

การวัดความหนาของฟิล์มทองโดยใช้เครื่องมือวัดสเปกตรัมของการวาวรังสีเอกซ์
และเครื่องมือวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

ปริญญานิพนธ์
ของ
ครรชิต กำลังกล้า

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์
ธันวาคม 2545
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

530.417๕

ด153ก

ร.3

การวัดความหนาของฟิล์มทองโดยใช้เครื่องมือวัดสเปกตรัมของการวาวรังสีเอกซ์
และเครื่องมือวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

บทคัดย่อ

ของ

ครรชิต กำลังกล้า

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

ธันวาคม 2545

๒๒๒๒๒ ๖.๓

11 มี.พ. 2546

ครรรชิต กำล้งกล้ำ. (2545). การวัดความหนาของฟิล์มทองโดยใช้เครื่องมือวัดสเปกตรัมของ
การวาวรังสีเอกซ์และเครื่องมือวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์. ปรญญานพณ์ กศ.ม.
(ฟลลลล์). กรุงเทพฯ : บัณทลทวทยาลัย มหาวทยาลัยศรลนครลทรวโรฒ. คณะกรรมการ
ควบลุม: รองศาสตราจารย์อรุณลย์ อลนทร , อาจารย์มาโนชญ์ เสงวฒณะ.

ได้ศลศึกษาการใช้ประโยชน์เทคโนโลยีการวาวรังสีเอกซ์และเทคโนโลยีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์
ในการวัดความหนาของฟิล์มทองที่เคลือบด้วยวิธีการสปัดเตอร์บนแผ่นแก้วบาง โดยการวัด
ความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์ที่วาวและเลี้ยวเบนออกมาจากฟิล์มทองที่มีความหนาของฟิล์มต่าง ๆ
กัน ด้วยเครื่องมือวัดการวาวรังสีเอกซ์ชนิดกระจายความยาวคลื่น และเครื่องมือวัดการเลี้ยวเบน
รังสีเอกซ์ ตามลำดับ ในขณะเดียวกันก็ได้วัดความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์ที่วาวออกมาจากวัสดุ
รองรับที่เป็นแก้วบางซึ่งถูกดูดกลืนด้วยฟิล์มทอง สามารถสร้างกราฟเปรียบเทียบสามเส้นที่แสดง
ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์ที่เด่นมากกับความหนาของฟิล์มทองที่ทราบ
ค่าจากการชั่งมวล ทำให้ได้ฟังก์ชันสามฟังก์ชันในรูปแบบเอกซ์โพเนนเชียลสำหรับหาค่าความ
หนาของฟิล์มทอง ท้ายที่สุดได้เปรลยบเทียบการหาค่าความหนาของฟิล์มทองของชันงาน 2 ชัน
ที่มีความหนาเท่ากันจากฟังก์ชันทั้งสามเหล่านล้กับฟังก์ชันจากเทคโนโลยีการวาวรังสีเอกซ์ชนิด
กระจายพลังงานที่ทำโดยนลร์นดร์ วลทอนันด์ (1999) ผลการศลศึกษาแสดงให้เห่นว่าการหาความ
หนาของฟิล์มจากเทคโนโลยีการวาวรังสีเอกซ์ชนิดกระจายความยาวคลื่นเป็นเทคโนโลยีที่สามารถหา
ความหนาของฟิล์มในช่วงความหนาของงานวญญนได้ดี โดยมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่ววิธีอื่น
เมื่อเทียบกับการชั่งมวล

GOLD THIN FILM THICKNESS MEASUREMENT USING X-RAY FLUORESCENCE
SPECTROMETER AND X-RAY DIFFRACTOMETER

AN ABSTRACT
BY
KANCHIT KAMLANGKLA

Presented in partial fulfillment of the requirements
for the Master of Education degree in Physics
at Srinakharinwirot University
December 2002

Kanchit Kamlangkla. (2002). *Gold thin film thickness measurement using X-Ray Fluorescence Spectrometer and X-Ray Diffractometer*. Master thesis, M.Ed. (Physics). Bangkok : Graduate School, Srinakharinwirot University. Advisor Committee: Assoc.Prof. Arunee Intasorn, Manoch Hengwattana.

The utilization of X-Ray Fluorescence (XRF) technique and X-Ray Diffraction (XRD) technique for the thickness measurement of gold thin sputtered film on glass substrates were studied. The intensity of XRF lines and XRD lines from various thickness of gold films were measured by Wavelength Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometer (WDXRFS) and X-Ray Diffractometer respectively. Meanwhile the XRF lines from the glass substrates absorbed by the gold film were obtained. Hence the three calibration functions in exponential form for the gold thin film thickness determination were fitted with the calibration curves plotting between the intensity of a strong x-ray line and the thickness value of the film given by the gravimetric technique. Finally the comparison of the film thickness values determined from two selected specimens with same thickness value by using both these three obtained functions and Energy Dispersive X-Ray Fluorescence technique performed by Nirun Witit-anun (1999) are presented. The results show that WDXRFS technique is the favorable one.

ปริญญานิพนธ์
เรื่อง

การวัดความหนาของฟิล์มทองโดยใช้เครื่องมือวัดสเปกตรัมของการวาวรังสีเอกซ์
และเครื่องมือวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

ของ
นายครรชิต กำลังกล้า

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์
ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร. นภาพรณ์ หะวานนท์)
วันที่ ๒๕ เดือน สิงหาคม พ.ศ. ๒๕๕๕

คณะกรรมการสอบปริญญานิพนธ์

.....ประธาน
(รองศาสตราจารย์ อรุณีย์ อินทร)

.....กรรมการ
(อาจารย์ มาโนชญ์ เสงวัฒนะ)

.....กรรมการที่แต่งตั้งเพิ่มเติม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ บัญชา ศิลปสกุลสุข)

.....กรรมการที่แต่งตั้งเพิ่มเติม
(อาจารย์ ศิริลักษณ์ เรืองรุ่งโรจน์)

ประกาศคุณูปการ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ได้ด้วยความรู้ ความช่วยเหลือ และด้วยความอนุเคราะห์อย่างดีจากคณาจารย์หลายท่าน ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ อรุณีย์ อินทธร ประธานควบคุมปริญญานิพนธ์ และอาจารย์มานิชญ์ เสงฆ์วัฒนะ กรรมการควบคุมปริญญานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำ และแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ตลอดระยะเวลาในการทำวิจัย

ขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์บัญชา ศิลปสกุลสุข และอาจารย์ศิริลักษณ์ เรืองรุ่งโรจน์ ในการเป็นกรรมการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์ ตลอดจนให้คำแนะนำและแก้ไขปริญญานิพนธ์ ทำให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์นิรันดร์ วิทิตอนันต์ ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ชั้นตัวอย่างฟิล์มทองมาศึกษาต่อจากงานวิจัยของท่าน ตลอดจนคำแนะนำ แนวคิด และหลักการต่างๆเกี่ยวกับการเคลือบฟิล์มบาง ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัยครั้งนี้

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ตลอดระยะเวลาการศึกษา จนผู้วิจัยสามารถนำความรู้มาใช้ในการดำเนินการทำปริญญานิพนธ์จนสำเร็จ

ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ นิสิตปริญญาโท วิชาเอกฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ทุกท่านที่คอยช่วยเหลือและเป็นกำลังใจในการทำงานวิจัยตลอดมา

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และทุกๆ คนในครอบครัว ที่ให้กำลังใจ และสนับสนุนแก่ผู้วิจัย ทำให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

กรรชิต กำลังกล้า

สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ.....	1
ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....	1
จุดมุ่งหมายของงานวิจัย.....	3
ขอบเขตของงานวิจัย.....	4
ความสำคัญของงานวิจัย.....	4
2 ทฤษฎีและเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
ทฤษฎี.....	5
เอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	39
3 วัสดุอุปกรณ์และขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	41
วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	41
ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	42
4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล.....	46
5 สรุปอภิปรายและข้อเสนอแนะ.....	64
สรุปผลการทดลอง.....	64
อภิปรายผลการทดลอง.....	66
ข้อเสนอแนะ.....	67
บรรณานุกรม.....	68
ประวัติย่อผู้วิจัย.....	71

บัญชีตาราง

ตาราง

หน้า

- 1 ข้อมูลการชั่งมวลและการวัดพื้นที่ของกระจกสไลด์ก่อนการเคลือบ
และหลังการเคลือบทองคำ..... 42
- 2 ผลการวัดความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์ที่เลี้ยวเบนจากระนาบ (111) ของฟิล์มทอง
ที่มีความหนาต่าง ๆ บนแผ่นวัสดุรองรับ จากการวัดด้วยเครื่อง XRD..... 52
- 3 ค่าความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์ที่เลี้ยวเบนจากระนาบ (111) ของฟิล์มทองที่มีความ
หนาต่าง ๆ กับบนแผ่นวัสดุรองรับ ของชิ้นงานที่คัดเลือกมา เพื่อนำมาใช้ในการ
สร้างกราฟเปรียบเทียบ จากการวัดด้วยเครื่อง XRD..... 53
- 4 ผลการวัดค่าความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์ $L\beta$ ที่วัดออกมาจากฟิล์มทองที่มีความหนา
ต่าง ๆ และค่าความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์ $K\alpha$ ที่วัดออกมาจากสังกะสีของแผ่น
แก้วบาง เนื่องจากถูกดูดกลืนโดยฟิล์มทอง จากการวัดด้วย WDXRFS..... 54
- 5 เปรียบเทียบผลการคำนวณความหนาของฟิล์มทองของชิ้นงาน 2 ชิ้นที่มีความหนา
เท่ากัน เมื่อหาโดยการชั่งมวลกับฟังก์ชันทั้ง 4 ฟังก์ชัน เมื่อวัดด้วยเครื่อง XRD
WDXRFS และ EDXRFS ที่ได้จากงานวิจัยของผู้ช่วยศาสตราจารย์
นิรันดร์ วิทิตอนันต์ ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยบูรพา..... 58
- 6 เปรียบเทียบผลการคำนวณความหนาของฟิล์มทองของชิ้นงาน 2 ชิ้นที่มีความหนา
เท่ากับ $0.129 \mu\text{m}$ โดยอาศัยฟังก์ชันของความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของเส้น
รังสีเอกซ์กับความหนาเชิงมวลของฟิล์ม และผลการคำนวณความหนาของฟิล์ม
โดยฟังก์ชันของความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์ กับความหนา
ของฟิล์ม (ดังตาราง 5) เมื่อวัดด้วยเครื่อง XRD และ WDXRFS..... 63

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 ลักษณะการเกิดฟิล์มบาง.....	7
2 อันตรกิริยาระหว่างไอออนกับผิวหน้าวัสดุ.....	10
3 วงจรของหลอดโกลว์ดิสชาร์จ.....	11
4 ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นและความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโตรดของ กระบวนการเกิดดีซี โกลว์ดิสชาร์จ ในหลอดสุญญากาศ.....	12
5 ส่วนต่างๆของกระบวนการโกลว์ดิสชาร์จ.....	13
6 ส่วนประกอบของภาชนะสุญญากาศของระบบการเคลือบฟิล์มบาง.....	15
7 ลักษณะเส้นแรงแม่เหล็กเมื่อจัดวางแบบไม่สมมาตรของระบบอัมบาแลนด์ แมกนีตรอน สปีดเตอริง.....	17
8 การแทนที่ของอิเล็กตรอนที่ทำให้เกิดรังสีเอกซ์ลักษณะเฉพาะตัว.....	18
9 ลักษณะเส้นการดูดกลืนของธาตุยูเรเนียม ทองแดง แคลเซียม และเบริลเลียม.....	20
10 ระบบการวาวรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน.....	21
11 ชุดอุปกรณ์เครื่องวิเคราะห์การวาวรังสีเอกซ์ชนิดกระจายความยาวคลื่น.....	24
12 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์โดยผลึกตามกฎของแบรกก์.....	25
13 อุปกรณ์ชุดวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์.....	27
14 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากแผ่นฟิล์ม เมื่อลำรังสีตกกระทบและลำรังสีเลี้ยวเบน มีความหนา 1 เซนติเมตร ในทิศตั้งฉากกับระนาบของรูป.....	30
15 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากวัสดุรองรับของฟิล์มบาง.....	32
16 การวาวของรังสีเอกซ์จากฟิล์มบางที่เคลือบที่ความหนาต่าง ๆ กัน.....	34
17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มรังสีเอกซ์กับความหนาของฟิล์ม.....	35
18 การวาวรังสีเอกซ์ที่เกิดจากวัสดุรองรับ.....	36
19 การวาวรังสีเอกซ์ที่เกิดจากฟิล์ม.....	37
20 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของชั้นตัวอย่างที่มีความหนาของฟิล์มทอง เท่ากับ 0.129 μm เมื่อวัดด้วยเครื่อง XRD.....	49
21 สเปกตรัมของการวาวรังสีเอกซ์ที่วัดได้จากชั้นตัวอย่างที่มีความหนาของฟิล์มทอง 0.129 μm เมื่อวัดด้วย WDXRFS.....	50
22 สเปกตรัมของการวาวรังสีเอกซ์ที่วัดได้จากชั้นตัวอย่างซึ่งเป็นแก้วบาง ที่ยังไม่เคลือบ ทอง เมื่อวัดด้วย WDXRFS.....	51

บัญชีภาพประกอบ(ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
23 กราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าความเข้มของรังสีเอกซ์ที่เลี้ยวเบนจากระนาบ (111) ของฟิล์มทอง กับความหนาฟิล์มทองที่ได้จากการชั่งมวล.....	55
24 กราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์ $L\beta$ ที่วาวออกมาจากฟิล์มทอง กับความหนาฟิล์มทองที่ได้จากการชั่งมวล.....	56
25 กราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์ $K\alpha$ ที่วาวออกมาจากสังกะสี ซึ่งถูกดูดกลืนโดยฟิล์มทอง กับความหนาฟิล์มทองที่ได้จากการชั่งมวล.....	57
26 กราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์ที่เลี้ยวเบนจากระนาบ (111) ของฟิล์มทอง กับความหนาเชิงมวลของฟิล์มทอง.....	59
27 กราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์ $L\beta$ ที่วาวออกมาจากฟิล์มทอง กับความหนาเชิงมวลของฟิล์มทอง.....	60
28 กราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์ $K\alpha$ ที่วาวออกมาจากสังกะสี ซึ่งถูกดูดกลืนโดยฟิล์มทอง กับความหนาเชิงมวลของฟิล์มทอง.....	61
29 เปรียบเทียบลักษณะเส้นกราฟเปรียบเทียบระหว่างความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์กับความหนาเชิงมวลของฟิล์ม และเส้นกราฟเปรียบเทียบระหว่างความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์ กับความหนาของฟิล์ม.....	62

บทที่ 1

บทนำ

ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา ได้มีการศึกษาถึงสมบัติของฟิล์มบางและการผลิตฟิล์มบางด้วยเทคโนโลยีที่ก้าวหน้ามากขึ้น นอกจากนี้ยังได้มีการศึกษาองค์ประกอบของธาตุ (Element Composition) สารเจือปนหรือสารปนเปื้อน (Impurities) โครงสร้าง (Structure) เฟส (Phase) ประสิทธิภาพเชิงความเค้น (Stress Effect) และการเคลือบสารยึดติดบนวัสดุรองรับ ซึ่งเป็นปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับความหนาของฟิล์ม¹ ปัจจัยเหล่านี้เป็นพื้นฐานในการกำหนดสมบัติล่วงหน้าในการผลิตฟิล์มบางอีกด้วย สิ่งที่ได้รับ ความสนใจก็คือ มีวิธีการใดที่สามารถใช้ในการตรวจหาความหนาของฟิล์มบางที่ผลิตขึ้น เพื่อให้ได้ความหนาของฟิล์มที่ถูกต้องมากที่สุด และพบว่ามีเครื่องมือและเทคนิคในการวัดความหนาที่สำคัญมากมาย

ฟิล์มบางในงานวิจัยนี้ หมายถึงฟิล์มที่มีความบางมาก ๆ ที่เคลือบอยู่บนผิวของแข็งจะมีความหนาตั้งแต่ในระดับอังสตรอมไปจนถึงระดับไมครอน ฟิล์มบางเกิดจากชั้นหรือกลุ่มอะตอมที่เกิดการจับตัวแล้วเรียงตัวกันเป็นชั้นบาง ๆ บนวัสดุรองรับ (Substrate) การระบุว่าฟิล์มใดเป็นฟิล์มบางหรือฟิล์มหนาขึ้นอยู่กับการใช้งาน การเคลือบฟิล์มบางเป็นกระบวนการที่ทำให้ธาตุหรือสารประกอบตกเคลือบบนวัสดุรองรับหรือวัสดุที่ต้องการใช้งาน โดยมีจุดประสงค์หลัก คือ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานที่ผิววัสดุให้ดีขึ้นและปรับปรุงสมบัติของวัสดุเคลือบให้มีความคงทน ทนทาน หรือสวยงามมากขึ้น และสามารถนำไปใช้ในงานอื่นได้ เช่น งานด้านอุตสาหกรรม มีการใช้การเคลือบกระจกเพื่อใช้เป็นกระจกเลเซอร์ การเคลือบเครื่องมือในการตัดเจาะ เพื่อเพิ่มความแข็งแรง งานด้านการศึกษา ใช้ในการสร้างทัศนูปกรณ์ต่างๆ ฯลฯ

สมบัติของฟิล์มบางที่ขึ้นกับความหนาของฟิล์ม คือ สมบัติการส่งผ่านแสง (Light Transmittance) และสมบัติการต้านทานไฟฟ้า (Resistivity) ด้วยเหตุนี้เองจึงทำให้ลักษณะเฉพาะของฟิล์มที่ใช้ในการวัดความหนามีความสำคัญมาก ซึ่งฟิล์มที่ดีควรจะมีผิวหน้า (Surface) ของฟิล์มที่ราบเรียบ สม่ำเสมอขนานกับวัสดุรองรับ จึงจะทำให้การวัดความหนาของฟิล์มถูกต้อง ปัจจุบันนี้วิธีการเคลือบฟิล์มบางมีอยู่หลายวิธีแต่การเคลือบที่ให้ฟิล์มบางที่มีความบางมาก ๆ และมีคุณภาพดียังต้องอาศัยวิธีการเคลือบในสุญญากาศ

¹ J. A. Moore and T. Elsahli. (1994). "Measurement of Composition of Thin Films Obtained by Sputtering Using Radioisotope Excited X-ray Fluorescence," *X-ray Spectrometry*. (23) : 155 – 159.

เทคนิคการเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปัตเตอริง (Sputtering) ภายใต้สภาวะสุญญากาศ เป็นวิธีที่มีการนำไปใช้กันอย่างกว้างขวาง มีข้อดีที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานหลายรูปแบบ เช่น การเคลือบฟิล์มที่มีหลายองค์ประกอบ การเคลือบฟิล์มเป็นชั้น การเคลือบฟิล์มบาง วัสดุสะท้อนแสง ซึ่งเทคนิคนี้จะทำให้ฟิล์มมีการเกาะยึดกับวัสดุรองรับดีและมีการจัดโครงสร้างที่ผิวหน้าเฉพาะอย่าง นอกจากนี้วิธีสปัตเตอริงเป็นเทคโนโลยีการเคลือบฟิล์มบางที่สามารถขยายขนาดเพื่อผลิตฟิล์มที่สม่ำเสมอบนพื้นที่ขนาดใหญ่ได้ เช่น การพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง เป็นต้น

สิ่งสำคัญที่ต้องการตรวจสอบหลังการเคลือบ คือความหนาของฟิล์ม โดยเครื่องมือที่ใช้ในการวัดความหนาของฟิล์มบางมีทั้งทางตรงและทางอ้อม โดยเฉพาะเทคนิคที่ไม่ใช้เครื่องวัดความหนาโดยตรง มีด้วยกันหลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีมีข้อดี-ข้อเสียแตกต่างกันไป แต่วิธีที่ใช้ในการศึกษากันอย่างกว้างขวาง คือ

1. การชั่งหามวล (Weighing) เป็นวิธีการที่สามารถคำนวณหาความหนาของฟิล์มได้ โดยการชั่งวัสดุรองรับก่อนการเคลือบและหลังการเคลือบ แล้วคำนวณค่าความหนาโดยอาศัยค่าความหนาแน่นของฟิล์มบาง ค่าความหนาโดยวิธีชั่งนี้ความถูกต้องจะขึ้นอยู่กับความเที่ยงตรง (Precision) ของเครื่องชั่ง และความละเอียดในการวัดหาพื้นที่

2. การกระเจิงกลับของอนุภาคบีตาหรืออนุภาคอัลฟา (Beta Particle or Alpha Particle Back-Scattering) อาศัยหลักการกระเจิงกลับของอนุภาคบีตาหรืออนุภาคอัลฟา โดยการยิงอนุภาคบีตาหรืออนุภาคอัลฟาที่มีพลังงานสูงไปกระทบกับฟิล์มบาง แล้วอนุภาคเกิดการกระเจิงกลับออกมาก็สามารถคำนวณหาความหนาของฟิล์มจากการวัดจำนวนอนุภาคบีตาหรืออนุภาคอัลฟาที่กระเจิงกลับออกจากฟิล์มได้

3. เครื่องวัดการแทรกสอดของลำรังสีหลายลำ (Multiple Beam Interferometry) อาศัยหลักการสะท้อนของลำรังสีหลายครั้ง คือเมื่อลำรังสีตกกระทบบนฟิล์มและวัสดุรองรับ แล้วลำรังสีมีการสะท้อนออกมาจึงเกิดการรวมกันของลำรังสีมีลักษณะเป็นริ้วของการแทรกสอดขึ้น ส่งผลให้ความเข้มของลำรังสีมีขนาดเพียงพอ ที่จะใช้ในการหาความหนาของฟิล์มได้

4. การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction) อาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์โดยการพิจารณาความเข้มที่ลดลงของรังสีเอกซ์เลี้ยวเบนจากวัสดุรองรับและฟิล์ม เนื่องจากการดูดกลืนของฟิล์มบาง เพื่อที่จะใช้หาความหนาของฟิล์ม ค่าความเข้มของรังสีเอกซ์เลี้ยวเบนจะถูกดูดกลืนมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับ ความหนาของฟิล์มบาง

5. การวาวรังสีเอกซ์ (X-ray Fluorescence) เป็นการใช่วงสีเอกซ์จากแหล่งกำเนิดรังสี เรียกว่า รังสีเอกซ์ปฐมภูมิ (Primary X-rays) ไปกระตุ้นให้ธาตุในฟิล์มบางเกิดการวาวรังสีเอกซ์ออกมา เรียกว่า รังสีเอกซ์ทุติยภูมิ (Secondary X-rays) ซึ่งสามารถวัดความเข้มของรังสีเอกซ์ทุติยภูมิได้ เพื่อที่จะนำไปใช้ในการคำนวณหาความหนาต่อไป

ปัจจุบันได้มีการนำเทคนิคทางเครื่องมือที่เป็นเทคโนโลยีสมัยใหม่มาใช้ในการวัดความหนาของชั้นฟิล์มบางที่ให้ประสิทธิภาพสูงสามารถตรวจสอบความหนาชั้นฟิล์มบางได้ คือการวัดความหนาด้วยเทคนิคทางเครื่องมือที่อาศัยรังสีเอกซ์ เป็นเทคนิคที่มีความไว (Sensitivity) ในการวิเคราะห์สูง มีความสะดวก รวดเร็ว และมีความเที่ยงตรง ประกอบกับคอมพิวเตอร์ ได้มีบทบาทเข้ามาช่วยในการเก็บข้อมูล และการคำนวณ ซึ่งเทคนิคทางรังสีที่ใช้ในการวัดความหนาในงานวิจัยนี้ คือเทคนิคการวาวรังสีเอกซ์ และเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ เทคนิคทั้งสองสามารถวัดความหนาฟิล์ม โดยการวัดความเข้มของรังสีที่เปลี่ยนไป ซึ่งอาศัยหลักพื้นฐาน คือความเข้มรังสีเอกซ์ที่วาวหรือเลี้ยวเบนจากฟิล์ม ค่าความเข้มรังสีเอกซ์ที่วัดได้จะเพิ่มขึ้นตามความหนา แต่ถ้าการวาวหรือการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่เกิดจากวัสดุรองรับ ความเข้มรังสีเอกซ์ที่วัดได้จะลดลงตามความหนาของฟิล์ม อันเนื่องจากการดูดกลืนของฟิล์มบาง

ผู้ช่วยศาสตราจารย์นิรันดร์ วิทิตอนันต์ ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยบูรพา ได้ศึกษาเกี่ยวกับการวัดความหนาฟิล์มทองที่เคลือบบนแก้วบาง โดยเทคนิคการวาวรังสีเอกซ์ที่ใช้เครื่องมือวัดสเปกตรัมของการวาวรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometer : EDXRFS) ดังนั้นเพื่อเปรียบเทียบเทคนิคการวัดความหนาของชั้นตัวอย่างชุดเดียวกัน จึงได้นำชั้นตัวอย่างดังกล่าวมาวัดด้วยเครื่องมือวัดสเปกตรัมของการวาวรังสีเอกซ์แบบกระจายความยาวคลื่น (Wavelength Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometer : WDXRFS) และเครื่องมือวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffractometer : XRD) โดยใช้หลักการที่แตกต่างกันสามวิธี แล้วนำค่าความหนาของฟิล์มที่ได้จากการวัดด้วยเทคนิคทั้งสามวิธีนี้มาเปรียบเทียบกัน เพื่อตรวจสอบความน่าเชื่อถือของเทคนิคในการวัดความหนาแต่ละแบบต่อไป โดยเทียบกับค่าความหนาของฟิล์มที่วัดได้จากการชั่งมวล

จุดมุ่งหมายของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาการวัดความหนาของฟิล์มทองบนแผ่นวัสดุรองรับที่เป็นแก้วบางด้วยเครื่องมือวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์
2. เพื่อศึกษาการวัดความหนาของฟิล์มทองบนแผ่นวัสดุรองรับที่เป็นแก้วบางโดยอาศัยเครื่องมือวัดสเปกตรัมของการวาวรังสีเอกซ์แบบกระจายความยาวคลื่น
3. เปรียบเทียบความน่าเชื่อถือของวิธีการวัดความหนาของฟิล์มทองบนแผ่นวัสดุรองรับที่เป็นแก้วบาง ด้วยเครื่องมือวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ และเครื่องมือวัดสเปกตรัมของการวาวรังสีเอกซ์แบบกระจายความยาวคลื่น แล้วเปรียบเทียบผลการวัดความหนาของฟิล์มกับวิธีการของผู้ช่วยศาสตราจารย์นิรันดร์ วิทิตอนันต์ ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่ใช้เครื่องมือวัดสเปกตรัมของการวาวรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน โดยใช้ชั้นตัวอย่างชุดเดียวกันทั้งหมด

ขอบเขตการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้จะใช้ชิ้นตัวอย่างฟิล์มทองที่เคลือบบนแผ่นวัสดุรองรับที่เป็นแก้วบางที่ได้จากการเคลือบในสุญญากาศด้วยวิธีการสปัตเตอร์ ซึ่งเป็นชิ้นตัวอย่างชุดเดียวกับงานวิจัยของผู้ช่วยศาสตราจารย์นิรันดร์ วิทอนันต์ ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่ใช้ศึกษาด้วยเครื่องมือวัดสเปกตรัมของการวาวรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน จากนั้นได้นำชิ้นตัวอย่างดังกล่าวนี้มาวัดด้วยเครื่องมือวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ และเครื่องมือวัดสเปกตรัมของการวาวรังสีเอกซ์แบบกระจายความยาวคลื่น แล้วทำการสร้างกราฟเปรียบเทียบระหว่างความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์กับความหนาของฟิล์มทองที่คำนวณได้จากวิธีการชั่งมวล จะได้ฟังก์ชันสำหรับคำนวณหาความหนาของฟิล์มทอง วิเคราะห์ผลและความน่าเชื่อถือของการวัดความหนาฟิล์มทองด้วยเทคนิคทางรังสีทั้งสามวิธี

ความสำคัญของงานวิจัย

สามารถตรวจสอบความน่าเชื่อถือของเทคนิคทางรังสีในการวัดความหนาของฟิล์มบางด้วยการใช้เครื่องมือวัดสเปกตรัมของการวาวรังสีเอกซ์แบบกระจายความยาวคลื่น (WDXRFS) เครื่องมือวัดสเปกตรัมของการวาวรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน (EDXRFS) และเครื่องมือวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) เพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับการวัดความหนาของฟิล์มบางให้ถูกต้อง รวดเร็ว โดยผลการศึกษาวัดความหนาของฟิล์มบางบนแผ่นแก้วบางด้วยเทคนิคเหล่านี้ น่าจะมีประโยชน์ต่องานอุตสาหกรรมเกี่ยวกับการเคลือบฟิล์มบางและในการวัดความหนาของฟิล์มบางของชิ้นงานที่จะผลิตขึ้นต่อไป

