ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (ฟิสิกส์)

ปริญญา

ฟิสิกส์ ฟิสิกส์

สาขา **ภาควิชา**

เรื่อง คุณสมบัติของฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์ที่เตรียมโดยวิธีดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอริง

Properties of Thin Film ZnO Prepared by DC Magnetron Sputtering

นามผู้วิจัย นางสาววริษา ปานเจริญ

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ....

(รองศาสตราจารย์นพปฎล สุทธิศิริ,วท.ม.)

หัวหน้าภาควิชา ....

(อาจารย์วิวัฒน์ วงศ์ก่อเกื้อ,Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

....

(รองศาสตราจารย์กัญจนา ธีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ .... **เดือน** .... **พ.ศ.** ....

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

คุณสมบัติของฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์ที่เตรียมโดยวิธีดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอริง

Properties of Thin Film ZnO Prepared by DC Magnetron Sputtering

โดย

นางสาววริยา ปานเจริญ

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (ฟิสิกส์)
พ.ศ. 2553

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วริยา ปานเจริญ 2553: คุณสมบัติของฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์ที่เตรียมโดยวิธีดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอริง ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (ฟิสิกส์) สาขาฟิสิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์นพปฎล สุทธิศิริ, วท.ม. 90 หน้า

จากการศึกษาอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงความดันของออกซิเจนบนฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์ที่เตรียมโดยวิธีดีซีแมกนีตรอนสปัตเทอริ่ง ด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์พบว่าพีคของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์เกิดขึ้นที่มุม 34.2 องศา ซึ่งสอดคล้องกับระนาบการเลี้ยวเบน (002) และจากการศึกษาผลของการเลี้ยวเบนที่ได้จากรังสีเอ็กซ์และภาพถ่ายพื้นผิวของฟิล์ม พบว่าเมื่ออัตราส่วนของความดันออกซิเจนมีค่าเพิ่มขึ้นขนาดของเกรนและความขรุขระของพื้นผิวของฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์มีค่าลดลง

____________________ ______________________________ ___ / ___ / ___

ลายมือชื่อนิสิต ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Warisa Pancharoen 2010: Properties of Thin Film ZnO Prepared by DC Magnetron Sputtering. Master of Science (Physics), Major Field: Physics, Department of Physics. Thesis Advisor: Associate Professor Noppadon Suttisiri, M.S. 90 pages.

The effect of oxygen partial pressure on the structure of ZnO thin films was studied. The films which were prepared by direct current (DC) reactive magnetron sputtering with variation of oxygen concentration at room temperature showed that the structure of ZnO thin films phase exhibited to (002) orientation at the diffraction angle 34.2°. When the oxygen partial pressure increased, grain size and roughness decreased.

____________________________ ____________________________ ___ / ___ / ___

Student's signature Thesis Advisor's signature

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ รศ.นพปฎล สุทธิศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ซึ่งได้อบรมสั่งสอนวิชาความรู้ ให้คำปรึกษาแนะนำ ควบคุมการทำวิทยานิพนธ์ รวมทั้งตรวจสอบและแนะนำการแก้ไขวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ ผศ.เอกชัย หุ่นนิวัฒน์ ซึ่งได้อบรมสั่งสอนในทุกๆเรื่อง ให้คำปรึกษาแนะนำการทำและแก้ไขวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ ดร.กิตติศักดิ์ชัย แนมจันทร์ สำหรับการสละเวลาให้คำปรึกษาต่างๆ

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ทุกท่านในสถาบันการศึกษาอันทรงเกียรติแห่งนี้ ที่ได้อบรมสั่งสอนวิชาความรู้ด้านวิชาการและด้านอื่นๆ

ขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดาสำหรับทุกสิ่งทุกอย่างที่ได้ช่วยเหลือ ดูแลและให้กำลังใจตลอดช่วงเวลาการศึกษาและช่วงเวลาทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณรุ่นพี่และเพื่อนๆทุกคนสำหรับคำปรึกษาความช่วยเหลือประสบการณ์ต่างๆ กำลังกายและกำลังใจที่มีให้เสมอมา

ขอขอบคุณคุณสุชาติ สุวรรณทัศน์ สำหรับความช่วยเหลือในการใช้เครื่องมือในการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณคุณปัญญา คงสวัสดิ์บุคลากรภาควิชาฟิสิกส์ทุกท่านสำหรับคำปรึกษาและความช่วยเหลือต่างๆ

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวิเคราะห์ทดสอบและบริการ ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ ในการวิเคราะห์ตัวอย่างฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์ด้วยเครื่อง UV-VIS spectrometer

วริษา ปานเจริญ

เมษายน 2553

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	4
การตรวจเอกสาร	5
อุปกรณ์และวิธีการ	35
อุปกรณ์	35
วิธีการ	39
ผลและวิจารณ์	42
สรุปและข้อเสนอแนะ	68
สรุป	68
ข้อเสนอแนะ	69
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	70
ภาคผนวก	73
ภาคผนวก ก การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	74
ภาคผนวก ข รามานสเปกโทรสโกปี	78
ภาคผนวก ค บัตรไฟล์มาตรฐาน JCPDS ของสังกะสี และสังกะสีออกไซด์	86
ภาคผนวก ง วิธีคำนวณอัตราส่วนความดันออกซิเจน	88
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	90

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

ตารางที่		หน้า
1	พลังงานขีดเริ่มของเป้าสารเคลือบเมื่อถูกชนด้วยก๊าซเฉื่อยในหน่วย eV	10
2	อัตราการผลิตอิเล็กตรอนทุติยภูมิสำหรับการพุ่งชนเป้าชนิดต่างๆของ	20
3	ไอออน	30
4	แสดงปริมาณของสังกะสีออกไซด์โครงสร้างผลึกเฮคซะโกนอล	35
	รายละเอียดของวัสดุที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์	
5	แสดงค่าความกว้างครึ่งหนึ่งของพีคที่สูงที่สุดของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (FWHM) และขนาดของเกรนของฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์	50
6	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของความดันออกซิเจนกับค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์	60

ตารางผนวกที่

ง1	แสดงวิธีคำนวณความดันของออกซิเจน	89

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ

ภาพที่ หน้า

1 อันตรกิริยาระหว่างเป้ากับสารเคลือบ 9
2 แสดงการจัดเครื่องมือโกลวดิสชาร์จดีซี 15
3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าพังทะลายกับผลคูณความดันก๊าซและระยะระหว่างขั้วไฟฟ้า 17
4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและความสัมพันธ์ระหว่างดิสชาร์จไฟฟ้ากระแสตรง 18
5 แสดงโครงสร้างโกลวดิสชาร์จ 19
6 (ก) การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็กที่ตั้งฉากกับหน้ากระดาษ (ข) เมื่อมองด้านข้างของเหตุการณ์เดียวกันกับการเคลื่อนที่ขนานกัยสนามแม่เหล็กจะไม่ได้รับการกระทบกระเทือน 21
7 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ตั้งฉากกัน 21
8 คาโธดแมกนีตรอน 23
9 แผนภาพระบบสปัตเตอริงดีซีไดโอด 23
10 แบบจำลองโซนแสดงอิธิพลของอุณหภูมิของฐานรองรับความดันก๊าซอาร์กอนต่อฟิล์มบางที่เคลือบด้วยวิธีสปัตเตอริง 26
11 แสดงหลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม 28
12 โครงสร้างแบบเฮกซะโกนอลของผลึกสังกะสีออกไซด์ 29
13 โครงสร้างแบบซิงค์เบลนของผลึกสังกะสีออกไซด์ 29
14 โครงสร้างแบบร็อคซอลของผลึกสังกะสีออกไซด์ 30
15 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานและการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์
(ก)ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง
(ข)ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียง 32

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
16	(ก) แสดงโครงสร้างแถบพลังงานของแคดเมียมซัลไฟด์แบบคิวบิก (ข) แสดงโครงสร้างแถบพลังงานของแคดเมียมซัลไฟด์แบบเฮกซะโกนอล	33
17	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $(hV)^2\alpha^2$ กับพลังงาน hV โดยที่จุดตัดแกนพลังงานคือค่าช่องว่างแถบพลังงาน	34
18	แสดง vacuum chamber	36
19	เครื่องดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	36
20	เครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้ากระแสตรง	37
21	เตาอบสำหรับอบกระจกสไลด์	37
22	ไดอะแกรมของระบบเคลือบ	41
23	แสดงลักษณะของฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์ เมื่อสังเกตุด้วยตาเปล่า	42
24	แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางสังกะสี	43
25	แสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของสังกะสีออกไซด์ที่อัตราส่วนความดันออกซิเจนเป็น 53 เปอร์เซ็นต์	44
26	แสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของสังกะสีออกไซด์ที่อัตราส่วนความดันออกซิเจนเป็น 63 เปอร์เซ็นต์	45
27	แสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของสังกะสีออกไซด์ที่อัตราส่วนความดันออกซิเจนเป็น 66 เปอร์เซ็นต์	46
28	แสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของสังกะสีออกไซด์ที่อัตราส่วนความดันออกซิเจนเป็น 73 เปอร์เซ็นต์	47
29	แสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของสังกะสีออกไซด์ที่อัตราส่วนความดันออกซิเจนเป็น 80 เปอร์เซ็นต์	48
30	แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางสังกะสี และสังกะสีออกไซด์ที่ความดันต่างๆ	49
31	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมของฟิล์มบางสังกะสี	50
32	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมของฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์ที่ความดันของแก๊สออกซิเจนเป็น 53 เปอร์เซ็นต์	51

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ | หน้า

33 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมของฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์ที่ความดันของแก๊สออกซิเจนเป็น 63 เปอร์เซ็นต์ 52

34 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมของฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์ที่ความดันของแก๊สออกซิเจนเป็น 66 เปอร์เซ็นต์ 52

35 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมของฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์ที่ความดันของแก๊สออกซิเจนเป็น 73 เปอร์เซ็นต์ 52

36 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมของฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์ที่ความดันของแก๊สออกซิเจนเป็น 80 เปอร์เซ็นต์ 53

37 เปอร์เซ็นการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์ที่อัตราส่วนความดันออกซิเจนเป็น 53 เปอร์เซ็นต์ 55

38 เปอร์เซ็นการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์ที่อัตราส่วนความดันออกซิเจนเป็น 63 เปอร์เซ็นต์ 55

39 เปอร์เซ็นการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์ที่อัตราส่วนความดันออกซิเจนเป็น 66 เปอร์เซ็นต์ 56

40 เปอร์เซ็นการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์ที่อัตราส่วนความดันออกซิเจนเป็น 73 เปอร์เซ็นต์ 56

41 เปอร์เซ็นการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์ที่อัตราส่วนความดันออกซิเจนเป็น 80 เปอร์เซ็นต์ 57

42 เปอร์เซ็นการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์ที่อัตราส่วนความดันออกซิเจนต่างๆกัน 57

43 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha hv)^2$ และ พลังงาน hv ของฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์ที่มีความดันออกซิเจนเป็น 53 เปอร์เซ็นต์ 58

44 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha hv)^2$ และ พลังงาน hv ของฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์ที่มีความดันออกซิเจนเป็น 63 เปอร์เซ็นต์ 58

45 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha hv)^2$ และ พลังงาน hv ของฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์ที่มีความดันออกซิเจนเป็น 66 เปอร์เซ็นต์ 59

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ **หน้า**

46 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ และ พลังงาน hv ของฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์ที่มีความดันออกซิเจนเป็น 73 เปอร์เซ็นต์ 59

47 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ และ พลังงาน hv ของฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์ที่มีความดันออกซิเจนเป็น 80 เปอร์เซ็นต์ 59

48 รามานสเปตรัมของฟิล์มบางสังกะสี 62

49 รามานสเปตรัมของฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์ที่ความดันออกซิเจนเป็น 53 เปอร์เซ็นต์ 63

50 รามานสเปตรัมของฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์ที่ความดันออกซิเจนเป็น 63 เปอร์เซ็นต์ 64

51 รามานสเปตรัมของฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์ที่ความดันออกซิเจนเป็น 66 เปอร์เซ็นต์ 65

52 รามานสเปตรัมของฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์ที่ความดันออกซิเจนเป็น 73 เปอร์เซ็นต์ 66

53 รามานสเปตรัมของฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์ที่ความดันออกซิเจนเป็น 80 เปอร์เซ็นต์ 67

ภาพผนวกที่

ก1 ส่วนประกอบของหลอดรังสีเอกซ์ 76

ก2 การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ตามเงื่อนไขของแบรกก์ 77

ข1 ส่วนประกอบของเครื่องรามานสเปกโทรมิเตอร์ 82

ข2 การวัดการกระเจิงแบบรามานในแนว (ก) 90 องศา และ (ข) 180 องศา 83

ข3 เทคนิคการวัดรามานสเปกตรัมของสารตัวอย่างที่เป็นของแข็ง 84

ข4 แผนภาพของเครื่อง FT-Raman spectrometer 85

ค1 บัตรไฟล์มาตรฐานของสังกะสี 87

ค2 บัตรไฟล์มาตรฐานของสังกะสีออกไซด์ 87

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

คุณสมบัติของฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์ที่เตรียมโดยวิธีดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอริง

Properties of Thin Film ZnO Prepared by DC Magnetron Sputtering

คำนำ

ได้มีการนำฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์ไปประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์ต่างๆมากมาย ทั้งในอุปกรณ์ทางวิทยาศาสตร์และในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากราคาที่ถูก หาได้ง่าย อีกทั้งยังมีคุณสมบัติเชิงแสง เชิงไฟฟ้า เชิงกล ที่เหมาะสมหลายประการ มีการนำไปใช้ประยุกต์เป็นอุปกรณ์หลายชนิด เช่น เป็นตัวจับก๊าซต่างๆ เป็นตัวแปลงสัญญาณ ตัวนำโปร่งแสง ซึ่งการเตรียมฟิล์มบางของสังกะสีออกไซด์นั่นสามารถทำได้หลายวิธี เช่น สเปรย์ไพโรไลซิส โซล-เจล ออโตเมตด์ฟลูอิดดิสเพนซ์ พัลส์เลเซอร์ สปัตเตอริงด้วยลำไอออน การเคลือบชั้นอะตอมหรอสปัตเตอริงดีซีแมกนีตรอนรีแอคทีฟ และสปัตเตอริงอาร์เอฟแมกนีตรอน เป็นต้น

ในที่นี้จะศึกษาสมบัติของฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์ที่เตรียมโดยวิธี ดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง เพื่อศึกษาถึงโครงสร้างและสมบัติต่างๆของฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์

การเคลือบฟิล์มบางบนผิววัสดุเป็นกระบวนการที่มีวัตถุประสงค์เพื่อเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุที่ต้องการเคลือบ เช่น ให้มีความคงทน ถาวร หรือ สวยงามมากขึ้น รวมถึงเพื่อการใช้ประโยชน์ในทางอื่นๆ ปัจจุบันการเคลือบฟิล์มบางบนผิววัสดุนี้เป็นกระบวนการที่มีความสำคัญในหลายด้านทั้งทางอุตสาหกรรม การแพทย์ และการวิจัยทางด้านวัสดุศาสตร์ สำหรับวิธีการเคลือบฟิล์มบางนั้นสามารถทำได้ทั้งจากกระบวนยการเคมี (chemical vapor deposition : CVD) หรือกระบวนการทางฟิสิกส์ (physic vapor deposition : PVD) ในชีวิตประจำวันของเรามักจะพบเห็น การเคลือบบนผิววัสดุโดยกระบวนการทางเคมีเป็นส่วนใหญ่ เช่น การคลือบด้วยไฟฟ้า (electroplating) การเคลือบด้วยกระบวนการนี้มีข้อเสียคือ สารเคลือบจะยึดติดกับผิวของวัสดุรองรับไม่ดีทำให้มีการหลุดลอกง่าย นอกจากนี้ยังต้องใช้สารละลายเคมีในกระบวนการเคลือบเป็นจำนวนมากซึ่งสุดท้ายแล้วสารเคมีที่เหลือใช้ของกระบวนการนี้จะเป็นตัวก่อให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมเกี่ยวกับน้ำเสียด้วย สำหรับการเคลือบสารด้วยกระบวนการทางฟิสิกส์จะทำในห้องสุญญากาศ (vacuum chamber) ซึ่งอาศัยหลักการในการทำให้อะตอมของสาร

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เคลือบหลุดออกจากผิวของสารเคลือบแล้วฟุ้งกระจายหรือวิ่งเข้าไปจับและยึดติดกับผิวของวัสดุรองรับ การเคลือบด้วยกระบวนการทางฟิสิกส์นั้นมีข้อดีกว่าวิธีทางเคมีหลายด้าน เช่น ไม่ต้องใช้สารเคมีในการเคลือบซึ่งจะไม่ก่อให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม มีความคงทนมากกว่า ทั้งนี้การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีการทางฟิสิกส์อาจแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ

1.การเคลือบด้วยวิธีระเหยสาร (evaporation) เป็นการเคลือบสารโดยการระเหยสารที่อุณหภูมิสูงแล้วเคลือบสารลงบนแผ่นรองรับ (substrate) ภายใต้สุญญากาศ การเคลือบสารด้วยวิธีนี้จะทำให้การยึดเกาะระหว่างสารเคลือบและแผ่นรองรับไม่ค่อยดีนัก ต้องมีการพ่นทับด้วยแล็กเกอร์เพื่อให้ความคงทนสูงขึ้นแต่ก็นับว่าเป็นวิธีการหนึ่งที่เสียค่าใช้จ่ายน้อยและไม่ต้องอาศัยกระบวนการทางเคมีใดๆ ในทุกขั้นตอนการเคลือบ นิยมใช้ในการเคลือบสารไดอิเลกตริก เช่น MgF_2 หรือ oxide ของโลหะที่มีสมบัติโปร่งใสลงบนเลนส์ เช่น เลนส์กล้องถ่ายรูป แว่นตา และกระจกเลเซอร์ เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถประยุกต์ใช้งานด้านอื่นๆอีกมากมาย

2.สปัตเตอริง (sputtering) เป็นอีกวิธีการหนึ่งที่อาศัยกระบวนการทางฟิสิกส์ซึ่งให้ความคงทนในการยึดเกาะของฟิล์มสูงกว่าวิธีการระเหยสาร กระบวนการเคลือบนี้เกิดขึ้นภายใต้บรรยากาศความดันต่ำประมาณ $10^{-3} - 10^{-1}$ ทอรร์ และอาศัยการดิจชาร์จไฟฟ้าของแก๊สทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออน ซึ่งไอออนจะถูกเร่งเข้าชนแผ่นเป้าสารเคลือบที่ต่ออยู่กับขั้วลบของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงขนาด 500 – 10,000 โวลต์ สารเคลือบที่ถูกชนด้วยไอออนของแก๊สจะหลุดออกและวิ่งด้วยความเร็วสูงลงเคลือบบนแผ่นรองรับในทุกทิศทาง พลังงานของอนุภาคสารเคลือบที่หลุดออกมาจากกระบวนการสปัตเตอริงนี้สูงกว่าอนุภาคที่หลุดออกด้วยวิธีการระเหยสารมาก ดังนั้นเมื่อตกกระทบแผ่นรองรับจะฝังตัวลงในเนื้อแผ่นรองรับ ทำให้การยึดเกาะของฟิล์มเคลือบดีมาก นอกจากนี้วัสดุที่ต้องการเคลือบด้วยวิธีการสปัตเตอร์อาจเป็นโลหะหรืออโลหะก็ได้ ซึ่งเป็นข้อดีเมื่อเทียบกับการเคลือบด้วยไฟฟ้าเคมีที่แผ่นรองรับต้องเป็นตัวนำไฟฟ้าเท่านั้น

จะเห็นได้ว่าการเคลือบด้วยวิธีสปัตเตอร์มีข้อดีหลายข้อ เช่น สามารถเคลือบที่มีจุดหลอมเหลวสูงได้ ในขณะที่การเคลือบด้วยวิธีระเหยสารจำเป็นต้องหลอมสารเคลือบให้เป็นของเหลวเสียก่อน และถ้าสารเคลือบมีจุดหลอมเหลวสูงมากก็จะไม่สามารถทำการเคลือบได้ด้วยวิธีระเหยสาร นอกจากนี้การเคลือบด้วยวิธีการสปัตเตอร์ยังสามารถทำได้ในสภาวะที่มีความดันสูงกว่าวิธีระเหยสาร

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สำหรับในวงการอุตสาหกรรมนั้นได้มีการเคลือบแบบสปัตเตอร์ไปใช้ในกระบวนการผลิตเครื่องมือและวัสดุต่างๆ เช่น เลนส์ กระจกสะท้อนแสงและกรองแสงเฉพาะบางชนิดความถี่ กระจกเลเซอร์ สารกึ่งตัวนำ ฟิล์มตัวนำและฟิล์มตัวต้านทานเป็นต้น นอกจากนี้ยังได้ใช้การเคลือบสารแบบสปัตเตอร์ในการเคลือบแข็ง เช่น การเคลือบไททาเนียมไนไตรด์

สำหรับในแง่ของการวิจัย นักวิจัยสามารถใช้วิธีการในการเตรียมสารตัวอย่างที่เป็นฟิล์มบางและมีความเป็นระเบียบได้ทำให้สามารถศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของวัสดุต่างๆในส่วนของฟิล์มบางได้ซึ่งสมบัติบางประการดังกล่าวไม่สามารถวัดได้เมื่อวัตถุอยู่ในสภาพเป็นก้อนสมบัติของฟิสิกส์ดังกล่าวเป็นข้อมูลที่มีประโยชน์มากในการพัฒนาวัสดุเพื่อนำไปใช้ในทางอุตสาหกรรม

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วัตถุประสงค์

1.เพื่อศึกษาเทคนิคการตรียมฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์โดยวิธีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

2.เพื่อศึกษาโครงสร้างของฟิล์มบางซิงค์สังกะสีออกไซด์ที่เตรียมโดยวิธีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม เครื่องสเปกโตรมิเตอร์และรามานสเปกโทรสโกปี

3. เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์ไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ต่อไป

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การตรวจเอกสาร

Igasagi and Saito (1991) สร้างฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์ด้วยวิธีและเป้าเดียวกันได้ฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์ที่ทีสภาพต้านทานไฟฟ้า 1.4×10^{-4} โอห์มเซนติเมตร

Minami *el al.* (1987) สร้างฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์โดยวิธี อาร์ เอฟ แมกนีตรอนสปัตเตอริงด้วยเป้าที่ทำมาจากสังกะสีออกไซด์ที่เจืออลูมิเนียมออกไซด์ 2% โดยน้ำหนัก ได้ฟิล์มที่มีความต้านทาน 1.9×10^{-4} โอห์มเซนติเมตร

Ellmer (1994) ใช้เป้าโลหะสังกะสีผสมอลูมิเนียมออกไซด์ 2% โดยน้ำหนักสร้างฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์ด้วยวิธีดีซีสปัตเตอริงได้ฟิล์มที่มีสภาพต้านทานไฟฟ้า 4.5×10^{-4} โอห์มเซนติเมตร

Wang *el al.* (1996) ได้เตรียมเป้าสั งกะสี ออกไซด์ โดยใช้ ผงสั งกะสีออกไซด์ผสมสารเจือ 0-5% โดยน้ำหนัก (โดยสารเจือที่ใช้ได้แก่ Al_2O_3, Ga_2O_3, In_2O_3 และ GeO_2 และในการทำเป้าแต่ละเป้าใช้สารเจือเพียงชนิดเดียว) อัดขึ้นรูปเป็นเป้าแล้วเผาที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง สร้างฟิล์มบางด้วยวิธีสปัตเตอริงอาร์เอฟแมกนีตรอนที่ความดั น 10 มิลลิทอร์ในก๊าซอาร์กอนบริสุทธิ์ และใช้กำลังไฟฟ้า (rf power) 50 วัตต์ ที่อุณหภูมิห้อง ได้ฟิล์มที่มีค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าต่ำสุดตามลำดับดังนี้ 5.55×10^{-4} โอห์มเซนติเมตสร้างจากเป้าที่เจือ Ga_2O_3 3% เป็น6.25×10^{-4} โอห์มเซนติเมตร สร้างจากเป้าเจือ Al_2O_3 2% และ 9.09×10^{-4} โอห์ มเซนติเมตรสร้างจากเป้าเจือ In_2O_3 3% ซึ่ งสภาพความต้านทานของฟิล์มเท่ากับฟิล์มที่สร้างจากเป้าที่เจือด้วยGeO_2 2% และฟิล์มยอมให้แสงส่องผ่านโดยเฉลี่ยประมาณ 85% ที่ความยาวคลื่น 450-800 นาโนเมตร

Dimova Malinovska *el al.* (1998) สร้างฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์โดยวิธีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง ได้ฟิล์มที่มีความต้านทานไฟฟ้า 2.0×10^{-3} โอห์มเซนติเมตร และค่าการส่องผ่านแสงประมาณ 90 %

T.K. Subramayan *el al.* (1999)ได้ศึกษาถึงโครงสร้างและสมบัติทางแสงของฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์ที่ถูกเตรียมโดยวิธี ดี ซี แมกนีตรอนสปัตเตอริงโดยแปรค่าความดันของออกซิเจน, อุณหภูมิของแผ่นรองรับ และกระแสที่ใช้ ซึ่งจะเตรียมฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์บนกระจกสไลด์ โดยใช้เป้าเป็นสังกะสีบริสุทธิ์ 99.99% ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร หนา 3 มิลลิเมตร โดยให้เป้าอยู่ห่างจากแผ่นรองรับ 65 มิลลิเมตรโดยมีแม่เหล็กเส้นผ่านศูนย์กลาง70 มิลลิเมตร เป็น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

แคโทด โดยให้กระแสและความต่างศักย์ของการสปัตเตอริงเป็น 750 โวลต์และ 3 มิลลิแอมแปร์ พบว่า ความดันออกซิเจนที่เหมาะสมที่สุดในการสปัตเตอริงนี้คือ 10^{-3} มิลลิบาร์ อุณหภูมิของแผ่นรองรับที่เหมาะสมคือ 663 องศาเคลวิน ซึ่งที่เงื่อนไขเหล่านี้จะให้ฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์ที่มีเฟสเดียวโดยมีระนาบคือระนาบ (002) มีการส่งผ่านแสง 83% มีช่องว่างแถบพลังงาน 3.28 อิเล็กตรอนโวลต์

P.samarasekara *el al.* (2002) ศึกษาในลักษณะที่คล้ายๆกันโดยใช้สังกะสีออกไซด์เป็นเป้าเช่นกันโดยใช้กระแสในการสปัตเตอริงเป็น 5 มิลลิแอมแปร์ ซึ่งผลจากการศึกษาพบว่าเวลาที่ดีที่ใช้ในการสปัตเตอริงคือ 23.75 ชั่วโมง และที่ความดันที่ดีคือ 6 มิลลิบาร์ ทำให้ฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์ที่ได้มีการดูดกลืนแสงที่ดีในช่วง 390 นาโนเมตรซึ่งเป็นช่วงของความถี่อุลตราไวโอเล็ต

มนูญ ปางพรหม (2004) ศึกษาวิธีการสร้างและศึกษาลักษณะสมบัติของเป้าสปัตเตอริงที่ทำจากสังกะสีออกไซด์เพื่อใช้ในการสร้างฟิล์มบางตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสง การสร้างเป้าในการวิจัยนี้ทำโดยการนำผงสังกะสีออกไซด์มาผสมกับน้ำและสารเจืออลูมิเนียมออกไซด์ ขึ้นรูปเป็นเป้าในแม่แบบแล้วนำไปเผาที่ 850, 950 และ 1050 องศาเซลเซียส และเผาที่เวลาต่างๆ กัน แล้วทำการศึกษาสมบัติลักษณะของเป้า โดยการวิเคราะห์องค์ประกอบเป้าด้วยวิธีเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน หาความหนาแน่นเป้าด้วยการชั่งน้ำหนักและวัดขนาดเพื่อหาปริมาตรแล้วคำนวณหาค่าความหนาแน่นและวัดสภาพความต้านทานไฟฟ้าของเป้าโดยสร้างฟิล์มบางจากเป้าด้วยวิธีสปัตเตอริงอาร์เอฟแมกนีตรอน วัดสภาพความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มด้วยวิธี ของแวนเดอร์พอว์และวัดการส่องผ่านแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ผลการศึกษาพบว่า ในการสร้างเป้าต้องผสมอลูมิเนียมออกไซด์ 4%โดยน้ำหนักและเผาที่ 1050 องศาเซลเซียส จึงสามารถขึ้นรูปเป้าได้และผงวัสดุจะยึดเกาะกันดี เป็นเป้าที่นำไปสร้างฟิล์มบางจะได้ฟิล์มที่มีสถาพความต้านทานไฟฟ้าต่ำสุด ความหนาแน่นของเป้าเริ่มคงที่เมื่อเผาที่ 1050 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 ชั่วโมง โดยมีค่าเท่ากับ 4.04 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เมื่อนำไปสร้างฟิล์มบางด้วยวิธีสปัตเตอริงอาร์เอฟแมกนีตรอน ในสภาวะ อุณหภูมิฐานรองรับ 197 องศาเซลเซียส กำลังไฟฟ้าอาร์เอฟ 130 วัตต์ ได้ฟิล์มที่มีสภาพความต้านทานไฟฟ้าต่ำสุดประมาณ 1.6x10-3โอห์มเซนติเมตร แสงส่องผ่านได้ประมาณ 85-90% ในช่วง 400-780 นาโนเมตร และการจัดเรียงตัวของฟิล์มบางมีการจัดเรียงตัวเป็นชั้นของสังกะสีออกไซด์โดยมีแกน c ของผลึกตั้งฉากกับระนาบฐานรอง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ศรชัย (2005) ศึกษาสมบัติเชิงแสงของฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์ที่เตรียมโดยวิธี อาร์เอฟสปัตเตอริงโดยศึกษาจากพลังงานเออร์บัคของฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์ที่สร้างขึ้นโดยเงื่อนไขความดัน 30 มิลลิทอร์กำลังไฟฟ้าที่100-300วัตต์ พบว่าที่กำลังที่ 150 วัตต์ในการสปัตเตอริงจะทำให้ค่าพลังงานเออร์บัคของฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์มีค่าต่ำที่สุดซึ่งหมายถึงความบกพร่องของผลึกมีค่าน้อยที่สุดด้วย

