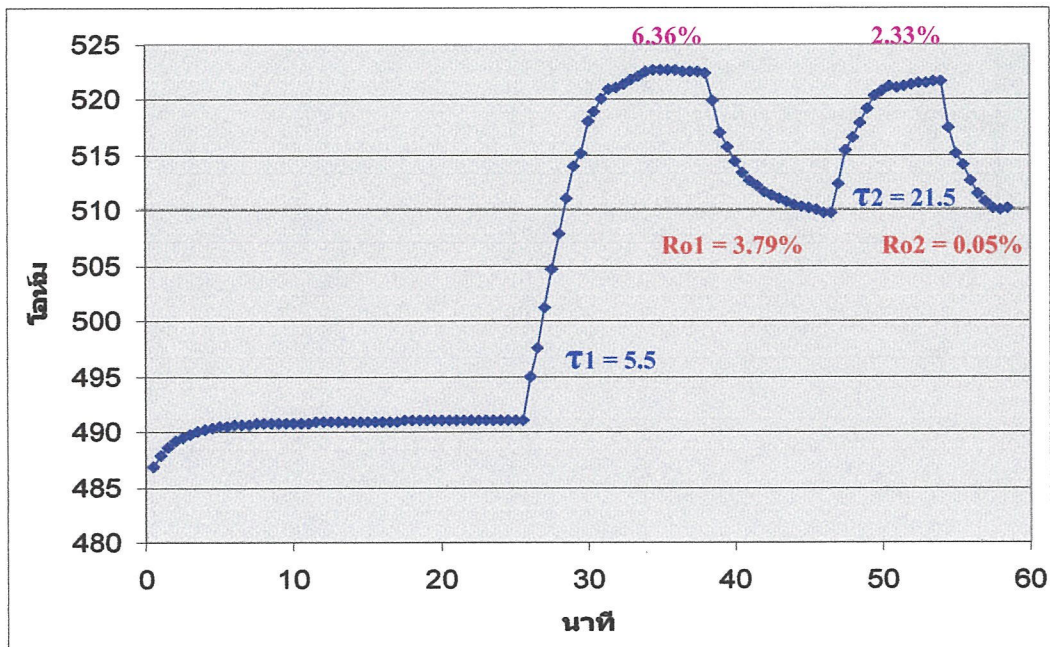
รูปที่ ก.1 แผ่นตัวอย่างที่ 16 ตรวจวัดเอทานอลอุณหภูมิ ต่ำกว่า 0 องศาเซลเซียส

ในการวัดเมื่อวัดซ้ำครั้งที่ 2 – 3 พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานตั้งต้นเนื่องจากอุณหภูมิในระบบมีการเปลี่ยนแปลงไป (อุณหภูมิเพิ่มขึ้น)

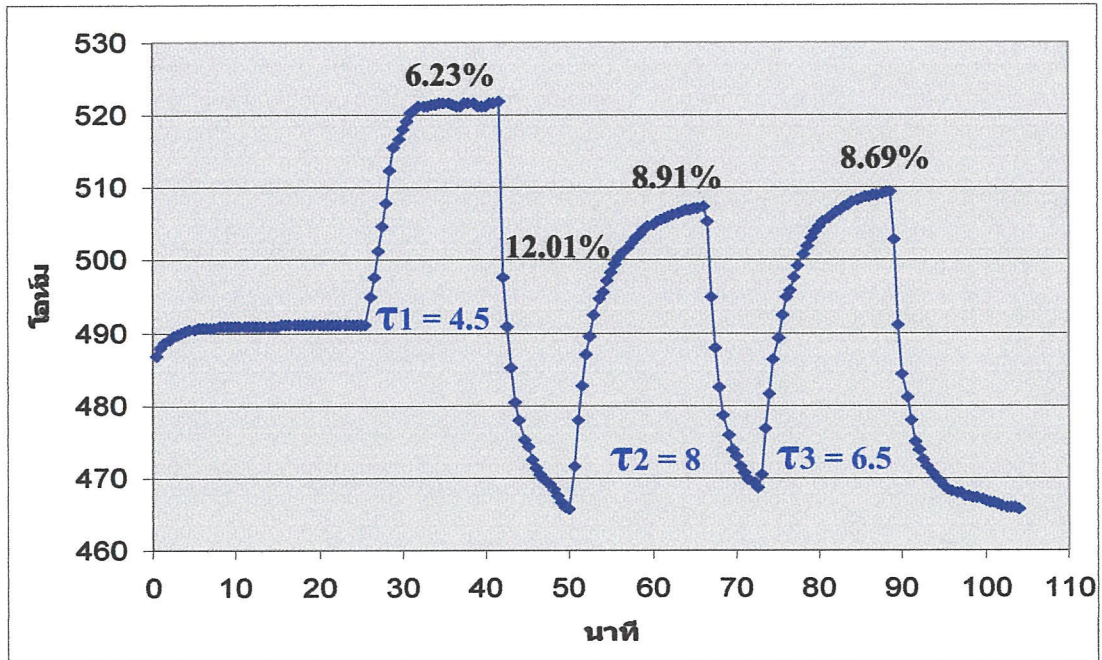
ต่อไปจะนำสารประกอบจำพวกไฮโดรคาร์บอนคืออะซิโตนมาทดลองตรวจวัดเพื่อทดสอบว่าคาร์บอนนาโนทิวบ์สามารถตรวจวัดไอรยะเหยของสารจำพวกไฮโดรคาร์บอนได้มีแนวโน้มใกล้เคียงกันหรือไม่



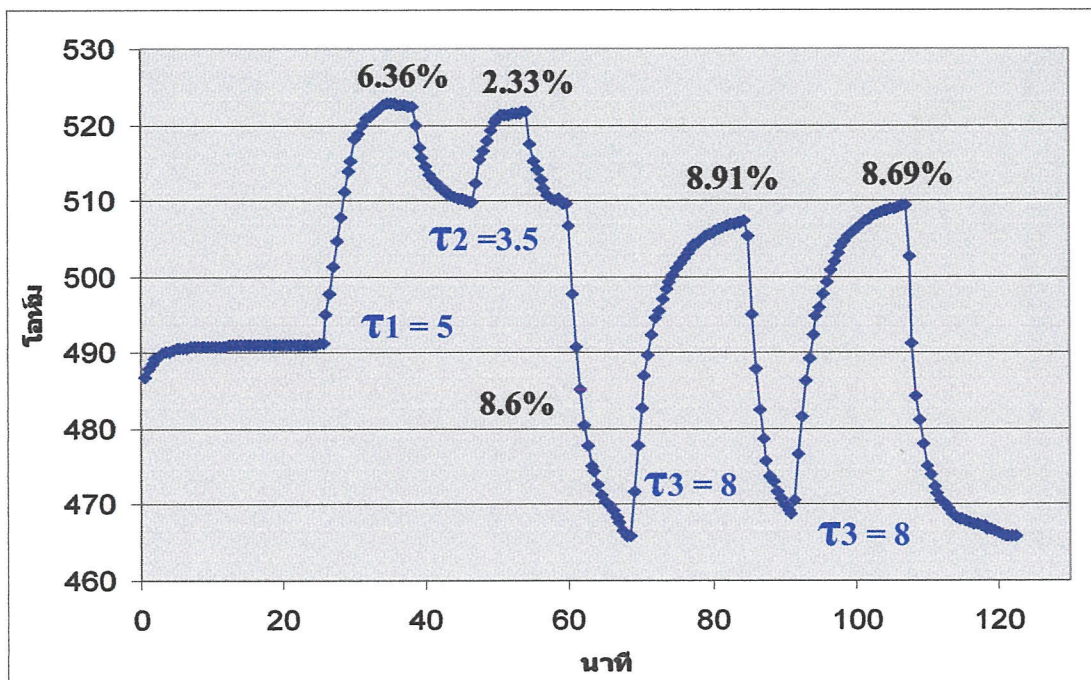
รูปที่ ก.2 แผ่นตัวอย่างที่ 8 ตรวจวัด อะซิโตน อุณหภูมิ ต่ำกว่า 0 องศาเซลเซียส



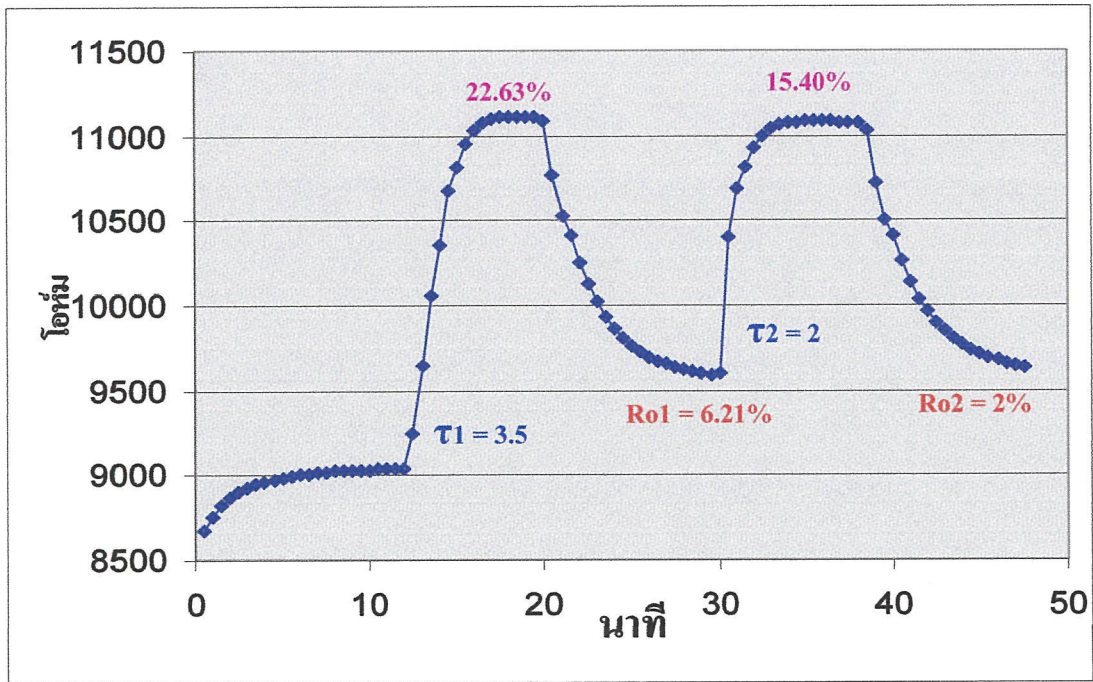
รูปที่ ก.3 แผ่นตัวอย่างที่ 8 ตรวจวัด อะซิโตน ทดลองที่อุณหภูมิห้อง



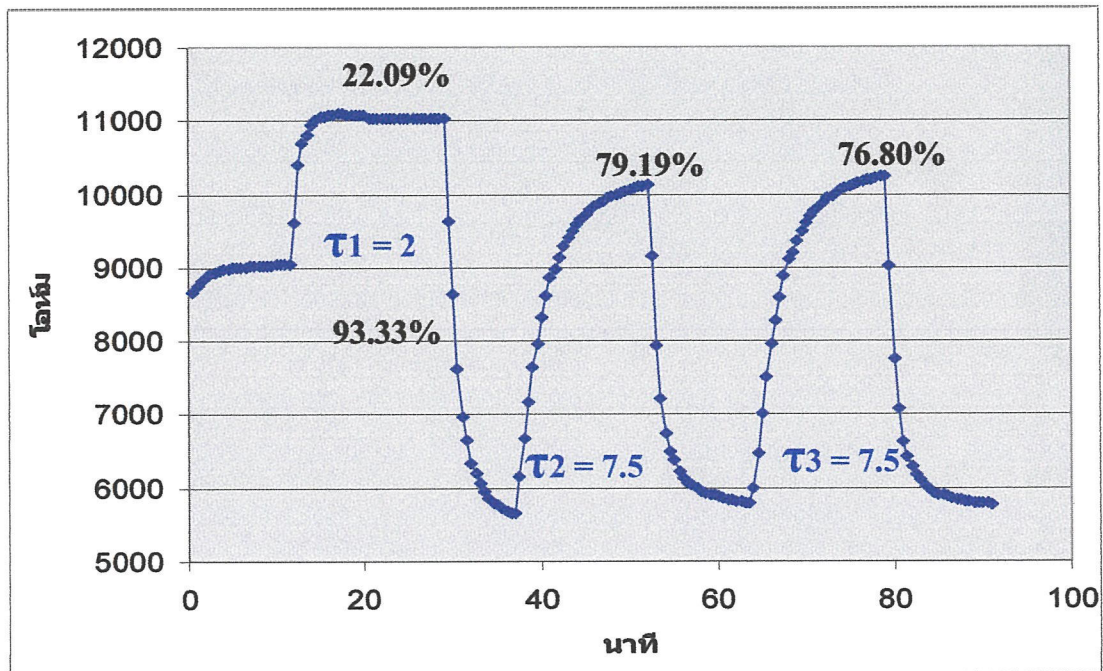
รูปที่ ก.4 แผ่นตัวอย่างที่ 8 ตรวจวัด อะซิโตน ทดลองที่อุณหภูมิห้อง
และมีการให้ความร้อนในระบบวัด



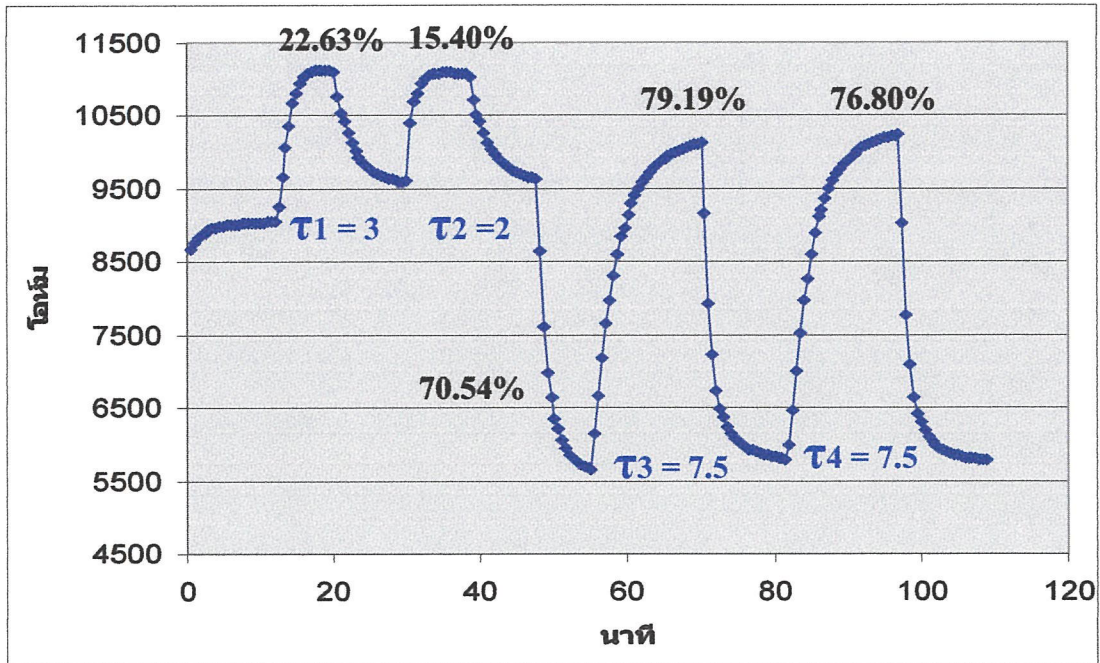
รูปที่ ก.5 แผ่นตัวอย่างที่ 8 ตรวจวัด อะซิโตน ทดลองที่อุณหภูมิห้อง
และมีการให้ความร้อนในระบบวัด



รูปที่ ก.6 แผ่นตัวอย่างที่ 16 ตรวจวัด อะซิโตน ทดลองที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ ก.7 แผ่นตัวอย่างที่ 16 ตรวจวัด อะซิโตน ทดลองที่อุณหภูมิห้อง
และมีการให้ความร้อนในระบบวัด



รูปที่ ก.8 แผ่นตัวอย่างที่ 16 ตรวจวัด อะซิโตน ทดลองที่อุณหภูมิห้อง
และมีการให้ความร้อนในระบบวัด

จากผลการทดลองข้างต้นจะพบว่า มีแนวโน้มเหมือนกับเอทานอลทุกประการ จึงสรุปได้
ว่าสามารถนำเซนเซอร์ไปประยุกต์ใช้กับสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอื่นๆ ได้โดยมีแนวโน้ม
เหมือนกัน

ผนวก ข

Atmospheric pressure HFCVD synthesis of carbon nanotube by using ethanol source

T. Phetchakul *, S. Cheirsirikul, S. Supadech

*Electronic Department, Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand
kptoempo@kmitl.ac.th*

ABSTRACT

Carbon nanotubes (CNTs) were grown by hot filament chemical vapor deposition at atmospheric pressure. Ethanol and hydrogen were used as source. Diamond can be synthesized at condition 8 vol% of the ratio of H₂ gas passed through ethanol (for bubbling) to total H₂ gas. The heated tungsten filament 2300 °C, Ø = 0.3 mm, 3 mm above substrate radiated thermal to silicon substrate at 850 °C which was on Mo substrate holder. The high quality of diamond was obtained by Raman spectroscopy inspection. In the case of CNTs, the filament temperature was about 2000 °C and substrate temperature was in the range 550-750 °C with the same ratio of carbon source. The growth rate and density depended on the substrate. The silicon substrate which used iron nitrate (Fe(NO₃)₂) as catalyst and carbon and graphite with non-catalyst substrate were used in this experiment. Both of them can be obtained CNTs at very difference rate of growth. The case of carbon and graphite substrate was higher growth rate than the case of silicon with catalyst. The increasing of ethanol increased the growth rate. CNTs were characterized by SEM and TEM.

Keywords: Atmospheric pressure HFCVD, Carbon nanotube, Diamond, Ethanol

1. Introduction

It is well known that carbon nanotubes (CNTs) are very attracting at present. Due to their unique properties both electrical and mechanical [1,2], many applications have been expected such as electronics devices and sensors [3-5]. Several methods include the arc discharge, the laser ablation vaporization and the chemical vapor deposition (CVD) from catalytic decomposition of hydrocarbon synthesizing either the single-walled or the multi-walled CNT [6-9]. Among of them, CVD has several advantages over the others in growing CNT. It can be synthesized well-aligned both single-walled and multi-wall CNT and also recognized as the most promising for industrial scale-up.

Synthesis of CNT by CVD generally requires catalyst such as Fe, Ni, Co and alloy that coated on the substrate prior CNT growth. The catalysts are usually deposited by sputtering or evaporation, and an etching process is frequently employed after the deposition. Under several of substrate and hydrocarbon source at the appropriate conditions, CNT can be grown. Mostly conditions operated at low-pressure mTorr but a few operated at atmosphere pressure.

Substrate temperatures 550 – 1000 °C have been reported.

In this work, the new effective process has been study. CNTs have been synthesized by HFCVD at atmospheric pressure. The ethanol and hydrogen gas were used as hydrocarbon source. The substrates are catalyst coated silicon and non-catalyst carbon and graphite. This process is low cost, short time operation, easily controlled and simplicity. From some advantages, it is possible for a commercial process for mass-product scale.

2. Experiment

2.1 Substrate preparation

Three kind substrates were used for CNT growing. The first one was silicon substrate <100>, 450-µm thickness. Some Si substrates were scratched the surface by diamond particle, diameter Ø 3 -µm and the others were mirror-polished surface. Both substrates were dipped for a few minutes into the solution of iron nitrate (Fe(NO₃)₂) diluted in ethanol. Then they were dried by air at room temperature.

The second one was amorphous carbon substrate, which received from the pressed carbon powder. The planar surface was flat but roughly with 3mm thickness. The last one was graphite substrate that original circular shape was scraped by cutter for planar surface with 2 mm thickness. In the case of carbon and graphite, they were not coated any catalyst layer or particle.

2.2 HFCVD

Figure 1 shows a schematic diagram of HFCVD system was designed in this study. The chamber is Pyrex glass and tungsten filament, \varnothing 0.3 mm, that was heated about 2000°C is 3mm above Mo substrate holder. The temperature substrate was monitor by thermocouple under substrate holder. The hydrogen was separated in two paths, which one pass through ethanol for vapor bubbling. Hydrogen and ethanol vapor flow rate were controlled by flow meters and valve as mixed vapor source. The rest reaction gas and by product were entrapped by water before wasted in air. Another reason of water stopper is for safety.

2.3 The condition

In this experiment, the tungsten filament was heated by DC power supply up to the temperature range 2000- 2300°C. The substrate temperature radiated from the upper heated filament was in the range 550-850°C. The ratio of H_2 gas passed

through ethanol to total H_2 was 8 vol%. The synthesis time was 30 minutes at atmosphere pressure.

3. Results and discussion

The deposited films were investigated by SEM. Figure 2 a-d show the surface of the three kinds of substrate that are Fe catalyst coated mirror-polished silicon, carbon and graphite, respectively. The condition was the same as in 2.3.

Figure 2a shows CNTs of Fe coated silicon substrate and figure 2b shows the micrograph of the planar surface. The CNTs appeared all over the surface. The length was very long in micron scales. For the non-catalyst, carbon and graphite, CNTs was observed as shown in Fig. 2c and 2d, respectively. The density of CNT was very dense and in the case of graphite, growth rate was the highest. The length of CNT deposited on graphite seems to be longer than the others are. At the substrate temperature below as 550°C, CNT did not observe on any kind of substrate. It was investigated that CNT was depend on the substrate temperature in the case of silicon substrate when it varied within the range.

Figure 3 shows the SEM photograph of the films deposited on scratched surface silicon and coated Fe later by dipped in solution in 2.1. The reason is to check that when the condition change, high temperature and high of vapor rate, what kind of film between diamond or carbon or both of them can be deposited. The scratched surface helps the nucleation for diamond growth under the appropriate condition. Figure 3a shows the deposited film when the substrate temperature and the vapor ratio reaches to or small upper 850°C and 10 Vol%. Diamond film was observed only rather than CNT or carbon. It means that temperature substrate is higher out of the range of CNT

Figure 3b shows the deposited film at the temperature below in the case of Figure 3a, around 850°C. Amorphous carbon was deposited cover the surface easily than CNT. Some CNTs were observed upon the amorphous carbon but did not observe on silicon surface. The amorphous carbon was depended on both the temperature and ratio of vapor source. Amorphous carbon films protected the substrate surface so some CNT were grown on it.

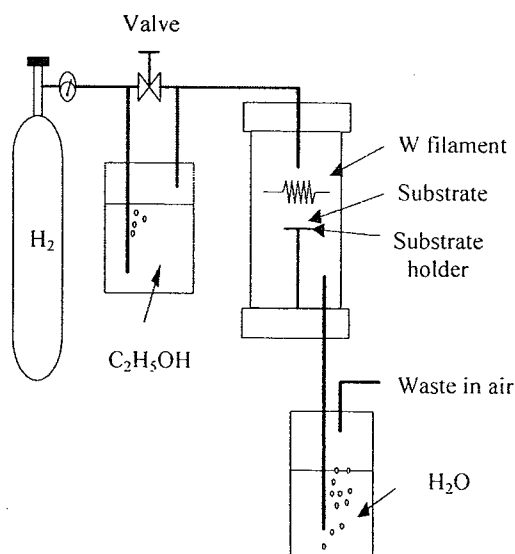


Fig. 1 Schematic diagram of HFCVD

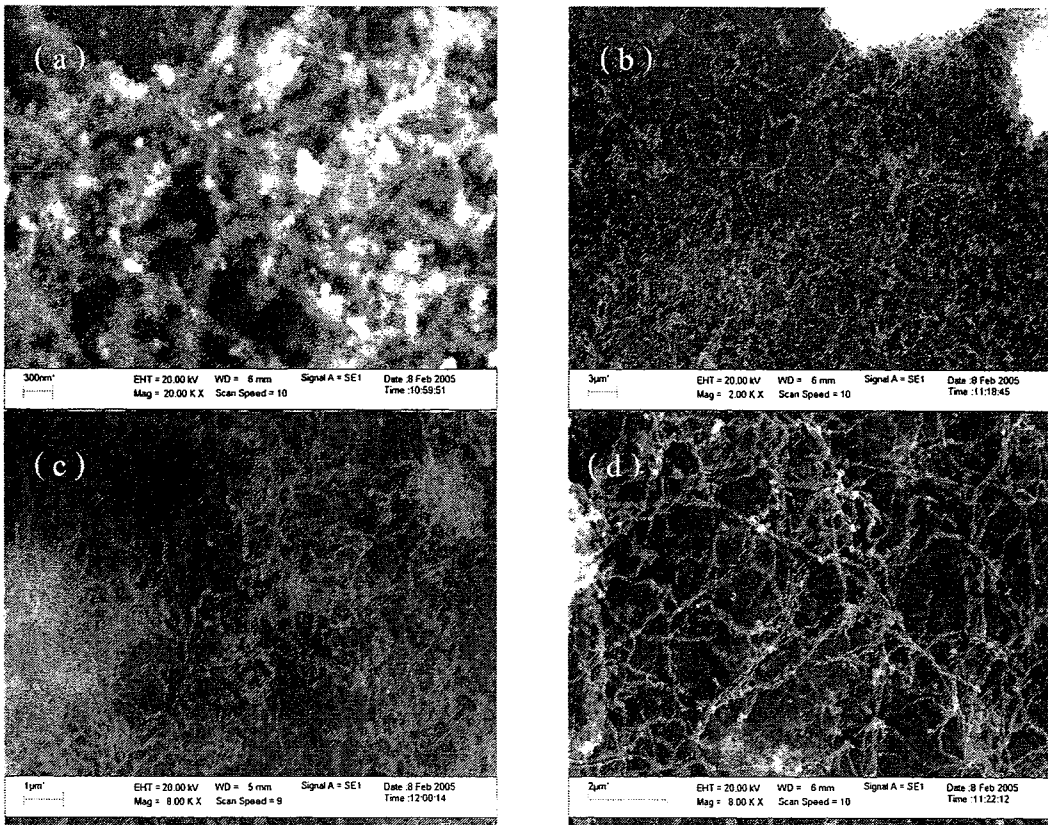


Fig 2. SEM photograph of carbon nanotube of a) Fe coated mirror-polished silicon substrate, b) planar surface of Fe coated mirror-polished Si, c) carbon substrate and d) graphite substrate at substrate temperature 650-750°C

Figure 4 shows the TEM images of CNT. They show that all of them are multi-walled. The end of the tip is closed. The outer diameter is less than 10 nm and the inner diameter is less than 10 nm.

