

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาการวิเคราะห์พื้นผิวด้วยเทคนิคการวิเคราะห์
สเปกตรัมของมวลไอออนทุติยภูมิ

STUDY OF SURFACE ANALYSIS USING SECONDARY ION
MASS SPECTROMETRY



สุทธินาท นูทองแก้ว

SUTTINART NOOTHONGKAEW

ฉพ.
๑๗๗๓๓
๒๕๔๙

เลขหมู่.....

63435

เลขทะเบียน.....

วัน,เดือน,ปี 28 ส.ค. 2549

b. 11637080

i.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2549

ISBN 974-15-2399-8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**STUDY OF SURFACE ANALYSIS USING SECONDARY ION
MASS SPECTROMETRY**

SUTTINART NOOTHONGKAEW



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE IN APPLIED PHYSICS
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2006

ISBN 974-15-2399-8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2006

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดได้เห็นใบโฆษณาหรือโฆษณาอื่นใด
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาการวิเคราะห์พื้นผิวด้วยเทคนิคการวิเคราะห์สเปกตรัมของมวลไอออนทุติยภูมิ
นักศึกษา	นางสาวสุทธินาด หนูทองแก้ว
รหัสประจำตัว	45064006
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์
พ.ศ.	2549
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วราวุฒิ เถาถัดดา

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาวิธีการวิเคราะห์พื้นผิวเพื่อศึกษาธาตุ องค์ประกอบเชิงเคมีและโครงสร้างเชิงลึกของพื้นผิววัสดุด้วยเทคนิคการวิเคราะห์สเปกตรัมของมวลไอออนทุติยภูมิ เมื่อโพกัสต้าไอออนปฐมภูมิลงบนพื้นผิวของสารตัวอย่างจะทำให้เกิดไอออนทุติยภูมิหลุดจากพื้นผิวของสารตัวอย่างด้วยกระบวนการสปีดเตอริง โดยการวัดมวลต่อประจุของไอออนทุติยภูมิเหล่านี้ด้วยควอดรูโพลแมสสเปกโทรมิเตอร์ ทำให้สามารถบ่งบอกถึงธาตุและองค์ประกอบเชิงเคมีของพื้นผิวได้ การวิเคราะห์พื้นผิวด้วยเทคนิคนี้ แบ่งเป็น 2 แบบ คือการวิเคราะห์สเปกตรัมของมวลไอออนทุติยภูมิแบบสถิต จะได้ผลการวัดในรูปของสเปกตรัมมวล ซึ่งแสดงให้เห็นถึงธาตุที่เป็นองค์ประกอบของพื้นผิวรวมถึงองค์ประกอบเชิงเคมีของพื้นผิวด้วย และการวิเคราะห์สเปกตรัมของมวลไอออนทุติยภูมิแบบไดนามิก จะได้ข้อมูลองค์ประกอบของสารตัวอย่างที่เป็นฟังก์ชันกับความลึกที่เรียกว่า โครงสร้างเชิงลึก ในการทดลองจะใช้ลำไอออนปฐมภูมิของออกซิเจนพลังงาน 3.0 keV สำหรับการวิเคราะห์แบบสถิตและ 5.0 keV สำหรับการวิเคราะห์แบบไดนามิก ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการวิเคราะห์พื้นผิวโดยใช้ อลูมิเนียมฟอสเฟต ฟิล์มบางอลูมิเนียมและฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์บนแผ่นซิลิกอนเป็นสารตัวอย่าง จากการวิเคราะห์สารตัวอย่างอลูมิเนียมฟอสเฟตพบว่าพื้นผิวของอลูมิเนียมฟอสเฟตมีการปนเปื้อนด้วย อลูมิเนียมคาร์ไบด์ อลูมิเนียมไนไตรด์ อลูมิเนียมออกไซด์และแมกนีเซียมจากสิ่งแวดล้อม สำหรับการวัดความหนาของฟิล์มบางของอลูมิเนียมและอินเดียมทินออกไซด์บนแผ่นซิลิกอน ทำโดยการวิเคราะห์แบบไดนามิก เทียบค่าที่วัดโดยเครื่องวัด โครงร่างของพื้นผิวของบริษัทวิโก รุ่น เดคแพค 3 เอสพี

Thesis Title	Study of Surface Analysis Using Secondary Ion Mass Spectrometry
Student	Miss Suttinart Noothongkaew
Student ID.	45064006
Degree	Master of Science
Programme	Applied Physics
Year	2006
Thesis Advisor	Assistant Professor Dr.Warawoot Thowladda

ABSTRACT

This thesis proposes a study of surface analysis technique for measurement of elements, chemical composition and depth profile of material surface using technique of secondary ion mass spectrometry (SIMS). During SIMS analysis, the sample surface is slowly sputtered away by primary ion beam. The resulting secondary ion spectrum which are measured by quadrupole mass spectrometer contain information useful for identifying the molecular species. This slow sputtering mode is called static SIMS. In contrast to dynamic SIMS, continuous analysis while fast sputtering produces the information as a function of depth, called a depth profile. In this thesis primary oxygen ion with beam energies of 3.0 keV and 5.0 keV were used for static and dynamic SIMS respectively. Aluminium foil, thin films of aluminium and indium tin oxide on silicon wafer were used as tested surfaces. The measurements showed that aluminium foil surface was contaminated with AlC, AlN, AlO and Mg from its environment. The thickness of aluminium and ITO thin film on silicon wafer surfaces were measured by dynamic SIMS. The results of the thickness measurements were compared the measurement results of Veeco Surface Profilometer model Dektak 3ST.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้อย่างดี เนื่องจากได้รับเมตตากรุณาเป็นอย่างยิ่ง จาก ผศ.ดร.วราวุฒิ เถาถัดดา อาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ที่ให้คำปรึกษา และแนะนำแนวทางในการดำเนินงานวิจัย รวมทั้งช่วยแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นขณะทำงานวิจัยได้เป็นอย่างดี ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) และคุณเจริญชัย เหลืองอ่อน (พี่โก้) ที่ได้สนับสนุนเครื่องมือวัดโครงสร้างของพื้นผิวตลอดจนข้อมูลและสารตัวอย่างต่างๆ ในการทำวิจัย