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎี

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ ประกอบด้วย

1. กระบวนการเคลือบฟิล์มบางในสุญญากาศด้วยวิธีการสปัตเตอริง
2. เครื่องมือวัดสเปกตรัมของการวาวรังสีเอกซ์
3. เครื่องมือวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์
4. เทคนิคในการวัดความหนาของฟิล์มบางด้วยวิธีการวาวรังสีเอกซ์

และวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

1. กระบวนการเคลือบฟิล์มบางในสุญญากาศด้วยวิธีการสปัตเตอริง

การเคลือบฟิล์มบาง คือ การเรียงตัว (Fabricated) โดยการตกเคลือบของสารเคลือบในลักษณะอะตอมเดี่ยวบนวัสดุรองรับ จนเกิดเป็นชั้นของฟิล์มบาง โดยฟิล์มบางที่ได้จะบางมากในระดับไมครอน ดังนั้นเทคนิคที่สามารถควบคุมกระบวนการพอกพูนของฟิล์มบางในระหว่างที่กระบวนการกำลังเกิดขึ้น ถือว่าเป็นสิ่งสำคัญและมีประโยชน์มาก ปัจจุบันได้มีการนำเทคโนโลยีระบบใหม่มาใช้ในกระบวนการเคลือบฟิล์มบางโดยเฉพาะการเคลือบฟิล์มบางในสุญญากาศ ซึ่งเป็นเทคนิคการเคลือบฟิล์มที่สามารถควบคุมความหนาของฟิล์มได้ง่าย

กระบวนการเคลือบฟิล์มบาง

การเคลือบฟิล์มบางเป็นกระบวนการทำให้สารเคลือบตกเคลือบลงบนผิวหน้าวัสดุรองรับ กระบวนการเคลือบฟิล์มบางมีขั้นตอนสำคัญ 3 ขั้นตอน คือ

1. การสร้างสารเคลือบในรูปของอะตอมหรือโมเลกุล ซึ่งสารเคลือบอาจอยู่ในรูปของแข็ง ของเหลว หรือแก๊ส โดยสารเคลือบเหล่านี้จะต้องทำให้อยู่ในรูปของไอระเหย แก๊สจากการให้ความร้อนหรือการระดมยิงด้วยอนุภาคที่มีพลังงานสูง

2. การเคลื่อนย้ายสารเคลือบมายังวัสดุรองรับ การเคลื่อนย้ายสารเคลือบอาจเกิดขึ้นในสุญญากาศ ทำได้โดยการให้ไอระเหยของสารเคลือบมีการเคลื่อนที่ในลักษณะเส้นตรงไปยังวัสดุรองรับ หรืออาจเคลื่อนที่ไปในลักษณะเลือนไหลทำให้ไอระเหยของสารเคลือบมีการชนกับอนุภาคอื่นในภาชนะสุญญากาศ แต่สิ่งที่สำคัญในการเคลื่อนย้ายสารเคลือบ คือ ไอระเหยของสารเคลือบต้องมีความสม่ำเสมอเพื่อจะทำให้ฟิล์มบางที่ได้มีความสม่ำเสมอ

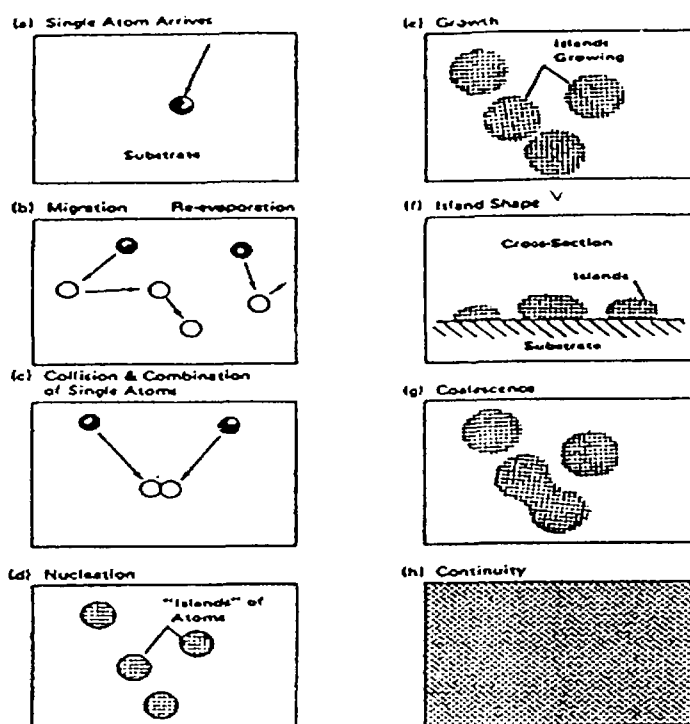
3. การควบแน่นและกระบวนการพอกพูนของชั้นฟิล์มบางของวัสดุรองรับ จะขึ้นอยู่กับการทำปฏิกิริยาของสารเคลือบกับวัสดุรองรับตลอดจนพลังงานในการเคลือบ

การก่อเกิดฟิล์มบาง

การเคลือบฟิล์มบางในสุญญากาศ สารเคลือบที่ตกกระทบผิววัสดุรองรับจะอยู่ในรูปของอะตอมหรือโมเลกุล ดังภาพประกอบ 1(a) เมื่ออะตอมสารเคลือบตกกระทบผิววัสดุรองรับในตำแหน่งดูดจับ (Absorption Site) และเกิดการเกาะติดหรือถ้าอะตอมมีพลังงานเพียงพอก็จะเคลื่อนที่ไปยังบริเวณที่อยู่ติดกันที่มีพลังงานต่ำกว่าเสมอ ดังภาพประกอบ 1(b) ในเวลาไม่นานอะตอมสารเคลือบอาจเกิดการระเหยกกลับ เกิดการชนและการรวมตัวกันระหว่างอะตอมที่มีการแพร่

เมื่ออะตอมสารเคลือบรวมกันอาจเกิดเป็นอะตอมคู่ ดังภาพประกอบ 1(c) ซึ่งมีความเสถียรมากกว่าอะตอมเดี่ยว เนื่องจากการรวมตัวกันของอะตอมจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของอะตอมเดี่ยวและอัตราการเคลือบ และอะตอมคู่อาจรวมตัวกับอะตอมเดี่ยวตัวอื่นๆ จนกลายเป็นสามอะตอม (Triplets) สี่อะตอม (Quadruplets) ในที่สุดจะเกิดลักษณะคล้ายนิวเคลียสของนิวเคลียสขึ้นเป็นกลุ่มก้อนของอะตอม ดังภาพประกอบ 1(d) และกลุ่มก้อนของอะตอมจะโตขึ้นโดยมีจำนวนอะตอมเท่าเดิมหรือเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ดังภาพประกอบ 1(e) และ 1(f) การโตของกลุ่มอะตอมนี้จะโตขึ้นเรื่อยๆจนกระทั่งแต่ละกลุ่มชนกัน เกิดรวมกันเป็นก้อนของกลุ่มอะตอม ดังภาพประกอบ 1(g) ขณะที่กลุ่มอะตอมรวมกันเป็นกลุ่มก้อน อะตอมสารเคลือบจะมีการจัดเรียงตัวในตำแหน่งของแลตทิซโดยอาศัยกระบวนการแพร่เข้าไปในเนื้อ (Bulk Diffusion) ในที่สุดการเคลือบจะเกิดอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งครอบคลุมทั่วทั้งพื้นผิววัสดุรองรับ ดังภาพประกอบ 1(h)

เมื่อพิจารณาการเกิดฟิล์มในลักษณะเป็นกลุ่มอะตอมนั้น พบว่าถ้ากลุ่มอะตอมตกเคลือบบนวัสดุรองรับที่เป็นผลึกเดี่ยว การจัดเรียงตัวของฟิล์มจะเป็นไปตามโครงสร้างของวัสดุรองรับที่ตกเคลือบ ซึ่งจะได้ฟิล์มบางที่มีลักษณะเป็นผลึกเดี่ยว เรียกการเกิดฟิล์มแบบผลึกเดี่ยวประเภทนี้ว่า เอพิแทกซี (Epitaxy)



ภาพประกอบ 1 แสดงลักษณะการเกิดฟิล์มบาง

ที่มา : Chapman, B. (1980). *Glow Discharge Processes*. p. 202. New York : John Wiley & Sons.

ประเภทการเคลือบฟิล์มบางในสุญญากาศ

การเคลือบฟิล์มบางในสุญญากาศแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

1.การเคลือบฟิล์มบางด้วยกระบวนการทางเคมี (Chemical Process) เป็นการเคลือบที่อาศัยการแตกตัวของสารเคมีในสภาพของแก๊สและเกิดปฏิกิริยาเคมีกลายเป็นสารใหม่ตกเคลือบบนวัสดุรองรับ ได้แก่วิธี CVD (Chemical Vapor Deposition)

2.การเคลือบฟิล์มบางด้วยกระบวนการทางฟิสิกส์ (Physical Process) เป็นการเคลือบที่อาศัยการทำให้อะตอมของสารเคลือบหลุดออกจากผิวแล้ววิ่งเข้าไปจับหรือยึดติดกับผิววัสดุรองรับ เกิดการพอกพูนเป็นชั้นของฟิล์มบาง ซึ่งเกิดขึ้นภายใต้สภาวะสุญญากาศ ได้แก่ วิธีการระเหยสาร (Evaporation) และวิธีสปัตเตอริง (Sputtering) ในที่นี้จะกล่าวเฉพาะการเคลือบฟิล์มบางด้วยกระบวนการทางฟิสิกส์ ดังนี้

การเคลือบฟิล์มบางด้วยกระบวนการทางฟิสิกส์ อาศัยหลักการทำให้อะตอมของสารเคลือบหลุดออกจากผิวแล้วพุ่งกระจายหรือวิ่งเข้าไปจับและยึดติดกับผิวของวัสดุรองรับแล้วพอกพูนเป็นชั้นของฟิล์มบาง ซึ่งเกิดขึ้นภายใต้สภาวะสุญญากาศ แบ่งเป็น 2 วิธีหลักๆ คือ

1. การเคลือบด้วยวิธีระเหยสาร เป็นกระบวนการพอกพูนของชั้นฟิล์มบางของสารเคลือบที่ทำให้ระเหยซึ่งเกิดขึ้นในสุญญากาศ ทำได้โดยการให้ความร้อนที่มากพอจนทำให้สารเคลือบระเหยกลายเป็นไอ ซึ่งไอของสารเคลือบนี้จะพุ่งไปกระทบกับวัสดุรองรับที่มีอุณหภูมิเหมาะสมก็จะเกิดการควบแน่นของสารเคลือบและพอกพูนโตเป็นชั้นฟิล์มบางต่อไป การให้ความร้อนในการระเหยสารเคลือบทำได้หลายวิธี แต่วิธีที่สะดวกและนิยมใช้ คือ การให้ความร้อนแก่ภาชนะบรรจุสารเคลือบด้วยวิธีทางไฟฟ้า

2. การเคลือบด้วยวิธีสปัตเตอริง เป็นกระบวนการพอกพูนของชั้นฟิล์มบางจากสารเคลือบที่ได้จากกระบวนการ สปัตเตอริง (ความดันประมาณ 10^{-3} – 10^{-1} ทอร์) การเคลือบด้วยวิธีนี้เกิดขึ้นเมื่ออะตอมของสารเคลือบที่หลุดจากผิวของวัสดุโดยการชนของอนุภาคพลังงานสูง และมีการแลกเปลี่ยนพลังงานและโมเมนตัมระหว่างอนุภาคที่วิ่งเข้าชนกับอะตอมที่ผิวสารเคลือบ แล้วอะตอมของสารเคลือบที่หลุดออกมาจากผิววัสดุก็เคลื่อนที่เข้าชนวัสดุรองรับเกิดการพอกพูนและโตเป็นฟิล์มบางในที่สุด โดยกระบวนการนี้อ่อนุภาคที่วิ่งเข้าชนอาจเป็นกลางทางไฟฟ้าหรือมีประจุก็ได้ และเนื่องจากไอออนที่ได้จากกระบวนการสปัตเตอริงในการเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปัตเตอริงจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงกว่าวิธีการระเหยมาก ดังนั้นเมื่ออะตอมของสารเคลือบที่วิ่งเข้ากระทบแผ่นวัสดุรองรับก็จะฝังตัวแน่นลงในเนื้อวัสดุที่ต้องการเคลือบได้ดี

1.1 การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปัตเตอริง

เมื่อผิวหน้าของวัสดุที่เป็นของแข็ง ถูกระดมยิงด้วยอนุภาคพลังงานสูงจะทำให้เกิดการสีกกร่อนและมีอนุภาคที่ผิวหน้าของวัสดุนั้นหลุดออกมาเนื่องจากการชนของอนุภาคพลังงานสูงกับอนุภาคผิวหน้า ปรากฏการณ์ที่อนุภาคผิวหน้าวัสดุหลุดออกมานี้ เรียกว่า สปัตเตอริง (Sputtering) อะตอมที่หลุดออกมาจากผิวหน้าวัสดุด้วยการสปัตเตอริงนี้ สามารถก่อตัวเป็นฟิล์มบางบนแผ่นวัสดุรองรับขึ้น

ในการเคลือบสารด้วยวิธีสปัตเตอริงนิยมใช้ไอออนที่ถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าจนไอออนมีพลังงานสูงในระดับอนุภาคเพื่อใช้ในการชนกับผิวของสารเคลือบ เช่น ไอออนของอาร์กอน โดยสารเคลือบที่ใช้เป็นเป้าในการชนจะต่อกับขั้วไฟฟ้าที่มีศักย์ลบ ส่วนวัสดุรองรับซึ่งวางหันหน้าเข้าหาเป้าจะให้เป็อนดซึ่งมีศักย์ไฟฟ้าบวก ปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญมากในการแสดงลักษณะของกระบวนการสปัตเตอริง คือ สปัตเตอริงยิลด์ (Sputtering Yield) ซึ่งเป็นจำนวนอะตอมที่หลุดออกมาจากผิวของสารที่เป็นเป้าต่อการชนของไอออน ค่าสปัตเตอริงยิลด์เป็นปริมาณที่ขึ้นอยู่กั โครงสร้างของส่วนผสมของสารเคลือบ ลักษณะเฉพาะของไอออน และพลังงานของไอออน ส่วนข้อดีของการเคลือบสารด้วยวิธีสปัตเตอริง คือ

1. फिल्मที่ได้มีความหนาสม่ำเสมอ
2. फिल्मที่ได้ยึดติดแน่นกับวัสดุรองรับ
3. การก่อตัวของฟิล์มมีส่วนผสมเหมือนกับสารที่ใช้เป็นเป้า
4. สามารถควบคุมความหนาของฟิล์มได้ง่าย

1.1.1 กระบวนการเกิดการสปัตเตอร์

เป็นกระบวนการที่อะตอมผิวหน้าของวัสดุถูกทำให้หลุดออกมา โดยการชนของอนุภาคที่มีพลังงานสูงและเกิดการแลกเปลี่ยนพลังงานและโมเมนตัมระหว่างอนุภาคที่วิ่งเข้าชนกับอะตอมที่ผิววัสดุและมีการพอกพูนโตบนวัสดุรองรับเป็นฟิล์มบางในที่สุด กระบวนการสปัตเตอร์นี้ ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วน คือ

1. เป้าสารเคลื่อน จะทำหน้าที่เป็นเป้าให้อนุภาคพลังงานสูงวิ่งเข้าชนจนมีการปลดปล่อยอะตอมของสารเคลื่อนออกมาตกเคลือบบนวัสดุรองรับ

2. อนุภาคพลังงานสูง จะเป็นตัววิ่งเข้าชนเป้าสารเคลื่อน แล้วทำให้อะตอมของเป้าสารเคลื่อนหลุดออกมา วิธีการที่นิยมในการสร้างอนุภาคที่มีพลังงานสูงมากเพื่อใช้ในกระบวนการสปัตเตอร์ คือการเร่งอนุภาคที่มีประจุภายใต้สนามไฟฟ้า ซึ่งเป็นวิธีที่สามารถควบคุมระดับพลังงานของไอออนได้ตามต้องการ เนื่องจากอิเล็กตรอนเป็นอนุภาคที่มีประจุที่ผลิตได้ง่ายและสามารถเร่งให้มีพลังงานสูงภายใต้สนามไฟฟ้าได้ แต่พบว่าอิเล็กตรอนมีมวลน้อยกว่าอะตอมของสารเคลื่อนมาก ทำให้การถ่ายเทพลังงานและโมเมนตัมต่ออะตอมของสารเคลื่อนไม่มีประสิทธิภาพและไม่สามารถทำให้เกิดกระบวนการสปัตเตอร์ได้ ดังนั้นจึงเลือกเร่งไอออนของแก๊สในสนามไฟฟ้าเป็นอนุภาควิ่งชนเป้าสารเคลื่อน จะทำให้อัตราการปลดปล่อยสารเคลื่อนสูงเพียงพอกับความต้องการ

3. การผลิตอนุภาคพลังงานสูง อนุภาคพลังงานสูงในกระบวนการสปัตเตอร์จะต้องถูกผลิตอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้กระบวนการเคลือบฟิล์มบางเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่องจนได้ความหนาของฟิล์มตามต้องการ ในการผลิตอนุภาคพลังงานสูงจะนิยมผลิตจากกระบวนการโกลว์ดิสชาร์จ (Glow Discharge)

1.1.2 อันตรกิริยาระหว่างไอออนกับผิวหน้าวัสดุ

เมื่อไอออนพลังงานสูงวิ่งเข้าชนผิวหน้าวัสดุของสารที่จะเคลือบบนวัสดุรองรับที่เรียกว่า เป้า จะเกิดปรากฏการณ์ต่างๆ ดังภาพประกอบ 2 ดังนี้ คือ

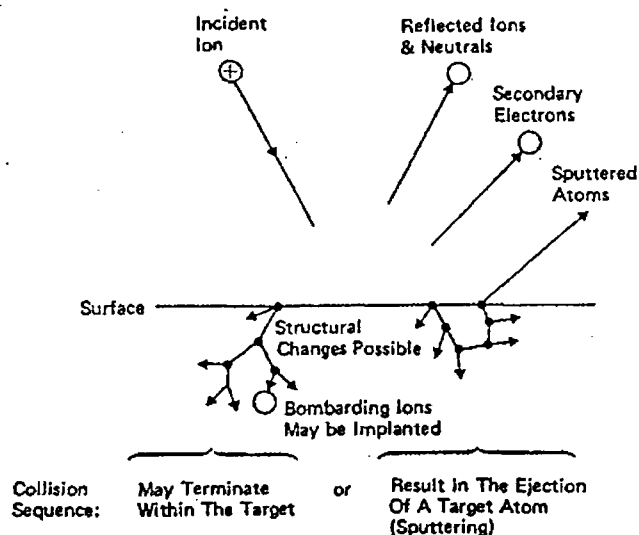
1. กระบวนการสปัตเตอร์ เป็นการชนของไอออนที่ผิวหน้าของเป้าซึ่งอาจทำให้เกิดกระบวนการชนแบบต่อเนื่องระหว่างอะตอมของเป้าแล้วทำให้เกิดการปลดปล่อยอะตอมออกจากเป้า

2. การปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron) โดยการชนของไอออนอาจทำให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิจากเป้าเมื่อไอออนมีพลังงานสูงพอ

3. การสะท้อนของไอออนที่ผิวหน้าของเป้า โดยไอออนที่สะท้อนกลับจากผิวหน้าเป้า จะสะท้อนออกมาในรูปของอะตอมที่เป็นกลางทางไฟฟ้า เนื่องจากเกิดการรวมตัวกับอิเล็กตรอนที่ผิวหน้าของเป้า

4. การเปลี่ยนโครงสร้างของผิวสารเคลือบ การชนของไอออนบนผิวหน้าเป้าทำให้เกิดการเรียงตัวของอะตอมที่ผิวของเป้าใหม่และเกิดความบกพร่องของโครงสร้างผลึก (Lattice Defect) เกิดขึ้นบางๆที่จัดตัวใหม่ของโครงสร้างของผิวหน้า

5. การฝังของไอออน (Ion Implantation) ไอออนจะฝังตัวลงไปเป้า โดยความลึกของการฝังตัวจะขึ้นกับพลังงานของไอออนโดยตรง

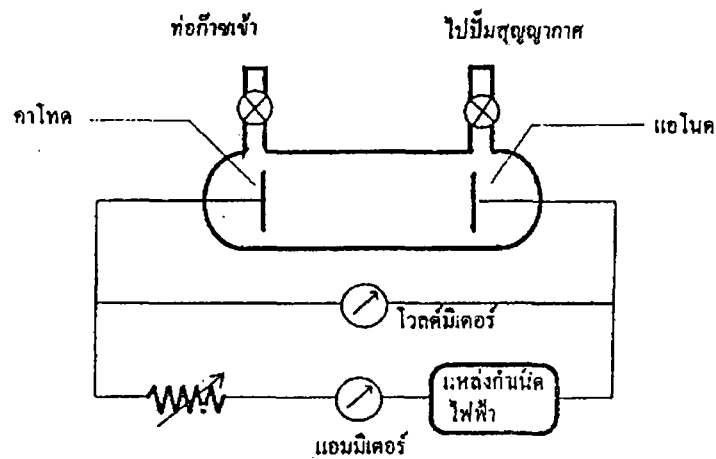


ภาพประกอบ 2 แสดงอันตรกิริยาระหว่างไอออนกับผิวหน้าวัสดุ

ที่มา : Chapman, B. (1980). *Glow Discharge Processes*. p. 178. New York : John Wiley & Sons.

1.1.3 โกลว์ดิสชาร์จ (Glow Discharge)

พิจารณาการจัดอุปกรณ์ของวงจรหลอดโกลว์ดิสชาร์จ ดังภาพประกอบ 3 ซึ่งเดิมเป็นการจัดอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับศึกษาการนำกระแสของแก๊สวิธีหนึ่ง แต่ต่อมาได้นำหลักการนี้ไปประยุกต์ใช้กับการศึกษาการเกิดกระบวนการสปัตเตอริงขึ้น โดยมีตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการศึกษาการนำกระแสของแก๊ส ได้แก่ ชนิดของแก๊ส ความดัน ความต่างศักย์ กระแสไฟฟ้า วัสดุที่เป็นขั้วไฟฟ้า และระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า



ภาพประกอบ 3 แสดงวงจรของหลอดโกลด์สตาร์จ

ที่มา : นิรันดร์ วิทิตอนันต์. (2544). เทคโนโลยีฟิล์มบาง. (เอกสารประกอบการสอน). หน้า 99.

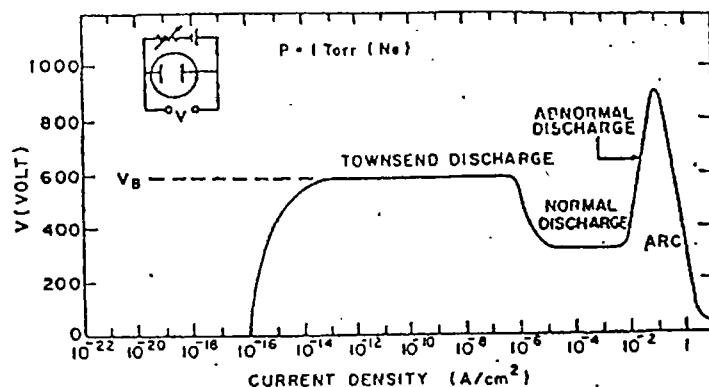
ชลบุรี : ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา. อัดสำเนา.

เมื่อเริ่มให้ความต่างศักย์ไฟฟ้ากระแสตรงระหว่างขั้วแอโนดและแคโทด ที่วางห่างกันภายใต้ความดันของแก๊สที่อ่อน พบว่าช่วงแรก que เพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าจะมีกระแสไฟฟ้าไหลในวงจรน้อยมาก และเมื่อศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นใกล้ศักย์ไฟฟ้าทะลาย (Breakdown Voltage) พลังงานของประจุที่ถูกเร่งภายใต้สนามไฟฟ้าจะมีค่าสูงขึ้นจนสามารถชนกับโมเลกุลของแก๊สให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนบวกและอิเล็กตรอนซึ่งจะถูกเร่งภายใต้สนามไฟฟ้าให้มีการชนและกลายเป็นไอออน (ionization) เพิ่มขึ้น ส่วนไอออนบวกจะถูกเร่งเข้าชนขั้วแคโทดจนเกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิ เรียกกระบวนการช่วงนี้ว่า ทาวนด์เซนต์ดิสชาร์จ (Townsend Discharge)

ต่อมาเมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นถึงศักย์ไฟฟ้าทะลายก็จะเกิดกระบวนการถล่ม (Avalanche) ทำให้ปริมาณไอออนบวกวิ่งเข้าชนแคโทดมากขึ้นและมีการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิออกมามากขึ้นด้วย และอิเล็กตรอนทุติยภูมิจะถูกเร่งให้วิ่งเข้าหาแอโนดในขณะเดียวกันอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้ก็จะมีการชนกับโมเลกุลของแก๊สทำให้เกิดไอออนออกมาเพิ่มขึ้น ในที่สุดไอออนบวกที่เพิ่มมากขึ้นก็จะวิ่งเข้าชนแคโทดแล้วเกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิเพิ่มขึ้นตามมาด้วยและชนโมเลกุลแก๊ส ทำให้เกิดการผลิตไอออนเพิ่มขึ้นและเกิดกระแสเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนมีปริมาณไอออนมากเพียงพอที่จะผลิตอิเล็กตรอนได้ในจำนวนคงที่ ช่วงนี้ระบบสามารถรักษาสภาพดิสชาร์จได้ด้วยตนเอง และช่วงนี้แก๊สภายในระบบเกิดการเรืองแสง

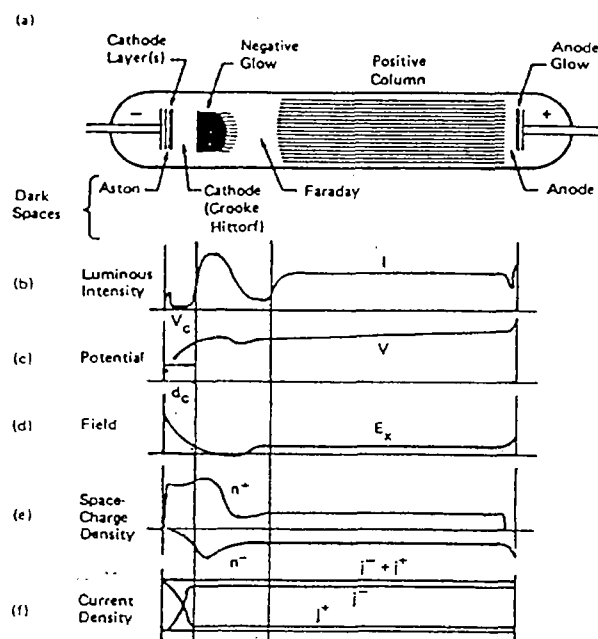
เรียกการเรืองแสงปกติหรือนอร์มอลโกลว์ (Normal Glow) โดยในช่วงเริ่มต้นของการเรืองแสงหรือโกลว์ การชนของไอออนบนแคโทดจะเกิดขึ้นในบางบริเวณ แนวการเรืองแสงอาจเลื่อนไปได้และการชนของไอออนบนแคโทดไม่มีความสม่ำเสมอ เมื่อกระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น แนวการชนของไอออนจะค่อยๆ ขยายตัวเพิ่มขึ้นที่จนครอบคลุมตลอดผิวแคโทด จนกระทั่งมีความหนาแน่นกระแสเท่ากันตลอดโดยมีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโตรดคงที่

หลังจากการชนของไอออนครอบคลุมพื้นที่ทั้งหมดของแคโทด แล้วการเพิ่มกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบจะทำให้ทั้งความต่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นเรียกว่าการเรืองแสงผิดปกติ การเปล่งแสงขึ้นหรือเรียกว่าแอบนอร์มอลโกลว์ (Abnormal Glow) ในช่วงนี้ถ้าระบบไม่มีการระบายความร้อนให้กับแคโทด ความหนาแน่นกระแสของแคโทดเพิ่มขึ้น ความร้อนที่เกิดจากการชนของไอออนบนผิวแคโทดจะเกิดขึ้นมากจนเกิดกระบวนการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิและติดตามด้วยกระบวนการถล่มอีกครั้งหนึ่ง ทำให้การนำกระแสของแก๊สในระบบสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโตรดตกลงมาก ขณะที่กระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นสูงและเปล่งประกายจ้าที่เรียกว่าอาร์คดิสชาร์จ (Arc Discharge) ดังภาพประกอบ 4



ภาพประกอบ 4 ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นกระแสและความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโตรดของกระบวนการเกิด ดีซี โกลว์ดิสชาร์จ ในหลอดสุญญากาศบรรจุแก๊สนีออน

ที่มา : Vossen, J.L. and Kerns, W. (1978). *Thin Film Processes*. p. 81. New York : Academic Press.