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์

1. เทคโนโลยีฟิล์มบาง

การเคลือบฟิล์มบางในสุญญากาศครั้งแรกทำโดย Bunsen และ Grove ในปี ค.ศ. 1852 โดยแนวคิดพื้นฐานแล้ว ฟิล์มบาง คือการเรียงตัวโดยการตกเคลือบของสารเคลือบในลักษณะของอะตอมเดี่ยวบนวัสดุรองรับจนเกิดเป็นชั้นของฟิล์มบาง(ระดับไมครอน)

การเคลือบฟิล์มบางเป็นกระบวนการที่ทำให้สารเคลือบตกลงบนผิววัสดุที่ต้องการ ซึ่งทำได้ทั้งกระบวนการทางฟิสิกส์ และกระบวนการทางเคมี โดยพื้นฐานแล้วกระบวนการเคลือบฟิล์มบางมีขั้นตอนพื้นฐาน 3 ขั้นตอน คือ การสร้างสารเคลือบในรูปอะตอม โมเลกุล หรืออนุภาค จากนั้นเป็นกระบวนการเคลื่อนย้ายสารเคลือบมายังวัสดุรองรับ และสุดท้ายสารเคลือบจะมีการควบแน่น พอกพูน และโตเป็นชั้นฟิล์มบางบนวัสดุรองรับ สารเคลือบอาจจะอยู่ในรูปของแข็ง ของเหลว ไอ หรือแก๊ส ก็ได้

2. กระบวนการสปัตเตอริง

กระบวนการสปัตเตอริงคือกระบวนการทำให้อะตอมของสารหลุดออกจากผิวด้วยการชนของอนุภาคพลังงานสูงโดยการแลกเปลี่ยนพลังงานและโมเมนตัมระหว่างอนุภาคที่วิ่งเข้าชนกับอะตอมของสารไปเคลือบบนฐานรองรับ การผลิตอนุภาคพลังงานสูงได้จากลำอนุภาคของปืนไอออน (ion gun) หรือกระบวนการโกลวดิสชาร์จ

องค์ประกอบสำคัญสำหรับการเคลือบฟิล์มบางโดยขบวนการสปัตเตอริงคือ

1) เป้าที่ทำจากสารที่ต้องการทำฟิล์มบาง

2) ฐานรองรับ

3) อนุภาคพลังงานสูงที่ผลิตขึ้นอย่างต่อเนื่องเพื่อวิ่งชนเป้าให้หลุดออกมาเคลือบบนฐานรองรับจนได้ความหนาที่ต้องการซึ่งผลิตได้หลายวิธี วิธีที่เป็นที่นิยมและทำได้ง่ายได้แก่กระบวนการโกลวดิจชาร์จ ซึ่งอนุภาคพลังงานสุงได้แก่ ไอออน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อันตรกิริยาระหว่างไอออนกับเป้าเมื่อไอออนพลังงานสูงวิ่งเข้าชนผิวหน้าเป้าสารเคลือบจะเกิดปรากฏการณ์

1) ไอออนอาจสะท้อนกลับจากผิวเป้า และบางตัวก็ถูกทำลายทำให้เป็นกลางทางไฟฟ้าเนื่องจากการรวมตัวกับอิเล็กตรอนที่ผิวเป้าสารเคลือบ

2)การชนกันของไอออนบางครั้งทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาจากเป้า เรียกว่า อิเล็กตรอนทุติยภูมิ

3)การชนของไอออนบางครั้งอาจเกิดการฝังตัวของไอออนในเป้าสารเคลือบ

4)การชนของไอออนบนผิวเป้าสารเคลือบทำให้เกิดการเรียงตัวของอะตอมที่ผิวสารเคลือบใหม่และเกิดความบกพร่องของโครงสร้างผลึก

5)การชนของไอออนบนผิวสารเคลือบทำให้เกิดกระบวนการชนแบบต่อเนื่องของอะตอมของเป้าสารเคลือบคล้ายการชนของลูกบิลเลียดทำให้อะตอมหลุดออกจากเป้าสารเคลือบ เรียกว่ากระบวนการสปัตเตอริง

ภาพที่ 1 อันตรกิริยาระหว่างเป้ากับสารเคลือบ

ที่มา: Chapman (1980)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3. อัตราการสปัตเตอริง (Sputtering Yield, S)

อัตราการสปัตเตอริง คือ ค่าเฉลี่ยปริมาณการหลุดออกของอะตอมเป้าสารเคลือบต่อปริมาณการชนของไอออน 1 ตัว มีหน่วยเป็น อะตอม/ไอออน อัตราการสปัตเตอริงแปรเปลี่ยนไปตามปัจจัย ดังนี้

1) พลังงานของไอออนที่พุ่งชน

ในการชนตรงระหว่างอนุภาค 2 ตัว ฟังก์ชันการถ่ายทอดพลังงานมีค่าเท่ากับ $\frac{4mM}{(m+M)^2}$ โดยที่ m คือมวลของอนุภาคที่ถูกพุ่งชน และ M คืออนุภาคที่พุ่งชน

เมื่อพลังงานของไอออนมีค่าน้อยมากๆ อัตราการสปัตเตอริงมีค่าเป็นศูนย์เนื่องจากพลังงานที่อะตอมได้รับถ่ายทอดจากไอออนไม่พอที่จะเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมของเป้าสารเคลือบ เมื่อพลังงานของไอออนมีค่ามากกว่าสี่เท่าพลังงานที่ใช้ในการระเหิดอะตอมสารเคลือบหนึ่งอะตอม จะทำให้เกิดกระบวนการชนแบบต่อเนื่องและเกิดการปลดปล่อยอะตอมออกจากผิวเป้าสารเคลือบ เรียกพลังงานค่านี้ว่า พลังงานขีดเริ่ม (threshold energy) มีค่าดังตาราง 1

ตารางที่ 1 พลังงานขีดเริ่มของเป้าสารเคลือบเมื่อถูกชนด้วยก๊าซเฉื่อยในหน่วย eV

	Ne	Ar	Kr	Xe	Hg
Al	13	13	15	18	18
Ti	22	20	17	18	25
V	24	23	25	28	25
Cr	22	22	18	20	23
Fe	22	20	25	23	23
ZnO		85			

2) อัตราการสปัตเตอริงแปรเปลี่ยนไปตามระนาบผลึกของผิวเป้าสารเคลือบ และมีค่ามากที่สุดในระนาบที่มีอะตอมหนาแน่นที่สุด และมีค่าต่ำในระนาบที่มีอะตอมหนาแน่นน้อยที่สุด เนื่องจากไอออนมีแนวโน้มที่จะฝังในเป้ามากขึ้น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3) อัตราสปัตเตอริง (S) มีค่าแปรผันตรงกับ พลังงานไอออนพุ่งชน (E) และแปรผกผันกับพลังงานขีดเริ่ม (U_0) มีค่าตามสมการ 1

$$S(E) = \frac{3\alpha}{4\pi^2}\frac{4mM}{(m+M)^2}\frac{E}{U_0} \tag{1}$$

α = ฟังก์ชันประสิทธิภาพการชน

4. กระบวนการโกลวดิสชาร์จ

โกลวดิสชาร์จถูกใช้อย่างหลากหลายในกระบวนการทำฟิล์มบางแบบต่างๆ เช่น สปัตเตอริง พลาสมาเอตชิง ไอออนอิมแพลนเตชัน เป็นต้น กระบวนการทั้งหมดวางอยู่บนพื้นฐานในการสร้างและสมบัติของพลาสมา พลาสมาในกระบวนการทำฟิล์มบางประกอบด้วยก๊าซที่ถูกไอออไนซ์บางส่วนที่ระดับความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศเป็นอย่างมาก สัดส่วนการไอออไนเซชันมีค่าระหว่าง 10^{-5} - 10^{-1} เพื่อความเข้าใจต่อไปจะกล่าวถึงสมบัติของพลาสมาและโกลวดิสชาร์จบางประการ รวมทั้งวิธีการสร้างและการคงสถานะดังกล่าวไว้

พลาสมาคือก๊าซที่ถูกไอออนไนซ์บางส่วน ประกอบด้วยไอออนและอิเล็กตรอนอิสระจำนวนเท่าๆกันโดยประมาณอยู่ในทะเลของอะตอมที่เป็นกลาง มีสภาพปกติเป็นกลางทางไฟฟ้า การรบกวนการเป็นกลางทางไฟฟ้าสามารถเกิดขึ้นได้ในระดับจุลภาคหรือเกิดขึ้นได้ที่ขอบพลาสมาในระดับมหภาค พลาสมามีลักษณะคล้ายกับตัวนำไฟฟ้าที่มีความต้านทานค่อนข้างต่ำ ดังนั้นเมื่อมีบริเวณใดที่มีประจุไฟฟ้าเกิดความไม่สมดุลขึ้นมันจะถูกชดเชยอย่างรวดเร็วดดยการเคลื่อนย้ายประจุไฟฟ้าในพลาสมา ประจุพาหะหลักในพลาสมาคืออิเล็กตรอนเนื่องจากมีมวลน้อยและตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าได้รวดเร็วกว่าไอออนมาก ในการคำนวณเกี่ยวกับพลาสมาถือว่าไอออนไม่เคลื่อนที่แต่ในความเป็นจริงไอออนสามารถเคลื่อนที่ได้แต่มีความคล่องตัวน้อยกว่าอิเล็กตรอนมาก

โกลวดิสชาร์จคือพลาสมาชนิดหนึ่งที่บางบริเวณมีประจุไฟฟ้าสุทธิเป็นบวก บางบริเวณมีประจุไฟฟ้าสุทธิเป็นลบ “โกลวดิสชาร์จ” และ “พลาสมา” มักเป็นคำที่ใช้แทนกันในกระบวนการผลิตฟิล์มบาง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

4.1 สมบัติทั่วไปของพลาสมา

การศึกษาพลาสมาผู้ศึกษาควรรู้จักสมบัติโดยทั่วไปของพลาสมาดังนี้

การกระจายพลังงานอิเล็กตรอนในพลาสมา

อิเล็กตรอนในพลาสมาปกติมีพลังงานสูงกว่าไอออนมาก ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิตพลาสมาและพลังงานที่ได้รับมีค่าตั้งแต่ 10^{9} – 10^{13} cm^{-3} พลังงานของอิเล็กตรอนในพลาสมามีการแจกแจงการกระจายพลังงานเป็นแบบแมกซ์เวลล์ (Maxwell) เขียนได้ดังสมการ (2)

$$f(\varepsilon) = 2\frac{\sqrt{\varepsilon}}{\sqrt{\pi}}(kT_e)^{\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{\varepsilon}{kT_e}\right) \tag{2}$$

ε คือ พลังงานอิเล็กตรอน

T_e คือ อุณหภูมิอิเล็กตรอน

k คือ ค่าคงตัวของโบลตส์มานน์

อุณหภูมิอิเล็กตรอนและไอออน

พลังงานจลน์เฉลี่ยของอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ (3/2) kT_e และ อุณหภูมิของอิเล็กตรอน (T_e) มีค่าอยู่ระหว่าง 1-10 eV พลังงานจลน์เฉลี่ยของไอออนมีค่าเท่ากับ (3/2) kT_i และอุณหภูมิของไอออน (T_i) มีค่าระหว่าง .02-0.1 eV

ระยะเดอบาย (Debye length, λ_D) คือ ระยะที่ศักย์ไฟฟ้าค่าน้อยๆสามารถรบกวนพลาสมาได้ในระดับจุลภาคมีค่าเท่ากับ $\left(\varepsilon_0 kT_e / ne^2\right)^{1/2}$ โดย n คือความหนาแน่นของอิเล็กตรอน ε_0 คือสภาพยอมทางไฟฟ้าของสุญญากาศ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ความถี่พลาสมา

เมื่อพลาสมาถูกรบกวนโดยศักย์ไฟฟ้าภายนอกมากระทำต่ออิเล็กตรอนหรือไอออนให้เคลื่อนที่ไปจากตำแหน่งเดิม ทำให้เสียความเป็นกลางทางไฟฟ้า ก็จะมีแรงดึงกลับกระทำต่อไอออนหรืออิเล็กตรอนนั้นเพื่อทำให้พลาสมามีความเป็นกลางตามเดิม ทำให้เกิดการสั่นของอิเล็กตรอนและไอออน แต่อิเล็กตรอนนั้นมีขนาดเล็กและเบาจึงตอบสนองต่อแรงภายนอกที่กระทำได้ดีกว่า ความถี่การสั่นของอิเล็กตรอนคือความถี่ที่พลาสมาตอบสนองต่อศักย์รบกวน $\omega_i = \left(ne^2 / \varepsilon_0 m_e\right)^{\frac{1}{2}}$ โดยที่ m_e , m_i คือ มวลของอิเล็กตรอนและไอออน เมื่อความหนาแน่นของอิเล็กตรอนเท่ากับ 10^{10}/cm^3 ความถี่พลาสมามีค่าเท่ากับ 9×10^8 Hz และความถี่ไอออนมีค่าเท่ากับ 3.3 MHz

ศักย์พลาสมา$\left(\phi_p\right)$

เนื่องจากอิเล็กตรอนในพลาสมามีความคล่องตัวสูงกว่าไอออนมาก ดังนั้นอิเล็กตรอนจึงมีแนวโน้มที่จะไปถึงขอบพลาสมาได้เร็วกว่าไอออน ถ้าพลาสมาถูกสร้างและคงสภาพอยู่ได้ในภาชนะโลหะในระบบสุญญากาศ อิเล็กตรอนจะออกจากพลาสมาไปถึงผนังของภาชนะด้วยอัตราที่สูงกว่าไอออนมากเป็นผลทำให้ตัวพลาสมามีศักย์ไฟฟ้าเป็นบวกมากกว่าเมื่อเทียบกับศักย์ไฟฟ้าที่ผนังและทำให้ประจุบวกถูกดึงเข้าหาผนังเพื่อที่จะรักษาความเป็นกลางของตัวพลาสมาไว้ และกระบวนการนี้จะดำเนินต่อไปจนเข้าสู่สภาวะคงที่ อัตราการสูญเสียอิเล็กตรอนและไอออนมีค่าเท่ากัน สภาวะนี้ศักย์ไฟฟ้าพลาสมาคือค่าศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยของตัวพลาสมาเมื่อเทียบกับผนัง ประจุบวกหรือไอออนจะถูกเร่งเข้าสู่ผนังทำให้มีพลังงานค่าหนึ่งแต่จะไม่ทำให้เกิดการหลุดออกของอะตอมโดยกระบวนการสปัตเตอริง เนื่องจากมีพลังงานไม่เพียงพอ แต่จะทำให้เกิดการหลุดออกของอะตอมของสารที่ถูกดูดซับไว้ที่ผิวตื้นๆของผนังภาชนะ

ศักย์ลอยตัว(Floating Potential, ϕ_f)

ถ้านำผิวใดๆไปวางไว้ในพลาสมามันจะถูกชาร์จประจุให้เป็นลบอย่างรวดเร็ว เนื่องจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่มีความคล่องตัวสูงกว่าไอออนมาก ดังนั้นฟลักซ์ของอิเล็กตรอนที่พุ่งชนผิวจึงมีค่ามากกว่า ทำให้ผิวเต็มไปด้วยอิเล็กตรอนและทำการผลักอิเล็กตรอนที่จะเข้ามาอีก แต่จะดึงให้ไอออนพุ่งเข้าหาผิวและกระบวนการนี้จะดำเนินต่อไปจนเข้าสู่สภาวะคงที่ที่กระแส

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับกระแสของไอออนและศักย์ไฟฟ้าที่ผิวนี้เรียกว่า ศักย์ไฟฟ้าลอยตัว (Floating potential) โดยมีค่าตามสมการ (3)

$$\phi_f = -0.5\left(\frac{kT_e}{e}\right) In\left(\frac{2\pi m_e}{m_i}\right)\left(1+\frac{T_i}{T_e}\right) \quad (3)$$

m_e คือ มวลอิเล็กตรอน , m_i คือ มวลไอออน

T_e คือ อุณหภูมิอิเล็กตรอน , T_i คือ อุณหภูมิไอออน

ชีต(Sheaths)

ขอบพลาสมาที่สัมผัสกับผนังภาชนะหรือผิวใดๆจะมีสมบัติแตกต่างจากตัวพลาสมา สำหรับทุกผิวที่สัมผัสกับพลาสมาจะมีแถบมืดหรือชีตปรากฏขึ้นระหว่างตัวพลาสมากับผิวนั้น แถบมืดหรือชีตนี้เป็นบริเวณที่มีความต่างศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมย่างมีนัยสำคัญและมีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนน้อยที่สุด เนื่องจากที่ตัวพลาสมาจะมีศักย์ไฟฟ้าสม่ำเสมอเท่ากันหมด ดังนั้นศักย์ไฟฟ้าที่เปลี่ยนจากพลาสมาไปยังผิวภาชนะหรือขั้วไฟฟ้าที่สัมผัสกับพลาสมาจึงตกคร่อมบริเวณนี้ทั้งหมด เนื่องจากอิเล็กตรอนมีความคล่องตัวสูงจึงเคลื่อนที่ออกจากบริเวณนี้อย่างรวดเร็ว ทำให้มีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนต่ำ จากที่มีอิเล็กตรอนอยู่น้อยจึงเป็นสาเหตุให้ระดับการกระตุ้นสถานะพลังงานของอะตอมก๊าซต่ำและการลดระดับพลังงานของอะตอมที่ปล่อยแสงออกมาต่ำไปด้วยจึงทำให้บริเวณนี้ปรากฏเป็นแถบมืดหรือชีต

กระแสไฟฟ้าในพลาสมาที่จำกัดโดยประจุไฟฟ้าคงค้าง (space charge)

$$J_{\max} = \left(\frac{4\varepsilon_0}{9}\right)\left(\frac{2e}{m_e}\right)^{\frac{1}{2}} V^{\frac{3}{2}}\left(\frac{1}{d}\right)^2 \quad (4)$$

โดย V คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมชีต

m_e คือ มวลของอิเล็กตรอน , d คือ ความกว้างของชีต

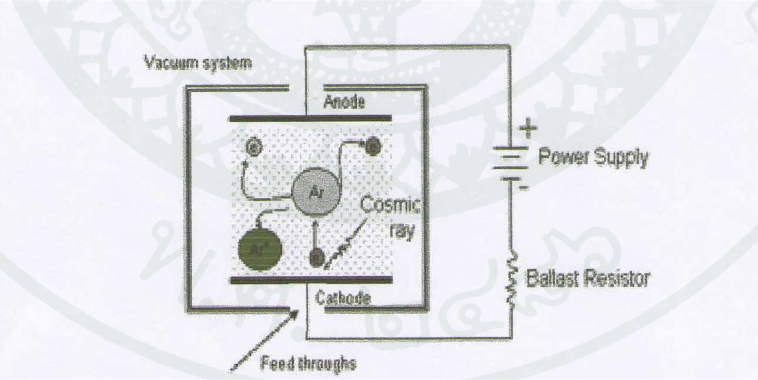
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

4.2 การผลิตพลาสมา

การผลิตพลาสมาและการทำให้พลาสมาคงสถานะอยู่ได้ขณะที่มีการสูญเสียอิเล็กตรอนและไอออนที่บริเวณชีตสามารถทำได้หลายวิธี พลาสมาที่ใช้ในกระบวนการสร้างฟิล์มบางถูกผลิตและคงสถานะอยู่ได้โดยการได้รับพลังงานจากภายนอกในรูปแบบพลังงานไฟฟ้าและคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่ตั้งแต่ศูนย์เฮิร์ตได้แก่ แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ไปจนถึง 10 จิกะเฮิร์ตหรือมากกว่าในกรณีแหล่งจ่ายกระแสสลับ หรือการส่งผ่านพลังงานในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านคความถี่คลื่นไมโครเวฟ มีหลายวิธีในการสร้างพลาสมาที่ใช้ในกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการสร้างฟิล์มบาง วิธีหนึ่งคือ โกลวดิสชาร์จดีซีและโกลวดิสชาร์จอาร์เอฟ กระบวนการที่สำคัญในการผลิตพลาสมาคือกระบวนการแตกตัวเป็นไอออนของอะตอมที่เป็นกลางของไอออนและอิเล็กตรอน

โกลวดิสชาร์จดีซี (dc glow discharge)

ในการผลิตพลาสมาโดยวิธีนี้คือการสร้างการดิสชาร์จของก๊าซระหว่างขั้วไฟฟ้าที่มีความต่างศักย์สูงลักษณะเป็นไดโอดกระแสตรง เครื่องมือจัดดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 แสดงการจัดเครื่องมือโกลวดิสชาร์จดีซี

ที่มา: Vossen and Kern (1991)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ดิสชาร์จไดโอดไฟฟ้ากระแสตรงประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าสองขั้วอยู่ภายในภาชนะสุญญากาศและต่อเข้ากับแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าความต่างศักย์สูงที่อยู่ภายนอกสนามไฟฟ้าจะมีอยู่ระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองมีค่าโดยประมาณเท่ากับ V/d เมื่อ V คือความต่างศักย์ของแหล่งจ่าย และ d คือ ระยะระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง ถ้ามีอิเล็กตรอนอิสระเกิดขึ้นที่ใกล้ๆ กับขั้วคาโธดซึ่งอาจเกิดขึ้นจากรังสีคอสมิค หรือรังสีอัลตร้าไวโอเลตไปตกกระทบขั้วคาโธดแล้วมีอิเล็กตรอนหลุดออกมาแล้วอิเล็กตรอนจะถูกเร่งให้เข้าสู่ขั้วอาโนดอย่างรวดเร็ว ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมที่ระบบมีความหนาแน่นของก๊าซค่าหนึ่ง อิเล็กตรอนจะได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าเพียงพอก่อนที่อิเล็กตรอนจะชนกับอะตอมของก๊าซในภาชนะสุญญากาศ

ดังนั้นเมื่ออะตอมก๊าซภายในระบบถูกอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงเพียงพอนี้ชน ก็จะทำให้อิเล็กตรอนของอะตอมหลุดออกไปหนึ่งตัวกลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระเป็นอิเล็กตรอนทุติยภูมิ ส่วนอิเล็กตรอนที่พุ่งชนเรียกว่า อิเล็กตรอนปฐมภูมิ พร้อมกันนี้ก็ทำให้อิเล็กตรอนก๊าซกลายเป็นไอออนเรียกว่า เกิดการไอออนไนเซชันของอะตอมก๊าซหรือการแตกตัวเป็นไอออน ซึ่งทั้งไอออนและอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นใหม่นี้ก็จะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองอีกโดยไอออนจะถูกเร่งเข้าหาขั้วคาโธดและอิเล็กตรอนถูกเร่งเข้าหาขั้วอาโนด และถ้าระบบอยู่ในภาวะที่มีความหนาแน่นของก๊าซเหมาะสม ก็จะมีขบวนการชนกันของอนุภาคเหล่านี้ที่ทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนของก๊าซเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเกิดจากการชนของไอออนกับขั้วคาโธดด้วยพลังงานสูงแล้วทำให้คาโธดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิออกมาและอิเล็กตรอนนี้ก็จะไปทำให้เกิดการแตกตัวเพิ่มขึ้นไปอีก และกระบวนการนี้จะดำเนินไปอย่างรวดเร็วจนมีไอออนและอิเล็กตรอนอิสระจำนวนมาก เรียกภาวะนี้ว่า ภาวะพังทะลาย(breakdown) ฟลักซ์ของอิเล็กตรอนที่ไหลไปยังขั้วอาโนดกำหนดโดยสมการ (5)

$$I = I_c \exp(\alpha x) \tag{5}$$

โดย I_c คือ ฟลักซ์ของอิเล็กตรอนที่เริ่มที่ขั้วคาโธด

α คือ สัมประสิทธิ์ทาวน์เซนต์(Townsend coefficient) มีค่าเท่ากับ $\frac{1}{\lambda}\exp\left(\frac{V_i}{eE\lambda}\right)$

λ คือ ระยะปลอดการชน , E คือ สนามไฟฟ้าระหว่างขั้ว

V_i คือ ศักย์ไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการไอออนไนเซชันของก๊าซแต่ละชนิดซึ่งแปลผกผันกับความดันภายในระบบ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

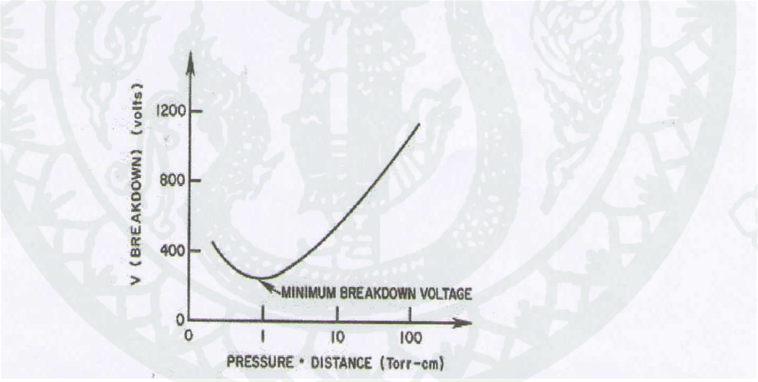
ความต่างศักย์ไฟฟ้าพังทะลาย(V_b)มีความสัมพันธ์กับความดันและระยะระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองตามกฎของพาสเชน(Paschen's law)

$$V_b = \frac{A(Pd)}{(C + In(Pd))} \tag{6}$$

A , C คือ ค่าคงที่ ขึ้นอยู่กับก๊าซแต่ละชนิด

P , d คือ ความดันของก๊าซและระยะระหว่างขั้ว ตามลำดับ

กราฟที่ได้จากความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าพังทลายและผลคูณความดันก๊าซกับระยะระหว่างขั้ว เรียกว้า เส้นโต้งพาสเสน (Paschen curve) มีลักษณะดังรูปที่ 3 และความต่างศักย์ไฟฟ้าพังทลายต่ำสุดเรียกว่า จุดต่ำสุดพาสเสน และเส้นกราฟนี้จะแตกต่างกันตามก๊าซที่ใช้ในระบบ

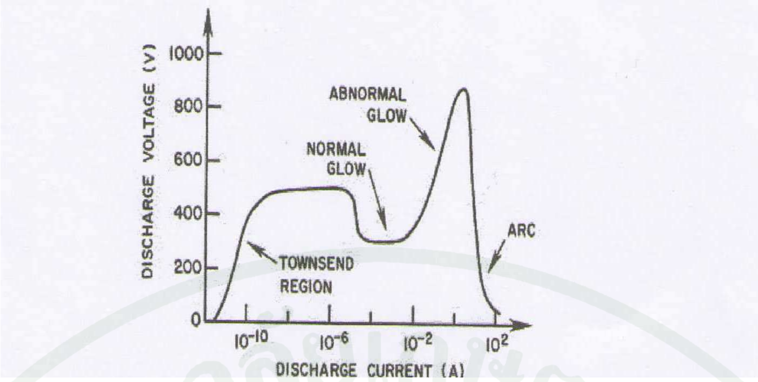


ภาพที่ 3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าพังทะลายกับผลคูณความดันก๊าซและระยะระหว่างขั้วไฟฟ้า

ที่มา: Vossen and Kern (1991)

ดิสชาร์จไฟฟ้ากระแสตรงที่เกิดขึ้นระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองที่เกิดขึ้นหลังจากเกิดภาวะพังทลายทางไฟฟ้าขึ้น มีหลายสถานะขึ้นอยู่กับกระแสไฟฟ้าดังรูป 4

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



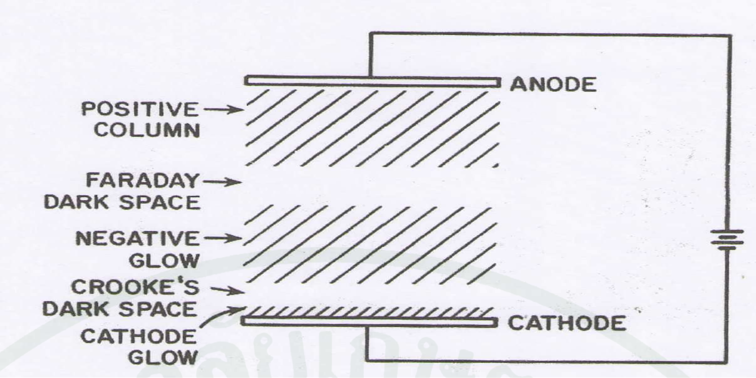
ภาพที่ 4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและความสัมพันธ์ระหว่างดิสชาร์จไฟฟ้ากระแสตรง

ที่มา: Vossen and Kern (1991)