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวิจัยควอนตัมและสารกึ่งตัวนำทางแสง ที่คอยสนับสนุนทางด้านการปลูกฟิล์มบางและอุปกรณ์สารเคมีในการทำความสะอาดสารตัวอย่าง

ขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) ที่ได้สนับสนุนเครื่องมือชุดกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

ขอขอบคุณอาจารย์ ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี เพื่อนๆ และรวมถึงทุกๆคนที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับงานวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่มอบทุนการศึกษาให้ศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนในทุกๆ เรื่องทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ข้าพเจ้าขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

สุทธินาถ หนูทองแก้ว

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและความเป็นมา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	1
1.3 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในงานวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.5 วิธีการดำเนินการ การทำวิทยานิพนธ์.....	2
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 การวิเคราะห์สเปกตรัมของมวลไอออนทุติยภูมิ.....	4
2.1.1 การวิเคราะห์สเปกตรัมของมวลไอออนทุติยภูมิแบบสถิต.....	5
2.1.2 การวิเคราะห์สเปกตรัมของมวลไอออนทุติยภูมิแบบไดนามิก.....	6
2.2 ไอออนบีมสปัตเตอริง (Ion Beam Sputtering).....	7
2.3 ลำไอออนปฐมภูมิ (Primary beam).....	7
2.4 พลังงานของลำไอออนปฐมภูมิ (Primary Beam Energy).....	8
2.5 มุมตกกระทบของลำไอออนปฐมภูมิ (Primary Angle of Incidence).....	10
2.6 การกระจายพลังงานของไอออนทุติยภูมิ (Energy Distribution).....	11
2.7 พื้นที่การตรวจวัด (Detected Area).....	12
2.8 การวัดโครงสร้างเชิงลึก.....	13
2.9 สมการพื้นฐาน.....	13
2.10 ปริมาณการเกิดไอออนทุติยภูมิ.....	17

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.11 พลังงานไอออไนเซชัน (Ionization energy)	17
2.12 สัมพรรคภาพอิเล็กตรอน (Electron Affinity; EA)	18
2.13 ตัวประกอบความไวสัมพัทธ์ (Relative Sensitivity Factor)	19
2.14 องค์ประกอบเครื่องมือพื้นฐาน.....	20
2.14.1 แหล่งกำเนิดไอออนปฐมภูมิ.....	21
2.14.2 ระบบวิเคราะห์มวล (mass spectrometers)	21
บทที่ 3 ขั้นตอนดำเนินงานวิจัย.....	26
3.1 การติดตั้งระบบการวิเคราะห์สเปกตรัมมวลของ ไอออนทุติยภูมิ.....	26
3.1.1 การติดตั้งอุปกรณ์การวิเคราะห์มวลแบบควอดรูโพล.....	27
3.1.2 การติดตั้งแหล่งกำเนิดลำไอออน	29
3.2 การปั๊มห้องสุญญากาศ.....	31
3.3 การใช้งานแหล่งกำเนิดลำไอออน.....	31
3.4 การใช้โปรแกรม (MASsoft).....	32
3.5 การปรับพารามิเตอร์แบบอัตโนมัติ (Auto Tune).....	38
3.6 การปลูกฟิล์มโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อน.....	40
3.7 การปลูกฟิล์มด้วยเทคนิคอาร์เอฟแมกนีตรอนสปีดเตอร์ริง.....	40
3.8 การทำความสะอาดสารกึ่งตัวนำซิลิกอน.....	41
3.9 การวัดความลึกของหลุม.....	42
3.10 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	43
บทที่ 4 การทดลอง ผลการทดลอง และการวิเคราะห์ผล.....	44
4.1 การหาพารามิเตอร์ของระบบวิเคราะห์มวล.....	44
4.2 การศึกษาผลของมุมตกกระทบของลำไอออนปฐมภูมิ.....	51
4.3 การวิเคราะห์พื้นผิวของสารตัวอย่าง.....	56
4.3.1 สารกึ่งตัวนำซิลิกอนชนิดพี.....	56
4.3.2 อลูมิเนียมฟอสไฟด์.....	57
4.3.2.1 การวิเคราะห์แบบสถิต.....	58

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.3.2.2 การวิเคราะห์แบบไดนามิก.....	62
4.3.3 फिल्मบางอลูมิเนียมบนสารกึ่งตัวนำซิลิกอน(ตัวอย่างที่1).....	63
4.3.3.1 การวิเคราะห์แบบสถิต.....	64
4.3.3.2 การวิเคราะห์แบบไดนามิก.....	66
4.3.3.3 การวัดอัตราการสปีดเตอร์.....	68
4.3.3.3.1 อัตราการสปีดเตอร์ของซิลิกอน.....	69
4.3.3.3.2 อัตราการสปีดเตอร์ของอลูมิเนียม.....	71
4.3.3.4 การคำนวณความหนาของฟิล์มบางอลูมิเนียม.....	74
4.3.4 फिल्मบางอลูมิเนียมบนสารกึ่งตัวนำซิลิกอน (ตัวอย่างที่ 2).....	78
4.3.4.1 การวิเคราะห์แบบสถิต.....	78
4.3.4.2 การวิเคราะห์แบบไดนามิก.....	80
4.3.5 फिल्मของอินเดียมทินออกไซด์บนสารกึ่งตัวนำซิลิกอน.....	86
4.3.5.1 การวิเคราะห์แบบสถิต.....	86
4.3.5.2 การวิเคราะห์แบบไดนามิก.....	88
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	93
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	93
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	95
บรรณานุกรม.....	96
ประวัติผู้เขียน.....	97