ภาพประกอบ 5 แสดงส่วนต่างๆของกระบวนการโกลว์ดิสชาร์จ ของหลอดนีออนยาว 50 cm ที่ความดัน 1.33 mbar

ที่มา : Vossen, J.L. and Kerns, W. (1978). *Thin Film Processes*. p. 79. New York : Academic Press.

จากภาพประกอบ 5 แสดงส่วนต่างๆของกระบวนการโกลว์ดิสชาร์จ ซึ่งแต่ละส่วน สามารถอธิบายได้ คือ

1. ช่วงมืดแอสตัน (Aston Dark Space) เป็นบริเวณที่อิเล็กตรอนถูกปล่อยออกจากแคโทด ด้วยพลังงานต่ำประมาณ 1 eV ซึ่งไม่สามารถทำให้โมเลกุลของแก๊สเกิดการชนเป็นไอออนได้ ทำให้เกิดเป็นช่วงมืดขึ้น

2. ช่วงแคโทดโกลว์ (Cathode Glow) เป็นบริเวณที่มีการเปล่งแสงออกมาด้วยความเข้มสูงมาก เนื่องจากเป็นบริเวณที่ไอออนแก๊สจากการดิสชาร์จและไอออนของอะตอมสารเคลือบซึ่งถูกผลิตขึ้นบริเวณแคโทดมีการรวมตัวเป็นกลางกับอิเล็กตรอนใกล้ผิวแคโทดด้วยกระบวนการต่างๆ ทำให้เกิดการปลดปล่อยแสงซึ่งมีความถี่เฉพาะของสารที่ทำแคโทดและของแก๊สที่ใช้ เช่น เมื่อแคโทดเป็นทองคำการเรืองแสงของแคโทดโกลว์จะให้สีส้มแดง แก๊สอาร์กอนมีสีน้ำเงินฟ้า เป็นต้น

3. ช่วงมืดครุก หรือช่วงมืดแคโทด (Crook or Cathode Dark Space) เป็นบริเวณที่พลังงานของอิเล็กตรอนมีค่าสูงกว่าพลังงานในการทำให้โมเลกุลของแก๊สเป็นไอออน เมื่อถูกเร่งผ่านสนามไฟฟ้าในระยะทางเฉลี่ยที่ปลอดจากการชนออกมาทำให้บริเวณปราศจากการชนนั้นไม่มีกระบวนการกระตุ้นหรือการทำให้เกิดไอออนขึ้น การปลดปล่อยแสงจึงไม่เกิดขึ้นในช่วงนี้และกลายเป็นบริเวณมืด

4. ช่วงเนกาทีฟ โกลว์ (Negative Glow) เป็นบริเวณที่เกิดการสะสมของประจุลบ จะเกิดขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนเลยจากบริเวณผลิตไอออนของบริเวณช่วงมืดจะมีพลังงานลดลงมาก ดังนั้นพลังงานที่เหลือจึงเพียงใช้ในการกระตุ้นโมเลกุลของแก๊สและเกิดการเรืองแสงขึ้น แม้อิเล็กตรอนซึ่งเป็นอนุภาคที่เคลื่อนที่ได้เร็วแต่พลังงานที่เหลือน้อยมาก รวมทั้งประจุลบจากประจุสะสมของไอออนด้านซ้ายมือในบริเวณช่วงมืดทำให้อิเล็กตรอนใช้เวลาในการเคลื่อนที่ผ่านช่วงเรืองแสงนี้นานขึ้นและเกิดการสะสมประจุลบบริเวณนี้

5. ช่วงมืดฟาราเดย์ (Faraday Dark Space) เป็นบริเวณช่วงมืดอีกช่วงหนึ่งที่เกิดหลังจากอิเล็กตรอนมีพลังงานลดลงมากจนไม่สามารถกระตุ้นให้โมเลกุลของแก๊สเปลี่ยนไปอยู่ในระดับพลังงานที่สูงขึ้นได้

6. บริเวณโพสิทีฟ โกลว์ (Positive Glow Column) บริเวณนี้เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นจะคล้ายกับทาวน์เซนดดิสชาร์จ ซึ่งมีปริมาณอิเล็กตรอนค่อนข้างคงที่ถูกเร่งภายใต้สนามไฟฟ้าค่าต่ำๆ ทำให้อิเล็กตรอนถูกเร่งเข้าสู่แอโนดและมีพลังงานสูงพอในการกระตุ้นโมเลกุลของแก๊สหรือทำให้แก๊สแตกตัวเป็นไอออนได้และเกิดการเรืองแสงขึ้นที่บริเวณนี้อีกครั้งหนึ่ง อิเล็กตรอนซึ่งเคลื่อนที่เร็วจะถูกกวาดเข้าสู่แอโนดเร็วทำให้สภาวะพลาสมาบริเวณนี้มีประจุบวกสูงกว่า

1.1.4 เครื่องเคลือบฟิล์มบางระบบดีซี อันบาลานซ์ แมกนีตรอน

สปีดเตอริง (D.C. Unbalance Magnetron Sputtering)

ในงานวิจัยนี้ได้นำเทคนิคการเคลือบฟิล์มบางของทองคำบนแก้วบางโดยใช้ระบบเคลือบแบบดีซี อันบาลานซ์ แมกนีตรอน สปีดเตอริง ออกแบบและสร้างขึ้นโดยห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีสุญญากาศและฟิล์มบาง ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา มีส่วนประกอบสำคัญ 6 ส่วน คือ

1.ระบบเครื่องสูบลสุญญากาศ ทำหน้าที่สูบลอากาศออกจากภาชนะสุญญากาศ ประกอบด้วยเครื่องสูบล 2 ชนิด คือ เครื่องสูบลแบบโรตารีและเครื่องสูบลแบบแพร์ไอ โดยต่อเข้ากับภาชนะสุญญากาศ

2.ภาชนะสุญญากาศ ที่ใช้สำหรับเคลือบฟิล์มบางทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหนา 3.0 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 23.0 เซนติเมตร มีช่องหน้าต่างเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.0 เซนติเมตร จำนวน 1 ช่อง ฝาปิดบนของภาชนะสุญญากาศมีช่องสำหรับใส่แคโทดและช่องป้อนแก๊ส ส่วนช่องเปิดสู่สุญญากาศอยู่ด้านข้างขนาด 13.5 เซนติเมตร เพื่อต่อกับเครื่องสูบลแบบ

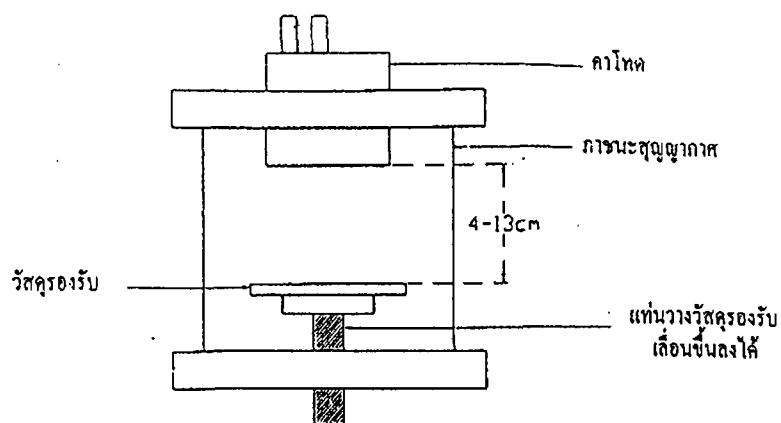
แพร่ไอ ส่วนแผ่นฐานของภาชนะสุญญากาศจะติดตั้งแท่นวางชิ้นงานที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม ซึ่งสามารถปรับระยะได้ตั้งแต่ 4.0 –15.0 เซนติเมตร

3. แคโทดและเป้าสารเคลือบ แคโทดของระบบมีลักษณะเป็นทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 114.0 มิลลิเมตร แคโทดซีลด์มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 122.0 มิลลิเมตร ระบายความร้อนด้วยน้ำ ในส่วนสนามแม่เหล็กจะใช้แม่เหล็กชนิด NdFeB และเพื่อให้สนามแม่เหล็กมีลักษณะไม่สมมาตรจึงใช้แม่เหล็กวางทั้งแกนกลางแคโทด และรอบนอกเป็นวงแหวน

4. ระบบน้ำหล่อเย็น สำหรับใช้หล่อเย็นแคโทด เป้าสารเคลือบ และส่วนบนของเครื่องสูบบางแพร่ไอ

5. ระบบจ่ายไฟฟ้า ใช้ในกระบวนการเคลือบฟิล์มบางเท่านั้นโดยให้แคโทดมีศักย์เป็นลบ ส่วนกราวด์และแท่นวางชิ้นงานมีศักย์เป็นบวก

6. ระบบป้อนแก๊ส ประกอบด้วยวาล์ว 2 ทาง คือ วาล์วเปิด-ปิดแก๊ส ทำหน้าที่เปิด-ปิดการป้อนแก๊สเข้าสู่ระบบ และวาล์วรูเข็ม ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมปริมาณของแก๊สที่ปล่อยเข้าสู่ระบบเคลือบ โดยแก๊สอาร์กอนที่เข้าสู่ระบบจะถูกป้อนผ่านวาล์วทั้งสอง ซึ่งติดตั้งอยู่ที่แผ่นปิดบนและมีท่อนำแก๊สต่อเข้ากับแคโทดซีลด์ ทำให้แก๊สอาร์กอนที่ป้อนเข้าสู่ระบบฟุ้งกระจายอยู่บริเวณด้านหน้าของเป้าสารเคลือบอย่างสม่ำเสมอทำให้เกิดกระบวนการสัปดาห์เตอริงที่ผิวหน้าเป้าสารเคลือบอย่างทั่วถึง



ภาพประกอบ 6 แสดงส่วนประกอบของภาชนะสุญญากาศของระบบการเคลือบฟิล์มบาง

ที่มา : นิรันดร์ วิทิตอนันต์. (2542). การวัดความหนาของฟิล์มทองคำซึ่งเคลือบบนแผ่นแก้ว ด้วยเทคนิคการวาวรังสีเอกซ์. วิทยานิพนธ์ วท.ม. กรุงเทพฯ : บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. ถ่ายเอกสาร.

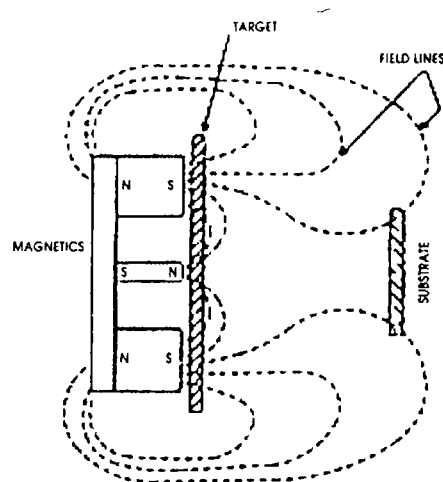
ระบบการเคลือบฟิล์มบางแบบดีซี อันบาลานซ์ แมกนีตรอน สเปตเตอริง จัดเป็นระบบการเคลือบฟิล์มบางที่มีหลักการเบื้องต้นเช่นเดียวกับระบบสเปตเตอริงโดยทั่วไป กล่าวคือเป็นการเคลือบฟิล์มที่อาศัยกระบวนการสเปตเตอริงที่เกิดขึ้นในแก๊สที่ดิสชาร์จ เนื่องจากไฟฟ้ากระแสตรงศักย์สูง แต่มีการปรับปรุงโครงสร้างเพื่อให้การเคลือบฟิล์มเกิดได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น คือการผ่านสนามแม่เหล็กในลักษณะที่ไม่สมมาตรเข้าไปในบริเวณที่เกิดการดิสชาร์จ ทำให้กลไกบางอย่างของการดิสชาร์จแตกต่างกันออกไป

หลักการทำงานของระบบการเคลือบฟิล์มบางแบบดีซี อันบาลานซ์ แมกนีตรอน สเปตเตอริง จะทำได้ภายใต้บรรยากาศความดันต่ำของแก๊สระหว่าง $10^{-3} - 10^{-6}$ ทอร์ และอาศัยการดิสชาร์จไฟฟ้าทำให้แก๊สเฉื่อยเกิดการแตกตัวเป็นไอออน ไอออนบวกของแก๊สเฉื่อยจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าให้มีพลังงานสูงภายใต้ความต่างศักย์ 400 – 10,000 โวลต์ เข้าชนเป้าสารเคลือบซึ่งต่ออยู่กับขั้วแคโทดของแหล่งกำเนิดไฟฟ้า อนุภาคสารเคลือบจะหลุดออกมาเนื่องจากการถ่ายเทโมเมนตัมของอนุภาคพลังงานสูงที่พุ่งเข้าชน อนุภาคของสารเคลือบที่หลุดออกมาจะมีพลังงานค่อนข้างสูง ดังนั้นเมื่อสารเคลือบตกบนวัสดุรองรับจะฝังตัวแน่นบนผิววัสดุรองรับทำให้การยึดเกาะมีความคงทนสูง

เพื่อให้การเคลือบฟิล์มและกระบวนการสเปตเตอริงมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ระบบการเคลือบฟิล์มบางแบบดีซี อันบาลานซ์ แมกนีตรอน จึงติดตั้งแม่เหล็กไว้ที่แคโทด ถ้าให้ความเข้มของสนามแม่เหล็กด้านใดด้านหนึ่งมากกว่าอีกด้านหนึ่งแล้วสนามแม่เหล็กที่แคโทดจะมีลักษณะไม่สมมาตร ทำให้พลาสมาของไอออนที่ขั้วทั้งสองไม่เท่ากัน ดังภาพประกอบ 7 ระบบจะมีปริมาณของไอออนและอิเล็กตรอนที่วิ่งเข้าชนวัสดุรองรับนั้นเพิ่มขึ้นมากกว่าปกติ เนื่องจากสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า ทำให้อิเล็กตรอนที่บริเวณผิวแคโทดถูกแรงลอเรนซ์ (Lorentz Force) กระทำให้เคลื่อนที่เป็นทางโค้งไปตามเส้นแรงแม่เหล็กเข้าชนแก๊สเฉื่อยและเกิดแตกตัวเป็นไอออนเพิ่มขึ้นซึ่งไอออนที่เกิดขึ้นนี้จะมีผลให้อัตราการเกิดสเปตเตอริงสูงและทำให้ฟิล์มที่เกิดขึ้นมีคุณภาพดี

ปัจจุบันมีนักวิจัยหลายกลุ่มที่นำแนวทางการจัดแม่เหล็กในลักษณะไม่สมมาตรของระบบการเคลือบ ไปประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลาย ซึ่งมีทั้งแม่เหล็กถาวรและแม่เหล็กไฟฟ้า

สำหรับในการติดตั้งแม่เหล็กที่แคโทดของระบบดีซี อันบาลานซ์ แมกนีตรอน สเปตเตอริงนั้น จะมีอิเล็กตรอนพลังงานสูงบางส่วนที่หลุดออกมาจากสนามแม่เหล็กจะถูกยึดไว้ด้วยเส้นแรงแม่เหล็กส่วนเกินของระบบ แล้วเคลื่อนที่เป็นทางโค้งไปตามเส้นแรงแม่เหล็กเข้าชนกับอะตอมของแก๊สเฉื่อยและเกิดการแตกตัวเป็นไอออน ได้พลาสมาทุติยภูมิบริเวณผิวหน้าของวัสดุรองรับ โดยพลาสมาที่เกิดขึ้นนี้จะมีส่วนช่วยในการเคลือบฟิล์มบางให้มีความหนาแน่นสูงและมีการยึดติดดีมาก



ภาพประกอบ 7 แสดงลักษณะเส้นแรงแม่เหล็กเมื่อจัดวางแบบไม่สมมาตรของระบบ
อินบาลานซ์ แมกนีตรอน สปีดเตอริง

ที่มา : ภาวดี อังค์วัฒนะ. (2541). เทคนิคในการวิเคราะห์ฟิล์มบาง. หน้า 76. กรุงเทพฯ : ศูนย์
เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ.

2. เครื่องมือวัดสเปกตรัมของการวาวรังสีเอกซ์ (X-Ray Fluorescence Spectrometer)

เครื่องมือวัดสเปกตรัมของการวาวรังสีเอกซ์ เป็นเครื่องมือการวิเคราะห์ที่อาศัยหลัก
การวาวรังสีเอกซ์ คือ การทำให้อิเล็กตรอนที่อยู่ในระดับชั้นพลังงาน (Shell) ชั้นในๆ (ชั้น K
หรือชั้น L) หลุดออกจากอะตอม โดยการยิงรังสีปฐมภูมิ (Primary Radiation) เข้าไป ถ้า
อิเล็กตรอนในระดับชั้นพลังงานชั้นในของอะตอมได้รับพลังงานเท่ากับหรือมากกว่าพลังงานยึด
เหนี่ยว (Binding Energy) ของระดับชั้นพลังงานนั้น จะทำให้อิเล็กตรอนในระดับชั้นพลังงาน
หลุดออกไปและเกิดที่ว่างขึ้น แล้วอิเล็กตรอนจากระดับชั้นพลังงานชั้นนอกซึ่งมีพลังงานสูงกว่า
เข้ามาแทนที่ว่างพร้อมกับปลดปล่อยพลังงานออกมาเป็นรังสีทุติยภูมิ (Secondary Radiation)
เรียกกระบวนการการเกิดรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นว่า การวาวรังสีเอกซ์ เนื่องจากค่าพลังงานและ
ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ที่วาวออกมานั้น มีค่าเฉพาะค่าหนึ่งๆตามชนิดของธาตุ จึงเรียกว่า
“ รังสีเอกซ์ลักษณะเฉพาะตัว ” (Characteristic X-rays)

การแทนที่อิเล็กตรอนที่หลุดออกจากระดับชั้นพลังงานชั้นใน จากระดับพลังงานหนึ่ง ไปยังระดับพลังงานหนึ่งนั้นจะอธิบายได้จากทฤษฎีอะตอม คืออะตอมประกอบด้วยนิวเคลียส เป็นแกนกลาง มีอิเล็กตรอนโคจรรอบและอิเล็กตรอนจะจัดเรียงตัวอยู่ในระดับชั้นพลังงาน ต่างๆกัน เช่น ชั้น K, L, M, N, เป็นต้น ในแต่ละระดับชั้นพลังงานยังแบ่งออกเป็นระดับพลังงาน ย่อย (Subshell) อีก โดยมีเลขควอนตัม n, ℓ, j ตามหลักกลศาสตร์ควอนตัม ดังนั้นใน ระดับชั้นพลังงานของชั้น K, L, M, N, จึงมีจำนวนระดับชั้นพลังงานย่อยเท่ากับ 1, 3, 5, และ 7 ตามลำดับ

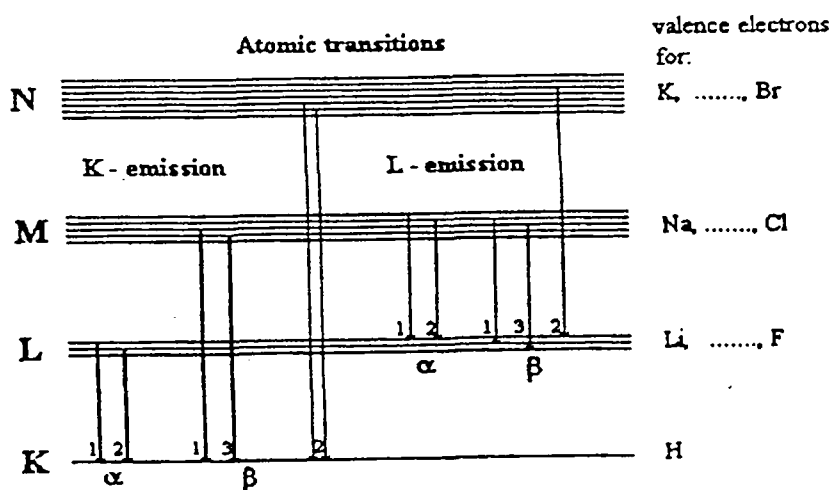
เมื่ออิเล็กตรอนในระดับชั้นพลังงาน K ถูกกระตุ้นให้หลุดออกไปนอกระดับชั้นพลังงาน อิเล็กตรอนในชั้น L และ M จะเข้ามาแทนที่ตามกฎการเลือก (Selection Rule) คือ

$$\Delta n \geq 1$$

$$\Delta \ell = \pm 1$$

$$\Delta j = 0 \text{ หรือ } \pm 1$$

จะเห็นว่าอิเล็กตรอนจากระดับชั้นพลังงาน L หรือ M จะเข้ามาแทนที่ระดับชั้นพลังงาน K ได้ 2 ทาง คือ จากระดับชั้นพลังงานย่อย L_{II} และ L_{III} หรือ M_{II} และ M_{III} ตามลำดับ ดังภาพประกอบ 8



ภาพประกอบ 8 แสดงการแทนที่ของอิเล็กตรอนที่ทำให้เกิดรังสีเอกซ์ลักษณะเฉพาะตัว

ที่มา : Schlotz, R. & Uhlig, S. (2000). *Introduction to X-Ray Fluorescence Analysis (XRF)*.

p. 4. Karlsruhe : Bruker Analytical X-Ray Systems.

เมื่อลำรังสีเอกซ์ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นลำรังสีเอกกรงค์ (Monochromatic) มีความเข้ม I_0 ผ่านตัวกลางความหนา x ความเข้มของรังสีเอกซ์จะถูกดูดกลืนหรือถูกลดทอน (attenuation) จนเหลือความเข้มเป็น I ดังนั้น I จะต้องมิต่ำกว่า I_0 เสมอ สำหรับการดูดกลืนรังสีเอกซ์ของสสารจะมีความสัมพันธ์ของ I_0 และ I คือ

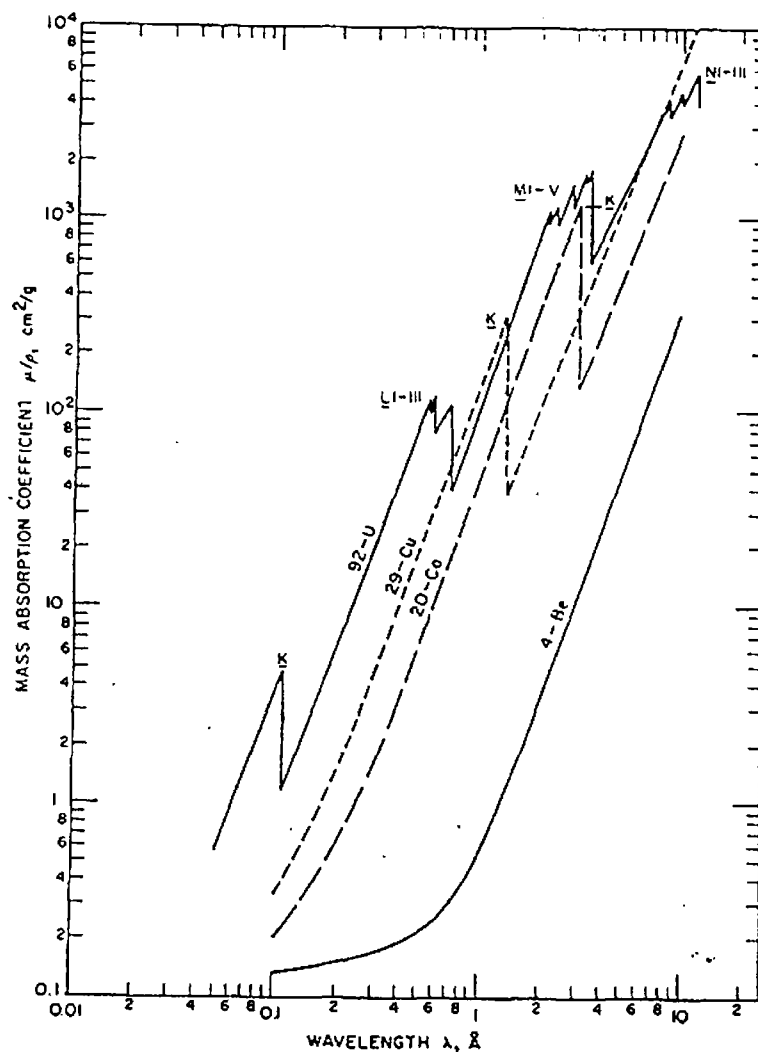
$$I = I_0 e^{-\mu_m x \rho} \quad \dots\dots (2.1)$$

เมื่อ x คือ ความหนาของสสาร หน่วยเซนติเมตร

μ_m คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเชิงมวล หน่วยเซนติเมตรยกกำลังสองต่อกรัม

ρ คือ ความหนาแน่นของสสาร หน่วยกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

ความสามารถในการดูดกลืนโฟตอนรังสีเอกซ์ของสสาร พิจารณาจากสัมประสิทธิ์การดูดกลืน (Absorption Coefficient) ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงตามขนาดพลังงานของโฟตอนที่ตกกระทบ จนถึงพลังงานค่าหนึ่งที่สามารถดูดกลืนได้ดีที่สุด เรียกพลังงานจุดนี้ว่า สันของการดูดกลืน (Absorption Edges) แต่เมื่อพลังงานโฟตอนเพิ่มขึ้นมากกว่าจุดนี้ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนจะลดลง โดยธาตุแต่ละชนิดจะมีหลายสันการดูดกลืน ดังภาพประกอบ 9 เช่น 1 K (K_{ab}) และ 3 L (L_{Iab} , L_{IIab} และ L_{IIIab}) เป็นต้น



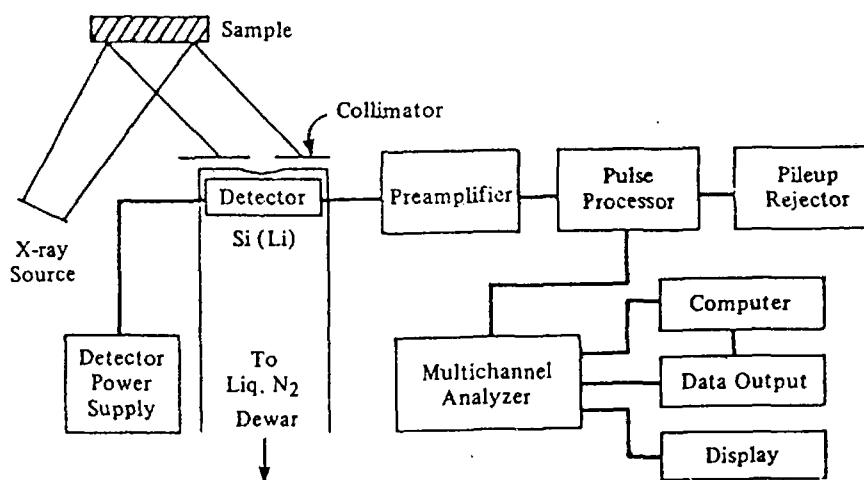
ภาพประกอบ 9 แสดงลักษณะสันของการดูดกลืน (Absorption Edges) ของธาตุยูเรเนียม ทองแดง แคลเซียม และเบริลเลียม

ที่มา : Bertin, E.P. (1970). *Principles and Practice of X-Ray Spectrometric Analysis*. p .28. New Jersey : RCA Laboratories David Sarnoff Research Center Princeton.