4. Conclusions

CNT can be synthesized by ethanol mixed hydrogen at atmospheric pressure. The

important parameters are substrate temperature and vapor source ratio. The film can be deposited on both catalyst-coated silicon and non-catalyst coated carbon and graphite. The receiving CNT are multi-walled with high density. The length of tube is in several micron scales. This system is easily control and simplicity. The other advantages are non-hazard, no pollution and vastless material source.

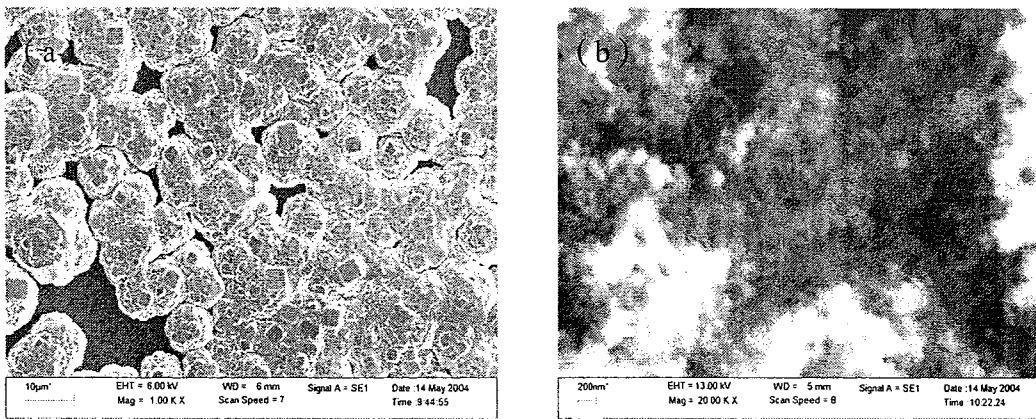


Fig 3. SEM photograph at vapor ratio 10 Vol % of a) Fe coated scratched Si surface at substrate temperature >850°C, b) Fe coated scratched Si surface at substrate temperature around 850°C

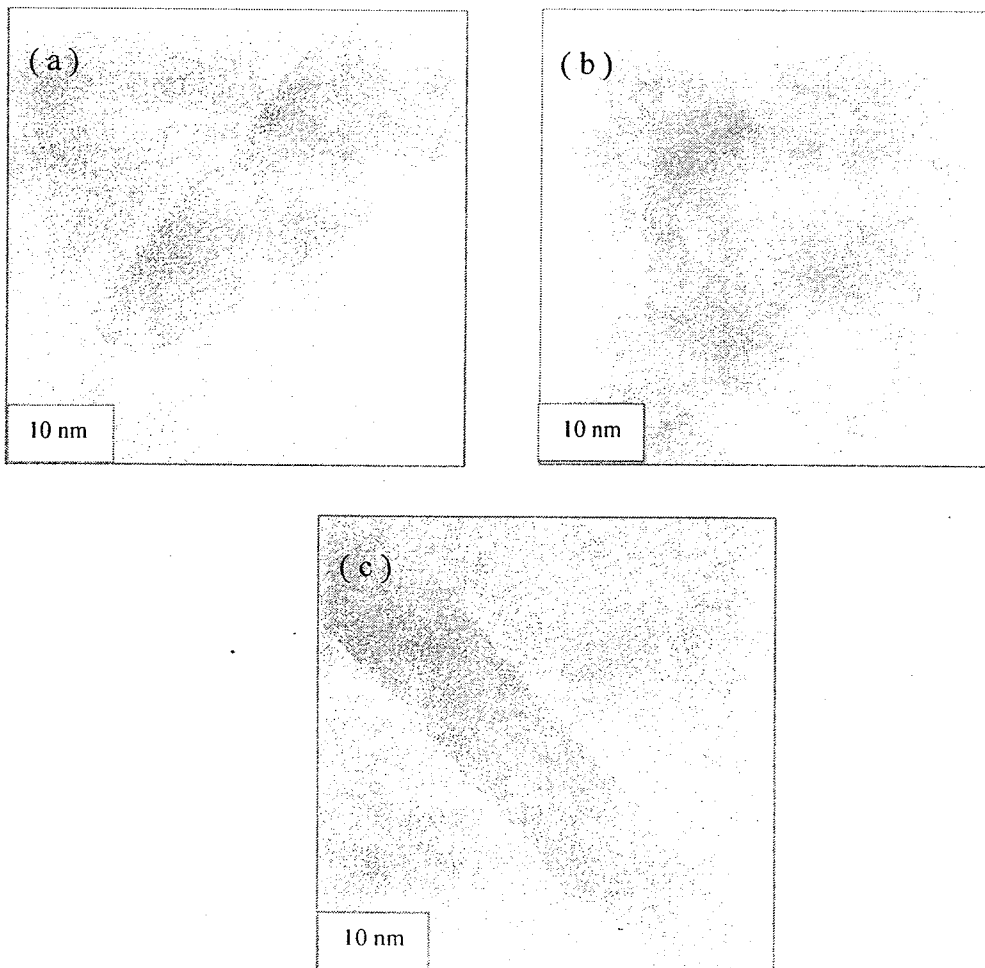


Figure 4 TEM images of CNTs grown on a) Fe coated Si. b) carbon and c) graphite.

Acknowledgement

The Thailand Research Fund financially supported in this work.

References

- [1] N. Hamada, Mater. Sci. Eng., B 19 (1993) 181.
- [2] R. F. Service, Science 271 (1996) 1232
- [3] A. Badzian, T. Badzian, E. Breval, A. Piotrowski, Thin Solid Films 398 (2001) 170..
- [4] I. Sayago, E. Lafuente, M.C. Horrillo, W.K. Maser, A.m. Benito, R. Navaro, E.P. Urriolabeitia, M.T. Martinez, J. Gutierrez, Synthetic Metal 148 (2005) 15.
- [5] J. Suehiro, G. Hiroshi, W Ding, M. Hara, Sens. Actuators B (2004).
- [6] C. Journet, W.K. Maser, P. Bernier, A. Loiseau, M.R. de la-Chapelle, S. Lefrant. Nature 388 (1997) 756.
- [7] Z.F. Ren, Z..P. Huang, J.H. Wang, M.P. Siegal, P.N. Provencio, Science 282 (1998) 1105.
- [8] A. Thess, Science 273 (1996) 483)
- [9] C.J. Lee, D.W. Kim, Y.H. Lee, J.M. Kim, Chem. Phys. Lett. 299 (1999) 97.

Contact Resistance Properties of Metal-Nanotube Interfaces

Yuki Matsuda, Wei-Qiao Deng & William A. Goddard III

Materials and Process Simulation Center (MC74-139)
California Institute of Technology, California 91125, USA

Carbon nanotubes are promising candidates for nanoelectronic devices due to their unique structural and electrical properties. Indeed, much experimental progress toward electronic devices based on carbon nanotubes has been reported. In particular, near ballistic transport properties have been reported for both single-walled carbon nanotubes (SWNTs) and multi-walled carbon nanotubes (MWNTs).

A potential problem with these devices is the high contact resistance, which significantly decreases the conductance. We consider here the structure, I-V characteristics, and contact resistance from five metals (Ti, Pd, Pt, Cu and Au) deposited on graphitic surface and nanotubes based on first-principles quantum mechanical (QM) density functional and matrix Green's function methods. We find that Ti leads to the lowest contact resistance followed by Pd, Pt, Cu, and Au. The sequence, $Ti \gg Pd > Pt > Cu > Au$, correlates well with the predicted cohesive strength of the electrode-carbon interface. In addition Ti leads to linear I-V characteristics, suggesting an Ohmic contact. (Figures 1 and 2)

These results provide guide lines for choosing materials for novel device architectures, and demonstrate how theory and computation can be used for high throughput lead development for complex nanosystems, allowing synthesis and experimental characterization to focus on the best leads.

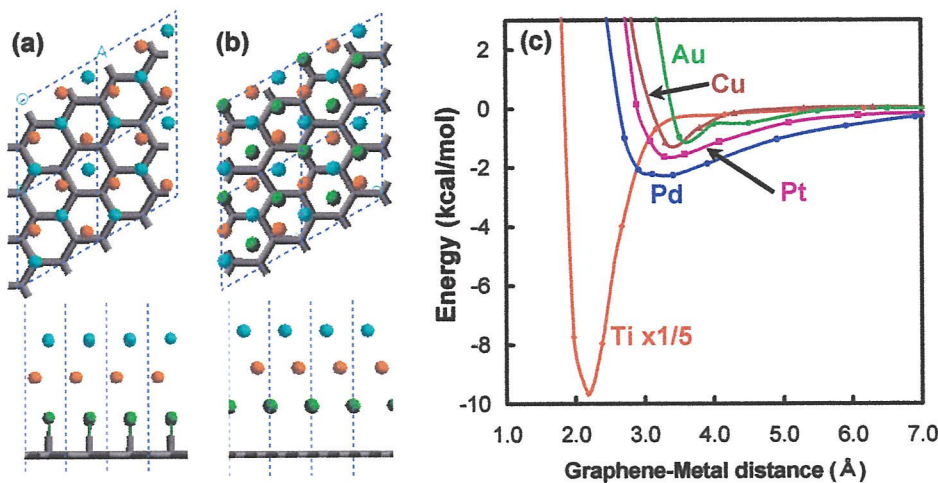


Figure 1 Optimized geometries of the top views (top) and side views (bottom) of (a) Ti deposited on graphene 4 x 4 sheet, and (b) Pd deposited on graphene 4 x 4 sheet. (Unit cell: 2 x 2 graphene sheet). (c) Interaction energetic of metal-graphene model. Ti was scaled by 1/5.

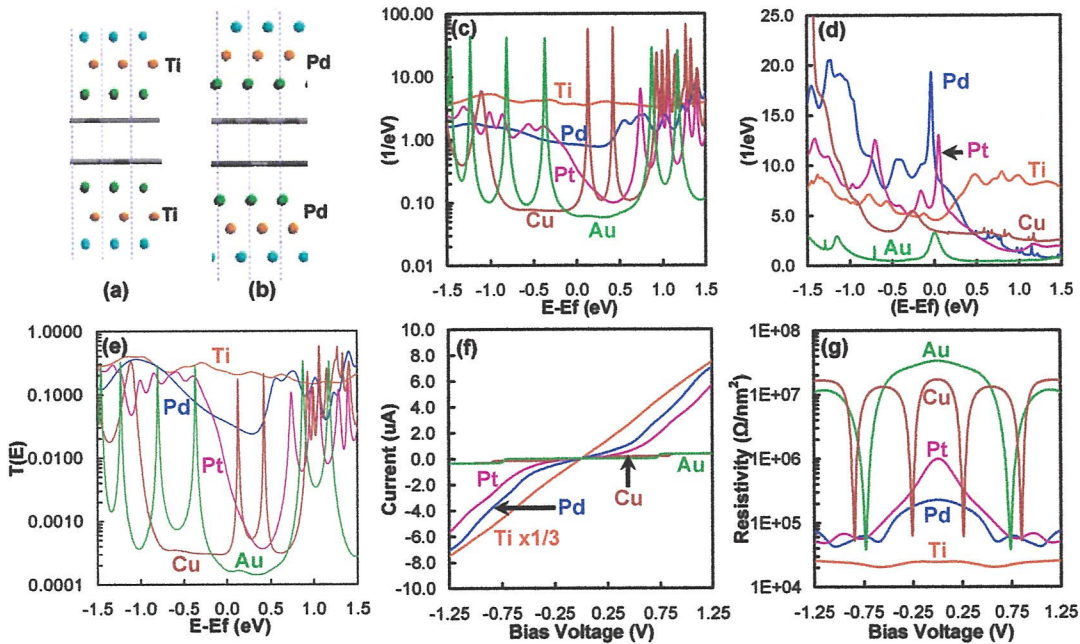


Figure 2 I-V characteristics of the metal-graphene (2 sheets) models. (a) Side views of I-V calculation model, Ti-graphene-Ti (left) and Pd-graphene-Pd (right). Models were constructed from Fig. 1(a). (b) Projected density of states (PDOS) near the Fermi energy (E_f) of $p\pi$ orbital of carbon in graphite. (c) PDOS of d-orbital of metal electrodes. (d) Transmission coefficient ($T(E)$). (e) I-V curve. Ti-graphite-Ti model was scaled by 1/3. (f) Contact resistivity per nm^2 at metal-graphite interface.

On the Ohmic Contact between Multiwalled Carbon Nanotubes and Nano-electrodes

Y. F. Hsiou,^{1,*} Y. J. Yang,¹ L. Stobinski,² Watson Kuo,³ and C. D. Chen^{3,†}

¹*Graduate Institute of Electronics Engineering and Department of Electrical Engineering, National Taiwan University, Taipei, R.O.C.*

²*Institute of Physical Chemistry, Polish Academy of Sciences, 01-224 Warsaw, Kasprzaka 44/52, Poland*

³*Institute of Physics, Academia Sinica, Taipei, Nankang 11529, Taiwan, R.O.C.*

The electrical contact property between multiwalled carbon nanotubes and nanoscaled Cr electrodes is experimentally studied. The nanotubes were grown by thermal chemical vapor deposition and the nanoscaled Cr electrodes were fabricated by standard e-beam lithography techniques. The contacts were found to be ohmic with resistance values in the order of $10^3 \Omega$ at room temperature. Remarkably, the contacts showed weak temperature dependence down to 40 mK and were insensitive to the magnetic field up to 5 Telsa. Moreover, in a perpendicularly applied magnetic field the multiwalled carbon nanotubes showed negative magnetoresistance; this can be attributed to the weak-localization of electrons on the tube surface.

PACS numbers: 73.63.Fg, 73.23.Hk, 73.22.Dj

The transport phenomena in carbon nanotubes (CNTs) have attracted much attention in recent years due to their unique electronic band structures [1], and their potential applications as nanoscaled electronic devices [2–5]. In this field, one of the major concerns is the electrical contact between the CNTs and the electrodes. Presently, there are two approaches for making electrical contact. In the first approach, CNTs are dispersed onto chips with prefabricated electrodes [6, 7]. In the second approach, CNTs are first randomly dispersed over the substrates and the electrodes are then placed on the top of the selected CNTs [2–5]. In both approaches, the contact between the electrodes and the nanotubes usually presents a serious problem. The measured resistance reported in the literatures ranges from 10^3 to $10^6 \Omega$ at room temperature [6, 8, 9], and has somewhat dependence on the electrode materials [10–12]. Attempts made on the contact issues have raised some possible schemes (with unclear origins), including annealing [13, 14], electron irradiation [6], and use of early 3-d elements as electrodematerials [12]. Furthermore, a combination of top and bottom contacts to CNTs has shown to give good contact [15]; the fabrication is, however, complex for practical applications. In this work, we propose and demonstrate a scheme that provides good electrical contacts. This method utilized thermal chemical vapor deposition for synthesis of multiwalled carbon nanotubes (MWNTs) and electron-beam lithography for preparation of nanoscaled electrodes. When using Cr as contact electrode material, we found that the contact resistance was in the order of $10^3 \Omega$. The low contact resistance possessed weak temperature and magnetic field dependences, which is desirable for many applications.

Carbon Nanotube Chemical and Mechanical Sensors

Shu Peng, James O'Keeffe, Chengyu Wei, K. Cho*
Department of Mechanical Engineering, Stanford University

Jing Kong, Robert Chen, Nathan Franklin, H. Dai*
Department of Chemistry, Stanford University

*contacting authors: kjcho@stanford.edu, hdai1@stanford.edu

I. Introduction

A single-walled carbon nanotube (SW-CNT) is a nano scale tube formed by a cylindrical shell of single atomic layer of carbon atoms. Nanotubes have diameter of a few nm and length up to 100 μ m so that they form extremely thin wires. The atomic structure of SW-CNT can be formed by wrapping a stripe of single atomic layer of graphite sheet along a certain direction, and this direction determines the diameter and chirality of the nanotubes. Experimental and theoretical studies have found that these nano-meter sized CNTs have novel electronic properties, which can be metallic or semiconducting, depending on their radius or chiralities [1-6]. Nanotubes can be used as electronic wire between two metal electrodes as shown in Fig. 1, and the conductance between the electrodes can be measured as a function of the gate bias voltage. Since the nanotube electronic property is a strong function of its atomic structure, mechanical deformations [7-8] or chemical doping can induce strong changes in conductance. Such changes can be easily detected by electron current signals, and these properties make CNTs extremely small sensors sensitive to their chemical and mechanical environments. In this paper, we present our theoretical and experimental studies on the subject of using SW-CNT as chemical and mechanical sensors.

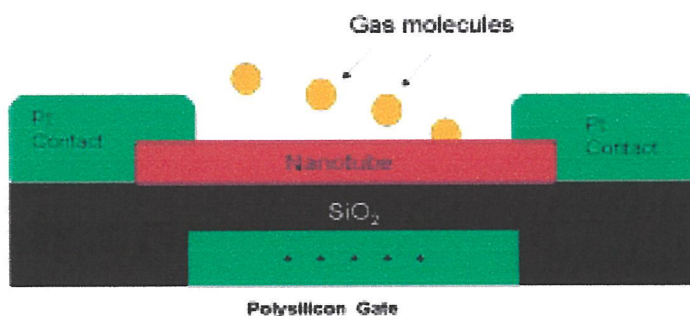


Fig.1 Schematic of a nanotube-based chemical sensor. The conducting properties of the nanotube change when chemicals in the surrounding environment bond to the tube. The absorbed molecules can act as dopants, shifting the Fermi energy of the nanotube. Similarly, the bonds formed between absorbed chemicals and the nanotube change the band-structure of the tube.

II. Nanotubes as Chemical Sensors: Chemical Adsorption of Gas Molecules

A. Experiments

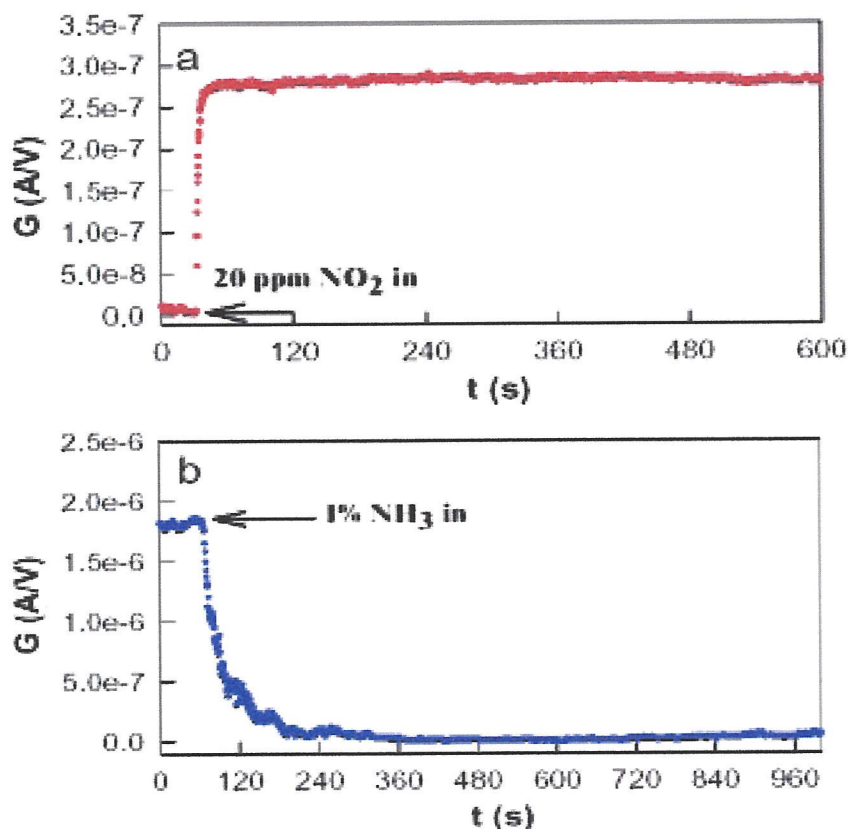


Fig. 2 Change of nanotube conductance when exposed to (a) NO_2 and (b) NH_3 gases.

Using the experimental structure shown in Fig. 1, Kong et al. found that nanotubes can be used for miniature chemical sensors to detect small concentrations of gas molecules with high sensitivity at room temperature [9]. Chemical sensors based on individual or ensembles of single-wall nanotubes can detect chemicals such as nitrous oxide (NO_2) and ammonia (NH_3) [9]. For a semiconducting single-wall nanotube exposed to 200 ppm of NO_2 , it was found that the electrical conductance can increase by up to three orders of magnitude in a few seconds (Fig. 2a). On the other hand, exposure to 2% NH_3 caused the conductance to decrease by up to two orders of magnitude (Fig. 2b). As a general comparison, conventional solid-state sensors for NO_2 and NH_3 typically operate at temperatures over 400°C , and conducting polymers provide only limited sensitivity. Sensors made from single-wall nanotubes have high sensitivity and a fast response time at room temperature, which are important advantages for sensing applications.

B. Theory

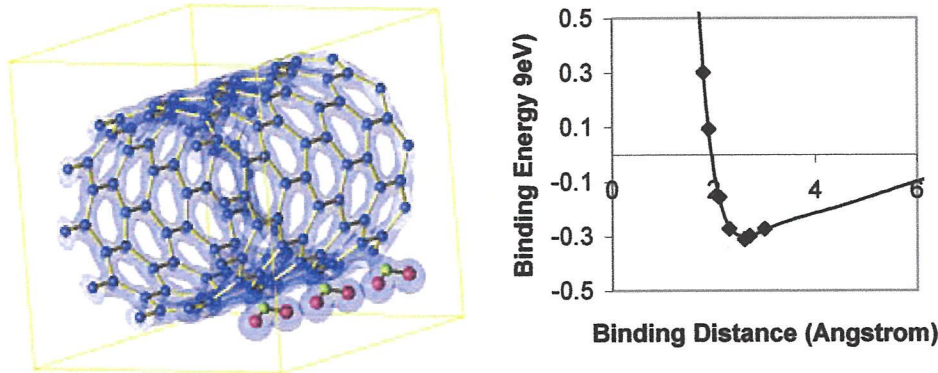


Fig 3 Left: Total valence electron charge density plot. The value of charge contour is $0.0015 \text{ (e/\text{\AA}^3)}$ showing the binding charge between the SWNT (10,0) and the NO₂ molecule. Three units are shown in this figure. Right: Binding energy curve for NO₂ interacting with (10,0) SWNT as a function of distance from NO₂ to the nanotube. The solid line curve is a fitting with universal binding curve.

The first-principles calculations are carried out on several representative molecules (NO₂, CO, NH₃, O₂, and H₂O) and SWNT using density functional theory. Figure 3 shows one binding configuration for NO₂ gas molecule on the (10,0) SWNT with three units. NO₂ gas molecule of this configuration is found to bind with SWNT with adsorption energy of 0.3 eV, and it is also found that the molecule has high diffusion kinetics on nanotube surfaces. Electron density analysis shows that charge transfer is induced from C atom to the NO₂ gas molecule leading to hole (or p-type) doping of semiconducting (10,0) nanotube. This increases hole carriers in the SWNT is responsible for the increase of conductance shown in Fig. 2a.

The simulation results for CO and SWNT system show no binding indicating that a bare nanotube may not work as a CO sensor, and this is in agreement with the experiment results [9]. For NH₃ and SWNT system, the molecule has stable binding energy when hydrogen atoms are pointing to the nanotube. The charge transfer is calculated to happen from NH₃ to nanotube leading to n-type doping (or hole compensation) of the nanotube corresponding to decreasing conductance shown in Fig. 2b. For O₂ case, O₂ can form a weak stable adsorption configuration with the (10,0) nanotube. Electron transfer direction is from the nanotube to the O₂ molecule that is consistent with experimental observation [10]. For H₂O case, one simulated molecular configuration shows repulsive interaction, and no charge transfer is observed when the water molecule is placed close to the nanotube surface. This result is consistent with experimental observation that the nanotube conductance is not significantly changed even when the nanotube is fully immersed in water. This finding demonstrates an important possibility of using nanotubes as biochemical sensors operating in water at physiological temperature.

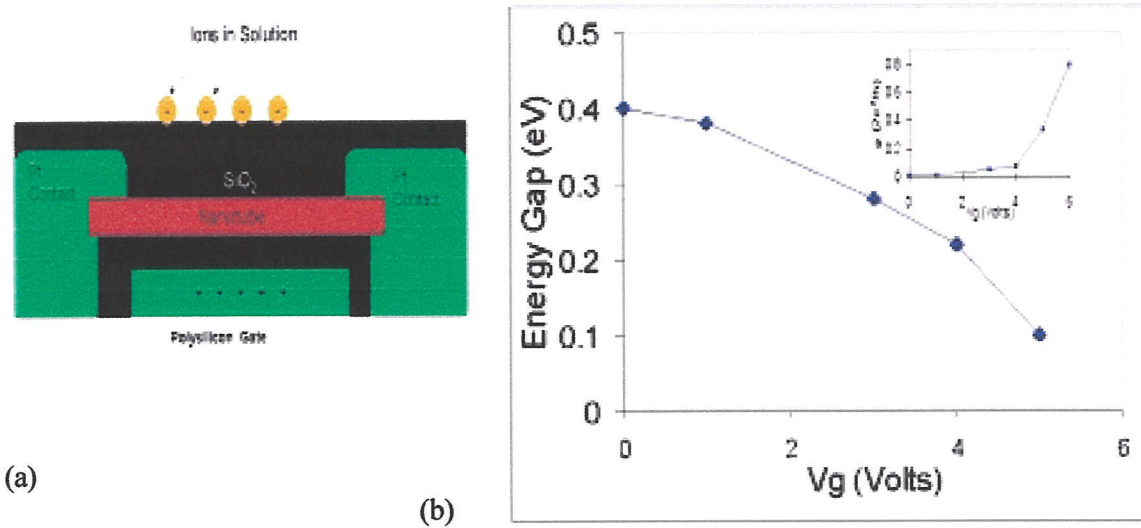


Fig.4 Schematic of an electrolyte insulator semiconductor (EIS) sensor, incorporating a nanotube sensing mechanism. A gate voltage V_g is applied to the semiconducting substrate and causes ions in the electrolyte to gather at the oxide surface. The conductance of the nanotube is modulated by the resulting electric field set up across the oxide. The strength of the electric field is used to identify the density and size of ions in the electrolyte.