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สปีดเตอร์ชิลด์ของไอออนทุติยภูมิจากผิวโลหะบริสุทธิ์และผิวโลหะที่เป็นออกไซด์	15
2.2 surface monolayer lifetime , t_m ขึ้นกับความหนาแน่นของไอออนปฐมภูมิ	16
4.1 พารามิเตอร์ของระบบวิเคราะห์มวล	52
4.2 พารามิเตอร์ของระบบควบคุมแหล่งกำเนิด ไอออนปฐมภูมิ	52
4.3 ปริมาณของ ไอออนทุติยภูมิของซิลิกอนเมื่อลำไอออนปฐมภูมิตกกระทบบำเหน็จต่าง ๆ.....	55
4.4 พารามิเตอร์สำหรับระบบวิเคราะห์มวล	59
4.5 พารามิเตอร์สำหรับระบบควบคุมแหล่งกำเนิดลำไอออน.....	59
4.6 พารามิเตอร์สำหรับระบบควบคุมแหล่งกำเนิด ไอออน.....	62
4.7 พารามิเตอร์ของระบบวิเคราะห์มวล	64
4.8 พารามิเตอร์ของระบบควบคุมแหล่งกำเนิด ไอออน.....	65
4.9 พารามิเตอร์ของระบบควบคุมแหล่งกำเนิด ไอออน	66
4.10 พารามิเตอร์ของระบบวิเคราะห์มวลสำหรับซิลิกอน	68
4.11 พารามิเตอร์ของระบบควบคุมแหล่งกำเนิด ไอออน (ซิลิกอน/ออลูมิเนียม)	69
4.12 อัตราการสปีดเตอร์ที่มุมตกกระทบบ 0 องศา	70
4.13 อัตราการสปีดเตอร์เฉลี่ยของซิลิกอนที่มุมตกกระทบบ 0, 30 และ 60 องศา	71
4.14 อัตราการสปีดเตอร์เฉลี่ยของออลูมิเนียมที่มุมตกกระทบบ 0 , 30 และ 60	72
4.15 พารามิเตอร์ของระบบวิเคราะห์มวล	79
4.16 พารามิเตอร์ของระบบควบคุมแหล่งกำเนิด ไอออน	79
4.17 พารามิเตอร์ของระบบควบคุมแหล่งกำเนิด ไอออน.....	80
4.18 พารามิเตอร์ของระบบวิเคราะห์มวล	87
4.19 พารามิเตอร์ของระบบควบคุมแหล่งกำเนิด ไอออน	87
4.20 พารามิเตอร์ของระบบควบคุมแหล่งกำเนิด ไอออน.....	89

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างระบบการวิเคราะห์พื้นผิวด้วยเทคนิคการวิเคราะห์สเปกตรัมของมวลไอออนทุติยภูมิ.....	5
2.2 ระบบวิเคราะห์สเปกตรัมของมวลไอออนทุติยภูมิแบบสถิต.....	6
2.3 ระบบวิเคราะห์สเปกตรัมของมวลไอออนทุติยภูมิแบบไดนามิก.....	6
2.4 กระบวนการสปีดเตอร์ที่เกิดจากการยิงลำไอออนบนสารตัวอย่าง.....	7
2.5 As ฟังค์ในชั้นของ SiO ₂ วัดโดยใช้ไอออนปฐมภูมิของออกซิเจนแตกต่างกัน.....	8
2.6 ยิลด์ไอออนบวกทุติยภูมิของซิลิกอน ขึ้นอยู่กับพลังงานไอออนปฐมภูมิที่มากกระทบสำหรับไอออนปฐมภูมิต่างๆ ท้ามุม 0 องศา กับเส้นปกติ.....	9
2.7 สปีดเตอร์ยิลด์ของซิลิกอนสำหรับ ไอออนปฐมภูมิแต่ละชนิดที่มุมตกกระทบ 0 และ 60 องศา กับเส้นปกติ.....	9
2.8 สปีดเตอร์ยิลด์ของ Si, Ge และ GaAs ที่มุมตกกระทบ 0 ถึง 60 องศา กับเส้นปกติ สำหรับไอออนปฐมภูมิของออกซิเจนพลังงาน 10 keV	10
2.9 การกระจายพลังงานของซิลิกอน (Si) และไอออนโมเลกุลของซิลิกอน	11
2.10 ลักษณะโครงสร้างเชิงลึกของกราฟรูป(A) และ(B)พื้นที่สแกนขนาด 220×220 μm และ 80×80 μm ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางพื้นที่ตรวจวัด 60 μm (วิเคราะห์ด้วยอุปกรณ์ชุด CAMECA IMS-3f)	12
2.11 ยิลด์ของ ไอออนบวกทุติยภูมิของธาตุต่างๆ เรียงตามลำดับเลขอะตอม.....	14
2.12 ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นกระแสของลำไอออนปฐมภูมิกับอัตราการหลุดออกของชั้นพื้นผิวสำหรับการวิเคราะห์สเปกตรัมของมวลไอออนทุติยภูมิแบบสถิต และแบบไดนามิก.....	16
2.13 แนวโน้มพลังงานไอออนไนเซชันของธาตุต่างๆ ในตารางธาตุ.....	17
2.14 แนวโน้มสัมพรรคภาพอิเล็กตรอนของธาตุต่างๆ ในตารางธาตุ.....	18
2.15 การเลือกใช้ลำไอออนปฐมภูมิ ให้เหมาะกับชนิดของไอออนทุติยภูมิที่จะทำการศึกษา.....	19
2.16 องค์ประกอบต่างๆ ของระบบการวิเคราะห์สเปกตรัมของมวลไอออนทุติยภูมิ.....	20
2.17 การจัดวางขั้วไฟฟ้าระบบวิเคราะห์มวลแบบควอดครูปอล.....	22
2.18 การทำงานของระบบวิเคราะห์มวลแบบควอดครูปอล.....	22