ขณะที่เกิดการพังทลายทางไฟฟ้าพอดี กระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นด้วยการเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าเพียงเล็กน้อย สถานะนี้เรียกว่าดิสชาร์จทาวน์เซนต์และนำไปสู่การพังทลายเต็มที่(full breakdown) ขณะที่ดิสชาร์จมีกระแสน้อยมาก โกลวยังจะไม่คลอบคลุมบริเวณทั้งคาโธด สถานะนี้เรียกว่า โกลวปกติ (normal glow) ขณะนี้ถ้าทำให้ดิสชาร์จเพิ่มขึ้นด้วยการเพิ่มความต่างศักย์เพียงเล็กน้อย โกลวก็จะขยายบริเวณจนในที่สุดก็คลอบคลุมทั้งคาโธด และต่อไปถ้าจะทำให้กระแสดิสชาร์จเพิ่มขึ้นจะต้องเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าอย่างมาก สถานะนี้เรียกว่า โกลวผิดปกติ(abnormal glow) สถานะนี้นิยมไปใช้ในกระบวนการสปัตเตอริงเพื่อเคลือบฟิล์มบาง และช่วงนี้กระแสในดิสชาร์จถูกกำหนดโดยประจุไฟฟ้าคงค้างตามกฎของไชด์ (Child’s law) ขณะที่กระแสดิสชาร์จเพิ่มขึ้นอีก คาโธดก็จะร้อนจนถึงจุดหนึ่งจะถึงจุดหลอมละลาย และถ้าคาโธดทำด้วยวัสดุทนไฟ ก็จะมีการปลดปล่อยอิเล็กตรอนแบบเทอมิออนิค สถานะนี้คือ อาร์ค(arc)

โครงสร้างของโกลวดิสชาร์จแสดงดังรูปที่ 5

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 5 แสดงโครงสร้างโกลวดิสชาร์จ

ที่มา: Vossen and Kern (1991)

บริเวณที่ 1 คือ ช่วงสว่างคาโธด (cathode glow) เป็นชั้นเรืองแสงบางๆปกติจะมองเห็นได้ยาก

บริเวณที่ 2 คือ ช่วงมืดครูก(Croook's dark space) หรือช่วงมืดคาโธด หรือคาโธดชีต เป็นช่วงที่มีความต่างศักย์ตกคร่อมมากที่สุด ทำให้สนามไฟฟ้ามีความเข้มสูง อิเล็กตรอนถูกเร่งออกไปอย่างรวดเร็ว ทำให้มีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนต่ำ ขาดแคลนอิเล็กตรอนที่จะไปกระตุ้นอะตอม ดังนั้นปรากฏเป็นช่วงมืด

บริเวณที่ 3 คือ ช่วงเนกกาทีฟโกลว เป็นที่เปล่งแสงสว่างจ้าออกมาบ่งบอกถึงการมีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและไอออนเท่าๆกัน มีค่าตั้งแต่ 10^{9}-10^{13} cm^{-3}

บริเวณที่ 4 คือ ช่วงมืดฟาราเดย์ เนื่องจากอิเล็กตรอนจากคาโธดได้สูญเสียไฟระหว่างที่ผ่านเนกาทีฟ เนื่องจากการชนทำให้มันไม่มีพลังงานพอที่จะไปกระตุ้นอะตอมอื่นอีก ทำให้เกิดเป็นช่วงมืดฟาราเดย์

บริเวณที่ 5 คือ ลำประจุบวก(positive column) ช่วงนี้อิเล็กตรอนจะถูกเร่งเข้าหาอาโนด รวมทั้งมีการแพร่ไปยังผนังช่วงนี้และที่เหลือไม่มีความสำคัญในกระบวนการสปัตเตอริงเพื่อเคลือบฟิล์ม

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

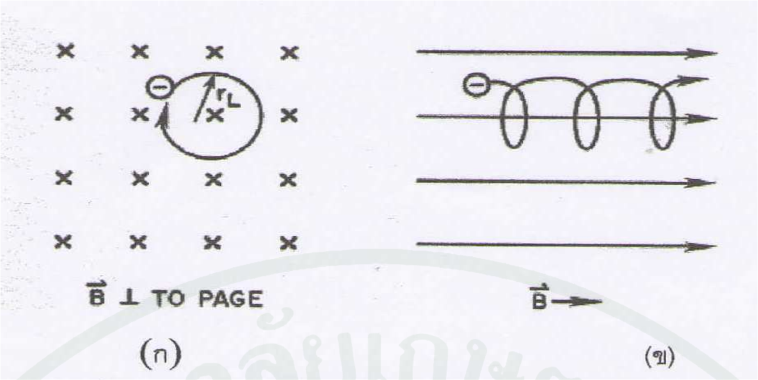
ในกระบวนการสปัตเตอริงสามารถเลื่อนขั้วอาโนดมายังบริเวณที่ 3 แล้วทำให้บริเวณที่เหลือหายไปจาโกลวดิสชาร์จยังคงสถานะอยู่ได้ เรียกว่า ดิสชาร์จแบบออบสตรัคด์(obstructed glow discharge)

แหล่งอิเล็กตรอนหลักที่ทำให้ดิสชาร์จคงสถานะอยู่ได้มาจากการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่เกิดจากการพุ่งชนคาโดของไอออน ปกติอัตราการผลิตอิเล็กตรอนทุติยภูมิ(secondary electron yield) มีค่าต่ำ โดยมีค่าสูงสุดประมาณ 25% ดังแสดงในตาราง 2

ตารางที่ 2 อัตราการผลิตอิเล็กตรอนทุติยภูมิสำหรับการพุ่งชนเป้าชนิดต่างๆของไอออน

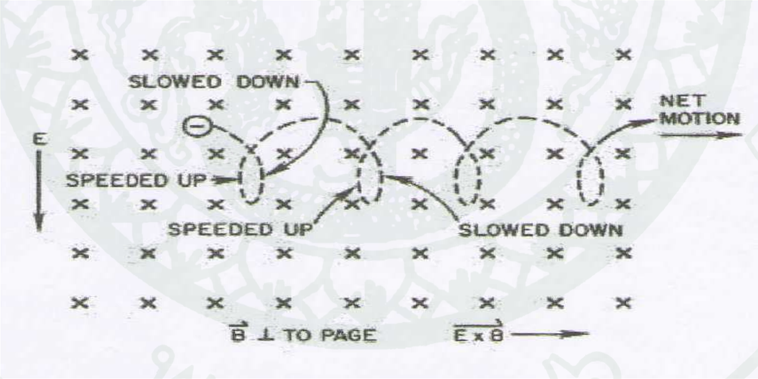
เป้า	อัตราการผลิตอิเล็กตรอนทุติยภูมิ พลังงานไอออน(eV)		
	10 eV	100 eV	1000 eV
W	.096	.095	.099
Si(100)	.024	.027	.039
Ni	.034	.036	.070
Mo	.122	.115	.118

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 6 (ก) การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็กที่ตั้งฉากกับหน้ากระดาษ (ข) เมื่อมองด้านข้างของเหตุการณ์เดียวกันกับการเคลื่อนที่ขนานกัยสนามแม่เหล็กจะไม่ได้รับการกระทบกระเทือน

ที่มา: Vossen and Kern (1991)



ภาพที่ 7 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ตั้งฉากกัน

ที่มา: Vossen and Kern (1991)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

4.3 พลาสมาในสนามแม่เหล็ก

พลาสมาเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ไม่ดีนักและสนามไฟฟ้าสามารถรบกวนได้เพียงอ่อนๆเท่านั้น แต่สนามแม่เหล็กมีผลต่อพลาสมาอย่างมีนัยสำคัญ ประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่จะถูกแรงแม่เหล็ก $\vec{F}_m$ กระทำโดย

$$\vec{F}_m = q\vec{v} \times \vec{B} \tag{7}$$

q คือ ประจุไฟฟ้าของอนุภาค

$\vec{v}$ คือ ความเร็ว

$\vec{B}$ คือ สนามแม่เหล็ก

ถ้าประจุเคลื่อนที่ทำมุมกับสนามแม่เหล็กจะทำแนวทางเดินเป็นวงกลมหรือเป็นเกลียวขนานกับสนามแม่เหล็กโดยมีรัศมีวงโคจร r รูป 5(ก) การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน $r = \frac{mv\perp}{qB}$

$$r = \frac{\sqrt{2m(KE)}}{qB} \tag{8}$$

m คือ มวลของอนุภาค

$v\perp$ คือ อัตราเร็วในแนวตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก

KE คือพลังงานจลน์ของอนุภาค

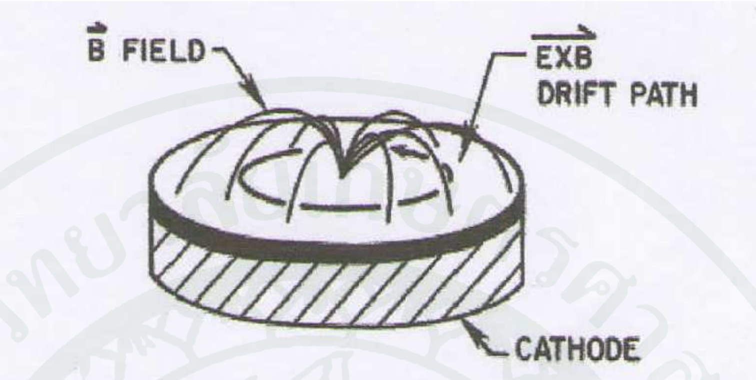
จากความสัมพันธ์นี้ยิ่งอนุภาคมีมวลและพลังงานมากรัศมีโคจรก็ยิ่งกว้าง ถ้าสนามแม่เหล็กมีขนาด 500 เกาส์ อิเล็กตรอนและไอออนอาร์กอนที่มีพลังงานจลน์ 50 eV มีรัศมีวงโคจรเท่ากับ 0.34 มิลลิเมตร และ 47 เซนติเมตรตามลำดับ วงโคจรของอิเล็กตรอนเล็กมากเมื่อเทียบกับภาชนะระบบสุญญากาศที่ใช้ในการเคลือบและวงโคจรของไอออนกว้างมากจนไม่ต้องคำนึงถึงการเคลื่อนที่ของประจุในสนามแม่เหล็กแสดง ความถี่วงโคจรหรือความถี่ ไซโคตรรอน (ω) มีค่าตามสมการ (9)

$$\omega = \frac{qB}{m} \tag{9}$$

เมื่อประจุเคลื่อนที่ในสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ทิศตั้งฉากกันจะทำให้ประจุมีการเคลื่อนที่ไปในทิศ $\vec{E} \times \vec{B}$ โดยความเร็วในทิศดังกล่าวเท่ากับ $\frac{E}{B}$ ดังรูปที่ 8

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วัตถุประสงค์ของการใส่สนามแม่เหล็กลงไปในพลาสมาก็เพื่อเพิ่มระยะทางของอิเล็กตรอน เพื่อเพิ่มโอกาสในการชนของอิเล็กตรอนกับอะตอมที่กลางแล้วเกิดการแตกตัวเป็นไอออน

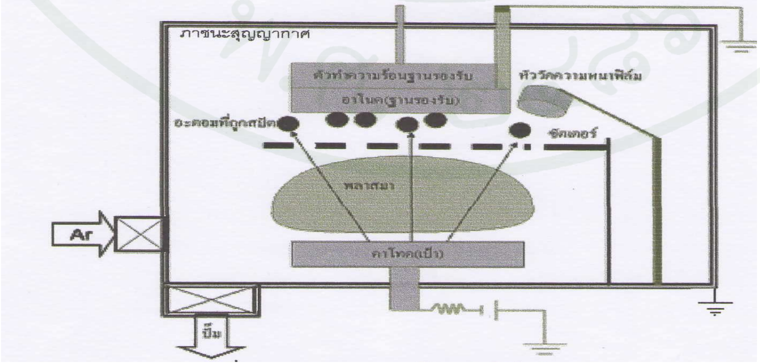


ภาพที่ 8 คาโธดแมกนีตรอน

ที่มา: Vossen and Kern (1991)

แมกนีตรอน

แมกนีตรอน คือเครื่องมือที่ใช้ในการกักอิเล็กตรอนให้อยู่บริเวณผิวหน้าของคาโธดโดยการใส่สนามแม่เหล็กที่ทำให้แนวการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนเป็นวงปิด เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการชนของอิเล็กตรอนกับอะตอมที่เป็นกลาง ดังตัวอย่างในรูปที่ 9



ภาพที่ 9 แผนภาพระบบสปัตเตอริงดีซีไดโอด

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

5. การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปัตเตอริง

การเคลือบฟิล์มบางโดยวิธีสปัตเตอริงในระบบโกลวดิสชาร์จ วิธีพื้นฐานที่สุดคือระบบสปัตเตอริงไดโอดดีซี แสดงดังรูปที่ 3.12 ระบบนี้ประกอบด้วย ภาชนะสุญญากาศ เป้าซึ่งทำจากวัสดุที่ต้องการเคลือบเป็นฟิล์มบางทำหน้าที่เป็นคาโธด ฐานรองรับวางอยู่ที่อาโนดห่างจากคาโธด 4-10 เซนติเมตร และอยู่ในภาชนะสุญญากาศที่ถูกปั๊มตลอดเวลา ก๊าซที่ใช้ในกระบวนการสปัตเตอริงเป็นก๊าซอาร์กอน จะถูกเติมลงไปหลังจากที่ปั๊มถึงระดับความดันต่ำสุดแล้ว โดยเติมจนได้ระดับความดันระหว่าง 30-120 มิลลิทอร์ จากนั้นป้อนความต่างศักย์จากแหล่งจ่ายไฟฟ้าระหว่างคาโธดและอาโนด ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นภายในภาชนะสุญญากาศเพื่อใช้เร่งอิเล็กตรอนเข้าชนกับอะตอมของก๊าซอาร์กอนให้แตกตัวออกเป็นไอออนบวกและได้อิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นจนกระทั่งสามารถผลิตไอออนได้มากพอ จะเกิดโกลวดิสชาร์จซึ่งมีพลาสมาสีม่วง และสามารถรักษาสภาพที่กระแสและความต่างศักย์ของการดิสชาร์จคงที่ค่าหนึ่ง ในระหว่างที่ระบบสามารถรักษาสภาพการดิสชาร์จได้ด้วยตนเองไอออนบวกที่ผลิตขึ้นจะอยู่ในบริเวณเนกาทีฟโกลว

อนุภาคที่มีประจุจะถูกเร่งให้มีพลังงานสูงขึ้นโดยสนามไฟฟ้า อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่เข้าสู่อาโนด และไอออนบวกจะเคลื่อนที่เข้าชนเป้าสารเคลือบ ถ้าการชนเป็นแบบยืดหยุ่นไอออนบวกจะสะท้อนกลับ แต่ถ้าชนแบบไม่ยืดหยุ่นไอออนบวกจะฝังตัวลงไปในเป้าสารเคลือบ อะตอมของเป้าสารเคลือบจะมีการจัดเรียงตัวใหม่และเกิดการชนกันระหว่างอะตอมซึ่งนำไปสู่การปลดปล่อยอะตอมสปัตเตอริงออกมา

การเกิดปรากฏการณ์ที่เกี่ยวเนื่องและนำไปสู่การเคลือบฟิล์มบางคือการเกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิมีบทบาทในกลไกรักษาสภาพการดิสชาร์จคือทำให้เกิดการดิสชาร์จอย่างต่อเนื่อง ส่วนอะตอมของเป้าที่ถูกสปัตเตอริงจะเคลื่อนที่ออกจากเป้าโดยทิศทางแบบสุ่ม โดยส่วนหนึ่งสามารถไปถึงฐานรองรับและเริ่มก่อตัวเป็นฟิล์มบางขึ้น โดยอาศัยการดิสชาร์จที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องในที่สุดจะได้ฟิล์มบางของวัสดุต้นกำเนิดฟิล์มที่มีเนื้อฟิล์มต่อเนื่องเคลือบบนผิวของฐานรองรับนั้น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

จากสมบัติเฉพาะตัวของกระบวนการสปัตเตอริงที่เป็นกระบวนการเชิงกลซึ่งสามารถผลิตอนุภาคต้นกำเนิดฟิล์มบางที่มีพลังงานจลน์สูงกว่ากระบวนการระเหยสารและสามารถกระทำได้กับวัสดุหลายประเภทมากกว่ากระบวนการระเหยสาร

ข้อดีของการเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปัตเตอริง

1) สามารถเคลือบฟิล์มในสภาพที่มีอุณหภูมิที่ไม่สูงได้

2) ได้ฟิล์มที่มีผิวหน้าค่อนข้างเรียบและยึดติดแน่นกับฐานรองรับ

3) ได้เนื้อฟิล์มที่มีความหนาสม่ำเสมอโดยเฉพาะเมื่อเคลือบบนพื้นที่ขนาดใหญ่และสามารถควบคุมความหนาได้ดี

4) สามารถเคลือบฟิล์มที่มีความบางระดับนาโนเมตร

5) ได้ฟิล์มที่มีสมบัติใกล้เคียงกับสมบัติของวัสดุต้นกำเนิดฟิล์มและมีเสถียรภาพดี

6) สามารถใช้งานกับเป้าสารเคลือบได้หลายชนิด ทั้งโลหะ ฉนวน สารผสม และ สารไดอิเล็กตริก

7) มีศักยภาพสูงในการขยายผลจากระดับงานวิจัยในระบบขนาดเล็กไปสู่การผลิตในระดับอุตสาหกรรม

6. อัตราการเคลือบฟิล์มบาง (R)

อัตราการเคลือบฟิล์มบาง คือ การเพิ่มความหนาของฟิล์มต่อหนึ่งหน่วยเวลา เมื่อมการเคลือบฟิล์มบางหรือใช้งานระบบเคลือบฟิล์มบาง พิจารณาจากกลไกและสภาพแวดล้อมของการเคลือบฟิล์มบาง อัตราการเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปัตเตอริงนี้ขึ้นกับปริมาณของอะตอมที่หลุดออกจากเป้าสารเคลือบและสภาพการขนส่งอะตอมเหล่านี้ไปยังฐานรองรับจะมีอัตราการเคลือบฟิล์มบางสูงถ้าอะตอมของเป้าถูกสปัตเตอริงออกมามากและสามารถเคลื่อนที่ไปยังฐานรองรับได้สะดวก และอัตราการเคลือบฟิล์มบางขึ้นกับกระแสไฟฟ้า ความต่างศักย์และความดันก๊าซของการดิสชาร์จ และลักษณะของระบบการเคลือบฟิล์มบาง เช่น ระยะห่างระหว่างเป้ากับฐานรองรับ ซึ่งสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$R \propto \frac{IV}{Pd} \qquad (10)$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

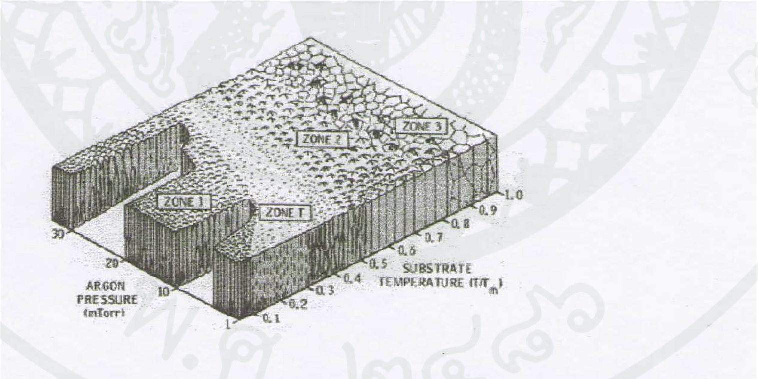
I, V คือ กระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ของการดิสชาร์จ

P, d คือ ความดันก๊าซและระยะห่างระหว่างเป้ากับฐานรองรับ

7. โครงสร้างจุลภาคของฟิล์มบาง

เมื่ออะตอมสารเคลือบกระทบฐานรองรับสภาพเคลื่อนที่ได้ของอะตอมเหล่านี้ในขณะก่อตัวเป็นฟิล์มบางจะเป็นตัวแปรสำคัญที่กำหนดโครงสร้างจุลภาคของฟิล์มบาง ในขั้นตอนสุดท้ายฟิล์มบางจะมีโครงสร้างสมบูรณ์และมีความบกพร่องน้อยถ้าอะตอมของสารสามารถเคลื่อนที่หรือแพร่ได้ดี เนื่องจากไปเพิ่มโอกาสการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบของอะตอมบนฐานรองรับ

ในระบบเคลือบฟิล์มบางโดยวิธีสปัตเตอริง สภาพการเคลื่อนที่ของอะตอมบนฐานรองรับและผิวฟิล์มที่กำลังก่อตัวขึ้นจะได้รับอิทธิพลจากอุณหภูมิของฐานรองรับและสภาพแวดล้อมของโกลวดิสชาร์จ เช่น การชนของอนุภาคต่างๆ โครงสร้างจุลภาคของฟิล์มบางจากสปัตเตอริงสามารถแบ่งได้เป็น 4 แบบ(zone) ตามอัตราส่วน T_s / T_m ความดันของก๊าซอาร์กอน โดย T_s คืออุณหภูมิของฐานรองรับ และ T_m เป็นอุณหภูมิจุดหลอมเหลวของสารเคลือบดังแสดงในรูปที่ 10



ภาพที่ 10 แบบจำลองโซนแสดงอิทธิพลของอุณหภูมิของฐานรองรับความดันก๊าซอาร์กอนต่อฟิล์มบางที่เคลือบด้วยวิธีสปัตเตอริง

ที่มา: Matacotta and Ottaviani (1995)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

โครงสร้างแบบที่ 1 ประกอบด้วยแท่งเรียว(tapered column grain)เรียงกันอย่างหลวมๆ ระหว่างเกรนมีช่องว่างค่อนข้างมาก ฟิล์มโครงสร้างแบบนี้เกิดขึ้นเมื่ออัตราส่วน T_s / T_m มีค่าน้อยกว่า 0.2 และความดันสูงกว่า 10 มิลลิบาร์ ลักษณะสำคัญของฟิล์มแบบนี้จะมีผิวหน้าขรุขระและมีสมบัติต่างจากสารเมื่อเป็นก้อนมาก

โครงสร้างแบบ T (transition) เกิดขึ้นเมื่ออัตราส่วน T_s / T_m มีค่าระหว่าง 0.2-0.3 มีโครงสร้างลักษณะประกอบด้วยเส้นใยอัดแน่นไม่มีช่องตรงรอยต่อ ฟิล์มนี้ถือเป็นลักษณะหนึ่งของโครงสร้างแบบที่ 1 ลักษณะเด่นคือผิวเรียบและมีความหนาแน่นสูง

โครงสร้างแบบที่ 2 เกิดขึ้นเมื่อ T_s / T_m มีค่าระหว่าง 0.3-0.5 ฟิล์มประกอบด้วยแท่งอัดกันค่อนข้างแน่น และขนาดเกรนจะเพิ่มตามอุณหภูมิฐานรองรับ และฟิล์มมีความแข็งแรง

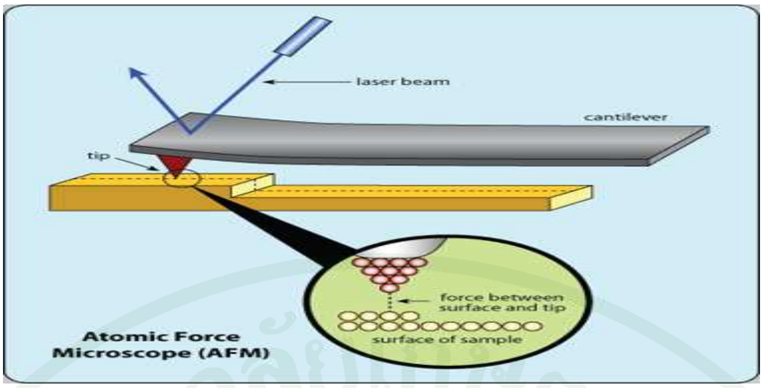
โครงสร้างแบบที่ 3 เกิดเมื่อ T_s / T_m มีค่ามากกว่า 0.5 ฟิล์มประกอบด้วยเกรนขนาดใหญ่และมีสมบัติใกล้เคียงกับสารที่เป็นก้อน

8. กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscope: AFM)

เป็นกล้องที่อาศัยเข็มขนาดเล็กกวาดไปบนพื้นผิวของชิ้นงานตัวอย่าง เราสามารถวัดคุณสมบัติของพื้นผิวชิ้นงานได้ ดังเช่น ความสูง การดูดกลืนแสง หรือ สนามแม่เหล็กเป็นต้น เนื่องจากปลายเข็มมีขนาดเล็กมาก จึงสามารถที่จะตรวจสอบได้ในบริเวณที่เล็กมากๆ ถึงขนาดระดับอะตอม เข็มจะกวาดไปบนพื้นผิว และแปรผลที่ได้ออกเป็นภาพกราฟฟิกทางคอมพิวเตอร์

หลักการพื้นฐานของ AFM คือ อาศัยแรงดูดและแรงผลักที่เกิดขึ้นจากหัวเข็มกับพื้นผิวของชิ้นงาน โดยเข็มที่ติดอยู่บนคานกระเดื่อง และเคลื่อนที่กวาดไปบนชิ้นงาน หรือ ให้เข็มอยู่กับที่ และชิ้นงานเคลื่อนที่ ก็ได้ ทำให้คานกระเดื่องบิดตัวขึ้นลงตามความสูงต่ำของพื้นผิวชิ้นงาน แสงเลเซอร์ที่สะท้อนจากคานกระเดื่อง ก็จะเปลี่ยนทิศทางการสะท้อนตามการบิดตัวของคานกระเดื่อง นำข้อมูลของเลเซอร์ที่ได้ไปแปรผล ก็สามารถสร้างภาพพื้นผิวของชิ้นงานตัวอย่างได้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่11 แสดงหลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม

ที่มา: www.rmutphysics.com

หลักการทำงานของเครื่อง คือ การผ่านแสงเลเซอร์ไปให้กับส่วนปลายแหลม (tip) ของคานยื่นที่มีขนาดระดับอะตอมในระยะใกล้ ซึ่งส่วนปลายแหลมของคานนั้นจะไปสัมผัสแบบกระดกในทิศทางขึ้นและลงกับพื้นผิวของวัตถุ และเมื่อเครื่องลากส่วนปลายแหลมผ่านโครงสร้างระดับนาโน แรงปฏิกิริยาที่กระทำในแนวตั้งฉากที่เกิดขึ้นระหว่างอะตอมของพื้นผิวกับปลายแหลมจะดึงคาน ทำให้คานโก่งงอตัวทำให้สามารถตรวจวัดขนาดของแรงเชิงปฏิสัมพันธ์ ระหว่างความสัมพันธ์เชิงตำแหน่งของส่วนปลายแหลมและพื้นผิวของวัตถุ (ทำให้สามารถทราบถึงระดับพลังงานที่เกิดขึ้นได้) ซึ่งจะถูกนำมาแปรสัญญาณร่วมกันเพื่อนำมาสร้างเป็นภาพพื้นผิวที่เป็นลักษณะเชิงโครงสร้างระดับอะตอมที่มีกำลังการขยายสูงไปแสดงบนจอภาพที่เป็นมอนิเตอร์ (และโดยหลักการเดียวกันนี้ก็สามารถที่ใช้ปลายแหลมของคานนี้ในการสร้างแรงผลัก เพื่อเคลื่อนย้ายอะตอมแต่ละตัวของโครงสร้างวัสดุได้เช่นเดียวกันอีกด้วย)

การทำงานของกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม ที่นำมาใช้งานทางด้านวิทยาศาสตร์ระดับนาโนเมตร สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 วิธี

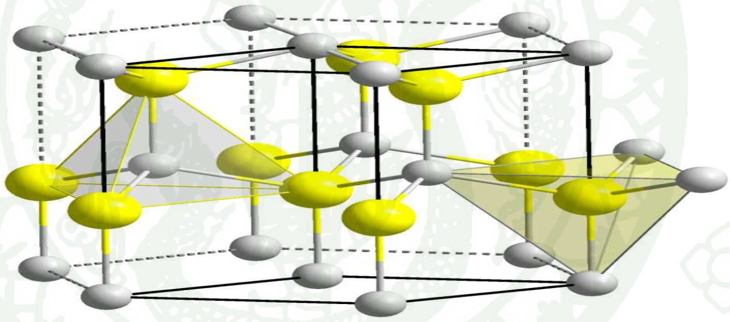
1. เป็นการสัมผัสพื้นผิวพร้อมกับการลากปลายแหลมไปบนพื้นผิวนั้นๆ ตลอดเวลา ข้อเสียของวิธีนี้คือ จะทำให้เกิดแรงต้านในแนวของการเคลื่อนที่ซึ่งขนานกับพื้นผิวขึ้น อันอาจทำให้คานของโพรบที่ใช้วัดเกิดการโก่งงอตัวหรือเกิดบิดเบี้ยวไป โดยที่มิได้เกิดจากแรงดึงดูดที่ปลายเนื่องจากแรงในแนวตั้งฉากเพียงอย่างเดียว จึงทำให้ข้อมูลความสูงของพื้นผิวที่วัดได้นั้นอาจผิดไปจากความสูงที่แท้จริง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

