

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาระบบ CVD เบื้องต้นสำหรับสร้างฟิล์มบาง SnO₂ โดยใช้เทคนิค CVD

Introduction study on CVD system for thin-film deposition of SnO₂



โดย
นาย จิรโรจ ถาวรรัตน์
นาย ไชยเชษฐ์ เบญจลักษณะกุล

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน **103098**
วัน,เดือน,ปี... **2.7.ส.ค. 2552**

b. 12091639
i.

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2551

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาระบบ CVD เบื้องต้นสำหรับสร้างฟิล์มบาง SnO₂ โดยใช้เทคนิค CVD

Introduction study on CVD system for thin-film deposition of SnO₂



โดย

นาย จจรจ อวรวรตน์

นาย ไชยเชษฐ เบญจถกษณกุล

อาจารย์ที่ปรกษา

พศ.ดร.สุรัชย ชัยตทรรค์กต

ปรญญานพนธ์สำหรับปรญญาวศวกรรมศตรบณฑต

ศขวอวศอเลกทรอนกส์

คณะวศวกรรมศตร

ศถบบนศทคโนลยพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารศดกระบัง

ปการศศกษา 2551

เอกศทรน้เป็นเอกศทรน้ที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพอการศศกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านกรค้า
ไม่ว่ากรณใด ๆ ทั้งสิ้น อกทงห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกศทรน้ทุกคร้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ ปีการศึกษา 2551

ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาระบบ CVD เบื้องต้นสำหรับสร้างฟิล์มบาง SnO₂ โดยใช้เทคนิค CVD

(Introduction study on CVD system for thin-film deposition of SnO₂)

ผู้จัดทำ

นายจิรโรจ ถาวรรัตน์

รหัสประจำตัว 48010129

นายไชยเชษฐ์ เบญจลักษณ์กุล

รหัสประจำตัว 48010223

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ. ดร. สุทธิชัย ชัยสิทธิ์ศักดิ์)

วันที่ / /

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาระบบCVD เบื้องต้นสำหรับสร้างฟิล์มบางSnO₂

นาย จิร ไรจ ถาวรรัตน์ รหัส 48010129

นาย ไชยเชษฐ์ เบญจลักษณ์กุล รหัส 48010223

ผศ.ดร.สุรัชชัย ชัยสิทธิ์ศักดิ์ อาจารย์ที่ปรึกษา

ภาคการศึกษาที่ 2 ปีการศึกษา 2551

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการศึกษาการสร้างชั้นฟิล์มบาง ทินออกไซด์ (SnO₂)บนกระจก ด้วยวิธี CVD (Chemical Vapor Deposition) เพื่อใช้เป็นตัวนำโปร่งแสงในเซลล์แสงอาทิตย์ โดยโครงการนี้ได้ออกแบบและสร้างระบบ CVD ซึ่งจะประกอบไปด้วย ขดลวดความร้อน, เครื่องผลิตหมอก, ท่อแก้วทนความร้อน และฝาปิดสุญญากาศ โดยสารเคมีตั้งต้นที่ใช้ในการทดลองคือ ทินคลอไรด์ (SnCl₄) และ แอมโมเนียมฟลูออไรด์ (NH₄F) ในการทำการทดลองจะทำการควบคุมพารามิเตอร์ต่างๆเช่น ระบบ, อุณหภูมิ, ก๊าซพาหะ, ตำแหน่งการวางชิ้นงาน และอัตราส่วนสารเคมีตั้งต้น ที่มีผลต่อการสร้างชั้นฟิล์มบาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Introduction study on CVD system for thin-films

deposition of SnO₂

Mr.Jirarot Thavonrat ID 48010129

Mr. Chaiyachet Benjaluksanakul ID 48010223

Asst.Prof.Dr.Sutichai Chaisitisak (Advisor)

Semester 2 Educational Year 2008

Abstract

This project studies the fabrication of Tin Oxide (SnO₂) thin films on glass substrates by using CVD (Chemical Vapor Deposition) technique as a conductive translucency for solar cells. In this project the CVD system was designed and built which consisted of a heater coil, an atomizer, a quartz tube and a vacuum cover. Chemical substance used in the preparation are Tin chloride(SnCl₂) and Ammonium Fluoride (NH₄F).The effect of fabrication process parameter such as systems,temperature, carrier gas, position of substrate and chemical substances

สารบัญ

เนื้อหา	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 วัตถุประสงค์	1
1.2 ขอบเขตของโครงการ	1
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการ	1
บทที่ 2 ฟิล์มบาง	
2.1 Transparent Conductive Oxide(TCOs)	3
2.2 ฟิล์มบางตัวนำไฟฟ้าโปร่งใส	5
2.2.1 วัสดุตัวนำไฟฟ้าโปร่งใสออกไซด์ชนิดสารประกอบ 2 ชนิด	6
2.2.2 วัสดุตัวนำไฟฟ้าโปร่งใสออกไซด์ชนิดสารประกอบ 2 ชนิดผสมกัน	6
2.2.3 วัสดุตัวนำไฟฟ้าโปร่งใสออกไซด์ชนิดสารประกอบ 3 ชนิด	7
2.2.4 วัสดุตัวนำไฟฟ้าโปร่งใสออกไซด์ชนิดสารประกอบ 3 ชนิดผสมกัน	7
2.2.5 แนวทางการออกแบบวัสดุตัวนำไฟฟ้าโปร่งใสออกไซด์	7
2.3 วิธีการเลือกวัสดุตัวนำไฟฟ้าโปร่งใส	8
2.3.1 อุปกรณ์ที่มีการใช้วัสดุตัวนำไฟฟ้าโปร่งใส	9
2.3.2 กระบวนการผลิตวัสดุตัวนำไฟฟ้าโปร่งใสสำหรับการใช้งาน	9
2.3.3 สมบัติที่มีผลในการเลือกวัสดุตัวนำไฟฟ้าโปร่งใส	11
2.3.4 การเลือกใช้วัสดุตัวนำไฟฟ้าโปร่งใสออกไซด์	15
2.3.4.1 การเลือกวัสดุตัวนำไฟฟ้าโปร่งใสบางชนิดไปใช้งานต่างๆ	15
บทที่ 3 คุณสมบัติของดีบุกออกไซด์ และ แอมโมเนียมฟลูออไรด์	18
3.1 วัสดุตัวนำไฟฟ้าโปร่งใสดีบุกออกไซด์	18
3.1.1 โครงสร้างของดีบุกออกไซด์	18
3.1.2 สมบัติทางไฟฟ้าของดีบุกออกไซด์	19
3.1.3 สมบัติทางแสงของดีบุกออกไซด์	20
3.1.3.1 ผลของแสงที่มีต่อสารกึ่งตัวนำ	20
3.2 แอมโมเนียมฟลูออไรด์ (NH ₄ F)	24

บทที่ 4 Chemical Vapor Deposition (CVD)	25
4.1 Chemical Vapor Deposition (CVD)	
4.1.1 ขั้นตอนการเกิดผลึกฟิล์มในกระบวนการ CVD	25
4.1.2 การเกิดปฏิกิริยาในแบบต่างๆของ CVD	26
4.1.3 ฐานรองในกระบวนการ CVD	29
4.1.4 ปัจจัยในการเกิดฟิล์ม	29
4.1.5 ประเภทของกระบวนการ CVD	29
บทที่ 5 ขั้นตอนการทดลอง	32
5.1 การเตรียมฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ที่เจือด้วยฟลูออรีน ($\text{SnO}_2:\text{F}$)	32
5.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง $\text{SnO}_2:\text{F}$	32
5.1.2 วิธีการเตรียมฟิล์มบาง $\text{SnO}_2:\text{F}$	32
5.2 การออกแบบระบบ CVD	33
5.2.1 เครื่องกำเนิดไอเคมี	33
5.2.2 ระบบ CVD ที่ใช้ทำการทดลอง	34
บทที่ 6 ผลการทดลองและสรุปผลการทดลอง	39
6.1 ผลการวัดค่าความต้านทานแผ่น	39
6.2 สรุปผลการทดลอง	39
6.3 แนวทางการพัฒนา	40
ข้อมูลอ้างอิง	41
กิตติกรรมประกาศ	42

สารบัญรูป

รูป	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงชั้น TCO ซึ่งสร้างด้วยวิธี CVD	4
รูปที่ 2.2 แถบพลังงานของวัสดุตัวนำไฟฟ้าโปร่งใสแบบสารประกอบ 2 ชนิด (O), 3 ชนิด (Δ) และแบบออกไซด์หลายชนิดผสมกัน (เส้นประ)	8
รูปที่ 3.1 โครงสร้างของดีบุกออกไซด์	18
รูปที่ 3.2 โครงสร้างผลึกแบบ tetragonal rutile ของผลึกดีบุกออกไซด์	18
รูปที่ 3.3 แถบพลังงานสารกึ่งตัวชนิดเอ็น	20
รูปที่ 3.4 ลำแสงตกลงบนวัสดุสารกึ่งตัวนำ	21
รูปที่ 3.5 การดูดกลืนแสง (Absorption) และการเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเอง (Spontaneous Emission) ระหว่างชั้นพลังงาน E_1 และ E_2	21
รูปที่ 3.6 ความสัมพันธ์พลังงานโฟตอนและความยาวคลื่น	22
รูปที่ 3.7 การส่งผ่านแสงของวัสดุดีบุกออกไซด์	23
รูปที่ 4.1 ตัวอย่างระบบ CVD	25
รูปที่ 4.2 แสดงขั้นตอนการเกิดผลึกบนฐานรอง	26
รูปที่ 4.3 ตัวอย่างเครื่อง Thermal CVD	30
รูปที่ 5.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	32
รูปที่ 5.2 ชุดกำเนิดไอเคมีแบบที่ 1	33
รูปที่ 5.3 ชุดกำเนิดไอเคมีแบบที่ 2	34
รูปที่ 5.4 ชุดกำเนิดไอเคมีแบบที่ 3	34
รูปที่ 5.5 ระบบ CVD โดยตั้งระบบในแนวราบ	35
รูปที่ 5.6 ชิ้นงานการปลูกฟิล์มในระบบที่ 1	36
รูปที่ 5.7 ระบบ CVD ตั้งระบบในแนวตั้ง	36
รูปที่ 5.8 Heater ที่ใช้ในระบบแรก	37
รูปที่ 5.9 Heater ที่ออกแบบขึ้นมาใหม่โดยใช้ Heater แบบแบ่งใส่เข้าไปภายในบล็อก	37
รูปที่ 5.10 ระบบแบบ CVD แบบแนวตั้งที่ใช้	37
รูปที่ 5.11 ระบบ CVD แบบเปิด	38
รูปที่ 6.1 ตำแหน่งในการวัด R ด้วยมัลติมิเตอร์	39

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของ TCOs ชนิดต่างๆ	4
ตารางที่ 2.2 กระบวนการเตรียมฟิล์มตัวนำไฟฟ้าโปร่งใสในอดีตที่ผ่านมา	10
ตารางที่ 2.3 ค่าประสิทธิภาพของวัสดุตัวนำไฟฟ้าโปร่งใสบางชนิด	12
ตารางที่ 2.4 ค่าต่ำสุดของค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าและความถี่พลาสมา ของวัสดุนำไฟฟ้าโปร่งใส	13
ตารางที่ 2.5 ค่าความแข็งของวัสดุนำไฟฟ้าโปร่งใสบางชนิด	14
ตารางที่ 2.6 การเลือกวัสดุนำไฟฟ้าโปร่งใส	15
ตารางที่ 3.1 ข้อดี-ข้อเสีย SnO ₂ :F เมื่อเทียบกับ ITO	23
ตารางที่ 4.1 บวกข้อดีและข้อเสียของกระบวนการ CVD แต่ละชนิด	31

บทที่ 1

บทนำ

1.1 วัตถุประสงค์

- เพื่อศึกษาทฤษฎีของ Transparent Conductive Oxides
- เพื่อศึกษากระบวนการสร้างชั้นฟิล์ม SnO_2 โดยกระบวนการ Chemical Vapor Deposition ในรูปแบบต่างๆ
- เพื่อศึกษาวิธีการออกแบบและสร้าง กระบวนการ Chemical Vapor Deposition อย่างง่าย และราคาถูก
- เพื่อศึกษาวิเคราะห์และแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นในระบบ Chemical Vapor Deposition

1.2 ขอบเขตของโครงการ

ในโครงการนี้จะทำการศึกษา และออกแบบระบบ CVD ในรูปแบบต่างๆและเพื่อศึกษาผลที่เกิดขึ้นของระบบ ว่ามีความแตกต่างของชิ้นงานที่ได้เป็นอย่างไร พร้อมทั้งศึกษาวิธีแก้ไขปัญหาที่เป็นไปได้ของระบบนั้นๆด้วย และ การเตรียมฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ (SnO_2) ที่เจือด้วยอะตอมฟลูออรีน (F) โดยใช้ไอเคมีของสารละลาย SnCl_2 และ NH_4F

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการนี้

- ทำให้ทราบถึงหลักการและวิธีการเตรียมฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ (SnO_2)
- ทำให้ได้ความรู้เพิ่มเติมในวิธีการเตรียมฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ (SnO_2) ที่เจือไนต์ต่างๆ ที่เหมาะนำไปประยุกต์ทำเป็นขั้วไฟฟ้า โปร่งแสงของ thin-film solar cell
- ทำให้ทราบถึงหลักการออกแบบระบบ CVD และการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นในระบบเพื่อพัฒนาต่อยอดให้ได้ระบบที่สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

บทที่ 2

ฟิล์มบาง (Thin Film)

สารที่มีคุณสมบัติอยู่ระหว่างตัวนำและฉนวนเราเรียกว่าสารกึ่งตัวนำ เช่น ซิลิกอน (Silicon) และเยอรมันเนียม (Germanium) สารกึ่งตัวนำ เช่น ซิลิกอนและเยอรมันเนียมนี้ ที่อุณหภูมิห้องจะมีแรงจับตัวกันระหว่างนิวเคลียสและอิเล็กตรอนค่อนข้างจะเหนียวแน่น จึงไม่มีอิเล็กตรอนอิสระ ดังนั้นถึงแม้ว่าจะมีแรงดันไฟฟ้าจากภายนอกมากระทำก็ไม่มีกระแสไฟฟ้าไหล จึงทำหน้าที่เช่นเดียวกับฉนวนแต่แรงจับตัวกันดังกล่าวไม่เหนียวแน่นเท่าฉนวนเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นวาเลนซ์อิเล็กตรอนส่วนหนึ่งจะหลุดออกจากอะตอมเป็นอิเล็กตรอนอิสระเมื่อมีแรงดันไฟฟ้าจากภายนอก อิเล็กตรอนอิสระจะเคลื่อนที่ และเกิดกระแสไฟฟ้าไหลขึ้น อิเล็กตรอนอิสระดังกล่าวมีจำนวนน้อยมากเมื่อเทียบกับในตัวนำกระแสไฟฟ้าที่ไหลจึงน้อย

สารกึ่งตัวนำเป็นสารที่มีคุณสมบัติอยู่ระหว่างตัวนำและฉนวน เช่น ซิลิกอน เยอรมันเนียม เทลลูเรียม เป็นต้น สารดังกล่าวเหล่านี้มีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ คือมีจำนวนอิเล็กตรอนอิสระอยู่น้อยจึงไม่สามารถให้กระแสไฟฟ้าไหลเป็นจำนวนมาก ฉะนั้นถ้าพึ่งสารนี้อย่างเดียวแล้วไม่สามารถทำประโยชน์อะไรได้มากนัก ดังนั้น เพื่อที่จะให้ได้กระแสไฟฟ้าไหลเป็นจำนวนมากเราจึงต้องมีการปรุงแต่งโดยการเจือปนอะตอมของธาตุอื่นลงไป ในเนื้อสารเนื้อเดียวเหล่านี้ หรือเอาอะตอมของธาตุบางชนิดมาทำปฏิกิริยากันให้ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติตามที่ต้องการสารกึ่งตัวนำที่สร้างขึ้นโดยวิธีดังกล่าวนี้เรียกว่า สารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์ หรือสารกึ่งตัวนำแบบสารประกอบตามลำดับ ซึ่งจะเป็นสารที่ใช้ทำทรานซิสเตอร์ เซลล์แสงอาทิตย์ และไดโอดชนิดต่าง ๆ

สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (Intrinsic semiconductor) ที่มีเฉพาะอะตอมของธาตุชนิดเดียว คือไม่มีอะตอมของธาตุชนิดอื่นปนอยู่เลย หรือปราศจากการเจือปนด้วยอะตอมแปลกปลอม ซึ่งบางครั้งถูกเรียกว่าสารกึ่งตัวนำชนิด i (i-type) เช่นสารกึ่งตัวนำซิลิกอนบริสุทธิ์ หรือสารกึ่งตัวนำเยอรมันเนียมบริสุทธิ์ เป็นต้น

สารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์ (Extrinsic semiconductor) เป็นสารที่เกิดขึ้นจากการเติมสารเจือปนลงไป ในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ เช่น ซิลิกอน หรือเยอรมันเนียม เพื่อให้ได้สารกึ่งตัวนำที่มีสภาพการนำไฟฟ้าที่ดีขึ้น สารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์นี้แบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type) และสารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type) ในที่นี้จะขออธิบายโดยใช้สารกึ่งตัวนำซิลิกอน

- สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type)

เป็นสารกึ่งตัวนำที่เกิดจากการจับตัวของอะตอมซิลิกอนกับอะตอมของฟอสฟอรัส (P) หรือสารหนู (As), พลวง (Sb), บิสมันส์ (Bi) ทำให้มีอิเล็กตรอนเกินขึ้นมา 1 ตัว เรียกว่า อิเล็กตรอนอิสระซึ่งสามารถเคลื่อนที่ได้โดยอิสระในก้อนผลึกนั้นจึงยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลได้ เช่นเดียวกับตัวนำทั่วไป

- สารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type)