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.1 อุปกรณ์ของระบบที่ติดตั้งในระบบสุญญากาศพร้อมจะใช้งาน	26
3.2 ขั้วไฟฟ้าเชื่อมต่อฟีดทูลที่ด้านท้ายของชุดตรวจวัดมวลและ ขั้วไฟฟ้าที่ต้องต่อเข้ากับชุดกำเนิดสัญญาณความถี่สูง.....	27
3.3 ชุดตรวจวัดมวลของไอออนทุติยภูมิ รุ่น HAL SIM 300 ที่ติดตั้งเข้ากับระบบสุญญากาศ.....	28
3.4 ชุดกำเนิดสัญญาณความถี่สูงที่ติดตั้งเข้ากับหัวตรวจวัดมวล.....	28
3.5 การเชื่อมต่อหัวตรวจวัดมวลและชุดกำเนิดสัญญาณความถี่สูง เข้ากับชุดควบคุมและเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์(MSIU).....	29
3.6 แหล่งกำเนิดลำไอออน รุ่น HAL IG 20 ที่ติดตั้งเรียบร้อยแล้ว.....	30
3.7 แสดงการติดตั้งโทเบอร์โมเลกุลดาร์ เกจวัดความดัน นิคเคิลว่าล์ ของระบบแหล่งกำเนิดลำไอออน.....	30
3.8 โปรแกรม MASsoft.....	33
3.9 ไดอะล็อกบ็อกซ์ของสแกนแกลอรี่.....	33
3.10 ไดอะล็อกบ็อกซ์การสแกนแบบเชิงเส้น.....	34
3.11 แสดงบ็อกซ์ไดอะแกรมสแกนทรีที่สามารถกำหนดและเพิ่มบ็อกซ์ได้อีกเมื่อต้องการ.....	35
3.12 ไดอะล็อกบ็อกซ์แสดงพารามิเตอร์ ของโหมดการวัด ไอออนบวก.....	35
3.13 ไดอะล็อกบ็อกซ์แสดงพารามิเตอร์สำหรับการสแกน.....	36
3.14 ไดอะล็อกบ็อกซ์สำหรับเลือกสแกนการนับแบบสะสม.....	36
3.15 คอนโทรลวินโดวส์ที่พร้อมจะทำงาน.....	37
3.16 สเปกตรัมของมวลที่แสดงธาตุต่างๆ ในตารางธาตุ	37
3.17 วินโดวส์สำหรับการปรับพารามิเตอร์แบบอัตโนมัติ.....	38
3.18 สแกนทรีแสดงพารามิเตอร์ที่ทำการปรับค่า.....	39
3.19 กราฟแสดงช่วงค่าพารามิเตอร์ของระบบวิเคราะห์มวลที่เหมาะสมสำหรับมวลไอออน.....	39
3.20 ระบบการปลูกฟิล์มโดยวิธีการระเหยด้วยความร้อน	40
3.21 ระบบการปลูกฟิล์มโดยเทคนิคอาร์เอฟแมกนีตรอนสปีดเตอริง.....	40
3.22 สารเคมีและเครื่องอัลตราโซนิกที่ใช้ในการทำความสะอาด.....	42
3.23 เครื่องวัด โครงร่างของพื้นผิว ของบริษัท Veecoรุ่นDektak 3ST	42
3.24 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 Scan tree สำหรับการปรับพารามิเตอร์แบบอัตโนมัติของมวลซิลิกอน	45
4.2 หน้าต่างแสดงผลของการปรับพารามิเตอร์ทั้ง 8	45
4.3 หน้าต่างแสดงผลของการปรับพารามิเตอร์ Source-focus	46
4.4 หน้าต่างแสดงผลของการปรับพารามิเตอร์ focus	46
4.5 หน้าต่างแสดงผลของการปรับพารามิเตอร์ extractor	47
4.6 หน้าต่างแสดงผลของการปรับพารามิเตอร์ lens	47
4.7 หน้าต่างแสดงผลของการปรับพารามิเตอร์ endcap	48
4.8 หน้าต่างแสดงผลของการปรับพารามิเตอร์ energy	48
4.9 หน้าต่างแสดงผลของการปรับพารามิเตอร์ cylinder	49
4.10 หน้าต่างแสดงผลของการปรับพารามิเตอร์ electron energy.....	49
4.11 Environment Editor แสดงค่าของตัวแปรที่ถูกปรับ	50
4.12 Environment Editor แสดงค่าของตัวแปรที่ถูกปรับ (ต่อ).....	50
4.13 Environment Editor แสดงค่าของตัวแปรที่ถูกปรับ (ต่อ)	51
4.14 สารกึ่งตัวนำซิลิกอนชนิดพีติดตั้งบนแผ่นจับยึดสารตัวอย่าง.....	51
4.15 สเปกตรัมมวลของสารตัวอย่างซิลิกอนเมื่อลำไอออนปฐมภูมิตกกระทบทำมุม (ก) 0 องศา วัดจากเส้นปกติ (ข) 50 องศา วัดจากเส้นปกติ	53
(ค) 60 องศา วัดจากเส้นปกติ (ง) 70 องศา วัดจากเส้นปกติ	54
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไอออนทุติยภูมิของซิลิกอนกับมุมตกกระทบ ของลำไอออนปฐมภูมิ	55
4.17 สเปกตรัมมวลของสารกึ่งตัวนำชนิดพีที่มีโบรอนเป็นสารเจือ (นำรูปที่ 4.15 (ค) มาขยายสเกลให้เห็นรายละเอียดมากขึ้น).....	57
4.18 ลักษณะของแผ่นอลูมิเนียมฟอยล์ที่ใช้ในการทดลอง (ก) ด้านหน้า (ด้านเงา) (ข) ด้านหลัง (ด้านหยาบ)	58
4.19 สเปกตรัมมวลของอลูมิเนียมฟอยล์ที่ผิวด้านหน้า (ก) แสดงสเกลสูงสุดที่ 70000 count (ข) แสดงสเกลสูงสุดที่ 10000 count	60
4.20 สเปกตรัมมวลของอลูมิเนียมฟอยล์ที่ผิวด้านหลัง (ก) แสดงสเกลสูงสุดที่ 80000 count (ข) แสดงสเกลสูงสุดที่ 6000 count	61