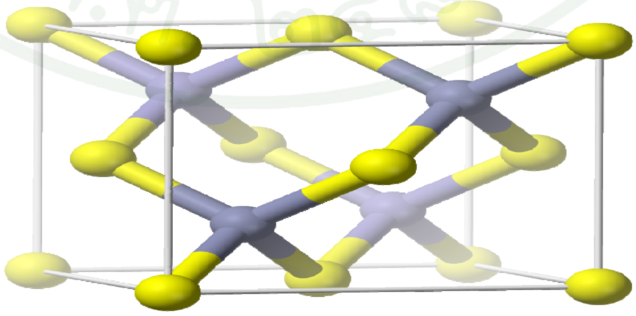
2. เป็นการสัมผัสพื้นผิวโดยให้ปลายแหลมสัมผัสกับพื้นผิวเป็นระยะเวลาสั้นๆ ในแนวตั้งฉากกับพื้นผิว (คล้ายกับการใช้ปลายนิ้วเคาะโต๊ะเป็นจังหวะๆ นั่นเอง) ด้วยลักษณะการสัมผัสแบบนี้แรงต้านในแนวตั้งฉากจะไม่เกิดขึ้น

9. โครงผลึกสังกะสีออกไซด์

สังกะสีออกไซด์มีโครงสร้างผลึก 3 แบบ แบบที่ 1 เฮกซะโกนอลในสภาวะปกติ มีสมบัติเชิงปริมาตร(bulk properties) ดังตารางที่ 3 โครงสร้างชนิดนี้เป็นที่ทราบกันดีว่ามีสมบัติเพียร์โซอิเล็กทริก เนื่องจากมีสัมประสิทธิ์การแปลงพลังงานเชิงกลสูง และมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกต่ำ และโครงสร้างแบบที่ 2 โครงผลึกแบบซิงค์เบลน และโครงผลึกแบบที่ 3 โครงผลึกแบบร็อกซอล เกิดขึ้นจากโครงสร้างแบบที่ 1 ได้รับแรงอัดและอุณหภูมิสูง

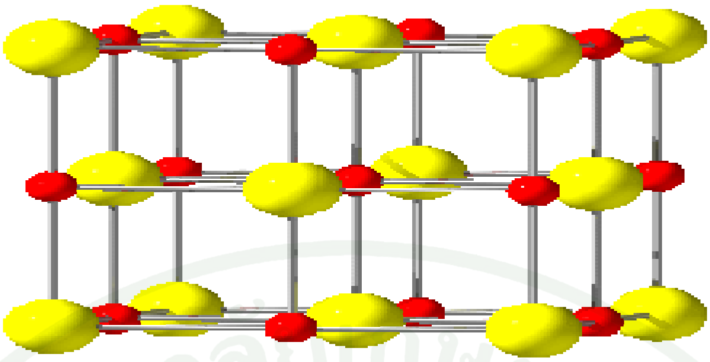


ภาพที่ 12 โครงสร้างแบบเฮกซะโกนอลของผลึกสังกะสีออกไซด์



ภาพที่ 13 โครงสร้างแบบซิงค์เบลนของผลึกสังกะสีออกไซด์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 14 โครงสร้างแบบร็อคซอลของผลึกสังกะสีออกไซด์

ตารางที่ 3 แสดงปริมาณต่างๆของสังกะสีออกไซด์โครงสร้างผลึกเฮกซะโกนอล

สมบัติ	ค่า
ค่าคงที่ผลึก	
a	3.253
c	5.211
a/c	1.602
ความหนาแน่น	5.606 g /cm3
เฟสสเถียรที่ 300 K	เฮกซะโกนอล
จุดหลอมเหลว	1975°C
สัมประสิทธิ์ขยายตัวเชิงเส้น	a_0:6.5×10^{-6}/°C
	c_0:3.0×10^{-6}/°C
ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก	8.656
ดัชนีหักเห	2.008,2.029
ช่องว่างแถบพลังงาน	3.4 eV
ความหนาแน่นพาหะภายใน	<10^{6}/cm
พลังงานพันธะเอกซิตรอน	60 MeV
มวลยังผลของอิเล็คตรอน	0.24
ความคล่องตัวของอิเล็คตรอนที่ 300 K	200 cm^{2}/V.S
มวลยังผลขอลโฮล	0.59
ความคล่องตัวของโฮลที่ 300 K	5-50cm^{2}/V.S

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

10. เครื่องสเปกโตรมิเตอร์(Spectrometer)

สเปกโตรมิเตอร์ที่ใช้แสง ที่ตามองเห็นและแสงเหนือม่วง มีส่วนประกอบของเครื่องวัดที่สำคัญ 5 ส่วน สำหรับสเปกโตรมิเตอร์ที่ใช้การดูดกลืนแสงส่วนใหญ่ คือ

1.แหล่งกำเนิดอันหนึ่งหรือแหล่งกำเนิดหลายอันที่มีรังสีช่วงความยาวคลื่นที่ต้องการ ซึ่งจะมีความยาวคลื่นในช่วง 200 นาโนเมตร ถึง 800 นาโนเมตร

2.ตัวทำแสงเอกรงค์(monocromator)

3.ที่จับตัวอย่างให้ลำแสงจากตัวทำแสงเอกรงค์ผ่าน ที่ใส่ตัวอย่างสำหรับแสงเหนือม่วง และแสงที่ตามองเห็น ใช้ซิลิกา ถ้าใช้เพียงแสงที่ตามองเห็นสามารถใช้แก้วกับพลาสติกได้

4.เครื่องวัดความเข้มแสงที่ส่งผ่านสารตัวอย่าง

5.เครื่องแสดงผลให้เราดูหรือบันทึกผลลัพธ์ออกมา

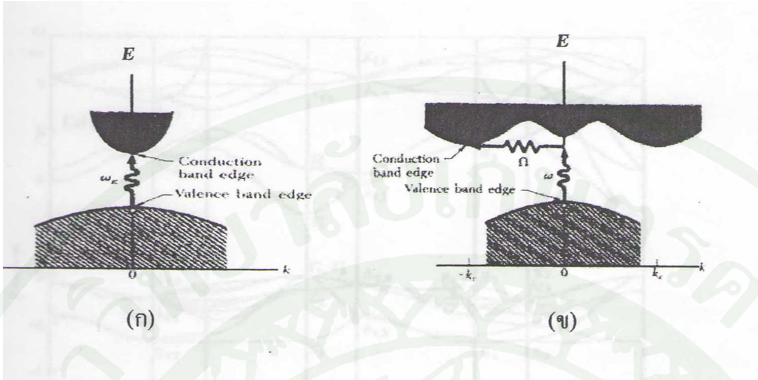
ในการหาช่องว่างแถบพลังงาน การวัดสัมประสิทธ์การดูดกลืนแสงของฟิล์มด้วยการส่งผ่านแสงวิเคราะห์การดูดกลืนแสง เพื่อหาช่องว่างแถบพลังงาน

$$\alpha = (\ln(\frac{I}{I_0}))/x \qquad (11)$$

เมื่อ x เป็นความหนาของฟิล์มบาง, I0 เป็นความเข้มแสงที่ฉายผ่านฟิล์มบาง, I เป็นความเข้มแสงที่ผ่านฟิล์มบาง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ลักษณะการดูดกลืนพลังงานแบบตรงและแบบเฉียงของสารกึ่งตัวนำแสดงได้ดังภาพที่ 15



ภาพที่ 15 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานและการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำ ที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์

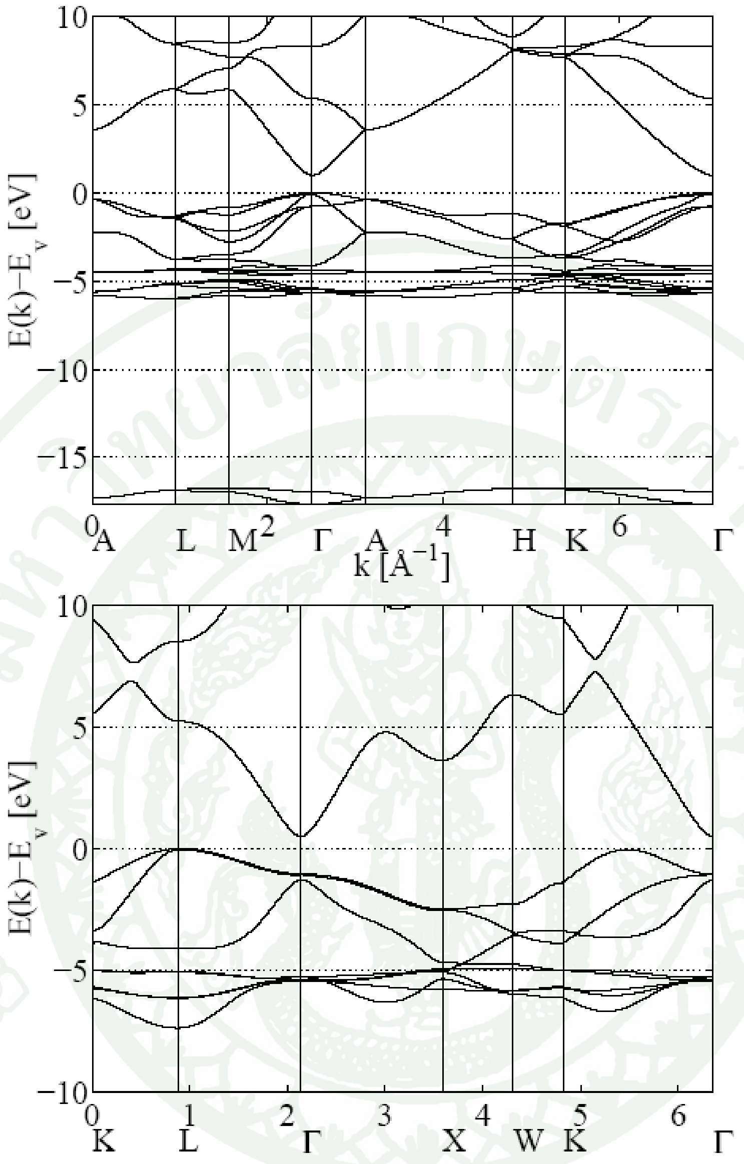
(ก)ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง

(ข)ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียง

ที่มา: Kittel (1971)

โครงสร้างแถบพลังงานเป็นสิ่งสำคัญที่ใช้ในการอธิบายสมบัติเชิงไฟฟ้าและเชิงแสงของสังกะสีออกไซด์ โครงสร้างแถบำพลังงานสังกะสีออกไซด์เป็นดังรูปที่ 16ก สำหรับโครงสร้างแบบเฮกซะโกนอล มีค่าประมาณ 3.4 eV และช่องว่างแถบพลังงานเป็นแบบตรง สำหรับผลึกแบบร็อกซอล แสดงในรูปที่ 16 ข ช่องว่างพลังงานเป็นแบบอ้อม มีค่าประมาณ 0.72 eV

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

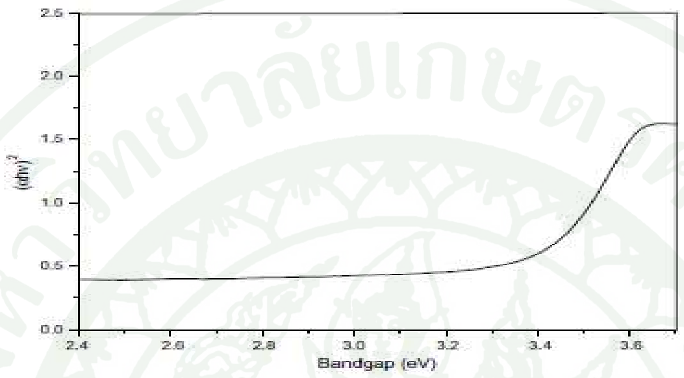


ภาพที่16 (ก) แสดงโครงสร้างแถบพลังงานของสังกะสีออกไซด์แบบคิวบิก
(ข) แสดงโครงสร้างแถบพลังงานของสังกะสีออกไซด์แบบเฮกซะโกนอล

การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำเกิดจากการที่อิเล็กตรอนได้รับพลังงานจากแสงที่มีพลังงานโฟตอนสูงกว่าค่าแถบช่องว่างพลังงาน แล้วย้ายสถานะพลังงานจากแถบวาเลนซ์ขึ้นไปสู่แถบนำ สเปกตรัมการดูดกลืนแสงบริเวณที่พลังงานโฟตอนมีค่าน้อยจะมีลักษณะเป็นขอบ แสดงถึงการลดลงของการดูดแสงอย่างกระทันหัน ขอบลักษณะนี้เรียกว่าขอบการดูดกลืนแสงหรือขอบการดูดกลืนพื้นฐาน พลังงานโฟตอนที่ขอบการดูดกลืนแสงมีค่าเท่ากับผลต่างของค่าพลังงานที่วัด

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

จากจุดต่ำสุดของแถบการนำ และจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ จุดที่เส้นตรงของกราฟระหว่าง $(hV)^2\alpha^2$ กับพลังงาน hV ซึ่งจะไปตัดกับแกนในแนวนอนที่พลังงานสอดคล้องกับช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ดังรูปที่ 17 วิธีการนี้เป็นการกำหนดค่าช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่นิยมมากที่สุด



ภาพที่ 17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $(hV)^2\alpha^2$ กับพลังงาน hV โดยที่จุดตัดแกนพลังงานคือค่าช่องว่างแถบพลังงาน

ที่มา: Chawla *et al.* (2006)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. วัสดุในการเตรียมฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์

วัสดุที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางเหล็กเพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในงานวิจัยนี้มีรายละเอียดดังตารางที่

ตารางที่ 4 รายละเอียดของวัสดุที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์

วัสดุ	สูตรเคมี	ความบริสุทธิ์(%)
เป้าสังกะสีออกไซด์	Zn	99.99
กระจกสไลด์	SiO_2	-
แก๊สอาร์กอน	Ar	99.99
แก๊สออกซิเจน	O_2	99.99

2. อุปกรณ์ในการเคลือบฟิล์ม

2.1 ที่ตัดกระจก

2.2 กระจกสไลด์

2.3 เครื่องเคลือบฟิล์มด้วยวิธีดีซีสปัตเตอริง รุ่นดังรูปที่ 18 เครื่องนี้ประกอบด้วย

2.3.1 ภาชนะสุญญากาศ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาพที่ 18 แสดง vacuum chamber

2.3.2 เกจวัดความดัน

2.4 เครื่องสูบสุญญากาศโรตารี (rotary vacuum pump)

2.5 เครื่องควบคุมการไหลของอากาศ รุ่น mks type247

2.6 เครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้ากระแสตรง ดังรูปที่ 20

2.7 ระบบหล่อเย็น

ภาพที่ 19 เครื่องดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาพที่ 20 เครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้ากระแสตรง

2.9 เตาอบสำหรับอบกระจกสไลด์ รุ่นYCO-101ของ GEMMY 888

ภาพที่ 21 เตาอบสำหรับอบกระจกสไลด์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

3. อุปกรณ์ในการศึกษาโครงสร้างฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์

เครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ รุ่น PW 3710 โดยบริษัท Phillips

4. อุปกรณ์ในการศึกษาพื้นผิวและความหนาของฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์

กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม รุ่น AR MFP-3D AFM (Bio.)

5. อุปกรณ์ในการศึกษาสมบัติเชิงแสงของฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์

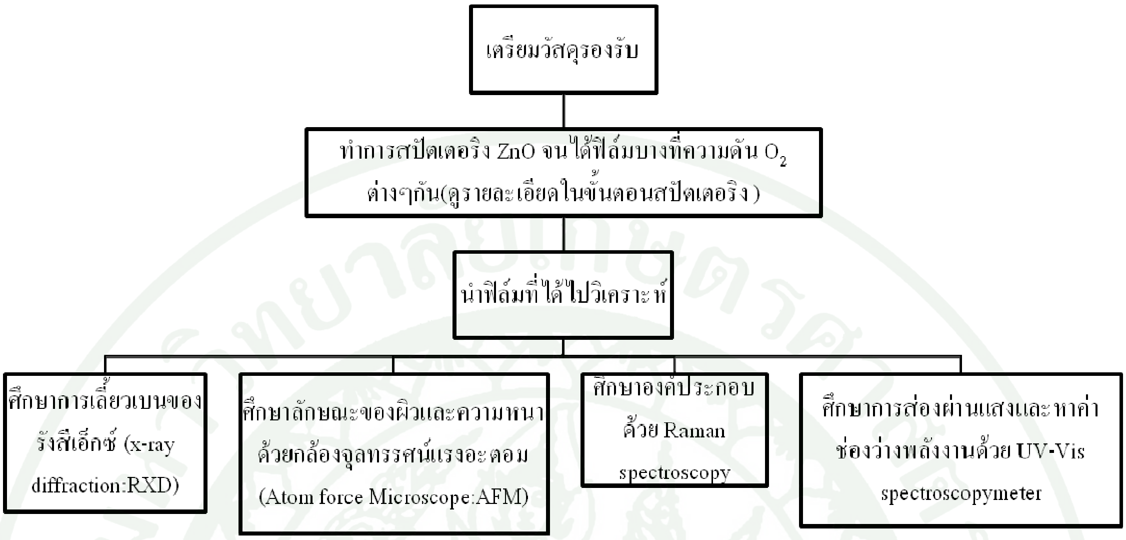
เครื่อง UV-VIS สเปกโตรมิเตอร์ รุ่น Lambda 650 ของบริษัท Perkin Elmer

6.อุปกรณ์ในการศึกษาพันธเคมีของฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์

เครื่องฟูเรียทรานฟอร์มรามานสเปกโตรมิเตอร์ รุ่น Spectrum GX ของบริษัท Perkin Elmer

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิธีการ



1.ขั้นตอนการเตรียมวัสดุรองรับ

จะทำการเคลือบฟิล์มบางบนวัสดุรองรับซึ่งก็คือ กระจกสไลด์ที่ทำความสะอาดโดยน้ำยาล้างจาน อะซีโตน เมทิลแอกอออล์ และน้ำกลั่น ตามลำดับ โดยทุกขั้นตอนจะสั่นในคลื่นเสียงความถี่สูง และนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 120 องศาเซสเซียสเป็นเวลา 15 นาที

2.ขั้นตอนการสร้างสภาวะสุญญากาศในภาชนะสุญญากาศ

ระบบสุญญากาศประกอบด้วยเครื่องสูบอากาศ 2 ชนิด คือ เครื่องสูบกลแบบโรตารี และแบบเครื่องสูบแพร่ไอ ซึ่งมีขั้นตอนการทำงาน ดังนี้

2.1. เปิดเครื่องสุบกลโรตารี และเครื่องสูบแพร่ไอให้ทำงาน โดยเปิด backing valve ไว้ เพื่อต้มน้ำมันให้ร้อน

2.2. เปิดภาชนะสุญญากาศ นำวัสดุรองรับวางไว้ในตำแหน่งห่างจากเป้าสังกะสีเป็นระยะ 11 เซนติเมตร ปิดภาชนะให้สนิท

2.3. สูบอากาศออกจากภาชนะสุญญากาศ โดยการเปิด roughing valve ให้เครื่องสูบกลโรตารีสูบอากาศออก จนได้ความดันในภาชนะสุญญากาศอยู่ที่ ระดับ10^{-2}มิลลิบาร์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2.4.เปิด backing valve ให้เครื่องสูบแพร่แบบไอต่อเนื่องกับเครื่องสูบกลโรตารี จากนั้นเปิด high vacuum valve เพื่อลดความดันในภาชนะสุญญากาศ ก่อนทำการสปัตเตอริ่ง ความดันต่ำสุดของระบบอยู่ที่ระดับ $5x10^{-5}$ มิลลิบาร์

3.ขั้นตอนการสปัตเตอริง

เมื่อทำการสร้างความดันในภาชนะสุญญากาศได้ตามต้องการแล้ว เริ่มการเคลือบฟิล์มบนวัสดุรองรับตามขั้นตอนดังนี้

3.1. ทำการป้อนแก๊สอาร์กอนเข้าสู่ภาชนะสุญญากาศ

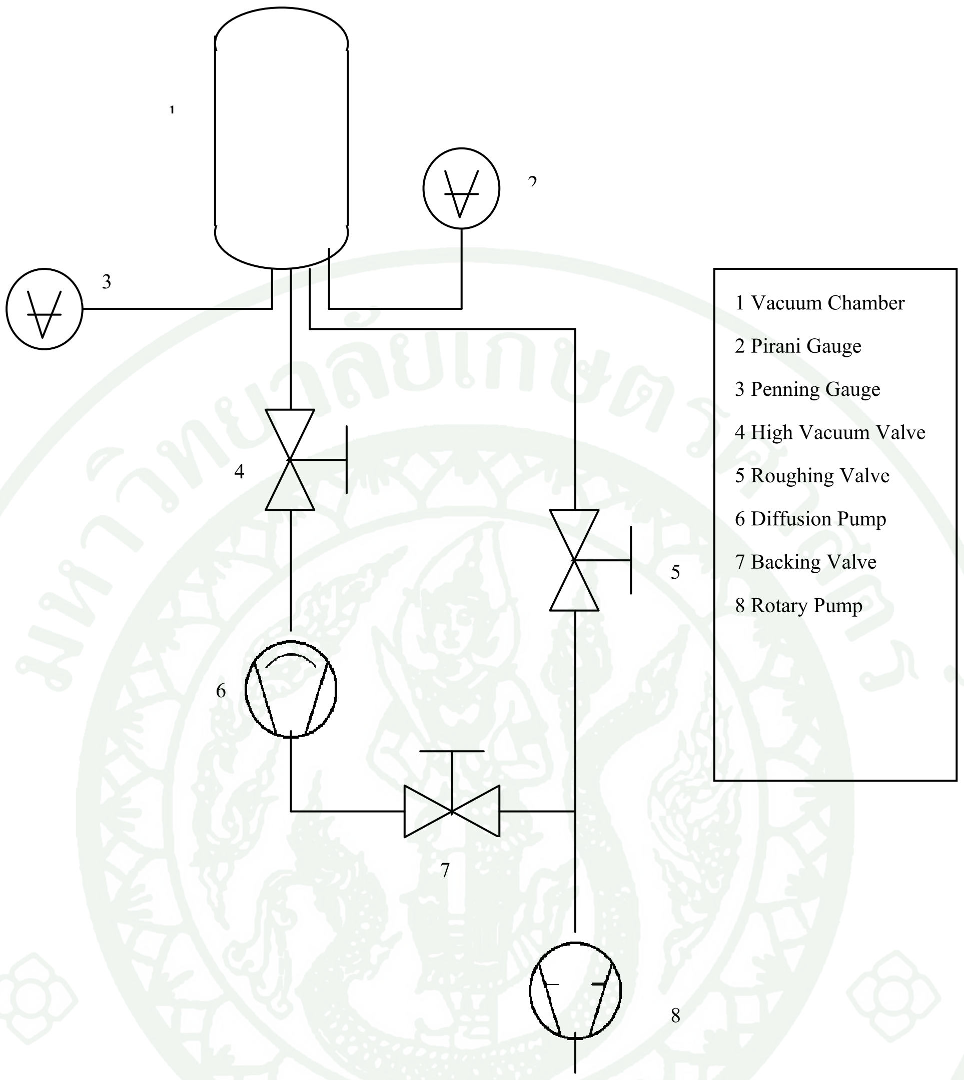
3.2. เปิดสวิตซ์แหล่งจ่ายไฟ ต่อศักย์ไฟฟ้าลบเข้ากับคาโทดของระบบ(เป้าโลหะที่จะเคลือบ) และภาชนะสุญญากาศเป็นศักย์ไฟฟ้าบวก(เปิดเครื่อง Power supply)

3.3.ป้อนศักย์ไฟฟ้าลบให้กับระบบค่อยๆปรับความต่างศักย์ของแหล่งจ่ายไฟเพื่อให้เกิดการโกลว์ดิสชาร์จ ปรับกระแสให้อยู่ที่ 110 มิลลิแอมป์

3.4. เปิดชัตเตอร์เพื่อทำการสปัตเตอร์ เพื่อให้เกิดฟิล์มบางโดยใช้เวลาตามต้องการปิดชัตเตอร์จากนั้น ปิดแหล่งจ่ายไฟ แล้วปิดแก๊สอาร์กอน ปิด high vacuum valveจากนั้นเปิดให้อากาศเข้าไปในภาชนะสุญญากาศแล้วจึงนำชิ้นงานออกมา

3.5. ถ้าต้องการเคลือบฟิล์มบางที่เป็นออกไซด์ของโลหะให้เพิ่มขั้นตอนในข้อ 1 โดยป้อนแก๊สออกซิเจนหลังจากป้อนแก๊สอาร์กอนเข้าสู่ภาชนะ หลังจากนั้นรอให้แก๊สทั้งสองผสมกันจนความดันในภาชนะคงที่ จึงทำการสปัตเตอร์ตามขั้นตอน 3.2-3.4

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 22 ไดอะแกรมของระบบเคลือบ

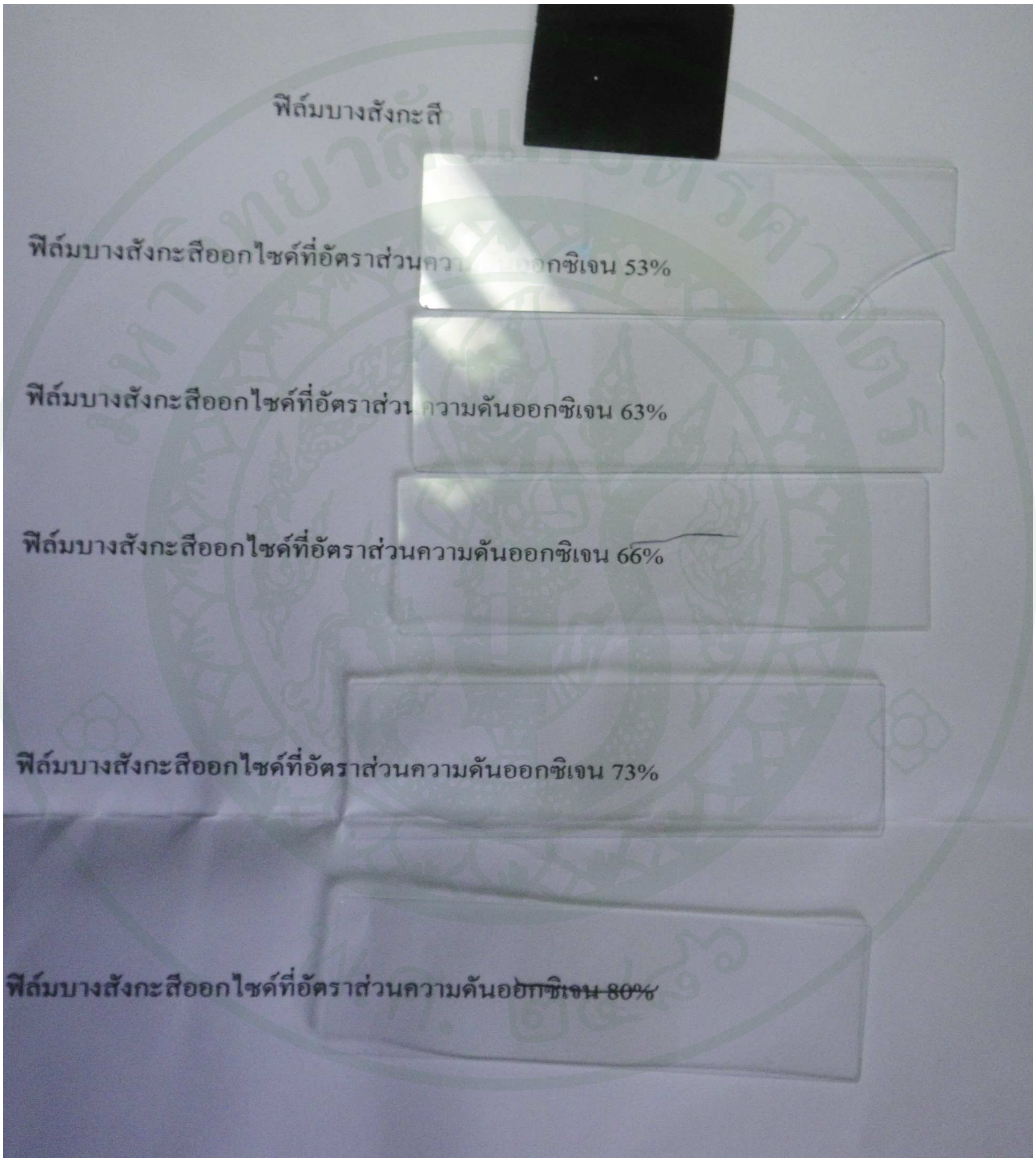
4. สถานที่และระยะเวลาทำการวิจัย

ห้องปฏิบัติการนาโนวัสดุ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน ภาคปลาย ปีการศึกษา 2550-ภาคปลาย ปีการศึกษา2552

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผลและวิจารณ์

1. ลักษณะของฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์จากการสังเกตุด้วยตาเปล่า



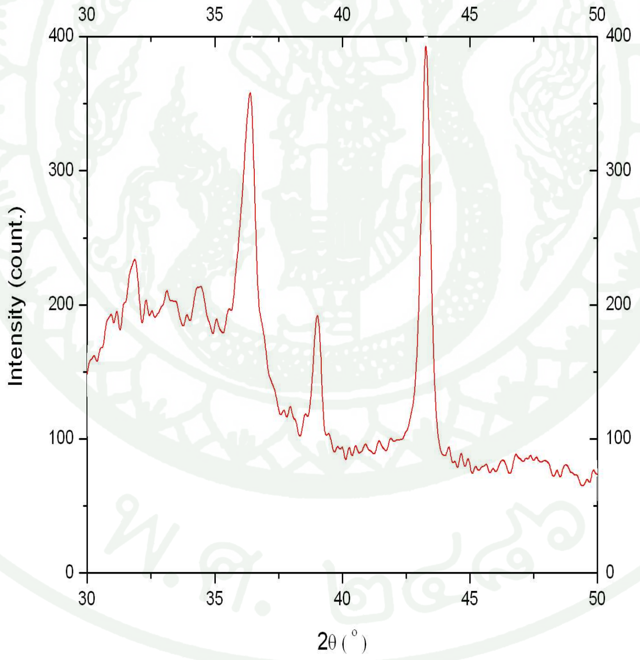
ภาพที่ 23 แสดงลักษณะของฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์ เมื่อสังเกตุด้วยตาเปล่า