เป็นสารกึ่งตัวนำที่เกิดจากการจับตัวของอะตอมซิลิกอนกับอะตอมของโบรอน (B) หรือ อะลูมิเนียม (Al), อินเดียม (In), แกลเลียม (Ga) ทำให้เกิดที่ว่างซึ่งเรียกว่า โฮล (Hole) ขึ้นในพันธะร่วมของอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนข้างโฮลจะเคลื่อนที่ไปอยู่ในโฮลทำให้ดูคล้ายกับโฮลเคลื่อนที่ได้จึงทำให้กระแสไหลได้

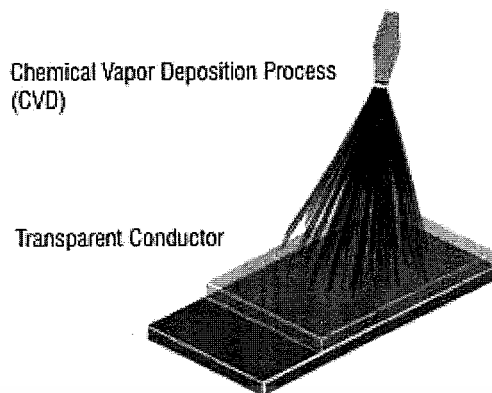
การวัดและการหาค่าพารามิเตอร์ในสารกึ่งตัวนำ เช่น ชนิดของพาหะ, ความหนาแน่นของพาหะอิเล็กตรอนและโฮล, สภาพคล่องของพาหะ, ความกว้างของช่องว่างพลังงาน, อายุของพาหะ และสภาพต้านทานของสารกึ่งตัวนำ เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำ นั้นมีอยู่หลายวิธีด้วยกัน เช่น วิธีวัดด้วยเข็มร้อน (Hot point probe measurement), การวัดด้วยวิธีโฟรพอยท์โพรบ (Four point probe), ปรากฏการณ์ของฮอลล์ (Hall Effect), การทดลองของเฮย์ และช็อคเลย์ (Haynes - Shockley experiment) และการวัดจากคุณสมบัติความนำเนื่องจากแสง (Photo conductivity) ของสารกึ่งตัวนำ

ซึ่งในโครงการนี้ ใช้วิธีปรากฏการณ์ของฮอลล์ (Hall Effect) เพื่อหาค่าความหนาแน่นของพาหะ, ชนิดของพาหะ และสภาพคล่องของพาหะ ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมกันมาก

2.1 Transparent conductive oxide (TCOs)

Transparent Conducting Oxide เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติ 2 ชนิดคือ นำไฟฟ้า และโปร่งแสง ซึ่งเกิดขึ้นพร้อมกัน โดย 2 คุณสมบัตินี้จะเกิดขึ้นได้เมื่อวัสดุชนิดนั้นมีขนาดแถบช่องพลังงานใหญ่พอประมาณ 3.1eV และมีความหนาแน่นของพาหะมากพอประมาณ $>10^{19} \text{ CM}^{-3}$ และมีสภาพคล่องประมาณ $1 \text{ CM}^2 \text{ V}^{-1} \text{ S}^{-1}$ ซึ่งคุณสมบัติที่กล่าวมาเป็นคุณสมบัติที่ดีของตัวนำไฟฟ้า

TCOs นับว่าเป็นวัสดุที่มีประโยชน์อย่างมากต่อการนำไปใช้งานในหลายๆด้าน ซึ่งการใช้ TCOs ครั้งแรกเกิดขึ้นระหว่างสงครามโลกครั้งที่ 2 โดยใช้ในการทำความร้อนเพื่อละลายน้ำแข็งที่เกาะอยู่บนกระจกเครื่องบิน หลังจากนั้น TCOs นำมาใช้ในหลายๆด้านเช่น รถยนต์, เครื่องบิน, กระจกเรือดำน้ำ, อิเล็กโตรโครมิก, liquid-crystal, หน้าจอพลาสมา, โซลาร์เซลล์ และ เซ็นเซอร์จับแก๊ส หรือแม้กระทั่งทำเป็นกระจกตามอาคารต่างๆเพื่อช่วยลดความร้อนจากภายนอกอาคาร



รูปที่ 2.1 แสดงชั้น TCO ซึ่งสร้างด้วยวิธี CVD

โดยทั่วไปแล้วการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างบนแผ่นฐานรองที่เป็นกระจกนั้นกระจกต้องถูกเคลือบด้วยชั้นโปร่งแสงนำไฟฟ้า หรือ TCO (Transparent Conductive Oxide) ซึ่งเป็นตัวรวบรวมกระแสไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อนำไปใช้งาน คุณสมบัติโดยทั่วไปแล้ว TCO ที่นิยมใช้งานในปัจจุบันนั้นมีอยู่ด้วยกัน 3 ชนิดคือ ITO (Indium Tin Oxide), SnO_2 (Tin Oxide) และ ZnO (Zinc Oxide) ซึ่งคุณสมบัติทางไฟฟ้าแสดงดังตารางซึ่งสารทั้งสามชนิดมีแถบช่องพลังงานที่เหมาะสมที่จะใช้ทำเป็น TCOs

วัสดุ	ช่องว่างแถบพลังงาน(eV)	ความนำไฟฟ้า (S cm^{-1})	ความหนาแน่นอิเล็กตรอน(cm^{-3})	ค่าสภาพคล่อง ($\text{cm}^2 \text{V}^{-1}\text{S}^{-1}$)
In_2O_3	3.75	10,000	$>10^{21}$	35
ZnO	3.35	8,000	$>10^{21}$	20
SnO_2	3.6	5,000	$>10^{20}$	15

ตารางที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของ TCOs ชนิดต่างๆ

จากตาราง TCOs จะเป็นตัวนำที่ดีเมื่อเปรียบเทียบกับสารกึ่งตัวนำแต่เมื่อเปรียบเทียบกับโลหะ TCOs เป็นวัสดุที่นำไฟฟ้าได้ไม่ดีเช่น ความนำไฟฟ้าของ Tungsten (W), Aluminum (Al) และ Copper (Cu) มีค่าประมาณ 100,000 , 350,000 และ 600,000 S.cm^{-1} ซึ่ง In_2O_3 ซึ่งมีค่าความนำไฟฟ้าที่ดีที่สุดมีค่าน้อยกว่าประมาณ 10-60 เท่าของหน้าสัมผัสโลหะที่ใช้ในวงจรรวม โดยในทางทฤษฎีค่าความนำไฟฟ้าของ TCOs มีค่าประมาณ 25,000 S.cm^{-1}

TCOs ในตารางทั้ง 3 ชนิดเป็นชนิด n-type ซึ่ง TCOs ชนิด p-type เป็นวัสดุชนิดใหม่และประสิทธิภาพความนำไฟฟ้าค่อนข้างแย่เมื่อเทียบกับชนิด n-type TCOs โดยสาเหตุที่ TCOs ชนิด p-type นำไฟฟ้าได้แย่นี้อาจมีค่าสภาพคล่องตัวของพาหะต่ำประมาณ 1 $\text{CM}^2\text{V}^{-1}\text{S}^{-1}$ แต่ใน n-type TCOs มีค่าสภาพคล่องตัวของพาหะประมาณ 10-40 $\text{CM}^2 \text{V}^{-1}\text{S}^{-1}$

TCOs เป็นอุปกรณ์แบบพาสซีฟ ซึ่งแสดงคุณสมบัติเป็นตัวนำซึ่งในการวิจัยและพัฒนาจึงต้องทำให้วัสดุมีความนำไฟฟ้าให้มากที่สุดเพื่อประสิทธิภาพในการทำงานที่ดี ซึ่งการได้ปัสสาวะเชื้อ
 ไข่สารในไข่สารหลังวันเวลาหรือการเจริญเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นั้นเป็นวิธีที่ทำให้มีความนำไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น โดย TCOs ชนิด n-type จะมีการได้ปสารดังนี้
 $\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}$, $\text{SnO}_2:\text{F}$, $\text{SnO}_2:\text{Sb}$, ZnO:F และ ZnO:Al

ในกรณีของ ITO นั้นมีราคาแพงเหมาะสมกับงานวิจัยเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพ ซึ่งจะทำให้ต้นทุนการผลิตสูง ในส่วนของ SnO_2 นั้นนำไฟฟ้าได้ดีกว่า ZnO และปัจจุบันนิยมนำมาใช้ในการผลิตเชิงพาณิชย์ แต่มีราคาแพง และในส่วนของเทคโนโลยีการสร้างฟิล์มนั้นไม่ยากแต่การที่จะทำให้มีพื้นผิวที่ขรุขระ (Haze) ที่เหมาะกับการใช้ผลิตเซลล์แสงอาทิตย์นั้นยังคงปิดเป็นความลับซึ่งทำได้ยากมาก ส่วน ZnO นั้นมีเทคโนโลยีการสร้างไม่ยากมากนักและสามารถทำให้พื้นผิวขรุขระที่เหมาะสมกับการใช้ผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ได้ง่ายกว่า และสามารถผลิตเป็น mass production ได้ ZnO มีข้อดีกว่า ITO และ SnO_2 ดังนี้ คือ ZnO เป็น TCO ที่มีราคาถูกที่สุดเพราะวัตถุดิบมีจำนวนมากและราคาถูก เป็นตัวที่จะนำมาใช้แทน ITO และ SnO_2 นอกจากนี้ ZnO สามารถเตรียมได้ที่อุณหภูมิต่ำประมาณ 100°C - 150°C และ ZnO ยังทนทานต่อสิ่งแวดล้อมที่มี Hydrogen plasma ซึ่งมักจะใช้ในการผลิต amorphoussilicon solar cell ในขณะที่ ITO และ SnO_2 จะด้อยกว่าในจุดนี้ แม้ว่าความต้านทานไฟฟ้าของ ZnO จะไม่ดีเท่าของ ITO (resistivity) อยู่ในระดับ $6 \times 10^{-3} - 5 \times 10^{-4}$ แต่ก็มีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตลอดระยะเวลา 1 ปีในอุณหภูมิห้อง

2.2 ฟิล์มบางตัวนำไฟฟ้าโปร่งใส

งานวิจัยส่วนใหญ่มีการพัฒนาฟิล์มบางให้มีความโปร่งใสและการนำไฟฟ้าที่สูง โดยมีการให้ความสนใจไปที่สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type) ที่ประกอบด้วยโลหะออกไซด์ ในอดีตฟิล์มบางนำไฟฟ้าโปร่งใสออกไซด์ (TCO, transparent conducting oxide) ประกอบไปด้วยสารประกอบ 2 ชนิด (binary compound) เช่น SnO_2 และ In_2O_3 โดยถูกพัฒนาด้วยกระบวนการเคลือบทางเคมีและทางฟิสิกส์ ต่อมาก็มีการเจือสารเจือปน (impurity-dope) เข้าไปเพื่อนำไปใช้งาน เช่น ดินบุกออกไซด์ (SnO_2) มีการเจือ Sb หรือ F เข้าไปในดินบุกออกไซด์กลายเป็น $\text{SnO}_2:\text{Sb}$ หรือ $\text{SnO}_2:\text{F}$ และสำหรับสารอินเดียมออกไซด์มีการเจือดินบุกกลายเป็น $\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}$ (indium tin oxide, ITO) นอกจากสารประกอบ 2 ชนิดพบว่าสารประกอบ 3 ชนิด (ternary compound) เช่น Cd_2SnO_4 , CdSnO_3 และ CdIn_2O_4 มีการพัฒนาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1980 เป็นต้นมา แต่ฟิล์มบางนำไฟฟ้าโปร่งใสชนิดนี้ยังไม่ได้ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวาง จุดประสงค์หนึ่งของการศึกษาฟิล์มบางนำไฟฟ้าโปร่งใสออกไซด์คือต้องการที่จะได้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (resistivity) ที่ต่ำนั้นให้มีค่าต่ำกว่าที่มีอยู่ในปัจจุบันเช่นพวกอินเดียมทินออกไซด์และสารทินออกไซด์ที่เจือสารเจือปน สารตัวนำไฟฟ้าโปร่งใสชนิดอื่นๆ ได้ถูกพัฒนาเปลี่ยนไปเรื่อยๆ ในปี ค.ศ. 1990 วัสดุตัวนำไฟฟ้าโปร่งใสที่ประกอบไปด้วยสารประกอบหลายชนิด (multicomponent oxide) ได้ถูกพัฒนาขึ้นมา ยกตัวอย่างเช่นการรวมของสารประกอบ 2 ชนิดจำพวก ZnO , CdO , In_2O_3 และ SnO_2 ส่วนในระบบของวัสดุพวกสารประกอบเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3 ชนิดจำพวก Zn_2SnO_4 , $MgIn_2O_4$, $CdSb_2O_6:Y$, $ZnSnO_3$, $GaInO_3$, $Zn_2In_2O_5$ และ $In_4Sn_3O_{12}$ สารเหล่านี้ถูกนำมาใช้เป็นสารประกอบออกไซด์หลายชนิด ซึ่งได้รับการพัฒนาการออกแบบสารประกอบออกไซด์หลายชนิดให้เหมาะสมกับงานนั้นๆ เพราะว่ามีสมบัติทางไฟฟ้า, แสง, เคมีและฟิสิกส์ สามารถควบคุมได้จากการเปลี่ยนส่วนประกอบทางเคมี หัวข้อต่อไปจะเป็นการอธิบายชนิดของวัสดุตัวนำไฟฟ้าโปร่งใสออกไซด์ที่มีใช้กันอยู่ในปัจจุบัน

2.2.1 วัสดุตัวนำไฟฟ้าโปร่งใสออกไซด์ชนิดสารประกอบ 2 ชนิด

ประโยชน์อันหนึ่งของการใช้สารประกอบ 2 ชนิดเพราะเนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุตัวนำไฟฟ้าโปร่งใสสามารถควบคุมได้ง่ายกว่าวัสดุจำพวกสารประกอบ 3 ชนิดและสารประกอบออกไซด์หลายชนิด พบว่าจนกระทั่งปัจจุบันนี้สารประกอบ SnO_2 , In_2O_3 , ZnO และ CdO มีการพัฒนาให้กลายเป็นวัสดุนำไฟฟ้าโปร่งใสที่เป็นแบบสารประกอบ 2 ชนิด โดยสารประกอบเหล่านี้เป็นวัสดุตัวนำไฟฟ้าโปร่งใสของโลหะออกไซด์ที่สามารถเตรียมได้จากการเจือสารเจือปน วัสดุเหล่านี้เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่มีปริมาณอิเล็กตรอนอิสระ (free electron concentration) อยู่ในระดับ 10^{20} cm^{-3} ซึ่งเกิดจากอะตอมผู้ให้ในตัวสาร (native donor) เช่น การเกิดช่องว่างตำแหน่งของออกซิเจน (oxygen vacancy) และ/หรือ การแทรกตัวของอะตอมโลหะ (interstitial metal atom) อย่างไรก็ตาม สารประกอบ 2 ชนิดที่ไม่เจือสารไม่ค่อยเป็นที่นิยมใช้เพราะวัสดุที่ทำการเจือสารอื่นนั้นสามารถเกิดได้ทั้งการเจือจากตัวสาร (native dope) และการเจือจากสารเจือ (impurity dope) ในกรณีของวัสดุนำไฟฟ้าแบบสารประกอบ 2 ชนิดที่มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำสุดในขณะนี้ เป็นฟิล์มแคดเมียมออกไซด์เจืออินเดียม ($CdO:In$) เตรียมได้ระดับค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามีค่า $10^{-5} \Omega \text{ cm}$ สำหรับอุปกรณ์แสดงผลแบบแบน (flat panel display) และเซลล์แสงอาทิตย์ (solar cell) แต่วัสดุนี้นี้ไม่เป็นที่นิยมใช้ เพราะวัสดุที่ใช้มาจากแคดเมียม (Cd) ที่เป็นพิษ ในทางปฏิบัติฟิล์มของตัวนำไฟฟ้าโปร่งใสจะมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่ต่ำประมาณ $1 \times 10^{-4} \Omega \text{ cm}$ โดยสามารถเตรียมได้จากฟิล์มอินเดียมทินออกไซด์ด้วยกระบวนการเคลือบหลายวิธี

2.2.2 วัสดุนำไฟฟ้าโปร่งใสออกไซด์ชนิดสารประกอบ 2 ชนิดผสมกัน

จุดประสงค์ในการพัฒนาฟิล์มบางนำไฟฟ้าโปร่งใสให้เหมาะสมกับอุปกรณ์พิเศษต่างๆนั้น ได้มีการค้นพบสารประกอบแบบใหม่ในปี ค.ศ. 1994 ซึ่งเป็นสารประกอบออกไซด์หลายชนิดของ $ZnO-SnO_2$ โดยสารประกอบแบบนี้ไม่ใช่มีแค่ข้อดีจากซิงค์ออกไซด์ แต่ยังสามารถรวมข้อดีของดีบุกออกไซด์ไว้ด้วย วัสดุนำไฟฟ้าโปร่งใสที่วานี้ซึ่งใช้วัสดุที่ประกอบไปด้วยการรวมกันของวัสดุนำไฟฟ้าโปร่งใสแบบ 2 ชนิดรวมเข้าไว้ด้วยกันเป็นอีกทางเลือกหนึ่งเช่นการรวมกันของสารเหล่านี้มี ZnO , In_2O_3 และ SnO_2 ร่วมอยู่ได้มีการพัฒนาขึ้นมา