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.21 โครงสร้างเชิงลึกของ Al และ Mg ของอลูมิเนียมฟอสต์ด้านหน้า	62
4.22 फिल्मบางของอลูมิเนียมบนสารกึ่งตัวนำซิลิกอน (ตัวอย่างที่ 1) ติดตั้งบนแผ่นจับยึดสารตัวอย่าง	64
4.23 สเปกตรัมมวลของฟิล์มบางอลูมิเนียมบนซิลิกอน (ก) แสดงสเกลสูงสุดที่ 90000 count (ข) แสดงสเกลสูงสุดที่ 20000 count	65
4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ ไอออนทุติยภูมิ Al และ Si ของฟิล์มบาง อลูมิเนียมบนซิลิกอนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (ก) แสดงสเกลเวลาถึง 250 นาที (ข) แสดงสเกลเวลาถึง 12 นาที	67
4.25 โครงสร้างเชิงลึกของซิลิกอน (มุมตกกระทบ 0 องศา) ในเวลา 60.8 นาที	70
4.26 หลุมที่เกิดจากการสปีดเตอร์ด้วยลำไอออนที่มุม 0 องศา เป็นเวลา 60.8 นาที	70
4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมตกกระทบและอัตราการสปีดเตอร์ของซิลิกอน	71
4.28 โครงสร้างเชิงลึกของอลูมิเนียม (มุมตกกระทบ 0 องศา) ในเวลา 50 นาที.....	72
4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมตกกระทบและอัตราการสปีดเตอร์ของอลูมิเนียม	73
4.30 อัตราการสปีดเตอร์ของซิลิกอนและอลูมิเนียมที่มุมตกกระทบต่างๆ	73
4.31 ผลการวัดความลึกด้วยเครื่องวัด โครงร่างของพื้นผิว	74
4.32 โครงสร้างเชิงลึกของ Al และ Si ของฟิล์มบางอลูมิเนียมบนซิลิกอน (ก) แสดงสเกลความลึกถึง 7 ไมโครเมตร (ข) แสดงสเกลความลึกถึง 0.3 ไมโครเมตร	75
4.33 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดด้วยกำลังขยาย 50,000 เท่า แสดงความหนาของฟิล์มบางอลูมิเนียม.....	77
4.34 फिल्मบางของอลูมิเนียมบนสารกึ่งตัวนำซิลิกอน(ตัวอย่างที่ 2)	78
4.35 สเปกตรัมมวลของฟิล์มบางอลูมิเนียมบนซิลิกอน(ตัวอย่างที่ 2)	80
4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ ไอออนทุติยภูมิ Al และ Si ของฟิล์มบางอลูมิเนียม บนซิลิกอนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา เมื่อลำไอออนปฐมภูมิตกกระทบทำมุม 0 องศา	81
4.37 ผลการวัดความลึกด้วยเครื่องวัด โครงร่างของพื้นผิว.....	81
4.38 โครงสร้างเชิงลึกของ Al และ Si ของฟิล์มบางอลูมิเนียมบนซิลิกอน (0 องศา)	82
4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ ไอออนทุติยภูมิ Al และ Si ของฟิล์มบางอลูมิเนียมบนซิลิกอนที่ เปลี่ยนแปลงตามเวลา เมื่อลำไอออนปฐมภูมิตกกระทบทำมุม 30 องศา.....	83
4.40 ผลการวัดความลึกด้วยเครื่องวัด โครงร่างของพื้นผิว.....	83

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.41 โครงสร้างเชิงลึกของ AI และ Si ของฟิล์มบางอลูมิเนียมบนซิลิกอน (30 องศา)	84
4.42 ผลการวัดความหนาของฟิล์มบางอลูมิเนียมด้วยเครื่องวัด โครงร่างของพื้นผิว.....	85
4.43 ฟิล์มของอินเดียมทินออกไซด์บนสารกึ่งตัวนำซิลิกอน.....	86
4.44 สเปกตรัมมวลของฟิล์มอินเดียมทินออกไซด์บนซิลิกอน.....	88
4.45 การกำหนดพารามิเตอร์ของการสแกนลำไอออน.....	89
4.46 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไอออนทุติยภูมิของ In และ Si ของฟิล์มอินเดียมทินออกไซด์บนซิลิกอนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาเมื่อมีการสแกนลำไอออน.....	90
4.47 ผลการวัดความลึกด้วยเครื่องวัด โครงร่างของพื้นผิว.....	90
4.48 โครงสร้างเชิงลึกของ In และ Si ของฟิล์มอินเดียมทินออกไซด์บนซิลิกอนเมื่อทำการวัดแบบสแกนลำไอออน.....	91
4.49 ความหนาของฟิล์มอินเดียมทินออกไซด์วัดด้วยเครื่องวัด โครงร่างของพื้นผิว.....	92

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและความเป็นมา

การพัฒนาอย่างรวดเร็วของเทคโนโลยีสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำทำให้เกิดความต้องการเทคนิคสำหรับตรวจสอบลักษณะสมบัติของวัสดุ การวิเคราะห์พื้นผิวด้วยเทคนิคการวิเคราะห์สเปกตรัมของมวลไอออนทุติยภูมิ (Secondary Ion Mass Spectrometry, SIMS) เป็นเทคนิคหนึ่งที่ถูกพัฒนาขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากมีข้อดีหลายประการ เช่น มีความเร็วในการวัดและวิเคราะห์ผลในระดับดี เชื่อถือได้ มีความละเอียดในการวิเคราะห์ที่สามารถแยกชั้นของความลึก (depth resolution) ได้ดี และสามารถวัดได้อย่างละเอียดและมีความแม่นยำสูง แต่มีข้อเสียที่มีผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณให้ผลได้ไม่แม่นยำ

การวิเคราะห์พื้นผิวด้วยเทคนิคการวิเคราะห์สเปกตรัมของมวลไอออนทุติยภูมิ ได้รับการพัฒนาขึ้นครั้งแรกภายใต้โครงการของนาซา ในช่วงต้นของทศวรรษที่ 1960 เพื่อวิเคราะห์หินจากดวงจันทร์ จากนั้นจึงถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในงานด้านวิทยาศาสตร์ตั้งแต่ 20 ปีต่อมา ซึ่งวิธีการวิเคราะห์พื้นผิวแบบนี้ สามารถใช้ตรวจสอบธาตุในตารางธาตุได้ทุกชนิด ปัจจุบัน ถูกนำมาใช้มากที่สุดในการวิเคราะห์วัสดุอิเล็กทรอนิกส์งานอุตสาหกรรม เช่น สารกึ่งตัวนำและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาการใช้งานระบบอุปกรณ์การวิเคราะห์พื้นผิวด้วยเทคนิคการวิเคราะห์สเปกตรัมของมวลไอออนทุติยภูมิ
- 1.2.2 เพื่อศึกษาการวิเคราะห์พื้นผิวด้วยเทคนิคการวิเคราะห์สเปกตรัมของมวลไอออนทุติยภูมิในลักษณะการวิเคราะห์มวลแบบต่างๆ ดังนี้
 - 1.2.2.1 วิเคราะห์สเปกตรัมของมวลไอออนทุติยภูมิแบบสถิต
 - 1.2.2.2 วิเคราะห์สเปกตรัมของมวลไอออนทุติยภูมิแบบไดนามิก