We have discovered a novel electronic property of nanotubes which can be used to develop another sensing mechanism of ionic species without inducing charge transfer or doping effects. Fig. 4b shows the electric field induced band gap change of a semiconducting nanotube. Even though the gate voltage (V_g) does not induce doping, the reduced band gap leads to significant increase in conductance as shown in Fig. 4b inset.

An Electrolyte-insulator-semiconductor (EIS) structure can be used to measure ion concentrations and types. In a typical EIS sensor a voltage applied to the semiconductor back gate (V_g) attracts ions in the electrolyte to the oxide surface. The arrangement of ions in response to a specific V_g is determined by the size and charge of the ions. Measuring to gate capacitance (C_g) versus V_g can allow the ion species and concentration to be determined.

In Fig.4a, a carbon nanotube is used to modify the EIS sensor. In this design a semiconducting carbon nanotube is placed in the center of the dielectric. When ions are present in sufficient concentrations, a large electric field occurs across the insulator. This field narrows the energy-gap of the semiconducting nanotube, leading to an increased source-drain conductance. If there are insufficient ions in the electrolyte the resulting electric field intensity is weak and the nanotube energy gap change is reduced. Fig.4b illustrates the energy-gap change with V_g for the case of a large ion concentration.

III. CNT as Mechanical Sensor

A. Experiments: Electromechanical Properties of SWNTs

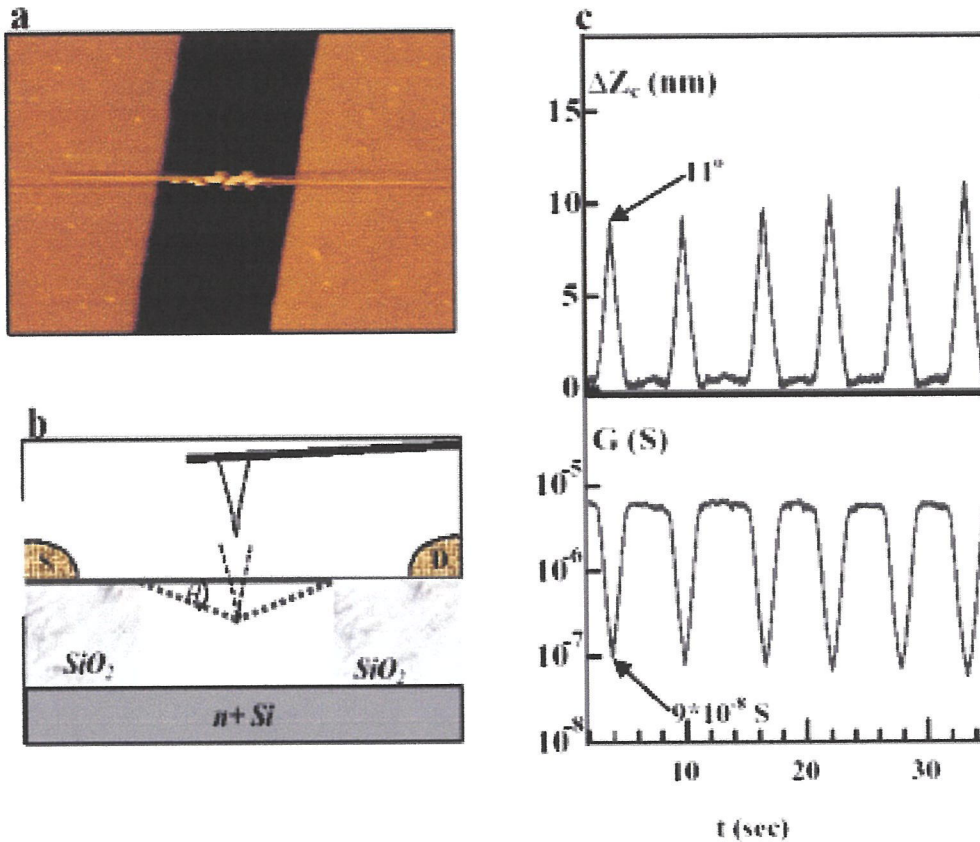


Fig. 5 Reversible conductance change induced by mechanical deformation of metallic nanotube using AFM tip. (a) AFM image of the nanotube on the trench. (b) Schematic illustration of the suspended nanotube and AFM tip inducing the deformation. (c) Vertical displacement (ΔZ_c) and conductance (G) of nanotube during six reversible deformations with 6 sec interval.

Experimental investigation of the electromechanical properties of nanotubes can be carried out with suspended nanotubes as shown in Fig. 5. [11]. A nanotube can be grown from patterned catalyst sites across pre-fabricated trenches on SiO₂/Si substrates [11]. This leads to an individual SWNT that is partially suspended over the trenches (Fig. 5a). The suspended part of the nanotube can be manipulated with an AFM tip, while the resistance of the sample is being monitored (Fig. 5b). The nanotube conductance decreases each time the AFM tip pushes the nanotube down, but recovers as the tip retracts (Fig. 5c). The full reversibility of the nanotube electrical conductance upon tip retraction suggests that the metal-tube contacts are not affected each time when the tip deflects the suspended part of the nanotube. The observed change in sample conductance is entirely due to the mechanical deformation of the SWNT caused by the pushing tip, and this measurement demonstrates a possibility of developing nanotubes as mechanical sensors.

B. Theory of Electromechanical Coupling of Nanotubes

When the AFM tip pushes down the nanotube as shown in Fig. 5, the nanotube experiences several mechanical deformations at the same time. The nanotube length increases leading to tensile strain of the suspended part of the nanotube. This tensile strain induces a force pulling the nanotube section on SiO₂ surface which is rather strongly bound to the surface. As the tension increases over a critical value, the nanotube section on SiO₂ surface will slip to reduce the tension in the suspended section. The nanotube section in contact with the AFM tip will experience the cross sectional flattening. As the tip is removed from the nanotube, the nanotube returns to the initial straight configuration to reduce the strain energy. We will analyze in detail the nanotube electronic structure changes to elucidate the mechanism of the experimentally observed reversible conductance changes in Fig. 5.

Electronic structure of flattened CNTs. - The effects of cross section flattening distortion of SWNTs on their electronic properties are investigated through first-principles calculations. The geometry of a flattened nanotube is described in Fig. 6a. A deformation parameter η is defined as $\eta = (D_0 - d)/D_0$, where D_0 is the original diameter of the nanotube, and d is the smallest diameter of the flattened cross section. For semiconducting (8,0) SWNT, the band gap first decreases leading to semiconductor-metal transition and then reopens leading to metal-semiconductor transition as a function of η . Similarly, metallic (or small band gap semiconducting) (9,0) SWNT undergoes band gap increase corresponding to metal-semiconductor transition as η increases. These results in Fig. 6b show that mechanical deformation can change electronic property of the nanotube from semiconductor to metal and vice versa.

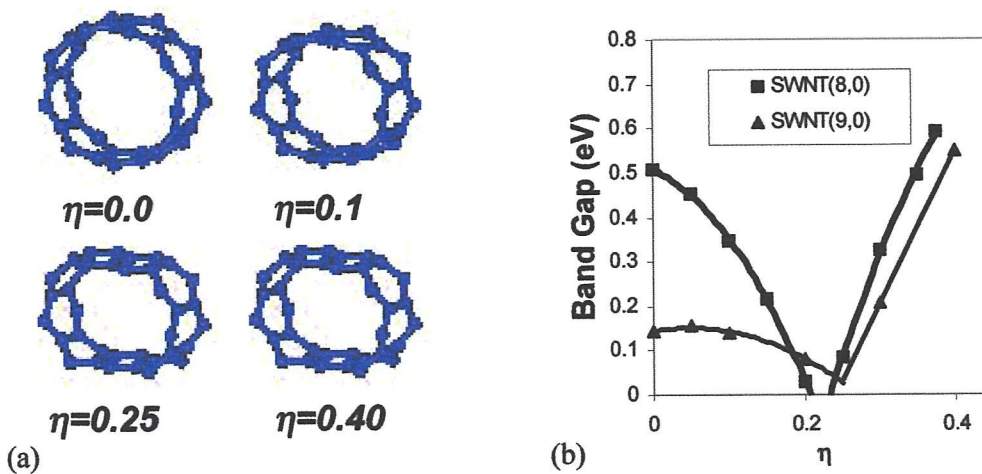


Fig.6 (a) The flattening of (9,0) carbon nanotube with four different degrees of deformation. (b) Energy band gap as a function of η for (8, 0) and (9, 0) SWNTs. The continuous lines are fitted through either quadratic or linear function.

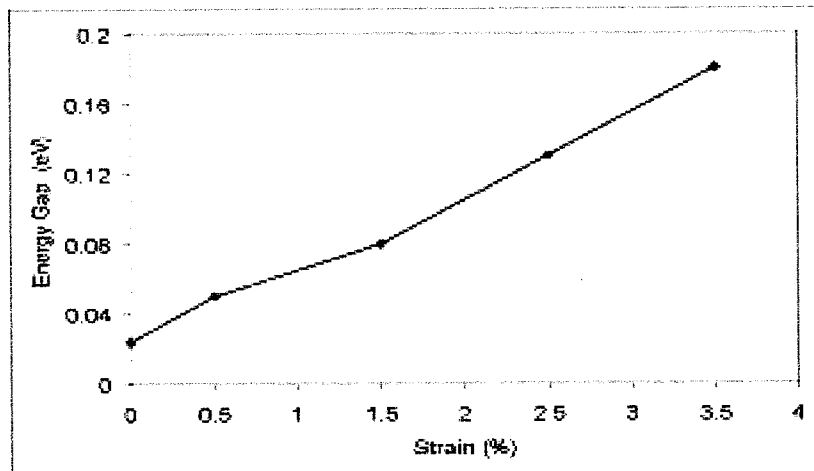


Fig.7 Band-gap versus tensile strain for a (9,0) zigzag nanotube. Under zero strain conditions a 24meV energy gap is predicted using pi-sigma band hybridization in a tight-binding simulation. For increased strain the energy-gap increases linearly. In this way the conductivity of the nanotube is very sensitive to mechanical forces that tend to stretch the tube.

Electronic structures of strained CNTs. - Experiments in Fig. 5 have shown that an atomic force microscope (AFM) tip can be used to gate a single walled nanotube (SWNT). When the AFM tip is pressed against the nanotube a large drop in tube conductance is observed (Fig. 5c), which turns the tube from a conducting channel to an insulator. Several mechanisms have been proposed to account for this gating effect, including localized deformation of the nanotube under the AFM tip as well as long range stretching of the nanotube. Curvature of the tube surface causes some small π - σ hybridization and can give rise to a small energy gap in metallic zigzag tubes. We use π -orbital axis vector (POAV) analysis to model the effect of such hybridization on carbon-carbon bonds. Using this analysis, single orbital tight-binding method [12] predicts a 24meV energy-gap for a (9,0) metallic nanotube. If a tensile strain is applied along the tube axis the π - σ hybridization is increased, and the energy-gap increases linearly with axial strain as shown in Fig.7. In this mechanical effect in nanotube conductivity can be used to measure the strain/deflection from a mechanical actuator shown in Fig. 5.

IV. Discussion and Future Applications

In summary, our experimental and theoretical studies show that CNTs can be used as chemical and mechanical sensors. We found the electronic properties of CNTs are sensitive to the adsorptions of certain type of gas molecules. External electric field is also shown to strongly modify the band structures of CNTs, which make CNTs a good sensor to surrounding ions. We also found that CNTs are sensitive to mechanical deformation such as flattening and tensile strain. The band gap of CNTs can be significantly modified in response to these deformations.

Conference Paper for the 3rd International Workshop on Structural Health Monitoring

A promising direction to develop CNT as biosensor is to use intermediate materials, such as polymers, between CNT and system to be sensed as illustrated in Fig. 8. Our molecular dynamics (MD) simulation shows that certain polymers (e.g., polyethylene) can be chemically bonded to CNT, and a pyrene molecule can also be adsorbed on CNTs through Van der Waals potentials. These suggest a possibility to use these connecting polymers as channels to passing information from variety of molecular systems to CNTs.

Another possible direction to improve sensing capability is to use AC electron currents as signals. Previous studies are generally based on DC currents. We expect that frequency-dependent responses of the CNTs to external chemical gases and mechanical deformations will provide enhanced ability to distinguish more varied types of signals from environments.

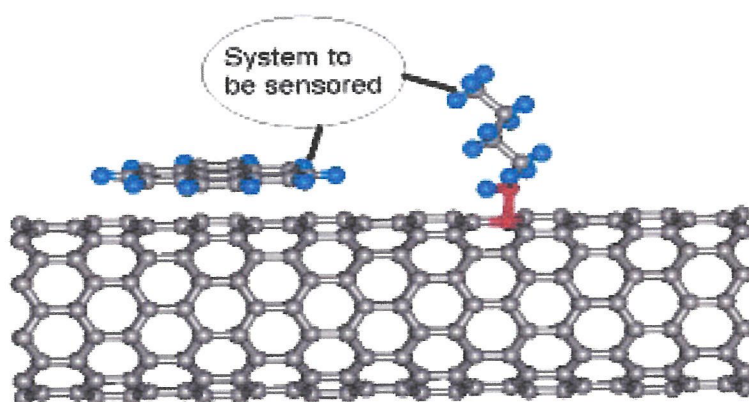


Fig. 8: Polymer-CNT composite system for a functionalized biosensor application. A polyethylene molecule is chemically bonded to a CNT and a pyrene molecular is adsorbed on the CNT through van der Waals interaction potential.

References

- [1] J.W. Mintmire, B.I. Dunlap, and C.T. White, *Phys. Rev. Lett.* **68**, 631 (1992).
- [2] N. Hamada, S. Sawada, and A. Oshiyama, *Phys. Rev. Lett.* **68**, 1579 (1992).
- [3] R. Saito, M.Fujita, G. Dresselhaus, and M.S. Dresselhaus, *Phys. Rev. B* **46**, 1804 (1992).
- [4] A.M. Rao et al., *Science* **275**, 187 (1997).
- [5] J.W.G. Wildoer et al., *Nature* **391**, 59(1998); T.W. Odom et al., *Nature* **391**, 62 (1998).
- [6] H. Kataura et al., *Synth. Met.* **103**, 2555 (1999).
- [7] W. Thomas et al., *Appl. Phys. Lett.* **76**, 2414 (2000).
- [8] L. Yang and J. Han, *Phys. Rev. Lett.* **85**, 154 (2000).
- [9] J. Kong, et al., *Science* **287**, 622 (2000).
- [10] G.C. Philip, et al, *Science* **287**, 1801 (2000).
- [11] T.W. Tomblor et al., *Nature* **405**, 769 (2000).
- [12] M. P. Anantram and T. R. Govindan, *Phys. Rev. B* **58**, 4882 (1998).

Thick Film of Carbon Nanotube Composite for Ethanol Sensor

Meechai Tapnurat, Supab Choopun, Atcharawon Gardchareon,
Pisith Singjai, Pongsri Mangkorntong and Nikorn Mangkorntong*

Department of Physics, Faculty of Science, Chiang Mai University, Chiang Mai 50200, Thailand

ABSTRACT

One interesting application of carbon nanotubes is their use as a gas sensor. In this work, a thick film carbon nanotube composite was prepared by mixing carbon nanotube powder with iso-butyl methyl ketone and painted onto alumina substrates. Then, the composite's gas-sensing properties for ethanol vapor were tested by measuring the resistance change of the composite at ethanol concentrations of 50, 100, 500, and 1,000 ppm at room temperature. An increase in resistance of 2–5 ohm has been observed with a responsiveness of about 0.01, a sensitivity of about 1 and a response time (τ_{90}) of about 10 sec. The sensing mechanism of the composite could be explained on the basis of volume expansion and polar interaction of various vapors on the carbon nanotube surface.

Key words: Carbon nanotube, Thick film, Composite, Gas sensor

INTRODUCTION

Carbon nanotubes (CNTs) have a wide variety of potential applications including field emission devices, electronic switches, biological sensors, flow sensors and gas storage (Govindaraj and Rao, 2002; Ghosh et al., 2003; Kruger et al., 2003; Philip et al., 2003; Stetter et al., 2003). One potential important application of CNTs is as a gas sensor. Gas sensing properties depend on the surface area and the huge surface area of the nanotubes, because of their hollow cores and outside walls, make them an exceptional candidate material for such applications. (Dai et al., 2002; Ong et al., 2002; Choopun et al., 2004; Lizznersk et al., 2004; Tan, 2004). Several methods such as arc-discharge, laser vaporization, chemical vapor deposition (CVD), pyrolysis and electrolysis (Singjai, 2005) can be used to fabricate CNTs. For gas sensor application, CNT composites have been typically used. The gas sensors based on CNT/polymer, ceramic and metal oxide composites such as epoxy, polyimide, PMMA, BaTiO₃ and SnO₂ (Dai et al., 2002; Ong et al., 2002; Philip et al., 2003) have been demonstrated. The gas sensing properties of CNT composites toward various gasses such as dichloromethane, chloroform, acetone, methanol, oxygen, carbon dioxide and ammonia have been reported. For example, Philip and co-workers reported CNT/PMMA composite thin films for gas-sensing application (Philip et al., 2003). They observed an increase of resistance in the order of 10^2 – 10^3 toward dichloromethane, chloroform and acetone due to surface modification and explained the gas sensing mechanism on the basis of volume expansion and polar interaction of various vapors on the CNTs surface.

In the present paper, we report on the gas-sensing properties of CNTs/iso-butyl methyl ketone composite thick film toward ethanol vapor.

MATERIALS AND METHODS

CNTs in bulk quantity were synthesized by alcohol catalytic chemical vapor deposition (AC-CVD) (Singjai, 2005). The thick films of CNT composite were prepared by mixing CNTs with 75 wt% iso-butyl methyl ketone ($(\text{CH}_3)_2\text{CH}\cdot\text{CH}_2\cdot\text{COCH}_3$) and painted onto alumina substrate. The general morphology of CNT composites was investigated by field emission scanning electron microscope (FE-SEM). After drying in air, CNT composites were painted with silver paint and connected with copper wires to form the interdigital electrodes. The gas sensor based on CNT composite was tested in cylindrical gas flow chamber. The characteristics of sensor were observed from the changing of resistance in air and in ethanol ambient with ethanol concentration of 50, 100, 500 and 1000 ppm and at work temperature of 38–150°C. The response and recovery as a function of time were monitored and recorded via interfaced personal computer.

RESULTS AND DISCUSSION

Figure 1 shows FE-SEM image of the thick film of CNT composites prepared by mixing CNTs with iso-butyl methyl ketone and painted onto an alumina substrate. The general morphology of the composite consists of CNTs with diameters of 50–200 nm.

Work temperatures:

The response and recovery curves of the CNT composite-based sensor at operating temperatures of 38, 50, 100 and 150°C under an ethanol vapor concentration of 1,000 ppm are shown in Figure 2. It is seen that the sensor resistance under the ethanol atmosphere is higher than the resistance in air and that the increase of resistance depends on the operating temperatures. The resistance of the sensor increases as the operating temperature decreases. The largest resistance increase was observed at a temperature of 38°C, suggesting an optimum operating temperature.

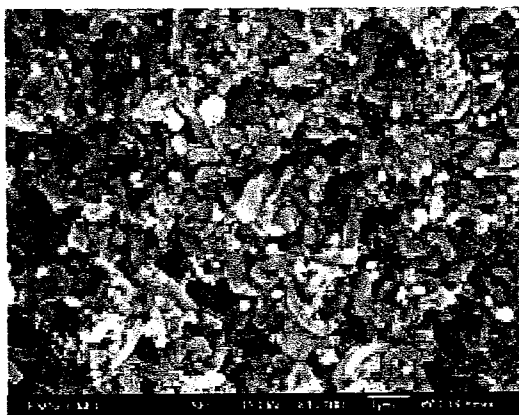


Figure 1. FE-SEM image of the thick film of CNT composites prepared by mixing CNTs with iso-butyl methyl ketone and painted onto alumina substrate.

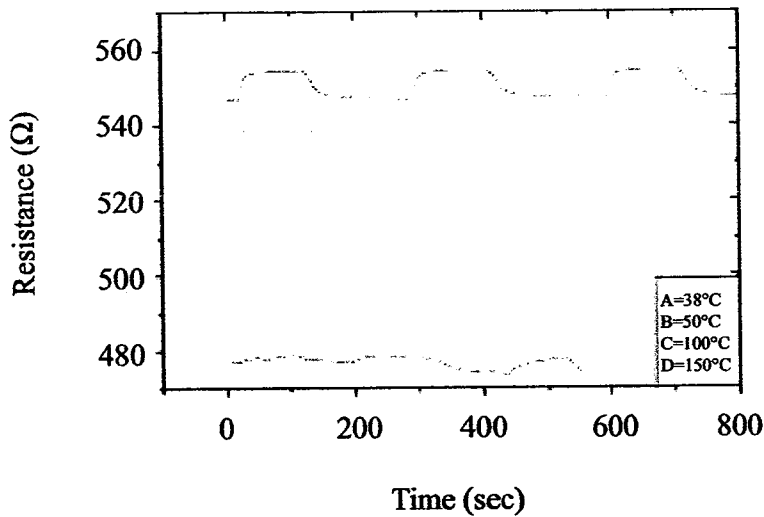


Figure 2. Response and recovery characteristics of CNT composite-based sensor at operating temperatures of 38, 50, 100 and 150°C under an ethanol vapor concentration of 1,000 ppm.

Alcohol vapor concentration:

The response and recovery curves of CNT composite-based sensor under ethanol vapor concentration of 50, 100, 500 and 1,000 ppm at an operating temperature of 38°C are shown in Figure 3. At different ethanol vapor concentrations, the sensor resistance varies slightly.

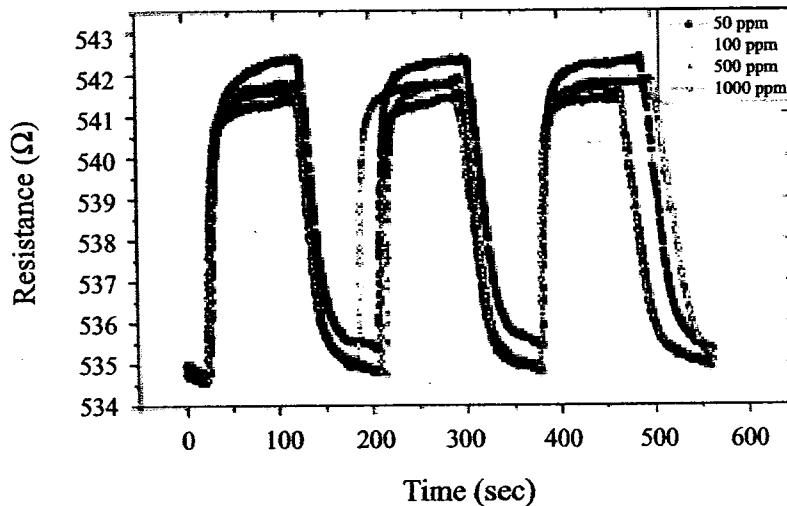


Figure 3. Response and recovery characteristics of CNT composite-based sensor under ethanol vapor concentration of 50, 100, 500 and 1,000 ppm at work temperature of 38°C.

Typical parameters used to determine the quality of a gas sensor are responsiveness, sensitivity and response time. The responsiveness S is defined $S = (R_a - R_o)/R_o$ where R_a is the electrical resistance of the sensor in air and R_o is its resistance in ethanol vapor. The sensitivity of the sensor is defined as R_a/R_o . The response time (τ_{90}) is defined as the time required for the sample resistance variation to reach 90% of equilibrium value following a step increase in the concentration of the testing gas. The resistance, responsiveness, sensitivity and response time of the CNT composite-based sensor obtained from the response and recovery curves are summarized in Table 1.

Table 1. Resistance, Responsiveness, Sensitivity and Response Time (τ_{90}) of CNT composite-based sensor at operating temperatures of 38, 50, 100 and 150°C and at operating temperature of 38°C under ethanol vapor concentration of 50, 100, 500 and 1,000 ppm.

Ethanol vapor concentrations (1,000 ppm)	Work Temperature	R_0 (Ω)	R_a (Ω)	Responsiveness ($(R_a - R_0)/R_0$)	Sensitivity (R_a/R_0)	Response time (τ_{90}) (sec)
		38°C	547.01	554.58	0.0138	1.0138
	50°C	536.35	539.61	0.0060	1.0060	28
	100°C	496.02	498.46	0.0049	1.0049	51
	150°C	476.74	478.73	0.0041	1.0042	46
Work Temperature (38°C)	Ethanol vapor concentrations	R_0 (Ω)	R_a (Ω)	Responsiveness ($(R_a - R_0)/R_0$)	Sensitivity (R_a/R_0)	Response time (τ_{90}) (sec)
	50 ppm	534.69	542.27	0.0142	1.014	17
	100 ppm	534.69	541.79	0.0133	1.013	17
	500 ppm	534.69	541.66	0.0130	1.013	13
	1,000 ppm	534.69	541.35	0.0125	1.012	10

At an ethanol vapor concentration of 1,000 ppm, the responsiveness and sensitivity of the sensor decreases while the response time increases with increasing temperature. This suggests that 38°C is the optimum operating temperature. Moreover, at 38°C the responsiveness, sensitivity and response time of the sensor decreases with increasing ethanol vapor concentration. The relation between ethanol concentration and the quality parameters is under intense research.