จะเห็นได้ว่าฟิล์มบางสังกะสีนั้นจะมีลักษณะทึบแสง มีสีดำ ส่วนฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์นั้นจะเปลี่ยนเป็นฟิล์มที่ใส มีสีออกเหลือง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2. อิทธิพลการเปลี่ยนแปลงความดันของออกซิเจนต่อโครงสร้างฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์

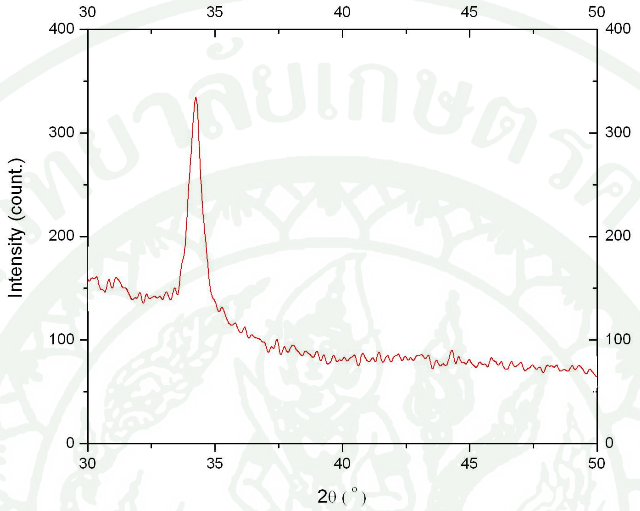
ในการศึกษาอิทธิพลการเปลี่ยนแปลงความดันออกซิเจนต่อฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์ ทำโดยการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างแก๊สอาร์กอนและแก๊สออกซิเจน โดยควบคุมตัวแปรอื่นๆให้เท่ากัน โดยให้กระแสที่ใช้สปัตเตอร์เป็น 110 มิลลิแอมป์ ระยะห่างจากเป้าสังกะสีถึงวัสดุรองรับเป็น 11 เซนติเมตร ทำการสปัตเตอริงโดยให้อัตราส่วนความดันของของแก๊สออกซิเจนต่อความดันรวมของแก๊สในภาชนะสุญญกาศ เป็น 0, 53, 63, 66, 73 และ 80 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จากนั้นนำไปวิเคราะห์โดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ โดยใช้ความยาวคลื่นของ Cu-Kα ความยาวคลื่น1.54 นาโนเมตรวัดมุมในช่วง 20 -60 องศา แล้วนำค่าความเข้มการเลี้ยวเบนที่ได้มาเขียนกราฟระหว่างค่ามุมเลี้ยวเบนและความเข้มของการเลี้ยวเบน นำผลที่ได้เปรียบเทียบกับมาตรฐานอ้างอิงของ JCPDS ให้ผลเป็นดังนี้



ภาพที่ 24 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางสังกะสี

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

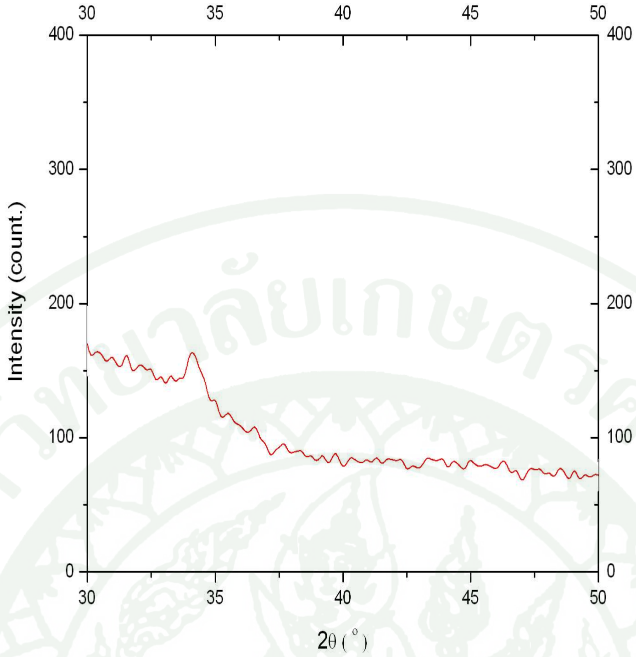
จากรูป 24 จะเห็นพีคการเลี้ยวเบนของสังกะสีที่มุมลี้ยวเบนเป็น 36.4, 39.0และ 43.3 ซึ่งสอดคล้องกับระนาบ (002), (100) และ (101) ของสังกะสี ตามลำดับ แสดงให้เห็นความเป็นผลึกที่ชัดเจนของฟิล์มบางสังกะสี



ภาพที่ 25 แสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของสังกะสีออกไซด์ที่อัตราส่วนความดันออกซิเจนเป็น 53 เปอร์เซ็นต์

รูปที่ 25 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์ที่ความดันออกซิเจนเป็น 53 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจะเห็นพีคการเลี้ยวเบนที่มุม 34.2 องศา ตรงกับระนาบการเลี้ยวเบนที่ (002) สังกะสีออกไซด์ (R. Hong *et al.* 2005) จากพีคของการเลี้ยวเบนที่ชัดเจนทำให้เห็นว่าฟิล์มมีความเป็นผลึกสูงจึงทำให้การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์มีค่ามากจึงเห็นพีคที่ชัดเจน

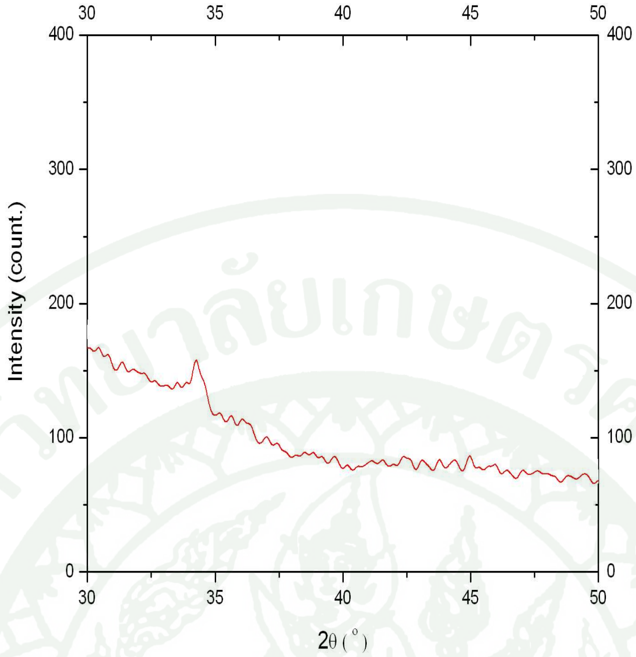
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 26 แสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของสังกะสีออกไซด์ที่อัตราส่วนความดันออกซิเจนเป็น 63 เปอร์เซ็นต์

รูปที่ 26 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์ที่ความดันออกซิเจนเป็น 63 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจะเห็นพีคการเลี้ยวเบนที่มุม 34.2 องศา ตรงกับระนาบการเลี้ยวเบนที่ (002) สังกะสีออกไซด์ (R. Hong *et al.*, 2005) ความเข้มของพีคของการเลี้ยวเบนมีค่าน้อยลงเมื่อเทียบกับการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์ที่อัตราส่วนความดันออกซิเจน 53 เปอร์เซ็นต์ แสดงว่าฟิล์มมีความเป็นอสัณฐานมากขึ้น จึงทำให้การสะท้อนของรังสีเอ็กซ์เกิดขึ้นได้น้อยลง

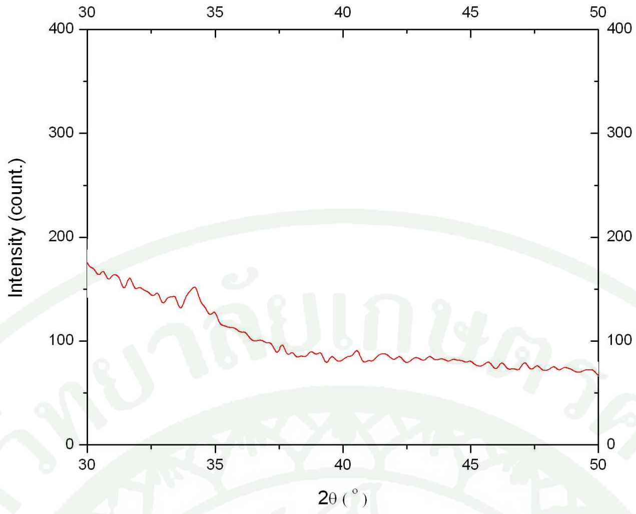
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 27 แสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของสังกะสีออกไซด์ที่อัตราส่วนความดันออกซิเจนเป็น 66 เปอร์เซ็นต์

รูปที่ 27 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์ที่ความดันออกซิเจนเป็น 66 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจะเห็นพีคการเลี้ยวเบนเล็กน้อยที่มุม 34.2 องศา ตรงกับระนาบการเลี้ยวเบนที่ (002) สังกะสีออกไซด์ (R. Hong *et al.*, 2005) ความเข้มของพีคของการเลี้ยวเบนมีค่าน้อยลงเมื่อเทียบกับการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์ที่อัตราส่วนความดันออกซิเจน 53 และ 63 เปอร์เซ็นต์ แสดงว่าฟิล์มมีความเป็นอสัณฐานมากขึ้น จึงทำให้การสะท้อนของรังสีเอ็กซ์เกิดขึ้นได้น้อยลง

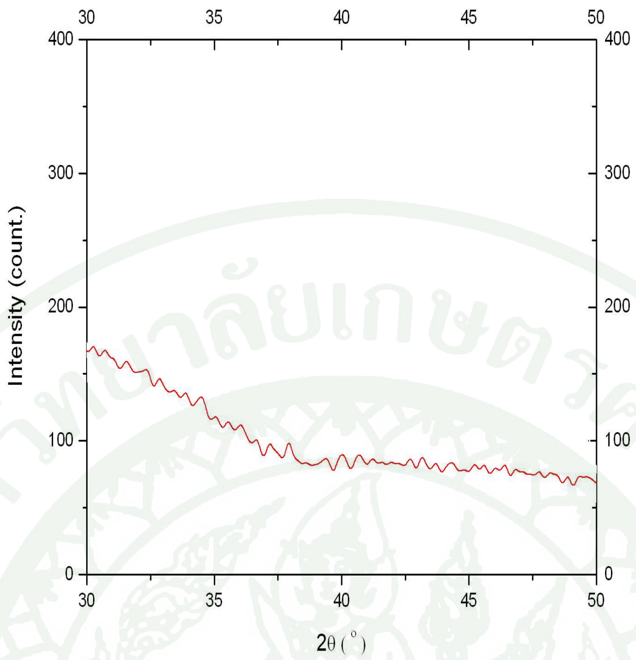
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 28 แสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของสังกะสีออกไซด์ที่อัตราส่วนความดันออกซิเจนเป็น 73 เปอร์เซ็นต์

รูปที่ 28 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์ที่ความดันออกซิเจนเป็น 73 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจะเห็นพีคการเลี้ยวเบนที่มุม 34.2 องศา ตรงกับระนาบการเลี้ยวเบนที่ (002) สังกะสีออกไซด์ (R. Hong *et al.*,2005) ความเข้มของพีคของการเลี้ยวเบนมีค่าน้อยลงเมื่อเทียบกับการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์ที่อัตราส่วนความดันออกซิเจน 53,63 และ 66 เปอร์เซ็นต์ แสดงว่าฟิล์มมีความเป็นอสัณฐานมากขึ้น จึงทำให้การสะท้อนของรังสีเอ็กซ์เกิดขึ้นได้น้อยลง

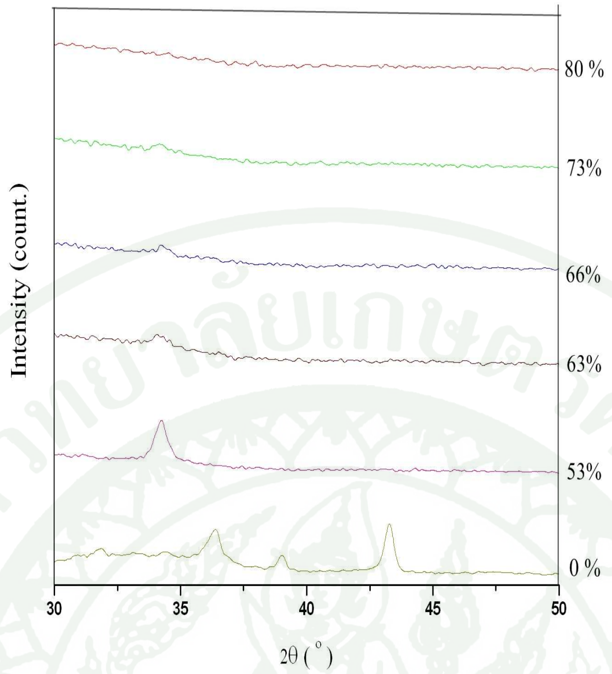
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 29 แสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของสังกะสีออกไซด์ที่อัตราส่วนความดันออกซิเจนเป็น 80 เปอร์เซ็นต์

รูปที่ 29 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์ที่ความดันออกซิเจนเป็น 80 เปอร์เซ็นต์ จะไม่เห็นการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่เด่นชัดแสดงถึงความไม่เป็นผลึกของฟิล์ม

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 30 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางสังกะสีและสังกะสีออกไซด์ที่ความดันออกซิเจนต่างๆ

รูปที่ 30 แสดงการเปรียบเทียบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ความดันออกซิเจนต่างๆ พบว่าความเข้มของพีคของการเลี้ยวเบนจะมีค่าลดลง แสดงว่าค่าความเป็นผลึกของฟิล์มมีค่าลดลงเมื่อความดันออกซิเจนมีค่าเพิ่มขึ้น ที่ความดันออกซิเจนเท่ากับ 53 % พบว่ามีความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์มีพีคการเลี้ยวเบนที่ชัดเจนกว่าที่อัตราส่วนความดันออกซิเจนอื่นๆคือเห็นความเข้มของพีคการเลี้ยวเบนที่ชัดเจน แสดงให้เห็นว่าฟิล์มมีความเป็นผลึกสูง

นำเอาพีคของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์มาคำนวณหาค่าความกว้างครึ่งหนึ่งของพีคที่สูงที่สุดของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (FWHM) แล้วนำค่าที่ได้มาหาขนาดของเกรนโดยสมการของ Scherrer:

$$D = 0.9\lambda / \beta \cos\theta \qquad (15)$$

เมื่อ D คือ ขนาดของเกรน, λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ มีค่าเป็น 0.1540 นาโนเมตร, β คือ ค่าความกว้างของพีคของระนาบ (0 0 2) ในหน่วย เรเดียน ,θ คือ มุมเลี้ยวเบนของแบรก มีค่า 34.2°

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

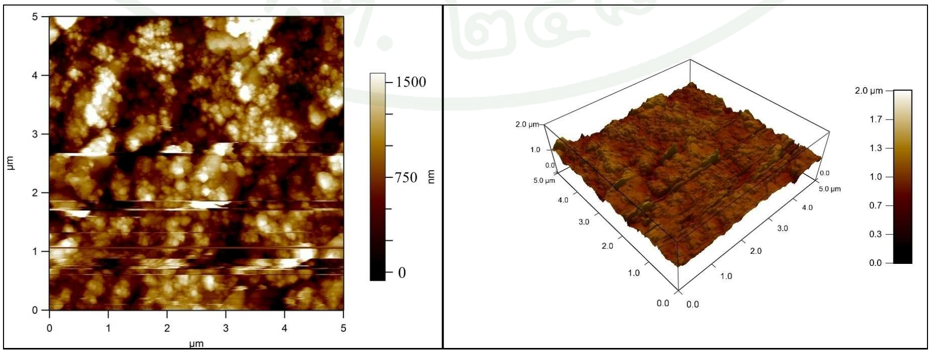
ตารางที่ 5 แสดงค่าความกว้างครึ่งหนึ่งของพีคที่สูงที่สุดของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (FWHM) และขนาดของเกรนของฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์

ความดันของแก๊สออกซิเจน(%)	FWHM (radian)	ขนาดของเกรน *(nm)*
0	0.0081	17.902
53	0.0151	9.603
63	0.0151	9.603
66	0.0151	9.603
73	0.0158	9.178
80	0.0158	9.178

3. **อิทธิพลการเปลี่ยนแปลงความดันของออกซิเจนต่อพื้นผิวและความหนาของฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์**

ศึกษาลักษณะพื้นผิวของฟิล์มและขนาดของเกรนด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม แสดงให้เห็นถึงขนาดเกรนของฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์ที่ความดันออกซิเจนต่างๆกัน แสดงดังรูปที่ 31- 36

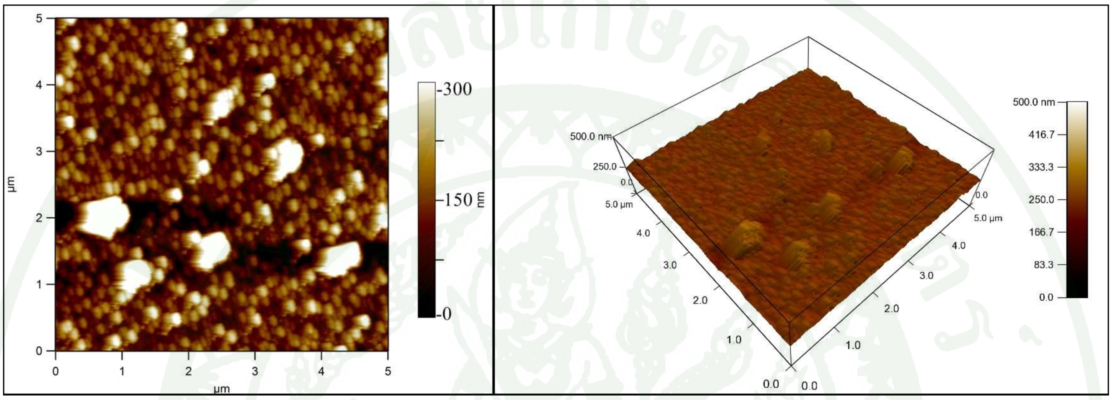
รูปที่ 31 แสดงพื้นผิวของฟิล์มบางสังกะสีที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม จากภาพด้านซ้ายมือจะเห็นผิวของฟิล์มของฟิล์มใน 2มิติ ส่วนด้านขวามือจะเป็นภาพใน 3 มิติ



ภาพที่ 31 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมของฟิล์มบางสังกะสี

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

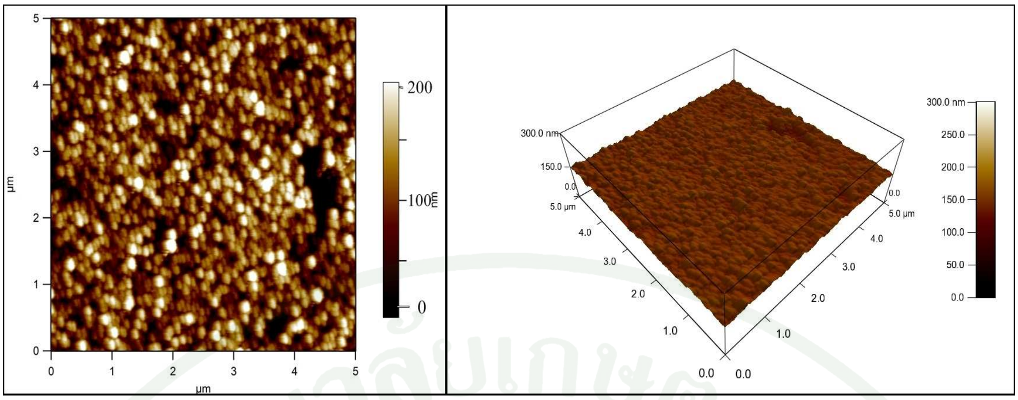
จากภาพซ้ายจะเห็นพื้นผิวของฟิล์มเป็น 2 บริเวณ คือ บริเวณที่มีสี คือ บริเวณที่มีผลึกของสังกะสีซึ่งมีความหนาไม่เท่ากัน โดยผลึกที่มีความหนาสูงสุด(เห็นเป็นสีขาว)อยู่ที่ 1500 นาโนเมตร และบริเวณที่มีความหนาน้อยที่สุด(เห็นเป็นสีดำ) คือที่ว่าง (void) ฟิล์มมีความหนาโดยเฉลี่ยเป็น 1300 นาโนเมตร ลักษณะของผลึกมีรูปร่างเป็นแท่ง(column) และเมื่อพิจารณาความกว้างของผลึกเราจะได้ขนาดของเกรน ขนาดของเกรนโดยเฉลี่ยมีค่าเป็น 0.1 ไมโครเมตร



ภาพที่ 32 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมของฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์ที่ความดันของแก๊สออกซิเจนเป็น 53เปอร์เซ็นต์

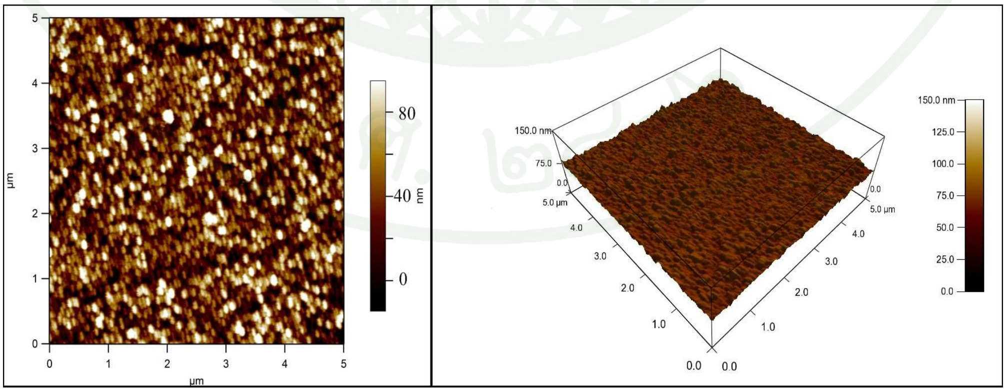
รูปที่ 32 รูปซ้ายจะเห็นพื้นผิวของฟิล์มเป็น 2 บริเวณ คือ บริเวณที่มีสี คือ บริเวณที่มีผลึกของสังกะสีซึ่งมีความหนาไม่เท่ากัน โดยผลึกที่มีความหนาสูงสุด(เห็นเป็นสีขาว)อยู่ที่ 300 นาโนเมตร และบริเวณที่มีความหนาน้อยที่สุด(เห็นเป็นสีดำ) คือที่ว่าง (void) ซึ่งความหนาแน่นผลึกมีค่าเป็น 28 ผลึก/μm^2 และความหนาแน่นที่ว่างมีค่าเป็น 14 ที่ว่าง/μm^2 พิจารณาสีของฟิล์มบางจากรูปด้านขวา พบว่า ฟิล์มมีความหนาโดยเฉลี่ยเป็น 250 นาโนเมตร ลักษณะของผลึกมีรูปร่างเป็นแท่ง (column) และเมื่อพิจารณาความกว้างของผลึกเราจะได้ขนาดของเกรน เกรนที่เกิดนั้นมีขนาดแตกต่างกันไป จะเห็นเกรนขนากใหญ่กว่า 0.5 ไมโครเมตรกระจายทั่วฟิล์ม ขนาดของเกรนโดยเฉลี่ยมีค่าเป็น 0.1 ไมโครเมตร

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 33 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมของฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์ที่ความดันของแก ออกซิเจนเป็น 63 เปอร์เซ็นต์

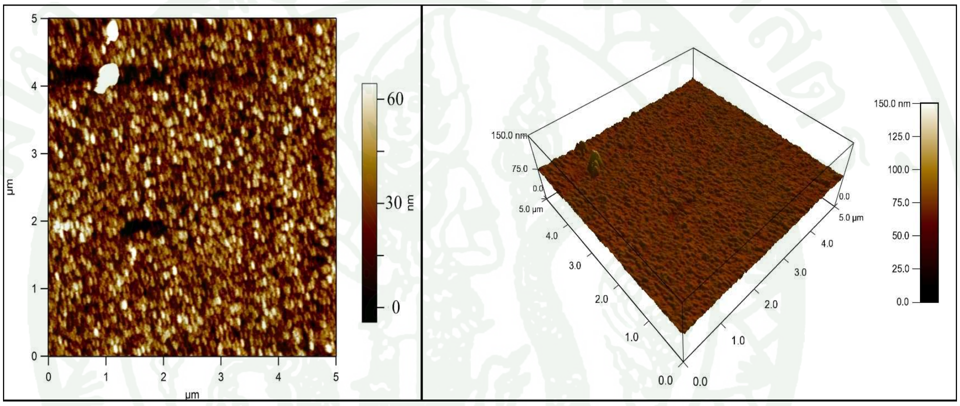
รูปที่ 33 รูปซ้ายจะเห็นพื้นผิวของฟิล์มเป็น 2 บริเวณ คือ บริเวณที่มีสี คือ บริเวณที่มีผลึกของสังกะสีซึ่งมีความหนาไม่เท่ากัน โดยผลึกที่มีความหนาสูงสุด(เห็นเป็นสีขาว)อยู่ที่ 200 นาโนเมตร และบริเวณที่มีความหนาน้อยที่สุด(เห็นเป็นสีดำ) คือที่ว่าง (void) ซึ่งความหนาแน่นผลึกมีค่าเป็น 16 ผลึก/μm^2 และความหนาแน่นที่ว่างมีค่าเป็น 18 ที่ว่าง/μm^2 พิจารณาสีของฟิล์มบางจากรูปด้านขวา พบว่า ฟิล์มมีความหนาโดยเฉลี่ยเป็น 200 นาโนเมตรลักษณะของผลึกมีรูปร่างเป็นแท่ง(column) และเมื่อพิจารณาความกว้างของผลึกเราจะได้ขนาดของเกรน เกรนที่เกิดนั้นมีขนาดแตกต่างกันไป แต่ไม่พบเกรนที่มีขนาดใหญ่กว่า 0.5 ไมโครเมตร ขนาดของเกรนโดยเฉลี่ยมีค่าเล็กกว่า 0.1 ไมโครเมตร



ภาพที่ 34 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมของฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์ที่ความดันของแก๊สออกซิเจนเป็น 66 เปอร์เซ็นต์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

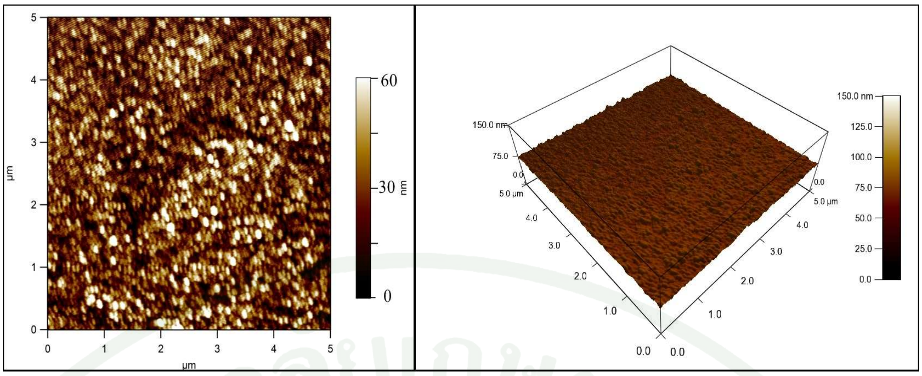
รูปที่ 34 รูปซ้ายจะเห็นพื้นผิวของฟิล์มเป็น 2 บริเวณ คือ บริเวณที่มีสี คือ บริเวณที่มีผลึกของสังกะสีซึ่งมีความหนาไม่เท่ากัน โดยผลึกที่มีความหนาสูงสุด(เห็นเป็นสีขาว)อยู่ที่ 100 นาโนเมตร และบริเวณที่มีความหนาน้อยที่สุด(เห็นเป็นสีดำ) คือที่ว่าง (void) ซึ่งความหนาแน่นผลึกมีค่าเป็น 14 ผลึก/μm^2 และความหนาแน่นที่ว่างมีค่าเป็น 21 ที่ว่าง/μm^2 พิจารณาสีของฟิล์มบางจากรูปด้านขวา พบว่า ฟิล์มมีความหนาโดยเฉลี่ยเป็น 80 นาโนเมตร ลักษณะของผลึกมีรูปร่างเป็นแท่ง (column) และเมื่อพิจารณาความกว้างของผลึกเราจะได้ขนาดของเกรน เกรนที่เกิดนั้นมีขนาดแตกต่างกันไป แต่ไม่พบเกรนที่มีขนาดใหญ่กว่า 0.5 ไมโครเมตร ขนาดของเกรนโดยเฉลี่ยมีค่าเล็กกว่า 0.1 ไมโครเมตร



ภาพที่ 35 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมของฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์ที่ความดันของแก๊สออกซิเจนเป็น 73 เปอร์เซ็นต์