2.1 เครื่องวัดสเปกตรัมของการวาวรังสีเอกซ์แบบการกระจายพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometer : EDXRF)

EDXRF มีส่วนประกอบของเครื่องมือที่สำคัญ ดังภาพประกอบ 10 คือ

1. แหล่งกำเนิดรังสี เครื่องมือชนิดนี้สามารถใช้แหล่งกำเนิดรังสีได้ทั้งจากหลอดรังสีเอกซ์หรือไอโซโทปของกัมมันตรังสี ถ้าเป็นหลอดรังสีเอกซ์จะใช้หลอดทั้งสแตนเป็นแคโทด ส่วนเป้าแอโนดเป็นโลหะพวกทองแดง โมลิบดีนัม นิกเกิล โรเดียม โดยรังสีเอกซ์จะเกิดขึ้นเมื่อทั้งสแตนได้รับความร้อนทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมา แล้วอิเล็กตรอนนี้จะถูกเร่งด้วยความต่างศักย์สูงที่จ่ายระหว่างขั้วแอโนดและขั้วแคโทดไปชนเป้าแอโนด และเกิดการปลดปล่อยรังสีเอกซ์ออกมา
2. ตัวทำขนาน (Collimator) ทำหน้าที่บังคับลำรังสีเอกซ์ให้เป็นลำขนานเพื่อเข้าสู่เครื่องตรวจวัด
3. เครื่องตรวจวัด จะเป็นเครื่องตรวจวัดชนิดสารกึ่งตัวนำ ที่ใช้เป็นซิลิกอนที่มีลิเทียมเจือปนอยู่ [Si(Li)] ซึ่งเครื่องตรวจวัดชนิดนี้มีกำลังแยกพลังงานในแต่ละช่วงได้ดี



ภาพประกอบ 10 แสดงระบบการวาวรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน

ที่มา : แม้น อมรสิทธิ์ และอมร เพชรสม. (2534). พรินซิเพิล แอนด์ เทคนิก ออฟ อินสตรูเมนทอลส์ อนาไลซิส (Principles and Techniques of Instrumental Analysis). หน้า 450. กรุงเทพฯ : ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อุปกรณ์ชุดนี้จะมีองค์ประกอบไม่ซับซ้อนมากเมื่อเปรียบเทียบกับระบบการวัดสเปกตรัมของการวาวรังสีเอกซ์แบบกระจายความยาวคลื่น คือ ระบบการวัดสเปกตรัมของการวาวรังสีเอกซ์แบบการกระจายพลังงาน จะจัดให้ระบบแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์และเครื่องตรวจวัดเป็นแบบตรึงอยู่กับที่ ไม่มีผลึกที่ใช้ในการเลี้ยวเบนรังสี ส่วนตำแหน่งสารตัวอย่างจะวางอยู่ใกล้กับเครื่องตรวจวัดรังสี เครื่องตรวจวัดจึงวัดรังสีเอกซ์ที่วาวออกมาจากสารตัวอย่างโดยตรง จึงส่งผลให้ความแรงของรังสีที่เข้าสู่เครื่องตรวจวัดแบบนี้จะมากกว่าระบบการวัดแบบกระจายความยาวคลื่นถึง 100 เท่า และอุปกรณ์ชุดนี้สามารถวัดความเข้มรังสีเอกซ์ที่ปล่อยออกมาได้พร้อมกันหลายช่วง ดังนั้นเครื่องตรวจวัดที่ใช้จึงต้องมีกำลังแยกพลังงานในแต่ละช่วงได้ดี

การวิเคราะห์สารตัวอย่างด้วยเทคนิค EDXRFS

จากอุปกรณ์ในภาพประกอบ 10 มีขั้นตอนของกระบวนการวิเคราะห์ คือเมื่อลำรังสีเอกซ์ที่ได้จากแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ ถูกส่งไปยังสารตัวอย่างเพื่อให้เกิดอันตรกิริยากับธาตุต่างๆในสารตัวอย่าง จึงเกิดการวาวของรังสีเอกซ์ขึ้นและให้รังสีเอกซ์ที่วาวออกมาผ่านตัวทำขนาน เพื่อทำให้ลำรังสีเอกซ์เป็นลำขนานเข้าสู่เครื่องตรวจวัดโดยตรง สัญญาณที่ได้จากเครื่องตรวจวัดถูกส่งไปยังเครื่องขยายสัญญาณให้ใหญ่พอที่จะวัดได้ถูกต้อง เพื่อส่งไปยังเครื่องวิเคราะห์ เครื่องวิเคราะห์จะทำหน้าที่แยกขนาดพลังงานในแต่ละช่วง จากสเปกตรัมของรังสีเอกซ์ที่วาวออกมาจะทำให้ทราบถึงชนิดและปริมาณของธาตุในสารตัวอย่างที่วิเคราะห์ได้

2.2 เครื่องวัดสเปกตรัมของการวาวรังสีเอกซ์แบบกระจายความยาวคลื่น

(Wavelength Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometer : WDXRFS)

WDXRFS โดยทั่วไปจะประกอบด้วยส่วนต่างๆที่สำคัญ ดังภาพประกอบ 11 คือ

1. แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ (X-ray Generator) จะใช้หลอดรังสีเอกซ์ชนิดหน้าต่างด้านปลาย เป็นแหล่งกำเนิดรังสี ประกอบด้วยขั้วแคโทดที่ทำหน้าที่กำเนิดอิเล็กตรอน เป็นไส้หลอดจัดวางให้มีลักษณะรูปร่างแหวน (Annular Cathode) วางรอบๆเป้าแอโนด ส่วนเป้าแอโนดหรือขั้วแอโนดที่ใช้เป็นธาตุโรเดียม (Rh) จะสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งธาตุเบาและธาตุหนัก

รังสีเอกซ์เกิดจากการทำให้ไส้หลอดที่เป็นแคโทดร้อนจนอิเล็กตรอนหลุดออกมาและถูกเร่งเข้าสู่เป้าแอโนด โดยการปรับความต่างศักย์ระหว่างขั้วทั้งสอง เมื่ออิเล็กตรอนชนขั้วแอโนด ก็จะปล่อยรังสีเอกซ์ออกมา ถึงแม้หลอดรังสีเอกซ์ชนิดนี้ จะใช้ความต่างศักย์ที่เร่งอิเล็กตรอนไม่สูงมากนัก คือ ไม่เกิน 60 kV แต่ก็จำเป็นต้องมีระบบหล่อเย็นซึ่งใช้น้ำเป็นตัวระบายความร้อนที่บริเวณขั้วแอโนดตลอดเวลา เพื่อป้องกันไม่ให้หลอดเสื่อมคุณภาพ

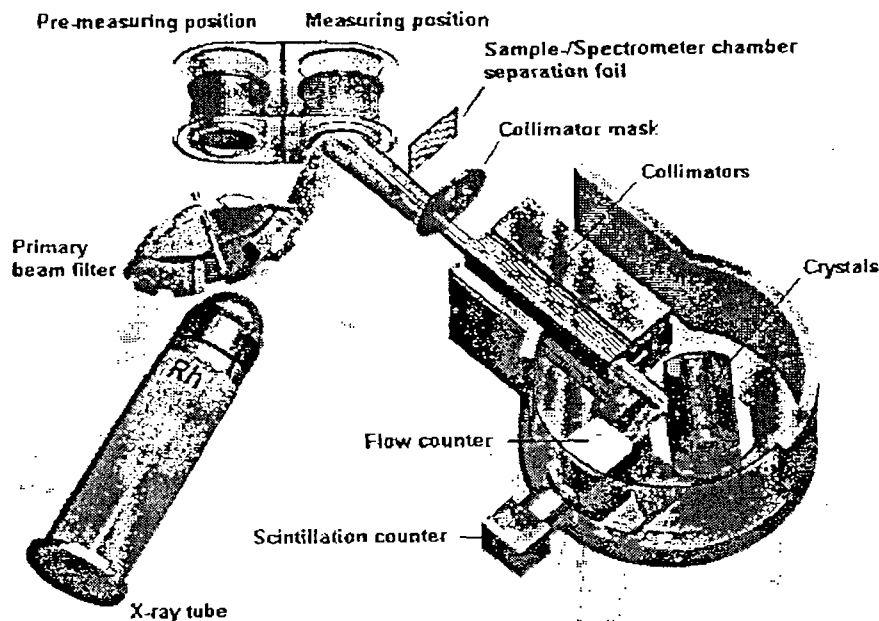
2. หน้ากากที่เป็นตัวทำขนาน (Collimator Masks) ทำหน้าที่ในการตัดลำรังสีเอกซ์ที่วาวออกมาจากสารตัวอย่างให้มีขนาดแคบลงก่อนจะเข้าสู่ตัวทำขนาน ซึ่งมีลักษณะเป็นช่องกลมขนาดเล็ก

3. ระบบบรรยากาศในเครื่องวัดสเปกตรัม บรรยากาศที่บรรจุอยู่ในเครื่องวัดสเปกตรัมนั้นเป็นสิ่งสำคัญ มิฉะนั้นรังสีเอกซ์ที่เกิดจากธาตุที่จะวิเคราะห์อาจถูกดูดกลืนหมดไปได้ หรือทำให้ความเข้มของรังสีเอกซ์ลดลง จะส่งผลให้การหาปริมาณผิดพลาดได้ ดังนั้นในการวิเคราะห์สารตัวอย่าง ควรจะเลือกใช้บรรยากาศให้เหมาะสม เช่น ถ้าสารตัวอย่างเป็นของแข็งให้ใช้ระบบสุญญากาศ เป็นต้น

4. ตัวทำขนาน (Collimator) มีลักษณะภายในเป็นแผ่นโลหะยาววางขนานกันเป็นจำนวนมากและห่างกันเล็กน้อย โดยวางตัวทำขนานไว้ระหว่างหน้ากากที่เป็นตัวทำขนานกับผลึกวิเคราะห์ ตัวทำขนานทำหน้าที่บังคับลำรังสีเอกซ์ที่เข้ามาให้อยู่ในแนวขนานเพื่อเข้าสู่ผลึกวิเคราะห์

5. ผลึกวิเคราะห์ (Analyzing Crystal) ทำหน้าที่กระจายความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ที่มีความยาวคลื่นแตกต่างกันออกจากกันไปที่มุมต่างๆ โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนตามกฎของแบรกก์ (Bragg's Law) ค่าของมุมที่เลี้ยวเบนผ่านผลึกที่สามารถวัดได้อยู่ระหว่าง 0 ถึง 90 องศา ซึ่งการกระจายความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ที่ทำให้เกิดการแทรกสอดของคลื่นแบบเสริมกัน (Constructive) จะมีความสัมพันธ์กับมุมที่รังสีตกกระทบบนผลึกตามกฎของแบรกก์ เขียนสมการได้ คือ $2d \sin\theta = n\lambda$

6. เครื่องตรวจวัดรังสี (X-ray Detector) มีหน้าที่รับรังสีเอกซ์ที่แยกความยาวคลื่นโดยผลึกแล้วผลึกจะหมุนเพื่อเปลี่ยนมุมให้รังสีเอกซ์ที่วาวตกกระทบบน โดยมีเครื่องตรวจวัดหมุนไปรับรังสีตามมุมที่สอดคล้องกัน เครื่องตรวจวัดรังสีที่ใช้ในเครื่องมือในงานวิจัยชุดนี้มีด้วยกัน 2 แบบ คือ เครื่องตรวจวัดชนิดประกายแสง (Scintillation Detector) และเครื่องตรวจวัดแบบบรรจุแก๊สเชิงสัดส่วน (Gas Proportional Counter)



ภาพประกอบ 11 แสดงชุดอุปกรณ์เครื่องวิเคราะห์การวาวรังสีเอกซ์ชนิดกระจายความยาวคลื่น

ที่มา : Schlotz, R. & Uhlig, S. (2000). *Introduction to X-Ray Fluorescence Analysis (XRF)*.
p. 40. Karlsruhe : Bruker Analytical X-Ray Systems.

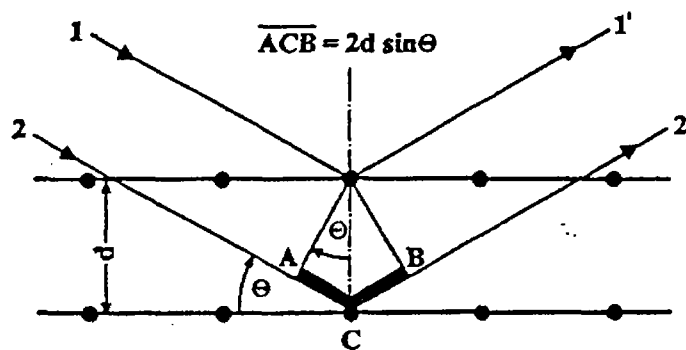
การวิเคราะห์สารตัวอย่างด้วยเทคนิค WDXRFS

จากชุดอุปกรณ์ในภาพประกอบ 11 การวิเคราะห์จะมีขั้นตอนต่างๆของกระบวนการ คือเมื่อให้ลำรังสีเอกซ์ปฐมภูมิตกกระทบบนสารตัวอย่าง ถ้าลำรังสีเอกซ์ปฐมภูมิมีพลังงานสูงพอที่จะกระตุ้นธาตุต่างๆในสารตัวอย่าง แล้วเกิดการวาวของรังสีเอกซ์ขึ้น เรียก รังสีเอกซ์ทุติยภูมิ ให้รังสีเอกซ์ทุติยภูมิที่วาวออกมาผ่านตัวทำขนาน เพื่อให้ลำรังสีเอกซ์เป็นลำขนานและบังคับไปในทิศทางที่ต้องการ กล่าวคือให้ไปตกกระทบบนผลึกวิเคราะห์ซึ่งอยู่ในเครื่องวัดสเปกตรัมที่ทำให้เป็นสภาวะสุญญากาศ ผลึกวิเคราะห์จะทำหน้าที่กระจายหรือแยกรังสีเอกซ์ที่มีความยาวคลื่นต่างๆให้เข้าสู่เครื่องตรวจวัดเป็นมุม 2θ โดยเครื่องตรวจวัดจะทำการตรวจวัดตั้งแต่มุมน้อยที่สุดจนถึงมุมมากที่สุดตามประสิทธิภาพของเครื่องตรวจวัด สัญญาณที่วัดได้ถูกส่งไปยังเครื่องเก็บข้อมูล โดยผลการวิเคราะห์จะแสดงออกมาในรูปสเปกตรัมระหว่างค่าของความเข้มของรังสีเอกซ์ที่วัดได้ กับค่ามุม 2θ

3. เครื่องมือวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffractometer : XRD)

เครื่องมือวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ จะอาศัยหลักการของสองปรากฏการณ์รวมกัน คือ การเกิดการเลี้ยวเบน (Diffraction) และการแทรกสอด (Interference) ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อลำรังสีเอกซ์ตกกระทบบนผลึกที่มีการจัดเรียงตัวของอะตอมในลักษณะที่เป็นกลุ่มของระนาบที่ขนานกัน ภายในผลึกมีระยะห่างกันเท่ากับ d และแต่ละระนาบจะเกิดการสะท้อนรังสีตกกระทบบางส่วนออกมา แนวรังสีสะท้อนที่วัดได้ออกมาจากกลุ่มของระนาบที่ขนานกันเกิดแทรกสอดกันแบบเสริมกัน ตามเงื่อนไขของแบรกก์

พิจารณาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ด้วยกฎของแบรกก์ (Bragg's Law) ดังภาพประกอบ 12



ภาพประกอบ 12 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์โดยผลึกตามกฎของแบรกก์

ที่มา : Schlotz, R. & Uhlig, S. (2000). *Introduction to X-Ray Fluorescence Analysis (XRF)*.
p. 24. Karlsruhe : Bruker Analytical X-Ray Systems.

เมื่อลำรังสีเอกซ์ที่มีความยาวคลื่น λ ตกกระทบบนผลึก โดยทำมุม θ กับระนาบของผลึก จะเกิดการเลี้ยวเบนจากชุดระนาบในชุดเดียวกัน ถ้าพิจารณาลำรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบบแล้วเกิดการสะท้อนจากระนาบ 2 ระนาบในชุดเดียวกัน จะพบว่าระยะทางเดินที่แตกต่างกัน (Path Difference) ของลำรังสีทั้งสองมีค่าเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่น ทำให้รังสีเอกซ์ทั้งสองที่ ถูกกระเจิงอยู่ในเฟสเดียวกัน นั่นคือ

$$AB + BC = n\lambda \quad \dots\dots (2.2)$$

จะเห็นได้ว่า

$$AC = BC = d \sin \theta \quad \dots\dots (2.3)$$

ดังนั้น เมื่อคลื่นรังสีเอกซ์เกิดการแทรกสอดแบบเสริมที่มุม θ จะได้

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad \dots\dots (2.4)$$

เมื่อ θ คือ มุมระหว่างรังสีตกกระทบกับระนาบของผลึก

d คือ ระยะห่างระหว่างระนาบของผลึก

λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์

n คือ เลขจำนวนเต็มมีค่าเท่ากับ 1,2,3,.....,n

เครื่องมือวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ มีส่วนประกอบต่างๆที่สำคัญ ดังภาพประกอบ 13 คือ

1. แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ (X-ray Generator) ตำแหน่ง R สำหรับเครื่องมือการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ จะใช้เวลาวัดความเข้มของรังสีเอกซ์ที่เลี้ยวเบนนาน ดังนั้นความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ออกมาจากเครื่องกำเนิดจะต้องมีเพียงพอและสม่ำเสมอ โดยแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่ใช้จะเป็นหลอดรังสีเอกซ์ชนิดหน้าต่างด้านข้าง จะมีส่วนประกอบสำคัญ คือ แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนที่เป็นขั้วแคโทด ขั้วแอโนดเป็นเป้าโลหะของทองแดง (Cu) และเครื่องกำเนิดโวลเตจสูงประมาณ 100 kV จึงต้องมีระบบหล่อเย็นช่วยระบายความร้อนให้กับหลอดรังสีเอกซ์ด้วย ส่วนหลักการเกิดรังสีเอกซ์จะมีกระบวนการเช่นเดียวกับหลอดรังสีเอกซ์ชนิดหน้าต่างด้านปลายของ WDXRFS

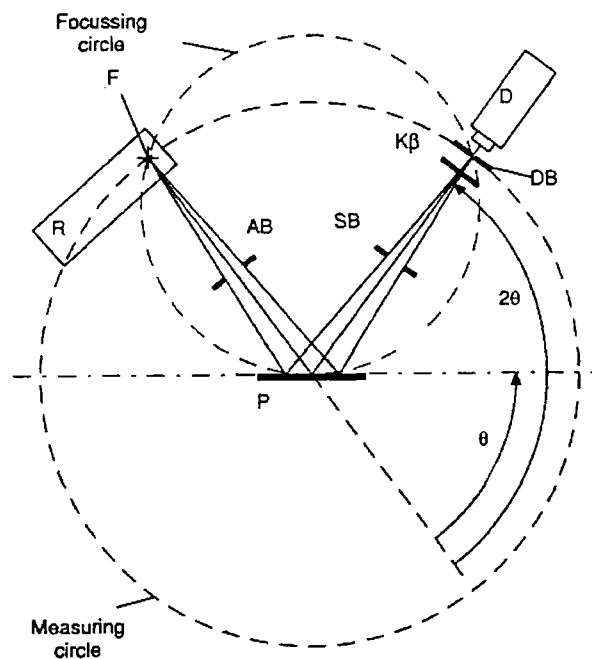
2. โกนิโอมิเตอร์ (Goniometer) เป็นองค์ประกอบที่สำคัญของเครื่องมือการเลี้ยวเบน ประกอบด้วยระบบสลิต คือ

ก. สลิตช่องลู่ออกรังสี (Divergence Slit) จะวางไว้ระหว่างหลอดรังสีเอกซ์และตำแหน่งที่วางสารตัวอย่าง (AB) ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวจำกัดปริมาณการลู่ออกของรังสีให้ตกลงบนเฉพาะสารตัวอย่าง

ข. สลิตช่องรับรังสีเอกซ์ (Receiving Slit) จะวางอยู่ในตำแหน่ง (SB) ซึ่งอยู่ระหว่างที่วางสารตัวอย่าง (P) กับเครื่องตรวจวัด (DB) โดยสลิตช่องรับรังสีเอกซ์และเครื่องตรวจวัดจะต้องติดอยู่กับชิ้นส่วนที่หมุนได้รอบสารตัวอย่าง ซึ่งสลิตช่องรับรังสีเอกซ์จะทำหน้าที่โฟกัสรังสีเอกซ์ที่เลี้ยวเบนออกมาจากสารตัวอย่างให้เข้าสู่เครื่องตรวจวัด

ค. ฟิลเตอร์ (Filter) จะวางไว้ระหว่างช่องรับรังสี (SB) และเครื่องตรวจจับ (DB) ทำหน้าที่ในการกรองรังสีเอกซ์ที่มีความยาวคลื่นที่ไม่ต้องการออกก่อนเข้าสู่เครื่องตรวจจับ สำหรับการวิเคราะห์ในงาน XRD ส่วนใหญ่จะใช้เวลาความยาวคลื่นในช่วงแคบๆ และมีความยาวคลื่นเดียว ซึ่งมักจะใช้เส้น K_{α} ที่มีความเข้มสูง จึงใช้โลหะนิเกิล (Ni) เป็นตัวกรองความยาวคลื่นเส้น K_{β} ออกไป

3. เครื่องตรวจจับรังสี (X-ray Detector) วางไว้ในตำแหน่ง DB คือ เครื่องตรวจจับชนิดประกายแสง (Scintillation Detector) จะใช้โซเดียมไอโอไดด์เป็นผลึกกระจายแสง เครื่องตรวจจับที่ใช้สามารถวัดรังสีเอกซ์ได้ในช่วงระหว่าง 0.05 – 0.3 นาโนเมตร



ภาพประกอบ 13 แสดงอุปกรณ์ชุดวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

ที่มา : Schlotz, R.& Uhlig, S. (2000). *Introduction to X-Ray Diffractometer Analysis (XRD)*.
p. 3-2. Karlsruhe : Bruker Analytical X-Ray Systems.

การวิเคราะห์สารตัวอย่างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

จากชุดอุปกรณ์ในภาพประกอบ 13 จะมีกระบวนการวิเคราะห์ คือรังสีเอกซ์ที่เกิดจากหลอดรังสีเอกซ์จะถูกจำกัดปริมาณโดยสลิตช่องลู่ออก (Divergence Slit) ให้ตกกระทบเฉพาะตัวอย่างซึ่งวางอยู่ในโกนิโอมิเตอร์ รังสีเอกซ์ที่เลี้ยวเบนออกจากสารตัวอย่างจะถูกโฟกัสโดยสลิตช่องรับรังสีเอกซ์ (Receiving Slit) และจะกรองเส้นรังสีเอกซ์ $K\beta$ ออกไปโดยใช้ฟิลเตอร์ เพื่อให้มีเส้นรังสีเอกซ์ความยาวคลื่นเดียว คือ เส้นรังสีเอกซ์ $K\alpha$ ผ่านเข้าสู่เครื่องตรวจวัด และระบบการวัดจะจัดให้สลิตช่องรับรังสีเอกซ์ และเครื่องตรวจวัดติดอยู่กับชิ้นส่วนที่สามารถหมุนได้รอบสารตัวอย่าง เพื่อวัดความเข้มของรังสีเอกซ์ที่เลี้ยวเบนออกมา ดังภาพประกอบ 12 สารตัวอย่างและเครื่องตรวจวัดจะถูกจัดให้อยู่ในสภาพการหมุนไปด้วยอัตราส่วนของมุมเป็น $\theta : 2\theta$ เสมอ จึงทำให้ผลการวิเคราะห์จะแสดงออกมาในรูปสเปกตรัมระหว่างค่าความเข้มของรังสีเอกซ์ที่วัดได้ กับมุม 2θ

4.เทคนิคในการวัดความหนาของฟิล์มบางด้วยวิธีการวาวรังสีเอกซ์และวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

เทคนิคในการวัดความหนาของฟิล์มบางโดยการใช้รังสีเอกซ์จะมีวิธีการที่แตกต่างจากเครื่องมือวัดชนิดอื่นๆ ซึ่งเป็นการวัดความหนาของฟิล์มบางโดยตรง แต่การใช้เทคนิคทางรังสีจะเป็นการวัดความหนาของฟิล์มบางโดยทางอ้อม โดยอาศัยหลักการพื้นฐานที่สำคัญ คือ

1.ถ้าการเลี้ยวเบนหรือการวาวของรังสีเอกซ์ที่เกิดจากวัสดุรองรับของฟิล์มบาง ความเข้มของรังสีเอกซ์ที่วัดได้จะลดลงตามความหนาของฟิล์มบาง เนื่องจากการดูดกลืนของฟิล์ม

2.ถ้าการเลี้ยวเบนหรือการวาวของรังสีเอกซ์ที่เกิดจากฟิล์มบาง ความเข้มของรังสีเอกซ์ที่วัดได้จะเพิ่มขึ้นตามความหนาของฟิล์มบาง

ในการวัดความหนาของฟิล์มบางโดยเทคนิคทางรังสีที่อาศัยหลักการพื้นฐานดังกล่าว สามารถแบ่งวิธีการวัดความหนาของฟิล์มบางได้เป็น 2 วิธี คือ

4.1 การวัดความหนาของฟิล์มบางโดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

พิจารณาการวิเคราะห์ฟิล์มบางด้วยหลักการเลี้ยวเบน คือเมื่อลำรังสีเอกซ์ตกกระทบบนระนาบผลึกของฟิล์มบางด้วยมุมแบรกก์ (Bragg Angle) ลำรังสีเอกซ์จะเกิดการเลี้ยวเบนออกจากฟิล์มบาง แล้วจะสะท้อนเข้าสู่เครื่องตรวจวัด ในการวัดความเข้มที่เลี้ยวเบนออกมาจากฟิล์มบาง สามารถพิจารณาได้ 2 กรณี คือ

แต่จากภาพประกอบ 14

$$\ell = \frac{1}{\sin \alpha} \quad AB = \frac{x}{\sin \alpha} \quad BC = \frac{x}{\sin \beta}$$

ดังนั้นจากสมการ (2.5) จะได้ผลรวมของความเข้มที่เลี้ยวเบนออกมาจากชั้นความหนาเรื่อยๆที่ความลึกต่ำกว่าผิวเป็นระยะ x คือ

$$dI_x = \frac{I_0 ab e^{-\mu x(1/\sin \alpha + 1/\sin \beta)}}{\sin \alpha} dx \quad \dots\dots(2.6)$$

สำหรับการจัดวางสารตัวอย่างที่ใช้ในเครื่องมือการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ จะให้ $\alpha = \beta = \theta$ จากสมการ (2.6) สามารถเขียนสมการใหม่ได้ คือ

$$dI_x = \frac{I_0 ab e^{-2\mu x/\sin \theta}}{\sin \theta} dx \quad \dots\dots(2.7)$$

จากสมการ (2.7) ถ้าพิจารณาผลรวมของความเข้มที่เลี้ยวเบนออกมาจากชั้นความหนาในช่วง 0 ถึง t จะได้

$$I_x = I_{dt} = \frac{I_0 ab (1 - e^{-2\mu t/\sin \theta})}{2\mu} \quad \dots\dots(2.8)$$

แต่ถ้าพิจารณาผลรวมของความเข้มที่เลี้ยวเบนออกมาที่เกิดจากความหนานันต์ (Infinite Thickness) ($x = \infty$) โดยการอินทิเกรตสมการ (2.7) จะได้

$$I_{ds} = \frac{I_0 ab}{2\mu} \quad \dots\dots(2.9)$$

ดังนั้นจากสมการที่ (2.8) และ (2.9) จะได้

$$\frac{I_{dt}}{I_{ds}} = (1 - e^{-2\mu t/\sin\theta}) \quad \text{.....(2.10)}$$

จากสมการ (2.10) ถ้าให้

$$z = 2\mu / \sin\theta \quad \text{.....(2.11)}$$

ดังนั้นจะได้

$$\frac{I_{dt}}{I_{ds}} = (1 - e^{-zt}) \quad \text{.....(2.12)}$$

เมื่อ I_{dt} คือ ความเข้มของรังสีเอกซ์ที่เลี้ยวเบนออกมาจากผิผลึก

I_{ds} คือ ความเข้มของรังสีเอกซ์อ้อมตัว

z คือ แฟกเตอร์ของระบบเชิงเรขาคณิต

t คือ ความหนาของผลึกบาง

สำหรับการเลี้ยวเบนจากฟิล์มโดยตรง จากหลักการที่กล่าวว่าความเข้มของรังสีที่เลี้ยวเบนจากฟิล์ม จะมีความสัมพันธ์กับความหนาของฟิล์มคือ ความเข้มรังสีจากการเลี้ยวเบนจะเพิ่มขึ้นตามความหนาของฟิล์มที่เพิ่มขึ้น แต่อัตราการเพิ่มความเข้มจะคงที่อยู่ที่ค่าความหนาค่าหนึ่ง เรียกว่า ความหนาวิกฤต (Critical Thickness) เมื่อความหนามากขึ้นไปอีกจะไม่มีผลต่อความเข้มที่เลี้ยวเบน ดังนั้นความเข้มรังสีที่วัดได้จะคงที่ จัดเป็นความเข้มอ้อมตัวและได้นิยามความหนานั้นคือ ความหนาที่ความเข้มที่เลี้ยวเบนออกมาโดยชั้นฟิล์มบางชั้นเดียว ที่เกิดจากด้านหลังของฟิล์มบางเป็น 1/1000 เท่าของความเข้มรังสีเอกซ์ที่เลี้ยวเบนออกมาในชั้นฟิล์มบางชั้นเดียวที่เป็นผิวด้านหน้านั้น จะได้

$$\frac{dI_{dt}(t=0)}{dI_{dt}(t=t)} = 1000 = e^{2\mu t/\sin\theta} \quad \text{.....(2.13)}$$

หรือจากสมการที่ (2.13) ได้ความหนาแน่นของฟิล์ม คือ

$$t_{\infty} = \frac{3.45 \sin \theta}{\mu} \quad \dots\dots(2.14)$$

เมื่อ

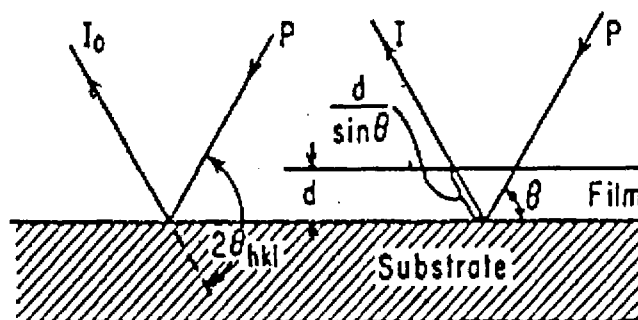
t_{∞} คือ ความหนาแน่นของฟิล์ม

μ คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงเส้น

θ คือ มุมระหว่างรังสีตกกระทบกับระนาบของผลึก

2. กรณีการเลี้ยวเบนจากวัสดุรองรับ

จากภาพประกอบ 15 ถ้าพิจารณาความเข้มของลำรังสีตกกระทบ (P) ทะลุผ่านไปตกกระทบวัสดุรองรับที่มีความลึก d แล้วเลี้ยวเบนออกมาจากวัสดุรองรับ ซึ่งสามารถวัดความเข้มของลำรังสีที่เลี้ยวเบนออกมา พบว่าความเข้มของรังสีเอกซ์ที่วัดได้มีบางส่วนจะถูกดูดกลืนไปทำให้ความเข้มลดลง การดูดกลืนนี้เกิดจากการดูดกลืนของฟิล์มบางตามระยะที่ต่ำกว่าผิวหน้า สามารถหาอัตราส่วนความเข้มจากสารตัวอย่างที่เคลื่อน I ต่อความเข้มของสารตัวอย่างที่ยังไม่ได้เคลื่อน I_0 ได้



ภาพประกอบ 15 แสดงการเลี้ยวเบนจากวัสดุรองรับของฟิล์มบาง

ที่มา : Johns, W.D. (1967). "Measurement of Film Thickness," *In Handbook of X-rays*.
p. 44-2. New York : McGraw – Hill.