The gas sensor based on CNTs/PMMA composites for methanol and acetone vapor has been reported and the sensing mechanism has been explained on the basis of the volume expansion and polar interaction of these vapors on the carbon nanotube surface (Philip et al., 2003). Since our CNT composite-based sensor was tested with a similar organic vapor, we strongly believe that the sensing mechanism of our gas sensor could be explained by the similar explanation.

CONCLUSION

A thick film of carbon nanotube composite was prepared by mixing carbon nanotube powder with iso-butyl methyl ketone and painted onto alumina substrates. Then, the composite's gas-sensing properties were tested for ethanol vapor. It was found that the optimum operating temperature was 38°C. At 38°C, an increase in resistance of 2–5 ohm was observed with the responsiveness of about 0.01, sensitivity of about 1 and response time of about 10 sec. The sensing mechanism of the composite could be explained on the basis of volume expansion and polar interaction of vapors on the carbon nanotube surface.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to acknowledge the financial support from the Commission of Higher Education.

REFERENCES

- Choopun, S., P. Mangkorntong, P. Subjareon, N. Mangkorntong, H. Tbat, and T. Kawai. 2004. Orthorhombic molybdenum trioxide whiskers by vapor transport method. *Jpn. J. Appl. Phys.* 43: L91–L93.
- Dai, L., P. Soundarrajan, and T. Kim. 2002. Sensor and sensor arrays based on conjugated polymers and carbon nanotubes. *Pure Appl. Chem.* 74: 1753 - 1772.
- Ghosh, S., K. A. Sood, and N. Kumar. 2003. Carbon nanotube flow sensor. *Science* 299: 1042–1044.
- Govindaraj, A., and C. N. R. Rao. 2002. Organometallic precursor route to carbon nanotubes. *Pure Appl. Chem.* 74: 1571–1580.
- Kruger, M., I. Widmer, T. Nussbaumer, M. Buitelaar, and C. Schomenberger. 2003. Sensitivity of single multi-walled carbon nanotube to the environment. *J. Phys.* 5: 138.1–138.11.
- Lizznersk, B. 2004. Thick - film gas sensor microsensor based on tin dioxide. *Bulletin of the Polish Academy of Science. Tech. Sci.* 52: 34–42.
- McEuen, P. L., M. S. Fuhrer, and H. Park. 2002. Single - walled carbon nanotube electronics. *IEEE Transactions on Nanotech.* 1: 78–85.
- Ong , K. G., K. Zeng, and A. Graig. 2002. A wireless passive carbon nanotube - based gas sensor. *IEEE Sensor J.* 2: 82–88.
- Philip, B., J. K. Abraham, A. Chandrasekhar, and V. K. Varadan. 2003. Carbon nanotube/PMMA composite thin films for gas-sensing applications. *Smart Mater. Struct.* 12: 935–939.
- Singjai, P. 2005. Production of low-cost carbon nanotubes for industrial uses. NSTDA Annual Conference S&T in Thailand. Towards the Molecular Economy. Thailand Science Park Convention Center, Thailand.
- Stetter, J. R., W. R. Penrose, and Y. Sheng. 2003. Sensors, chemical sensors, electrochemical sensors and ECS. *J. The Electrochemical Society* 150: S11–S16.
- Tan, O. K., W. Cao, Y. Hu, and W. Zhu. 2004. Nano-structured oxide semiconductor materials for gas-sensing application. *Ceramint.* 30: 1127–1133.

Hydrogen sensors based on carbon nanotubes thin films

I. Sayago^a, E. Terrado^{b,1}, E. Lafuente^{b,1}, M.C. Horrillo^a, W.K. Maser^{b,1},
A.M. Benito^{b,1}, R. Navarro^c, E.P. Urriolabeitia^c, M.T. Martinez^{b,1}, J. Gutierrez^{a,*}

^a *Laboratorio de Sensores, Instituto de Física Aplicada, CSIC, Calle Serrano 144, Madrid 28006, Spain*

^b *Instituto de Carboquímica, CSIC, Miguel Luesma Castan 4, 50018 Zaragoza, Spain*

^c *Departamento de Química Inorgánica, Universidad de Zaragoza, ICMA, CSIC, 5009 Zaragoza, Spain*

Abstract

Single-walled carbon nanotubes (SWNTs) produced by arc-discharge have been researched as resistive gas sensors for H₂ detection. Raw as well as modified single-walled carbon nanotubes were utilised as sensor material. Two types of modification treatments were carried out on the as grown SWNT material; chemical functionalization with palladium and doping with palladium by sputtering.

CNTs were deposited on alumina substrates by airbrush. Two different alumina substrates (with and without heater element) were used to obtain the sensor devices.

Conductance measurements were carried out in a N₂ constant flow for H₂ detection. The results demonstrate that the CNTs are p-type semiconductor materials, increasing their resistance with reducing gases. SWNTs functionalized with Pd show the best response when exposed to H₂ at room temperature.

© 2004 Published by Elsevier B.V.

Keywords: Carbon nanotubes; Gas sensor; Functionalization; Hydrogen

1. Introduction

Carbon nanotubes are amazing nanostructures with remarkable electronic and mechanical properties. Since their discovery in 1991 [1], they have attracted the scientific interest due to their unique structure and properties. They have found a great number of potential applications and in very different areas because of their special geometry and features.

Potential applications of CNTs include microelectronic devices [2], cold cathode flat panel displays (FDP) [3], hydrogen storage [4], quantum wires [5], tips for scanning probe microscopes [6] and high power electrochemical capacitors [7].

There are two types of carbon nanotubes' morphology. On the one hand, single-walled nanotubes (SWNTs) that consist of a honeycomb network of carbon atoms and can be visualized as a cylinder rolled from a graphitic sheet. On the other

hand, multi-walled nanotubes (MWNTs) that are a coaxial assembly of graphitic cylinders generally separated by the plane space of graphite [8].

CNTs seem to be ideal for adsorption and detection of gas due to their hollow centre, nanometre size and large surface area [9]. The study of the gas adsorption on CNTs is nowadays the centre of intense experimental and theoretical studies [10–12]. Considering that the gas adsorption on carbon nanotubes modifies sensibly their electronic properties, Kong et al. [13] proposed the use of CNT as gas sensors.

Hydrogen has been employed in different fields such as hydrogenation processes, petroleum transformation, welding, cryogenic cooling, chemical production of substances, rocket engines, etc.

Considering that fossil fuels (petroleum and natural gas), traditionally used as main energy sources, are pollutant and exhaustible (extinguish) agents, the hydrogen utilization as a clean energy source in fuel cells has been recently researched.

Fuel cells are currently used in vehicle and power generators. They are electrochemical devices that can directly

* Corresponding author. Tel.: +34 91 56188062; fax: +34 91 5631794.

E-mail address: javiergutierrez@ifa.cetef.csic.es (J. Gutierrez).

¹ Tel.: 34 976 733977; fax: 34 976 733318.

convert chemical energy to electrical energy obtaining water as the only waste (residual) product.

Hydrogen is a colourless and odourless gas, that results inflammable for concentrations higher than 4%. Accordingly its transport and storage raises many safety questions.

Hydrogen detecting and monitoring sensors will be useful for several industries; however inexpensive, small and chemically inert sensors have not been developed and commercialized yet.

In this work a fast, economic and versatile preparation technique (airbrush) has been used to obtain SWNTs as sensor films on alumina substrates. Sensor devices have been designed and developed for the hydrogen detection. Considering that palladium is a well known catalyst for hydrogen dissociation, it has been incorporated to the CNTs to improve their hydrogen sensitivity. Changes in electrical resistance value due to H₂ presence have been evaluated.

2. Experimental method

2.1. Carbon nanotubes preparation

Three different types of sensor materials have been prepared: (1) SWNTs; (2) SWNTs functionalized with palladium; (3) SWNTs doped with palladium.

The SWNTs were produced by arc-discharge using graphite rods as electrodes. The atomic ratios of the metals used as catalyst were 2/0.5 at.% (Ni/Y) and the SWNTs were obtained according to the procedure reported elsewhere [14]. The arc-discharge enclosure was filled with helium at 660 mbar pressure. A direct current of 100 A driven by approximately 20 V creates the high discharge temperature that vaporizes the catalyst-graphite anode. The as-grown sample contains 12.77 wt.% of Ni and 1.86 wt.% of Yttrium. The SWNTs diameter distribution obtained by Raman spectrum and porous structure obtained by N₂ isotherms have been already reported [15]. The SWNT material have been used without previous purification since the acid treatment necessary for metals removal leads to a drastic reduction of surface area and pore volume that it is only partially recovered with the final annealing purification step [16]. The decrease of micropore volume and surface area of SWNTs could inhibit the gas sensing.

In order to improve the affinity of the samples to hydrogen, we have also prepared samples functionalized with Pd. The chemical sidewall functionalization was carried out using SWNTs and a palladium complex salt as reactive and using toluene as dissolvent according to the reaction already reported elsewhere [17]. Two different materials were obtained depending on the weight ratio Pd:CNTs in the original reactants. These functionalized samples are: 1:1 Pd-SWNTs and 1:4 Pd-SWNTs. Transmission electron microscopy (TEM) image (Fig. 1a) reveals that the chemical functionalization implies palladium nanoparticles with diam-

eter between 3 and 5 nm distributed on the sidewall of the SWNTs.

The preparation of the Pd doped SWNT material is described in "Section 2.2".

2.2. Sensor fabrication

CNTs were dissolved in ethanol (8 mg/ml) and directly sprayed on alumina substrates by means of an airbrush using dry air as carrier gas at 2 bar. Next they are dried in air. Fig. 1b shows a scanning electron microscopy (SEM) image of the SWNTs as-grown film prepared by this simple method.

Two different substrates have been used to obtain the sensor devices:

1. Alumina substrates (Heraeus MSP 769) with the following components: gold electrical contacts, heater element

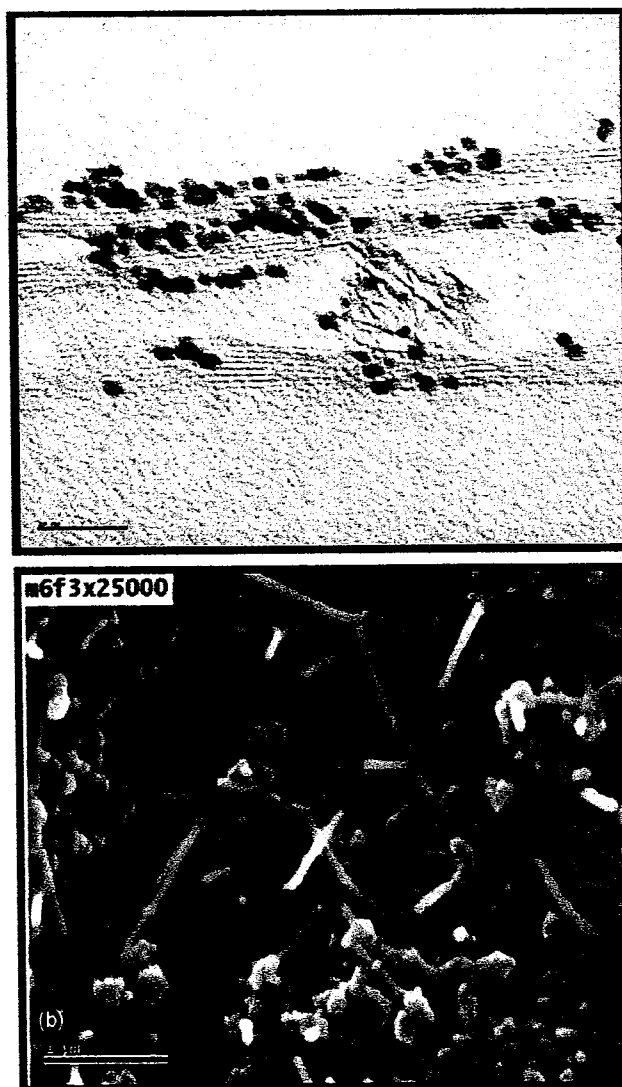


Fig. 1. (a) Transmission electron microscopy image of the SWNTs functionalized with Pd nanoparticles (scale bar 20 nm) and (b) scanning electron microscopy image of the SWNTs as-grown film prepared by the airbrush method.

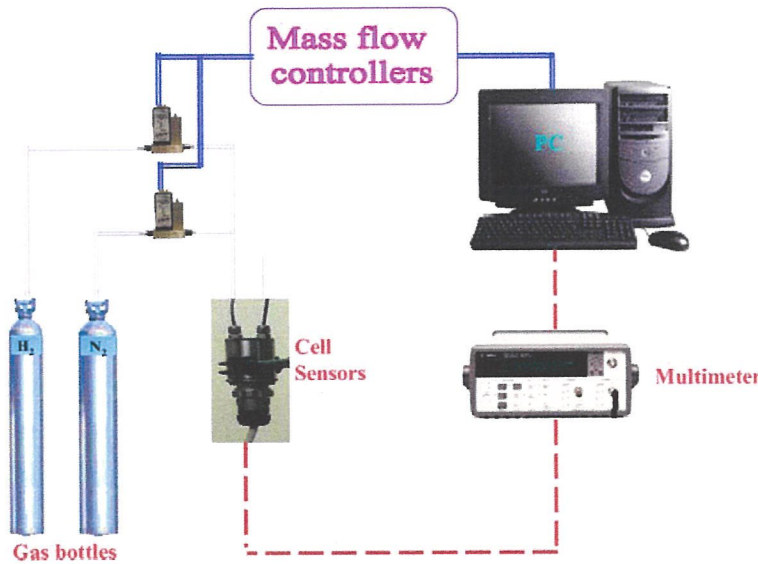


Fig. 2. Experimental setup: gas bottle, sensor cell, multimeter and mass flowmeter controller.

(Pt 250) and temperature sensor (Pt 1000). SWNTs have been deposited on this substrate type.

2. Alumina substrates (Laser Tech Services A/S). In this case, the deposited sensor materials are:
 - SWNTs functionalized with palladium;
 - SWNTs doped with palladium.

Doped palladium was deposited by RF magnetron sputtering on SWNTs films.

Finally platinum deposited also by RF magnetron sputtering on the CNTs were used as electrical contacts.

Four different sensors have been used in the hydrogen detection. Characteristics of each sensor are listed in Table 1.

2.3. Measurement set-up

Sensors were placed in a stainless steel test cell for their characterization by dc electrical measurements. The carrier used gas was nitrogen 99.998% purity at constant flow. Detection concentrations of hydrogen were varied from 0.5 to 4%. The mixtures were prepared by means of a mass flows controller into an automated gas line.

A 200 ml/min nitrogen constant flow was used to achieve a line base. Then the automatic system allows to change the gas flows obtaining the different concentrations. The expo-

sure and recovery time were 30 and 60 min, respectively. The resistance of the sensors is recorded every 60 s. during all the experiment. Comparative detection measurements of the different sensors used were carried out at room temperature.

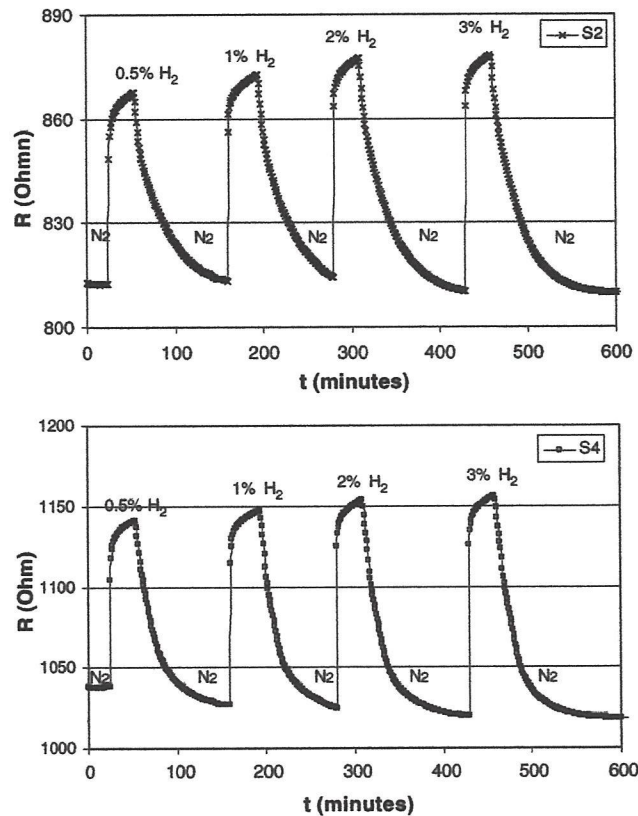


Fig. 3. Response curve of sensors S2 and S4 (SWTs functionalized with Pd) at room temperature.

Table 1
Tested sensors characteristics

Sensor	Sensor films	Alumina substrate
S1	SWNTs (Ni/Y = 2:0.25) Pd doped by sputtering	Laser Tech Services A/S
S2	SWNTs functionalized with Pd (1:1)	Laser Tech Services A/S
S3	SWNTs	Heraeus MSP 769
S4	SWNTs functionalized with Pd (1:4)	Laser Tech Services A/S

To establish the influence of the temperature on the response of the S3 sensor, the detections also were carried in the temperature range from 100 to 250 °C. Sensor resistances are measured with a digital multimeter (DMM) connected to the personal computer through standard IEEE interface. The measurement system (multimeter and flow controller) was fully automated and controlled with a program developed in Testpoint™. The main components of the measurement setup are shown in Fig. 2.

3. Results and discussions

Sensors functionalized with Pd are the only ones that detect H₂ at room temperature. Fig. 3 shows the response curves for these sensors (S2 and S4) at this temperature, sensor S4 has better response than sensor S2 probably due to the higher palladium content. The resistance variation depends on the detected gas concentration, however the variations are small. The adsorption–desorption processes are slow probably due to the low operating temperature. Sensors do not reach saturation during the exposure time (30 min) but they have fast response times. The response time is defined as the time to achieve a steady response state after switching gas concentrations. These response times are about 2 min and remain constant with temperature.

A dependency of the hydrogen sensing with temperature has been detected. Sensor S3 does not detect until temperatures higher than 200 °C. Fig. 4 shows the response curves for Sensor S3 at 250 °C, the adsorption–desorption processes are similar to the commented ones in Fig. 3. In any case, processes are also slow since saturation is not reached after 30 min of exposition time. These results are probably due to a large surface specific area, since preparation method (spray) favours the formation of randomly distributed CNT arrays, as it can be seen in the SEM image (Fig. 1b). Gas can be adsorbed in multiple active points (tube ends, edges and valleys inner, outside and between). Therefore long exposure times are required to reach saturation.

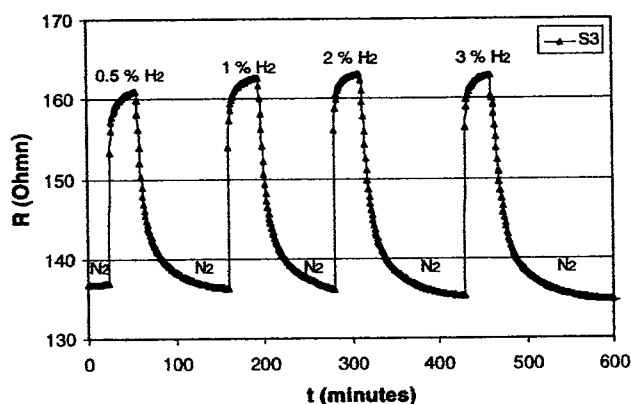


Fig. 4. Response curve of sensors S3 at 250 °C.

Pd doped sensor (S1) does not detect at room temperature and higher temperatures will have to be used to establish the appropriate detection temperature as has been determined for S3.

In general, detection processes are reversible and the experiment repetitions reveal that the sensors have a good reproducibility. The sensors were operating for 2 months. During this time their resistance values resulted hardly modified and similar responses were periodically obtained.

As a result of comparing S2 and S4 (at room temperature) to the S3 corresponding one (at 250 °C), all the sensors present low responses and their resistance changes with H₂ concentration are not significant at the hydrogen concentrations used. The S3 sensor presents the best sensitivity (20%). Sensitivity has been defined as the resistance change divided by the resistance value in the carrier gas, i.e., $S = 100 \times (\Delta R)/R_{N_2}$.

4. Conclusions

SWNT grown by arc-discharge behave as sensor materials for H₂ detection. Different behaviour has been observed for the different SWNT material tested:

- Raw and Pd doped SWNT sensors do not detect H₂ at room temperature.
- The temperature dependence on H₂ detection for raw SWNT sensor indicates H₂ sensing activity at temperatures higher than 200 °C.
- SWNTs functionalized with Pd detect H₂ at room temperature. SWNTs functionalized with a higher proportion of palladium present a better response.
- The sensors S2, S4 (room temperature) and S3 ($T^a \geq 200$ °C) have fast response and good reproducibility.

After this preliminary study, the preparation conditions will be optimized and different temperatures will be tested in order to improve the hydrogen sensitivity. The temperature effect on H₂ detection of Pd doped SWNT sensor has to be investigated. Probably the catalyst effect would begin to be effective at higher temperature.

Acknowledgements

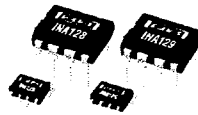
This work has been supported by the project NANOENER MAT2002-04630-C02-01, Good-Food. IP, IST VI FM, and the CSIC Fuel Cell Network.

References

- [1] S. Iijima, Nature (London) 354 (1991) 56.
- [2] S.J. Tans, A.R.M. Vershueren, C. Dekker, Nature 393 (1998) 49.
- [3] W.B. Choi, D.S. Chung, J.H. Kang, H.Y. Kim, Y.W. Jin, I.T. Han, Y.H.Y. Lee, Appl. Phys. Lett. 75 (1999) 3129.

- [4] C. Liu, Y.Y. Fan, M. Liu, H.T. Cong, H.M. Cheng, M.S. Dresselhaus, *Science* 286 (1999) 1127.
- [5] S.J. Tans, M.H. Devoret, H. Dai, A. Thess, R.E. Smalley, L.J. Geerligs, C. Dekker, *Nature* 386 (1997) 474.
- [6] J. Hafner, C. Cheung, C. Lieber, *Nature* 398 (1999) 761.
- [7] C. Niu, E.K. Sichel, R. Hoch, D. Moy, H. Tennent, *Appl. Phys. Lett.* 70 (1997) 1480.
- [8] M.S. Dresselhaus, G. Dresselhaus, P.C. Eklund, *Science of Fullerenes and Carbon Nanotubes*, Academic, New York (Chapter 19).
- [9] J. Zhao, A. Buldum, J. Han, J. Ping Lu, *Nanotechnology* 13 (2002) 195.
- [10] Y.T. Jang, S.I. Moon, J.H. Ahn, Y.H. Lee, B.K. Ju, *Sens. Actuators B* 99 (2004) 118.
- [11] C. Cantalini, L. Valentini, I. Armentano, J.M. Kenny, L. Lozzi, S. Santucci, *Diamond Relat. Mater.* 13 (2004) 1301.
- [12] S.G. Wang, Q. Zhang, D.J. Yang, P.J. Sellin, G.F. Zhong, *Diamond Relat. Mater.* 13 (2004) 1327.
- [13] J. Kong, N.R. Franklin, C. Zhou, M.G. Chapline, S. Peng, K. Cho, H. Dai, *Science* 287 (2000) 622.
- [14] C. Journet, W.K. Maser, P. Vernier, A. Lamy de la Chapelle, S. Lefrant, P. Deniard, R. Lee, J.E. Fisher, *Nature* 388 (1997) 756.
- [15] F. Picó, J.M. Rojo, M.L. Sanjuán, A. Ansón, A.M. Benito, M.A. Callejas, W.K. Maser, M.T. Martínez, *J. Electrochem. Soc.* 151 (6) (2004) 1.
- [16] M.T. Martínez, M.A. Callejas, A.M. Benito, M. Cochet, T. Seeger, A. Ansón, J. Schreiber, C. Gordon, C. Marhic, O. Chauvet, W.K. Maser, *Nanotechnology* 14 (2003) 691.
- [17] E. Lafuente, M.T. Martínez, R. Serrano, E.P. Urriolabeitia, *Internal Communication*, Instituto de Carboquímica, CSIC, 2004.

ผนวก ก



Precision, Low Power INSTRUMENTATION AMPLIFIERS

FEATURES

- **LOW OFFSET VOLTAGE:** 50 μ V max
- **LOW DRIFT:** 0.5 μ V/ $^{\circ}$ C max
- **LOW INPUT BIAS CURRENT:** 5nA max
- **HIGH CMR:** 120dB min
- **INPUTS PROTECTED TO \pm 40V**
- **WIDE SUPPLY RANGE:** \pm 2.25V to \pm 18V
- **LOW QUIESCENT CURRENT:** 700 μ A
- **8-PIN PLASTIC DIP, SO-8**

APPLICATIONS

- **BRIDGE AMPLIFIER**
- **THERMOCOUPLE AMPLIFIER**
- **RTD SENSOR AMPLIFIER**
- **MEDICAL INSTRUMENTATION**
- **DATA ACQUISITION**

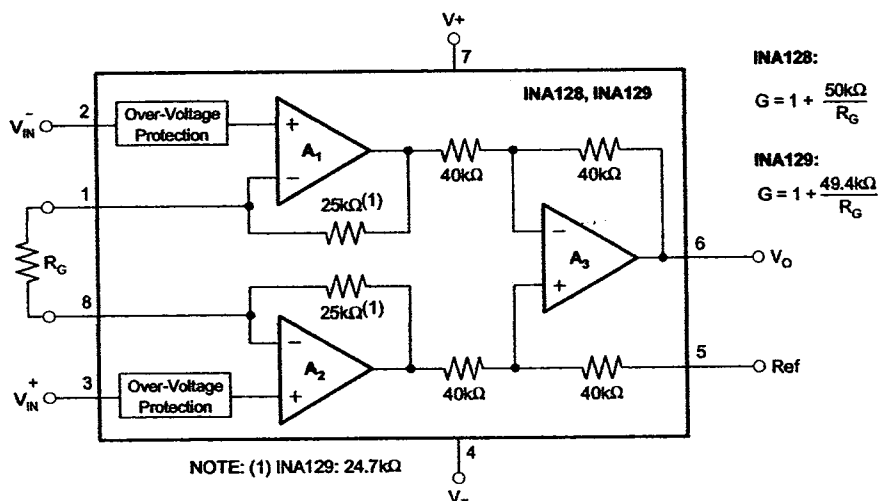
DESCRIPTION

The INA128 and INA129 are low power, general purpose instrumentation amplifiers offering excellent accuracy. The versatile 3-op amp design and small size make them ideal for a wide range of applications. Current-feedback input circuitry provides wide bandwidth even at high gain (200kHz at G = 100).