2.2.3 วัสดุนำไฟฟ้าโปร่งใสออกไซด์ชนิดสารประกอบ 3 ชนิด

หัวข้อก่อนหน้านี้ได้มีการพูดถึงฟิล์มบางตัวนำไฟฟ้าโปร่งใสแบบสารประกอบ 2 ชนิดผสมกัน โดยวัสดุที่เตรียมได้มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่ต่ำ ในวัสดุนี้มีหลายองค์ประกอบอยู่รวมกัน เช่น $Zn_mIn_2O_{3+m}$ เมื่อ $m = 2-7$ มีอยู่ในวัสดุ $ZnO-In_2O_3$ นี้ ฟิล์มบางของสารประกอบหลายชนิดนั้น ประกอบไปด้วยการรวมกันของสารประกอบ 2 ชนิด เช่น ZnO , MgO , In_2O_3 , Ga_2O_3 และ SnO_2 เตรียมได้ด้วยการใช้การเคลือบฟิล์มโดยแมกนีตรอนสปัตเตอริง โดยใช้ผงสารประกอบหลายชนิดรวมเข้าไว้ด้วยกัน มีการรวมกันของ ZnO -, MgO - และ Ga_2O_3 หรือ $SnO_2-In_2O_3$ และ Ga_2O_3 - หรือ SnO_2-ZnO ยกตัวอย่างเช่นฟิล์ม $SnO_2-In_2O_3$ สามารถระบุได้ว่ามีสารประกอบใหม่เกิดขึ้นในกระบวนการเตรียมคือมี $In_4Sn_3O_{12}$ เกิดขึ้นซึ่งให้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่ต่ำ แล้วยังคงมีความเสถียรในสารละลายกรดและการเกิดออกซิเดชันในบรรยากาศที่อุณหภูมิสูง จากผลที่เกิดขึ้นทำให้เกิดฟิล์มบางนำไฟฟ้าโปร่งใสแบบสารประกอบ 3 ชนิดขึ้นมา ตัวอย่างของสารประกอบประเภทนี้ เช่น $(Ga,In)_2O_3$ ที่เตรียมจาก $In_2O_3-Ga_2O_3$ หรือ $MgIn_2O_4$ ที่เตรียมจาก In_2O_3-MgO

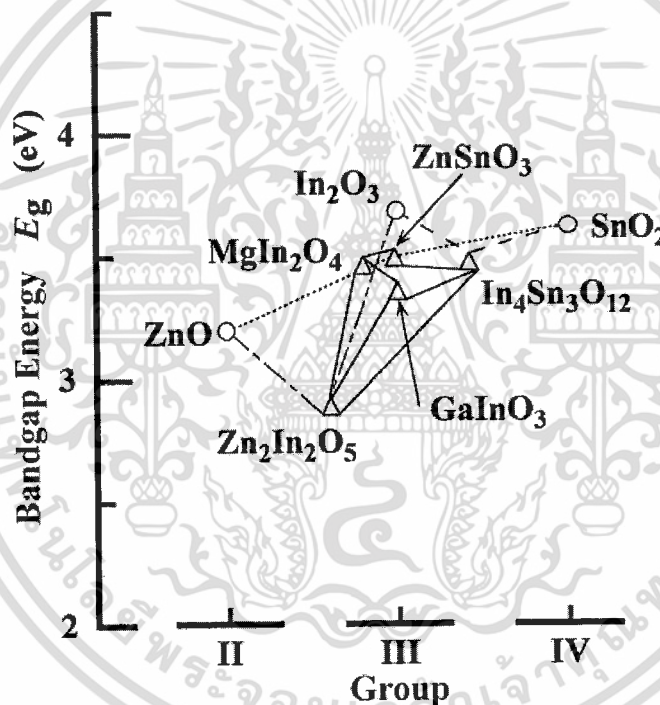
2.2.4 วัสดุนำไฟฟ้าโปร่งใสออกไซด์ชนิดสารประกอบ 3 ชนิดผสมกัน

ในการพัฒนาฟิล์มตัวนำไฟฟ้าโปร่งใสออกไซด์ให้เหมาะสมสำหรับอุปกรณ์ต่างๆพบว่า เมื่อนำสารประกอบ 3 ชนิดมารวมกันจะได้สารประกอบออกไซด์หลายชนิดเช่น $Zn_2In_2O_5-MgIn_2O_4$ ซึ่งจะเป็นวัสดุนำไฟฟ้าโปร่งใสชนิดใหม่ ในปี ค.ศ. 1995 ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าฟิล์มตัวนำไฟฟ้าโปร่งใสสามารถเตรียมได้จากสารประกอบออกไซด์หลายชนิดแบบนำสารประกอบ 3 ชนิดมาผสมกันโดยประกอบด้วยอัตราส่วนของสารประกอบ 3 ชนิดเช่น $Zn_2In_2O_5-MgIn_2O_4$, $GaInO_3-Zn_2In_2O_5$, $Zn_2In_2O_5-In_4Sn_3O_{12}$, $ZnSnO_3-In_4Sn_3O_{12}$, $ZnSnO_3-Zn_2In_2O_5$ และ $GaInO_3-In_4Sn_3O_{12}$

2.2.5 แนวทางการออกแบบวัสดุนำไฟฟ้าโปร่งใสออกไซด์

แม้ว่าวัสดุตัวนำไฟฟ้าโปร่งใสออกไซด์ชนิดอื่นได้มีการค้นคว้ามานานกว่า 40 ปี แต่วัสดุตัวนำไฟฟ้าโปร่งใสออกไซด์ที่ถูกนำมาใช้จริงมีเพียง SnO_2 , In_2O_3 , ZnO สารประกอบ 3 ชนิดและสารประกอบออกไซด์หลายชนิดบางตัว ซึ่งวัสดุส่วนใหญ่ที่ถูกนำมาใช้และช่วงของแถบพลังงานที่เกิดขึ้นแสดงในรูปที่ 2.1 ส่วนใหญ่ที่นำมาใช้งานจริงของวัสดุนำไฟฟ้าโปร่งใสนอกจากผลึกเดี่ยว (single crystal) ก็คือสารประกอบ 2 ชนิด เช่น สารอินเดียมออกไซด์ที่มีสารเจือและซิงค์ออกไซด์ โดยอินเดียมออกไซด์ (ITO) เป็นวัสดุที่ดีที่สุดขณะนี้และเป็นที่ยอมรับ แต่อย่างไรก็ตามสารหลักในอินเดียมทินออกไซด์เป็นอินเดียม ซึ่งมีราคาแพงและหายาก นอกจากนี้การพัฒนาในอุปกรณ์ประเภทออปโตอิเล็กทรอนิกส์ (optoelectronic device) มีการใช้งานมากขึ้นเรื่อยๆพร้อมกับพัฒนาสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ของฟิล์มตัวนำไฟฟ้าโปร่งใสให้มีความดีขึ้นในอุปกรณ์ ในทางที่พัฒนาฟิล์มตัวนำไฟฟ้าโปร่งใสสำหรับอุปกรณ์พิเศษต่างๆ การออกแบบวัสดุนำไฟฟ้าโปร่งใสจึงมีการใช้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารประกอบออกไซด์หลายชนิด แต่จะมีผลต่อสมบัติที่เกิดขึ้นทั้งสมบัติทางไฟฟ้า, แสง, เคมี ส่วนสมบัติทางฟิสิกส์ เช่นแถบพลังงานและค่าฟังก์ชันงาน (work function) นั้นสามารถควบคุมได้โดยการเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมี ดังนั้นการพัฒนาวัสดุนำไฟฟ้าโปร่งใสชนิดอื่นมีความจำเป็นที่ต้องตระหนักว่าฟิล์มบางนำไฟฟ้าโปร่งใสจะต้องมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่ต่ำและมีสมบัติที่เหมาะสมกับการใช้งานเฉพาะอย่าง แม้ว่าวัสดุนำไฟฟ้าโปร่งใสใหม่ๆที่เกิดขึ้นนั้นมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่ต่ำ แต่ยังไม่ปรากฏว่ามีวัสดุตัวไหนที่มีค่าต่ำกว่าอินเดียมทินออกไซด์แม้กระทั่งสารประกอบออกไซด์หลายชนิด นอกเหนือจากค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่ต่ำ มีความสำคัญสำหรับตัวนำไฟฟ้าโปร่งใสแล้ว จะต้องมีราคาที่ไม่แพงและไม่เป็นพิษก็เป็นอีกปัจจัยที่สำคัญ ดังนั้นการพัฒนาทางเลือกอื่นที่จะมาแทนที่อินเดียมออกไซด์ก็ยังคงเป็นที่ต้องการเนื่องจากราคาที่แพงและเป็นสารที่หายากของวัสดุชนิดนี้



รูปที่ 2.2 แถบพลังงานของวัสดุตัวนำไฟฟ้าโปร่งใสแบบสารประกอบ 2 ชนิด (○), 3 ชนิด (△) และแบบออกไซด์หลายชนิดผสมกัน (เส้นประ)

2.3 วิธีการเลือกวัสดุตัวนำไฟฟ้าโปร่งใส

ฟิล์มนำไฟฟ้าโปร่งใสถูกเตรียมได้จากวัสดุหลายชนิด รวมทั้งสารออกไซด์ของสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor oxide) และของตะกั่ว, สังกะสีและแคดเมียม อีกทั้งโลหะเช่น เงิน, ทอง และไททาเนียมไนเตรท ในหัวข้อนี้สมบัติทางฟิสิกส์ของวัสดุเหล่านี้ได้อธิบายและนำมาเปรียบเทียบโดยค่าที่นำมาวิเคราะห์หามี ค่าประสิทธิภาพ (Figure of merit) สำหรับตัวนำไฟฟ้าโปร่งใสนิยามได้ว่าเป็นอัตราส่วนของค่าการนำไฟฟ้า (electrical conductivity) ต่อค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนทางแสง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(optical absorption coefficient) ของฟิล์ม สำหรับวัสดุที่มีค่าประสิทธิภาพที่สูงคือซิงค์ออกไซด์เจือฟลูออรีนและแคลเซียมแอสแตนเนท ส่วนสมบัติทางฟิสิกส์, เคมี และความคงทนต่อความร้อนพร้อมกับค่าการนำไฟฟ้า (conductivity), ค่าความยาวคลื่นพลาสมา (plasma wavelength), อุณหภูมิในการเคลือบ, ค่าความเป็นพิษและราคา ซึ่งเป็นปัจจัยอื่นๆที่คาดว่าจะมีอิทธิพลในการเลือกของวัสดุนำไฟฟ้าโปร่งใสสำหรับวัสดุอุปกรณ์ใดๆก็ตาม

2.3.1 อุปกรณ์ที่มีการใช้วัสดุนำไฟฟ้าโปร่งใส

วัสดุนำไฟฟ้าโปร่งใสมีการใช้อย่างหลากหลาย โดยความสามารถการสะท้อนความร้อนที่มาจากแสงอินฟราเรด (infrared) ถูกนำมาใช้ประโยชน์ในหน้าต่างแบบ “energy conserving windows” ที่เป็นหน้าต่าง low emissivity (“low-e”) ได้ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในปัจจุบัน อีกประเภทหนึ่งสำหรับวัสดุนำไฟฟ้าโปร่งใสคือนำหน้าต่างเตาอบ (oven window) ที่จะทำหน้าที่อนุรักษ์พลังงานและรักษาความแตกต่างของอุณหภูมิภายในกับภายนอก ส่วนความสามารถทางด้านกรนำไฟฟ้าของวัสดุนำไฟฟ้าโปร่งใสได้มีการนำมาใช้เป็นขั้วไฟฟ้าที่ผิวหน้า สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์และอุปกรณ์แสดงผลแบบแบน (flat panel display) หรือ FPD รวมทั้งใช้เป็นกระจกที่ปรับความสว่างอัตโนมัติสำหรับยานพาหนะและใช้เป็นตัวนำไฟฟ้าในการควบคุมหน้าต่างอัจฉริยะ (smart windows) โดยจะใช้ร่วมกันเป็นคู่ตัวนำไฟฟ้ากับสารอิเล็กโตรโครมิก (electrochromic) ที่อยู่ระหว่างคู่ตัวนำไฟฟ้า การนำมาใช้อีกประเภทของวัสดุนำไฟฟ้าโปร่งใสโดยการให้กระแสไฟผ่านตัวนำไฟฟ้าโปร่งใส เพื่อใช้เป็นหน้าต่างดีฟรอสต์ (defrost windows) ในรถยนต์หรือนำมาใช้ในกระจกแบบสัมผัส (touch panel) ได้จากกัดผิว (etched) ของวัสดุนำไฟฟ้าโปร่งใส ยังคงมีอุปกรณ์อีกหลายประเภทที่มีการนำวัสดุนำไฟฟ้าโปร่งใสไปใช้งาน ทำให้มีคำถามเกิดขึ้นมาว่า วัสดุนำไฟฟ้าโปร่งใสตัวไหนที่ดีที่สุดอย่างไรก็ตามคำถามนี้ไม่มีคำตอบที่ชัดเจนเนื่องจากความแตกต่างของวัสดุนำไฟฟ้าแต่ละชนิดเหมาะสมสำหรับอุปกรณ์ที่แตกต่างกัน แม้ว่าอุปกรณ์ที่ให้แต่ละชนิดอาจมีความแตกต่างของวิธีการเตรียมและการเลือกวัสดุ จากสิ่งต่างๆเหล่านี้สรุปเป็นอันดับแรกได้ว่าวิธีสำหรับการเตรียมวัสดุนำไฟฟ้าโปร่งใสจะพิจารณาสมบัติที่หลากหลายเป็นตัวเลือกที่สำคัญในการเลือก สุดท้ายนี้แสดงว่าวิธีเหล่านี้และสมบัติของวัสดุนำไปสู่การเลือกตัวนำไฟฟ้าโปร่งใสที่แตกต่างกันเพื่อให้ได้วัสดุที่ดีที่สุดสำหรับอุปกรณ์ที่แตกต่างกัน

2.3.2 กระบวนการผลิตตัวนำไฟฟ้าโปร่งใสสำหรับการใช้งาน

สมบัติของชั้นฟิล์มนำไฟฟ้าโปร่งใสไม่ได้ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของสารแต่ละชนิดเท่านั้น แต่ยังขึ้นอยู่กับวิธีการที่ใช้สำหรับเตรียมฟิล์มด้วย วิธีการเตรียมเหล่านี้มีทั้งวิธีการเคลือบทางฟิสิกส์ได้แก่วิธีสปัตเตอริง, การระเหยสาร (evaporation), การเคลือบแบบพัลส์เลเซอร์ (pulsed laser deposition) และวิธีการเคลือบทางเคมีได้แก่ โซล-เจล (sol-gel), การเคลือบด้วยไฟฟ้า (electroplating) บางส่วนของกรรมวิธีในการเตรียม แสดงในตารางที่ 2.1 วิธีการเคลือบพ่นความ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ร้อน (spray pyrolysis) เป็นวิธีการแรกที่ถูกนำมาใช้ในทางการค้าเป็นเวลามากกว่า 50 ปีมาแล้ว จาก การเคลือบฟิล์มตัวนำไฟฟ้าติบูกออกไซด์บนแผ่นกระจกที่ได้รับความร้อนในกระบวนการผลิต แบบทีละชิ้น (batch process) ต่อมาตั้งแต่ปี 1980 กระบวนการเคลือบฟิล์มทางเคมี (CVD) มีการ นำมาใช้อย่างกว้างขวางในการผลิตทีละชิ้นของแผ่นกระจกกับสารติบูกออกไซด์เจือฟลูออรีน โดย หลักๆฟิล์มตัวนำไฟฟ้าโปร่งใสส่วนใหญ่จะผลิตด้วยกระบวนการนี้ แม้ว่าความจริงแล้วสาร อินเดียมทินออกไซด์ ($\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}$, ITO) เป็นสารชนิดแรกที่ผลิตด้วยวิธีพ่นเคลือบด้วยความร้อน แต่ ต่อมาวิธีการสเปตเตอร์ริงกลับกลายเป็นกระบวนการหลักที่ใช้ในการเคลือบสารชนิดนี้ สารอินเดียม ทินออกไซด์หลักๆแล้วจะถูกใช้ใน FPD

ตารางที่ 2.2 กระบวนการเตรียมฟิล์มตัวนำไฟฟ้าโปร่งใสในอดีตที่ผ่านมา

Materials and Process	Reference
Ag by chemical-bath deposition	Unknow Venetian
$\text{SnO}_2:\text{Sb}$ by spray pyrolysis	J.M. Mochel (Corning), 1947
$\text{SnO}_2:\text{Cl}$ by spray pyrolysis	H.A. McMaster (Libbey-Owens-Ford), 1947
$\text{SnO}_2:\text{F}$ by spray pyrolysis	W.O. Lytle and A.E. Junge (PPG), 1951
$\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}$ by spray pyrolysis	J.M. Mochel (Corning), 1951
$\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}$ by sputtering	L. Holland and G. Siddall, 1955
$\text{SnO}_2:\text{Sb}$ by CVD	H.F. Dates and J.K. Davis (Corning), 1967
Cd_2SnO_4 by sputtering	A.J. Nozik (American Cyanamid), 1974
Cd_2SnO_4 by spray pyrolysis	A.J. Nozik and G. Haacke (American Cyanamid), 1967
$\text{SnO}_2:\text{F}$ by CVD	R.G. Gordon (Harvard), 1979
TiN by CVD	S.R. Kurtz and R.G. Gordon (Harvard), 1986
$\text{ZnO}:\text{In}$ by spray pyrolysis	s. Major et al. (Kanazawa), 1984
$\text{ZnO}:\text{Al}$ by sputtering	T. Minami et al. (Kanazawa), 1984
$\text{ZnO}:\text{In}$ by sputtering	S.N. Qlu et al. (McGill), 1987
$\text{ZnO}:\text{B}$ by CVD	P.S. Vijayakumar et al. (Arco Solar), 1988
$\text{ZnO}:\text{Ga}$ by sputtering	B.H. Choi et al. (KAIST), 1990
$\text{ZnO}:\text{F}$ by CVD	J. Hu and R.G. Gordon (Harvard), 1991
$\text{ZnO}:\text{Al}$ by CVD	J. Hu and R.G. Gordon (Harvard), 1992
$\text{ZnO}:\text{Ga}$ by CVD	J. Hu and R.G. Gordon (Harvard), 1992

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์หรือขอขนางานการค้ำ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ZnO:In by CVD	J. Hu and R.G. Gordon (Harvard), 1992
Zn ₂ SnO ₄ by sputtering	H. Enoki et al. (Tohoku), 1992
ZnSnO ₃ by sputtering	T. Minami et al. (Kanazawa), 1994
Cd ₂ SnO ₄ by pulsed laser deposition	J.M. McGraw et al. (Colorado School of Mines and NREL), 1995