จากภาพประกอบ 15 จะสามารถหาอัตราส่วนของความเข้มของรังสีเอกซ์ที่เลี้ยวเบนออกมาจากวัสดุรองรับ คือ

$$\frac{I}{I_0} = e^{(-\mu)(d/\sin \theta + d/\sin \theta)} \quad \text{.....(2.15)}$$

จากสมการ (2.15) จะได้

$$\frac{I}{I_0} = e^{-(2\mu d/\sin \theta)} \quad \text{.....(2.16)}$$

เมื่อ μ คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงเส้น

ถ้าให้ μ_m คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวล และความหนาฟิล์ม t จากสมการ (2.16) จะได้

$$\frac{I_t}{I_0} = e^{-2\mu_m \rho t / \sin \theta} \quad \text{.....(2.17)}$$

เมื่อ

I_0 คือ ความเข้มของรังสีที่เลี้ยวเบนขณะยังไม่เคลือบฟิล์ม

I_t คือ ความเข้มของรังสีที่เลี้ยวเบนหลังการเคลือบฟิล์ม

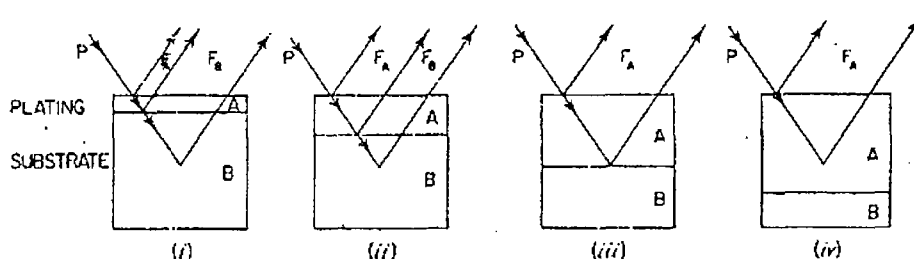
μ_m คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวล

t คือ ค่าความหนาของฟิล์ม

ρ คือ ค่าความหนาแน่นของฟิล์ม

4.2 การวัดความหนาของฟิล์มบางโดยการวาวรังสีเอกซ์

ในการวัดความหนาของฟิล์มบางโดยวิธีการวาวรังสีเอกซ์ จะอาศัยความเข้มของรังสีเอกซ์ที่วาวออกมาเพื่อหาค่าความหนาของฟิล์มบาง วิธีการคือถ้าให้พลังงานของรังสีเอกซ์ปฐมภูมิมีค่ามากพอก็จะเกิดการกระตุ้นให้ธาตุในฟิล์มและวัสดุรองรับเกิดการวาวออกมา ถ้าการวาวรังสีเอกซ์ที่เกิดจากวัสดุรองรับความเข้มที่วัดได้จะลดลงตามความหนาของฟิล์มบาง แต่ถ้าการวาวรังสีเอกซ์ที่เกิดจากฟิล์ม ความเข้มที่วัดได้จะเพิ่มขึ้นตามความหนาของฟิล์มบาง ซึ่งจะสามารถพิจารณาการวาวรังสีเอกซ์ของฟิล์ม A ที่เป็นธาตุบริสุทธิ์ชั้นเดียว เคลือบบนวัสดุรองรับ B ที่มีความหนาแตกต่างกัน ดังภาพประกอบ 16



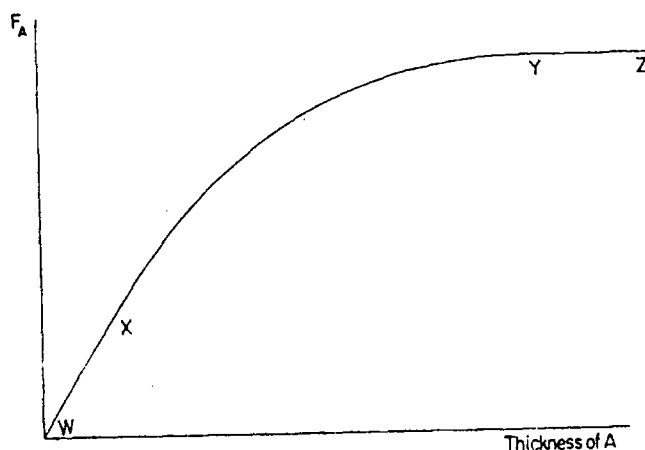
ภาพประกอบ 16 แสดงการวาวของรังสีเอกซ์จากฟิล์มบางที่เคลือบที่ความหนาต่าง ๆ กัน

ที่มา : Whiston, C. (1991). *X-Ray Methode : Analytical Chemistry by Open Learning*.

p. 269. London : John Wiley & Sons.

จากภาพประกอบ 16 เมื่อลำรังสีเอกซ์ปฐมภูมิ (P) ตกกระทบบนฟิล์มบาง จะทะลุผ่านชั้นของฟิล์มบางลงไปยังวัสดุรองรับแล้วเกิดการวาวรังสีเอกซ์ทุติยภูมิออกมาจากฟิล์มและวัสดุรองรับ คือ F_A และ F_B ตามลำดับ ดังรูปที่ (i) และ (ii) ถ้าพิจารณาความเข้มของรังสีเอกซ์ที่เกิดจากฟิล์ม A พบว่า ค่าความเข้มที่วัดได้จากรูป (ii) จะมากกว่า รูป (i) เพราะว่าฟิล์มในรูป (ii) มีความหนามากกว่า ดังนั้นถ้าความหนาของฟิล์มเพิ่มขึ้นความเข้มของรังสีเอกซ์จากฟิล์มที่วัดได้จะเพิ่มขึ้นจนถึงค่าหนึ่งเท่านั้น ดังรูป (iii) แล้วจะพบว่ารังสีเอกซ์ปฐมภูมิจะไม่สามารถทะลุผ่านไปถึงชั้นความหนาของฟิล์มได้อีก เรียกความหนาที่ว่า ความหนาวิกฤต (Critical Thickness) ดังรูป (iv) นั่นคือ ถ้าความหนาของฟิล์มหนากว่าค่าความหนาวิกฤต ก็จะไม่ทำให้ความเข้มของรังสีทุติยภูมิเปลี่ยนแปลง หรือความเข้มที่วัดได้มีค่าคงที่ เรียกความเข้มอิ่มตัว (Saturated Intensity)

ถ้านำความเข้มที่วัดได้จากฟิล์มที่มีความหนาต่าง ๆ มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอกซ์กับความหนาของฟิล์มที่ทราบค่า จะได้ดังภาพประกอบ 17



ภาพประกอบ 17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มรังสีเอกซ์กับความหนาของฟิล์ม

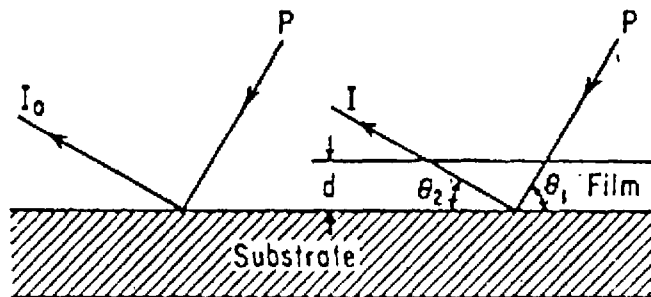
ที่มา : Whiston, C. (1991). *X-Ray Methode : Analytical Chemistry by Open Learning*.
p. 270. London : John Wiley & Sons.

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอกซ์กับความหนาของฟิล์มที่ทราบค่า สามารถแยกพิจารณาได้ 3 ช่วง คือ

1. ช่วงที่เป็นเส้นตรง (บริเวณ WX) เป็นช่วงที่มีความหนาฟิล์มบางมาก จึงทำให้การดูดกลืนของรังสีปฐมภูมิและการวาร์รังสีออกมามีค่าน้อย ดังนั้นความเข้มที่วาร์ออกมาจะเพิ่มขึ้น เมื่อความหนาของฟิล์มเพิ่มขึ้น จากความสัมพันธ์นี้จะได้กราฟเป็นเส้นตรง
2. ช่วงที่เป็นลักษณะเอกซ์โพเนนเชียล (บริเวณ XY) ช่วงนี้เป็นช่วงที่การดูดกลืนมีผลมาก ถึงแม้ว่าความเข้มของรังสีเอกซ์ทุติยภูมิที่แผ่ออกมาจะเพิ่มขึ้น เมื่อความหนาของฟิล์มเพิ่มขึ้น แต่ต่อมาอัตราเพิ่มจะค่อยๆ ลดลงเนื่องจากความเข้มถูกดูดกลืนโดยตัวอย่างฟิล์มบาง จึงทำให้กราฟมีลักษณะโค้ง
3. ช่วงที่คงที่ (บริเวณ YZ) เป็นช่วงที่มีความหนาของฟิล์มมีความหนามากๆ (Infinite Thickness) คือ เมื่อความหนาของฟิล์มเพิ่มขึ้นความเข้มรังสีเอกซ์ที่วัดได้นั้นจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วยค่าหนึ่ง แล้วรังสีเอกซ์จะไม่สามารถทะลุผ่านลงไปได้อีก ทำให้ความเข้มที่วัดได้มีค่าคงที่ เรียกความหนาที่ว่า ความหนาวิกฤต และเรียกความเข้มรังสีเอกซ์ทุติยภูมิที่วาร์ออกมาจะไม่เพิ่มสูงมากกว่าความหนาวิกฤต ถึงแม้ความหนาของฟิล์มจะเพิ่มขึ้นก็ตามว่าความเข้มอิ่มตัว

ในการวัดความเข้มรังสีเอกซ์ที่วาวออกมาจากฟิล์มบาง สามารถพิจารณาได้เป็น 2 กรณี คือ

1. กรณีการวาวรังสีเอกซ์จากวัสดุรองรับ



ภาพประกอบ 18 แสดงการวาวรังสีเอกซ์ที่เกิดจากวัสดุรองรับ

ที่มา : Johns, W.D. (1967). "Measurement of Film Thickness," *In Handbook of X-rays*.
p. 44-4. New York : McGraw – Hill.

จากภาพประกอบที่ 18 เมื่อลำรังสีเอกซ์ปฐมภูมิ (P) ตกกระทบบนฟิล์มแล้วทะลุผ่านลงไปกระทบวัสดุรองรับเป็นมุม θ_1 ก็จะไปกระตุ้นธาตุที่อยู่ในวัสดุรองรับให้เกิดการวาวรังสีเอกซ์ลักษณะเฉพาะตัวออกมา โดยรังสีเอกซ์ลักษณะเฉพาะตัวจะวาวออกมาโดยตรงจากวัสดุรองรับในทิศทางทำมุม θ_2 และมีความเข้มเป็น I ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความหนา d ของฟิล์มและสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวล μ_2 ของฟิล์ม เมื่อลำรังสีเอกซ์ปฐมภูมิทะลุผ่านฟิล์มลงไปก่อนที่จะเกิดการกระตุ้นธาตุจากวัสดุรองรับ ลำรังสีเอกซ์ปฐมภูมิก็就会被ดูดกลืนจากฟิล์มตามทางที่ผ่าน โดยขนาดของการดูดกลืนขึ้นอยู่กับความหนาของฟิล์ม มุมตกกระทบ θ_1 และสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวล μ_1 จะอาศัยกฎการดูดกลืนทำให้สามารถเขียนความสัมพันธ์ของสมการได้ คือ

$$I = I_0 e^{-(\mu_1 \csc \theta_1 + \mu_2 \csc \theta_2) d} \quad \text{.....(2.18)}$$

จากสมการ (2.18) ให้ $\sigma = (\mu_1 \csc \theta_1 + \mu_2 \csc \theta_2) \rho$ และความหนาฟิล์ม t จะได้

$$I = I_t = I_0 e^{(-\sigma t)} \quad \text{.....(2.19)}$$

เมื่อ

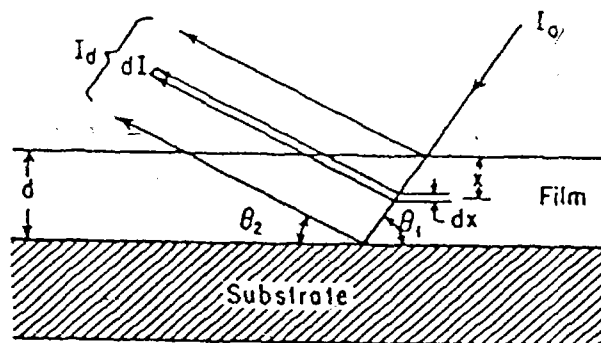
I_0 คือ ความเข้มของรังสีเอกซ์ที่วาวขณะยังไม่เคลือบฟิล์ม

I_t คือ ความเข้มของรังสีเอกซ์ที่วาวหลังการเคลือบฟิล์ม

σ คือ ตัวประกอบเชิงเรขาคณิต

t คือ ความหนาของฟิล์ม

2. กรณีการวาวรังสีเอกซ์จากฟิล์ม



ภาพประกอบ 19 แสดงการวาวรังสีเอกซ์ที่เกิดจากฟิล์ม

ที่มา : Johns, W.D. (1967). "Measurement of Film Thickness," *In Handbook of X-rays*.
p. 44-8. New York : McGraw – Hill.

จากภาพประกอบ 19 เมื่อความเข้มของลำรังสี I_0 ตกกระทบกับชั้นฟิล์มบางซึ่งมีความหนา d เพื่อไปกระตุ้นธาตุให้เกิดการวาวรังสีเอกซ์ขึ้น ทำให้เกิดรังสีเอกซ์ลักษณะเฉพาะตัวขึ้น มีความเข้มของการวาวรังสีเอกซ์เป็น I ดังนั้นอัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มของรังสีเอกซ์ที่เลี้ยวเบนออกมา dI_d จากส่วนเล็กๆของฟิล์มที่มีปริมาตรเล็กๆ ความหนา dx คือ

$$dI_d = kI_0 e^{-(\mu_1 \csc \theta_1 + \mu_2 \csc \theta_2) \rho} d_{dx} \quad \text{.....(2.20)}$$

เมื่อ k คือ ค่าคงที่ซึ่งสัมพันธ์กับการดูดกลืนและการวาวรังสีเอกซ์

ให้ $y = (\mu_1 \csc \theta_1 + \mu_2 \csc \theta_2) \rho$ จะได้

$$dI_d = kI_0 e^{-y d_{dx}} \quad \text{.....(2.21)}$$

ถ้าอินทิเกรตสมการ (2.21) ในช่วง 0 ถึง t จะได้

$$I_d = I_{ft} = \frac{kI_0 (1 - e^{-yt})}{y} \quad \text{.....(2.22)}$$

กรณีมีความหนาแน่นมาก (Infinite Thickness) ($t = \infty$) จากสมการ (2.22) คือ

$$I_{fs} = \frac{kI_0}{y} \quad \text{.....(2.23)}$$

ดังนั้นจากสมการ (2.22) และ (2.23) ความเข้มของรังสีเอกซ์ที่วาวออกมาหาได้จากความสัมพันธ์ คือ

$$\frac{I_{ft}}{I_{fs}} = (1 - e^{-yt}) \quad \text{.....(2.24)}$$

เมื่อ

I_{ft} คือ ค่าความเข้มของรังสีเอกซ์ที่วาวออกมาจากฟิล์ม

I_{fs} คือ ค่าความเข้มรังสีเอกซ์อ้อมตัว

y คือ ตัวประกอบเชิงเรขาคณิต

t คือ ความหนาของฟิล์มบาง

เอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี 1993 แฟน (Q. Fan) ได้นำวิธี Monte Carlo มาเป็นแบบอย่างในการหาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของการวาวรังสีเอกซ์จากวัสดุรองรับและความหนาฟิล์มของฟิล์ม นิกเกิล (Ni) และดีบุก (Sn) บนวัสดุรองรับที่เป็นระบบผลึกต่างๆ เมื่อได้ทำการทดลองวัดหาความเข้มของความสัมพันธ์นี้ของฟิล์มนิกเกิล และดีบุก พบว่าผลการเปรียบเทียบระหว่างวิธีคำนวณที่ใช้ Monte Carlo เป็นแบบอย่างและวิธีการทดลอง ให้ค่าที่สอดคล้องกันที่สามารถยอมรับได้

ในปี 1994 มัวร์ และแอลซาลลี (J.A.Moore & T.Elsahlli) ได้ทำการวิเคราะห์หาส่วนประกอบของธาตุในฟิล์มบาง ที่ได้จากการเคลือบด้วยวิธีสปีดเทอริงโดยใช้อุปกรณ์การวิเคราะห์การวาวรังสีเอกซ์ชนิดกระจายพลังงาน (EDXRF) ที่มีแหล่งกำเนิดรังสีเป็นไอโซโทปกัมมันตรังสีของธาตุอะเมริเซียม (^{241}Am) และเป้าที่ใช้เป็นธาตุโมลิบดีนัม (Mo) เครื่องมือวิเคราะห์ใช้เครื่องตรวจวัดเป็น Si(Li) ทำการวัดหาปริมาณของ Cu, Sr, Bi ในฟิล์มบางที่ถูกสปีดเทอริงบนวัสดุรองรับที่เป็นแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) และเมื่อนำฟิล์มบางชุดเดียวกันไปวิเคราะห์วิธี Rutherford Backscattering พบว่าให้ผลสอดคล้องกัน ในการสร้างกราฟเปรียบเทียบของผลที่ได้จากเครื่อง EDXRF ทำได้โดยการวัดความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ถูกกระตุ้นใน Sol - gel Films ที่รู้ปริมาณของ Cu, Sr, Bi แน่นอน จากการเตรียมโดยวิธีทางเคมี พบว่าผลของการเปรียบเทียบจากการทดลองให้ผลที่สอดคล้องกับการคำนวณทางทฤษฎีจากสมการของฟิล์มบาง โดยการคำนวณคิดว่าการดูดกลืนของรังสีเอกซ์ลักษณะเฉพาะตัว และผลการกระตุ้นให้เกิดรังสีเอกซ์ทุติยภูมิน้อยมาก

ในปี 1995 ดี บัวร์ ลีเนียร์ส และแวนเดน ฮุกเกนฮอฟ (D.K.G. de Boer A.J.G. Leenaers & W.W.van den Hooggenhof) ได้ศึกษาความเป็นไปได้ของวิธีการส่งผ่านรังสีเอกซ์สำหรับวิเคราะห์ตัวอย่างฟิล์มชั้นเดียวและหลายชั้น ซึ่งงานวิจัยชิ้นนี้กล่าวถึงการสะท้อนออกมาจากชั้นความลึกภายใต้เงื่อนไขทั้งที่เป็นสเปกตรัมและไม่เป็นสเปกตรัม รวมทั้งมุมที่ขึ้นอยู่กับการวาวรังสีเอกซ์ด้วย ข้อมูลที่ได้จากการวัดนี้ทำให้ทราบถึงชั้นความหนา ลักษณะคุณภาพระหว่างชั้น และองค์ประกอบความลึกของโครงสร้าง โดยในส่วนแรกของงานวิจัยแสดงให้เห็นถึงการพัฒนาของวิธีการวิเคราะห์ส่งผ่านรังสีเอกซ์ ต่อมากล่าวถึงหลักทางฟิสิกส์เกี่ยวกับการเกิดอันตรกิริยาของรังสีเอกซ์จากการส่งผ่านรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบบนสารตัวอย่าง โดยเฉพาะตัวอย่างที่มีชั้นของผิวรอยต่อไม่เรียบ ในส่วนของเครื่องมือวัดใช้วัดทั้งการวาวรังสีเอกซ์และการสะท้อนของรังสีเอกซ์แล้วนำมาอภิปราย ซึ่งผลที่เป็นไปได้จากงานวิจัยชิ้นนี้แสดงให้เห็นจากจำนวนกลุ่มของตัวอย่าง

ในปี 1998 บาร์เรีย และคณะ (R.A. Barrea and others) ได้ศึกษาวิธีการหาความหนาของตัวอย่างที่บาง โดยการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวาวรังสีที่ได้รับการพัฒนา วิธีการ คือ การทดลองหาความเข้มของการวาวรังสีเอกซ์จากองค์ประกอบของธาตุในตัวอย่างที่อาศัยหลักการสะท้อนและการส่งผ่าน ในงานชิ้นนี้ศึกษาตัวอย่างที่เป็นธาตุและองค์ประกอบของธาตุของแผ่นโลหะบาง (Foil) โดยใช้วิธีการคำนวณทางเรขาคณิต วิธีการ Monte Carlo Simulation และการทดลองวัดกับสารตัวอย่างที่เป็นผลึกเดี่ยวของสารตัวนำ พบว่าให้ผลการทดลองที่ดีมาก โดยช่วงความหนาที่หาได้จากเทคนิคที่นำเสนอนี้อาศัยส่วนประกอบของธาตุ พลังงานที่ใช้กระตุ้นในตัวอย่าง และการจัดระบบของเครื่องมือ

ในปี 1998 ยูน กวง และคิม (J.G Yoon, Y.J. Kwang & H.K.Kim) ศึกษาสมบัติเกี่ยวกับลักษณะโครงสร้างของการเคลือบฟิล์มบางของแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) บนวัสดุรองรับที่เป็นซิลิกอน (Si) โดยวิธีโซลเจล (Sol-gel) ในการศึกษาลักษณะโครงสร้างของฟิล์มบางจะใช้วิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction) และวิธี Rutherford Backscattering ซึ่งทำให้ทราบการจัดเรียงตัวผลึก MgO เป็นแบบระนาบ (111) ที่เกิดจากการตกผลึกของ MgO แล้วเกิดการพอกพูนก่อตัวเป็นชั้นผิวหน้าระหว่าง MgO กับ Si ที่มีรูปร่างแบบอสัณฐาน (Amorphus) โดยผลิตรังสีเอกซ์จากเครื่องซินโครตรอน เพื่อจะให้ไปกระทบกับรอยต่อของชั้นฟิล์มบางแล้วเกิดการสะท้อนออกมาได้รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ผลทำให้เห็นลักษณะโครงสร้างที่รอยต่อระหว่างชั้นของผิวหน้าอย่างชัดเจน แต่ถึงแม้ว่าการพัฒนาของการจัดเรียงตัวของฟิล์ม MgO ให้ดีขึ้นก็ยังมีความยากเกี่ยวกับการพอกพูนของผิวรอยต่อระหว่างชั้นของผิวหน้ากันอยู่

ในปี 2001 แคมโพส และคณะ (C.S. Campos and others) ได้ทำการทดลองหาความหนาของฟิล์มบางโลหะ โดยใช้วิธี EPMA (Electron Probe Microanalysis) ในการศึกษาจะใช้ฟิล์มที่เป็นธาตุเดี่ยวชนิดต่าง ๆ กัน คือ ฟิล์มของธาตุ Al , Ti , Cr , Cu , Nb , Mo , และ Au ซึ่งเคลือบบนวัสดุรองรับที่เป็นซิลิกอน ที่มีความหนาแตกต่างกัน โดยอาศัยเครื่องมือ Rutherford Backscattering สำหรับใช้ในการวัดความหนาของฟิล์มเหล่านี้ จะวัดค่าความเข้มของรังสีเอกซ์ลักษณะเฉพาะตัวที่เกิดจากฟิล์ม วัสดุรองรับ และสารตัวอย่างมาตรฐานเชิงปริมาตร แล้วนำอัตราส่วนของความเข้มระหว่างความเข้มรังสีเอกซ์ลักษณะเฉพาะจากฟิล์มกับความเข้มจากสารตัวอย่างมาตรฐานเชิงปริมาตร (k-ratio) ที่ได้ไปเปรียบเทียบกับที่ได้จาก Monte Carlo Simulations พบว่าให้ค่าที่สอดคล้องกัน ผลจากการ Simulation และจากการทดลอง สามารถสร้างกราฟเปรียบเทียบระหว่าง k-ratio กับความหนาของฟิล์มแต่ละธาตุได้ ในการวิเคราะห์ฟังก์ชันจะพิจารณาจากกราฟที่สร้างขึ้น ส่วนพฤติกรรมของธาตุแต่ละธาตุจะใช้ศึกษาตัวแปรของเลขอะตอม

บทที่ 3

วัสดุอุปกรณ์และขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

เครื่องมือ และอุปกรณ์ ที่สำคัญในการทดลองหาค่าความหนาของฟิล์มบาง โดยอาศัยเทคนิคการวาวรังสีเอกซ์และเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ประกอบด้วย

1. เป้าสารเคลือบ เป็นทองคำบริสุทธิ์ที่มีลักษณะเป็นแผ่นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.6 เซนติเมตร หนา 3.0 เซนติเมตร ติดตั้งในตำแหน่งแคโทดของระบบการเคลือบ
2. กระจกสไลด์ ซึ่งใช้เป็นวัสดุรองรับในการเคลือบฟิล์มบาง ขนาด 2.2 x 2.2 ตารางเซนติเมตร มีลักษณะเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัส ผิวเรียบ สี
3. เครื่องมือวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffractometer) เป็นเครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีจากฟิล์มบาง ที่ใช้เป็น BRUKER รุ่น D8 Diffractometer ของภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร
4. เครื่องมือวัดสเปกตรัมของการวาวรังสีเอกซ์ชนิดกระจายความยาวคลื่น (Wavelength Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometer) หรือ WDXRFS เป็นเครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์การวาวรังสีเอกซ์จากฟิล์มบาง โดย WDXRFS ที่ใช้เป็น BRUKER รุ่น SRS 3400 Spectrometer ของภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร
5. เครื่องเคลือบฟิล์มบางในสุญญากาศ เป็นเครื่องเคลือบแบบดีซี อันบาลานซ์ แมกนีตรอน สปัดเตอร์ริง ออกแบบและสร้างโดยห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีสุญญากาศและฟิล์มบาง ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
6. เครื่องคอมพิวเตอร์และโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปเพื่อใช้ในการสร้างกราฟเปรียบเทียบ

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ในงานวิจัยครั้งนี้ได้ทำการทดลองหาความหนาของฟิล์มทองที่เป็นชุดเดียวกับงานวิจัยของผู้ช่วยศาสตราจารย์นิรันดร์ วิทิตอนันท์ ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยบูรพา จำนวน 15 ชิ้นตัวอย่าง มาใช้ศึกษาการวัดค่าความหนาของฟิล์มทองด้วยเครื่องมือวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์และเครื่องมือวัดสเปกตรัมของการวาวรังสีเอกซ์แบบกระจายความยาวคลื่น ที่มีเทคนิคการวิเคราะห์แตกต่างกัน แล้วเปรียบเทียบผลการคำนวณความหนาของฟิล์มกับวิธีการชั่งมวล ซึ่งข้อมูลความหนาของฟิล์มที่ได้จากการชั่งมวล แสดงไว้ดังตาราง 1

ตาราง 1 แสดงข้อมูลการชั่งมวลและการวัดพื้นที่ของกระจกสไลด์ก่อนการเคลือบและหลังการเคลือบ โดยเป่าสารเคลือบคือ ทองคำ ที่มีความหนาแน่น 19.28 g/cm^3