A single external resistor sets any gain from 1 to 10,000. The INA128 provides an industry-standard gain equation; the INA129 gain equation is compatible with the AD620.

The INA128/INA129 is laser trimmed for very low offset voltage (50 μ V), drift (0.5 μ V/ $^{\circ}$ C) and high common-mode rejection (120dB at G \geq 100). It operates with power supplies as low as \pm 2.25V, and quiescent current is only 700 μ A—ideal for battery-operated systems. Internal input protection can withstand up to \pm 40V without damage.

The INA128/INA129 is available in 8-pin plastic DIP and SO-8 surface-mount packages, specified for the -40° C to $+85^{\circ}$ C temperature range. The INA128 is also available in a dual configuration, the INA2128.



Please be aware that an important notice concerning availability, standard warranty, and use in critical applications of Texas Instruments semiconductor products and disclaimers thereto appears at the end of this data sheet.

All trademarks are the property of their respective owners.

PRODUCTION DATA Information is current as of publication date. Products conform to specifications per the terms of Texas Instruments standard warranty. Production processing does not necessarily include testing of all parameters.

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS⁽¹⁾

Supply Voltage	±18V
Analog Input Voltage Range	±40V
Output Short-Circuit (to ground)	Continuous
Operating Temperature	-40°C to +125°C
Storage Temperature Range	-55°C to +125°C
Junction Temperature	+150°C
Lead Temperature (soldering, 10s)	+300°C

(1) Stresses above these ratings may cause permanent damage. Exposure to absolute maximum conditions for extended periods may degrade device reliability. These are stress ratings only, and functional operation of the device at these or any other conditions beyond those specified is not implied.

ELECTROSTATIC DISCHARGE SENSITIVITY



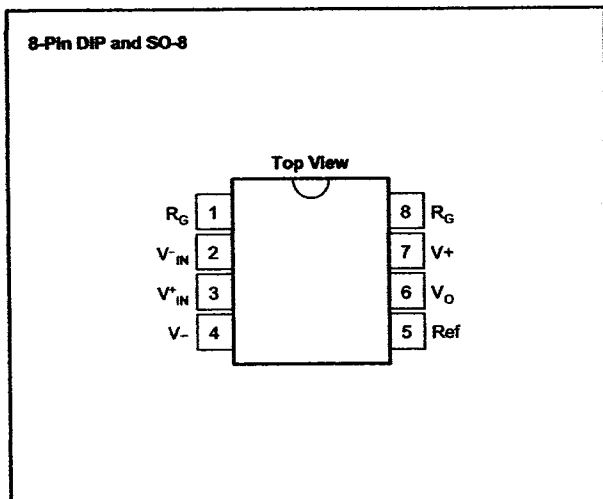
This integrated circuit can be damaged by ESD. Texas Instruments recommends that all integrated circuits be handled with appropriate precautions. Failure to observe proper handling and installation procedures can cause damage.

ESD damage can range from subtle performance degradation to complete device failure. Precision integrated circuits may be more susceptible to damage because very small parametric changes could cause the device not to meet its published specifications.

ORDERING INFORMATION

For the most current package and ordering information, see the Package Option Addendum located at the end of this data sheet.

PIN CONFIGURATION



ELECTRICAL CHARACTERISTICS

At $T_A = +25^\circ\text{C}$, $V_S = \pm 15\text{V}$, $R_L = 10\text{k}\Omega$, unless otherwise noted.

PARAMETER	CONDITIONS	INA128P, U INA129P, U			INA128PA, UA INA129PA, UA			UNIT
		MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
INPUT								
Offset Voltage, RTI								
Initial	$T_A = +25^\circ\text{C}$		$\pm 10 \pm 100/\text{G}$	$\pm 50 \pm 500/\text{G}$		$\pm 25 \pm 100/\text{G}$	$\pm 125 \pm 1000/\text{G}$	μV
vs Temperature	$T_A = T_{\text{MIN}}$ to T_{MAX}		$\pm 0.2 \pm 2/\text{G}$	$\pm 0.5 \pm 20/\text{G}$		$\pm 0.2 \pm 5/\text{G}$	$\pm 1 \pm 20/\text{G}$	$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
vs Power Supply	$V_S = \pm 2.25\text{V}$ to $\pm 18\text{V}$		$\pm 0.2 \pm 20/\text{G}$	$\pm 1 \pm 100/\text{G}$		*	$\pm 2 \pm 200/\text{G}$	$\mu\text{V}/\text{V}$
Long-Term Stability			$\pm 0.1 \pm 3/\text{G}$			*		$\mu\text{V}/\text{mo}$
Impedance, Differential			$10^{10} \parallel 2$			*		$\Omega \parallel \text{pF}$
Common-Mode			$10^{11} \parallel 9$			*		$\Omega \parallel \text{pF}$
Common-Mode Voltage Range(1)	$V_O = 0\text{V}$	(V+) - 2 (V-) + 2	(V+) - 1.4 (V-) + 1.7		*	*		V
Safe Input Voltage				± 40	*	*	*	V
Common-Mode Rejection	$V_{\text{CM}} = \pm 13\text{V}$, $\Delta R_S = 1\text{k}\Omega$							
	$G = 1$	80	86		73	*		dB
	$G = 10$	100	106		93	*		dB
	$G = 100$	120	125		110	*		dB
	$G = 1000$	120	130		110	*		dB
BIAS CURRENT			± 2	± 5		*	± 10	nA
vs Temperature			± 30			*		$\text{pA}/^\circ\text{C}$
Offset Current			± 1	± 5		*	± 10	nA
vs Temperature			± 30			*		$\text{pA}/^\circ\text{C}$
NOISE VOLTAGE, RTI	$G = 1000$, $R_S = 0\Omega$							
$f = 10\text{Hz}$			10			*		$\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
$f = 100\text{Hz}$			8			*		$\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
$f = 1\text{kHz}$			8			*		$\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
$f_B = 0.1\text{Hz}$ to 10Hz			0.2			*		μVpp
Noise Current								
$f = 10\text{Hz}$			0.9			*		$\text{pA}/\sqrt{\text{Hz}}$
$f = 1\text{kHz}$			0.3			*		$\text{pA}/\sqrt{\text{Hz}}$
$f_B = 0.1\text{Hz}$ to 10Hz			30			*		pApp
GAIN								
Gain Equation, INA128			$1 + (50\text{k}\Omega/R_G)$			*		V/V
INA129			$1 + (49.4\text{k}\Omega/R_G)$			*		V/V
Range of Gain		1		10000	*		*	V/V
Gain Error	$G = 1$		± 0.01	± 0.024		*	± 0.1	%
	$G = 10$		± 0.02	± 0.4		*	± 0.5	%
	$G = 100$		± 0.05	± 0.5		*	± 0.7	%
	$G = 1000$		± 0.5	± 1		*	± 2	%
Gain vs Temperature(2)	$G = 1$		± 1	± 10		*	*	$\text{ppm}/^\circ\text{C}$
$50\text{k}\Omega$ (or $49.4\text{k}\Omega$) Resistance(2)(3)			± 25	± 100		*	*	$\text{ppm}/^\circ\text{C}$
Nonlinearity	$V_O = \pm 13.6\text{V}$, $G = 1$		± 0.0001	± 0.001		*	± 0.002	% of FSR
	$G = 10$		± 0.0003	± 0.002		*	± 0.004	% of FSR
	$G = 100$		± 0.0005	± 0.002		*	± 0.004	% of FSR
	$G = 1000$		± 0.001	(4)		*	*	% of FSR

NOTE: * Specification is same as INA128P, U or INA129P, U.

(1) Input common-mode range varies with output voltage — see typical curves.

(2) Specified by wafer test.

(3) Temperature coefficient of the $50\text{k}\Omega$ (or $49.4\text{k}\Omega$) term in the gain equation.

(4) Nonlinearity measurements in $G = 1000$ are dominated by noise. Typical nonlinearity is $\pm 0.001\%$.

SBOS051B - OCTOBER 1995 - REVISED FEBRUARY 2005

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (continued)At $T_A = +25^\circ\text{C}$, $V_S = \pm 15\text{V}$, $R_L = 10\text{k}\Omega$, unless otherwise noted.

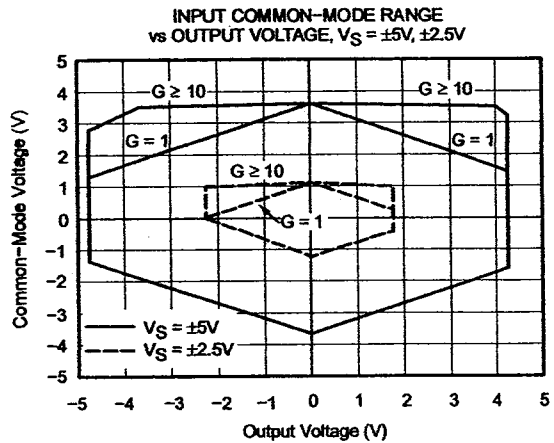
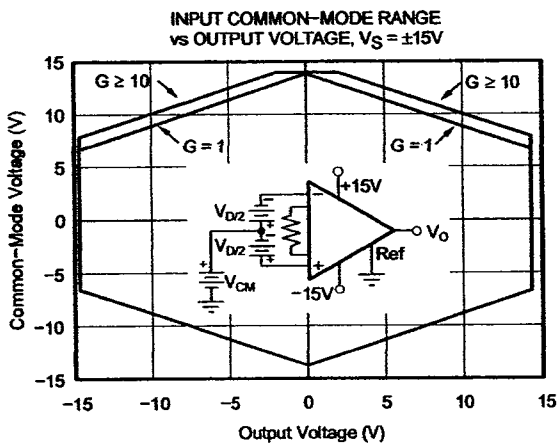
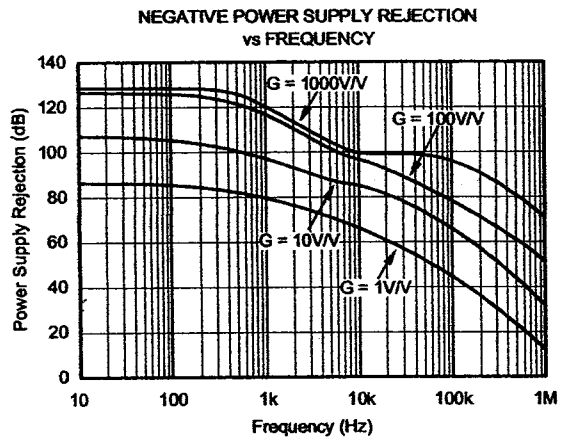
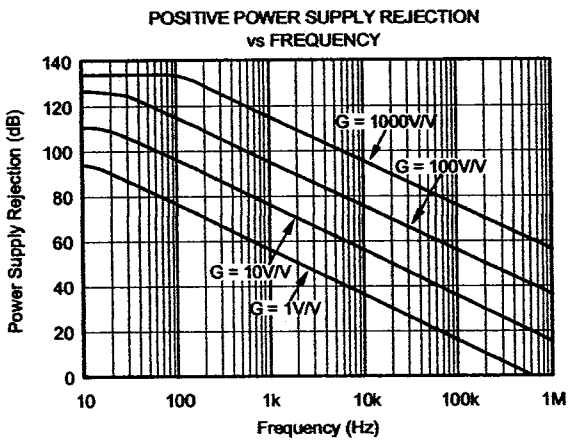
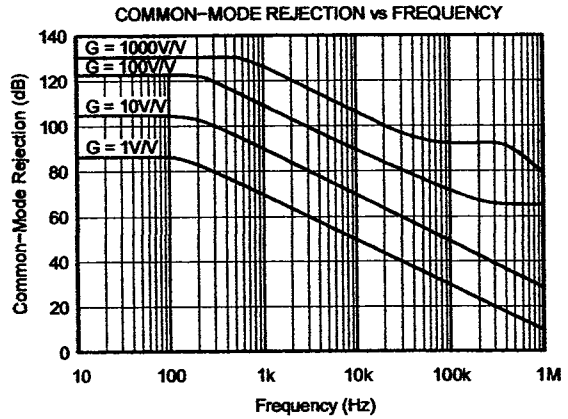
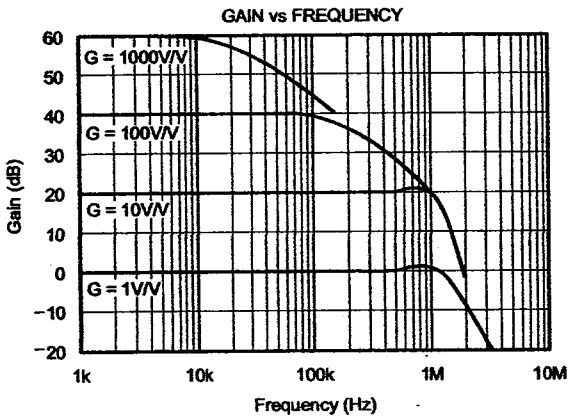
PARAMETER	CONDITIONS	INA128P, U INA129P, U			INA128PA, UA INA129PA, UA			UNIT
		MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
OUTPUT								
Voltage: Positive	$R_L = 10\text{k}\Omega$	(V+) - 1.4	(V+) - 0.9		*	*		V
Negative	$R_L = 10\text{k}\Omega$	(V-) + 1.4	(V-) + 0.8		*	*		V
Load Capacitance Stability			1000			*		pF
Short-Circuit Current			+6/-15			*		mA
FREQUENCY RESPONSE								
Bandwidth, -3dB	G = 1		1.3			*		MHz
	G = 10		700			*		kHz
	G = 100		200			*		kHz
	G = 1000		20			*		kHz
Slew Rate	$V_O = \pm 10\text{V}$, G = 10		4			*		V/ μs
Settling Time, 0.01%	G = 1		7			*		μs
	G = 10		7			*		μs
	G = 100		9			*		μs
	G = 1000		80			*		μs
Overload Recovery	50% Overdrive		4			*		μs
POWER SUPPLY								
Voltage Range		± 2.25	± 15	± 18	*	*	*	V
Current, Total	$V_{IN} = 0\text{V}$		± 700	± 750		*	*	μA
TEMPERATURE RANGE								
Specification		-40		+85	*		*	$^\circ\text{C}$
Operating		-40		+125	*		*	$^\circ\text{C}$
θ_{JA} 8-Pin DIP			80			*		$^\circ\text{C}/\text{W}$
SO-8 SOIC			150			*		$^\circ\text{C}/\text{W}$

NOTE: * Specification is same as INA128P, U or INA129P, U.

- (1) Input common-mode range varies with output voltage — see typical curves.
- (2) Specified by wafer test.
- (3) Temperature coefficient of the 50k Ω (or 49.4k Ω) term in the gain equation.
- (4) Nonlinearity measurements in G = 1000 are dominated by noise. Typical nonlinearity is $\pm 0.001\%$.

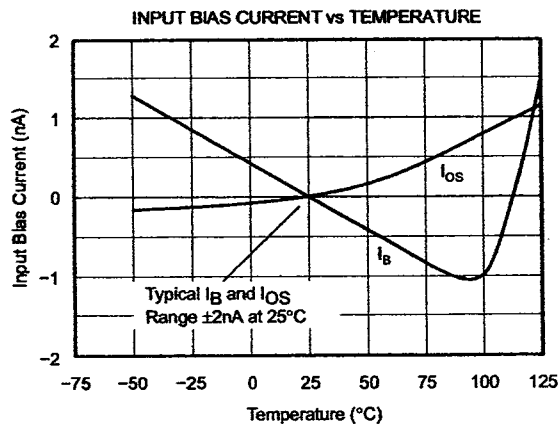
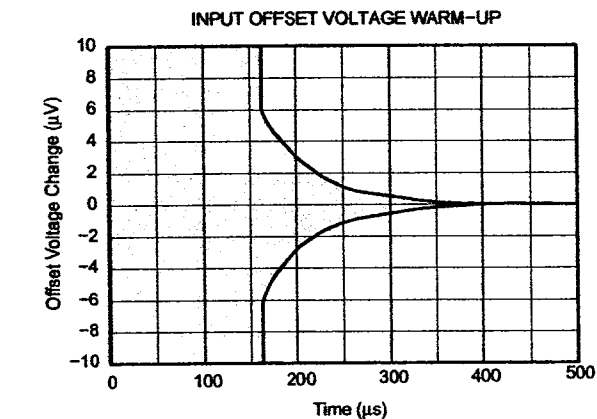
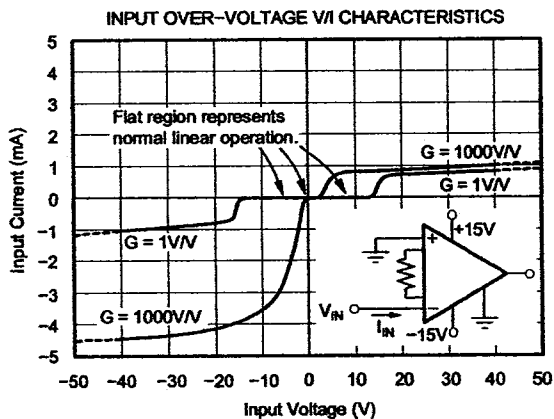
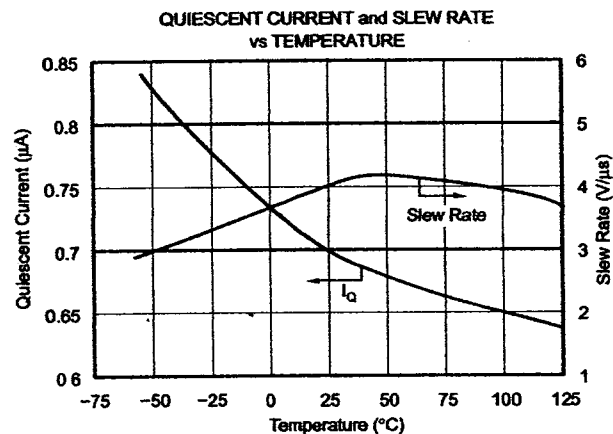
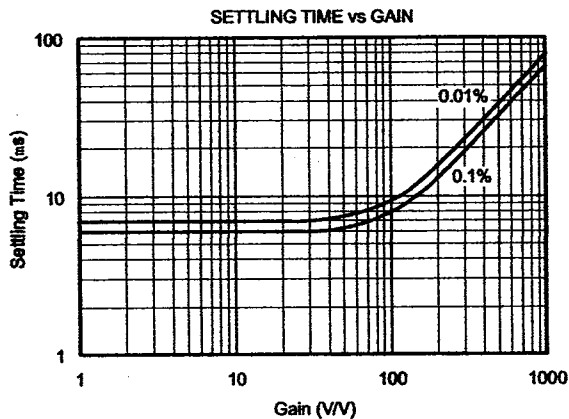
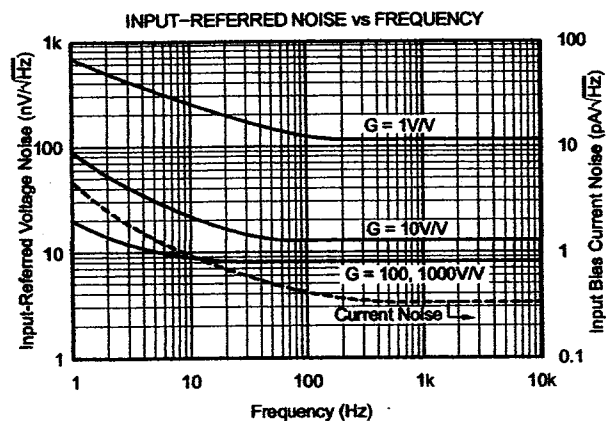
TYPICAL CHARACTERISTICS

At $T_A = +25^\circ\text{C}$, $V_S = \pm 15\text{V}$, unless otherwise noted.



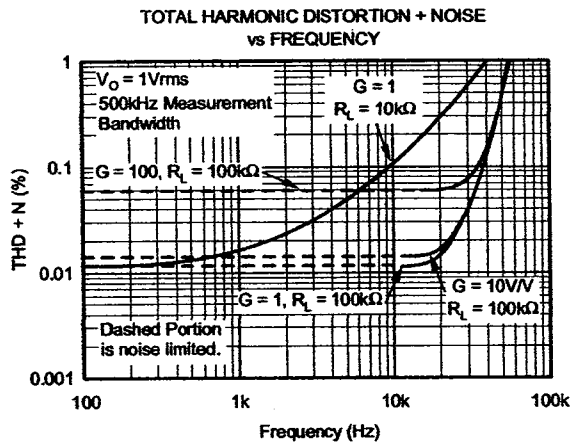
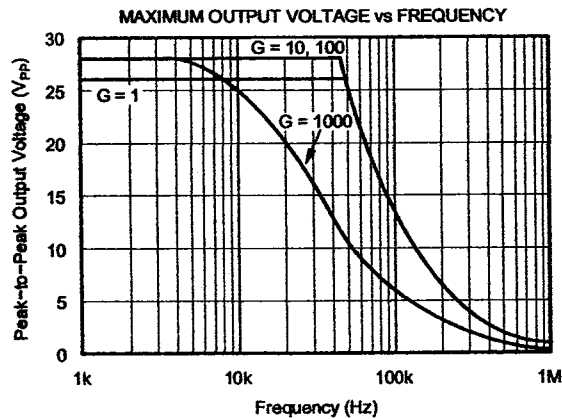
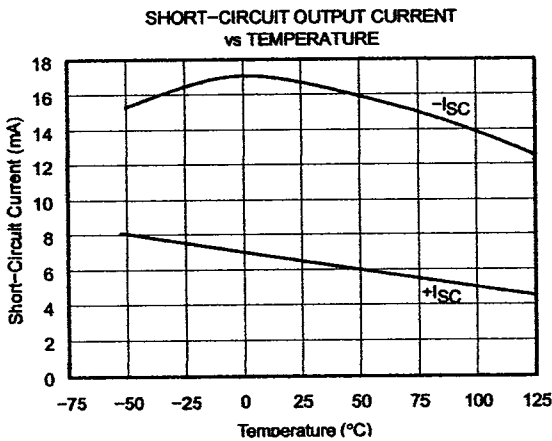
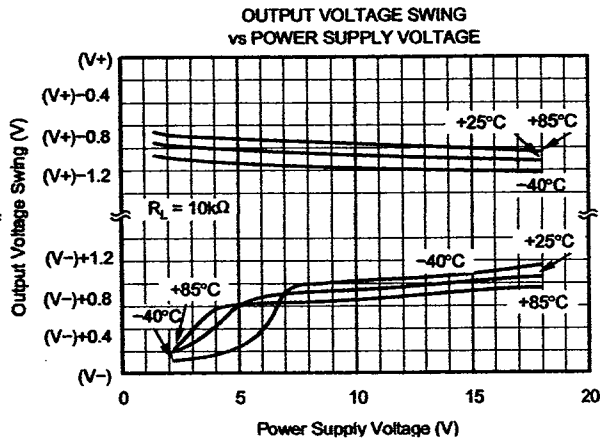
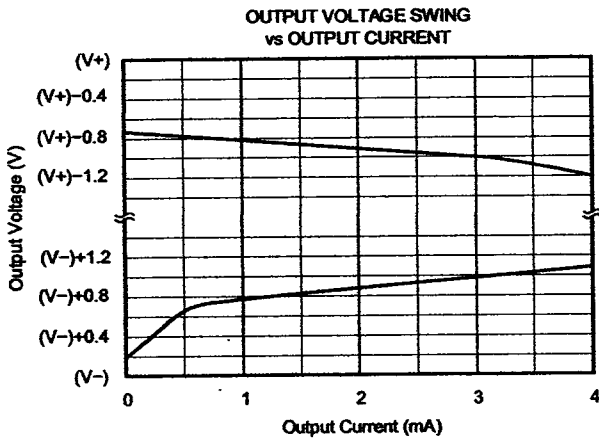
TYPICAL CHARACTERISTICS (continued)

At $T_A = +25^\circ\text{C}$, $V_S = \pm 15\text{V}$, unless otherwise noted.



TYPICAL CHARACTERISTICS (continued)

At $T_A = +25^\circ\text{C}$, $V_S = \pm 15\text{V}$, unless otherwise noted.