2.3.3 สมบัติที่มีผลในการเลือกวัสดุนำไฟฟ้าโปร่งใส

หัวข้อเหล่านี้เป็นสมบัติจำนวนหนึ่งของสมบัติทางฟิสิกส์และทางเคมีที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพของวัสดุนำไฟฟ้าโปร่งใสที่จะนำมาใช้ในอุปกรณ์ต่างๆ

- ค่าประสิทธิภาพทางแสงและทางไฟฟ้าของวัสดุนำไฟฟ้าโปร่งใส

ประสิทธิภาพของวัสดุตัวนำไฟฟ้าโปร่งใสควรมีค่าการนำไฟฟ้าสูงรวมกับมีค่าการดูดกลืนต่ำ (low absorption) สำหรับแสงในช่วงที่ตามองเห็น ดังนั้นปริมาณที่เหมาะสมในการวัดประสิทธิภาพของวัสดุนำไฟฟ้าโปร่งใสคืออัตราส่วนของค่าการนำไฟฟ้า (electrical conductivity, σ) ต่อค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงช่วงตามองเห็น (α)

$$\frac{\sigma}{\alpha} = -\{R_s \ln(T + R)\}^{-1} \quad (2.1)$$

ซึ่ง R_s คือค่าความต้านทานเชิงแผ่น (sheet resistance) ในหน่วยโอห์ม (ohm) ต่อพื้นที่, T คือการส่งผ่านรวมในช่วงแสงที่ตามองเห็น (total visible transmission) และ R คือค่าการสะท้อนรวมในช่วงแสงที่ตามองเห็น (total visible reflectance) ดังนั้นค่า σ/α คือ ค่าประสิทธิภาพ (figure of merit) สำหรับใช้ในการบอกคุณภาพของตัวนำไฟฟ้าโปร่งใส โดยค่าที่มากของ σ/α จะชี้ให้เห็นว่าวัสดุนำไฟฟ้าโปร่งใสนั้นมีประสิทธิภาพที่ดี ค่าประสิทธิภาพสำหรับตัวนำไฟฟ้าโปร่งใสของสารบางตัวได้ให้ไว้ในตารางที่ 2.2 ค่าเหล่านี้ในตารางคือค่าที่ดีที่สุดซึ่งเตรียมได้จากห้องทดลองด้วยกระบวนการเคลือบฟิล์มแบบไอทางเคมี (CVD) ถ้าสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงของวัสดุนำไฟฟ้าโปร่งใสเป็นอิสระกับความหนาของฟิล์ม ดังนั้นค่าประสิทธิภาพไม่ควรที่จะขึ้นกับความหนาฟิล์ม ในความเป็นจริงสมบัติของเนื้อวัสดุนำไฟฟ้าโปร่งใสเช่น σ และ α ขึ้นกับค่าความหนาฟิล์ม ทำให้ค่าประสิทธิภาพโดยทั่วไปเพิ่มขึ้นกับความหนาฟิล์ม จากทฤษฎีของค่าประสิทธิภาพอาจประมาณค่าจากทฤษฎีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในโลหะ ซึ่งเขียนได้โดย

$$\frac{\sigma}{\alpha} = 4\pi^2 \varepsilon_0 c^3 n (m^* \mu)^2 \lambda^{-2} e^{-2} \quad (2.2)$$

เมื่อ ε_0 คือค่าสภาพการยอม (permittivity) ของสุญญากาศ, c คือค่าความเร็วแสงในสุญญากาศ, n คือค่าดัชนีหักเหของฟิล์ม, m^* คือมวลประสิทธิผล (effective mass) ของอิเล็กตรอน, μ คือค่าโมบิลิตี (mobility), λ คือความยาวคลื่นของแสงในช่วงที่ตามองเห็นและ e คือประจุอิเล็กตรอน จากค่าที่ได้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของประสิทธิภาพวัสดุนำไฟฟ้าโปร่งใสจะสามารถใช้เป็นแนวทางในการเลือกใช้วัสดุที่เหมาะสมกับอุปกรณ์ที่ต้องการ

ตารางที่ 2.3 ค่าประสิทธิภาพของวัสดุตัวนำไฟฟ้าโปร่งใสบางชนิด

Material	Sheet Resistance	Visible Absorption	Figure of Merit
	(Ω / \square)	Coefficient	(Ω^{-1})
ZnO:F	5	0.03	7
Cd ₂ SnO ₄	7.2	0.02	7
ZnO:Al	3.8	0.05	5
In ₂ O ₃ :Sn	6	0.04	4
SnO ₂ :F	8	0.04	3
ZnO:Ga	3	0.12	3
ZnO:B	8	0.06	2
SnO ₂ :Sb	20	0.12	0.4
ZnO:In	20	0.20	0.2

● ค่าการนำไฟฟ้า

ในบางอุปกรณ์ของวัสดุนำไฟฟ้าจะต้องมีขนาดบางเท่าที่เป็นไปได้ ยกตัวอย่างเช่นในอุปกรณ์แสดงผลที่ความละเอียดสูง (high resolution display) ในกรณีนี้ตัวแปรของวัสดุที่มีความสำคัญคือค่าการนำไฟฟ้า โดยค่าการนำไฟฟ้านั้นเพิ่มขึ้นตามปริมาณความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระและค่าโมบิลิตี สำหรับโลหะเช่นเงินขึ้นอยู่กับโครงสร้างและสมบัติทางไฟฟ้าวัสดุ แต่สำหรับพวกสารกึ่งตัวนำที่มีแถบพลังงานกว้าง (wide band gap semiconductor) นั้นค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระจะถูกทำให้มีจำนวนมากโดยการใส่สารเจือเข้าไปแทนที่ในแลตทิซ ซึ่งความพยายามที่เจืออะตอมจำนวนมากในแลตทิซจะส่งผลต่อการเกิดความบกพร่องในโครงสร้าง (neutral defect) ที่จะทำให้ลดค่าโมบิลิตี ดังนั้นค่ามากที่สุดที่ได้ของความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและค่าการนำไฟฟ้าในวัสดุนำไฟฟ้าโปร่งใสโดยทั่วไปพบว่าการเรียงลำดับการเพิ่มขึ้นของค่าการนำไฟฟ้าได้ดังนี้ ZnO:F < SnO₂:F < ZnO:Al < In₂O₃:Sn < TiN < Ag

● ความถี่พลาสมา

ค่าความถี่พลาสมา สำหรับอิเล็กตรอนในแถบนำไฟฟ้าของวัสดุนำไฟฟ้าโปร่งใสสามารถแบ่งตามสมบัติทางแสงโดยที่ความถี่สูงมากกว่าความถี่พลาสมา อิเล็กตรอนนั้นไม่สามารถตอบสนองและจะทำให้วัสดุมีลักษณะคล้ายวัสดุฉนวนไฟฟ้าโปร่งใส (transparent dielectric) แล้วที่ความถี่ต่ำกว่าความถี่พลาสมาวัสดุนำไฟฟ้าโปร่งใสจะมีการสะท้อนและดูดกลืนรังสีตกกระทบ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับวัสดุนำไฟฟ้าโปร่งใสส่วนใหญ่จะมีค่าความถี่พลาสมาตกอยู่ในช่วงบริเวณของความยาวคลื่นอินฟราเรด ค่าความถี่พลาสมานั้นเพิ่มขึ้นกับค่ารากที่สองของความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระ พบว่าค่ามากที่สุดที่ได้ของอิเล็กตรอนอิสระและความถี่พลาสมาของวัสดุนำไฟฟ้าโปร่งใสโดยทั่วไปเพิ่มขึ้นในระดับเดียวกัน ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าแสดงไว้ในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.4 ค่าต่ำสุดของค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าและความถี่พลาสมาของวัสดุนำไฟฟ้าโปร่งใส

Material	Resistivity ($\mu\Omega\text{cm}$)	Plasma Wavelength (μm)
Ag	1.6	0.4
TiN	20	0.7
In ₂ O ₃ :Sn	100	>1.0
Cd ₂ SnO ₄	130	>1.3
ZnO:Al	150	>1.3
SnO ₂ :F	200	>1.6
SnO:F	400	>2.0

● อุณหภูมิในการเคลือบ

เมื่อวัสดุนำไฟฟ้าโปร่งใสถูกนำมาเคลือบบนแผ่นรองรับนั้น อุณหภูมิแผ่นรองรับโดยทั่วไปจะต้องคงไว้ที่อุณหภูมิสูงเพียงพอในทางที่จะพัฒนาให้ได้สมบัติที่ต้องการ อุณหภูมิที่วัสดุนำไฟฟ้าโปร่งใสต้องการจะเพิ่มขึ้นตามลำดับคือ Ag หรือ ITO < ZnO < SnO₂ < Cd₂SnO₄ ดังนั้นเงินหรืออินเดียมทินออกไซด์อาจเคลือบบนแผ่นรองรับที่ใช้อุณหภูมิต่ำได้ เช่น พลาสติก ขณะที่แคดเมียมแอสแตนเนทมีความต้องการใช้วัสดุของแผ่นรองรับที่ทนความร้อนสูงนำมาเคลือบเพื่อให้ได้สมบัติที่ดี

● ค่าความแข็งทางกล

ค่าความทนทานทางกลของวัสดุนำไฟฟ้าโปร่งใสมีความสัมพันธ์กับค่าความแข็ง (hardness) ของผลึก ค่าความแข็งเหล่านี้อาจอยู่ในหน่วยมอร์ (Moh) ซึ่งเป็นค่าที่สูงในการแสดงค่าความแข็งของวัสดุในตารางที่ 2.4 จากตาราง แสดงให้เห็นว่าสมบัติทางกลมีความสำคัญในการเลือกใช้วัสดุนำไฟฟ้าโปร่งใส

ตารางที่ 2.5 ค่าความแข็งของวัสดุนำไฟฟ้าโปร่งใสบางชนิด

Material	Mohs Hardness
TiN	9
SnO ₂	6.5
Soda-lime glass	6
In ₂ O ₃	~5
ZnO	4
Ag	low

● ราคาของผลิตภัณฑ์

ราคาผลิตภัณฑ์จากวัสดุนำไฟฟ้าโปร่งใสขึ้นอยู่กับราคาของวัสดุที่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบและขั้นตอนกระบวนการผลิตให้เป็นฟิล์ม สำหรับราคาของวัตถุดิบโดยทั่วไปเพิ่มขึ้นในอันดับราคา ดังนี้ $Cd < Zn < Ti < Sn < Ag < In$ โดยที่สารอินเดียมเป็นธาตุหายากและมีราคาแพง เนื่องจากเป็นผลพลอยได้จากการทำเหมืองที่มีสารอื่นเจือปนอยู่ เช่น สังกะสีและตะกั่ว แต่จะไม่มีเหมืองอินเดียม เพราะว่ามีปริมาณของอินเดียมมีอยู่น้อยเกินกว่าความคุ้มค่าที่จะทำเหมืองเพื่อถลุงอินเดียมเพียงอย่างเดียว ดังนั้นทำให้ปริมาณของอินเดียมที่มีในการนำมาใช้ไม่เพียงพอ จึงส่งผลต่อราคาของอินเดียม สิ่งนี้ก็เป็นปัจจัยหนึ่งส่งผลต่อราคาผลิตภัณฑ์จากวัสดุตัวนำไฟฟ้าโปร่งใส อีกส่วนหนึ่งคือราคาของวิธีการเคลือบ ซึ่งโดยทั่วไปราคาเพิ่มขึ้นตามลำดับความยากง่ายในการเคลือบดังนี้ การเคลือบฟิล์มทางเคมีภายใต้ความดันปกติ < การระเหยสาร < แมกนีตรอนสปัตเตอริง < การเคลือบฟิล์มทางเคมีที่ความดันต่ำ < โซล-เจล < การเคลือบด้วยพัลส์เลเซอร์ อันดับตามนี้ถูกประมาณโดยการพิจารณาจากราคาต่ำที่สุดของผลิตภัณฑ์ ในการทำแต่ละกระบวนการความเร็วของกระบวนการเป็นส่วนสำคัญ จึงทำให้มีการนำมาพิจารณาราคา พบว่ากระบวนการเคลือบฟิล์มเหล่านี้ การเคลือบฟิล์มทางเคมีภายใต้ความดันปกติ, การระเหยสารและการเคลือบแบบแมกนีตรอนสปัตเตอริงมีอัตราการเคลือบที่สูงและมีขนาดเล็กเพิ่มไปจนถึงขนาดใหญ่ สำหรับการจัดอันดับทั้งหมดนี้ สามารถให้การเปรียบเทียบอย่างหยาบสำหรับราคาการผลิต เพราะว่ามีอีกหลายปัจจัยเข้ามามีส่วนในการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์รวมทั้งปริมาณการผลิตและค่าความผิดพลาดจากการผลิต โดยจะแยกตามความแปรผันแต่ละกรณี

● ความเป็นพิษ

สำหรับบางธาตุที่ถูกนำมาใช้เป็นวัสดุนำไฟฟ้าโปร่งใสมีความเป็นพิษ จึงเป็นการเพิ่มขึ้นของราคาในกระบวนการผลิตของสารเหล่านี้ เนื่องจากมีความจำเป็นในการรักษาป้องกันอันตรายให้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คนงานและป้องกันการหลุดรอดของสารพิษไปกระทบต่อสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้การกำจัดสารคงเหลือระหว่างการผลิตมีความจำเป็น และอีกกรณีหนึ่งคือการรีไซเคิลผลิตภัณฑ์สุดท้ายของการผลิตที่ต้องมีการป้องกันตลอดอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ ความเป็นพิษของธาตุโดยทั่วไปเพิ่มขึ้นตามลำดับต่อไปนี้ $Zn < Sn < In < Ag < Cd$

2.1.2.4 การเลือกใช้วัสดุนำไฟฟ้าโปร่งใสออกไซด์

การเลือกใช้คือสิ่งที่สะท้อนจากตัวอุปกรณ์ที่จะนำไปใช้ สำหรับการเลือกใช้วัสดุนำไฟฟ้าโปร่งใสจะพบว่าไม่มีวัสดุใดเหมาะสมสำหรับทุกอุปกรณ์ แต่จะขึ้นอยู่กับทางเลือกใช้ที่แตกต่างกันโดยสมบัติของวัสดุเป็นส่วนสำคัญในการเลือกใช้ จากตารางที่ 2.5 เป็นการสรุปสมบัติบางอย่างที่สำคัญแล้วมีอิทธิพลในการเลือกใช้วัสดุนำไฟฟ้าโปร่งใส

ตารางที่ 2.6 การเลือกวัสดุนำไฟฟ้าโปร่งใส

Property	Material
Highest transparency	ZnO:F, Cd ₂ SnO ₄
Highest conductivity	In ₂ O ₃ :Sn
Lowest plasma frequency	SnO ₂ :F, ZnO:F
Highest plasma frequency	Ag, TiN, In ₂ O ₃ :Sn
Highest work function, best contact to <i>p</i> -Si	SnO ₂ :F, ZnSnO ₃
Lowest work function, best contact to <i>n</i> -Si	ZnO:F
Best thermal stability	SnO ₂ :F, TiN, Cd ₂ SnO ₄
Best mechanical durability	TiN, SnO ₂ :F
Best chemical durability	SnO ₂ :F
Easiest to etch	ZnO:F, TiN
Lowest deposition temperature	In ₂ O ₃ :Sn, ZnO:B, Ag
Least toxic	ZnO:F, SnO ₂ :F
Lowest cost	SnO ₂ :F

• การเลือกวัสดุนำไฟฟ้าโปร่งใสบางชนิดไปใช้งานต่างๆ

ในการเลือกใช้วัสดุนำไฟฟ้าโปร่งใสจะเห็นว่ามีการมีอุปกรณ์มากมายที่ใช้วัสดุเหล่านี้ การเลือกวัสดุมีความแตกต่างกันตามลักษณะการใช้งาน โดยอุปกรณ์บางส่วนได้แสดงให้เห็นดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ก) หน้าต่างแบบการปลดปล่อยต่ำ (Low Emissivity windows)

วัสดุหน้าต่างไฟฟ้าโปร่งใสที่อยู่บนหน้าต่างเพื่อให้เกิดการพัฒนาการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพของหน้าต่าง โดยหน้าต่างแบบนี้จะมีการสะท้อนการแผ่รังสีความร้อนจากอิเล็กทรอนิกส์สำหรับในช่วงความยาวคลื่นมากกว่าความยาวคลื่นพลาสมา ผลที่ได้นี้มีลักษณะคล้ายกับการเคลือบด้วยเงิน

(ข) เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cell)

ผิวหน้าของเซลล์แสงอาทิตย์ถูกปกคลุมด้วยชั้นไฟฟ้าโปร่งใส วัสดุที่เป็นเซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบาง จะใช้วัสดุหน้าต่างไฟฟ้าโปร่งใสเป็นชั้นอิเล็กโทรดที่ผิวหน้า ดังนั้น ITO จึงถูกเลือกสำหรับจุดประสงค์นี้เพราะว่าสามารถเคลือบได้อย่างมีประสิทธิภาพที่อุณหภูมิต่ำ

(ค) แผงแสดงผล (Flat panel display)

รูปแบบของแผงแสดงผลมีหลายชนิด ซึ่งทั้งหมดทุกชนิดใช้วัสดุหน้าต่างไฟฟ้าโปร่งใสเป็นชั้นอิเล็กโทรดในการขึ้นแบบ (pattern) นั้นชั้นไฟฟ้าโปร่งใสที่มีความสามารถในการถูกกัดง่ายเป็นส่วนสำคัญ พบว่าอินเดียมทินออกไซด์เป็นที่นิยมใช้ การเคลือบสารอินเดียมทินออกไซด์ที่อุณหภูมิต่ำมีความจำเป็นสำหรับอุปกรณ์แสดงสีที่ซึ่งวัสดุหน้าต่างไฟฟ้าโปร่งใสเคลือบอยู่บนชั้นสารอินทรีย์ (organic) ที่มีความไวต่อความร้อน