ชิ้น	เวลาการเคลือบ(นาท)	มวลก่อนเคลือบ (g)	มวลหลังเคลือบ (g)	กว้าง (cm)	ยาว (cm)	พื้นที่ (cm^2)	ความหนา (μm)
1	5	0.1861	0.1873	2.200	2.200	4.840	0.129
2	5	0.1778	0.1790	2.190	2.205	4.829	0.129
3	10	0.2026	0.2051	2.200	2.200	4.840	0.268
4	15	0.1908	0.1948	2.230	2.210	4.928	0.421
5	15	0.1857	0.1896	2.190	2.190	4.796	0.422
6	20	0.1789	0.1845	2.210	2.210	4.884	0.569
7	20	0.1748	0.1801	2.195	2.200	4.829	0.595
8	25	0.1819	0.1886	2.205	2.200	4.851	0.716
9	30	0.1805	0.1886	2.230	2.190	4.884	0.860
10	50	0.1877	0.1995	2.195	2.180	4.785	1.279
11	70	0.1805	0.2021	2.190	2.220	4.862	1.877
12	75	0.1848	0.2028	2.225	2.235	4.973	2.304
13	90	0.1727	0.2001	2.175	2.200	4.785	2.970
14	110	0.1773	0.2102	2.220	2.220	4.928	3.462
15	140	0.1808	0.2192	2.220	2.235	4.962	4.014

1. ขั้นตอนการวัดความหนาของฟิล์มทองและการสร้างกราฟเปรียบเทียบจากเครื่องมือวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) มีขั้นตอนดังนี้

1.1 นำชิ้นตัวอย่างที่ 1 ที่ใช้เวลาในการเคลือบ 5 นาที ดังตาราง 1 มายึดติดกับที่ยึดแล้วนำไปวางไว้ในเครื่อง XRD ตรงตำแหน่งที่วางสารตัวอย่าง

1.2 หาพารามิเตอร์ของการวัดที่เหมาะสมโดยเข้าโปรแกรมการวิเคราะห์ ศึกษาการตั้งค่าอัตราการหมุนของโกนิโอมิเตอร์ที่ 2 θ และตั้งฟิล์มค่ามุมของการวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่เหมาะสมสำหรับการทดลองนี้ แล้วทำการวัดชิ้นตัวอย่างแต่ละชิ้นด้วยพารามิเตอร์ของการวัดที่เหมาะสมเดียวกันทั้งหมดทุกชิ้น

1.3 บันทึกข้อมูลความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์จากระนาบ (111) ที่เลี้ยวเบนออกมาจากฟิล์มทอง

1.4 ดำเนินการทดลองซ้ำข้อ 1.1 ถึง ข้อ 1.3 แต่เปลี่ยนตัวอย่างฟิล์มทองในชั้นถัดไป ตามตาราง 1 จนครบ 15 ชิ้น

1.5 ทำการสร้างกราฟเปรียบเทียบ โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของฟิล์มทองจากการซึ่งมวลกับความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์ที่เลี้ยวเบนจากระนาบ (111) ของฟิล์มทอง โดยใช้วิธีการวิเคราะห์แบบถดถอย (Regression Analysis) ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป จะเห็นว่าพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า คือ ความเข้มของรังสีเอกซ์อ้อมตัว (I_{ds}) จากชิ้นงานที่มีความหนาแน่น และแฟกเตอร์ของระบบเชิงเรขาคณิต (z) ซึ่งหาได้จากการปรับค่าเส้นกราฟกับข้อมูลจากการทดลอง ตามรูปแบบฟังก์ชันในสมการ (2.12) คือ $I_{dt} = I_{ds}(1 - e^{-z})$ จะได้ฟังก์ชันในการหาค่าความหนาของฟิล์มบางด้วยวิธีการทดลองแบบเดียวกันต่อไป

1.6 คำนวณค่าความหนาของฟิล์มทองของชิ้นตัวอย่าง 2 ชิ้นที่มีความหนาจากการซึ่งมวลเท่ากัน โดยอาศัยฟังก์ชันในข้อ 1.5 แล้วเปรียบเทียบกับความหนาของฟิล์มที่คำนวณได้กับวิธีการซึ่งมวล

2. ขั้นตอนการวัดความหนาของฟิล์มทองและการสร้างกราฟเปรียบเทียบจากเครื่องมือวัดสเปกตรัมการวาวรังสีเอกซ์ชนิดกระจายความยาวคลื่น (WDXRFS) ขั้นตอนดังนี้

2.1 นำชิ้นตัวอย่างฟิล์มทองที่มีความหนาต่างๆ ดังตาราง 1 ซึ่งเป็นฟิล์มทองชุดเดียวกับชุดที่ใช้วัดด้วยเครื่อง XRD มาวัดด้วย WDXRFS โดยนำชิ้นตัวอย่างฟิล์มบางที่จะวัดบรรจุลงในที่ยึด แล้วนำไปวางไว้ตรงตำแหน่งที่วางสารตัวอย่างของ WDXRFS

2.2 ตั้งค่าต่างๆของระบบการวัดโดยใช้โปรแกรม Semiquant จากเครื่องวิเคราะห์การวาวรังสีเอกซ์ชนิดกระจายความยาวคลื่น เครื่องจะทำการวัดและแสดงผลโดยใช้เวลาในการวัดประมาณ 20 นาทีต่อ 1 ชิ้นตัวอย่าง

2.3 บันทึกข้อมูลความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์ L_β ที่วาวออกมาจากฟิล์มทองที่มีความหนาต่าง ๆ และความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์ K_α ที่วาวออกมาจากสังกะสี (Zn) ที่มีในแผ่นแก้วบาง เนื่องจากถูกดูดกลืนด้วยฟิล์มทอง และความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์ K_α ที่วาวออกมาจากสังกะสี (Zn) ที่มีในแผ่นแก้วบางในขณะที่ยังไม่ได้เคลือบฟิล์มทอง

2.4 ทำการทดลองซ้ำขั้นตอน 2.1 ถึงขั้นตอน 2.3 แต่เปลี่ยนขึ้นตัวอย่างฟิล์มทองจนครบ 15 ชั้น ตามตาราง 1

2.5 ทำการสร้างกราฟเปรียบเทียบ ที่อาศัยความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์ที่วาวออกมาจากฟิล์มและวัสดุรองรับของฟิล์ม กับความหนาฟิล์มที่ได้จากการชั่งมวล โดยใช้วิธีการวิเคราะห์แบบถดถอย (Regression Analysis) ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป ดังนี้

2.5.1 กราฟเปรียบเทียบที่อาศัยความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของฟิล์มทองที่ได้จากการชั่งมวลกับความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์ L_β ที่วาวออกมาจากฟิล์มทอง ทำให้ได้พารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า คือ ความเข้มของรังสีเอกซ์อิมิต์ (I_{is}) จากชิ้นงานที่มีความหนานั้นต์ และแฟกเตอร์ของระบบเชิงเรขาคณิต (y) จากการปรับค่าเส้นกราฟกับข้อมูลจากการทดลอง ตามรูปแบบฟังก์ชันของสมการ (2.24) คือ $I_r = I_{is}(1 - e^{-yt})$ ทำให้ได้ฟังก์ชันในการหาค่าความหนาของฟิล์มบางด้วยวิธีการทดลองแบบเดียวกันต่อไป

2.5.2 กราฟเปรียบเทียบที่อาศัยความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของฟิล์มทองที่ได้จากการชั่งมวลกับความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์ K_α ที่วาวออกมาจากสังกะสี (Zn) ที่มีในแผ่นแก้วบางเนื่องจากถูกดูดกลืนด้วยฟิล์มทอง ทำให้ได้แฟกเตอร์ของระบบเชิงเรขาคณิต (σ) จากการปรับค่าเส้นกราฟกับข้อมูลจากการทดลองตามรูปแบบในสมการ (2.19) คือ $I_t = I_0 e^{-\sigma t}$ จะได้ฟังก์ชันในการหาค่าความหนาของฟิล์มบางด้วยวิธีการทดลองแบบเดียวกัน

2.6 คำนวณหาความหนาของฟิล์มบางของขึ้นตัวอย่างฟิล์มทอง 2 ชั้น ที่ทราบค่าความหนาจากการชั่งมวลได้เท่ากัน โดยอาศัยฟังก์ชันทั้ง 2 ฟังก์ชัน คือ ฟังก์ชันที่ได้จากในข้อ 2.5.1 และ 2.5.2 แล้วเปรียบเทียบความหนาของฟิล์มที่คำนวณได้กับวิธีการชั่งมวล

3. การตรวจสอบความน่าเชื่อถือของฟังก์ชันที่สร้างขึ้น

ในการตรวจสอบความน่าเชื่อถือของฟังก์ชัน ทำได้โดยการเปรียบเทียบผลการคำนวณความหนาของฟิล์มทองที่ความหนาเท่ากัน 2 ชั้น ที่ทราบค่าโดยการชั่งมวลกับฟังก์ชันทั้ง 4 ฟังก์ชัน คือ

1. ฟังก์ชันแบบที่ 1 ที่เป็นข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์ที่เลี้ยวเบนจากระนาบ (111) ของฟิล์มทอง กับความหนาของฟิล์มจากการชั่งมวล เมื่อวัดด้วยเครื่อง XRD

2. ฟังก์ชันแบบที่ 2 ซึ่งเป็นข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอกซ์ L_{β} ที่วาวออกมาจากฟิล์มทอง กับความหนาของฟิล์มจากการชั่งมวล เมื่อวัดด้วย WDXRFS

3. ฟังก์ชันแบบที่ 3 ซึ่งเป็นข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอกซ์ K_{α} ที่วาวออกมาจากสังกะสีเนื่องจากถูกดูดกลืนของฟิล์มทอง กับความหนาของฟิล์มจากการชั่งมวล เมื่อวัดด้วย WDXRFS

4. ฟังก์ชันแบบที่ 4 ซึ่งเป็นข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอกซ์ L_{β} ที่วาวออกมาจากฟิล์มทอง กับความหนาของฟิล์มจากการชั่งมวล ที่ได้จากงานวิจัยของผู้ช่วยศาสตราจารย์นิรันดร์ วิทิตอนันต์ ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยบูรพา เมื่อวัดด้วย EDXRFS

นอกจากนี้ได้ตรวจสอบความน่าเชื่อถือของฟังก์ชันจากเทคนิค XRD โดยการพิจารณาค่าพารามิเตอร์ 2 ค่า คือ ค่าแฟกเตอร์ของระบบเชิงเรขาคณิต (z) และความหนานันต์ (t_{∞}) ทำได้โดยเปรียบเทียบผลการคำนวณค่าแฟกเตอร์ของระบบเชิงเรขาคณิต (z) และความหนานันต์ (t_{∞}) จากทฤษฎี โดยอาศัยความสัมพันธ์ของสมการ (2.11) คือ $z = 2\mu/\sin\theta$ และสมการ (2.14) คือ $t_{\infty} = 3.45\sin\theta/\mu$ ตามลำดับ กับค่าที่ได้จากการปรับเฉลี่ยของเส้นกราฟเปรียบเทียบในขั้นตอน 1.5

สำหรับการตรวจสอบค่าความหนาแน่นของฟิล์มทองว่าไม่มีผลต่อการหาความหนาของฟิล์ม ได้ทำการสร้างกราฟเปรียบเทียบระหว่างความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์กับความหนาเชิงมวลของฟิล์ม (pt) ในหน่วย g/cm^2 แทนความหนาของฟิล์ม (t) ตามฟังก์ชันของสมการ (2.12) (2.19) และ (2.24)

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล

ผลการวัดความหนาของชั้นตัวอย่างฟิล์มทอง

ผลการวัดชั้นตัวอย่างฟิล์มทองด้วยเครื่อง XRD และ WDXRFS ได้รูปแบบสเปกตรัมของรังสีเอกซ์ที่เลี้ยวเบนออกมาจากชั้นตัวอย่างฟิล์มทอง เมื่อวัดด้วยเครื่อง XRD แสดงดังภาพประกอบ 20 และภาพประกอบ 21 แสดงสเปกตรัมของการวาวรังสีเอกซ์ที่วัดได้จากชั้นตัวอย่างฟิล์มทอง เมื่อวัดด้วย WDXRFS สำหรับสเปกตรัมของการวาวรังสีเอกซ์ที่วัดได้จากชั้นตัวอย่างซึ่งเป็นแก้วบางที่ยังไม่เคลือบทอง เมื่อวัดด้วย WDXRFS แสดงดังภาพประกอบ 22

สำหรับ ตาราง 2 – ตาราง 4 แสดงผลการวัดความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์จากชั้นตัวอย่างฟิล์มทองจำนวน 15 ชั้น โดยใช้เครื่อง XRD และ WDXRFS

กราฟเปรียบเทียบและฟังก์ชันที่สร้างขึ้น

ผลการวัดความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์จากชั้นตัวอย่างฟิล์มทอง จำนวน 15 ชั้น ด้วยเครื่องมือวัดแต่ละชนิด นำไปหาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของการวาวรังสีเอกซ์ที่เกิดจากฟิล์มหรือวัสดุรองรับของฟิล์ม หรือความเข้มของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่เกิดจากฟิล์ม กับความหนาของฟิล์มจากการชั่งมวล โดยการสร้างกราฟเปรียบเทียบ ด้วยวิธีการวิเคราะห์แบบถดถอย (Regression Analysis) ทำให้ได้ฟังก์ชันสำหรับการใช้ในการคำนวณหาความหนาของฟิล์ม คือ

1. สำหรับการวัดด้วยเครื่อง XRD กราฟเปรียบเทียบและฟังก์ชันจากการวัดความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์ที่เลี้ยวเบนจากระนาบ (111) ของฟิล์มทองที่มีความหนาต่างๆ จำนวน 15 ชั้น ซึ่งให้ความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์ที่เด่น แสดงดังตาราง 2 พบว่าค่าความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์ที่เลี้ยวเบนจากระนาบ (111) ของฟิล์มทอง มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่ไม่ค่อยแน่นอน ดังนั้นจึงได้คัดเลือกข้อมูลความเข้มของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์จากฟิล์มทองบางชั้นกับความหนาของฟิล์มจากการชั่งมวล ดังตาราง 3 ไปใช้สร้างกราฟเปรียบเทียบ โดยอาศัยวิธีการวิเคราะห์แบบถดถอย ตามรูปแบบฟังก์ชันของสมการ (2.12) แสดงดังภาพประกอบ 23 จะได้ค่าความเข้มรังสีเอกซ์อิ่มตัว (I_{ds}) เท่ากับ 379357 cps และค่าแฟกเตอร์ของระบบเชิงเรขาคณิต (z) เท่ากับ $1.682 \mu\text{m}^{-1}$ โดยได้ฟังก์ชันในการคำนวณหาความหนาของฟิล์มทอง คือ

$$I_{dt} = 379357 (1 - e^{-1.682t})$$

2. สำหรับการวัดด้วย WDXRFS กราฟเปรียบเทียบและฟังก์ชัน ที่ได้จากการนำค่าความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์ที่วัดออกมาจากฟิล์มทองหรือวัสดุรองรับของฟิล์มทองกับความหนาของฟิล์มจากการชั่งมวล มาสร้างกราฟเปรียบเทียบได้ คือ

2.1 กราฟเปรียบเทียบและฟังก์ชันที่สร้างขึ้นจากความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของฟิล์มจากการชั่งมวล กับค่าความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์ L_{β} ที่วัดจากฟิล์มทอง โดยอาศัยวิธีการวิเคราะห์แบบถดถอย ตามรูปแบบฟังก์ชันของสมการ (2.24) แสดงดังภาพประกอบ 24 จะได้ค่าความเข้มรังสีเอกซ์อิ่มตัว (I_{∞}) เท่ากับ 96822 cps และแฟกเตอร์ของระบบเชิงเรขาคณิต (y) เท่ากับ $0.489 \mu\text{m}^{-1}$ โดยได้ฟังก์ชันในการคำนวณหาความหนาของฟิล์มทอง คือ

$$I_t = 96822 (1 - e^{-0.489t})$$

2.2 กราฟเปรียบเทียบและฟังก์ชันที่สร้างขึ้นจากความสัมพันธ์ระหว่างความหนาจากการชั่งมวล กับค่าความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์ K_{α} ที่วัดออกมาจากสังกะสีของแผ่นแก้วบาง เนื่องจากถูกดูดกลืนด้วยฟิล์มทอง โดยอาศัยวิธีการวิเคราะห์แบบถดถอย ตามรูปแบบฟังก์ชันของสมการ (2.19) แสดงดังภาพประกอบ 25 จะได้ค่าความเข้มรังสีเอกซ์ (I_0) เท่ากับ 83474 cps และแฟกเตอร์ของระบบเชิงเรขาคณิต (σ) เท่ากับ $0.755 \mu\text{m}^{-1}$ โดยได้ฟังก์ชันสำหรับใช้คำนวณหาความหนาของฟิล์มทอง คือ

$$I_t = 83474 (e^{-0.755t})$$

3. จากงานวิจัยของผู้ช่วยศาสตราจารย์นิรันดร์ วิทิตอนันต์ ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยบูรพา ได้ศึกษาการวัดความหนาของฟิล์มทองด้วย EDXRFS และสร้างกราฟเปรียบเทียบโดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างความหนาจากการชั่งมวลกับความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์ L_{β} ที่วัดออกมาจากฟิล์มทอง ซึ่งผลจากการปรับค่าเส้นกราฟกับข้อมูลจากการทดลอง จะได้ฟังก์ชันสำหรับคำนวณหาความหนาของฟิล์ม คือ

$$I_d = 337066 (1 - e^{-0.592d})$$

ผลการตรวจสอบความน่าเชื่อถือของฟังก์ชันที่สร้างขึ้น

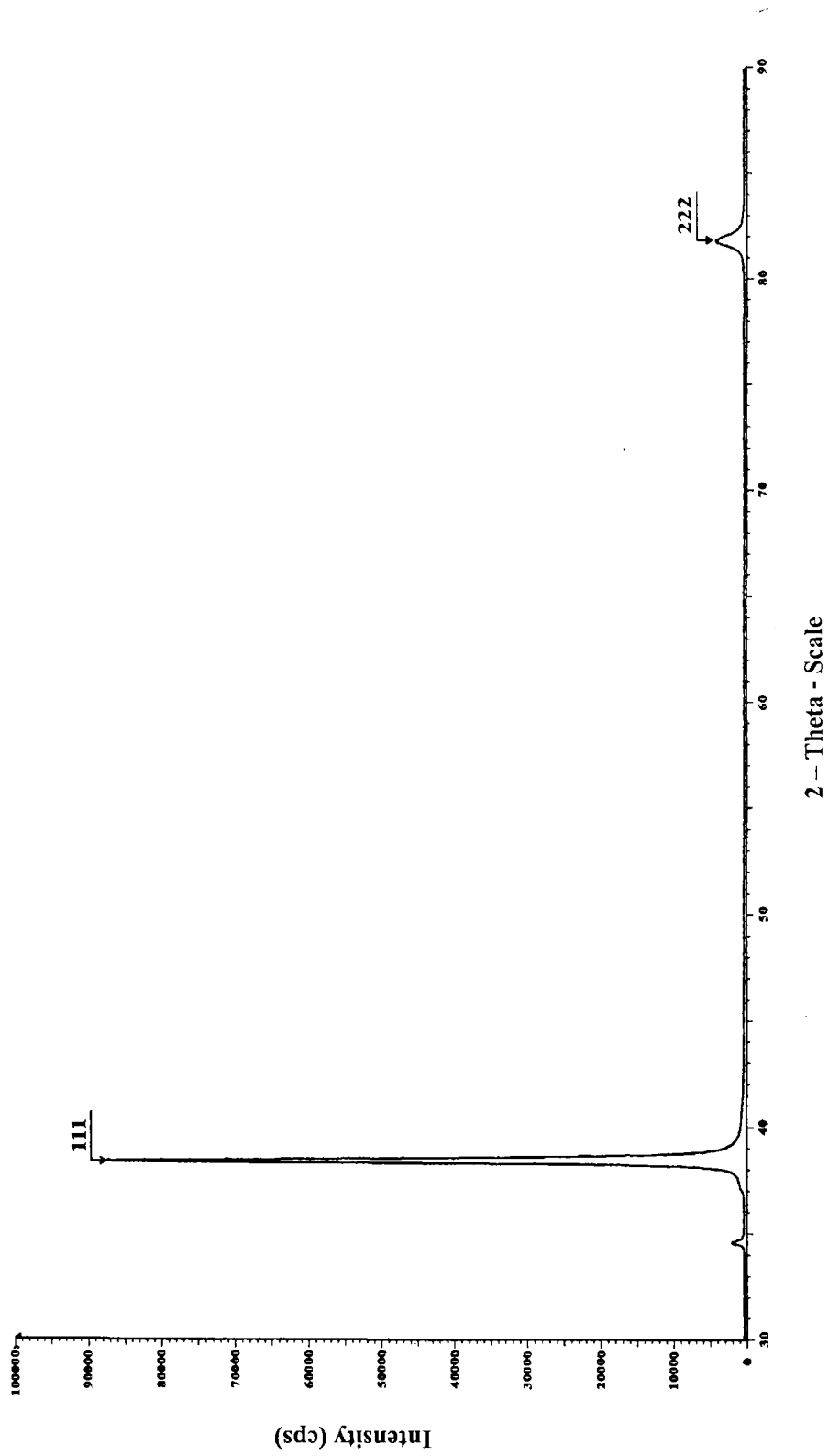
1. การตรวจสอบความน่าเชื่อถือของฟังก์ชันทั้งสี่ เมื่อวัดด้วย WDXRFS เครื่อง XRD และ EDXRFS ที่ได้จากงานวิจัยของผู้ช่วยศาสตราจารย์นิรันดร์ วิทิตอนันต์ ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยบูรพา ทำโดยการเปรียบเทียบผลการคำนวณค่าความหนาของฟิล์มทองบนวัสดุรองรับที่เป็นแผ่นแก้วบางของชิ้นงาน 2 ชั้นที่มีความหนาเท่ากันเมื่อทราบค่าโดยการชั่งมวลกับฟังก์ชันทั้งสี่ ซึ่งผลจากการเปรียบเทียบ แสดงดังตาราง 5

2. สำหรับผลการตรวจสอบความน่าเชื่อถือของฟังก์ชัน จากเทคนิค XRD โดยพิจารณาค่าพารามิเตอร์ 2 ค่า คือ ค่าความหนานันต์ (t_{∞}) และค่าแฟกเตอร์ของระบบเชิงเรขาคณิต (z) พบว่า

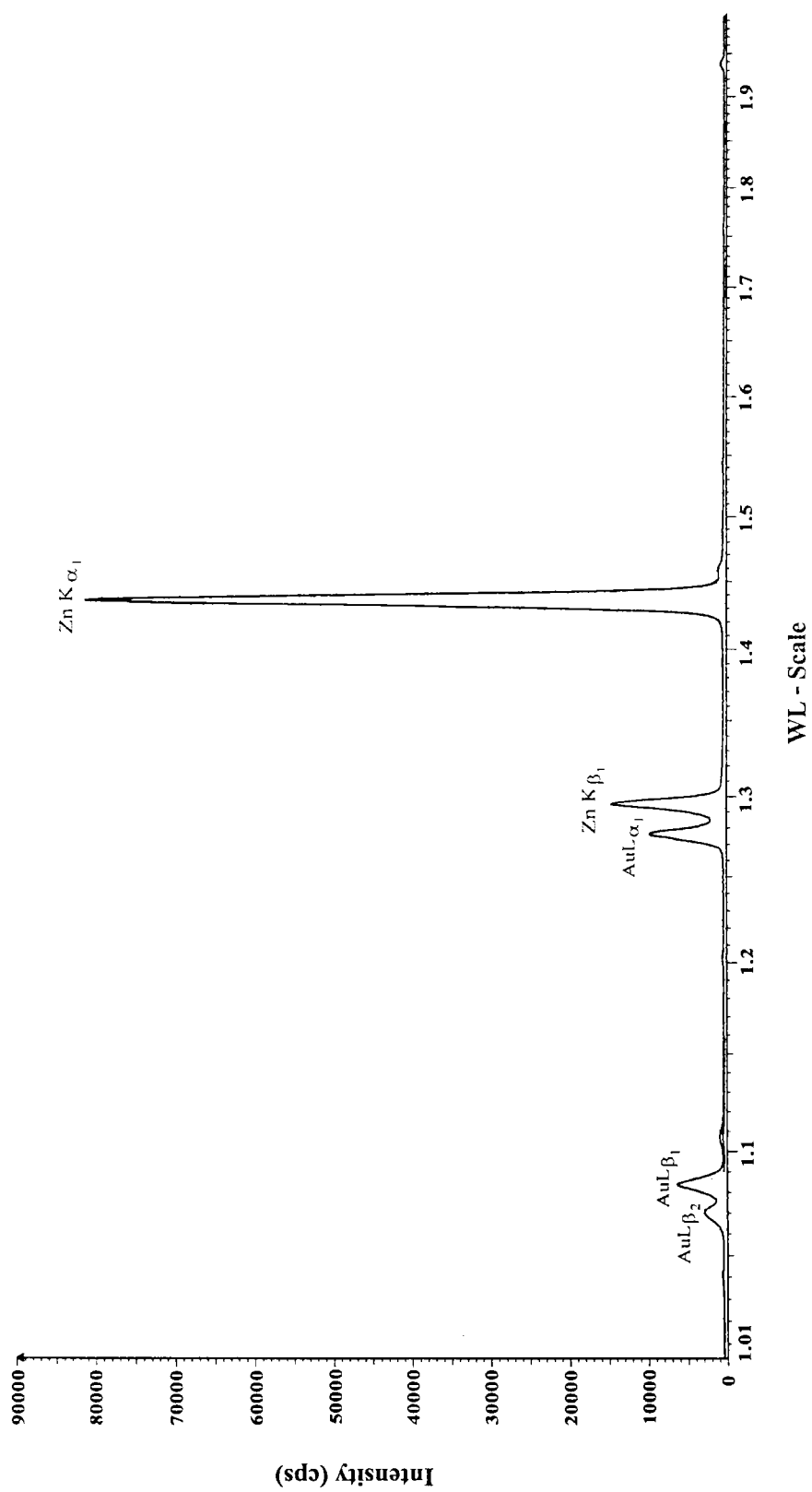
ก) ค่าความหนานันต์จากเส้นกราฟเปรียบเทียบ ดังภาพประกอบ 23 ตรงบริเวณค่าความเข้มเริ่มเข้าสู่บริเวณค่าความเข้มอิ่มตัว มีค่าเท่ากับ $2.90 \mu\text{m}$ และเมื่อเทียบกับผลการคำนวณจากทฤษฎี ตามสมการ (2.14) คือ $t_{\infty} = 3.45 \sin\theta/\mu$ โดยที่สัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนเชิงเส้นของทองคำสำหรับรังสีเอกซ์ $\text{Cu K}\alpha$ มีความยาวคลื่น $1.542 \text{ \AA}$ เท่ากับ 4134.48 cm^{-1} และมุม $\theta = 19.2^\circ$ จะได้ค่าความหนานันต์ประมาณ $2.70 \mu\text{m}$

ข) ผลการคำนวณค่าแฟกเตอร์ของระบบเชิงเรขาคณิตที่คำนวณได้จากทฤษฎี ตามสมการ (2.11) คือ $z = 2\mu / \sin\theta$ มีค่าประมาณ $2.50 \mu\text{m}^{-1}$ และเมื่อเปรียบเทียบค่าแฟกเตอร์ของระบบเชิงเรขาคณิตที่ได้จากกราฟเปรียบเทียบ ดังภาพประกอบ 23 มีค่าประมาณ $1.68 \mu\text{m}^{-1}$