รูปที่ 35 รูปซ้ายจะเห็นพื้นผิวของฟิล์มเป็น 2 บริเวณ คือ บริเวณที่มีสี คือ บริเวณที่มีผลึกของสังกะสีซึ่งมีความหนาไม่เท่ากัน โดยผลึกที่มีความหนาสูงสุด(เห็นเป็นสีขาว)อยู่ที่ 200 นาโนเมตร และบริเวณที่มีความหนาน้อยที่สุด(เห็นเป็นสีดำ) คือที่ว่าง (void) ซึ่งความหนาแน่นผลึกมีค่าเป็น 12 ผลึก/μm^2 และความหนาแน่นที่ว่างมีค่าเป็น 20 ที่ว่าง/μm^2 พิจารณาสีของฟิล์มบางจากรูปด้านขวา พบว่า ฟิล์มมีความหนาโดยเฉลี่ยเป็น 75 นาโนเมตรลักษณะของผลึกมีรูปร่างเป็นแท่ง (column) และเมื่อพิจารณาความกว้างของผลึกเราจะได้ขนาดของเกรน เกรนที่เกิดนั้นมีขนาดแตกต่างกันไป แต่ไม่พบเกรนที่มีขนาดใหญ่กว่า 0.5 ไมโครเมตร ขนาดของเกรนโดยเฉลี่ยมีค่าเล็กกว่า 0.1 ไมโครเมตร

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



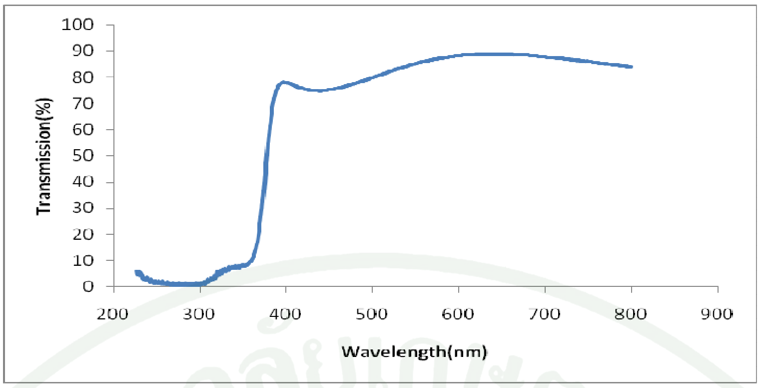
ภาพที่ 36 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมของฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์ที่ความดันของแก๊สออกซิเจนเป็น 80 เปอร์เซ็นต์

รูปที่ 36 รูปซ้ายจะเห็นพื้นผิวของฟิล์มเป็น 2 บริเวณ คือ บริเวณที่มีสี คือ บริเวณที่มีผลึกของสังกะสีซึ่งมีความหนาไม่เท่ากัน โดยผลึกที่มีความหนาสูงสุด(เห็นเป็นสีขาว)อยู่ที่ 60 นาโนเมตร และบริเวณที่มีความหนาน้อยที่สุด(เห็นเป็นสีดำ) คือที่ว่าง (void) ซึ่งความหนาแน่นผลึกมีค่าเป็น 12 ผลึก/μm^2 และความหนาแน่นที่ว่างมีค่าเป็น 29 ที่ว่าง/μm^2 พิจารณาสีของฟิล์มบางจากรูปด้านขวา พบว่า ฟิล์มมีความหนาโดยเฉลี่ยเป็น 50 นาโนเมตรลักษณะของผลึกมีรูปร่างเป็นแท่ง (column) และเมื่อพิจารณาความกว้างของผลึกเราจะได้ขนาดของเกรน เกรนที่เกิดนั้นมีขนาดแตกต่างกันไป แต่ไม่พบเกรนที่มีขนาดใหญ่กว่า 0.5 ไมโครเมตร ขนาดของเกรนโดยเฉลี่ยมีค่าเล็กกว่า 0.1 ไมโครเมตร

4. ศึกษาสมบัติเชิงแสงของฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์ด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์

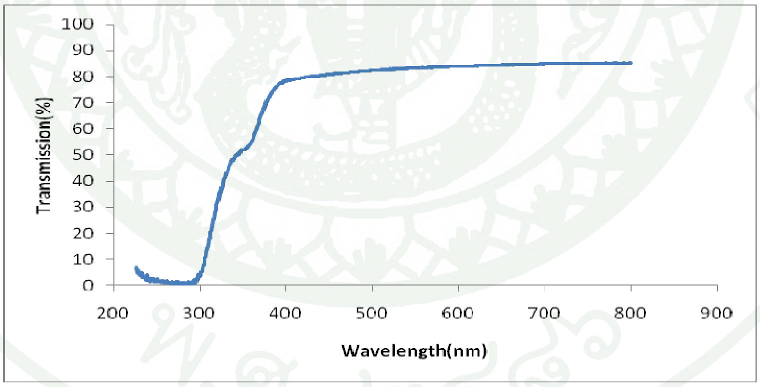
นำฟิล์มสังกะสีออกไซด์ไปศึกษาการส่งผ่านของแสงด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์โดยศึกษาในช่วงความยาวคลื่น 200-800 นาโนเมตร พบว่าการส่งผ่านของแสงของฟิล์มบางมีเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงในช่วงตามองเห็น(400-700 นาโนเมตร) ได้ดี (ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านมีค่าเกิน 80%)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 37 เปอร์เซ็นการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์ที่อัตราส่วนความดันออกซิเจน เป็น 53 เปอร์เซ็นต์

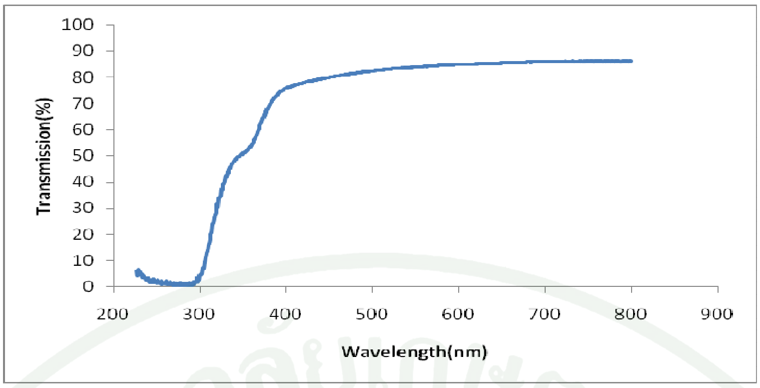
รูปที่ 37 แสดงการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์ที่อัตราส่วนความดันออกซิเจนเป็น 53 เปอร์เซ็นต์ พบว่าประสิทธิภาพการส่งผ่านแสงในช่วงแสงที่ตามองเห็นมีการส่งผ่านได้ดี (มากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์) และมีการเพิ่มขึ้นของสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่ความยาวคลื่นต่ำๆ (รังสีเหนือม่วง) ได้เล็กน้อย ความยาวคลื่นที่เริ่มส่งผ่านแสงได้มีค่าประมาณ 357 นาโนเมตร



ภาพที่ 38 เปอร์เซ็นการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์ที่อัตราส่วนความดันออกซิเจน เป็น 63 เปอร์เซ็นต์

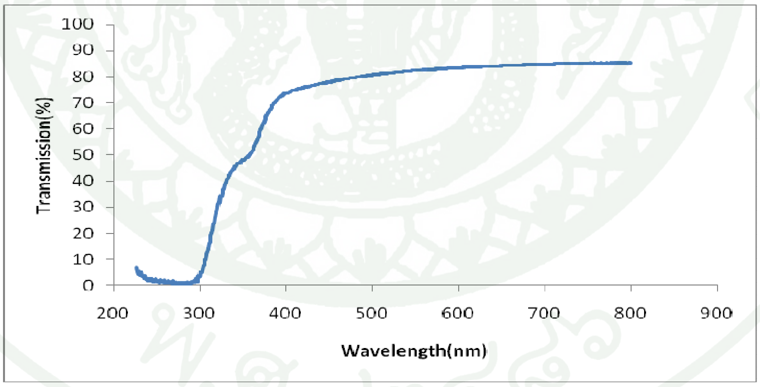
รูปที่ 38 แสดงการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์ที่อัตราส่วนความดันออกซิเจนเป็น 63 เปอร์เซ็นต์ พบว่าประสิทธิภาพการส่งผ่านแสงในช่วงแสงที่ตามองเห็นมีการส่งผ่านได้ดี (มากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์) และมีการเพิ่มขึ้นของสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่ความยาวคลื่นต่ำๆ (รังสีเหนือม่วง) ได้เล็กน้อย ความยาวคลื่นที่เริ่มส่งผ่านแสงได้มีค่าประมาณ 306 นาโนเมตร

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 39 เปอร์เซ็นการส่งผ่านของแสงของฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์ที่อัตราส่วนความดันออกซิเจนเป็น 66 เปอร์เซ็นต์

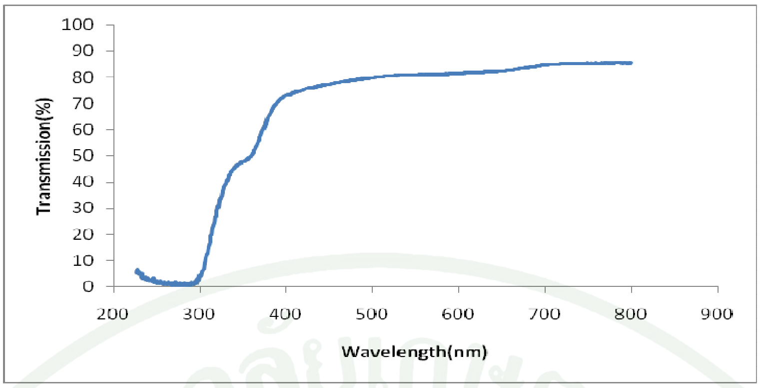
รูปที่ 39 แสดงการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์ที่อัตราส่วนความดันออกซิเจนเป็น 66 เปอร์เซ็นต์ พบว่าประสิทธิภาพการส่งผ่านแสงในช่วงแสงที่ตามองเห็นมีการส่งผ่านได้ดี (มากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์) และมีการเพิ่มขึ้นของสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่ความยาวคลื่นต่ำๆ (รังสีเหนือม่วง) ได้เล็กน้อย ความยาวคลื่นที่เริ่มส่งผ่านแสงได้มีค่าประมาณ 306 นาโนเมตร



ภาพที่ 40 เปอร์เซ็นการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์ที่อัตราส่วนความดันออกซิเจนเป็น 73 เปอร์เซ็นต์

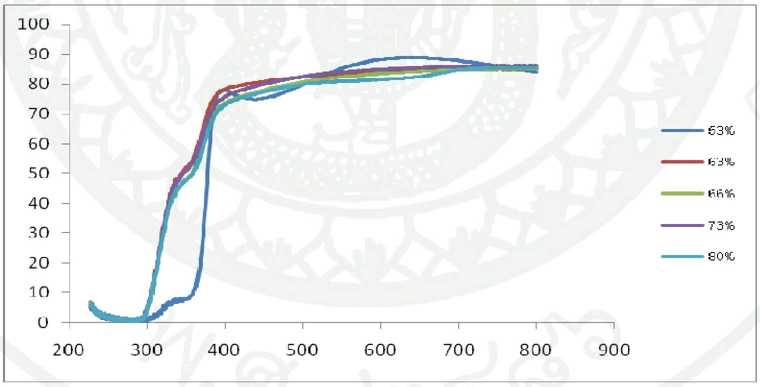
รูปที่ 40 แสดงการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์ที่อัตราส่วนความดันออกซิเจนเป็น 73 เปอร์เซ็นต์ พบว่าประสิทธิภาพการส่งผ่านแสงในช่วงแสงที่ตามองเห็นมีการส่งผ่านได้ดี (มากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์) และมีการเพิ่มขึ้นของสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่ความยาวคลื่นต่ำๆ (รังสีเหนือม่วง) ได้เล็กน้อย ความยาวคลื่นที่เริ่มส่งผ่านแสงได้มีค่าประมาณ 306 นาโนเมตร

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 41 เปอร์เซ็นการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์ที่อัตราส่วนความดันออกซิเจน เป็น 80 เปอร์เซ็นต์

รูปที่ 41 แสดงการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์ที่อัตราส่วนความดันออกซิเจนเป็น 80 เปอร์เซ็นต์ พบว่าประสิทธิภาพการส่งผ่านแสงในช่วงแสงที่ตามองเห็นมีการส่งผ่านได้ดี (มากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์) และมีการเพิ่มขึ้นของสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่ความยาวคลื่นต่ำๆ (รังสีเหนือม่วง) ได้เล็กน้อย ความยาวคลื่นที่เริ่มส่งผ่านแสงได้มีค่าประมาณ 306 นาโนเมตร

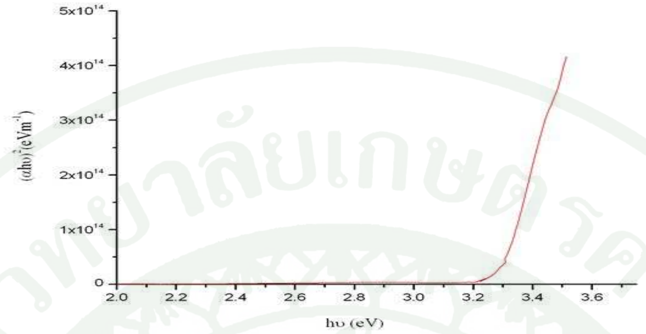


ภาพที่ 42 เปอร์เซ็นการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์ที่อัตราส่วนความดันออกซิเจน ต่างๆกัน

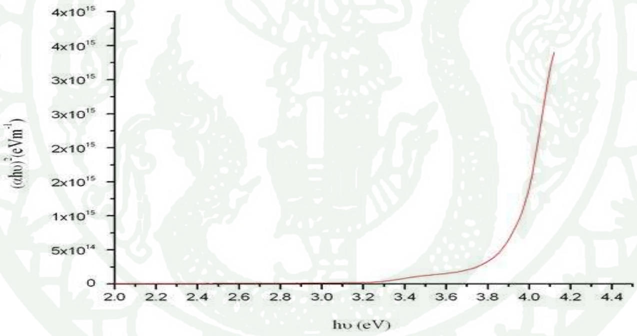
รูปที่ 42 เปรียบเทียบการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์ที่ความดันออกซิเจนต่างๆกัน พบว่าที่อัตราส่วนความดันออกซิเจนเป็น 53 เปอร์เซ็นต์ฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์มีประสิทธิภาพในการส่งผ่านแสงที่ความยาวคลื่นต่ำๆได้น้อยกว่าฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์ที่มีความดันออกซิเจนสูงๆ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

นำค่าสัมประสิทธิ์การส่องผ่านแสง และ ความหนาของฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์ที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมมาเขียนกราฟระหว่าง $(\alpha hv)^2$ และ (hv) ได้กราฟต่อไปนี้

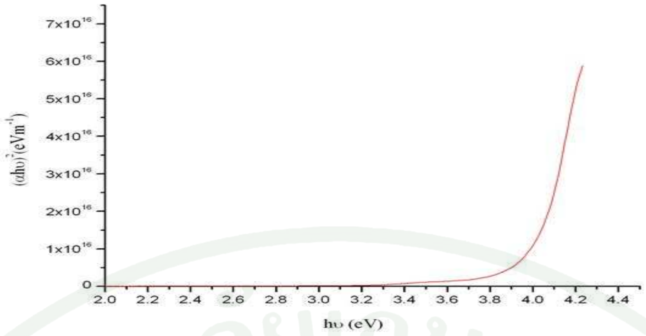


ภาพที่ 43 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha hv)^2$ และ พลังงาน hv ของฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์ที่มีความดันออกซิเจนเป็น 53 เปอร์เซ็นต์

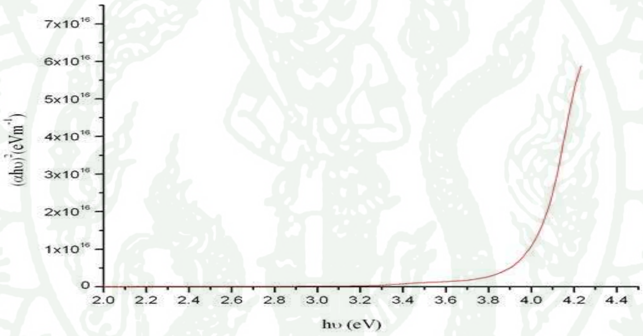


ภาพที่ 44 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha hv)^2$ และ พลังงาน hv ของฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์มี่ความดันออกซิเจนเป็น 63 เปอร์เซ็นต์

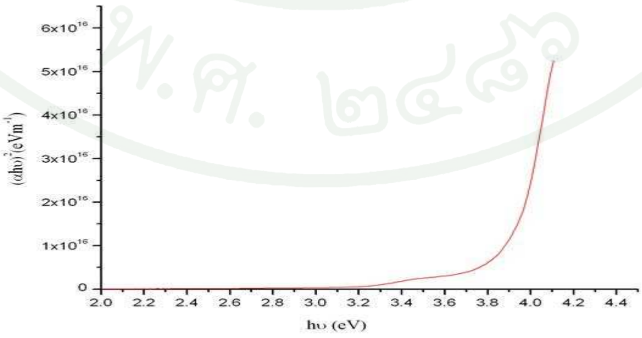
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 45 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha hv)^2$ และ พลังงาน hv ของฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์มี่ความดันออกซิเจนเป็น 66 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 46 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha hv)^2$ และ พลังงาน hv ของฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์มี่ความดันออกซิเจนเป็น 73 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 47 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha hv)^2$ และ พลังงาน hv ของฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์มี่ความดันออกซิเจนเป็น 80 เปอร์เซ็นต์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

จากรูปที่ 43-47 สรุปค่าช่องว่างพลังงานของฟิล์มบางสังกะสีและความดันของออกซิเจน ได้ความสัมพันธ์เป็นดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของความดันออกซิเจนกับค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์

ความดันออกซิเจน(%)	ช่องว่างแถบพลังงาน:E_g (eV)
53	3.3
63	3.8
66	3.8
73	3.8
80	3.8

จะเห็นว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานของสังกะสีออกไซด์มีค่าไม่เท่ากัน กล่าวคือ ที่ความดันออกซิเจนเป็น 53 เปอร์เซ็นต์ จะมีค่าช่องว่างพลังงานเป็น 3.2 eV ส่วนที่อัตราส่วนความดันออกซิเจนเป็น 63, 66, 73 และ 80 เปอร์เซ็นต์นั้นพบว่า ค่าชองว่างแถบพลังงานมีค่าเป็น 3.8 eV ซึ่งการที่ช่องว่างแถบพลังงานมีค่ากว้างขึ้นนั้น น่าจะมีผลมาจากการที่ฟิล์มมีแถบพลังงานส่วนหางเนื่องจากความเป็นอสัณฐานของผลึก ทำให้แถบช่องว่างพลังงานมีค่าเพิ่มขึ้น

5. ศึกษาพันธะเคมีของฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์โดยเทคนิครามานสเปกโตสโคปี

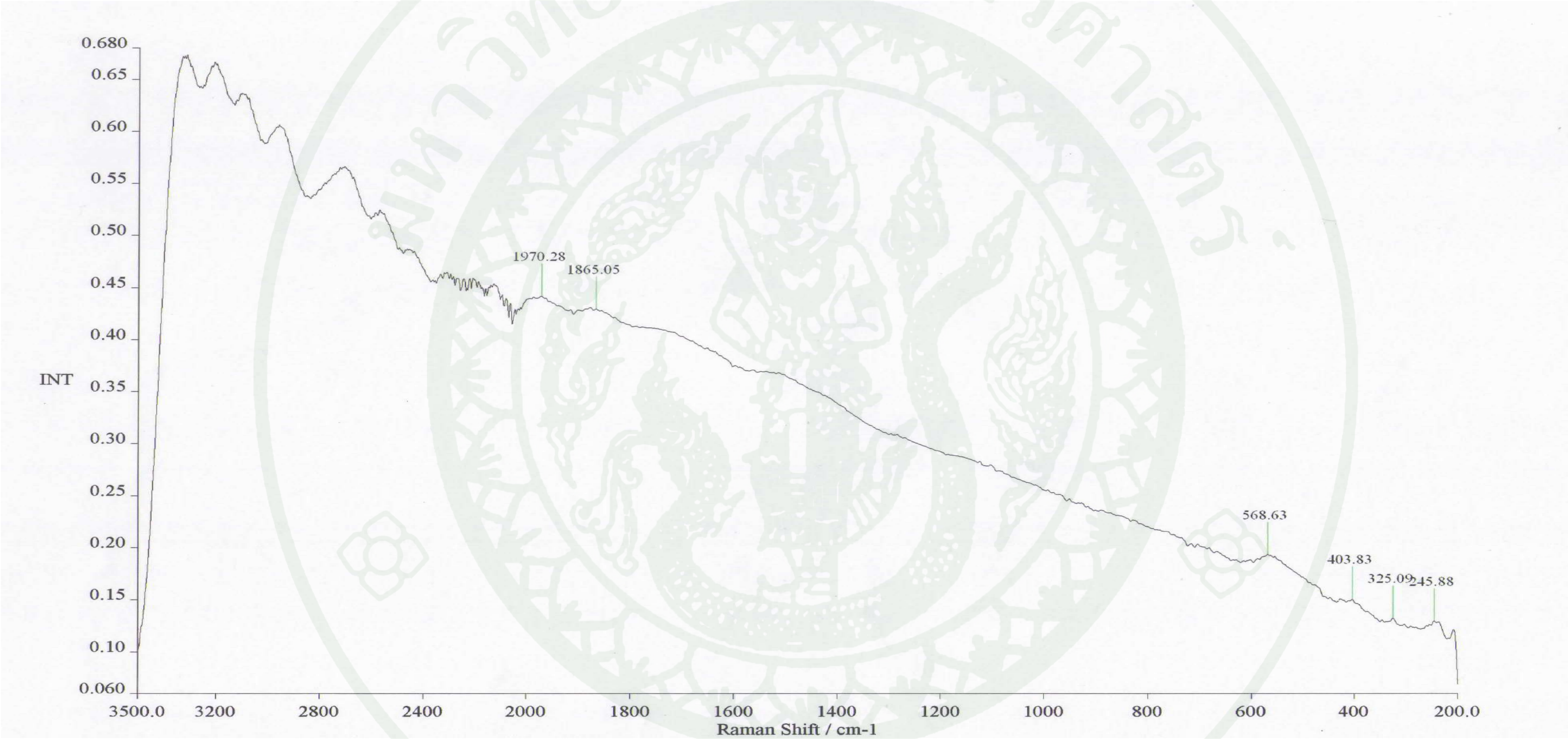
ทำการศึกษาพันธะเคมีของฟิล์มบางสังกะสี และสังกะสีออกไซด์ โดยใช้เครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์มรามานสเปกโตรมิเตอร์ ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ว่าฟิล์มบางที่ได้เป็นฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์หรือไม่ ดังรูปที่ 48-53

จากรูปที่ 48 แสดงรามานสเปกตรัมของสังกะสีออกไซด์พีคชัดเจนที่ตำแหน่ง 568 ต่อเซนติเมตร 404 ต่อเซนติเมตร 325 ต่อเซนติเมตร 1970 ต่อเซนติเมตร ซึ่งเป็นพันธะของสังกะสี รูปที่ 49-53 จะสังเกตุเห็นพีคที่ตำแหน่ง 562-569 ต่อเซนติเมตร 403-464 ต่อเซนติเมตร 318-325 ต่อ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

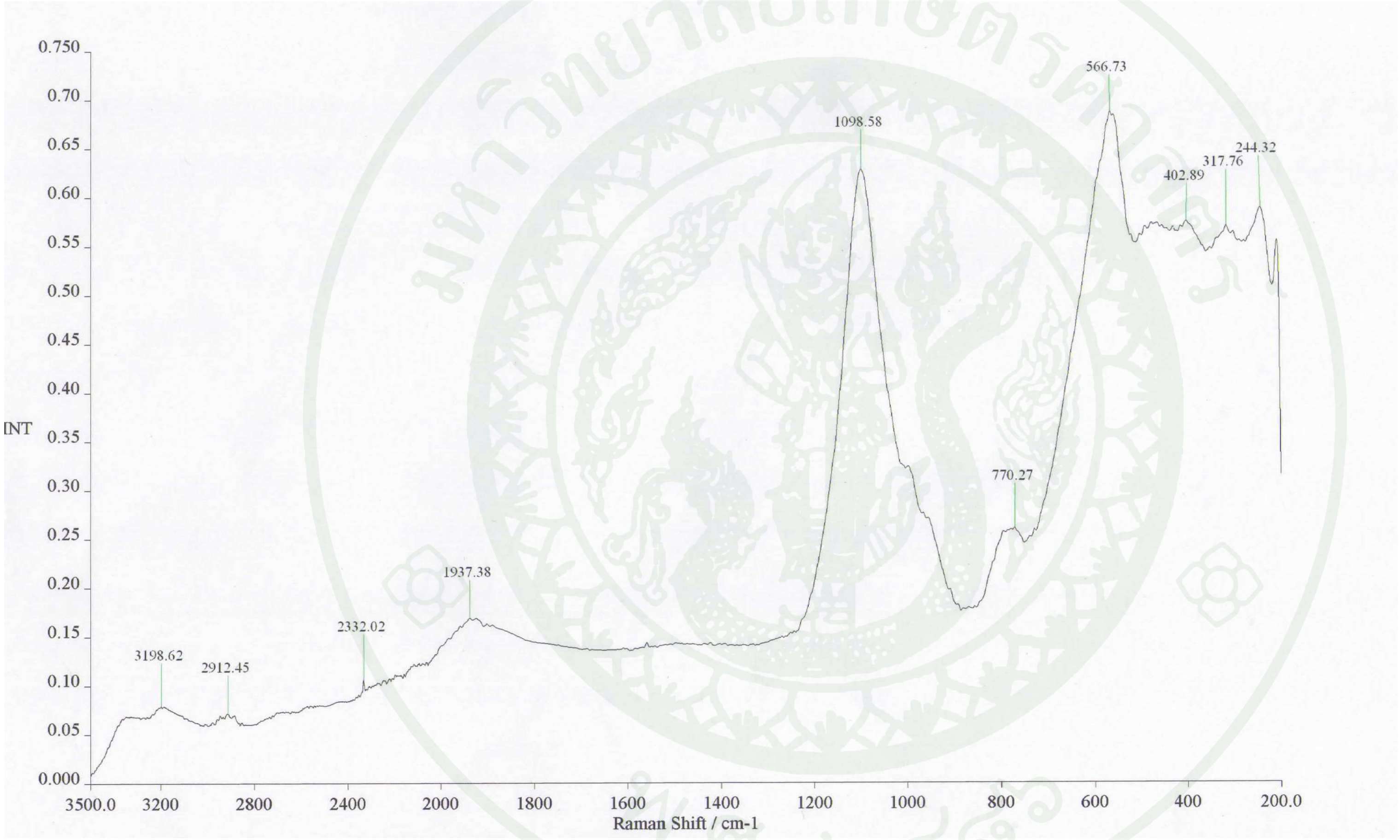
เซนติเมตร 1925-1937 ต่อเซนติเมตร ซึ่งเป็นพันธะของสังกะสีออกไซด์ แสดงว่ายังปรากฎพันธะของสังกะสีในฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์ แต่จะสังเกตุเห็นพีคที่เด่นชัดอีก 2 พีค คือ 1098 และ 770 ต่อเซนติเมตร ในฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์ที่อัตราส่วนความดันออกซิเจนเป็น 53 เปอร์เซ็นต์, 1097 และ 777 ต่อเซนติเมตร ในฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์ที่อัตราส่วนความดันออกซิเจนเป็น 63 เปอร์เซ็นต์, 1094 และ 770 ต่อเซนติเมตร ในฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์ที่อัตราส่วนความดันออกซิเจนเป็น 66 เปอร์เซ็นต์, 1095 และ 772 ต่อเซนติเมตร ในฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์ที่อัตราส่วนความดันออกซิเจนเป็น 73เปอร์เซ็นต์, 1097 และ 775 ต่อเซนติเมตร ในฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์ที่อัตราส่วนความดันออกซิเจนเป็น 80 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งทั้งหมดมีค่าตรงกับพีคของสังกะสีออกไซด์ (M. Bouchard *et al*., 2003)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