(ง) หน้าต่างและกระจกแบบอิเล็กโตรโครมิก (Electrochromic windows)

กระจกที่ปรับความสว่างได้อัตโนมัติในปัจจุบันได้ถูกติดตั้งในยานพาหนะหลายล้านคัน การพิจารณาการเลือกใช้วัสดุหลักๆคือความไวในการเปลี่ยนแปลงทางเคมี, ความโปร่งใสที่สูงและราคาต่ำ หน้าต่างที่ปรับความสว่างได้หรือเรียกว่าหน้าต่างอัจฉริยะนั้นเริ่มที่จะมีการใช้งานมากขึ้นในตลาดการค้า สำหรับสารที่นิยมใช้มีดีบุกออกไซด์หรืออินเดียมทินออกไซด์

(จ) หน้าต่างดีฟรอสต์ (Defrosting windows)

ตู้แช่เย็นในซูเปอร์มาร์เก็ตมีการผ่านกระแสไฟฟ้าบนวัสดุหน้าต่างไฟฟ้าโปร่งใสบนหน้าต่างที่ใช้แสดงสินค้า เพื่อที่ป้องกันความชื้นในอากาศซึ่งมาจากการควบแน่นแล้วเกาะลงบนกระจก จะบดบังทัศนวิสัยในการมอง

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

วัสดุตัวนำโปร่งใสมีการนำมาใช้ในหลายอุปกรณ์ โดยจะพบว่าไม่มีวัสดุนำไฟฟ้าโปร่งใสที่ดีที่สุดสำหรับทุกอุปกรณ์ ถ้าสารดีบุกออกไซด์เจือฟลูออรีนมีการถูกนำมาใช้มากที่สุด แต่ขณะที่สารอินเดียมทินออกไซด์ก็ยังคงเหมาะกับการนำมาใช้กับอุปกรณ์แสดงผลมากกว่าทุกอุปกรณ์ที่ใช้งานโดยทั่วไป การใช้วัสดุนำไฟฟ้าโปร่งใสจะต้องทราบว่าแต่ละชนิดที่นำมาใช้มีวิธีการผลิตที่แตกต่างกัน มีข้อดีข้อด้อยที่แตกต่างกัน ซึ่งจะต้องข่งน้ำหนักสำหรับแต่ละอุปกรณ์ว่าวัสดุชนิดไหนเหมาะสมที่สุด



บทที่ 3

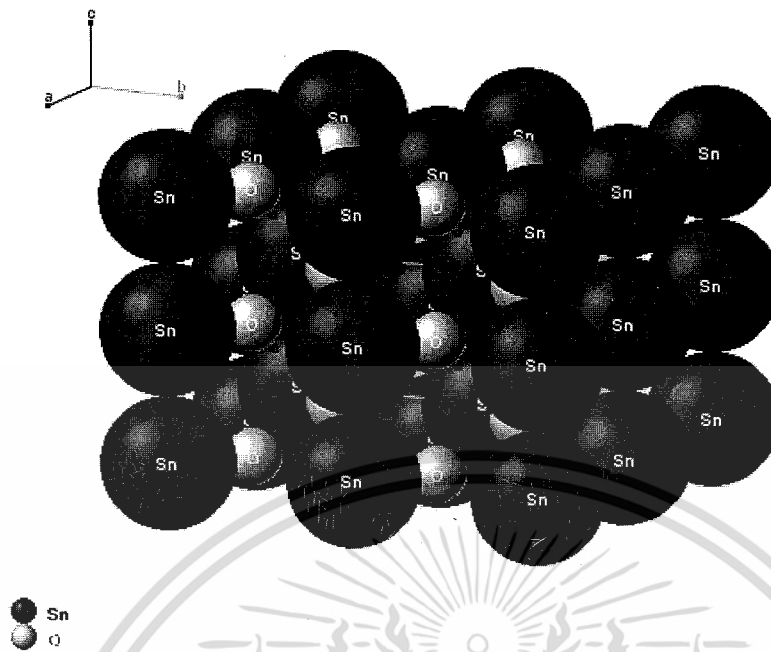
คุณสมบัติของ ดีบุกออกไซด์และแอมโมเนียมฟลูออไรด์

3.1 วัสดุตัวนำไฟฟ้าโปร่งใสดีบุกออกไซด์

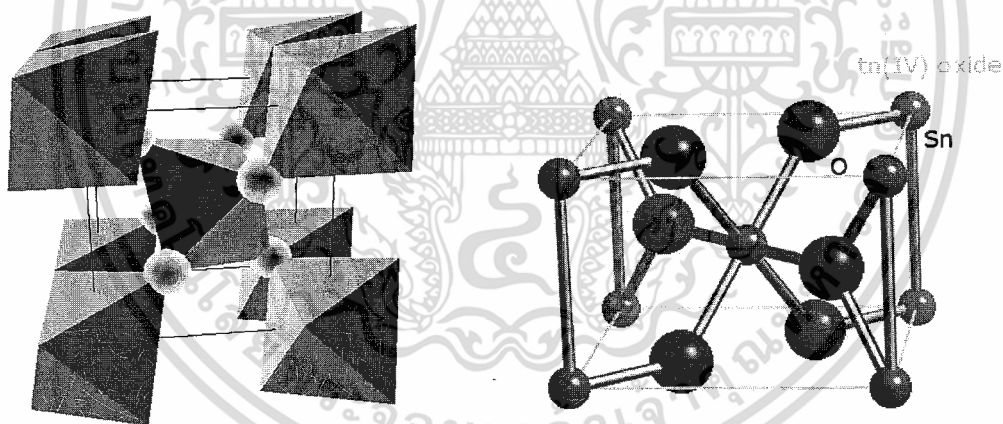
ดีบุกออกไซด์ (SnO_2) เป็นวัสดุหนึ่งในหลายวัสดุในประเภทโลหะออกไซด์ที่ถูกเลือกใช้เป็นอย่างมาก เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีราคาถูก ทนต่อสารเคมี มีความแข็งแรง เมื่อทำการเจือสารเพื่อเพิ่มพาหะจะสามารถนำไฟฟ้าได้ดีอีกทั้งยังคงสภาพการส่งผ่านแสงที่สูงต่อการนำไปใช้งานในด้านอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ด้วยดีบุกออกไซด์ไม่ได้ถูกนำมาใช้แค่ในด้านอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เพียงอย่างเดียวเท่านั้น แต่ยังคงมีการนำมาใช้เป็นตัวอุปกรณ์ตรวจจับก๊าซ (gas sensor) ที่ดีเนื่องจากตัววัสดุเองนั้นมีเสถียรภาพทางเคมีและ โครงสร้างที่สูง ทำให้มีความคงทนในระยะยาวและไม่เกิดปฏิกิริยาต่อก๊าซที่ทำการตรวจวัด โดยก๊าซที่เข้ามาในระบบที่ทำการตรวจจับนั้นจะมีการแตกตัวและแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนที่พื้นผิวของดีบุกออกไซด์ ซึ่งจะมีผลทำให้ค่าความนำไฟฟ้าของฟิล์มเปลี่ยนไป

3.1.1 โครงสร้างของดีบุกออกไซด์

ดีบุกออกไซด์มีชื่อเรียกว่า คาสตีเทอไรท์ (Cassiterite) โครงสร้างผลึกของดีบุกออกไซด์อยู่ในกลุ่มโครงสร้างแบบรูไทล์ (rutile) เช่นเดียวกับโลหะออกไซด์อย่างอื่น เช่น TiO_2 , RuO_2 , GeO_2 , MnO_2 , VO_2 , IrO_2 และ CrO_2 โครงสร้างรูไทล์นั้นมีหน่วยเซลล์ (unit cell) เป็นแบบเตตระโกนอล (tetragonal unit) ที่อยู่ใน space group แบบสมมาตรของ $P4_2/mnm$ มีค่าคงที่ผลึก (lattice constants) คือ $a = b = 4.7374 \text{ \AA}$ และ $c = 3.1864 \text{ \AA}$ เมื่อมีการเรียงตัวกัน อะตอมของดีบุก (Sn) จะมีการเชื่อมต่อกันแบบ sixfold อะตอมของออกซิเจน (O) จะมีการเชื่อมต่อกันแบบ threefold



รูปที่ 3.1 โครงสร้างอะตอมของดีบุกออกไซด์ (SnO_2)



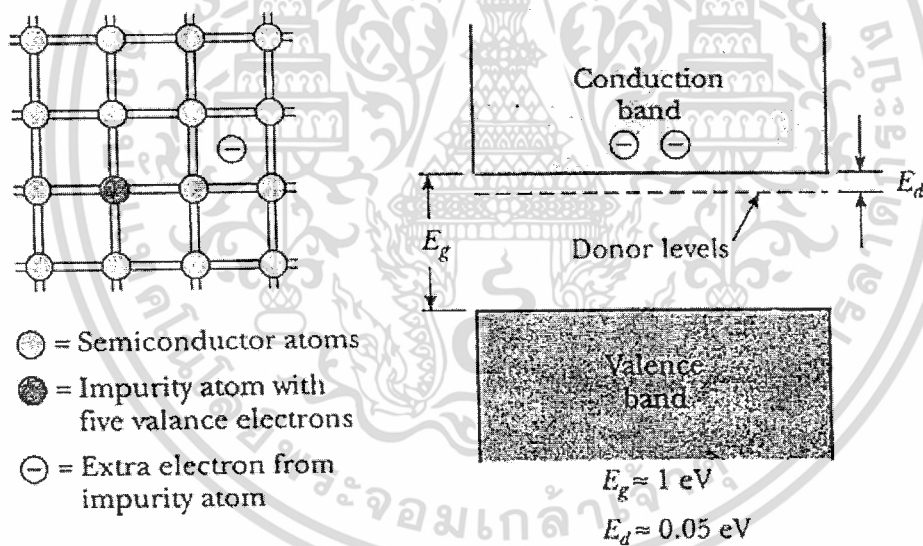
รูปที่ 3.2 โครงสร้างผลึกแบบ tetragonal rutile ของผลึกดีบุกออกไซด์

3.1.2 สมบัติทางไฟฟ้าของดีบุกออกไซด์

การนำไฟฟ้าของดีบุกออกไซด์นั้นเกิดขึ้นได้จาก 2 กรณี คือ เกิดจากการเกิดตำแหน่งว่างของอะตอมออกซิเจนในโครงสร้าง (oxygen vacancy) ซึ่งจะส่งผลให้อะตอมของดีบุกมีอิเล็กตรอนเหลือจากการจับพันธะกับอะตอมออกซิเจน จึงทำให้มีอิเล็กตรอนเหลือเกิดเป็นพาหะนำไฟฟ้าได้อีกกรณีหนึ่งคือการเติมสารเจือ (impurity element) เพื่อเพิ่มพาหะนำไฟฟ้า โดยทั่วไปวัสดุดีบุกออกไซด์จะมีการเจือด้วยอะตอมธาตุหลักอยู่ 2 ธาตุคือฟลูออรีน(F) และ แอนติโมนี (Sb) โดยที่อะตอมของฟลูออรีน($\text{F}^-:0.136 \text{ nm}$) ซึ่งมีขนาดใกล้เคียงกับอะตอมออกซิเจน($\text{O}^{2-}:0.140 \text{ nm}$) จะเข้าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไปแทนที่อะตอมของออกซิเจน เมื่ออะตอมดีบุกจับพันธะกับอะตอมของฟลูออรีนแทนออกซิเจนแล้วจะเหลืออิเล็กตรอนอยู่ 1 ตัวซึ่งจะเป็นพาหะหลักในการนำไฟฟ้าแทน ในขณะที่อะตอมของแอนติโมนี (Sb^{+5} : 0.062 nm) ซึ่งมีขนาดใกล้เคียงกับอะตอมของดีบุก (Sn^{+4} : 0.071 nm) จะเข้าแทนที่อะตอมของดีบุก เมื่อจับพันธะกับอะตอมของออกซิเจนแทนดีบุกแล้วจะเหลืออิเล็กตรอนอยู่ 1 ตัวซึ่งจะเป็นพาหะหลักในการนำไฟฟ้าต่อไป

เมื่ออธิบายในรูปแบบของแถบพลังงานซึ่งดีบุกออกไซด์มีช่องว่างพลังงาน (energy gap) ประมาณ 3.6 eV จากการนำไฟฟ้าได้ของทั้งสองกรณีนั้นไม่ว่าจะเป็นการนำไฟฟ้าด้วยการเกิดตำแหน่งว่างของอะตอมหรือการเติมสารเจือ ก็จะมีอิเล็กตรอนเป็นพาหะหลักในการนำไฟฟ้า ดังนั้นวัสดุตัวนำไฟฟ้าโปร่งใสนั้นจะมีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีผลเหมือนเป็นการเติมสารเจือในสารกึ่งตัวนำ ซึ่งจะทำให้ระดับชั้นต่ำสุดของแถบนำลดลงมาเป็นระยะ E_d จะเรียกระดับนี้ว่าระดับผู้ให้ (donor level) แสดงในรูปที่ 2.3 โดยอิเล็กตรอนที่เป็นพาหะหลักที่ใส่เข้าไปให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นของการนำไฟฟ้าทั้งสองกรณีเรียกว่าธาตุผู้ให้ (donor) ในกรณีนี้ค่าการนำไฟฟ้ามาจากประจุลบเคลื่อนที่จึงเรียกวัดคุณสมบัติว่า “สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น” (N-type semiconductor)



รูปที่ 3.3 แถบพลังงานสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

3.1.3 สมบัติทางแสงของดีบุกออกไซด์

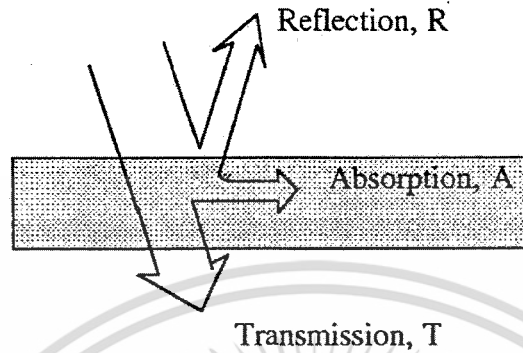
วัสดุตัวนำไฟฟ้าโปร่งใส มีคุณสมบัติทางแสงที่จำเป็นต้องศึกษาอย่าง การดูดกลืน (absorption), การส่งผ่าน (transmission), การสะท้อน (reflection) โดยคุณสมบัติทางแสงที่กล่าวมานั้นจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลักอยู่ 2 อย่างคือ

1. ช่องว่างพลังงาน (energy gap, E_g)

เอกสารนี้เป็นการสื่อสารในวัสดุ (impurity doping) วัสดุศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

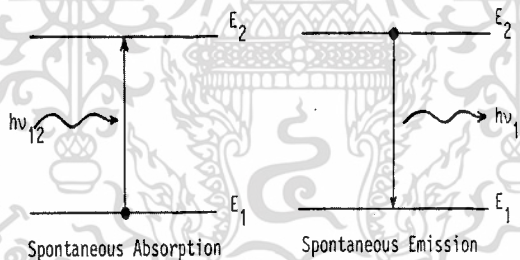
3.1.3.1 ผลของแสงที่มีต่อสารกึ่งตัวนำ

ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางแสงในวัสดุและแสงตกลงบนวัสดุแสดงได้ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 3.4 ลำแสงตกลงบนวัสดุสารกึ่งตัวนำ

ในทางควอนตัมแมคานิกส์ ระบบของโมเลกุลหรืออะตอมจะประกอบไปด้วยชั้นพลังงานต่างๆตามโครงสร้างของโมเลกุลและอะตอมนั้นๆ ขอยกตัวอย่างกรณีชั้นพลังงานของอะตอม เช่น E_1 และ E_2 ในรูปที่ 2.5 อิเล็กตรอนเปลี่ยนสถานะจาก E_1 ขึ้นไปสู่ E_2 ก็ต้องมีการดูดกลืนพลังงาน และถ้าอิเล็กตรอนเปลี่ยนสถานะจาก E_2 ลงไปสู่ E_1 ก็ต้องมีการคายพลังงาน พลังงานที่อิเล็กตรอน



รูปที่ 3.5 การดูดกลืนแสง (Absorption) และการเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเอง (Spontaneous Emission)