1.3 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในงานวิจัย

เทคนิคการวิเคราะห์พื้นผิวโดยการวิเคราะห์สเปกตรัมของมวลไอออนทุติยภูมิที่มีองค์ประกอบหลักสองส่วนด้วยกันคือ ระบบแหล่งกำเนิดลำไอออนปฐมภูมิ และระบบวิเคราะห์มวล ซึ่งเทคนิคนี้ เป็นการโฟกัสลำไอออนปฐมภูมิลงบนสารตัวอย่างเป็นผลให้เกิดไอออนทุติยภูมิจากสารตัวอย่าง เมื่อทำการวิเคราะห์มวลของไอออนทุติยภูมิเหล่านี้ด้วยระบบวิเคราะห์มวลแบบควอดรูโพล จะทำให้บ่งบอกถึงธาตุและองค์ประกอบเชิงเคมีของพื้นผิวได้

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ จะศึกษาการวิเคราะห์สเปกตรัมของมวลไอออนทุติยภูมิแบบสถิตเพื่อศึกษาธาตุและองค์ประกอบเชิงเคมีบริเวณพื้นผิวแต่ละชนิด และแบบไดนามิก ซึ่งเป็นการวัดในขณะที่ทำการวิเคราะห์พื้นผิวของสารตัวอย่างอย่างต่อเนื่องในขณะที่พื้นผิวถูกกำจัดออก ซึ่งจะได้ข้อมูลที่เป็นฟังก์ชันกับความลึก เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างเชิงลึกของสารตัวอย่างโดยนำสารตัวอย่างไปวัดความลึกของหลุมที่เกิดจากการสปีดเตอร์ด้วยลำไอออนปฐมภูมิ ด้วยเครื่องวัดโครงสร้างของพื้นผิว (surface profilometer) หลังจากนั้นนำมาคำนวณหาอัตราการสปีดเตอร์ของซิลิกอนและอลูมิเนียมสำหรับการวัดความหนาของฟิล์มบางของอลูมิเนียมและอินเดียมทีนออกไซด์บนแผ่นซิลิกอน ด้วยการวิเคราะห์แบบไดนามิก

1.5 วิธีการดำเนินการ การทำวิทยานิพนธ์

1.5.1 แผนดำเนินงานสามารถแบ่งเป็นขั้นตอนต่างๆ ได้ดังต่อไปนี้

- ขั้นตอนที่ 1 ติดตั้งและทดสอบการใช้งานระบบอุปกรณ์
- ขั้นตอนที่ 2 ศึกษาการใช้งานของระบบอุปกรณ์
- ขั้นตอนที่ 3 เริ่มทำการทดลอง
- ขั้นตอนที่ 4 รวบรวมผลและเก็บข้อมูลเพิ่มเติม
- ขั้นตอนที่ 5 วิเคราะห์ สรุปผล และจัดทำวิทยานิพนธ์

1.5.2 ระยะเวลาที่ใช้ในการดำเนินการในแต่ละขั้นตอน

แผนการดำเนินการงานวิจัย													
ลำดับ	เดือนที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ขั้นตอนที่ 1		←→											
ขั้นตอนที่ 2				←→									
ขั้นตอนที่ 3					←→								
ขั้นตอนที่ 4									←→				
ขั้นตอนที่ 5												←→	

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.6.1 สามารถเข้าใจการทำงานของระบบอุปกรณ์ การวิเคราะห์พื้นผิวด้วยเทคนิคการวิเคราะห์สเปกตรัมของมวล ไอออนทุติยภูมิ
- 1.6.2 สามารถวิเคราะห์สเปกตรัมของมวล ไอออนทุติยภูมิแบบสถิตได้
- 1.6.3 สามารถวิเคราะห์สเปกตรัมของมวล ไอออนทุติยภูมิแบบไดนามิกได้
- 1.6.4 สามารถนำเทคนิคนี้ไปตรวจสอบธาตุต่างๆ ในตารางธาตุได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

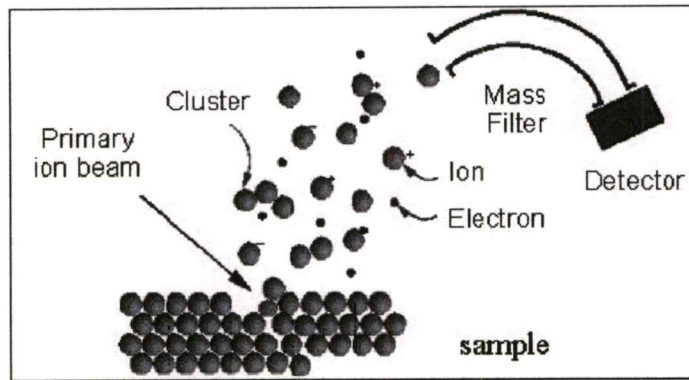
หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

สำหรับบทนี้กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานต่างๆ ที่เกี่ยวข้องในการวิจัยและระบบพื้นฐานของเครื่องมือวิเคราะห์พื้นผิวด้วยเทคนิคการวิเคราะห์สเปกตรัมของมวล ไอออนทุติยภูมิ รวมทั้งกล่าวถึงเทคนิคการวิเคราะห์มวลแบบสถิตและแบบไดนามิก การทำงานพื้นฐานของเครื่องมือซึ่งเนื้อหาทั้งหมดนี้ จำเป็นสำหรับการศึกษาและทำการวิเคราะห์สำหรับเทคนิคนี้