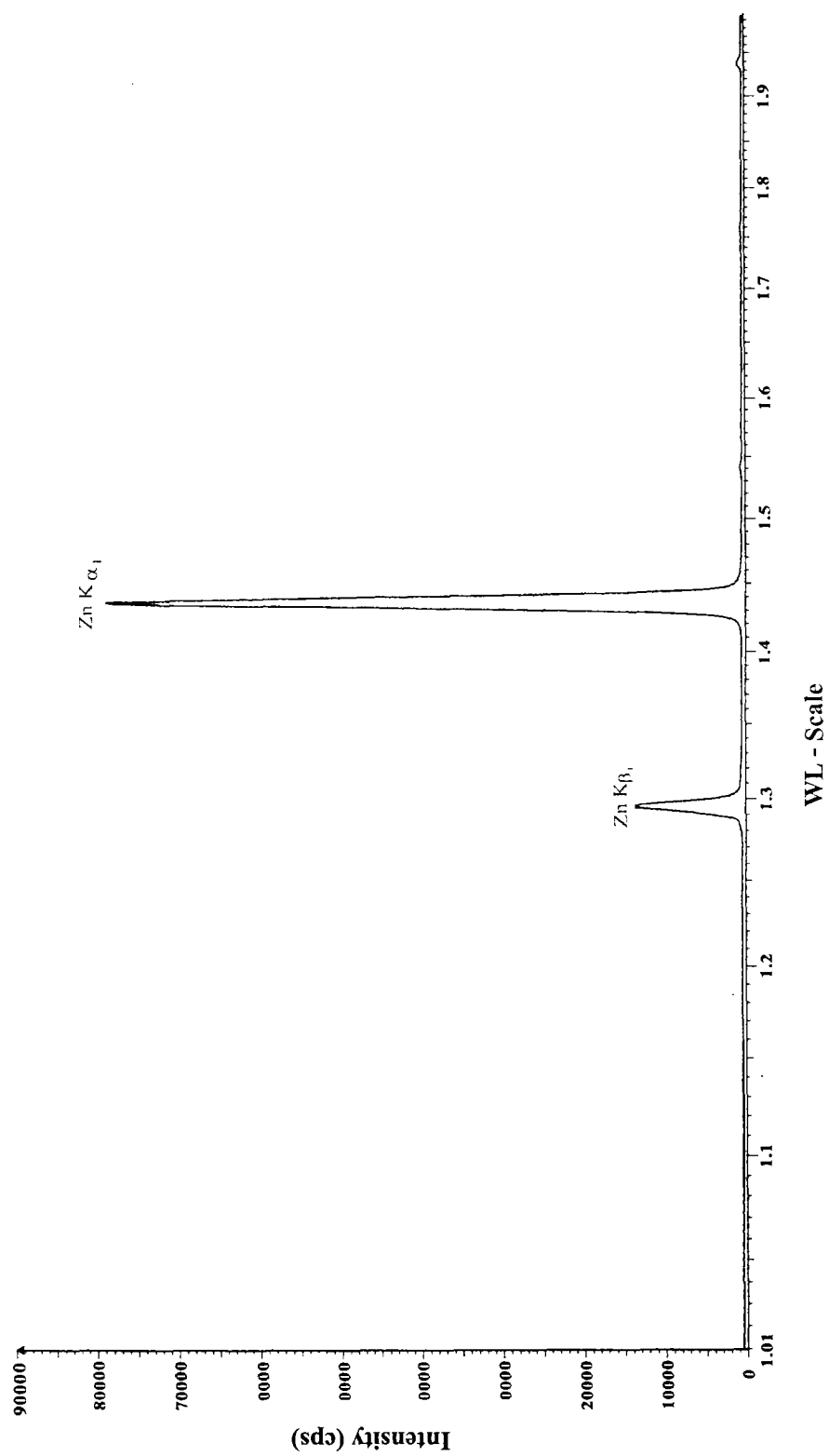
3. จากการตรวจสอบค่าความหนาแน่นของฟิล์มทองว่าไม่มีผลต่อการหาความหนาของฟิล์ม โดยได้ทำการสร้างกราฟเปรียบเทียบระหว่างความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์ กับความหนาเชิงมวลของฟิล์ม (ρt) ในหน่วย g/cm^2 แทนความหนาของฟิล์ม (t) ตามฟังก์ชันของสมการ (2.12) (2.19) และ (2.24) จะได้เส้นกราฟเปรียบเทียบ ดังภาพประกอบ 26 – 28 ซึ่งจะเห็นได้ว่าถึงแม้จะเปลี่ยนค่าความหนาของฟิล์ม (t) ในฟังก์ชันของสมการ (2.12) (2.19) และ (2.24) เป็นความหนาเชิงมวลของฟิล์ม (ρt) ในหน่วย g/cm^2 ก็ตาม เส้นกราฟเปรียบเทียบที่ได้ก็ยังคงมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงไปในลักษณะเดียวกัน แสดงดังภาพประกอบ 29 และเมื่อคำนวณความหนาของฟิล์มโดยอาศัยฟังก์ชันเหล่านี้เปรียบเทียบกับความหนาของฟิล์มที่ได้จากฟังก์ชันในตาราง 5 จะได้ค่าความหนาของฟิล์มที่ใกล้เคียงกัน แสดงดังตาราง 6 จึงกล่าวได้ว่าผลของความหนาแน่นของฟิล์มจะไม่มีผลทำให้ค่าความหนาของฟิล์มเปลี่ยนแปลง



ภาพประกอบ 20 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของชั้นตัวอย่างที่มีความหนาของฟิล์มทองเท่ากับ 0.129 μm เมื่อวัดด้วยเครื่อง XRD



ภาพประกอบ 21 แสดงสเปกตรัมของการวัดรังสีเอกซ์ที่วัดได้จากชิ้นตัวอย่างที่มีความหนาของฟิล์มทอง 0.129 μm เมื่อวัดด้วย WDXRF



ภาพประกอบ 22 แสดงสเปกตรัมของการวัดรังสีเอกซ์ที่วัดได้จากชิ้นตัวอย่างซึ่งเป็นแก้วบาง ที่ยังไม่เคลือบทอง เมื่อวัดด้วย WDXRF

ตาราง 2 แสดงผลการวัดความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์ที่เลี้ยวเบนจากระนาบ (111) ของฟิล์มทองที่มีความหนาต่างๆกันบนแผ่นวัสดุรองรับที่เป็นแก้วบาง จากการวัดด้วยเครื่อง XRD

ชั้นที่	เวลาการเคลือบ (นาที)	พื้นที่ (cm^2)	มวล (g)	ความหนาจากการชั่ง (μm)	ความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์ (cps)
1	5	4.840	0.0012	0.129	87,484
2	5	4.829	0.0012	0.129	83,081
3	10	4.840	0.0025	0.268	135,421
4	15	4.928	0.004	0.421	159,379
5	15	4.796	0.0039	0.422	149,859
6	20	4.884	0.0056	0.569	140,089
7	20	4.829	0.0053	0.595	250,289
8	25	4.851	0.0067	0.716	270,749
9	30	4.884	0.0081	0.860	300,775
10	50	4.785	0.0118	1.279	330,900
11	70	4.862	0.0216	1.877	363,011
12	75	4.973	0.0180	2.304	211,371
13	90	4.785	0.0274	2.970	256,421
14	110	4.928	0.0329	3.462	376,985
15	140	4.962	0.0384	4.014	286,721

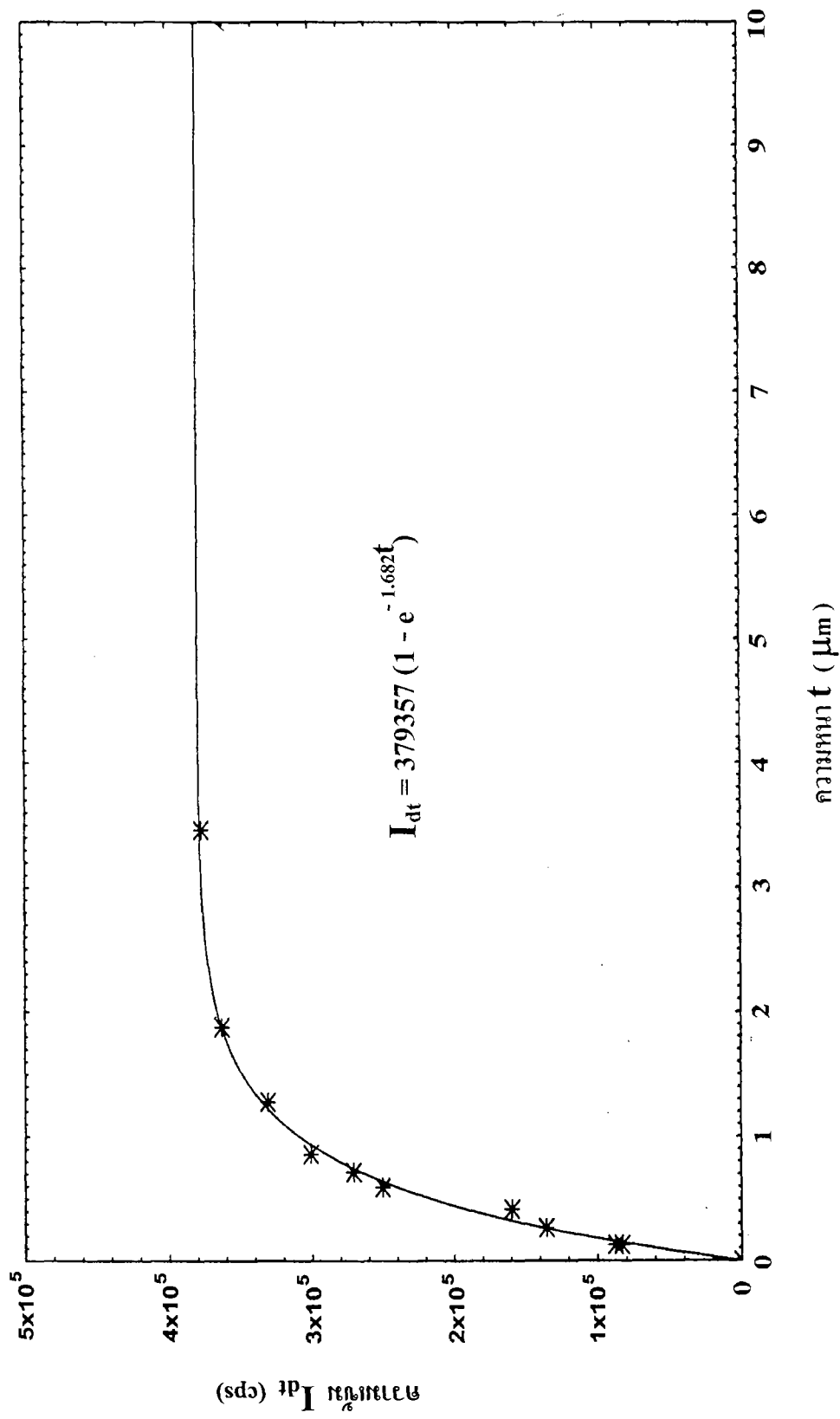
ตาราง 3 แสดงค่าความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์ที่เลี้ยวเบนจากระนาบ (111) ของฟิล์มทอง ที่มี ความหนาต่างๆกันบนแผ่นวัสดุรองรับที่เป็นแก้วบางของชิ้นงานที่คัดเลือกมา เพื่อนำมา ใช้ในการสร้างกราฟเปรียบเทียบ จากการวัดด้วยเครื่อง XRD

ชั้นที่	เวลาการเคลือบ (นาที่)	พื้นที่ (cm^2)	มวล (g)	ความหนาจากการชั่ง (μm)	ความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์ (cps)
1	5	4.840	0.0012	0.129	87,484
2	5	4.829	0.0012	0.129	83,081
3	10	4.840	0.0025	0.268	135,421
4	15	4.928	0.0040	0.421	159,379
5	20	4.829	0.0053	0.595	250,289
6	25	4.851	0.0067	0.716	270,749
7	30	4.884	0.0081	0.860	300,775
8	50	4.785	0.0118	1.279	330,900
9	70	4.862	0.0216	1.877	363,011
10	110	4.928	0.0329	3.462	376,985

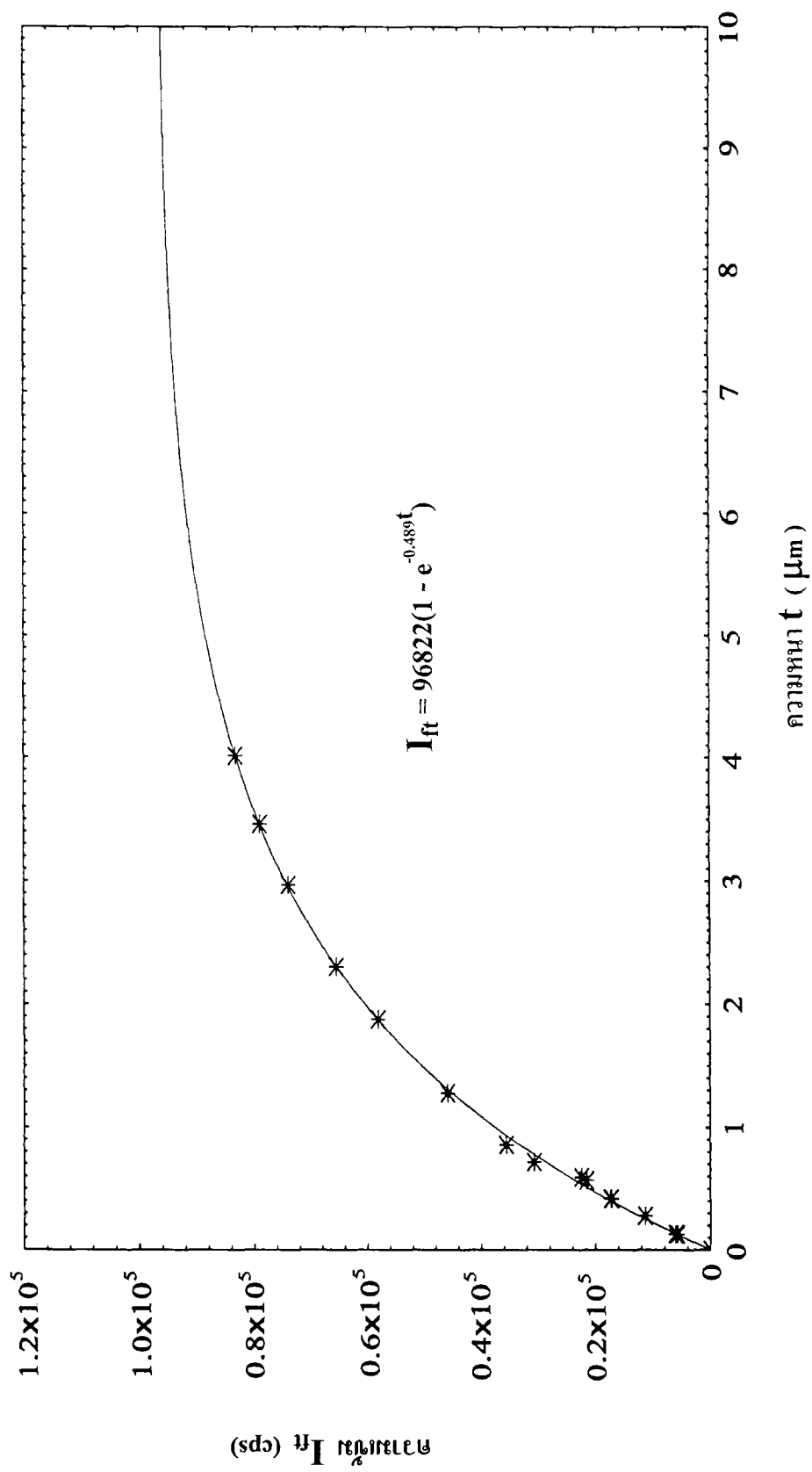
ตาราง 4 แสดงผลการวัดความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์ L_{β} ที่วาวออกมาจากฟิล์มทอง ที่มี
ความหนาต่างๆกัน และค่าความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์ K_{α} ที่วาวออกมาจากสังกะสีของ
แผ่นแก้วบาง เนื่องจากถูกดูดกลืนโดยฟิล์มทอง จากการวัดด้วย WDXRFS

ชั้นที่	เวลาการ เคลือบ (นาท)	พื้นที่ (cm^2)	มวล (g)	ความหนา จากการชั่ง (μm)	ความเข้ม L_{β} ของทอง (cps)	ความเข้ม K_{α} ของสังกะสี (cps)
1*	0	4.840	0	0	0	87,052
2	5	4.840	0.0012	0.129	5,801	75,955
3	5	4.829	0.0012	0.129	6,105	76,346
4	10	4.840	0.0025	0.268	11,373	65,755
5	15	4.928	0.004	0.421	17,330	57,782
6	15	4.796	0.0039	0.422	17,159	59,660
7	20	4.884	0.0056	0.569	21,490	58,340
8	20	4.829	0.0053	0.595	22,380	53,167
9	25	4.851	0.0067	0.716	30,723	46,419
10	30	4.884	0.0081	0.860	35,597	43,494
11	50	4.785	0.0118	1.279	45,858	32,216
12	70	4.862	0.0216	1.877	58,051	23,227
13	75	4.973	0.0180	2.304	65,454	15,093
14	90	4.785	0.0274	2.970	73,957	9,995
15	110	4.928	0.0329	3.462	78,958	5,587
16	140	4.962	0.0384	4.014	83,219	5,665

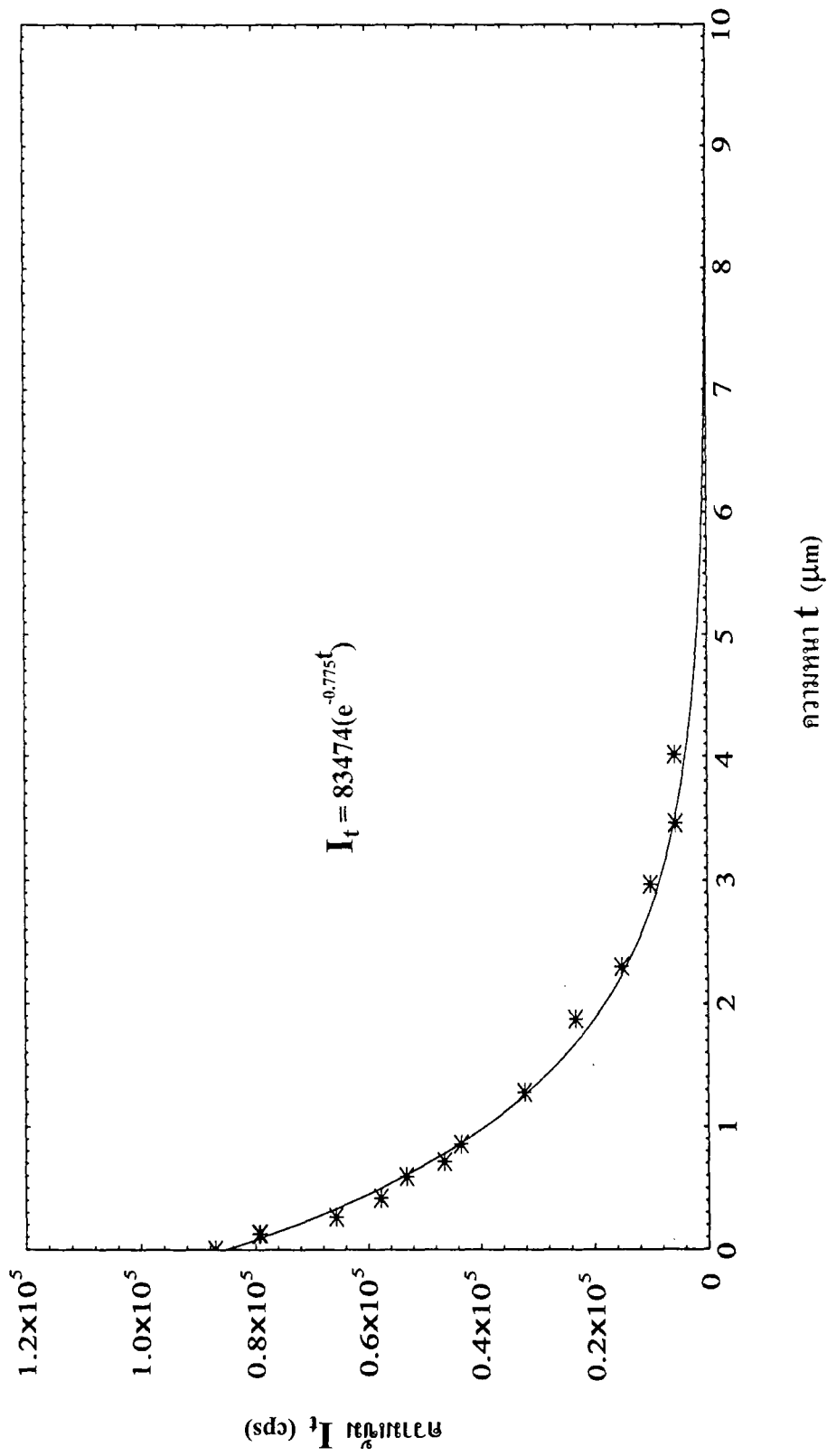
* ชั้นตัวอย่างแผ่นแก้วบางที่ยังไม่ได้เคลือบด้วยทองคำ



ภาพประกอบ 23 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าความเข้มของรังสีเอกซ์ที่เลี้ยวเบนจากระนาบ (111) ของฟิล์มทองคำกับความหนาของฟิล์มทองคำที่ได้จากการชั่งมวล



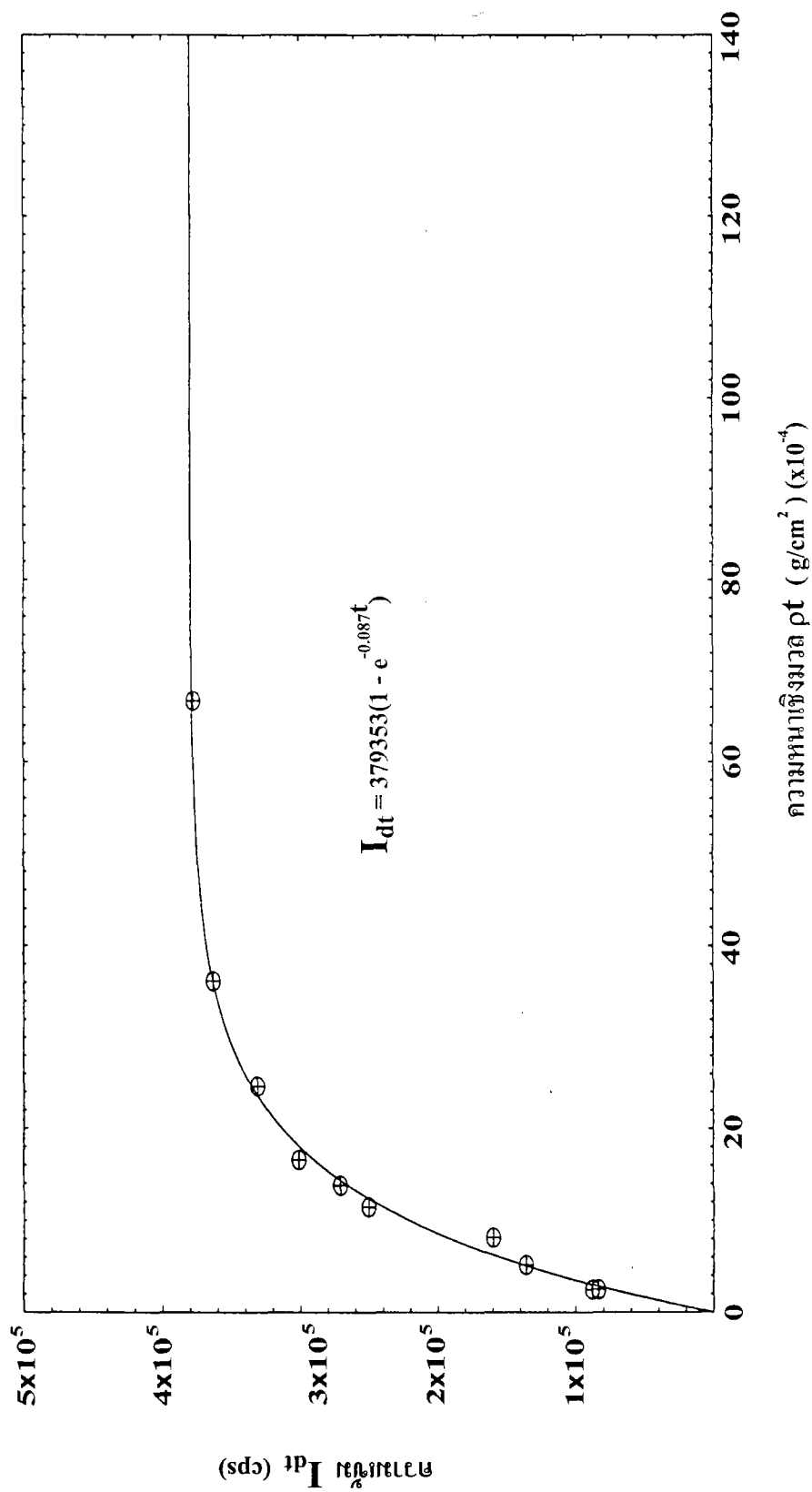
ภาพประกอบ 24 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์ L_{β} ที่วัดออกมาจากฟิล์มทองคำกับความหนาของฟิล์มทองคำที่ได้จากการชั่งมวล



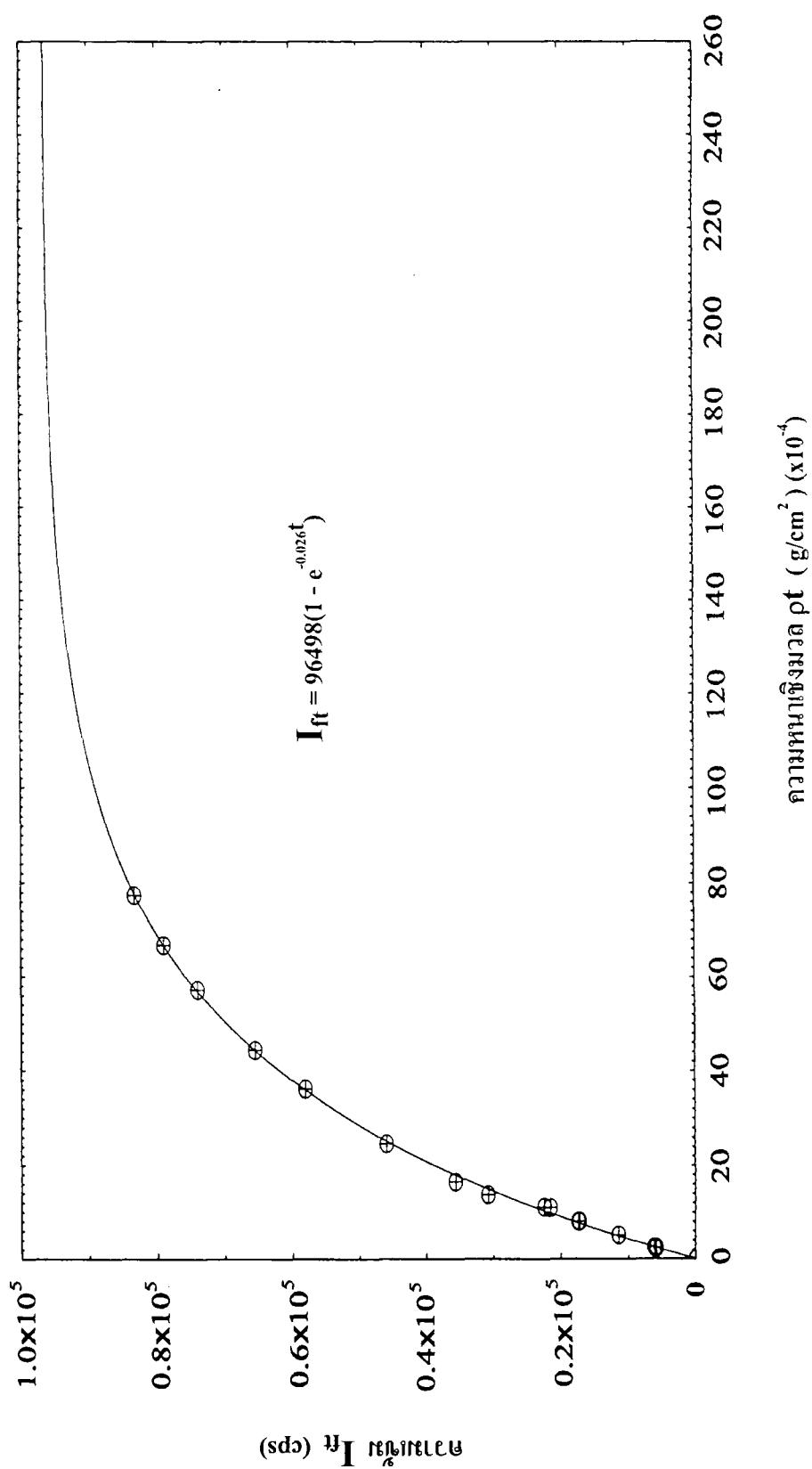
ภาพประกอบ 25 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์ K_α ที่วาวออกมาจากสังกะสี ซึ่งถูกดูดกลืนโดยฟิล์มทองคำกับความหนาของฟิล์มทองคำที่ได้จากการชั่งมวล

ตาราง 5 เปรียบเทียบผลการคำนวณความหนาของฟิล์มทองของชิ้นงาน 2 ชั้นที่มีความหนาเท่ากันเมื่อหาโดยการชั่งมวลกับฟังก์ชันทั้ง 4 ฟังก์ชัน เมื่อวัดด้วยเครื่อง XRD WDXRFS และ EDXRFS จากงานวิจัยของผู้ช่วยศาสตราจารย์นิรันดร์ วิทิตอนันต์ ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยบูรพา

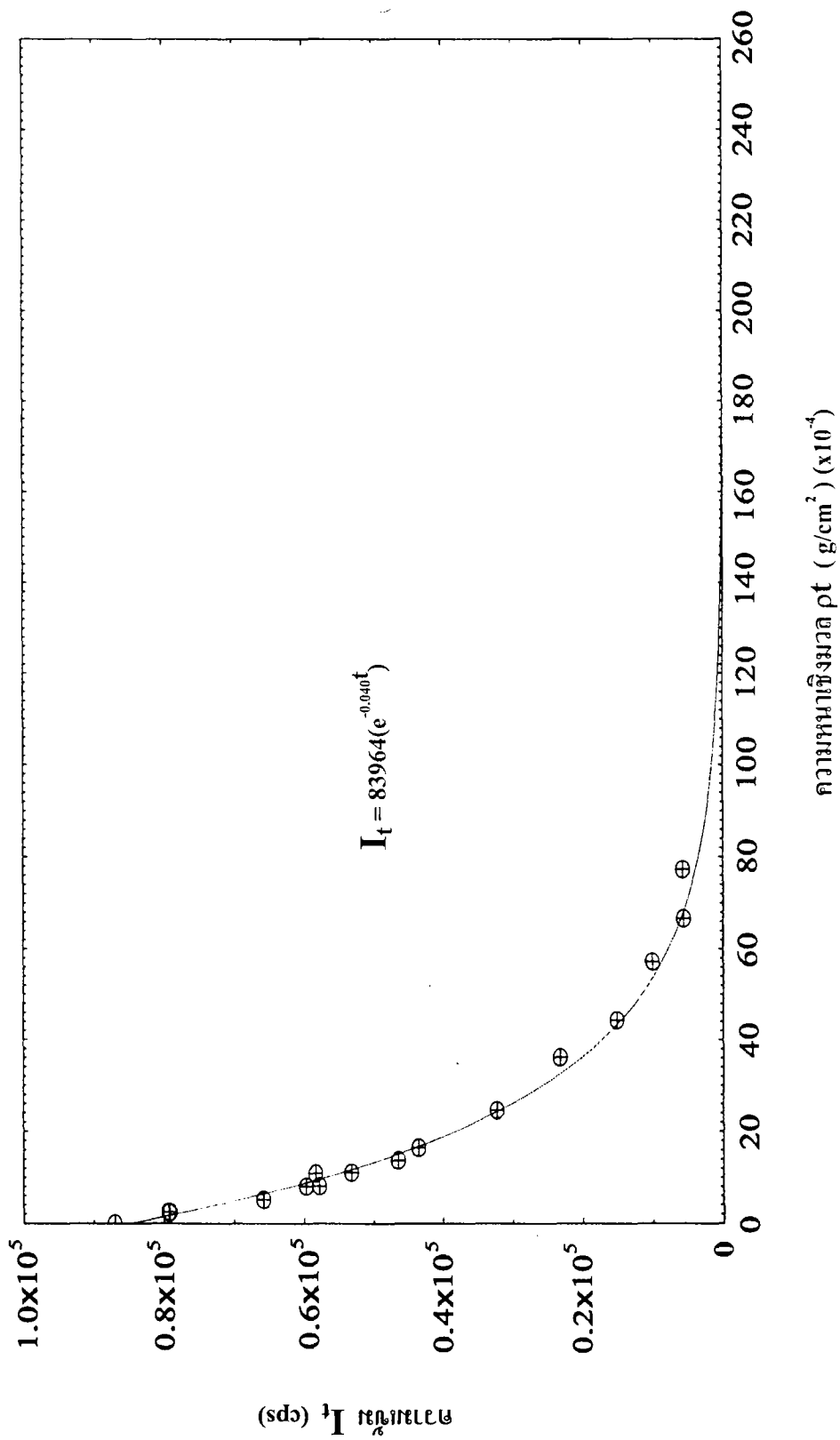
ฟังก์ชันจากการวัดด้วยวิธี	ความเข้มข้นรังสีเอกซ์ (cps)	ความหนาฟิล์มคำนวณ (μm)	ความหนาฟิล์มจากการชั่งมวล (μm)	ความแตกต่างเทียบกับการชั่งมวล (%)
WDXRFS (ฟิล์ม)	5,801	0.126	0.129	2.06
$I_{ft} = 96822 (1 - e^{-0.489t})$	6,105	0.133	0.129	3.25
WDXRFS (วัสดุรองรับ)	76,346	0.118	0.129	8.35
$I_t = 83474 e^{-0.755t}$	75,955	0.125	0.129	3.08
XRD (ฟิล์ม)	87,484	0.156	0.129	20.82
$I_{dt} = 379357 (1 - e^{-1.682t})$	83,081	0.147	0.129	13.92
EDXRFS (ฟิล์ม)	26,613	0.139	0.129	7.98
$I_d = 337066 (1 - e^{-0.592d})$	26,680	0.139	0.129	7.98



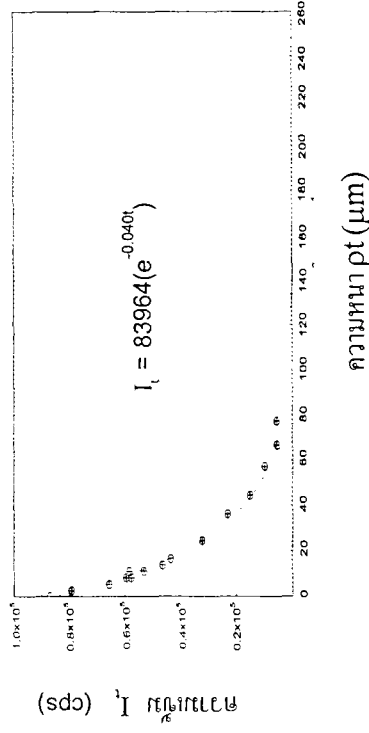
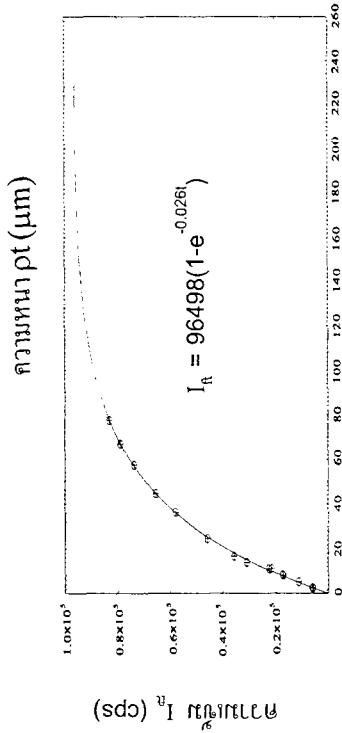
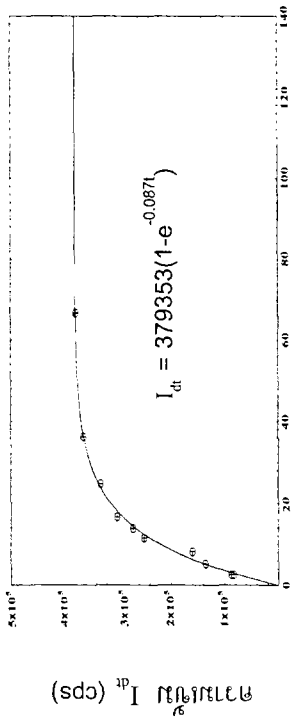
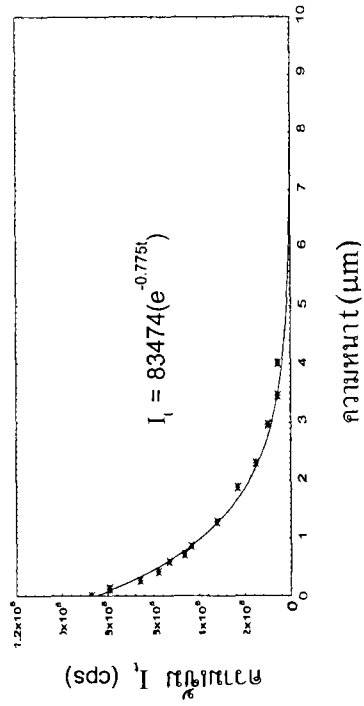
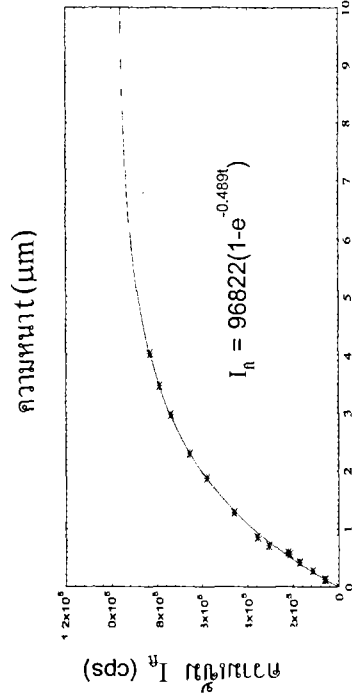
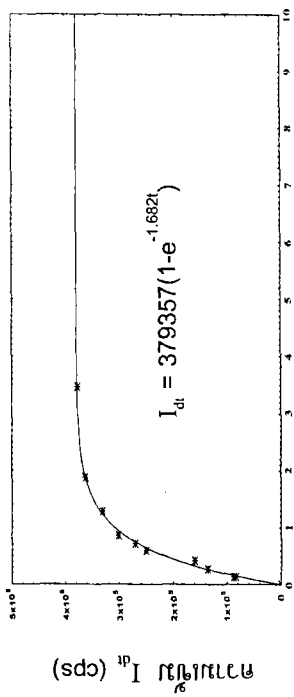
ภาพประกอบ 26 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าความเข้มของรังสีเอกซ์ที่เลี้ยวเบนจากระนาบ (111) ของฟิล์มทองคำกับความหนาเชิงมวลของฟิล์มทองคำ



ภาพประกอบ 27 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าความเข้มของแสงฟลูออเรสเซนซ์ I_f ที่วัดออกมาจากฟิล์มของ กับความหนาแน่นของฟิล์มของ



ภาพประกอบ 28 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์ K_α ที่วัดออกมาจากสังกะสี ซึ่งถูกดูดกลืนโดยฟิล์มทอง กับความหนาแน่นของฟิล์มทอง



ภาพประกอบ 29 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะเส้นกราฟปรับเทียบของความเข้มของแสงรังสีเอกซ์ กับความหนาเชิงมวลของฟิล์ม (pt) และเส้นกราฟปรับเทียบของความเข้มของแสงรังสีเอกซ์ กับความหนาของฟิล์ม (t)

ตาราง 6 เปรียบเทียบผลการคำนวณค่าความหนาของฟิล์มทองจากชั้นงาน 2 ชั้น ที่มีความหนาเท่ากัน เท่ากับ $0.129 \mu\text{m}$ โดยอาศัยฟังก์ชันของความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์ กับความหนาเชิงมวลของฟิล์ม และผลการคำนวณความหนาของฟิล์มโดยฟังก์ชันของความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์ กับความหนาของฟิล์ม (ดังตาราง 5) เมื่อวัดด้วยเครื่อง XRD และ WDXRFS

ฟังก์ชันจากการวัด ด้วยวิธี	ความเข้มรังสี เอกซ์ (cps)	ความหนาฟิล์ม (t) คำนวณ (μm)	ความหนาฟิล์มจาก ตาราง 5 (μm)
WDXRFS (ฟิล์ม)	5,801	0.124	0.126
$I_{ft} = 96719 (1 - e^{-0.026t})$	6,105	0.130	0.133
WDXRFS (วัสดุรองรับ)	76,346	0.123	0.118
$I_t = 83964 (e^{-0.040t})$	75,955	0.129	0.125
XRD (ฟิล์ม)	87,484	0.156	0.156
$I_{dt} = 379353 (1 - e^{-0.087t})$	83,081	0.147	0.147

บทที่ 5

สรุปผล อภิปราย และข้อเสนอแนะ

สรุปผลการทดลอง

จากการวัดความหนาของฟิล์มทองที่เคลือบบนวัสดุรองรับที่เป็นแก้วบาง ด้วยเครื่องมือวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ และเครื่องมือวัดสเปกตรัมของการวาวรังสีเอกซ์ชนิดกระจายความยาวคลื่น เมื่อเปรียบเทียบความน่าเชื่อถือของการวัดความหนาฟิล์มทองจากเครื่องมือวัดแต่ละชนิด ได้ข้อสรุปดังนี้ คือ

1. ผลการวัดความหนาของฟิล์มทองด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ จะปรากฏรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์จากระนาบ (111) ของทองที่เด่นชัด และผลการวัดรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มแต่ละชั้น พบว่าฟิล์มทองมีการจัดเรียงตัวในทิศทางที่เด่นเหมือนกันทุกชั้นตามระนาบ (111) ของฟิล์มทอง แต่จากการทดลองค่าความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์ที่เลี้ยวเบนจากระนาบ (111) ของฟิล์มทองจะมีการเปลี่ยนแปลงที่มีแนวโน้มไม่แน่นอน โดยมีได้เพิ่มขึ้นตามความหนาที่ทราบจากการชั่งมวลทั้งหมดทุกชั้น จึงเลือกชั้นบางบางชั้นที่มีค่าความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์ที่เลี้ยวเบนออกมาจากฟิล์มทองที่เพิ่มขึ้นจริงตามความหนาจากการชั่งมวล ไปใช้ในการสร้างกราฟเปรียบเทียบ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาเส้นกราฟเปรียบเทียบ จะเห็นได้ว่าข้อมูลจากการทดลองมีการเบี่ยงเบนจากเส้นกราฟเปรียบเทียบ และค่าพารามิเตอร์ทั้งสองที่หาได้จากกราฟและฟังก์ชัน คือค่าความหนานันต์ของฟิล์ม (t_∞) และค่าแฟกเตอร์ของระบบเชิงเรขาคณิต (z) ตามลำดับ ก่อนข้างแตกต่างกับค่าที่คำนวณได้ทางทฤษฎี จากผลการทดลองที่ได้นี้ แสดงการคำนวณหาความหนาของฟิล์มทองด้วยฟังก์ชันจากเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์มีค่าไม่น่าเชื่อถือเท่าที่ควร

2. สำหรับการวัดความหนาของฟิล์มทองด้วยเทคนิคการวาวรังสีเอกซ์ชนิดกระจายความยาวคลื่น สามารถนำข้อมูลความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์ทั้งที่เกิดการวาวออกมาจากฟิล์มทองและสังกะสีของแผ่นแก้วบางกับความหนาของฟิล์มทองจากการชั่งมวล ไปสร้างกราฟเปรียบเทียบ ทำให้ได้ฟังก์ชัน 2 ฟังก์ชันพร้อม ๆ กันเพื่อคำนวณหาความหนาของฟิล์ม และเมื่อคำนวณหาความหนาของฟิล์มจากฟังก์ชันทั้งสองก็ให้ผลที่มีค่าใกล้เคียงกันและมีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยมาก เนื่องจากจะเห็นได้ว่าผลการวัดค่าความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์ที่วาวออกมาจากฟิล์มทองของแต่ละชิ้นงาน มีค่าเพิ่มขึ้นตามความหนาจากการชั่งมวลจริงทั้งหมดทุกชิ้น และเมื่อนำข้อมูลจากการทดลองไปสร้างกราฟเปรียบเทียบ ข้อมูลจากการทดลองมีการเบี่ยงเบนจากเส้นกราฟเปรียบเทียบน้อย ผลการคำนวณหาความหนาของฟิล์มทองจากฟังก์ชันนี้จึงมีความคลาดเคลื่อนค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับวิธีการชั่งมวล ส่วนค่าความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์ที่วาวออกมาจากสังกะสีที่มีอยู่ในแผ่นแก้วบาง ซึ่งถูกดูดกลืนโดยฟิล์มทอง เมื่อนำไปสร้างกราฟเปรียบเทียบ ข้อมูลจากการทดลองมีการเบี่ยงเบนจากเส้นกราฟเปรียบเทียบค่อนข้างสูง สาเหตุอาจจะเกิดจากปริมาณสังกะสีในแผ่นแก้วบางของแต่ละแผ่นมีไม่เท่ากัน แต่เมื่อคำนวณหาความหนาของฟิล์มทองจากฟังก์ชันนี้ก็ให้ผลที่มีค่าความคลาดเคลื่อนค่อนข้างต่ำเช่นเดียวกัน

3. เมื่อตรวจสอบความน่าเชื่อถือของฟังก์ชันทั้งสามฟังก์ชัน ที่ได้จากเทคนิคการวาวรังสีเอกซ์ชนิดกระจายความยาวคลื่น และเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ โดยเปรียบเทียบผลการคำนวณความหนาของฟิล์มทองจากชิ้นงาน 2 ชิ้นที่มีความหนาเท่ากัน เมื่อทราบค่าจากการชั่งมวลกับฟังก์ชันเหล่านี้ พบว่าการคำนวณความหนาของฟิล์มทองจากฟังก์ชันที่อาศัยเทคนิคการวาวรังสีเอกซ์ชนิดกระจายความยาวคลื่น จะให้ค่าความหนาของฟิล์มทองที่มีความน่าเชื่อถือมากกว่าวิธีการคำนวณจากฟังก์ชันโดยอาศัยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ และเมื่อนำผลการคำนวณความหนาของฟิล์มจากฟังก์ชันทั้งสามนี้เทียบกับฟังก์ชันจากเทคนิคการวาวรังสีเอกซ์ชนิดกระจายพลังงาน ที่ได้จากงานวิจัยของผู้ช่วยศาสตราจารย์นิรันดร์ วิทิตอนันต์ แสดงให้เห็นว่าการวัดความหนาของฟิล์มทองด้วยเทคนิคการวาวรังสีเอกซ์ชนิดกระจายความยาวคลื่น เป็นเทคนิคที่สามารถหาความหนาของฟิล์มทองในช่วงความหนางานวิจัยนี้ได้ดี มีความน่าเชื่อถือ และมีความคลาดเคลื่อนน้อยมากเมื่อเทียบกับค่าความหนาที่ได้จากการชั่งมวล แต่อย่างไรก็ตามในการหาความหนาของฟิล์มทองที่คำนวณได้จากเทคนิคเหล่านี้ จะค่อนข้างง่าย สะดวก รวดเร็วกว่าการคำนวณจากทฤษฎี ซึ่งต้องวัดค่าตัวแปรต่างๆโดยตรง และต้องอาศัยเครื่องมือที่มีความแม่นยำสูง ในงานวิจัยครั้งนี้จึงนับว่าเป็นประโยชน์ต่องานด้านอุตสาหกรรมเกี่ยวกับการควบคุมความหนาของการเคลือบฟิล์มบาง และการเลือกใช้เทคนิคการวัดความหนาของฟิล์มบางที่เหมาะสมกับลักษณะของชิ้นงานที่จะผลิตขึ้นต่อไป ซึ่งขึ้นกับปัจจัยสำคัญที่ต้องพิจารณา เช่น ระดับความหนาของฟิล์ม ชนิดของฟิล์ม ความละเอียดที่ต้องการ และระบบเครื่องมือวัด เป็นต้น โดยไม่ต้องอาศัยเครื่องมือเฉพาะที่จะมาวัดความหนาเท่านั้น

การอภิปรายผลการทดลอง

1. ในการวัดความหนาของฟิล์มทองด้วยเทคนิคการวาวรังสีเอกซ์ โดยทั่วไปจะพิจารณาจากความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์ K_{α} หรือ L_{α} ที่วาวออกมาจากฟิล์มบาง แต่เนื่องจากในงานวิจัยครั้งนี้ พบว่าเส้นรังสีเอกซ์ L_{α} ที่วาวออกมาจากฟิล์มทอง เกิดการซ้อนทับกับเส้นรังสีเอกซ์ K_{β} ที่วาวออกมาจากสังกะสีที่มีอยู่ในแก้วบาง ทำให้ไม่สามารถบอกค่าความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์ที่วาวออกมาจากฟิล์มทองที่เกิดขึ้นจริงได้ ในงานวิจัยจึงได้เลือกความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์ L_{β} ที่วาวออกมาจากฟิล์มทอง ซึ่งไม่ถูกรบกวนโดยเส้นรังสีเอกซ์ของธาตุอื่นแทน แต่พบว่าค่าความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์ที่วัดได้มีค่าค่อนข้างต่ำ จึงทำให้ผลการตรวจสอบความหนาของฟิล์มทองในกรณีนี้อาจเกิดความคลาดเคลื่อนได้

2. สำหรับผลการวัดความหนาของฟิล์มทองที่ได้จากการทดลองครั้งนี้สามารถอธิบายสาเหตุที่ทำให้ผลการวัดความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์โดยเทคนิค XRD ไม่เพิ่มขึ้นตามความหนาที่ทราบจากการชั่งมวลของชิ้นตัวอย่าง อาจเป็นผลกระทบจากฟิล์มทองที่เคลือบบนแผ่นแก้วบาง ไม่ได้เรียบหนาสม่ำเสมอตลอดพื้นที่ที่ทำการวัดก็ได้ ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพของการเคลือบฟิล์มบางด้วย และจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของทุกชิ้นงาน ก็แสดงให้เห็นว่าฟิล์มทองที่เคลือบบนแผ่นแก้วบางมีการจัดเรียงตัวในทิศทางตามระนาบ (111) เหมือนกันทุกชิ้น ดังนั้นการที่ความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์ไม่เพิ่มขึ้นตามความหนาที่ทราบจากการชั่งมวล จึงไม่น่าจะมาจากผลของการจัดเรียงตัวของฟิล์มที่เปลี่ยนไป ในขณะที่ฟิล์มบางเหล่านี้มีความเป็นเนื้อเดียว (homogeneous) จึงทำให้การวัดความหนาของฟิล์มทองด้วยเทคนิค WDXRF ได้ผลดี

3. การหาค่าความหนาของฟิล์มโดยอาศัยหลักการวาวรังสีเอกซ์และหลักการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ค่าความหนาของฟิล์มที่ได้จะเป็นค่าเฉลี่ยเท่านั้น จะไม่สามารถบอกความหนาที่จุดใดจุดหนึ่งของฟิล์มบางได้ชัดเจน จึงทำให้การวัดความหนาของฟิล์มบางด้วยเทคนิคเหล่านี้อาจเกิดความคลาดเคลื่อนได้ และเมื่อนำความหนาของฟิล์มบางมาเปรียบเทียบกับวิธีการชั่งมวล ซึ่งให้เป็นความหนามาตรฐานสำหรับในงานวิจัยนี้ ค่าความหนาของฟิล์มจากการชั่งมวลก็อาจมีความคลาดเคลื่อนได้เช่นเดียวกัน เนื่องจากถ้าเครื่องมือที่ใช้ในการชั่งมวล และการวัดขนาดของวัสดุรองรับไม่ละเอียดพอหรือชั่งได้ไม่ดีพอ จะทำให้ค่าความหนาของฟิล์มทองจากวิธีการชั่งมวลก็ขาดความน่าเชื่อถือได้

ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาเทคนิคการวัดความหนาของฟิล์มทองด้วยเครื่องมือวัดสเปกตรัมของการวาวรังสีเอกซ์ชนิดกระจายความยาวคลื่น และเครื่องมือวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ของภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร จะมีข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการวัดความหนาของฟิล์มบางด้วยเทคนิคเหล่านี้ คือ

1. ในการเคลือบฟิล์มบางชั้นเดียวของชิ้นงานต่อไป ควรศึกษาก่อนว่าเส้นรังสีเอกซ์ของธาตุที่วาวออกมาจากฟิล์มจะไม่เกิดการซ้อนทับหรือมีความยาวคลื่นใกล้เคียงกันกับเส้นรังสีเอกซ์ของธาตุที่วาวออกมาจากวัสดุรองรับของฟิล์ม เนื่องจากถ้าเส้นรังสีเอกซ์ของธาตุในฟิล์มบางและวัสดุรองรับของฟิล์มบางเกิดการซ้อนทับกัน จะทำให้ยากต่อการวิเคราะห์และค่าความเข้มรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นมีค่าลดลงจากความเป็นจริงได้

2. การวัดความหนาของฟิล์มบางโดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์นั้น เป็นวิธีที่ใช้ศึกษารูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่าง ดังนั้นก่อนที่จะนำชิ้นตัวอย่างฟิล์มบางมาใช้วัดความหนาด้วยเทคนิคนี้ ผู้วิจัยจึงควรมีความมั่นใจว่าชิ้นตัวอย่างฟิล์มบางที่จะนำมาศึกษานั้นต้องมีชั้นผิวหน้าของฟิล์มบางที่เรียบสม่ำเสมอ มีการจัดเรียงตัวของฟิล์มไปในทิศทางเดียวกันทุกชั้น จึงจะทำให้การสร้างฟังก์ชันเพื่อหาความหนาของฟิล์มด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์มีความน่าเชื่อถือ

3. ถ้านำประโยชน์ของฟังก์ชันจากเทคนิคการวัดความหนาของฟิล์มทางรังสีแต่ละแบบไปใช้ในการตรวจสอบความหนาของฟิล์มบางในชิ้นงานที่จะผลิตขึ้นต่อไป ควรนำความหนาของฟิล์มที่รู้ค่าแน่นอนมาใช้ในการสร้างกราฟเปรียบเทียบและฟังก์ชัน จึงจะทำให้ผลการตรวจสอบความหนาของฟิล์มที่ได้มีความถูกต้องและน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น

บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

- นิรันดร์ วิทิตนันต์. (2542). การวัดความหนาของฟิล์มทองคำซึ่งเคลือบบนแผ่นแก้วด้วยเทคนิคการวาวรังสีเอกซ์. วิทยานิพนธ์ วท.ม. กรุงเทพฯ : บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. ถ่ายเอกสาร.
- นิรันดร์ วิทิตนันต์. (2544). เทคโนโลยีฟิล์มบาง. (เอกสารประกอบการสอน). ชลบุรี : ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยบูรพา. อัดสำเนา.
- ภาวดี อังค์วัฒน์. (2541). เทคนิคในการวิเคราะห์ฟิล์มบาง. กรุงเทพฯ : ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ.
- แมน อมรสิทธิ์ และ อมร เพชรสม. (2534). พรินซิเพิล แอนด์ เทคนิค ออฟ อินสตรูเมนทอลส์ อนาไลซิส (*Principles and Techniques of Instrumental Analysis*). กรุงเทพฯ : ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สาหร่าย เล็กชะอุ่ม. (2536). เอกซ์เรย์ ฟลูออเรสเซนซ์ สเปกโตรมิเตอร์ (*X-Ray Fluorescence Spectrometer*). กรุงเทพฯ : ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- Barrea, R.A., Derosa, P.A. & Mainardi, R.T. (1998). "Absolute Mass Thickness Determination of Thin Samples by X-Ray Fluorescence Analysis," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 143. : 561-568.
- Berry, R.W, Hall, P.M. & Harris, M.T. (1968). *Thin Film Technology*. New Jersey : D.Van Nostrand .
- Bertin, E.P. (1970). *Principles and Practice of X-Ray Spectrometric Analysis*. New Jersey : RCA Laboratories David Sarnoff Research Center Princeton.
- Campos, C.S. and others. (2001). "Metallic Thin Film Thickness Determination Using Electron Probe Microanalysis," *X-Ray Spectrom.* (30). : 253-259.
- Chapman, B. (1980). *Glow Discharge Processes*. New York : John Wiley & Sons.
- Cullity, B.D. (1967). *Elements of X-Ray Diffraction*. London : Addison – Wesley.
- De Boer, D.K.G., Leenaers, A.J.G. & Van den Hoogenhof, W.W. (1995). "Glancing – Incidence X-Ray Analysis of Thin – Layered Materials : a Review," *X-Ray Spectrometry*. (24). : 91-102.
- Fan, Q. (1993). " Simulate of Relationships Between Substrate XRF Intensities and Thicknesses ," *X-Ray Spectrometry* . (22). : 11-12.

- Johns, W.D. (1967). " Measurement of Film Thickness," *In Handbook of X-rays*.
New York : McGraw – Hill.
- Moore, J.A. & Elsahlli, T. (1994). " Measurement of Composition of Thin Films
Obtainedby Sputtering Using Radioisotope Excited X-Ray Fluorescence,"
X-Ray Spectrometry. (23). : 155-159.
- Schlotz, R. & Uhlig, S. (2000). *Introduction to X-Ray Fluorescence Analysis (XRF)*.
Karlsruhe : Bruker Analytical X-Ray Systems.
- Vossen, J.L. & Kerns, W. (1978). *Thin Film Processes*. New York : Academic Press.
- Whiston, C. (1991). *X-Ray Methodes : Analytical Chemetry by Open Learning*.
London : John Wiley & Sons.
- Williams, K.L. (1987). *An Introduction to X-Ray Spectrometry X-ray fluorescence
and microprob analysis*. London : ALLEN & UNWIN.

ประวัติย่อผู้วิจัย

ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ นายครรชิต ชื่อสกุล กำลังกล้า
เกิดวันที่ 14 เดือน มกราคม พุทธศักราช 2518
สถานที่เกิด อำเภอเมือง จังหวัด พังงา
สถานที่อยู่ปัจจุบัน 70 ม.2 ต.ปากอ อ.เมือง จ.พังงา 82000
ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2534 มัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนดีบุกพังงาวิทยายน จังหวัดพังงา
พ.ศ. 2541 กศ.บ. วิทยาศาสตร์ ฟิสิกส์ จากมหาวิทยาลัยทักษิณ
พ.ศ. 2545 กศ.ม. (สาขาวิชาฟิสิกส์) จากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