ระหว่างชั้นพลังงาน E_1 และ E_2

ต้องดูดกลืนหรือคายออกนี้จะมีขนาดตามผลต่างระหว่าง E_1 และ E_2 หากพลังงานที่ต้องดูดกลืนหรือคายออกนี้เป็นพลังงานแสง ก็จะเกิดการดูดกลืนแสง (Light Absorption) หรือการเปล่งแสง (Light Emission) ขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.6 (ก) และ (ข) พลังงานแสงหรือโฟตอน (photon) จึงมีค่า

$$hv_{12} = E_2 - E_1 \quad (3.1)$$

ช่องว่างพลังงานแสงของสารกึ่งตัวนำจึงเป็นตัวแปรที่สำคัญของการดูดกลืนและการส่งผ่านแสง เนื่องจากช่องว่างพลังงานแสงในสารกึ่งตัวนำก็คือผลต่างของพลังงานแถบนำและแถบวาเลนซ์ การเปลี่ยนแปลงจากการสารกึ่งตัวนำโปร่งใสไปเป็นสารกึ่งตัวนำโปร่งแสงนั้นก็เป็ผลจากการดูดกลืนของพลังงานโฟตอนที่ทำให้เกิดการกระตุ้นอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบนำและได้ทั้งโฮล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(hole) ว่างแถบวาเลนซ์ ในการดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำช่องแถบตรง (direct band gap semiconductor) จะมีการเปลี่ยนแปลงของสถานะพลังงานอยู่สองสถานะคือสถานะพลังงานเริ่มต้น (initial state : E_i) และสถานะพลังงานสิ้นสุด (final state : E_f) ซึ่งความผลต่างของสองสถานะพลังงานนี้ก็คือพลังงานโฟตอนที่มีสมการเหมือนกับสมการที่ 2.3

$$E_f - E_i = hf \quad , E = E_f - E_i$$

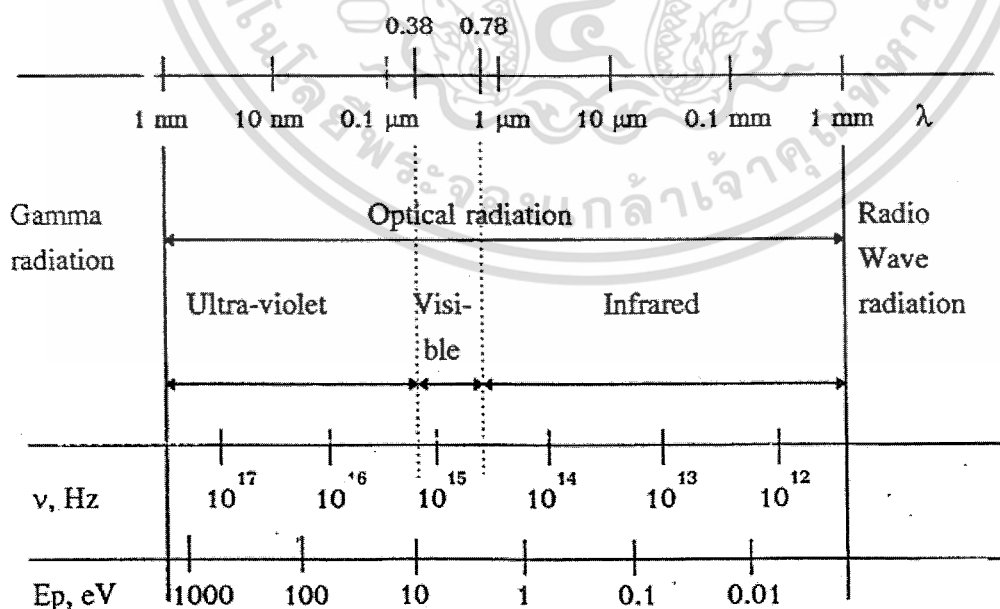
$$E = hf \quad (3.2)$$

โดยที่ h = ค่าคงที่ของพลังค์ (Plank's constant), $f = 1/\lambda$

พลังงานโฟตอน (E_p) ที่ความยาวคลื่นต่างๆแสดงในรูปที่ 2.7 และความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นกับช่องว่างพลังงานนั้นแสดงได้ในสมการที่ 2.5

$$\lambda_g (\mu m) = \frac{1.23}{E_g} \quad (eV) \quad (3.3)$$

พลังงานโฟตอนที่มากกว่าช่องว่างพลังงานอิเล็กทรอนิกส์จะเกิดการดูดกลืนพลังงานและถูกกระตุ้นจากสถานะพลังงานเริ่มต้นที่แถบวาเลนซ์ไปยังสถานะพลังงานสิ้นสุดที่แถบนำ ในขณะที่พลังงานโฟตอนที่น้อยกว่าช่องว่างพลังงานนั้นอิเล็กทรอนิกส์จะไม่สามารถดูดกลืนพลังงานโฟตอนได้ แสงจึงสามารถผ่านวัสดุสารกึ่งตัวนำได้ ดังนั้นที่ความยาวคลื่นสั้นกว่าความยาวความยาวคลื่นขีดเริ่ม (threshold wavelength, λ_g) พลังงานโฟตอนก็จะมากกว่าช่องว่างพลังงานและถูกดูดกลืนอิเล็กทรอนิกส์จะถูกกระตุ้นไปยังแถบนำและทิ้งโฮลไว้ยังแถบวาเลนซ์ ส่วนความถี่ที่ความยาวคลื่นมากกว่าความยาวคลื่นขีดเริ่ม ก็จะทะลุผ่านสารกึ่งตัวนำไปได้ ซึ่งเงื่อนไขเหล่านี้เป็นสิ่งสำคัญของการดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ

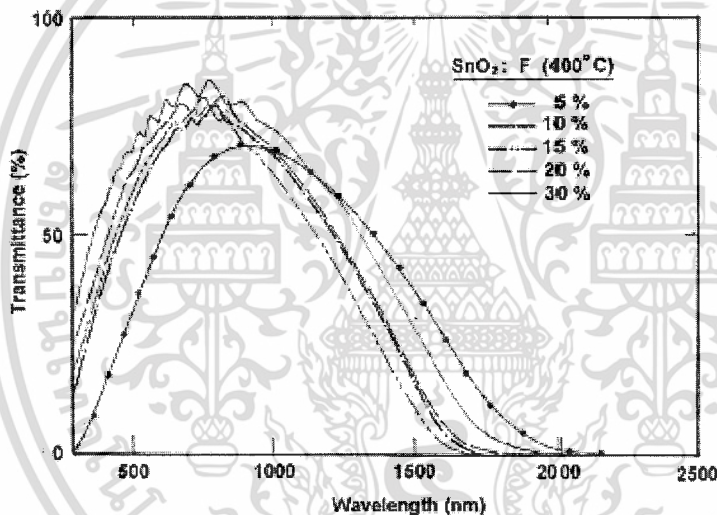


รูปที่ 3.6 ความสัมพันธ์พลังงานโฟตอนและความยาวคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่มีค่าน้อยกว่า 1.6 eV นั้นจะมีความยาวคลื่นขีดเริ่มที่ 0.76 μm . สารกึ่งตัวนำจะมีสถานะเป็นสารกึ่งตัวนำทึบแสง เพราะที่พลังงานน้อยกว่า 1.6 eV ความยาวคลื่นที่สั้นกว่า 0.76 μm . จะถูกดูดกลืนไว้หมด (รวมถึงแสงช่วงที่ตามองเห็น) สำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างพลังงานมากกว่า 3 eV จะมีความยาวคลื่นขีดเริ่มที่ 0.4 μm . ความยาวคลื่นที่สั้นกว่า 0.4 μm . เท่านั้นที่ถูกดูดกลืน ดังนั้นแสงในช่วงที่ตามองเห็นจะไม่ถูกดูดกลืนไปด้วย สารกึ่งตัวนำจึงแสดงสถานะเป็นสารกึ่งตัวนำโปร่งใสนั่นเอง

สารกึ่งตัวนำโปร่งใสโดยทั่วไปจะมีรูปแบบการส่งผ่านแสงดังรูปที่ 2.7 ซึ่งจะมีการดูดกลืนแสงเกิดขึ้นในช่วงรังสีเหนือม่วง (ultra-violet) และรังสีใต้แดง (infrared) ดังนั้นความร้อนที่เกิดขึ้นจากความยาวคลื่นในช่วงอินฟราเรดจะถูกดูดกลืนไว้ในตัววัสดุ ทำให้ความร้อนที่เกิดจากความยาวคลื่นในช่วงนี้ไม่สามารถผ่านไปได้ จึงมีการนำเอาปรากฏการณ์นี้ไปใช้ประโยชน์ในกระจกป้องกันความร้อนเข้าสู่อาคารได้



รูปที่ 3.7 การส่งผ่านแสงของวัสดุฟิล์มออกไซด์

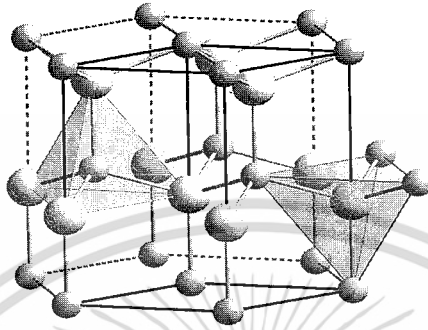
ชนิด TCO	ข้อดี	ข้อเสีย
ITO	<ul style="list-style-type: none"> - สามารถนำไฟฟ้าได้ดี - มีค่าการส่งผ่านแสงดี - สามารถกัดออกได้ง่าย 	<ul style="list-style-type: none"> - มีราคาแพง
SnO ₂ :F	<ul style="list-style-type: none"> - ราคาต้นทุนต่ำ - ด้านทานความร้อนได้สูง - ทนต่อการกัดกร่อน 	<ul style="list-style-type: none"> - นำไฟฟ้าได้ไม่ดีเท่า ITO - มีความยุ่งยากในการกัด

ตารางที่ 3.1 ข้อดี-ข้อเสีย SnO₂:F เมื่อเทียบกับ ITO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 แอมโมเนียมฟลูออไรด์ (NH_4F)

ประกอบด้วย แอมโมเนีย (NH_3) และ กรดไฮโดรฟลูออริก (HF) โดยแอมโมเนียมฟลูออไรด์มีลักษณะโครงสร้างผลึกเป็นปริซึมขนาดเล็ก เป็นแบบ wurtzite และสามารถละลายในน้ำได้ดี



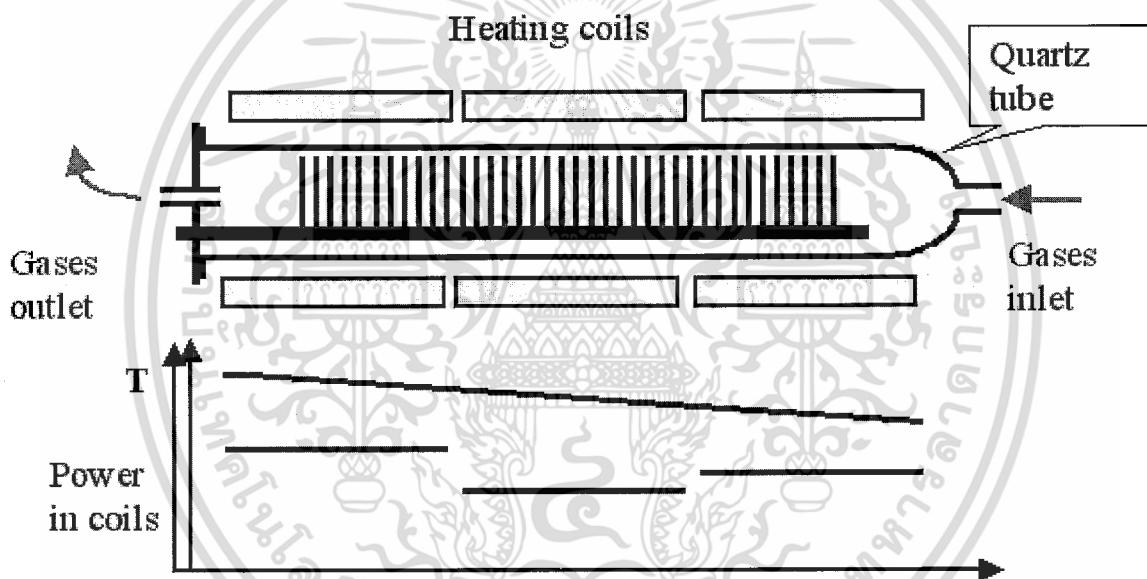
รูปที่ 3.8 ลักษณะ โครงสร้างผลึกแบบ Wurtzite

บทที่ 4

Chemical Vapor Deposition (CVD)

4.1 Chemical Vapor Deposition (CVD)

CVD เป็นกระบวนการทางเคมีเพื่อใช้ผลิตอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่มีประสิทธิภาพสูง ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้ในอุตสาหกรรมทางเซมิคอนดักเตอร์อย่างกว้างขวาง เทคนิคนี้เป็นการปลูกผลึกฟิล์มบนผิวหน้าของแผ่นเวเฟอร์หรือกระจก ซึ่งเราจะเรียกว่า Heterogeneous reaction เช่น monocrystalline, polycrystalline, amorphous และ epitaxial ซึ่งสารเคมีตั้งต้นบางส่วนซึ่งอยู่ในรูปของก๊าซจะเกิดปฏิกิริยาเคมีก่อนที่จะถึงผิวหน้าแผ่นเวเฟอร์ ซึ่งเราจะเรียกว่า Homogeneous reactions ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เราไม่ต้องการให้เกิดขึ้น เพราะจะทำให้ฟิล์มที่เกิดขึ้นไม่สามารถยึดติดกับแผ่นเวเฟอร์ได้ดี, ทำให้ฟิล์มมีความหนาแน่นต่ำ และมีข้อผิดพลาดเกิดขึ้น



รูปที่ 3.1 ตัวอย่างระบบ CVD

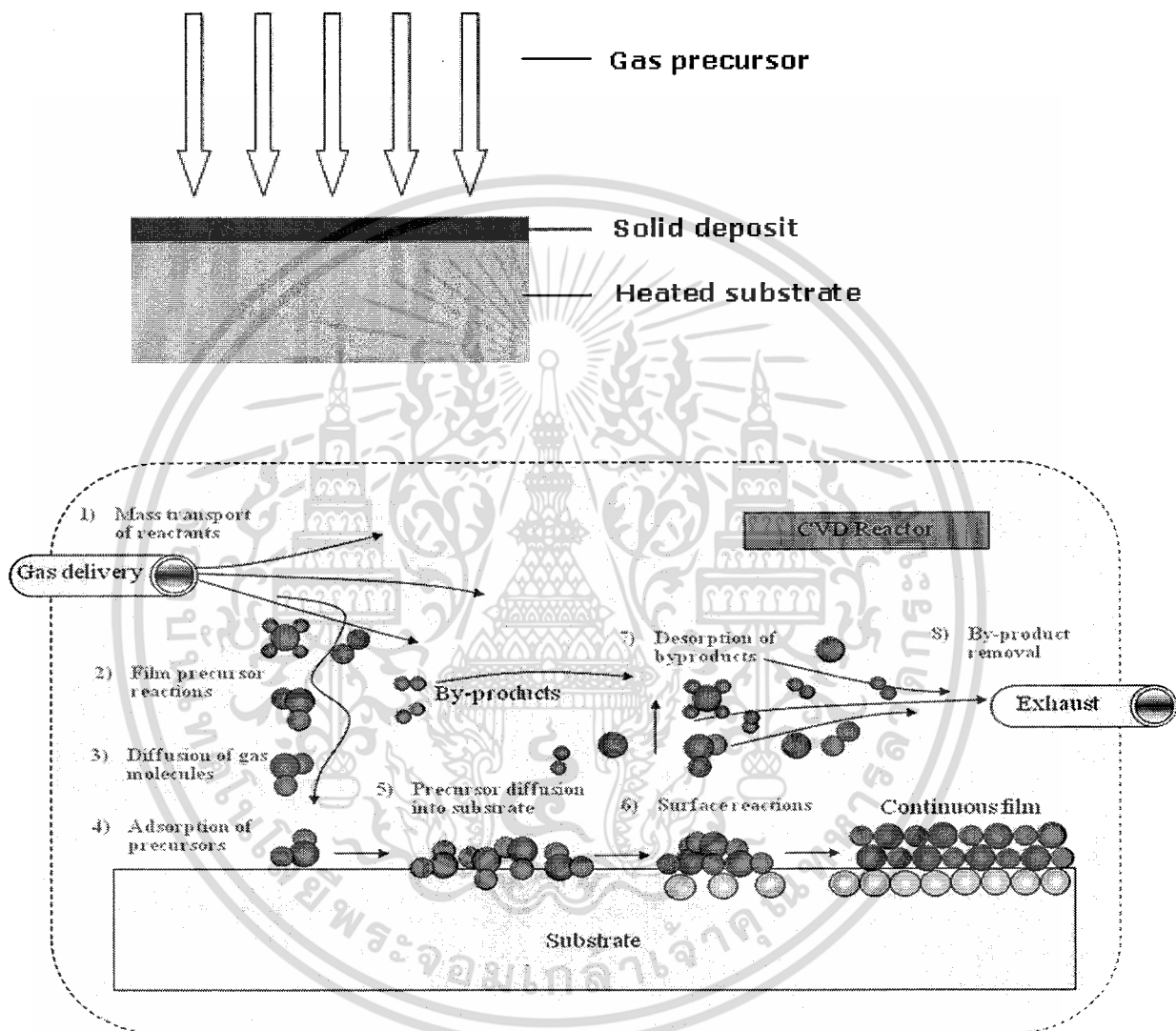
4.1.1 ขั้นตอนการเกิดผลึกฟิล์มในกระบวนการ CVD

กระบวนการเกิดผลึกฟิล์มนี้มี 8 ขั้นตอนหลักดังนี้ ตามรูปที่ 4.4

1. ก๊าซจะถูกแพร่ไปยังส่วนปฏิบัติการซึ่งมีฐานรองวางอยู่
2. ก๊าซบางส่วนจะเกิดปฏิกิริยา Homogeneous reaction ก่อนแพร่ถึงฐานรองซึ่งทำให้เกิดผลพลอยได้ขึ้นมา
3. ก๊าซที่เหลือจากปฏิกิริยา Homogeneous reaction
4. ก๊าซจะตกลงบนฐานรองและถูกยึดติดกับผิวหน้าของฐานรอง
5. ก๊าซจะทำการแพร่ลงสู่ฐานรอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. เกิดปฏิกิริยา Heterogeneous reaction กับฐานรองจะทำให้เกิดผลึกฟิล์มและผลพลอยได้ของปฏิกิริยา
7. ผลพลอยได้จะไม่ติดอยู่บนผิวหน้าของฐานรองโดยจะลอยขึ้นมาเหนือผิวหน้า
8. ผลพลอยได้จะถูกดูดออกไปจากส่วนปฏิบัติการ



รูปที่ 3.2 แสดงขั้นตอนการเกิดผลึกบนฐานรอง

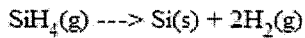
4.1.2 การเกิดปฏิกิริยาในแบบต่างๆของ CVD

- **Pyrolysis-Thermal decomposition**



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ex: Si deposition from Silane at 650 C



use to deposit: Al, Ti, Pb, Mo, Fe, Ni, B, Zr, C, Si, Ge, SiO₂, Al₂O₃, MnO₂, BN, Si₃N₄, GaN, Si_{1-x}Ge_x, ...