2.1 การวิเคราะห์สเปกตรัมของมวลไอออนทุติยภูมิ

เทคนิคการวิเคราะห์พื้นผิวโดยการวิเคราะห์สเปกตรัมของมวล ไอออนทุติยภูมิ เป็นการโพกัสไอออนปฐมภูมิลงบนสารตัวอย่างเป็นผลให้เกิดไอออนทุติยภูมิจากสารตัวอย่างเมื่อทำการวิเคราะห์มวลของไอออนทุติยภูมิต่างๆเหล่านี้จะทำให้บ่งบอกถึงธาตุและองค์ประกอบเชิงเคมีของพื้นผิวได้ การวิเคราะห์พื้นผิวด้วยวิธีนี้เรียกว่า การวิเคราะห์พื้นผิวด้วยเทคนิคการวิเคราะห์สเปกตรัมของมวลไอออนทุติยภูมิ โครงสร้างระบบการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 2.1 ปัจจุบันได้นำมาใช้ในการวิเคราะห์พื้นผิวของวัสดุที่เป็นของแข็ง ในด้านสารกึ่งตัวนำและฟิล์มบาง

เทคนิคการวิเคราะห์สเปกตรัมของมวล ไอออนทุติยภูมิ เป็นเทคนิคการวิเคราะห์พื้นผิว โดยการวัดมวลต่อประจุของอนุภาคที่อยู่ในสภาพไอออน ซึ่งถูกปลดปล่อยจากพื้นผิวของวัสดุเมื่อพื้นผิวนั้น (ซึ่งปกติมีสภาพสถานะของแข็ง) ถูกยิงด้วยอนุภาคปฐมภูมิที่มีพลังงานสูง ซึ่งอาจจะเป็นอนุภาคอิเล็กตรอน ไอออน หรืออนุภาคที่เป็นกลางหรือแม้กระทั่ง โฟตอน อนุภาคทุติยภูมิที่ถูกปลดปล่อยออกจากพื้นผิวอาจเป็น อิเล็กตรอน อะตอมหรือ โมเลกุลที่เป็นกลาง ไอออนของอะตอมหรือกลุ่มของอะตอม เฉพาะมวลของอนุภาคทุติยภูมิที่เป็น ไอออนบวกและ ไอออนลบเท่านั้นที่ได้รับความสนใจในเทคนิคที่กล่าวมานี้ ซึ่ง ไอออนเหล่านี้จะถูกวิเคราะห์โดย แมสสเปกโตรมิเตอร์ (mass spectrometer) ผลการวิเคราะห์นี้จะได้สเปกตรัมของมวลที่เป็นองค์ประกอบของพื้นผิว รวมถึงองค์ประกอบเชิงเคมีของพื้นผิวด้วย



รูปที่ 2.1 โครงสร้างระบบการวิเคราะห์พื้นผิวด้วยเทคนิคการวิเคราะห์สเปกตรัมของมวลไอออนทุติยภูมิ

โดยทั่วไปแล้วเทคนิคนี้จะใช้ลำไอออนพลังงานในช่วง 0.5-20 keV เข้าชนพื้นผิววัสดุ โดยการชนนี้ พลังงานของไอออนจะถ่ายเทไปยังอะตอมของพื้นผิวและทำให้เกิดการชนอย่างต่อเนื่องระหว่างอะตอมภายใต้พื้นผิวนั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ในการชนนั้นมีความเป็นไปได้ที่ทำให้อะตอมมีการเคลื่อนที่ไปยังพื้นผิวและเป็นผลให้อะตอมหรือกลุ่มอะตอมเหล่านั้นหลุดออกจากพื้นผิว อะตอมหรือกลุ่มอะตอมเหล่านี้ บางส่วนอาจสูญเสียอิเล็กตรอนในขณะที่บางส่วนได้รับอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้น จึงมีสภาพเป็นไอออนบวกและ ไอออนลบตามลำดับ ไอออนทุติยภูมิที่หลุดออกจากพื้นผิวเหล่านี้ 95% มาจากสองชั้นบนสุดของชั้นอะตอมของพื้นผิวหรือที่ความลึกน้อยกว่า 10 นาโนเมตร

การวิเคราะห์พื้นผิวด้วยเทคนิคการวิเคราะห์สเปกตรัมของมวลไอออนทุติยภูมิ ซึ่งแบ่งได้ 2 ลักษณะ ดังนี้

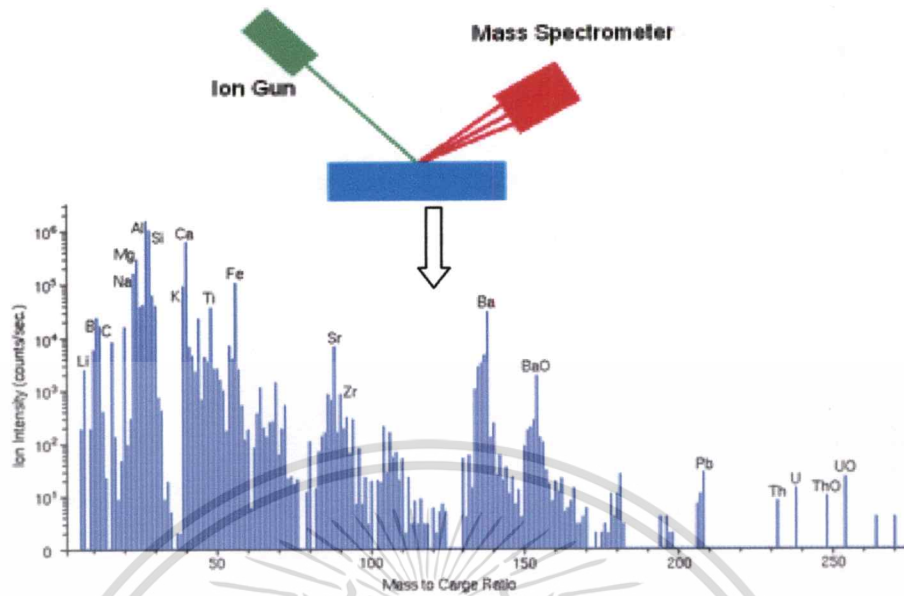
2.1.1 การวิเคราะห์สเปกตรัมของมวลไอออนทุติยภูมิแบบสถิต