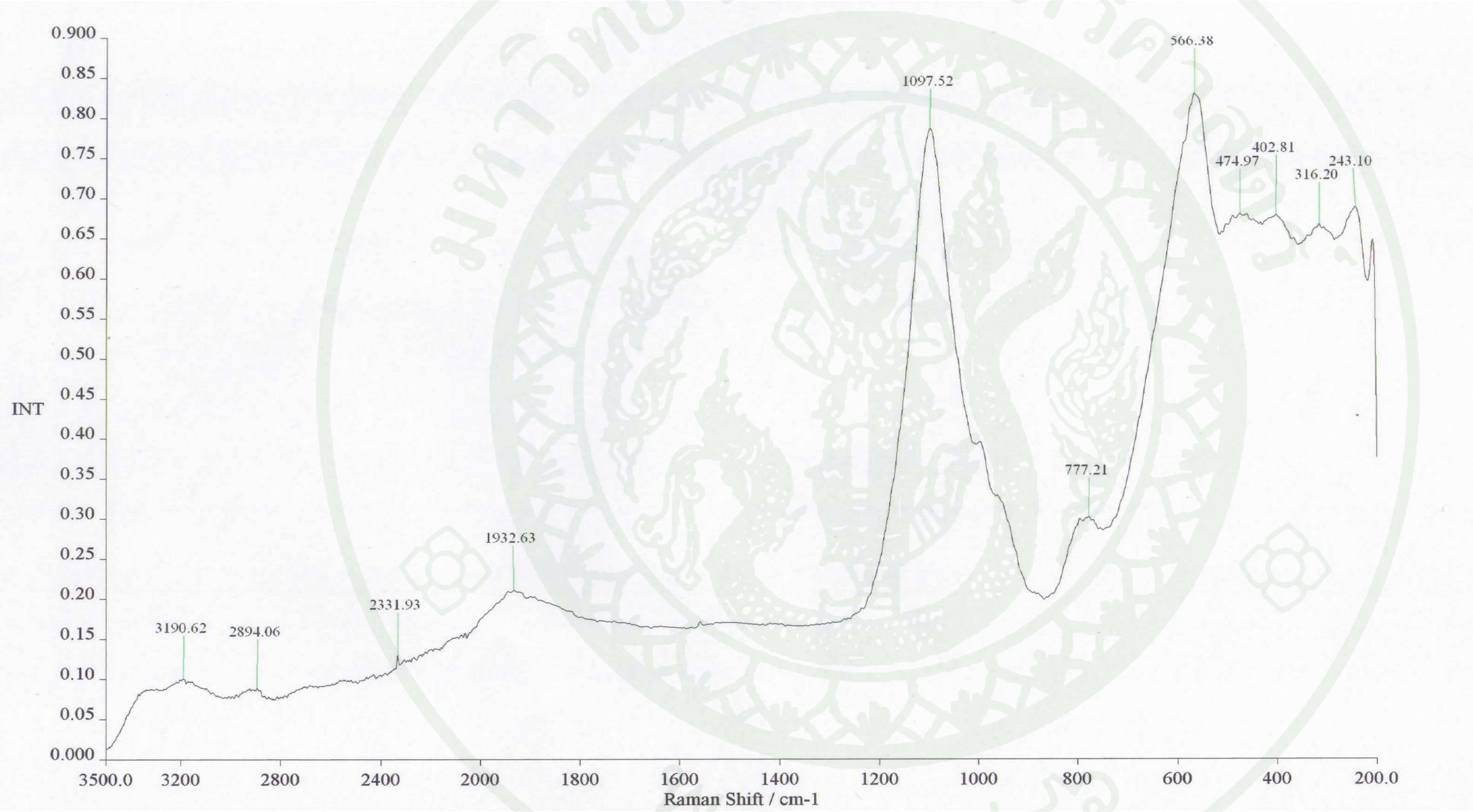
ภาพที่ 48 รามานสเปตรัมของฟิล์มบางสังกะสี

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



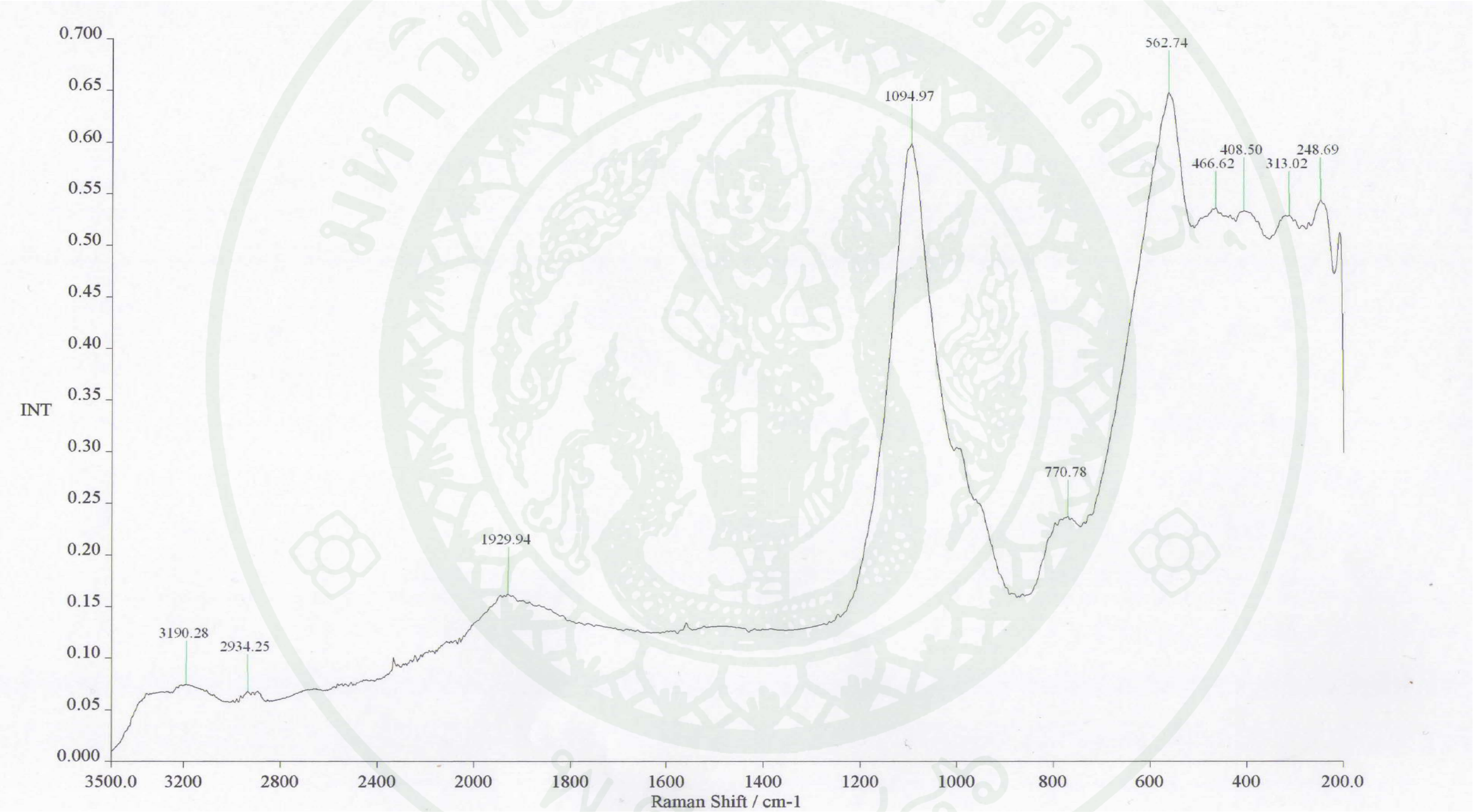
ภาพที่ 49 รามานสเปตรัมของฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์ที่ความดันออกซิเจนเป็น 53 เปอร์เซ็นต์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



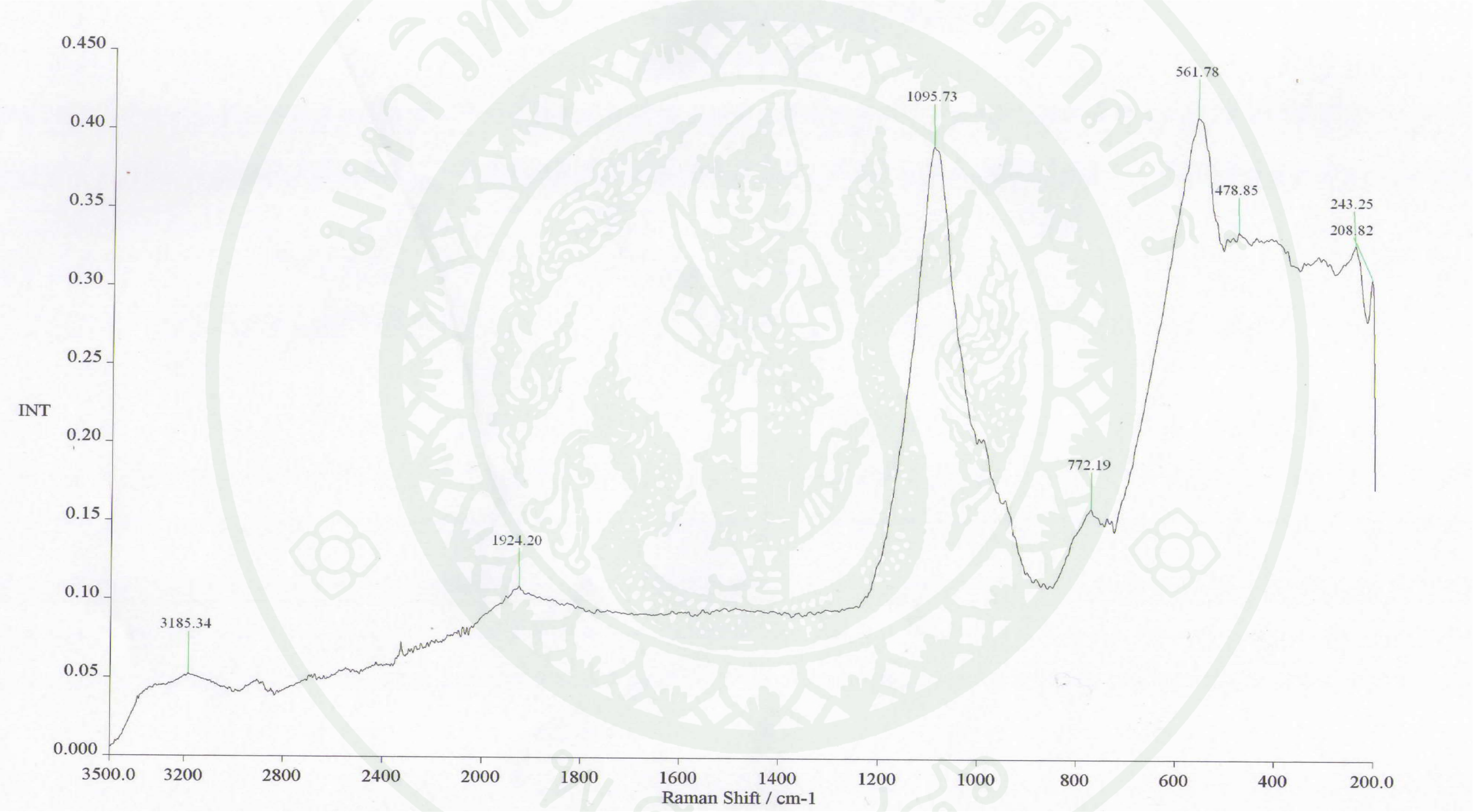
ภาพที่ 50 รามานสเปตรัมของฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์ที่ความดันออกซิเจนเป็น 63 เปอร์เซ็นต์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



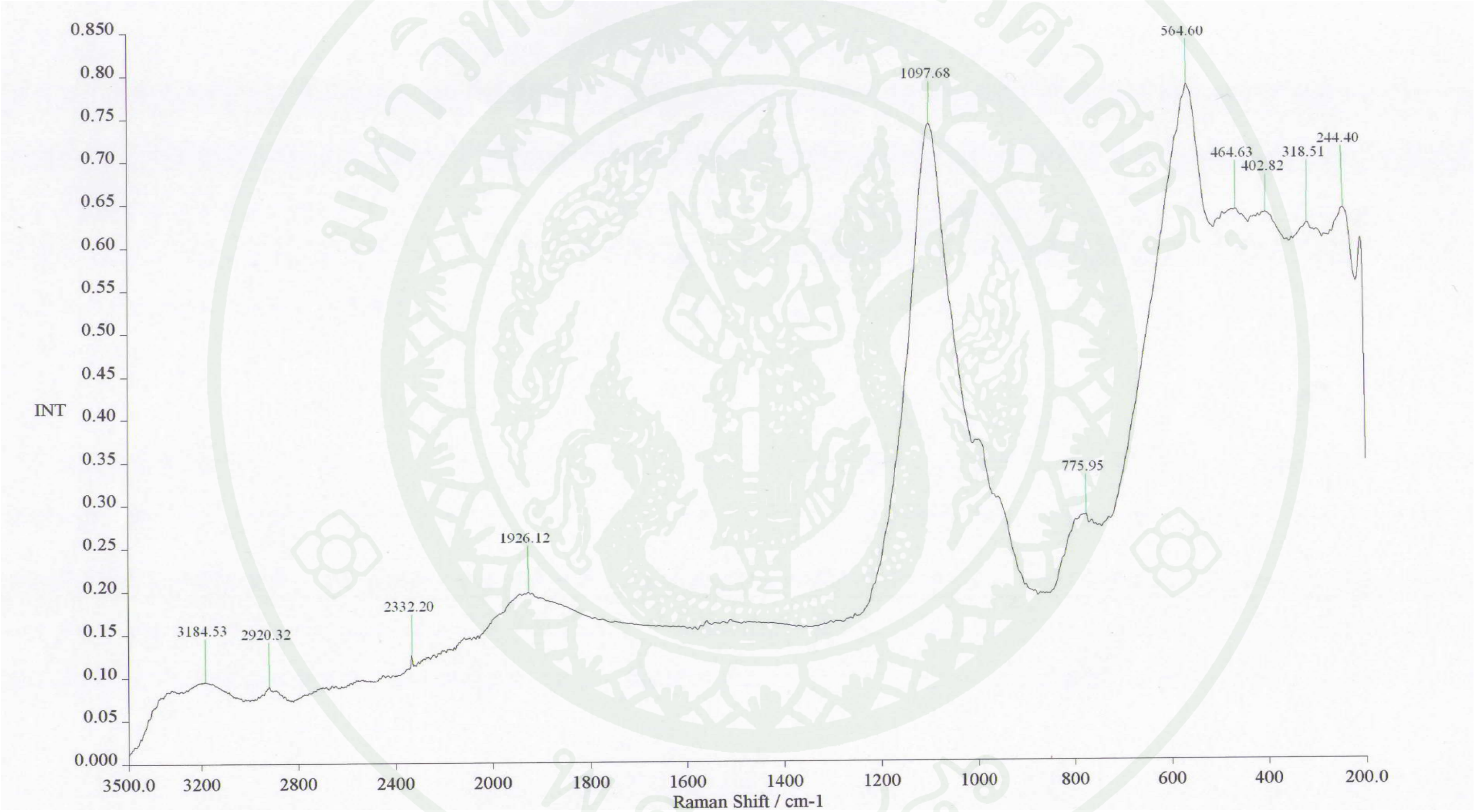
ภาพที่ 51 รามานสเปตรัมของฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์ที่ความดันออกซิเจนเป็น 66 เปอร์เซ็นต์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 52 รามานสเปตรัมของฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์ที่ความดันออกซิเจนเป็น 73 เปอร์เซ็นต์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 53 รามานสเปตรัมของฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์ที่ความดันออกซิเจนเป็น 80 เปอร์เซ็นต์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

งานวิจัยนี้ได้ทำการสร้างฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์ขึ้นบนกระจกสไลด์โดยวิธีการดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง โดยใช้เป้าเป็นสังกะสีออกไซด์และทำการศึกษาผลของปริมาณแก๊สออกซิเจนที่มีผลต่อฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์ ปรับอัตราส่วนความดันออกซิเจนเป็น 53, ,63, 66,73 และ 80 เปอร์ณซ็นต์ ตามลำดับ โดยวางกระจกสไลด์ห่างจากเป้าสังกะสีเป็นระยะ 11 เซนติเมตร ใช้ความดันก่อนสปัตเตอริงเป็น $5x10^{-5}$ มิลลิบาร์ กระแสที่ใช้ในการสปัตเตอร์เป็น 110 มิลลิแอมแปร์

การศึกษาโครงสร้างและความเป็นผลึกของฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์โดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์พบว่าฟิล์มมีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่มุมเลี้ยวเบนของแบรกเป็น 34.2 องศาตรงกับระนาบ (002) ซึ่งเมื่ออัตราส่วนความดันออกซิเจนเพิ่มขึ้นพบว่าความเป็นผลึกของฟิล์มีค่าลดลง สังเกตุจากความเข้มของพีคการเลี้ยวเบนมีค่าลดลงจนแทบจะไม่สังเกตุเห็นได้ในฟิล์มที่เตรียมโดยให้อัตราส่วนความดันออกซิเจนเป็น 80 เปอร์เซ็นต์

ศึกษาพื้นผิว ขนาดของเกรน และความหนาของฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม พบว่าความดันออกซิเจนที่เพิ่มขึ้นนั้นมีผลทำให้ความหนาของฟิล์มมีค่าลดลง ขนาดของเกรนโดยเฉลี่ยของฟิล์มบางพบว่าเกรนมีขนาดลดลงเมื่อความดันออกซิเจนมีค่าเพิ่มขึ้น ฟิล์มที่มีอัตราส่วนความดันออกซิเจนสูงจะมีเกรนที่มีขนาดเล็ก เมื่อเทียบความหนาแน่นผลึกพบว่า เมื่อความดันออกซิเจนเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นของผลึกจะมีค่าลดลง ทำให้ฟิล์มมีความเป็นผลึกต่ำ ซึ่งทำให้ผลการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในกรณีที่ฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์มีความดันออกซิเจนสูงมีความเข้มของพีคการเลี้ยวเบนที่ลดลง เป็นผลให้การคำนวณค่าขนาดของเกรนด้วยสมการของ Scherrer เนื่องจากโครงสร้างที่ไม่เป็นผลึกจะส่งผลให้เกิดการลดลงของความเข้มของพีคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ลดลง และเกิดไหล่ของพีคการเลี้ยวเบน ซึ่งส่งผลให้ค่าความกว้างครึ่งหนึ่งของพีคที่สูงที่สุดมีค่ามากขึ้นขนาดของเกรนที่คำนวณได้จึงมีค่าน้อยกว่าที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม

เมื่อพิจารณาโครงสร้างพื้นผิวของฟิล์มจะพบว่าเมื่ออัตราส่วนความดันออกซิเจนมีค่าเพิ่มขึ้น ขนาดของเกรนจะมีขนาดเล็ดลงทำให้ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางมีความเรียบและสม่ำเมอ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การศึกษาการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์แสดงให้เห็นว่าฟิล์มสามารถส่งผ่านแสงในช่วงที่ตามองเห็นได้ดี จึงทำให้ฟิล์มมีลักษณะโปร่งใส และพบว่าฟิล์มสามารถส่งผ่านแสงในย่านของรังสีเหนือม่วงได้ดีพอควร ซึ่งมีผลทำให้ค่าช่องว่างพลังงานของสังกะสีออกไซด์มีค่ากว้างขึ้นจาก 3.3 eV เป็น 3.8 eV ซึ่งการที่ช่องว่างพลังงานมีขนาดกว้างจะทำให้ฟิล์มสามารถส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่นสั้นๆได้

การศึกษาฟูเรียร์รามานสเปกโตรมิเตอร์พบว่ามีพันธเคมีระหว่างสังกะสีและออกซิเจนเกิดขึ้น 2 พีค คือที่ 1094-1097 ต่อเซนติเมตร และ 770-777 ต่อเซนติเมตร ซึ่งยืนยันว่าฟิล์มที่ได้มีพันธะของสังกะสีและออกซิเจน ผลของความดันออกซิเจนไม่มีผลต่อพันธะของสังกะสีออกไซด์

ข้อเสนอแนะ

ผลจากการวิเคราะห์ฟิล์มบางสังกะสีออกไซด์ในงานวิจัยพบว่า ความเป็นผลึกของฟิล์มบางช่วงที่มีความเข้มข้นของออกซิเจนสูงนั้นมีความเป็นผลึกน้อย จึงทำให้มีสมบัติบางประการที่แตกต่างไปจากเดิม ผลจากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมพบว่า ที่อัตราส่วนความดันออกซิเจนที่มีค่าน้อย ฟิล์มบางที่ได้จะมีความหนาและมีขนาดของเกรนที่ใหญ่ขึ้น ถ้าต้องการให้สมบัติเชิงแสงของฟิล์มมีค่าเพิ่มขึ้นกว่าเดิม ควรจะเพิ่มอัตราส่วนความดันออกซิเจนให้มากขึ้น

เนื่องจากงานวิจัยนี้ เป้าที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มบางเป็นเป้าสังกะสี ถ้าเปลี่ยนเป้าเป็นสังกะสีออกไซด์ อาจจะทำให้คุณสมบัติของฟิล์มที่ได้มีค่าดีขึ้น โครงสร้างของผลึกเป็นไปตามสัดส่วนที่ถูกต้อง และอาจจะทำการปรับปรุงสมบัติเชิงไฟฟ้าของฟิล์มโดยการโดปฟิล์ม จะทำให้ได้ฟิล์มที่มีคุณสมบัติตรงตามที่ต้องการนำไปใช้งานต่อไป

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

คมกฤษณ์ ปุ่นอุดม.2540. **การเตรียมฟิล์มซิงค์ออกไซด์แบบโปร่งใสและนำไฟฟ้า**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท,จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อนุชา วัฒนาภา.2544. **การศึกษาสมบัติทางแสงและไฟฟ้าของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ (ด้วยวิธีการสปัตเตอริง).** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท,มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

มนูญ ปางพรหม 2547. **การสร้างและศึกษาลักษณะสมบัติของเป้าสปัตเตอริงที่ทำจากสังกะสีออกไซด์**. วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโท,มหาวิทยาลัยศิลปากร นครปฐม.

ฉรวุฒิ ต.เทียนประเสริฐ. 2548. **การศึกษาสมบัติการเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับ**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท,มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

นิคม อุ่นใจ 2549. **การเตรียมฟิล์มแคดเมียมซัลไฟด์บนแผ่นรองรับแคดเมียมเทลูไรด์โดยวิธีอาบเคลือบสารเคมี**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท,มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

อุดมเดช ภัคดี. 2550. **การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนบนฟิล์มบางเหล็กโดยวิธีการตกสะสมไอเชิงความร้อนที่ความดันต่ำ.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท,มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สุรสิงห์ ไชยคุณ นิรันดร์ วิทิตอนันต์ สกุล ศรีญาณลักษณ์ จักพันธ์ ถาวรธิรา. **2541 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับเคลือบสารต่างๆด้วยวิธีการสปัตเตอริง**. รายงานการวิจัย, มหาวิทยาลัยบูรพา

นิพนธ์ ตังคนานุรักษ์ และ คณิตา ตังคนานุรักษ์. 2547. **สเปกโตสโกปีด้านการวิเคราะห์.** มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ

Ellmer**. **K.**,** Kudella.F., Mientus. R., Schieck. R., Fiechter S.. 1994 Influence of discharge parameters on the layer properties of reactive magnetron sputtered ZnO:Al films.**Thin Solid Films** 247:15-23.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Subramanyam T.K., Naidu. B. Srinivasulu, Uthanna. S. 1999. Structure and optical properties of dc reactive magnetron sputterd Zinc oxide films. **Crys.Res.Technol.** 34:981-988

Ming-Ta Chen., Jyh-Ming Ting., Sputter deposition of ZnO nanorods/thin-film structures on Si.**Thin Solid Films.**494:250-254

Samarasekara. P., Nisantha. A.G.K.,and Disanayake. A.S. High photo-voltage zinc oxide thin film deposited by dc sputtering. **Chinese Journal Of Physics** 40.

Hong R., Qi H., Huang J., He H., Fan Z., Shao. J. 2005. Influence of oxygen partial pressure on structure and photoluminescence of direct current reactive magnetron sputtering ZnO thin films. **Thin Solid Films.**473:58-62.

Hong R.,Qi. H., Shao. J., He, Fan Z., Shao J. 2006. Influence of buffer layer thickness on the structure and optical properties of ZnO thin films. **Applied Surface Science**.252:2888-2893

Suchea. M., Christoulakis. S Katsarakis. ., N.,Kitsopoulos.T., Kiriakidis.G. 2007. Comparative study of zinc oxide and aluminum doped zinc oxide transparent thin films grown by direct current magnetron sputtering. **Thin Solid Films**.515:6562-6566

Bouchard.M., Smith. D.C. 2003 Catalogue of 45 reference Raman Spectra of Minerals concerning research in art history or archaeology, especially on corroded metal and coloured glass. **Spectrochimica Acta Part A** 59:2247-2266

Vossen J.L., 1978. **Thin Film Processes**. Academic Press. New York.

Chapman B.1980. **Glow Discharge Process Sputtering and Plasma Etching**. John Wiley. New York

Kittel,C 1971. **Introduction to Solid State Physics**.4th ed. John Wiley&Sons,Inc., New York

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Vossen J.L., Kern W. 1978**. Thin Film Processes**.Academic Press. California.

Matacotta. F.C., Ottaviani. G., 1995.**Science and Technology of Thin Films**. World Scientific Publishing Company., New Jersey

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก ก

การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

รังสีเอกซ์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ประกอบด้วยสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในทิศตั้งฉากกัน และตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์อยู่ในช่วงประมาณ 0.1-10 อังสตรอม ซึ่งเทียบได้กับขนาดของอะตอมและโมเลกุล รังสีเอกซ์จึงสามารถตรวจสอบวัตถุในระดับอะตอมและโมเลกุลได้ รังสีเอกซ์ประกอบด้วยอนุภาคพื้นฐานที่เรียกว่าโฟตอน พลังงานของโฟตอน E ในหน่วยอิเล็กตรอนโวลต์ มีค่าสอดคล้องกับความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ในหน่วยนาโนเมตร ตามความสัมพันธ์

$$E = \frac{1240}{\lambda} \qquad \text{(ผ1)}$$

1. การเกิดรังสีเอกซ์

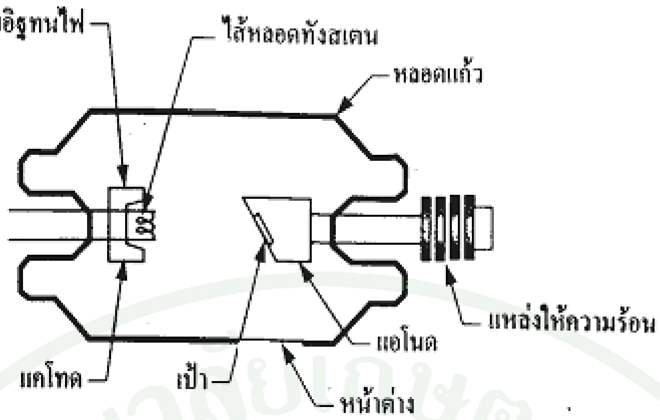
เมื่ออิเล็กตรอนอิสระที่มีพลังงานจลน์สูง ถูกทำให้ลดความเร็วหรือทำให้หยุดนิ่งแบบกะทันหันโดยการชนกับเป้าโลหะ พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนอิสระจะถูกถ่ายเทให้กับเป้าและถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนร้อยละ 99 ซึ่งถูกดูดกลืนที่ผิวของเป้าโลหะ ส่วนอีกประมาณร้อยละ1 จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโลหะที่เป็นเป้า ผลของการเปลี่ยนแปลงทำให้เกิดรังสีเอกซ์ ที่ถูกนำมาใช้งานต่อไป ในทางปฏิบัตินั้นจะใช้หลอดรังสีเอกซ์ (X-ray tubes) เป็นเครื่องมือในการเกิดรังสีเอกซ์ ภายในหลอดรังสีเอกซ์จะประกอบด้วยส่วนสำคัญดังนี้

1.1 แหล่งผลิตอิเล็กตรอนอิสระ จะใช้ไส้หลอด (filament) ที่ทำจากโลหะทังสเตน ซึ่งถูกเผาให้ร้อนด้วยกระแสไฟฟ้า ไส้หลอดนี้ทำหน้าที่เป็นแคโทดของหลอดรังสีเอกซ์

1.2 แหล่งจ่ายความต่างศักย์สูง หรือศักย์ไฟฟ้าเร่ง (acceleration voltage) เพื่อเร่งอิเล็กตรอนอิสระให้เคลื่อนที่ไปในทิศทางที่ต้องการ

1.3 เป้าโลหะ ซึ่งเป็นบริเวณที่ทำหน้าที่ผลิตรังสีเอกซ์ และเป็นแอโนดของหลอดรังสีเอกซ์ ธาตุที่จะนำมาทำเป้าโลหะควรเป็นธาตุที่มีเลขอะตอมสูง จุดหลอมเหลวสูง นำความร้อนได้ดี และกลายเป็นไอได้ยาก ซึ่งนิยมใช้ ทองแดง (Cu) และโครเมียม (Cr) เป็นเป้าโลหะ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพผนวกที่ ก1 ส่วนประกอบของหลอดรังสีเอกซ์

ที่มา: อุดมเดช (2550)

หลอดรังสีเอกซ์ต้องเป็นหลอดสุญญากาศ เพื่อป้องกันไม่ให้เป้าเกิดเป็นสารประกอบออกไซด์ และอิเล็กตรอนอิสระที่ขั้วแคโทดจะเคลื่อนที่ไปยังเป้าโลหะโดยไม่มีการสูญเสียพลังงาน

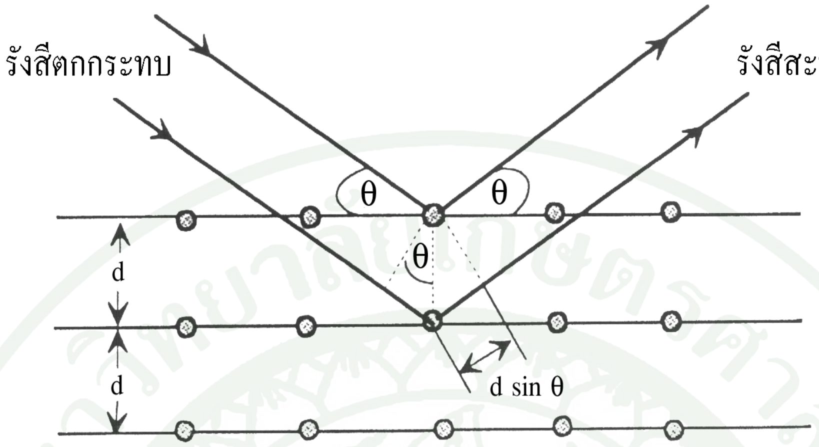
2. อันตรกิริยารังสีเอกซ์กับอะตอม

วัตถุทุกชนิดสามารถดูดกลืนรังสีเอกซ์ได้ บางชนิดทำให้เกิดการเลี้ยวเบน การหักเห และการสะท้อนของรังสีเอกซ์ได้ การตอบสนองของวัตถุที่มีต่อรังสีเอกซ์มีที่มาจากอันตรกิริยาพื้นฐานระหว่างโฟตอนกับอะตอมในวัตถุ โดยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์เกิดจากอันตรกิริยาการกระเจิงรังสีของอะตอม การกระเจิงของรังสีเอกซ์ในอะตอมแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ

2.1 การกระเจิงแบบยืดหยุ่น (Elastic Scattering) ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ก่อนและหลังการกระเจิงจะมีค่าเท่ากัน การกระเจิงแบบยืดหยุ่นจึงไม่ทำให้อะตอมเปลี่ยนสถานะพลังงาน สนามไฟฟ้าของรังสีเอกซ์จะทำให้เกิดการสั่นของอิเล็กตรอนในอะตอมเท่านั้น อิเล็กตรอนซึ่งเป็นอนุภาคที่มีประจุลบ เมื่อถูกแรงกระทำหรือเกิดความเร่งจะปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นเท่ากับรังสีเอกซ์ที่ไปตกกระทบออกมาเราเรียกคลื่นนี้ว่า คลื่นกระเจิงรังสีเอกซ์ (X-ray scattered wave) การกระเจิงแบบยืดหยุ่นจึงสามารถทำให้คลื่นเลี้ยวเบนและแทรกสอดได้ใน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผลึก การแทรกสอดแบบเสริมของรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบและสะท้อนจากสองระนาบ เป็นไปตามกฎของแบรกก์ (Bragg's law) ดังสมการที่ (ผ2)



ภาพผนวกที่ ก2 การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ตามเงื่อนไขของแบรกก์

ที่มา: ฉรวุฒิ (2548)

$$2d_{hkl}\sin\theta = n\lambda \qquad \text{(ผ2)}$$

โดย d_{hkl} เป็น ระยะระหว่างระนาบ (interplanar spacing)

θ เป็น มุมเลี้ยวเบน หรือมุมที่รังสีเอกซ์กระทำกับระนาบของผลึก

n เป็น เลขจำนวนเต็ม $n = 0, 1, 2, 3,\ldots$

และ λ เป็น ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์

2.2 การกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic Scattering) การกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่นโฟตอนจะสูญเสียพลังงานให้กับอิเล็กตรอน ทำให้ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ก่อนและหลังการกระเจิงมีค่าไม่เท่ากัน ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์จะมีค่ามากขึ้นหลังจากการกระเจิง และเพิ่มขึ้นตามขนาดของมุมกระเจิง การกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่นทำให้คลื่นไม่สามารถแทรกสอดกันได้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก ข

รามานสเปกโทรสโกปี

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

รามานสเปกโทรสโกปี

เทคนิครามานสเปกโทรสโกปี เป็นการวัดการกระเจิงของคลื่นแสงหลังจากชนกับโมเลกุลที่กำลังสั่นและหมุนอยู่ เนื่องจากโมเลกุลที่มีการสั่นแบบสมมาตรจะไม่สามารถถูกกระตุ้นด้วยคลื่นอินฟราเรด (infrared wave) อย่างไรก็ตามพันธะของโมเลกุลดังกล่าวยังคงมีการสั่น และพบว่าเทคนิครามานสามารถจะให้สเปกตรัมของโมเลกุลดังกล่าวได้ โดยการผ่านคลื่นแสงไปยังโมเลกุลที่มีการสั่นแบบสมมาตร ถ้าการชนของคลื่นแสงกับโมเลกุลเป็นแบบยืดหยุ่นจะได้คลื่นแสงที่กระเจิงหลังจากการชนมีพลังงานเท่ากับคลื่นแสงที่ตกกระทบโมเลกุล การกระเจิงลักษณะนี้เรียกว่า การกระเจิงแบบเรย์ลี (Rayleigh scattering) ถ้าการชนเป็นแบบไม่ยืดหยุ่น คลื่นแสงที่กระเจิงหลังจากการชนอาจมีพลังงานสูงกว่าหรือต่ำกว่าคลื่นแสงที่ตกกระทบโมเลกุล การกระเจิงลักษณะนี้เรียกว่า การกระเจิงแบบรามาน (Raman scattering) ความเข้มแสงของการกระเจิงแบบรามาน มีค่าประมาณ 10^{-10}-10^{-12} เท่าของคลื่นแสงที่ตกกระทบโมเลกุล ซึ่งทำให้ตรวจวัดยาก จึงต้องใช้คลื่นแสงที่มีความเข้มสูงคือ คลื่นแสงเลเซอร์ และสเปกตรัมที่ได้จากการกระเจิงแบบรามาน มี 2 แบบ คือ

เส้นสโตก (Stoke Line เป็นเส้นสเปกตรัมที่มีความถี่ต่ำกว่าความถี่ของคลื่นแสงเลเซอร์ เส้นนี้เกิดจากการชนกันระหว่างโฟตอนของคลื่นแสงเลเซอร์กับโมเลกุลที่อยู่สภาวะพื้นของระดับพลังงานการสั่น เป็นผลทำให้โฟตอนมีพลังงานลดลง ส่วนโมเลกุลที่ได้รับพลังงานจากโฟตอนจะอยู่ในสภาวะถูกกระตุ้น (exicited state) แล้วกลับลงสู่สภาวะพื้น ดังสมการที่ (ผ3)

$$E_{ST} = h\nu_{\circ} - h\nu \qquad \text{(ผ3)}$$

เมื่อ E_{ST} คือ พลังงานของเส้นสโตก

$h\nu_{\circ}$ คือ พลังงานในสถานะพื้น

$h\nu$ คือ พลังงานในสถานะถูกกระตุ้น

เส้นแอนติสโตก (Anti-Stoke Line) เป็นเส้นสเปกตรัมที่มีความถี่มากกว่าความถี่ของคลื่นแสงเลเซอร์ที่ตกกระทบ เส้นนี้เกิดจากการชนกันของโฟตอนของคลื่นแสงเลเซอร์กับโมเลกุลที่อยู่ในสภาวะถูกกระตุ้น ทำให้โฟตอนได้รับพลังงานจากโมเลกุล พลังงานเพิ่มขึ้น ดังสมการที่ (ผ4)

$$E_{AST} = h\nu_{\circ} + h\nu \qquad \text{(ผ4)}$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เมื่อ E_{AST} คือ พลังงานของเส้นแอนติสโตก

1. กลไกการเกิดรามานสเปกตรัม

เมื่อโมเลกุลถูกกระตุ้นด้วยคลื่นแสงจะเกิดการบิดเบี้ยว (distortion) ซึ่งเป็นผลจากการที่โมเลกุลถูกโพลาไรซ์ (polarize) และเกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดสภาพขั้วขึ้นมาชั่วคราว สภาพขั้วจะหายไปเมื่อโมเลกุลดังกล่าวคายคลื่นแสงออกมาโดยการกระเจิง ซึ่งขึ้นอยู่กับว่าในโมเลกุลนั้นมีพันธะเคมีที่ทำให้เกิดการบิดเบี้ยวไปจากตำแหน่งสมดุลมากน้อยเพียงใด โดยการบิดเบี้ยวอาจเกิดจากการสั่น หรือการยืดหดของโมเลกุล การเกิดสภาพขั้วโมเลกุลจะเหนี่ยวนำให้เกิดโมเมนต์ขั้วคู่ ซึ่งจะแปรผันตรงกับความเข้มสนามไฟฟ้าที่เป็นองค์ประกอบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังสมการที่ (ผ5)

$$\mu = \alpha E \qquad \text{(ผ5)}$$

โดย μ คือ โมเมนต์ขั้วคู่ (dipole moment)

α คือ ค่าสภาพมีขั้วได้ (polarizability)

E คือ ความเข้มสนามไฟฟ้า

ถ้าคลื่นแสงที่ใช้มีความถี่ ν_{ex} ที่ให้กับโมเลกุลที่ถูกโพลาไรซ์ ความเข้มสนามไฟฟ้าจะมีค่าดังสมการที่ (ผ6)

$$E = E_0 \cos(2\pi\nu_{ex} t) \qquad \text{(ผ6)}$$

เมื่อ E_0 คือ แอมพลิจูดของความเข้มสนามไฟฟ้าที่แปรเปลี่ยนตามเวลา

แทนค่าสมการ (ผ6) ลงในสมการ (ผ5) จะได้

$$\mu = \alpha E_0 \cos(2\pi\nu_{ex} t) \qquad \text{(ผ7)}$$

เพื่อจะให้เกิดการกระเจิง α จะเป็นฟังก์ชันของระยะทางระหว่างนิวเคลียส

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

$$\alpha = \alpha_0 + \left(r - r_{eq}\right)\left(\frac{\partial \alpha}{\partial r}\right) \qquad (ผ8)$$

โดย α_0 คือ สภาพมีขั้วได้ของพันธะเคมี ที่สภาวะสมดุลที่มีระยะทางระหว่างนิวเคลียสเป็น r_{eq}

r คือ ระยะทางระหว่างนิวเคลียสที่ไม่อยู่ในสภาวะสมดุล

การเปลี่ยนแปลงระยะทางระหว่างนิวเคลียส $\left(r - r_{eq}\right)$ จะขึ้นอยู่กับความถี่ของการสั่น ν_v

$$r - r_{eq} = r_m \cos\left(2\pi \nu_v t\right) \qquad (ผ9)$$

โดย r_m คือ ระยะห่างระหว่างนิวเคลียสมากที่สุด

นำสมการ (ผ9) แทนลงในสมการ (ผ8) จะได้

$$\alpha = \alpha_0 + \left(\frac{\partial \alpha}{\partial r}\right) r_m \cos\left(2\pi \nu_v t\right) \qquad (ผ10)$$

นำสมการ (ผ10) แทนลงในสมการ (ผ7) จะได้

$$\mu = \alpha_0 E_0 \cos\left(2\pi \nu_{ex} t\right) + E_0 r_m \left(\frac{\partial \alpha}{\partial r}\right) \cos\left(2\pi \nu_v t\right) \cos\left(2\pi \nu_{ex} t\right) \qquad (ผ11)$$

จากความสัมพันธ์ของตรีโกณ $\cos x \cos y = \left[\cos(x+y) + \cos(x-y)\right]/2$ นำไปใช้ในสมการที่ (ผ18) จะได้

$$\mu = \alpha_0 E_0 \cos\left(2\pi \nu_{ex} t\right) + \frac{E_0}{2} r_m \left(\frac{\partial \alpha}{\partial r}\right) \cos\left[2\pi\left(\nu_{ex} - \nu_v\right)t\right] + \frac{E_0}{2} r_m \left(\frac{\partial \alpha}{\partial r}\right) \cos\left[2\pi\left(\nu_{ex} + \nu_v\right)\right]$$

(ผ12)

พจน์แรกในสมการที่ (ผ19) แทนการกระเจิงแบบเรย์ลีที่ความถี่กระตุ้นของคลื่นแสง ν_{ex} พจน์ที่สองและสาม แทนเส้นสโตก $\left(\nu_{ex} - \nu_v\right)$ และเส้นแอนติสโตก $\left(\nu_{ex} + \nu_v\right)$ ตามลำดับ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

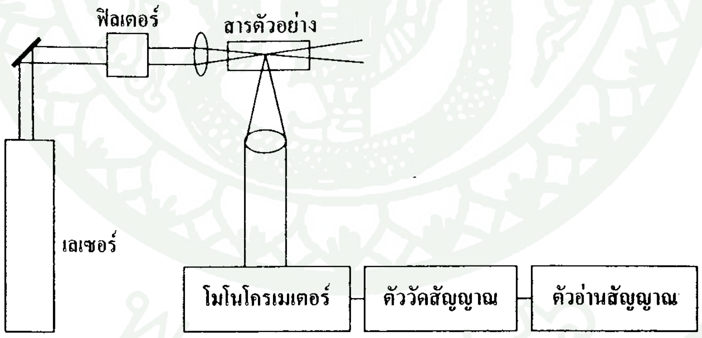
ดังนั้นถ้าต้องการให้เกิดการกระเจิงแบบรามาน ค่าสภาพมีขั้วได้ของพันธะเคมีจะเป็นฟังก์ชันกับระยะห่างระหว่างนิวเคลียส นั่นคือ

$$\frac{\partial \alpha}{\partial r} > 0 \qquad (ผ13)$$

สรุปได้ว่า โมเลกุลใดๆที่ทำให้คลื่นแสงที่ไปกระตุ้นเกิดการกระเจิงแล้วให้การเลื่อนแบบรามาน (Raman shift) โมเลกุลนั้นจะต้องมีการสั่นที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าสภาพมีขั้วได้ของพันธะเคมีนั้น และแต่ละพันธะโมเลกุลที่สั่นจะมีค่าระยะห่างระหว่างนิวเคลียสมากที่สุดเป็นแบบเฉพาะ จึงสามารถตรวจสอบพันธะเคมีได้จากการไปเทียบกับค่ามาตรฐาน

2. เครื่องรามานสเปกโทรมิเตอร์

ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องรามานสเปกโทรมิเตอร์ ได้แก่ แหล่งผลิตคลื่นแสงที่มีความเข้มสูง ระบบทัศนศาสตร์ (optic system) ระบบใส่สารตัวอย่าง ระบบแยกแสงและตัวตรวจวัดสัญญาณ ดังภาพผนวกที่ ค1



ภาพผนวกที่ ข1 ส่วนประกอบของเครื่องรามานสเปกโทรมิเตอร์

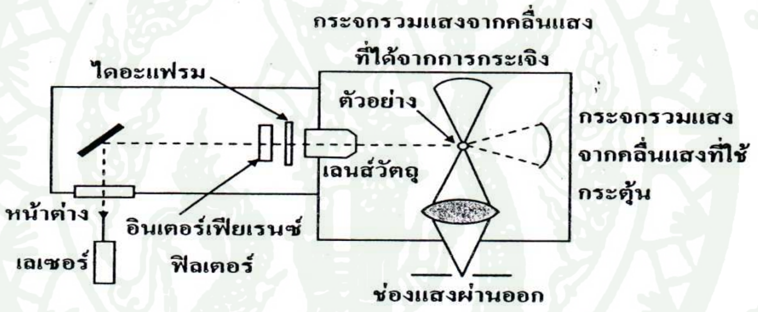
ที่มา: อุดมเดช (2550)

2.1 แหล่งผลิตคลื่นแสงที่มีความเข้มสูง เนื่องจากการเกิดการกระเจิงแบบรามานนั้นอ่อนมาก (ความเข้มของการกระเจิงต่ำ) เพื่อที่จะให้ได้จำนวนโฟตอนที่เกิดจากการกระเจิงแบบรา

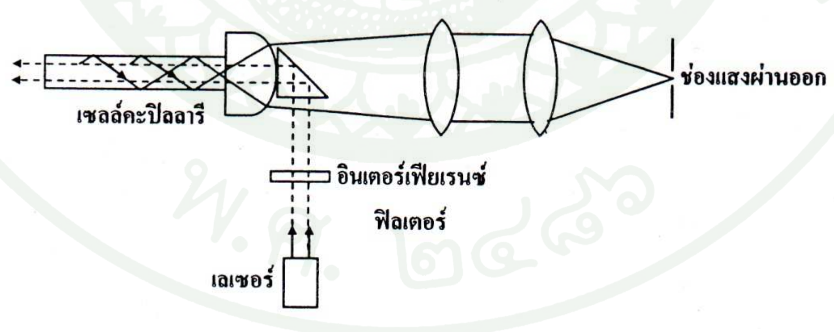
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

มานมากเพียงพอที่จะตรวจวัดได้ จึงต้องใช้แหล่งผลิตคลื่นแสงที่มีความเข้มสูง เช่น เลเซอร์ ซึ่งจัดเป็นแหล่งผลิตคลื่นแสงที่มีความเข้มสูง มีความกว้างของช่วงแสงที่ใช้แคบมากๆ เช่น Nd /YAG (Neodymium ion ที่เข้าไปแทนที่ในผลึก yttrium aluminium garnet, $Y_3Al_5O_{12}$) เลเซอร์ที่ได้มีความยาวคลื่น 1064 นาโนเมตร

2.2 เลนส์และตัวกรองแสง เมื่อลำแสงเลเซอร์ผ่านออกจากแหล่งผลิตไปตกกระทบกระจกแบนราบ ได้ลำแสงคู่ขนานผ่านไปยังตัวกรองแสงที่มีประสิทธิภาพสูงในการกรองแสงช่วงคลื่นที่ไม่ต้องการออกไปได้ถึงร้อยละ 99.9 ลำแสงที่ผ่านการกรองแล้วจะถูกเลนส์นูนปรับให้เป็นจุดเล็กๆ ไปกระทบที่สารตัวอย่าง แสงที่กระเจิงแบบรามานจากตัวอย่างถูกรวบรวมเข้าสู่เลนส์นูนให้มาอยู่ที่ช่องแสงผ่านออกของโมโนโครเมเตอร์ (monochromater) ซึ่งอาจจะเป็นมุม 90 องศา หรือ 180 องศา ตามภาพผนวกที่ ข2



(ก)



(ข)

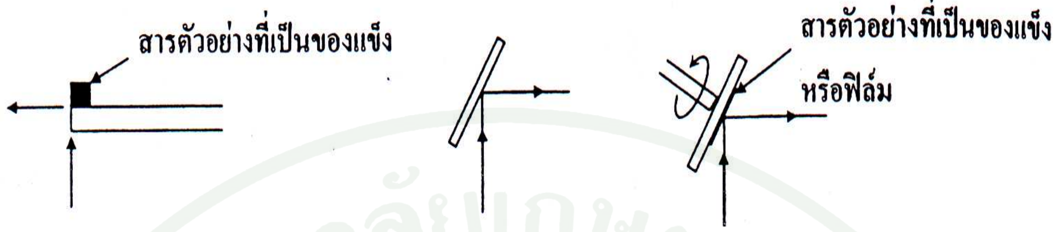
ภาพผนวกที่ ข2 การวัดการกระเจิงแบบรามานในแนว (ก) 90 องศา และ (ข) 180 องศา

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิตา (2547)

2.3 ระบบใส่สารตัวอย่าง เนื่องจากเทคนิครามานสเปกโทรสโกปี ส่วนใหญ่จะใช้แสงเลเซอร์ จึงสามารถใช้แก้วเป็นภาชนะบรรจุสารตัวอย่าง เพราะว่าแก้วให้สัญญาณการกระเจิง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

แบบรามานที่อ่อนมาก นอกจากนี้ยังทนความร้อนและความดันได้ดีพอสมควร จึงใช้แก้วเป็นภาชนะบรรจุสารกรณีที่ต้องการเพิ่มอุณหภูมิหรือความดัน



ภาพผนวกที่ ข3 เทคนิคการวัดรามานสเปกตรัมของสารตัวอย่างที่เป็นของแข็ง

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิตา (2547)

2.4 โมโนโครเมเตอร์ ทำหน้าที่รวบรวมแสงที่กระเจิงแบบรามาน มาที่ช่องแสงผ่านออก แล้วกระจายออกเป็นแต่ละความถี่ของคลื่น จากนั้นผ่านออกที่ช่องแสงเข้าสู่ตัววัดสัญญาณ

2.5 ตัววัดสัญญาณ ตัววัดสัญญาณที่ใช้ในเครื่องรามานสเปกโทรมิเตอร์มีด้วยกัน 2 แบบ คือ

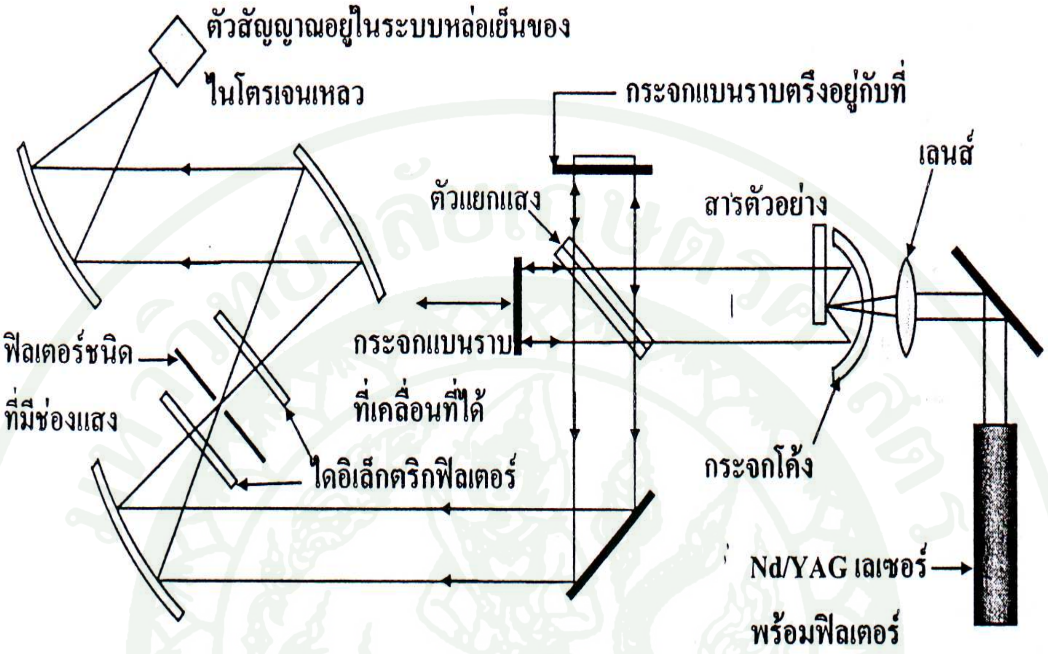
2.5.1 แบบช่องสัญญาณเดียว (single channel)
2.5.2 แบบหลายช่องสัญญาณ (multi channel)

ความไวของเครื่องรามานสเปกโทรมิเตอร์จะดี เมื่อใช้ตัววัดสัญญาณแบบหลายช่องสัญญาณ ซึ่งสามารถจะตรวจวัดสัญญาณอ่อนๆ ของแสงที่กระเจิงแบบรามานได้ แต่ถ้ามีแสงภายนอกรบกวน (background fluorescence) แสงดังกล่าวจะถูกตรวจวัดไปด้วย ปัญหาที่ต้องแก้ไข คือต้องกำจัดแสงรบกวน ทำได้โดยให้แสงตัวอย่างถูกอาบด้วยแสงเลเซอร์เป็นระยะเวลานานขึ้น อีกปัญหาหนึ่งก็คือ การสลายตัวอันเนื่องมากจากความร้อน (thermal decomposition) การแก้ปัญหานี้ทำได้โดยการหมุนสารตัวอย่างด้วยความเร็วสูง

การใช้เครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์มรามานสเปกโทรมิเตอร์ จะช่วยแก้ปัญหาเกี่ยวกับสัญญาณแสงรบกวนและการสลายตัวเนื่องจากความร้อนได้ โดยเครื่องนี้ประกอบด้วย อินเตอร์ฟีรอมิเตอร์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

(interferometer) แหล่งผลิตคลื่นแสงเลเซอร์เป็น Nd/YAG เลเซอร์ มีตัวกรองแสงและตัววัดสัญญาณชนิดหลายช่องสัญญาณอยู่ในระบบหล่อเย็นด้วยไนโตรเจนเหลว



ภาพผนวกที่ ข4 แผนภาพของเครื่อง FT-Raman spectrometer

ที่มา: อุดมเดช (2550)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก ค

บัตรไฟล์มาตรฐาน JCPDS ของสังกะสี และสังกะสีออกไซด์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

04-0831 Wavelength= 1.5405

Zn

Zinc

Zinc, syn

Rad.: CuKa1 λ: 1.5405 Filter: Ni Beta.M d-sp:
Cut off: Int.: Diffract. I/Icor.: 3.80
Ref: Swanson, Tatge, Natl. Bur. Stand. (U.S.), Circ. 539, I, 16 (1953)

Sys.: Hexagonal S.G.: $P6_3/mmc$ (194)
a: 2.665 b: c: 4.947 A: C: 1.8563
α: β: γ: Z: 2 mp: 420
Ref: Ibid.

Dx: 7.136 Dm: 7.050 SS/FOM: F_{20}=55(.0182, 20)

εα: nωβ: 2.58 εγ: Sign: 2V:
Ref: Winchell, Elements of Optical Mineralogy, 1 (1927)

Color: Bluish white
Pattern taken at 26 C. Sample from New Jersey Zinc Company, Sterling Hill, New Jersey, USA. CAS #: 7440-66-6.
Spectroscopic analysis shows faint traces of Pb, Cu, Mg, Si. Mg type. Zinc group. PSC: hP2. Mwt: 65.38. Volume[CD]: 30.43.

d	Int	h	k	l
2.47300	53	0	0	2
2.30800	40	1	0	0
2.09100	100	1	0	1
1.68700	28	1	0	2
1.34200	25	1	0	3
1.33200	21	1	1	0
1.23700	2	0	0	4
1.17290	23	1	1	2
1.15380	5	2	0	0
1.12360	17	2	0	1
1.09010	3	1	0	4
1.04560	5	2	0	2
.945400	8	2	0	3
.909300	6	1	0	5
.906400	11	1	1	4
.872200	5	2	1	0
.858900	9	2	1	1
.843700	2	2	0	4
.824500	1	0	0	6
.822500	9	2	1	2

ภาพผนวกที่ ค1 บัตรไฟล์มาตรฐานของสังกะสี

ที่มา: อนุชา (2544)

04-0831 Wavelength= 1.5405

Zn

Zinc

Zinc, syn

Rad.: CuKa1 λ: 1.5405 Filter: Ni Beta.M d-sp:
Cut off: Int.: Diffract. I/Icor.: 3.80
Ref: Swanson, Tatge, Natl. Bur. Stand. (U.S.), Circ. 539, I, 16 (1953)

Sys.: Hexagonal S.G.: $P6_3/mmc$ (194)
a: 2.665 b: c: 4.947 A: C: 1.8563
α: β: γ: Z: 2 mp: 420
Ref: Ibid.

Dx: 7.136 Dm: 7.050 SS/FOM: F_{20}=55(.0182, 20)

εα: nωβ: 2.58 εγ: Sign: 2V:
Ref: Winchell, Elements of Optical Mineralogy, 1 (1927)

Color: Bluish white
Pattern taken at 26 C. Sample from New Jersey Zinc Company, Sterling Hill, New Jersey, USA. CAS #: 7440-66-6.
Spectroscopic analysis shows faint traces of Pb, Cu, Mg, Si. Mg type. Zinc group. PSC: hP2. Mwt: 65.38. Volume[CD]: 30.43.

d	Int	h	k	l
2.47300	53	0	0	2
2.30800	40	1	0	0
2.09100	100	1	0	1
1.68700	28	1	0	2
1.34200	25	1	0	3
1.33200	21	1	1	0
1.23700	2	0	0	4
1.17290	23	1	1	2
1.15380	5	2	0	0
1.12360	17	2	0	1
1.09010	3	1	0	4
1.04560	5	2	0	2
.945400	8	2	0	3
.909300	6	1	0	5
.906400	11	1	1	4
.872200	5	2	1	0
.858900	9	2	1	1
.843700	2	2	0	4
.824500	1	0	0	6
.822500	9	2	1	2

ภาพผนวกที่ ค2 บัตรไฟล์มาตรฐานของสังกะสีออกไซด์

ที่มา: อนุชา (2544)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก ง

วิธีคำนวณอัตราส่วนความดันออกซิเจน

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ง1 แสดงวิธีคำนวณความดันของออกซิเจน

Flow rate Ar:O_2	ความดันของภาชนะสุญญากาศก่อนป้อนแก๊ส(mbar)	ความดันขณะป้อนแก๊สอาร์กอน (mbar)	ความดันขณะป้อนแก๊สO_2(mbar)	$P_{Ar}+O_2-P_{Ar}$ (mbar)	อัตราส่วนของคสามดันอาร์กอน
5:1	$5x10^{-5}$	$1.5x10^{-2}$		$1.7x10^{-2}$	$\frac{1.7\times10^{-2}}{3.2\times10^{-2}}\times100=53\%$
5:2	$5x10^{-5}$	$1.4x10^{-2}$	$3.8x10^{-2}$	$12.4x10^{2}$	$\frac{2.4\times10^{-2}}{3.8\times10^{-2}}\times100=63\%$
5:3	$5x10^{-5}$	$1.4x10^{-2}$	$4.2x10^{-2}$	$2.8x10^{-2}$	$\frac{2.8\times10^{-2}}{4.2\times10^{-2}}\times100=66\%$
5:4	$5x10^{-5}$	$1.5x10^{-2}$	$5.5x10^{-2}$	$4.0x10^{-2}$	$\frac{4.0\times10^{-2}}{5.5\times10^{-2}}\times100=73\%$
5:5	$5x10^{-5}$	$1.3x10^{-2}$	$6.5x10^{-2}$	$5.2x10^{-2}$	$\frac{5.2\times10^{-2}}{4.5\times10^{-2}}\times100=80\%$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ	นางสาววริษา ปานเจริญ
เกิดวันที่	28 กรกฎาคม 2525
สถานที่เกิด	อำเภอเมือง จังหวัดราชบุรี
ประวัติการศึกษา	วท.บ. (ฟิสิกส์) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งหน้าที่ปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์