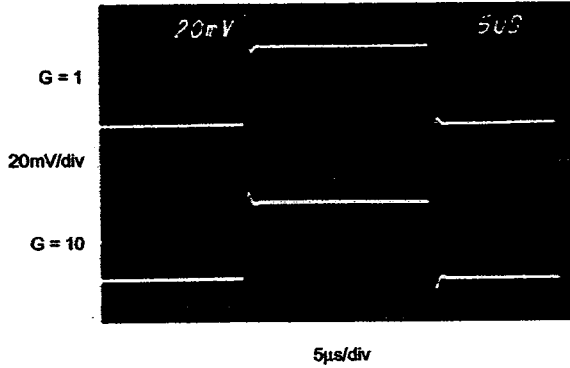


SBOS051B - OCTOBER 1995 - REVISED FEBRUARY 2005

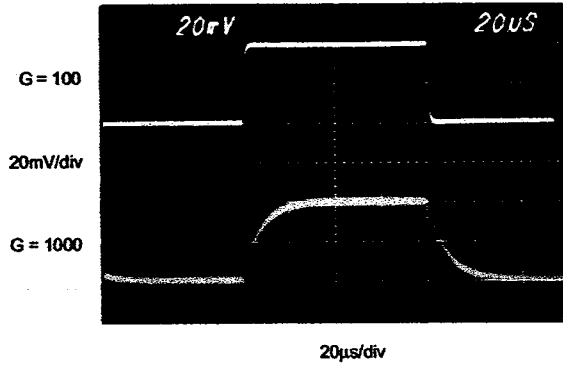
TYPICAL CHARACTERISTICS (continued)

At $T_A = +25^\circ\text{C}$, $V_S = \pm 15\text{V}$, unless otherwise noted.

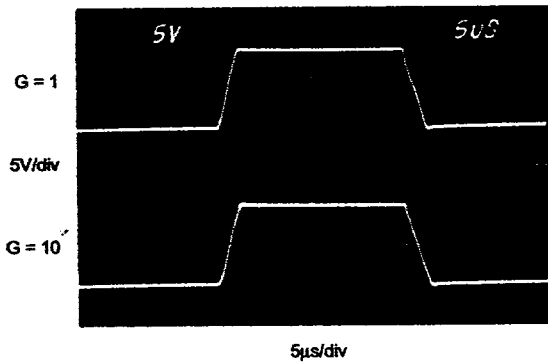
SMALL SIGNAL
(G = 1, 10)



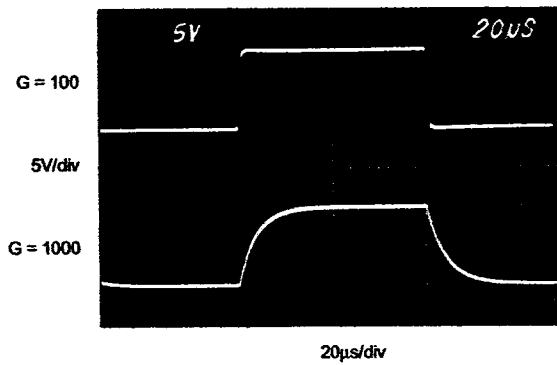
SMALL SIGNAL
(G = 100, 1000)



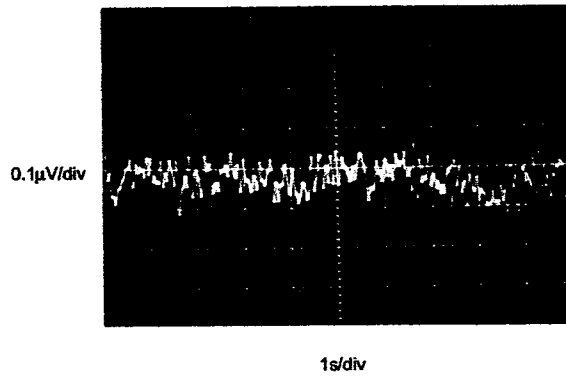
LARGE SIGNAL
(G = 1, 10)



LARGE SIGNAL
(G = 100, 1000)



VOLTAGE NOISE 0.1 to 10Hz
INPUT-REFERRED, G ≥ 100



APPLICATIONS INFORMATION

Figure 1 shows the basic connections required for operation of the INA128/INA129. Applications with noisy or high impedance power supplies may require decoupling capacitors close to the device pins as shown.

The output is referred to the output reference (Ref) terminal which is normally grounded. This must be a low-impedance connection to assure good common-mode rejection. A resistance of 8Ω in series with the Ref pin will cause a typical device to degrade to approximately 80dB CMR ($G = 1$).

SETTING THE GAIN

Gain is set by connecting a single external resistor, R_G , connected between pins 1 and 8:

INA128:

$$G = 1 + \frac{50k\Omega}{R_G} \quad (1)$$

INA129:

$$G = 1 + \frac{49.4k\Omega}{R_G} \quad (2)$$

Commonly used gains and resistor values are shown in Figure 1.

The 50kΩ term in Equation 1 (49.4kΩ in Equation 2) comes from the sum of the two internal feedback resistors of A_1 and A_2 . These on-chip metal film

resistors are laser trimmed to accurate absolute values. The accuracy and temperature coefficient of these internal resistors are included in the gain accuracy and drift specifications of the INA128/INA129.

The stability and temperature drift of the external gain setting resistor, R_G , also affects gain. R_G 's contribution to gain accuracy and drift can be directly inferred from the gain equation (1). Low resistor values required for high gain can make wiring resistance important. Sockets add to the wiring resistance which will contribute additional gain error (possibly an unstable gain error) in gains of approximately 100 or greater.

DYNAMIC PERFORMANCE

The typical performance curve *Gain vs Frequency* shows that, despite its low quiescent current, the INA128/INA129 achieves wide bandwidth, even at high gain. This is due to the current-feedback topology of the input stage circuitry. Settling time also remains excellent at high gain.

NOISE PERFORMANCE

The INA128/INA129 provides very low noise in most applications. Low frequency noise is approximately 0.2μV_{PP} measured from 0.1 to 10Hz ($G \geq 100$). This provides dramatically improved noise when compared to state-of-the-art chopper-stabilized amplifiers.

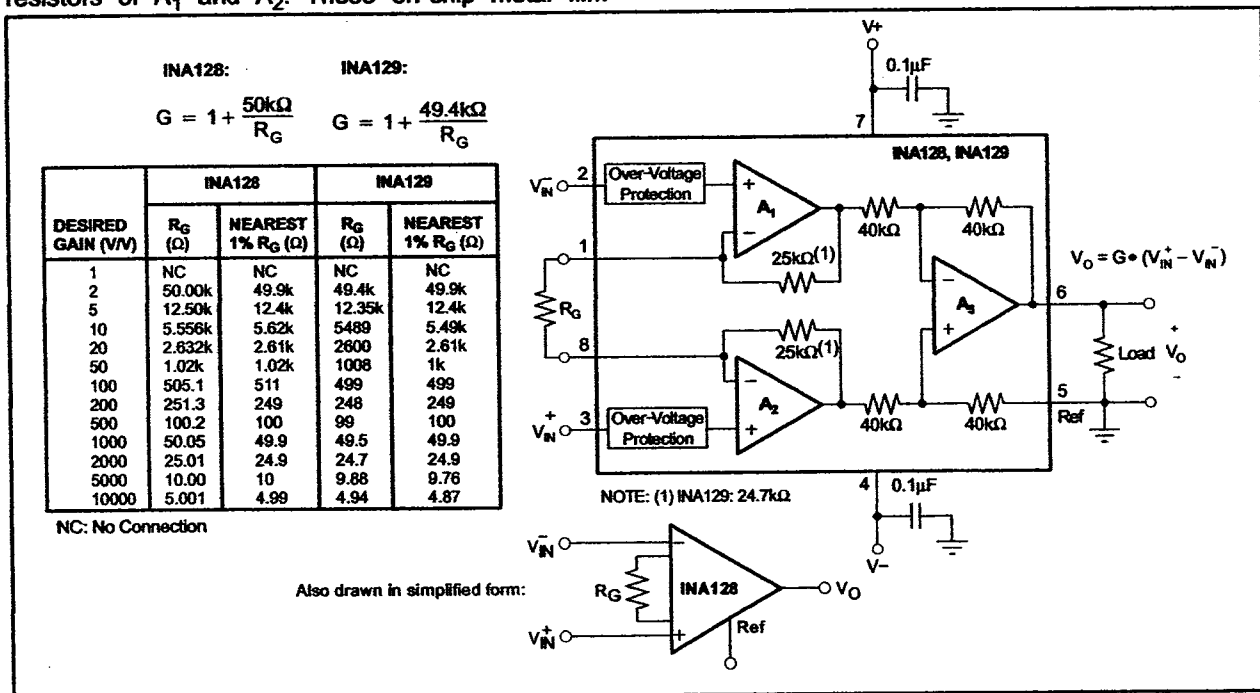


Figure 1. Basic Connections

SBOS051B - OCTOBER 1995 - REVISED FEBRUARY 2005

OFFSET TRIMMING

The INA128/INA129 is laser trimmed for low offset voltage and offset voltage drift. Most applications require no external offset adjustment. Figure 2 shows an optional circuit for trimming the output offset voltage. The voltage applied to Ref terminal is summed with the output. The op amp buffer provides low impedance at the Ref terminal to preserve good common-mode rejection.

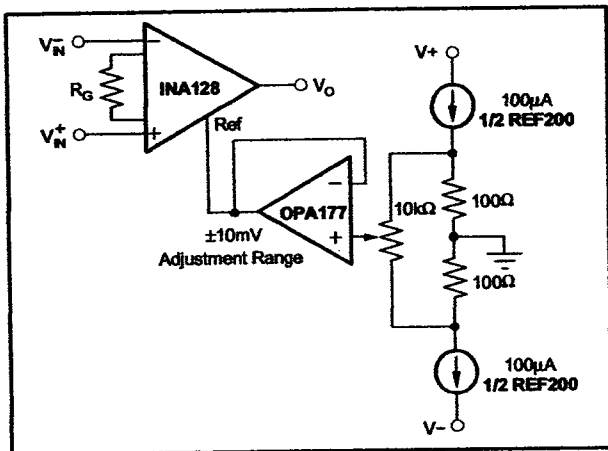


Figure 2. Optional Trimming of Output Offset Voltage

INPUT BIAS CURRENT RETURN PATH

The input impedance of the INA128/INA129 is extremely high—approximately $10^{10}\Omega$. However, a path must be provided for the input bias current of both inputs. This input bias current is approximately $\pm 2\text{nA}$. High input impedance means that this input bias current changes very little with varying input voltage.

Input circuitry must provide a path for this input bias current for proper operation. Figure 3 shows various provisions for an input bias current path. Without a bias current path, the inputs will float to a potential which exceeds the common-mode range, and the input amplifiers will saturate.

If the differential source resistance is low, the bias current return path can be connected to one input (see the thermocouple example in Figure 3). With higher source impedance, using two equal resistors provides a balanced input with possible advantages of lower input offset voltage due to bias current and better high-frequency common-mode rejection.

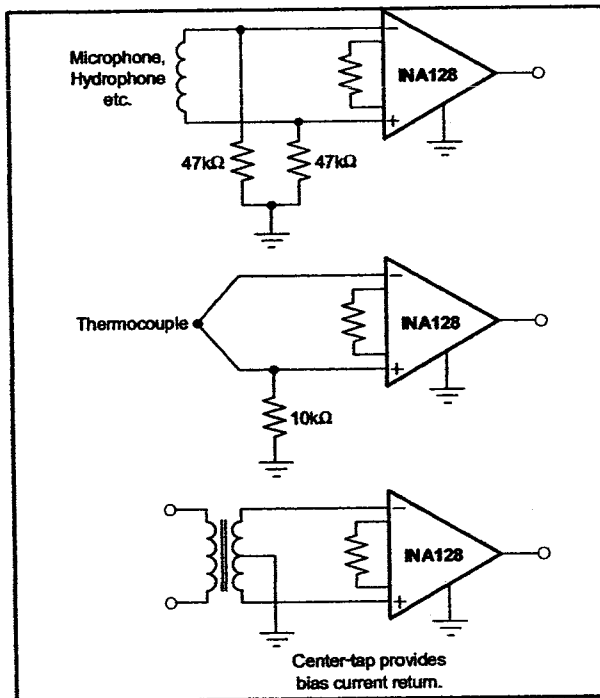


Figure 3. Providing an Input Common-Mode Current Path

INPUT COMMON-MODE RANGE

The linear input voltage range of the input circuitry of the INA128/INA129 is from approximately 1.4V below the positive supply voltage to 1.7V above the negative supply. As a differential input voltage causes the output voltage increase, however, the linear input range will be limited by the output voltage swing of amplifiers A_1 and A_2 . So the linear common-mode input range is related to the output voltage of the complete amplifier. This behavior also depends on supply voltage—see performance curves, *Input Common-Mode Range vs Output Voltage*.

Input-overload can produce an output voltage that appears normal. For example, if an input overload condition drives both input amplifiers to their positive output swing limit, the difference voltage measured by the output amplifier will be near zero. The output of A_3 will be near 0V even though both inputs are overloaded.

LOW VOLTAGE OPERATION

The INA128/INA129 can be operated on power supplies as low as $\pm 2.25\text{V}$. Performance remains excellent with power supplies ranging from $\pm 2.25\text{V}$ to $\pm 18\text{V}$. Most parameters vary only slightly throughout this supply voltage range—see typical performance curves.

Operation at very low supply voltage requires careful attention to assure that the input voltages remain within their linear range. Voltage swing requirements of internal nodes limit the input common-mode range with low power supply voltage. Typical performance curves, "Input Common-Mode Range vs Output Voltage" show the range of linear operation for $\pm 15V$, $\pm 5V$, and $\pm 2.5V$ supplies.

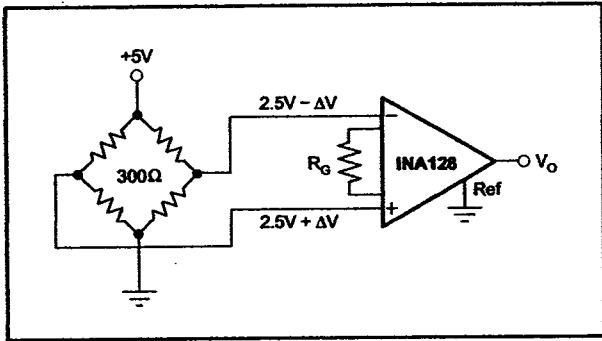


Figure 4. Bridge Amplifier

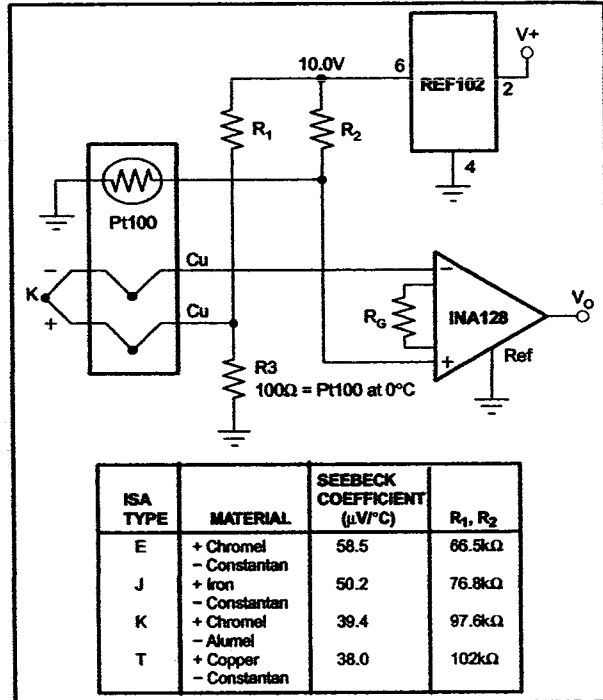


Figure 6. Thermocouple Amplifier with RTD Cold-Junction Compensation

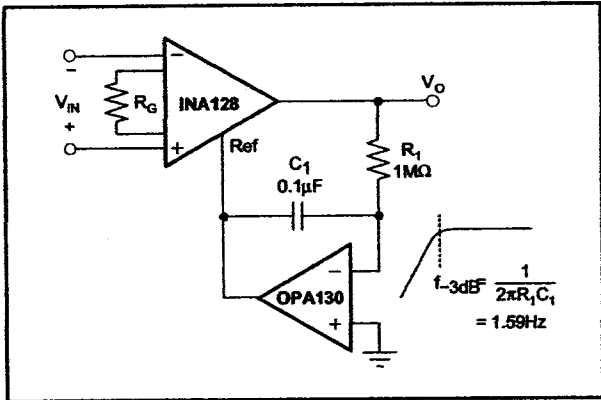


Figure 5. AC-Coupled Instrumentation Amplifier

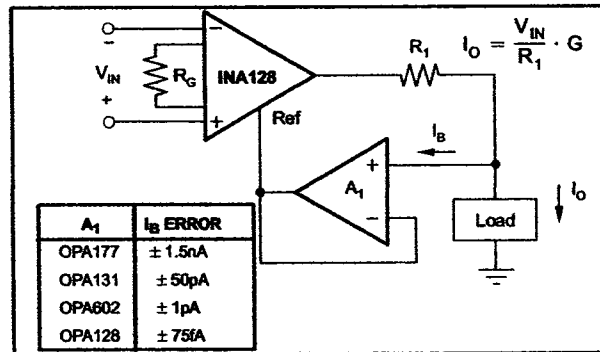


Figure 7. Differential Voltage to Current Converter

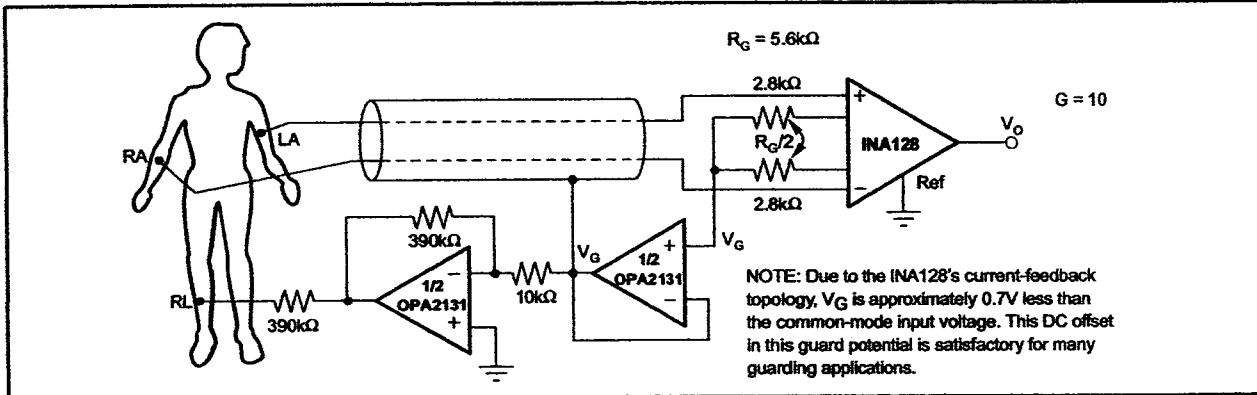


Figure 8. ECG Amplifier with Right-Leg Drive

PACKAGE OPTION ADDENDUM

PACKAGING INFORMATION

Orderable Device	Status ⁽¹⁾	Package Type	Package Drawing	Pins	Package Qty	Eco Plan ⁽²⁾	Lead/Ball Finish	MSL Peak Temp ⁽³⁾
INA128P	ACTIVE	PDIP	P	8	50	Green (RoHS & no Sb/Br)	CU NIPDAU	N / A for Pkg Type
INA128PA	ACTIVE	PDIP	P	8	50	Green (RoHS & no Sb/Br)	CU NIPDAU	N / A for Pkg Type
INA128PAG4	ACTIVE	PDIP	P	8	50	Green (RoHS & no Sb/Br)	CU NIPDAU	N / A for Pkg Type
INA128PG4	ACTIVE	PDIP	P	8	50	Green (RoHS & no Sb/Br)	CU NIPDAU	N / A for Pkg Type
INA128U	ACTIVE	SOIC	D	8	100	Green (RoHS & no Sb/Br)	Cu NiPdAu	Level-3-260C-168 HR
INA128U/2K5	ACTIVE	SOIC	D	8	2500	Green (RoHS & no Sb/Br)	Cu NiPdAu	Level-3-260C-168 HR
INA128U/2K5G4	ACTIVE	SOIC	D	8	2500	Green (RoHS & no Sb/Br)	Cu NiPdAu	Level-3-260C-168 HR
INA128UA	ACTIVE	SOIC	D	8	100	Green (RoHS & no Sb/Br)	Cu NiPdAu	Level-3-260C-168 HR
INA128UA/2K5	ACTIVE	SOIC	D	8	2500	Green (RoHS & no Sb/Br)	Cu NiPdAu	Level-3-260C-168 HR
INA128UA/2K5E4	ACTIVE	SOIC	D	8	2500	Green (RoHS & no Sb/Br)	Cu NiPdAu	Level-3-260C-168 HR
INA128UA/2K5G4	ACTIVE	SOIC	D	8	2500	Green (RoHS & no Sb/Br)	Cu NiPdAu	Level-3-260C-168 HR
INA128UAE4	ACTIVE	SOIC	D	8	100	Green (RoHS & no Sb/Br)	Cu NiPdAu	Level-3-260C-168 HR
INA128UAG4	ACTIVE	SOIC	D	8	100	Green (RoHS & no Sb/Br)	Cu NiPdAu	Level-3-260C-168 HR
INA128UG4	ACTIVE	SOIC	D	8	100	Green (RoHS & no Sb/Br)	Cu NiPdAu	Level-3-260C-168 HR
INA129P	ACTIVE	PDIP	P	8	50	Green (RoHS & no Sb/Br)	CU NIPDAU	N / A for Pkg Type
INA129PA	ACTIVE	PDIP	P	8	50	Green (RoHS & no Sb/Br)	CU NIPDAU	N / A for Pkg Type
INA129PAG4	ACTIVE	PDIP	P	8	50	Green (RoHS & no Sb/Br)	CU NIPDAU	N / A for Pkg Type
INA129PG4	ACTIVE	PDIP	P	8	50	Green (RoHS & no Sb/Br)	CU NIPDAU	N / A for Pkg Type
INA129U	ACTIVE	SOIC	D	8	100	Green (RoHS & no Sb/Br)	Cu NiPdAu	Level-3-260C-168 HR
INA129U/2K5	ACTIVE	SOIC	D	8	2500	Green (RoHS & no Sb/Br)	Cu NiPdAu	Level-3-260C-168 HR
INA129U/2K5G4	ACTIVE	SOIC	D	8	2500	Green (RoHS & no Sb/Br)	Cu NiPdAu	Level-3-260C-168 HR
INA129UA	ACTIVE	SOIC	D	8	100	Green (RoHS & no Sb/Br)	Cu NiPdAu	Level-3-260C-168 HR
INA129UA/2K5	ACTIVE	SOIC	D	8	2500	Green (RoHS & no Sb/Br)	Cu NiPdAu	Level-3-260C-168 HR
INA129UA/2K5E4	ACTIVE	SOIC	D	8	2500	Green (RoHS & no Sb/Br)	Cu NiPdAu	Level-3-260C-168 HR
INA129UA/2K5G4	ACTIVE	SOIC	D	8	2500	Green (RoHS & no Sb/Br)	Cu NiPdAu	Level-3-260C-168 HR

Orderable Device	Status ⁽¹⁾	Package Type	Package Drawing	Pins	Package Qty	Eco Plan ⁽²⁾	Lead/Ball Finish	MSL Peak Temp ⁽³⁾
INA129UAE4	ACTIVE	SOIC	D	8	100	Green (RoHS & no Sb/Br)	Cu NiPdAu	Level-3-260C-168 HR
INA129UG4	ACTIVE	SOIC	D	8	100	Green (RoHS & no Sb/Br)	Cu NiPdAu	Level-3-260C-168 HR
SN412014DRE4	ACTIVE	SOIC	D	8	2500	Green (RoHS & no Sb/Br)	Cu NiPdAu	Level-3-260C-168 HR

⁽¹⁾ The marketing status values are defined as follows:

ACTIVE: Product device recommended for new designs.

LIFEBUY: TI has announced that the device will be discontinued, and a lifetime-buy period is in effect.

NRND: Not recommended for new designs. Device is in production to support existing customers, but TI does not recommend using this part in a new design.

PREVIEW: Device has been announced but is not in production. Samples may or may not be available.

OBSOLETE: TI has discontinued the production of the device.

⁽²⁾ Eco Plan - The planned eco-friendly classification: Pb-Free (RoHS), Pb-Free (RoHS Exempt), or Green (RoHS & no Sb/Br) - please check <http://www.ti.com/productcontent> for the latest availability information and additional product content details.

TBD: The Pb-Free/Green conversion plan has not been defined.

Pb-Free (RoHS): TI's terms "Lead-Free" or "Pb-Free" mean semiconductor products that are compatible with the current RoHS requirements for all 6 substances, including the requirement that lead not exceed 0.1% by weight in homogeneous materials. Where designed to be soldered at high temperatures, TI Pb-Free products are suitable for use in specified lead-free processes.

Pb-Free (RoHS Exempt): This component has a RoHS exemption for either 1) lead-based flip-chip solder bumps used between the die and package, or 2) lead-based die adhesive used between the die and leadframe. The component is otherwise considered Pb-Free (RoHS compatible) as defined above.

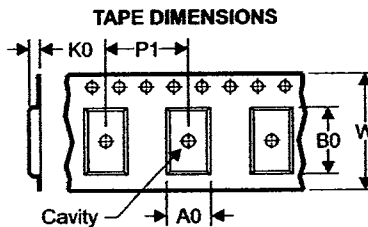
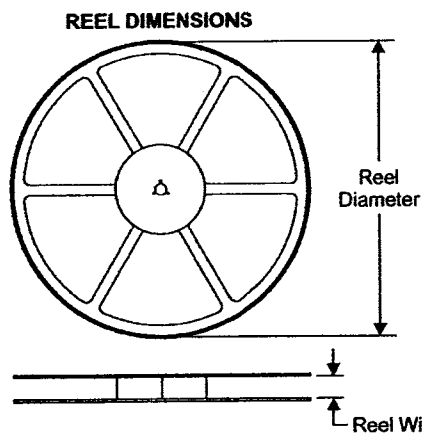
Green (RoHS & no Sb/Br): TI defines "Green" to mean Pb-Free (RoHS compatible), and free of Bromine (Br) and Antimony (Sb) based flame retardants (Br or Sb do not exceed 0.1% by weight in homogeneous material)

⁽³⁾ MSL, Peak Temp. - The Moisture Sensitivity Level rating according to the JEDEC industry standard classifications, and peak solder temperature.