- **Reduction**

Reduction

often using H₂



often lower temperature than pyrolysis

reversible => can use for cleaning too

ex: W deposition at 300 C



use to deposit Al, Ti, Sn, Ta, Nb, Cr, Mo, Fe, B, Si, Ge, TaB, TiB₂, SiO₂, BP, Nb₃Ge, Si_{1-x}Ge_x, ...

- **Oxidation**

often using O₂



ex: SiO₂ deposition from silane and oxygen at 450 C (lower temp than thermal oxi



use to deposit: Al₂O₃, TiO₂, Ta₂O₅, SnO₂, ZnO, ...

- **Compound formation**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

often using ammonia or water vapor



ex: deposit wear resistant film (BN) at 1100 C



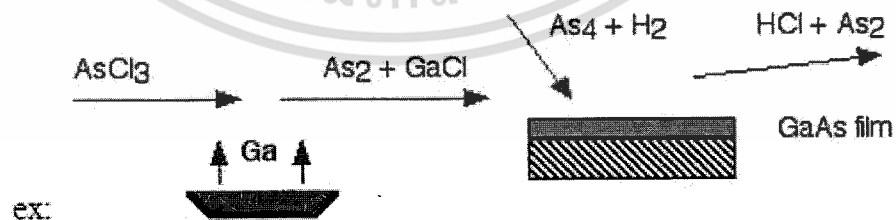
- Disproportional

compounds involving elements with multiple valence states



use to deposit: Al, C, Ge, Si, III-V compounds, ...

- Reversible Transfer



use to deposit: GaInAs, AlGaAs, InP, FeSi₂, ...

4.1.3 ฐานรองในกระบวนการ CVD

ชนิดของฐานรอง

- gasses
- volatile liquids
- sublimable solids
- combination

ฐานรองควรอยู่ในสภาพ

- ที่อุณหภูมิห้องต้องมีความเสถียร
- อุณหภูมิที่เกิดปฏิกิริยา ต้องน้อยกว่าจุดหลอมเหลวของฐานรอง
- ความเป็นพิษต่ำ
- สามารถกำจัดสารที่ไม่ต้องการบน ฐานรอง ได้ง่าย

4.1.4 ปัจจัยในการเกิดฟิล์ม

- การแพร่ของก๊าซมายังฐานรอง
- การดูดซับของก๊าซมายังฐานรอง
- อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีบนฐานรอง

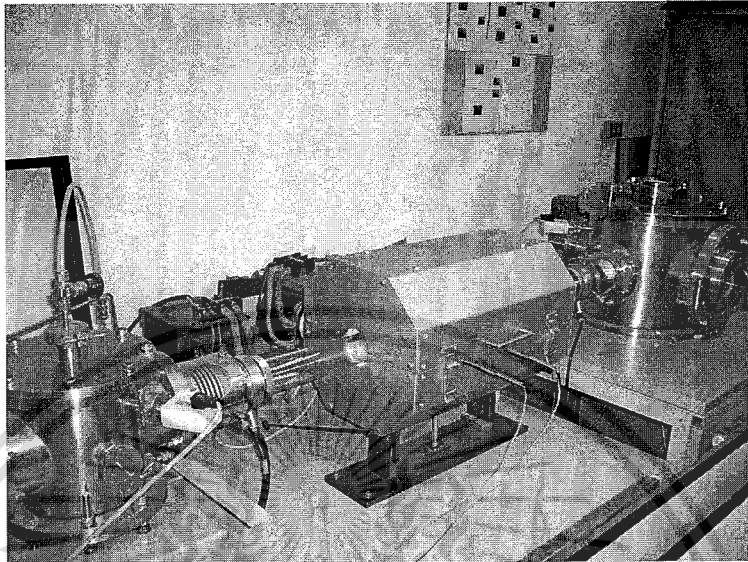
4.1.5 ประเภทของกระบวนการ CVD สามารถแบ่งได้หลายชนิดดังนี้

- แยกชนิดตามความดันที่ใช้ในกระบวนการ

- *Atmospheric pressure CVD* (APCVD) - กระบวนการที่ความดันบรรยากาศ
- *Low-pressure CVD* (LPCVD) - กระบวนการที่ต่ำกว่าความดันบรรยากาศ และโดยส่วนมากจะใช้วิธี LPCVD หรือ UHCVD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- *Ultrahigh vacuum CVD* (UHVCVD) – กระบวนการที่ความดันต่ำมากที่สุดที่ 10^{-6} Pa (~ 10^{-8} torr).



รูปที่ 4.3 ตัวอย่างเครื่อง Thermal CVD

-แยกชนิดตามคุณสมบัติของไอเคมี

- *Aerosol assisted CVD* (AACVD) - กระบวนการที่สารเคมีตั้งต้นเป็นเป็นละอองเคมี โดยเทคนิคนี้เหมาะกับสารตั้งต้นที่ไม่สามารถระเหยได้อย่างรวดเร็ว.
- *Direct liquid injection CVD* (DLICVD) – กระบวนการที่สารตั้งต้นเป็นของเหลว เทคนิคนี้เหมาะสำหรับกับสารตั้งต้นที่เป็นของแข็งหรือของเหลว

-ชนิดพลาสมา

- *Microwave plasma-assisted CVD* (MPCVD)
- *Plasma-Enhanced CVD* (PECVD) – กระบวนการที่ใช้พลาสมาเป็นตัวเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยา และกระบวนการนี้สามารถเกิดที่อุณหภูมิต่ำได้
- *Remote plasma-enhanced CVD* (RPECVD) – คล้ายกับกระบวนการ PECVD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 บวกข้อดีและข้อเสียของกระบวนการ CVD แต่ละชนิด

ประเภทของ CVD	ข้อดี	ข้อเสีย	การนำไปใช้
APCVD	อัตราการเกิดผลึกดี, ใช้ อุณหภูมิต่ำ	มีการปนเปื้อนสูง	สร้างออกไซด์ที่ใช้ อุณหภูมิต่ำ
LPCVD	ความบริสุทธิ์สูง, ผลึกมีความเป็นระเบียบ,	ต้องใช้อุณหภูมิต่ำ, อัตราการเกิดผลึกช้า	สร้างออกไซด์ที่ใช้ อุณหภูมิต่ำ, ซิลิคอนไน ไตร, โพลีซิลิคอน
PECVD	ใช้อุณหภูมิต่ำ	มีการปนเปื้อน	สร้างชั้นในไตรพาส ซิเวชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

ขั้นตอนการทดลอง

5.1 การเตรียมฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ที่เจือด้วยฟลูออรีน ($\text{SnO}_2:\text{F}$)

5.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง $\text{SnO}_2:\text{F}$

- Chamber, ท่อควอทซ์

- Atomizer

- ที่อุณหภูมิ $300\text{ }^{\circ}\text{C} - 450\text{ }^{\circ}\text{C}$

- กระจกสไลด์ใช้เป็นฐานรองในการปลูกฟิล์ม

- เทอร์โมคัปเปิล

- สารตั้งต้นที่ใช้ Stannous chloride ($\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)	2.256 g
Ammonium fluoride (NH_4F)(10%)	0.185 g
Ethyl Alcohol ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$)	100 ml
Hydrochloric (HCl)	0.831 ml

- Flow meter

5.1.2 วิธีการเตรียมฟิล์มบาง $\text{SnO}_2:\text{F}$

1) ทำความสะอาดกระจกสไลด์ โดย

- ทำความสะอาดด้วยอะซิโตน โดยนำเข้าเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาที

- ทำความสะอาดด้วยเอทานอล โดยนำเข้าเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาที

- ทำความสะอาดด้วยน้ำ DI โดยนำเข้าเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาที

2) เตรียมสารตั้งต้นที่ประกอบด้วย Stannous chloride ($\text{SnO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), Ammonium Fluoride (NH_4F) Ethyl Alcohol ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$), Hydrochloric (HCl) ตามที่กำหนดไว้ด้านบน



รูปที่ 5.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

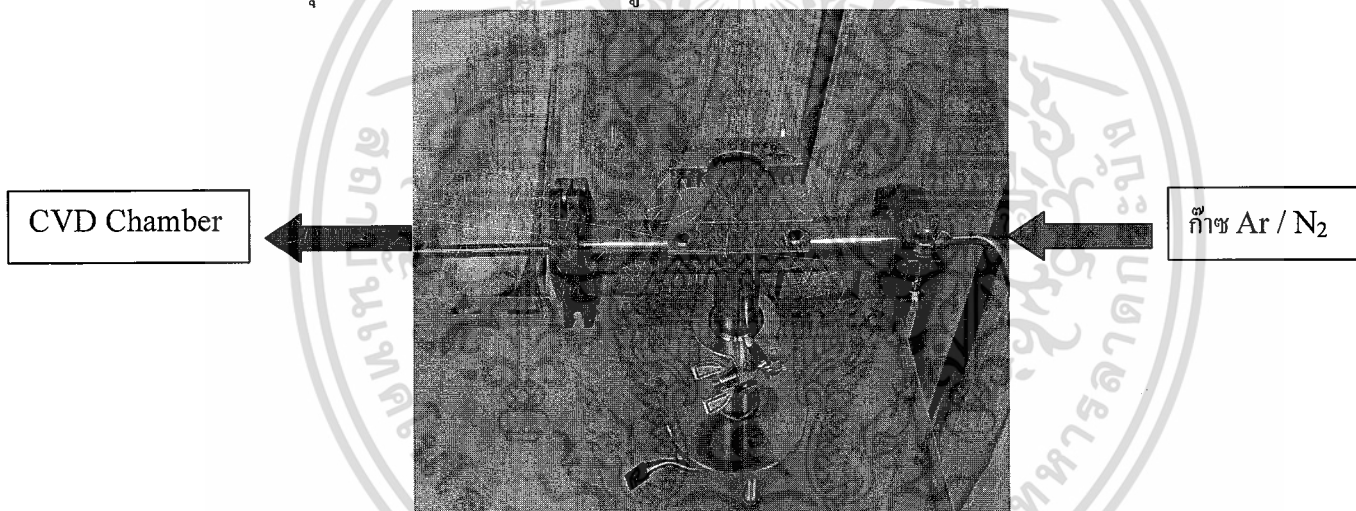
- 3) นำสารละลายจากข้อ 2 ใส่ในแก้วภาชนะที่มี Atomizer อยู่
- 4) นำกระจกสไลด์เข้าสู่ระบบในบริเวณ Heater
- 3) ปลดอ็อกซิเจนเข้าสู่ระบบในอัตรา 1 SCCM เพื่อไล่อากาศออกจากระบบ
- 5) ปรับเตาให้ความร้อนให้ได้อุณหภูมิตามที่ต้องการ
- 6) เมื่อได้อุณหภูมิที่ต้องการแล้ว ทำการเปิดเครื่องตีหมอกทำการทดลองเป็นเวลา 20 นาที
- 7) ลดอุณหภูมิ และนำชิ้นงานออก

5.2 การออกแบบระบบ CVD

5.2.1 เครื่องกำเนิดไอเคมี

โดยในการทดลองนั้นเราได้ใช้ เครื่องกำเนิดไอเคมีในรูปแบบต่างๆ เพื่อศึกษาผลของไอเคมีที่เกิดขึ้นว่ามีลักษณะอย่างไร และเครื่องกำเนิดไอเคมีแต่ละชนิดมีข้อดี-ข้อเสียอย่างไรบ้าง ดังนี้

ชนิดที่ 1 เป็นชุดเครื่องตีหมอกที่ใช้ติดตั้งอยู่ภายใต้ภาชนะโลหะ



รูปที่ 5.2 ชุดกำเนิดไอเคมีแบบที่ 1

ข้อเสีย

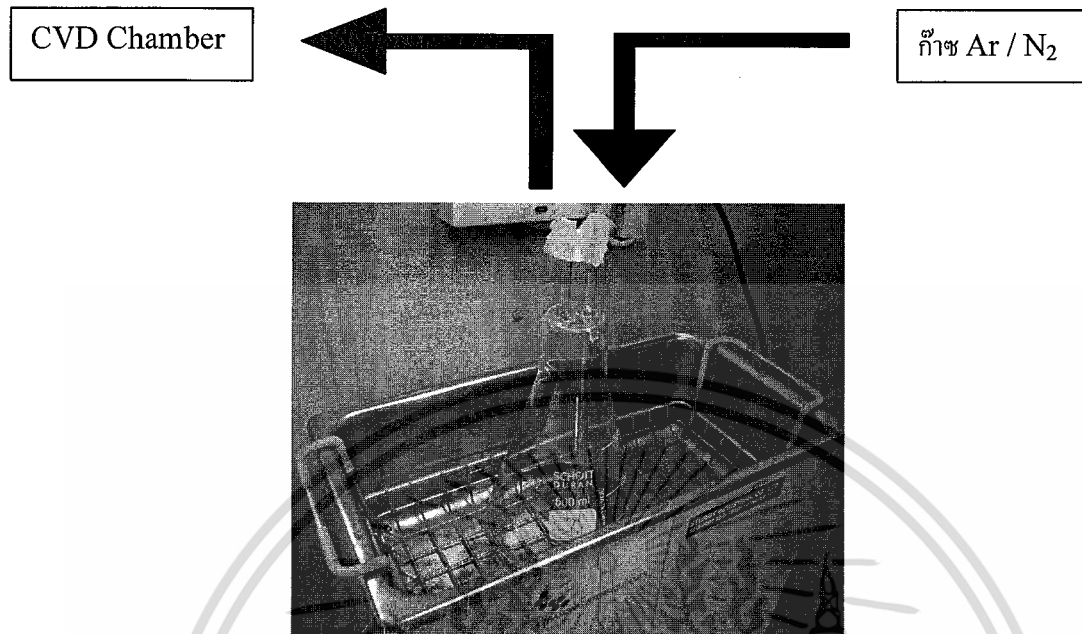
- จากการทดลองพบว่าสารที่ใช้ในการทำการทดลอง ทำปฏิกิริยากับภาชนะโลหะ ทำให้ผลของไอเคมีที่ผลิตจากเครื่องตีหมอกชนิดนี้อาจจะเป็นไอเคมีของสารชนิดที่เราไม่ต้องการ การปลุกฟิล์มจึงได้ผลที่ไม่ดีนัก
- ไม่สามารถมองเห็นหมอกได้อย่างชัดเจนว่าเข้าไปในระบบหรือไม่
- มีราคาแพง

ข้อดี

- ทำจากโลหะเมื่อมีความแข็งแรงทนทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชนิดที่ 2 ทำการประยุกต์ใช้เครื่องอัตราโซนิก โดยเปิดเครื่องทำงานทำให้เกิดละอองเคมีได้เช่นกัน

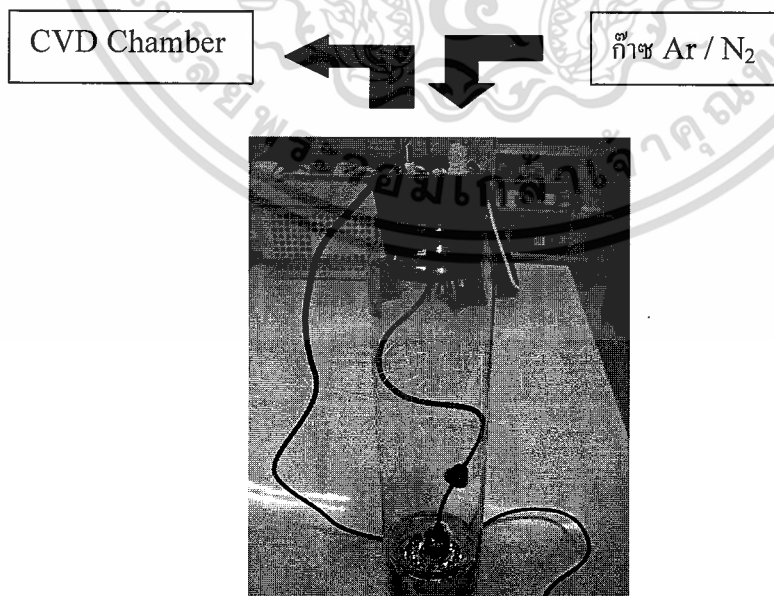


รูปที่ 5.3 ชุดกำเนิดไอเคมีแบบที่ 2

ข้อเสีย

- สามารถผลิตไอเคมีได้น้อยมาก จนชิ้นงานที่ใช้ทำการทดลองไม่สามารถวัดค่าความต้านทานได้

ชนิดที่ 3 นำเครื่องตีหมอกใส่โหลภาชนะ



รูปที่ 5.4 ชุดกำเนิดไอเคมีแบบที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