Important Information and Disclaimer: The information provided on this page represents TI's knowledge and belief as of the date that it is provided. TI bases its knowledge and belief on information provided by third parties, and makes no representation or warranty as to the accuracy of such information. Efforts are underway to better integrate information from third parties. TI has taken and continues to take reasonable steps to provide representative and accurate information but may not have conducted destructive testing or chemical analysis on incoming materials and chemicals. TI and TI suppliers consider certain information to be proprietary, and thus CAS numbers and other limited information may not be available for release.

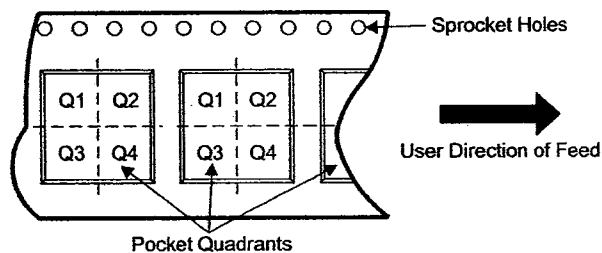
In no event shall TI's liability arising out of such information exceed the total purchase price of the TI part(s) at issue in this document sold by TI to Customer on an annual basis.

TAPE AND REEL INFORMATION



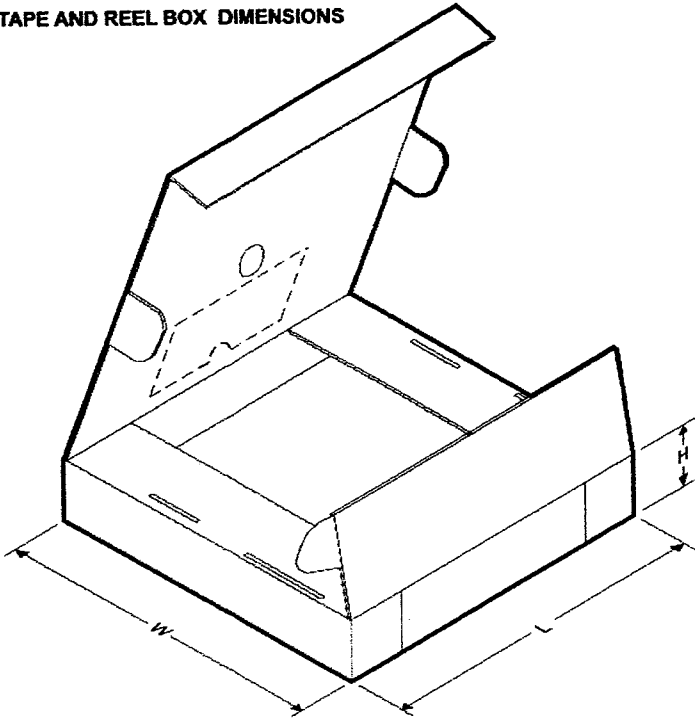
A0	Dimension designed to accommodate the component width
B0	Dimension designed to accommodate the component length
K0	Dimension designed to accommodate the component thickness
W	Overall width of the carrier tape
P1	Pitch between successive cavity centers

QUADRANT ASSIGNMENTS FOR PIN 1 ORIENTATION IN TAPE



*All dimensions are nominal

Device	Package Type	Package Drawing	Pins	SPQ	Reel Diameter (mm)	Reel Width W1 (mm)	A0 (mm)	B0 (mm)	K0 (mm)	P1 (mm)	W (mm)	Pin1 Quadrant
INA128U/2K5	SOIC	D	8	2500	330.0	12.4	6.4	5.2	2.1	8.0	12.0	Q1
INA128UA/2K5	SOIC	D	8	2500	330.0	12.4	6.4	5.2	2.1	8.0	12.0	Q1
INA129U/2K5	SOIC	D	8	2500	330.0	12.4	6.4	5.2	2.1	8.0	12.0	Q1
INA129UA/2K5	SOIC	D	8	2500	330.0	12.4	6.4	5.2	2.1	8.0	12.0	Q1
INA129UA/2K5G4	SOIC	D	8	2500	330.0	12.4	6.4	5.2	2.1	8.0	12.0	Q1

TAPE AND REEL BOX DIMENSIONS

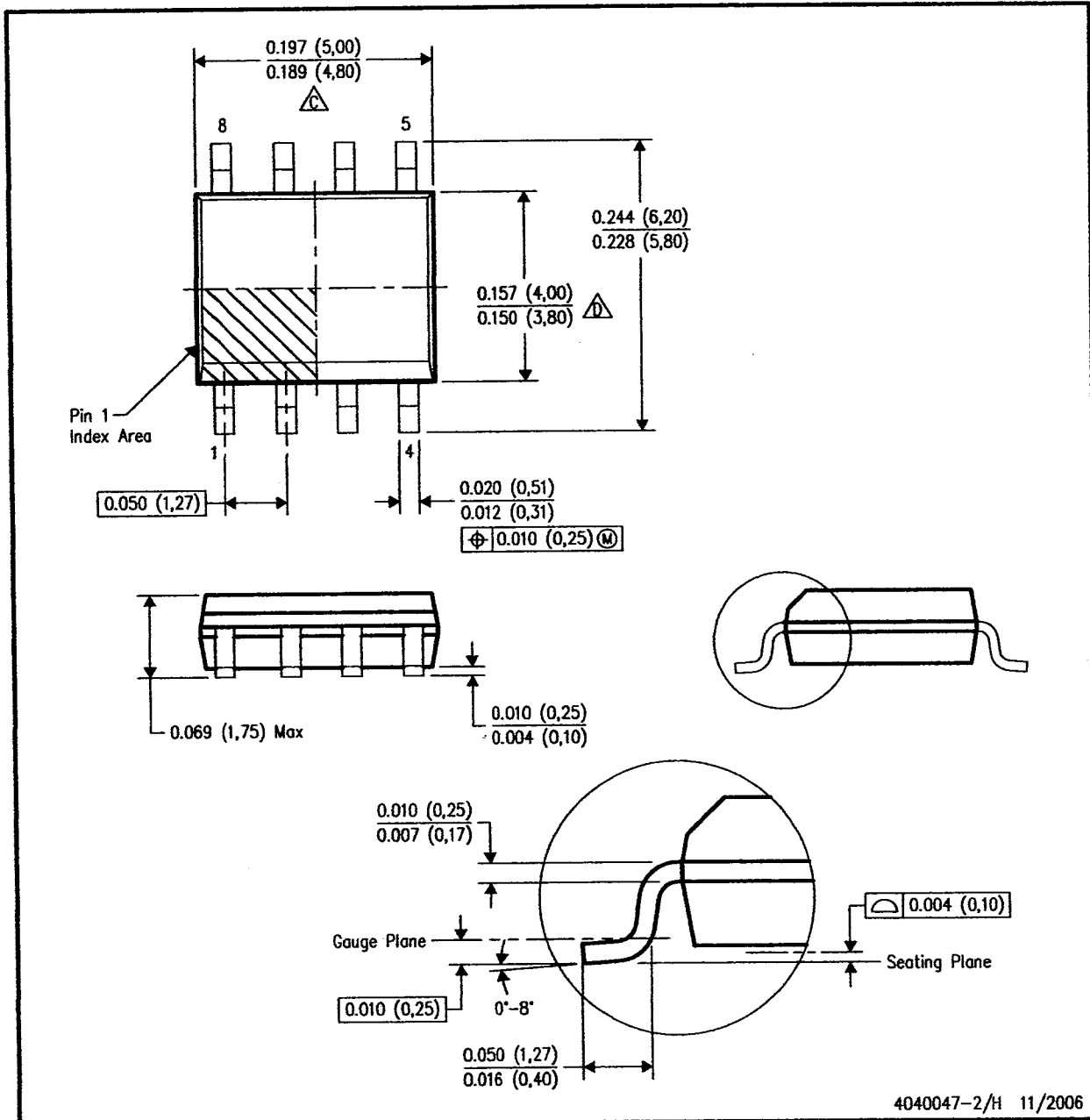
*All dimensions are nominal

Device	Package Type	Package Drawing	Pins	SPQ	Length (mm)	Width (mm)	Height (mm)
INA128U/2K5	SOIC	D	8	2500	346.0	346.0	29.0
INA128UA/2K5	SOIC	D	8	2500	346.0	346.0	29.0
INA129U/2K5	SOIC	D	8	2500	346.0	346.0	29.0
INA129UA/2K5	SOIC	D	8	2500	346.0	346.0	29.0
INA129UA/2K5G4	SOIC	D	8	2500	346.0	346.0	29.0

MECHANICAL DATA

D (R-PDSO-G8)

PLASTIC SMALL-OUTLINE PACKAGE



- NOTES:
- All linear dimensions are in inches (millimeters).
 - This drawing is subject to change without notice.
 - Body length does not include mold flash, protrusions, or gate burrs. Mold flash, protrusions, or gate burrs shall not exceed .006 (0,15) per end.
 - Body width does not include interlead flash. Interlead flash shall not exceed .017 (0,43) per side.
 - Reference JEDEC MS-012 variation AA.

IMPORTANT NOTICE

Texas Instruments Incorporated and its subsidiaries (TI) reserve the right to make corrections, modifications, enhancements, improvements, and other changes to its products and services at any time and to discontinue any product or service without notice. Customers should obtain the latest relevant information before placing orders and should verify that such information is current and complete. All products are sold subject to TI's terms and conditions of sale supplied at the time of order acknowledgment.

TI warrants performance of its hardware products to the specifications applicable at the time of sale in accordance with TI's standard warranty. Testing and other quality control techniques are used to the extent TI deems necessary to support this warranty. Except where mandated by government requirements, testing of all parameters of each product is not necessarily performed.

TI assumes no liability for applications assistance or customer product design. Customers are responsible for their products and applications using TI components. To minimize the risks associated with customer products and applications, customers should provide adequate design and operating safeguards.

TI does not warrant or represent that any license, either express or implied, is granted under any TI patent right, copyright, mask work right, or other TI intellectual property right relating to any combination, machine, or process in which TI products or services are used. Information published by TI regarding third-party products or services does not constitute a license from TI to use such products or services or a warranty or endorsement thereof. Use of such information may require a license from a third party under the patents or other intellectual property of the third party, or a license from TI under the patents or other intellectual property of TI.

Reproduction of TI information in TI data books or data sheets is permissible only if reproduction is without alteration and is accompanied by all associated warranties, conditions, limitations, and notices. Reproduction of this information with alteration is an unfair and deceptive business practice. TI is not responsible or liable for such altered documentation. Information of third parties may be subject to additional restrictions.

Resale of TI products or services with statements different from or beyond the parameters stated by TI for that product or service voids all express and any implied warranties for the associated TI product or service and is an unfair and deceptive business practice. TI is not responsible or liable for any such statements.

TI products are not authorized for use in safety-critical applications (such as life support) where a failure of the TI product would reasonably be expected to cause severe personal injury or death, unless officers of the parties have executed an agreement specifically governing such use. Buyers represent that they have all necessary expertise in the safety and regulatory ramifications of their applications, and acknowledge and agree that they are solely responsible for all legal, regulatory and safety-related requirements concerning their products and any use of TI products in such safety-critical applications, notwithstanding any applications-related information or support that may be provided by TI. Further, Buyers must fully indemnify TI and its representatives against any damages arising out of the use of TI products in such safety-critical applications.

TI products are neither designed nor intended for use in military/aerospace applications or environments unless the TI products are specifically designated by TI as military-grade or "enhanced plastic." Only products designated by TI as military-grade meet military specifications. Buyers acknowledge and agree that any such use of TI products which TI has not designated as military-grade is solely at the Buyer's risk, and that they are solely responsible for compliance with all legal and regulatory requirements in connection with such use.

TI products are neither designed nor intended for use in automotive applications or environments unless the specific TI products are designated by TI as compliant with ISO/TS 16949 requirements. Buyers acknowledge and agree that, if they use any non-designated products in automotive applications, TI will not be responsible for any failure to meet such requirements.

Following are URLs where you can obtain information on other Texas Instruments products and application solutions:

Products		Applications	
Amplifiers	amplifier.ti.com	Audio	www.ti.com/audio
Data Converters	dataconverter.ti.com	Automotive	www.ti.com/automotive
DSP	dsp.ti.com	Broadband	www.ti.com/broadband
Clocks and Timers	www.ti.com/clocks	Digital Control	www.ti.com/digitalcontrol
Interface	interface.ti.com	Medical	www.ti.com/medical
Logic	logic.ti.com	Military	www.ti.com/military
Power Mgmt	power.ti.com	Optical Networking	www.ti.com/opticalnetwork
Microcontrollers	microcontroller.ti.com	Security	www.ti.com/security
RFID	www.ti-rfid.com	Telephony	www.ti.com/telephony
RF/IF and ZigBee® Solutions	www.ti.com/lprf	Video & Imaging	www.ti.com/video
		Wireless	www.ti.com/wireless

Mailing Address: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
Copyright © 2008, Texas Instruments Incorporated



LM193 LM293 - LM393

LOW POWER DUAL VOLTAGE COMPARATORS

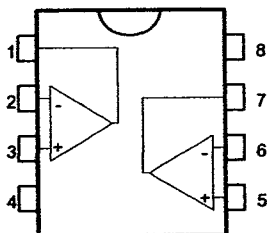
- WIDE SINGLE SUPPLY VOLTAGE RANGE OR DUAL SUPPLIES : +2V TO +36V OR ±1V TO ±18V
- VERY LOW SUPPLY CURRENT (0.4mA) INDEPENDENT OF SUPPLY VOLTAGE (1mW/comparator at +5V)
- LOW INPUT BIAS CURRENT : 25nA TYP
- LOW INPUT OFFSET CURRENT : ±5nA TYP
- LOW INPUT OFFSET VOLTAGE : ±1mV TYP
- INPUT COMMON-MODE VOLTAGE RANGE INCLUDES GROUND
- LOW OUTPUT SATURATION VOLTAGE : 250mV TYP. ($I_o = 4mA$)
- DIFFERENTIAL INPUT VOLTAGE RANGE EQUAL TO THE SUPPLY VOLTAGE
- TTL, DTL, ECL, MOS, CMOS COMPATIBLE OUTPUTS

DESCRIPTION

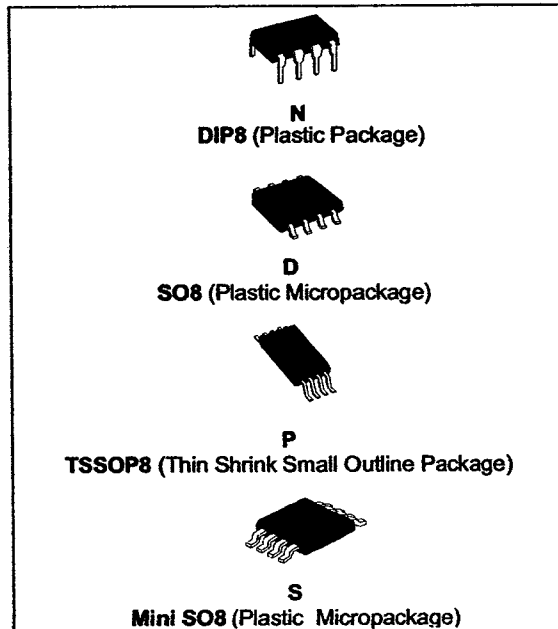
These devices consist of two independent low voltage comparators designed specifically to operate from a single supply over a wide range of voltages. Operation from split power supplies is also possible.

These comparators also have a unique characteristic in that the input common-mode voltage range includes ground even though operated from a single power supply voltage.

PIN CONNECTIONS (top view)



- 1 - Output 1
- 2 - Inverting input 1
- 3 - Non-inverting input 1
- 4 - V_{CC}^-
- 5 - Non-inverting input 2
- 6 - Inverting input 2
- 7 - Output 2
- 8 - V_{CC}^+



ORDER CODE

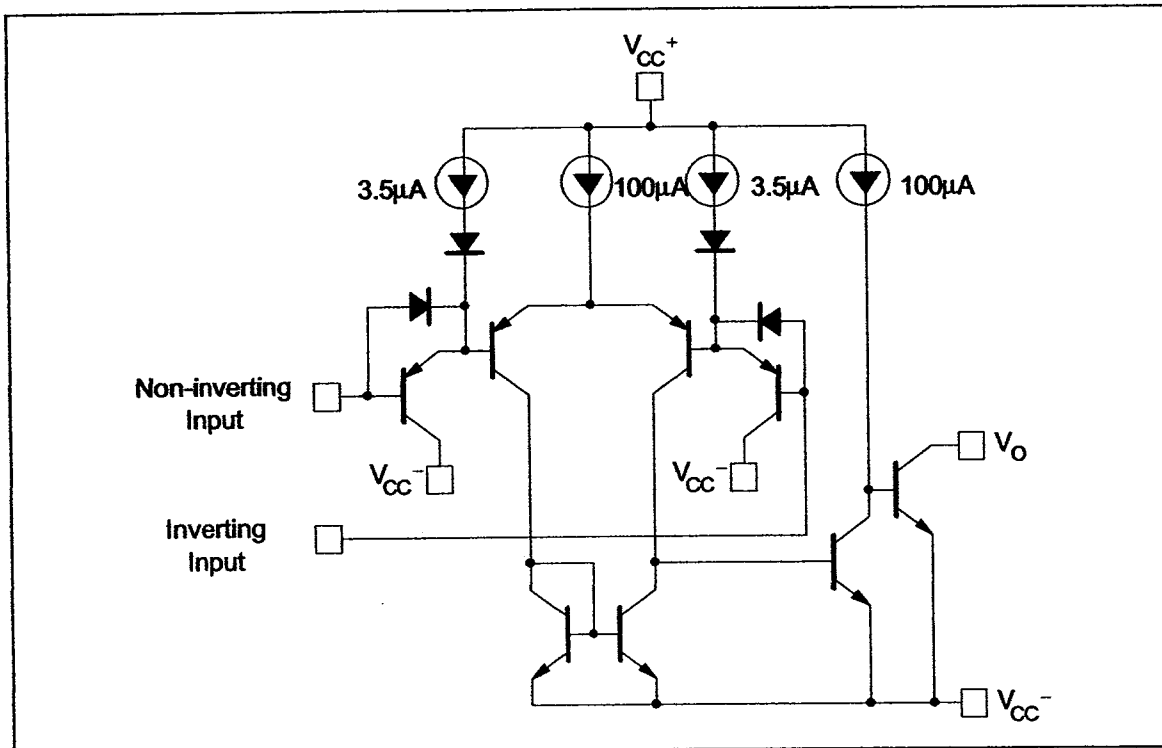
Part Number	Temperature Range	Package			
		N	D	P	S
LM193	-55°C, +125°C	•	•	•	•
LM293	-40°C, +105°C	•	•	•	•
LM393	0°C, +70°C	•	•	•	•

Example : LM393D

N = Dual in Line Package (DIP)
D = Small Outline Package (SO) - also available in Tape & Reel (DT)
P = Thin Shrink Small Outline Package (TSSOP) - only available in Tape & Reel (PT)
S = MiniSO Package (MiniSO) only available in Tape & Reel (ST)

LM193-LM293-LM393

SCHEMATIC DIAGRAM (1/2 LM193)



ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Symbol	Parameter	Value	Unit
V_{CC}	Supply voltage	± 18 or 36	V
V_{id}	Differential Input Voltage	± 36	V
V_i	Input Voltage	-0.3 to +36	V
	Output Short-circuit to Ground - note 1)	Infinite	
P_d	Power Dissipation 2) DIP8 SO8 TSSOP8 Mini SO8	1250 710 625 580	mW
T_{stg}	Storage Temperature Range	-65 to +150	$^{\circ}\text{C}$

- Short-circuits from the output to V_{CC}^+ can cause excessive heating and eventual destruction. The maximum output current is approximately 20mA independent of the magnitude of V_{CC}^+ .
- P_d is calculated with $T_{amb} = +25^{\circ}\text{C}$, $T_j = +150^{\circ}\text{C}$ and R_{thja} = 100 $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ for DIP8 package
= 175 $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ for SO8 package
= 200 $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ for TSSOP8 package
= 215 $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ for Mini SO8 package

OPERATING CONDITIONS

Symbol	Parameter	Value	Unit
V_{icm}	Common Mode Input Voltage Range	0 to $V_{CC}^+ - 1.5$	V
T_{oper}	Operating Free-Air Temperature range LM193 LM293 LM393	-55 to +125 -40 to +125 0 to +70	$^{\circ}\text{C}$

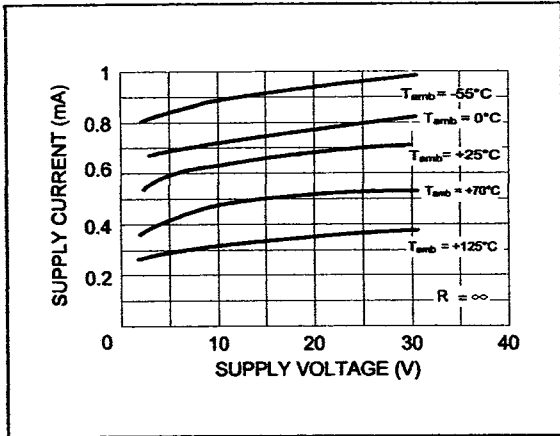
ELECTRICAL CHARACTERISTICS $V_{CC}^+ = +5V$, $V_{CC}^- = 0V$, $T_{amb} = +25^\circ C$ (unless otherwise specified)

Symbol	Parameter	Min	Typ.	Max.	Unit
V_{io}	Input Offset Voltage - note 1) $T_{amb} = +25^\circ C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$		1	5 9	mV
I_{ib}	Input Bias Current - note 2) $T_{amb} = +25^\circ C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$		25	250 400	nA
I_{io}	Input Offset Current $T_{amb} = +25^\circ C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$		5	50 150	nA
A_{vd}	Large Signal Voltage Gain $V_{CC} = 15V$, $R_L = 15k\Omega$, $V_o = 1V$ to $11V$	50	200		V/mV
I_{CC}	Supply Current (all comparators) $V_{CC} = 5V$, no load $V_{CC} = 30V$, no load		0.4 1	1 2.5	mA
V_{icm}	Input Common Mode Voltage Range - note 3) $T_{amb} = +25^\circ C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$	0 0		$V_{CC}^+ - 1.5$ $V_{CC}^+ - 2$	V
V_{id}	Differential Input Voltage -note 4)			V_{CC}^+	V
I_{sink}	Output Sink Current $V_{id} = 1V$, $V_o = 1.5V$	6	16		mA
V_{OL}	Low Level Output Voltage $V_{id} = -1V$, $I_{sink} = 4mA$ $T_{amb} = +25^\circ C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$		250	400 700	mV
I_{OH}	High Level Output Current ($V_{id} = 1V$) $V_{id} = 1V$, $V_{CC} = V_o = 30V$ $T_{amb} = +25^\circ C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$		0.1	1	nA μA
t_{re}	Response Time - note 5) $R_L = 5.1k\Omega$ to V_{CC}^+		1.3		μs
t_{rel}	Large Signal Response Time $V_i = TTL$, $V_{(ref)} = +1.4V$, $R_L = 5.1k\Omega$ to V_{CC}^+		300		ns

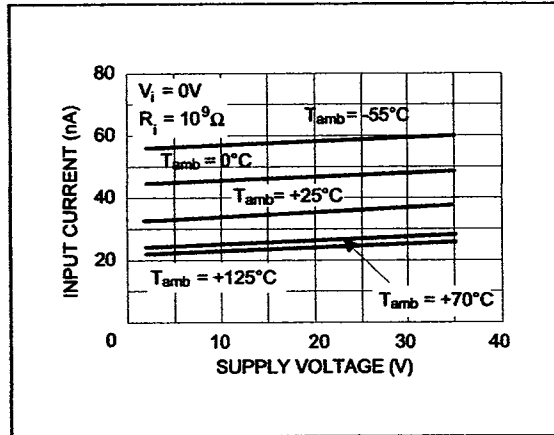
- At output switch point, $V_o = 1.4V$, $R_a = 0$ with V_{CC}^+ from $5V$ to $30V$, and over the full common-mode range ($0V$ to $V_{CC}^+ - 1.5V$).
- The direction of the input current is out of the IC due to the PNP input stage. This current is essentially constant, independent of the state of the output, so no loading charge exists on the reference of input lines.
- The input common-mode voltage of either input signal voltage should not be allowed to go negative by more than $0.3V$. The upper end of the common-mode voltage range is $V_{CC}^+ - 1.5V$, but either or both inputs can go to $+30V$ without damage.
- Positive excursions of input voltage may exceed the power supply level. As long as the other voltage remains within the common-mode range, the comparator will provide a proper output state. The low input voltage state must not be less than $-0.3V$ (or $0.3V$ below the negative power supply, if used).
- The response time specified is for a $100mV$ input step with $5mV$ overdrive. For larger overdrive signals $300ns$ can be obtained.