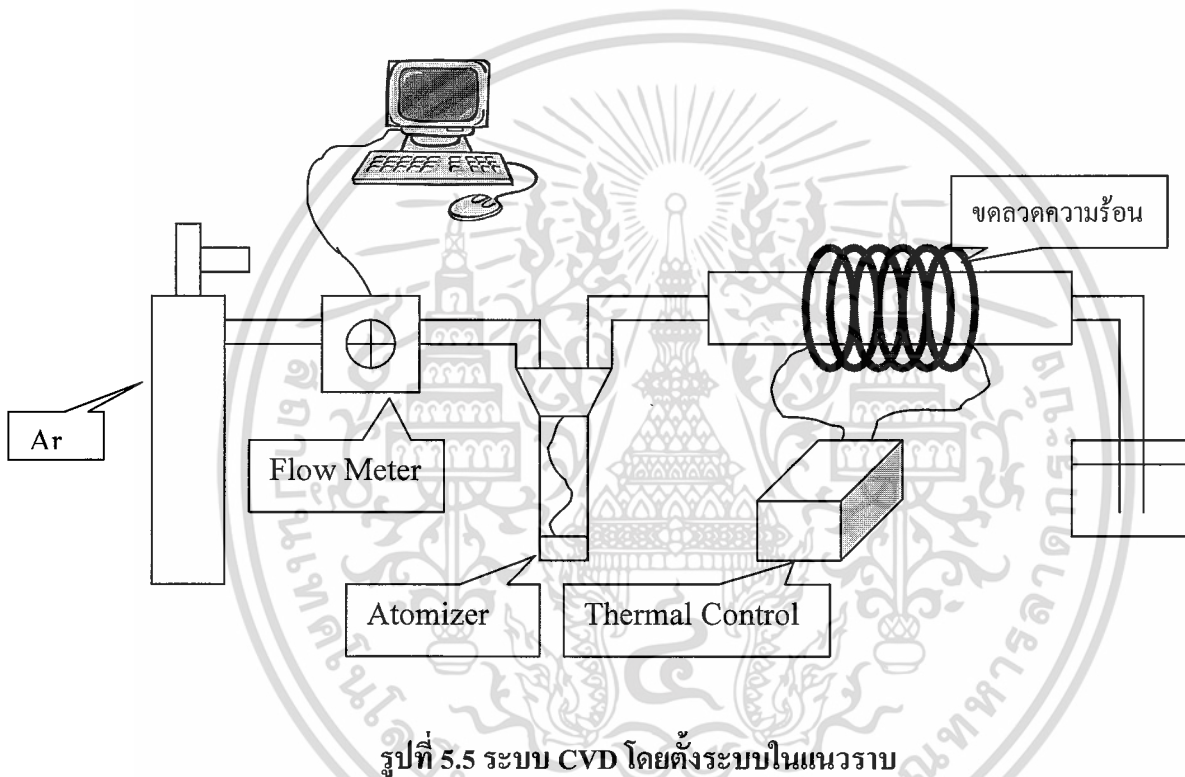
ข้อดี

- สามารถผลิตไอเคมีให้กับระบบ ได้อย่างมากและเห็นได้ชัด

5.2.2 ระบบ CVD ที่ใช้ทำการทดลอง

ในการทดลอง ได้ทำการทดลองรูปแบบของระบบ CVD ในรูปแบบต่างๆดังนี้

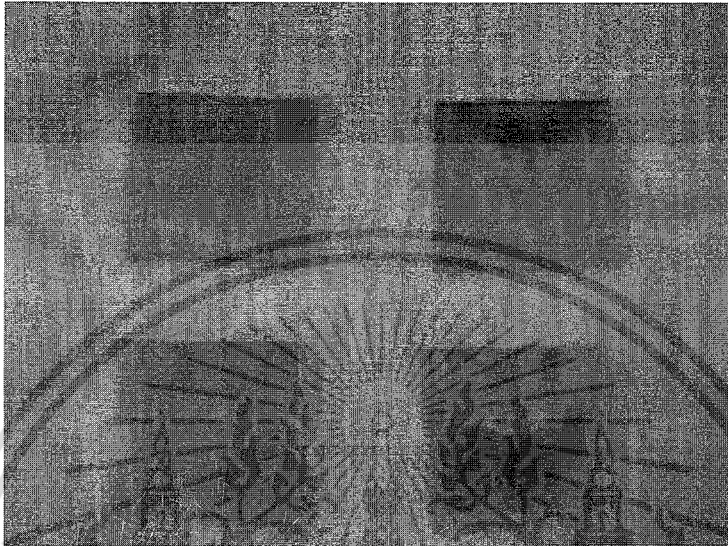
ระบบแบบที่ 1



- 1 ใช้เครื่องกำเนิดไอเคมีแบบที่ 3 เนื่องจากสารเคมีทำปฏิกิริยากับภาชนะโลหะที่ใส่สารเคมีในแบบที่ 1 และเครื่องกำเนิดไอเคมีแบบที่ 2 ไม่สามารถผลิตไอเคมีได้มากตามที่ต้องการ
- 2 ผลของการปลูกฟิล์มพบว่าสามารถวัดค่าความต้านทานบนชิ้นงานได้แต่ ชิ้นงานไม่มีความเป็นยูนิฟอร์ม ทำให้ยังไม่สามารถนำไปใช้งานจริงได้
- 3 จึงทำการเปลี่ยนปัจจัยในการทดลองซึ่งคิดว่ามีผลต่อความเป็นยูนิฟอร์มของชิ้นงาน เช่น ค่า Flowrate, ตำแหน่งของชิ้นงานภายในขดลวดที่ให้ความร้อน และ ตำแหน่งของขดลวดที่ให้ความร้อน

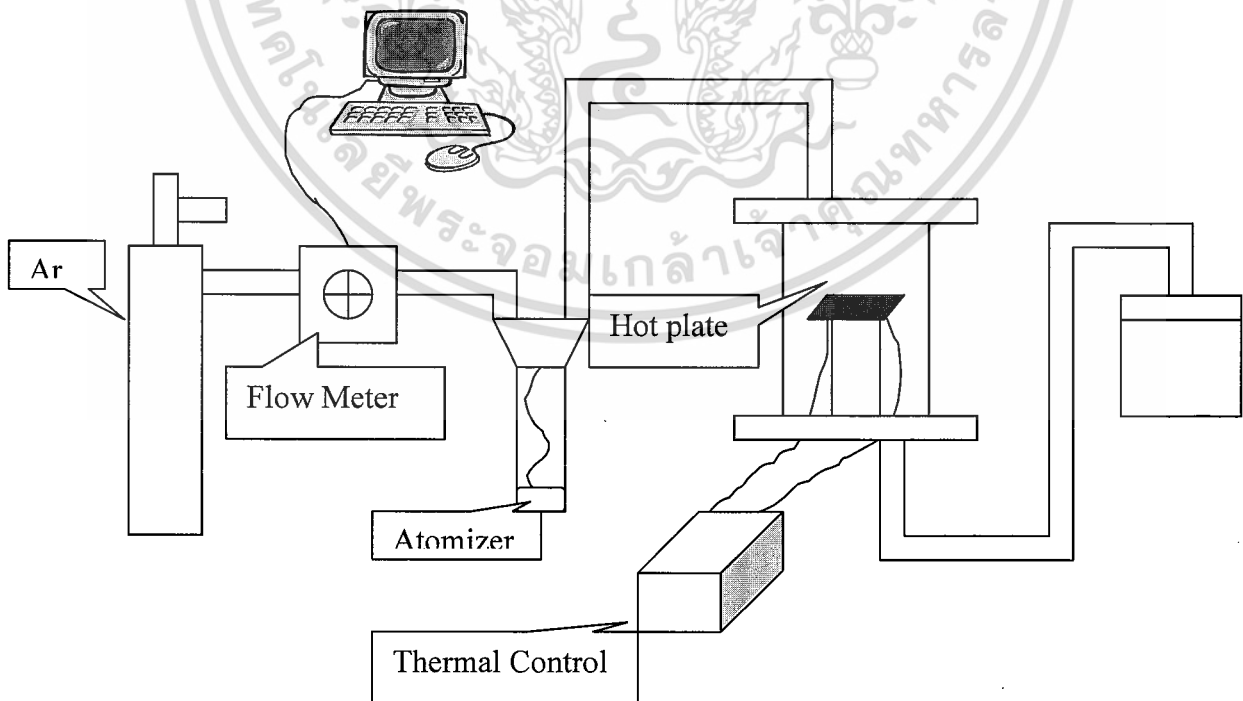
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 4 ซึ่งจากการไม่ยูนิฟอร์ม ของชั้นงานคาดว่าเกิดจากการพาของก๊าซในแนวราบความหนาของชั้นฟิล์ม SnO_2 ทางด้านที่เป็นทางเข้าของไอเคมีมากกว่าอีกด้านหนึ่งและ ขดลวดซึ่งไม่สามารถ ความร้อนได้อย่างสม่ำเสมอภายในท่อควอทซ์จึงทำการแก้ไข โดยสร้างระบบใหม่ให้ก๊าซเข้า ออกในแนวตั้งแทน



รูปที่ 5.6 ชั้นงานจากการปลูกฟิล์มในระบบที่ 1

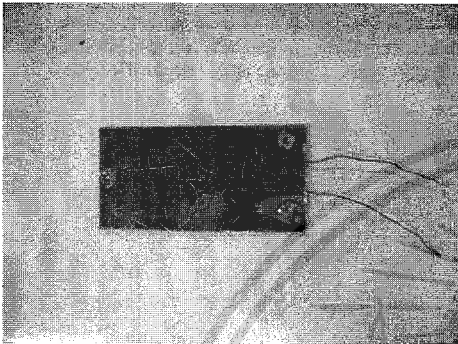
ระบบแบบที่ 2



รูปที่ 5.7 ระบบ CVD ตั้งระบบในแนวตั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. หลังจากเปลี่ยนระบบมาเป็นแบบแนวตั้งพบว่า ชิ้นงานมีความยูนิฟอร์ม มากขึ้น
2. ปัญหาที่พบในระบบนี้ ตอนแรกคือ ทำการปลูกฟิล์มติดบ้างไม่ติดบ้าง ซึ่งเป็นน่าจะมีผลมาจาก อุณหภูมิที่ไม่สม่ำเสมอเนื่องจาก Heater จึงทำการออกแบบ Heater ชนิดใหม่ขึ้นมา



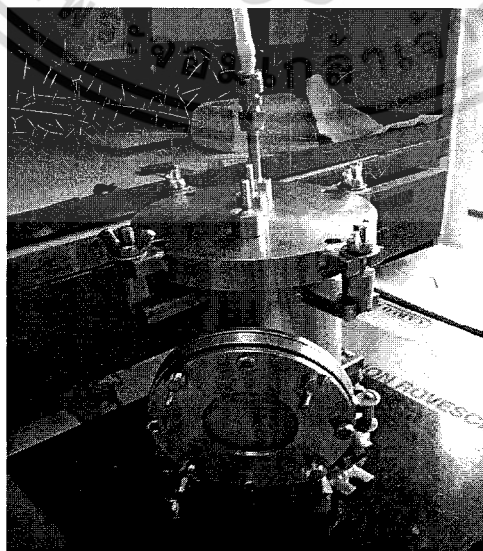
รูปที่ 5.8 Heater ที่ใช้ในระบบในครั้งแรก



รูปที่ 5.9 Heater ที่ออกแบบขึ้นมาใหม่โดยใช้ Heater แบบ

แท่งใส่เข้าไปภายในบล็อคดีงรูป

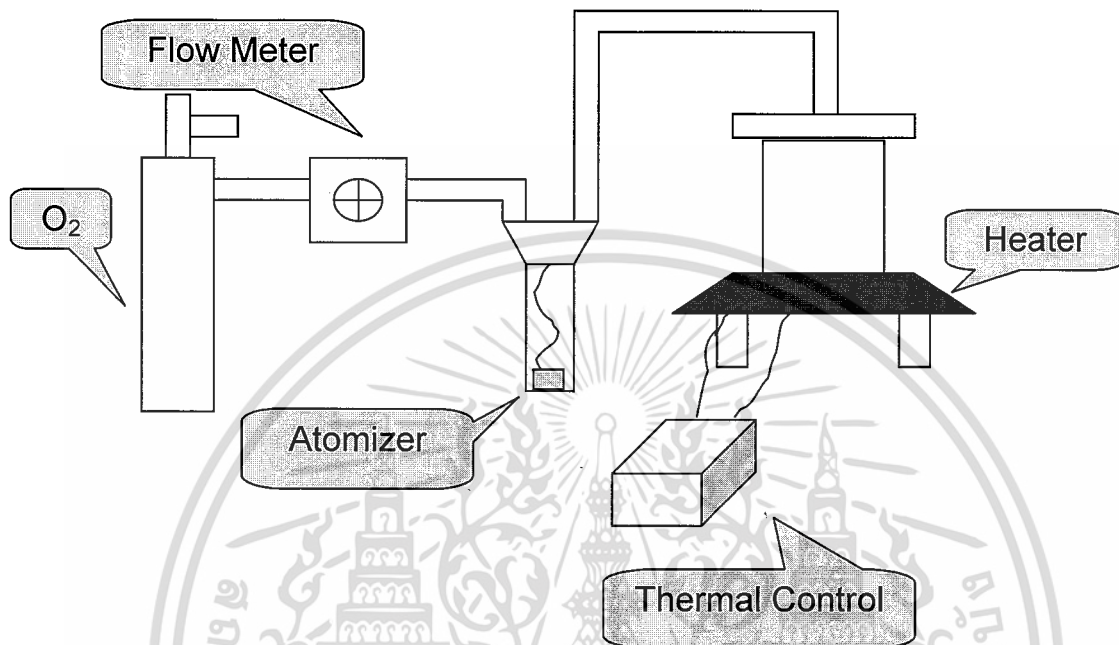
3. ผลที่ได้คือฟิล์มมีความเสถียรมากขึ้นแต่ค่าความต้านทานยังให้ผลที่ไม่น่าพอใจ



รูปที่ 5.10 ระบบแบบ CVD แบบแนวตั้งที่ใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือสงวนเพื่อการค้าเท่านั้น เมื่อผู้เอาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบแบบที่ 3



รูปที่ 5.11 ระบบ CVD แบบเปิด

1. ทำการเปลี่ยนตัว Heater ให้มีขนาดใหญ่ขึ้นและเปลี่ยนจาก Chamber แบบ โลหะเป็น Chamber ที่ทำจากแก้ว โดยใช้ก๊าซ O_2 ในกาทดลอง
2. ผลการทดลองพบว่า ฟิล์มที่ได้มีความเป็นยูนิฟอร์มและสามารถวัดค่าความต้านทานได้
3. พบปัญหาที่เกิดขึ้นคือระบบเกิดความไม่เสถียร

บทที่ 6

ผลการทดลอง และสรุปผลการทดลอง

6.1 ผลการวัดค่าความต้านทาน

ระบบ CVD	**วัดแบบทแยงมุม		**วัดด้านขอบได้				*วัดโดย 4 Point probe $R_s (\Omega/\square)$ i
	$R_s (\Omega)$		$R_s (\Omega)$				
	A	B	C	D	E	F	
แบบที่ 1	10.16K	10.29K	11.7K	8.73K	8.53K	9.28K	0.47 K
แบบที่ 2	6.89M	6.88M	6.87M	6.88M	6.70M	7.09M	0.45 M
แบบที่ 3	1.43K	2.82K	2.55K	2.56K	0.63K	1.52K	34.25

หมายเหตุ; *วัด โดยใช้ 4-point-probe บริเวณกึ่งกลางของแผ่นฐานรอง

**วัด โดยใช้มัลติมิเตอร์ (ตำแหน่งในการวัดดูในรูป 6.1)



รูปที่ 6.1 ตำแหน่งในการวัด R ด้วยมัลติมิเตอร์

6.2 สรุปผลการทดลอง

- **แบบที่ 1** CVD แบบระบบปิดแบบแนวนอน ฟิล์มที่เกิดขึ้นไม่มีความสม่ำเสมอที่ผิวของฟิล์มอย่างเห็นได้ชัด และความต้านทานที่วัดได้มีค่าไม่สม่ำเสมอ ซึ่งอาจเกิดจาก Heater ให้ความร้อนไม่สม่ำเสมอทั้งระบบ และทิศทางรวมทั้งอัตราการไหลเข้าของไอเคมีเข้าระบบไม่เสถียรผลเลยทำให้เกิดปฏิกิริยาไม่ต่อเนื่อง นอกจากนั้นตำแหน่งของชิ้นงานและขดลวดให้ความร้อนก็มีผลต่อการยูนิฟอร์มของชิ้นงานด้วยเช่นกัน
- **แบบที่ 2** CVD ระบบปิดแบบแนวตั้ง ฟิล์มที่เกิดขึ้นมีความยูนิฟอร์มของฟิล์มมากกว่าระบบที่ 1 แต่ฟิล์มที่เกิดขึ้นวัดค่าความต้านทานได้ค่ามากเกินไปที่จะนำมาใช้เป็นตัวนำโปร่งใส และเกิดการลัดวงจรของไฟฟ้าภายในระบบได้ง่ายเนื่องจาก Chamber ทำมาจากโลหะ
- **แบบที่ 3** CVD ระบบเปิดแบบตั้งฟิล์มที่เกิดขึ้นมีความยูนิฟอร์มและค่าความต้านทานแผ่นดีเมื่อเทียบกับฟิล์มที่ได้จาก CVD ระบบที่ 1 และ 2 แต่ระบบเกิดการระเบิดขึ้นบริเวณ Chamber ที่เป็นแก้วซึ่งสาเหตุน่าจะเกิดจาก สารแอมโมเนียมฟลูออไรด์เกิดการทำปฏิกิริยากับ ซิลิเกตที่เป็นส่วนประกอบของแก้ว เมื่อรวมกับออกซิเจนจึงเกิดการระเบิดบริเวณนั้นขึ้น

6.3 แนวทางการพัฒนา

จากระบบ CVD ทั้งหมดจะเห็นว่าระบบที่ 3 เกิดฟิล์มที่มีความยูนิฟอร์มรวมทั้งค่าความต้านทานที่วัดได้ให้ผลที่น่าพอใจแต่ ระบบเกิดปฏิกิริยาเคมีขึ้นภายในทำให้เกิดผลกระทบจากการระเบิดขึ้น ซึ่งปัญหานี้ อาจแก้ไขด้วยการเปลี่ยนภาชนะทั้งหมดในระบบให้เป็นโลหะหรือนำแก้วที่ใช้ในระบบทำการเคลือบด้วยเทฟลอนเพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง สารเคมี แก้ว และ ออกซิเจน หรือทำการเจือจางก๊าซออกซิเจนซึ่งใช้เป็นก๊าซพาหะ โดยใช้ก๊าซชนิดอื่นเป็นก๊าซพาหะร่วมกับ ก๊าซออกซิเจน ในอัตราส่วนที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ค่าความต้านทานของฟิล์มที่ต้องการและไม่เกิดการระเบิดของระบบขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ ผศ.ดร.สุริชัย ชัยสิทธิ์ศักดิ์

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ และ นาย โสรัช(นักศึกษาระดับปริญญาโท) ที่ได้ให้คำแนะนำและ

ข้อคิดเห็นต่างๆของการวิจัยมาโดยตลอด



ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง มา ณ โอกาสนี้

นายจิร โรจ ถาวรรัตน์

นายไชยเชษฐ์ เบญจลักษณ์กุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้