LM193-LM293-LM393

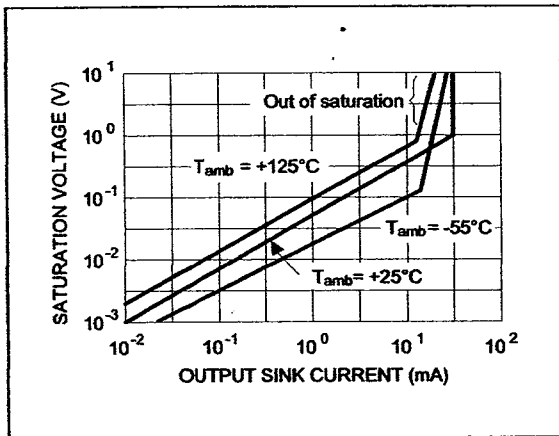
SUPPLY CURRENT versus SUPPLY VOLTAGE



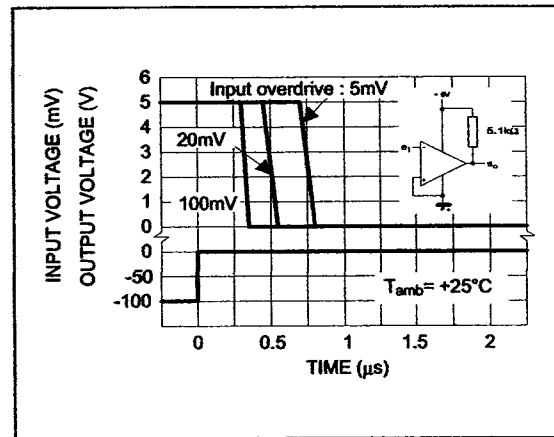
INPUT CURRENT versus SUPPLY VOLTAGE



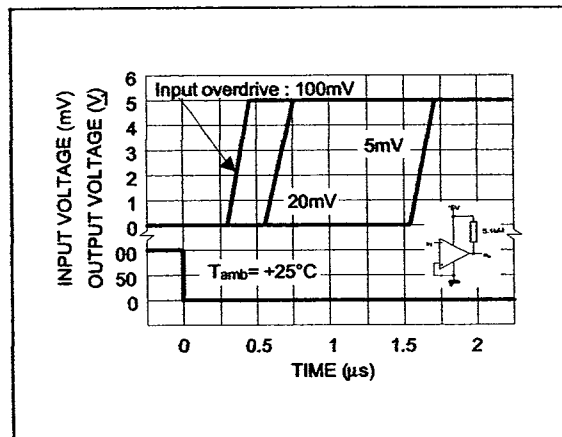
OUTPUT SATURATION VOLTAGE versus OUTPUT CURRENT



RESPONSE TIME FOR VARIOUS INPUT OVERDRIVES - NEGATIVE TRANSITION

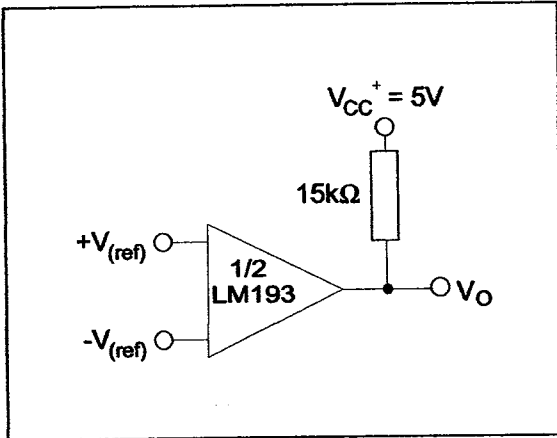


RESPONSE TIME FOR VARIOUS INPUT OVERDRIVES - POSITIVE TRANSITION

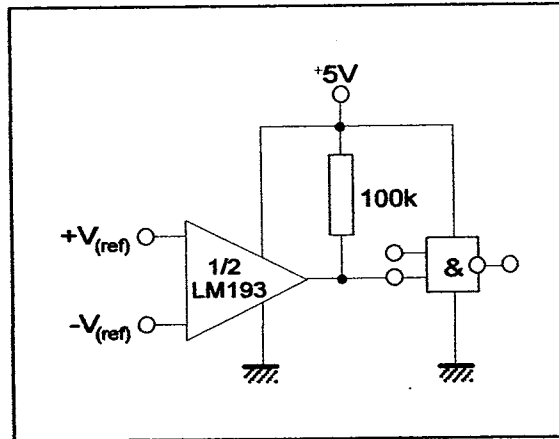


TYPICAL APPLICATIONS

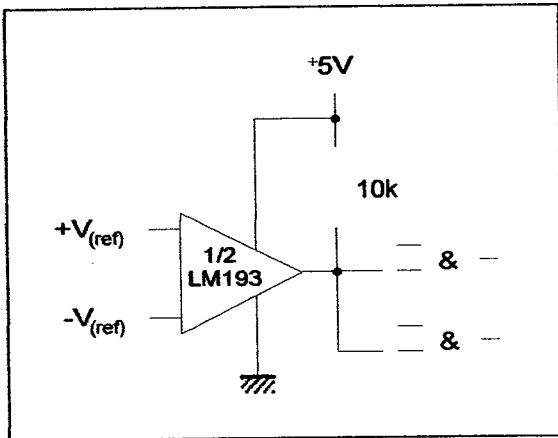
BASIC COMPARATOR



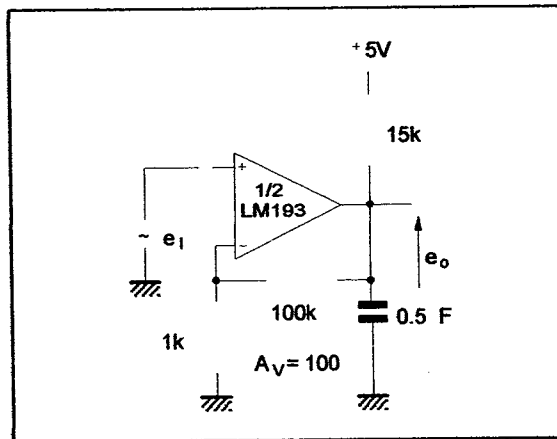
DRIVING CMOS



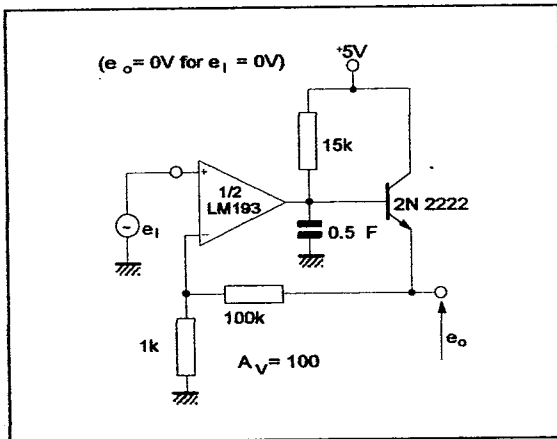
DRIVING TTL



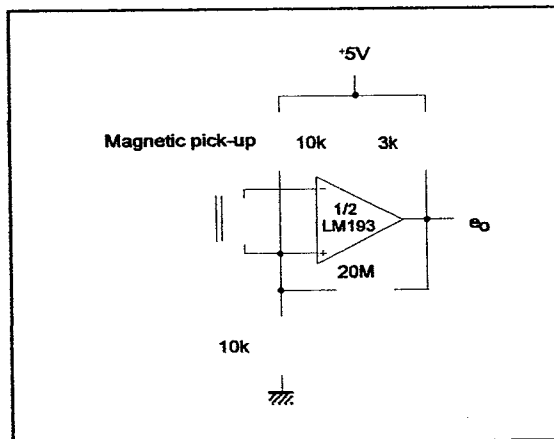
LOW FREQUENCY OP AMP



LOW FREQUENCY OP AMP

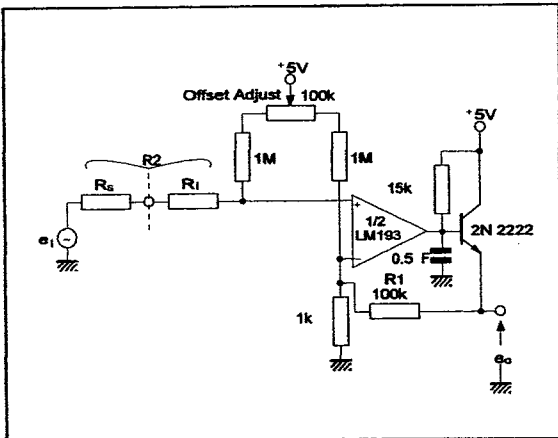


TRANSDUCER AMPLIFIER

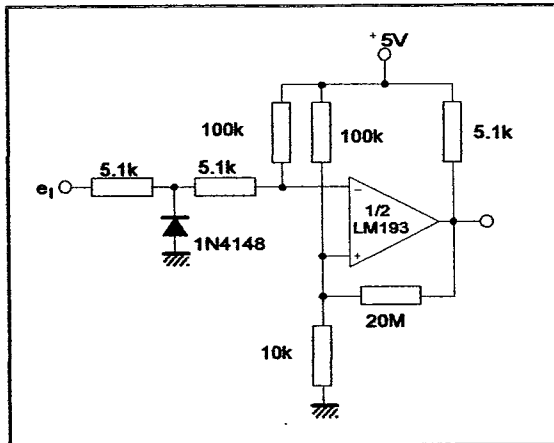


LM193-LM293-LM393

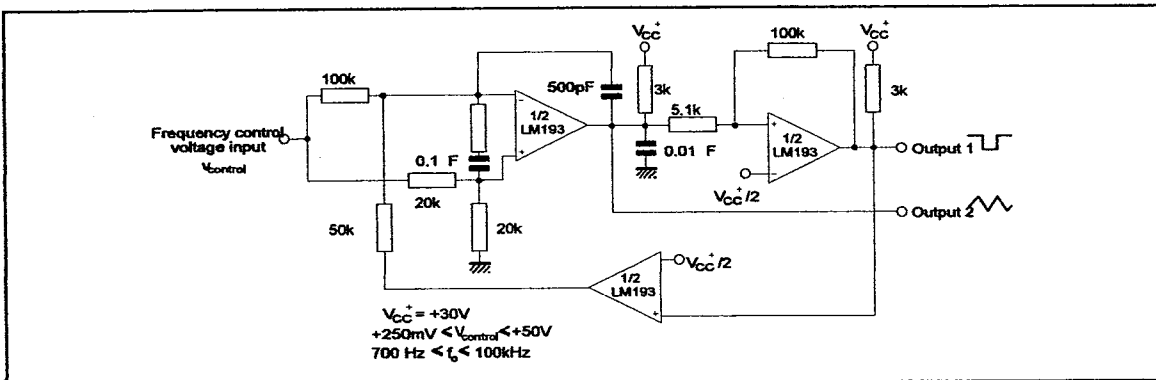
LOW FREQUENCY OP AMP WITH OFFSET ADJUST



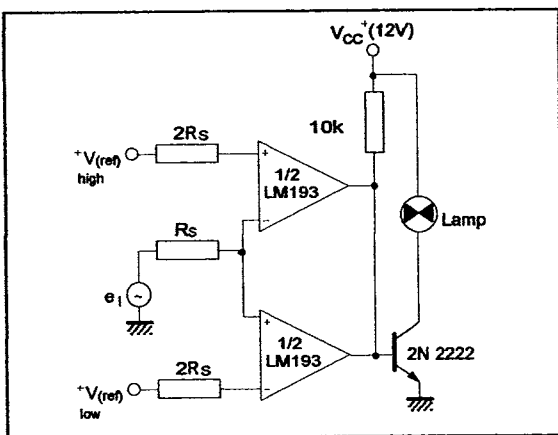
ZERO CROSSING DETECTOR (single power supply)



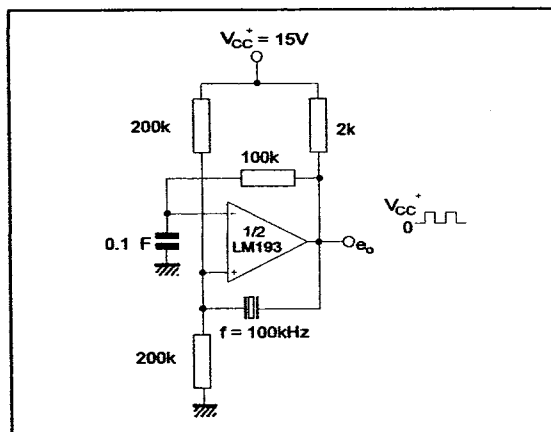
TWO-DECADE HIGH-FREQUENCY VCO



LIMIT COMPARATOR

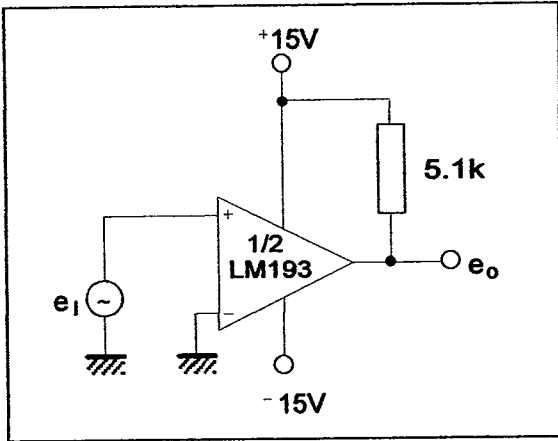


CRYSTAL CONTROLLED OSCILLATOR

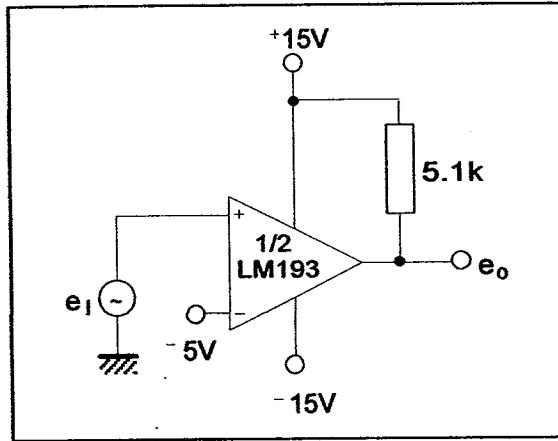


SPLIT-SUPPLY APPLICATIONS

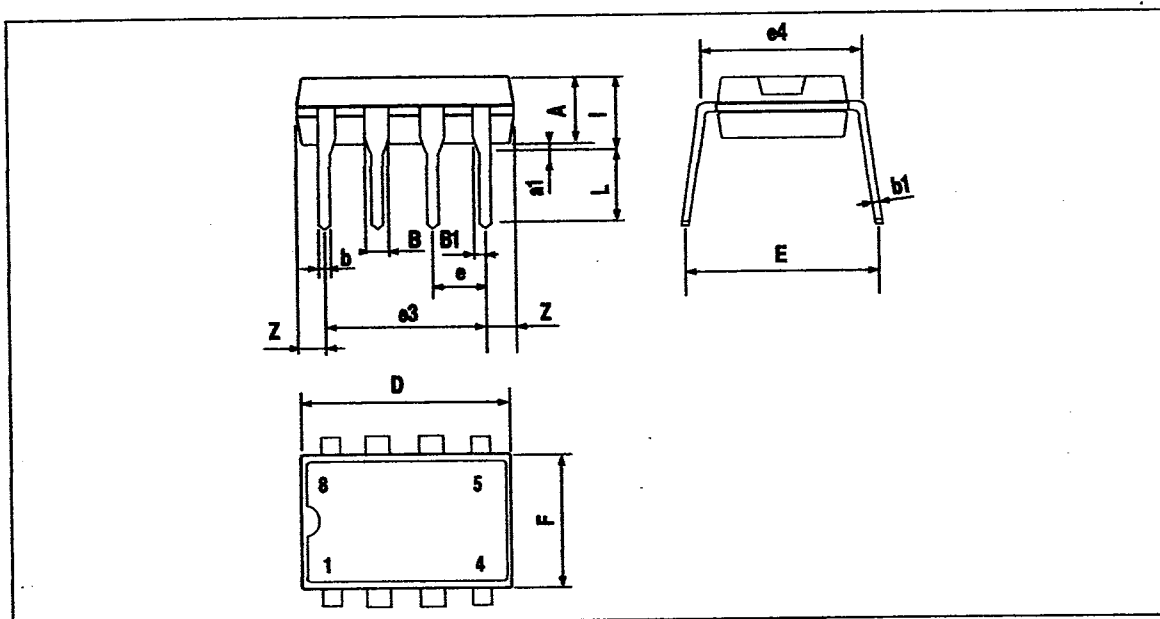
ZERO CROSSING DETECTOR



COMPARATOR WITH A NEGATIVE REFERENCE

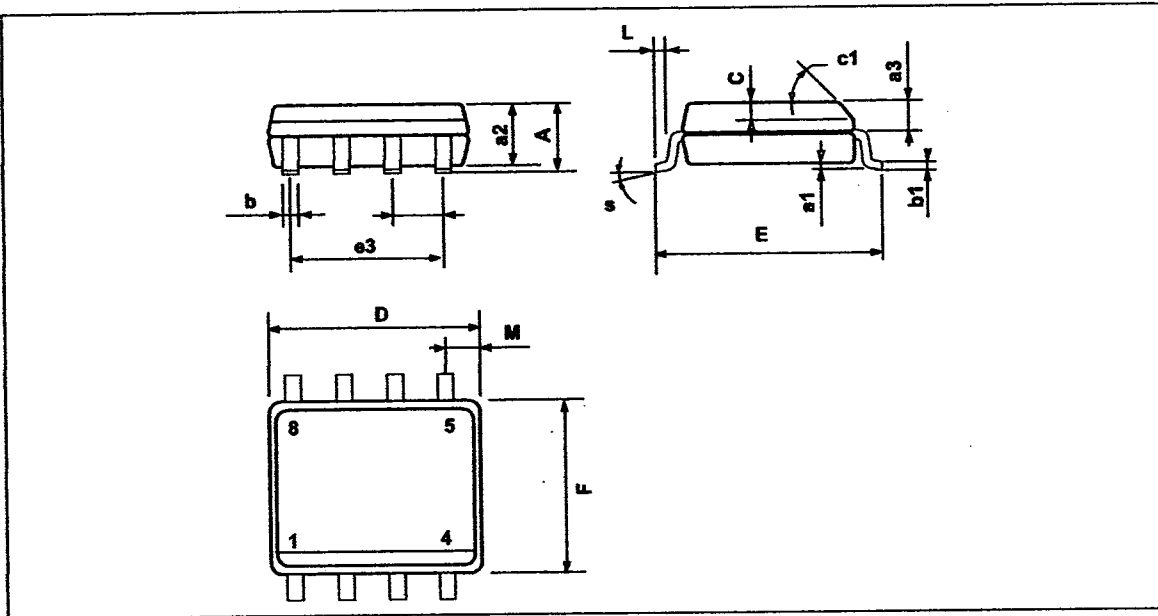


LM193-LM293-LM393

PACKAGE MECHANICAL DATA
8 PINS - PLASTIC DIP

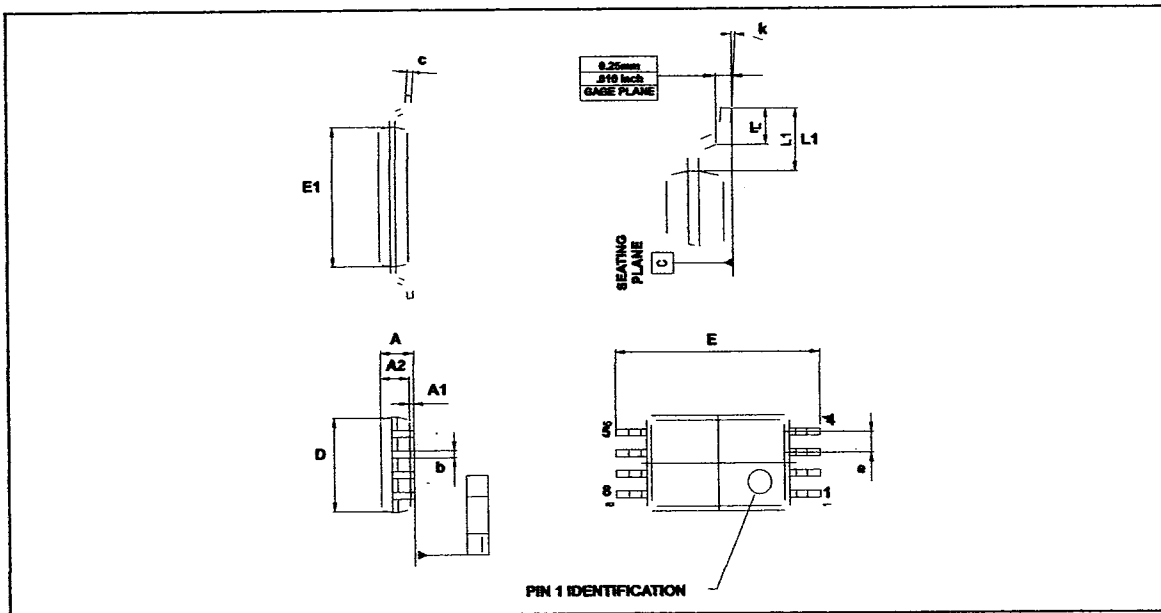
Dimensions	Millimeters			Inches		
	Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.
A		3.32			0.131	
a1	0.51			0.020		
B	1.15		1.65	0.045		0.065
b	0.356		0.55	0.014		0.022
b1	0.204		0.304	0.008		0.012
D			10.92			0.430
E	7.95		9.75	0.313		0.384
e		2.54			0.100	
e3		7.62			0.300	
e4		7.62			0.300	
F			6.6			0.260
i			5.08			0.200
L	3.18		3.81	0.125		0.150
Z			1.52			0.060

PACKAGE MECHANICAL DATA
8 PINS - PLASTIC MICROPACKAGE (SO)



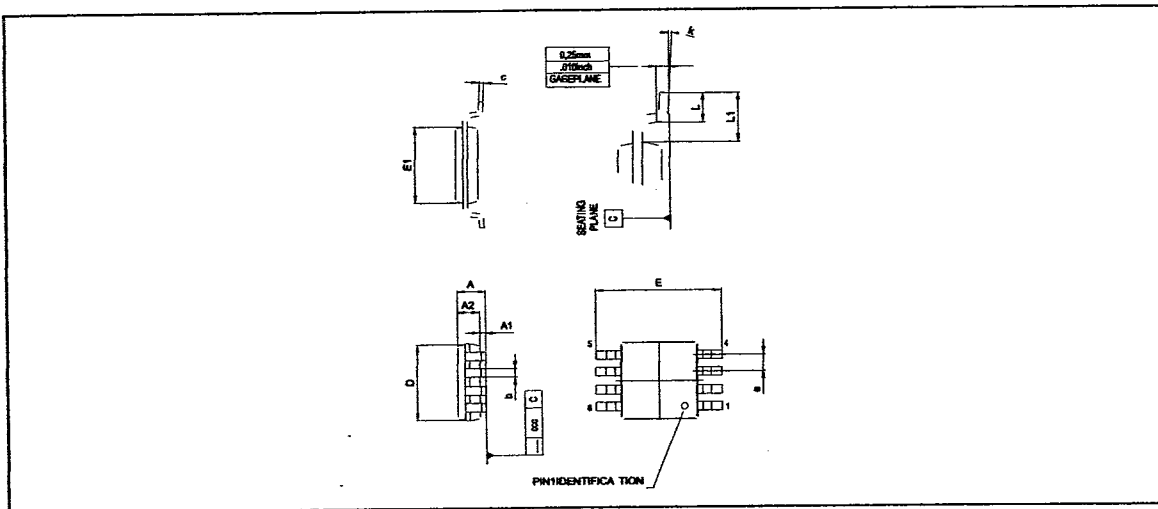
Dimensions	Millimeters			Inches		
	Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.
A			1.75			0.069
a1	0.1		0.25	0.004		0.010
a2			1.65			0.065
a3	0.65		0.85	0.026		0.033
b	0.35		0.48	0.014		0.019
b1	0.19		0.25	0.007		0.010
C	0.25		0.5	0.010		0.020
c1	45° (typ.)					
D	4.8		5.0	0.189		0.197
E	5.8		6.2	0.228		0.244
e		1.27			0.050	
e3		3.81			0.150	
F	3.8		4.0	0.150		0.157
L	0.4		1.27	0.016		0.050
M			0.6			0.024
S	8° (max.)					

PACKAGE MECHANICAL DATA
8 PINS - THIN SHRINK SMALL OUTLINE PACKAGE



Dimensions	Millimeters			Inches		
	Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.
A			1.20			0.05
A1	0.05		0.15	0.01		0.006
A2	0.80	1.00	1.05	0.031	0.039	0.041
b	0.19		0.30	0.007		0.15
c	0.09		0.20	0.003		0.012
D	2.90	3.00	3.10	0.114	0.118	0.122
E		6.40			0.252	
E1	4.30	4.40	4.50	0.169	0.173	0.177
e		0.65			0.025	
k	0°		8°	0°		8°
l	0.50	0.60	0.75	0.09	0.0236	0.030
L	0.45	0.600	0.75	0.018	0.024	0.030
L1		1.000			0.039	

LM193-LM293-LM393

PACKAGE MECHANICAL DATA
8 PINS - PLASTIC MICROPACKAGE (miniSO)


Dimensions	Millimeters			Inches		
	Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.
A			1.100			0.043
A1	0.050	0.100	0.150	0.002	0.004	0.006
A2	0.780	0.860	0.940	0.031	0.034	0.037
b	0.250	0.330	0.400	0.010	0.013	0.016
c	0.130	0.180	0.230	0.005	0.007	0.009
D	2.900	3.000	3.100	0.114	0.118	0.122
E	4.750	4.900	5.050	0.187	0.193	0.199
E1	2.900	3.000	3.100	0.114	0.118	0.122
e		0.650			0.026	
L	0.400	0.550	0.700	0.016	0.022	0.028
L1		0.950			0.037	
k	0d	3d	6d	0d	3d	6d
aaa			0.100			0.004

Information furnished is believed to be accurate and reliable. However, STMicroelectronics assumes no responsibility for the consequences of use of such information nor for any infringement of patents or other rights of third parties which may result from its use. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of STMicroelectronics. Specifications mentioned in this publication are subject to change without notice. This publication supersedes and replaces all information previously supplied. STMicroelectronics products are not authorized for use as critical components in life support devices or systems without express written approval of STMicroelectronics.

© The ST logo is a registered trademark of STMicroelectronics

© 2002 STMicroelectronics - Printed in Italy - All Rights Reserved
 STMicroelectronics GROUP OF COMPANIES

Australia - Brazil - Canada - China - Finland - France - Germany - Hong Kong - India - Israel - Italy - Japan - Malaysia
 Malta - Morocco - Singapore - Spain - Sweden - Switzerland - United Kingdom - United States
 © <http://www.st.com>

This datasheet has been download from:

www.datasheetcatalog.com

Datasheets for electronics components.