2.1.2 การวิเคราะห์สเปกตรัมของมวลไอออนทุติยภูมิแบบไดนามิก

2.1.1 การวิเคราะห์สเปกตรัมของมวลไอออนทุติยภูมิแบบสถิต

การวิเคราะห์สเปกตรัมของมวลไอออนทุติยภูมิแบบสถิต หมายถึง กรณีที่พื้นผิวถูกยิงด้วยลำไอออนที่มีพลังงานและความหนาแน่นกระแสต่ำมากซึ่งจะทำให้อัตราการสเปกตรัม (sputter rate) ที่ใช้งานต่ำด้วย เนื่องจากลำไอออนปฐมภูมิที่มีความหนาแน่นกระแสแน่นต่ำ ($< 1 \text{ nA cm}^{-2}$) พื้นผิวจะถูกกำจัดออกน้อยกว่าหนึ่งในสิบของชั้นแรกของชั้นอะตอม (atomic monolayer) ขณะทำการวัดซึ่งจะได้ข้อมูลเฉพาะที่บริเวณพื้นผิวเท่านั้น ซึ่งข้อมูลที่ได้จะแสดงในรูปของกราฟที่เรียกว่า สเปกตรัมของมวล (mass spectrum) โดยที่แกนอนเป็นมวลต่อประจุ (m/z) โดยที่มวล (m) เป็นมวลของไอออนทุติยภูมิ สำหรับประจุ (z) คือประจุของไอออนทุติยภูมิ และแกนตั้งเป็นจำนวนไอออนทุติยภูมิในหน่วยจำนวนนับต่อวินาที (counts/second) ระบบวิเคราะห์สเปกตรัมของมวลไอออนทุติยภูมิแบบสถิตแสดงดังรูปที่ 2.2

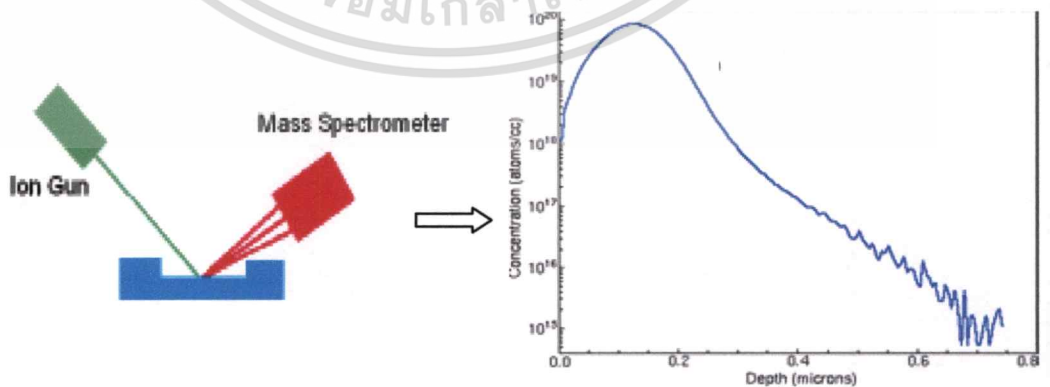
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 ระบบวิเคราะห์สเปกตรัมของมวลไอออนทุติยภูมิแบบสถิต

2.1.2 การวิเคราะห์สเปกตรัมของมวลไอออนทุติยภูมิแบบไดนามิก

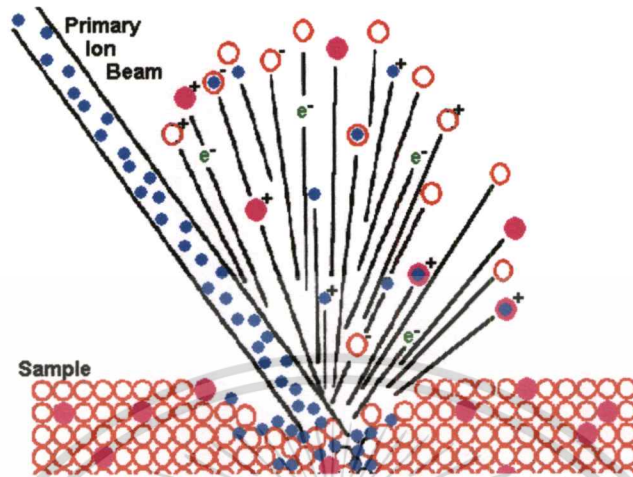
การวิเคราะห์สเปกตรัมของมวลไอออนทุติยภูมิแบบไดนามิกนั้น เราจะใช้ลำไอออนปฐมภูมิที่มีพลังงานและความหนาแน่นกระแสสูง ($> 1 \mu\text{A cm}^{-2}$) พื้นผิวจะถูกสปีดเตอร์ ออกอย่างรวดเร็ว เมื่อทำการวิเคราะห์มวลของไอออนทุติยภูมิอย่างต่อเนื่อง ในขณะที่พื้นผิวถูกกำจัดออกจะได้อินโฟร์เมชันที่เป็นฟังก์ชันกับความลึก เรียกว่า โครงสร้างเชิงลึก (depth profile) การวิเคราะห์แบบไดนามิกนี้ มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาองค์ประกอบเชิงลึกของพื้นผิว ระบบวิเคราะห์สเปกตรัมของมวลไอออนทุติยภูมิแบบไดนามิกแสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ระบบวิเคราะห์สเปกตรัมของมวลไอออนทุติยภูมิแบบไดนามิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ไอออนบีมสปัตเตอริง (Ion Beam Sputtering)



รูปที่ 2.4 กระบวนการสปัตเตอริงที่เกิดจากการยิงลำไอออนบนสารตัวอย่าง

การใช้ลำไอออนยิงบนสารตัวอย่าง เป็นผลให้เกิดอนุภาคต่างๆ หลุดออกมาจากพื้นผิวด้วยกระบวนการสปัตเตอริง อนุภาคที่หลุดออกมาอาจเป็นอะตอมเดี่ยวหรือหลายอะตอมและอาจเป็นอนุภาคที่เป็นกลาง ไอออนบวกหรือไอออนลบก็ได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 อนุภาคทุติยภูมิอาจจะมีพลังงานจลน์ตั้งแต่ศูนย์ถึงหลายร้อยอิเล็กตรอนโวลต์ สำหรับงานวิจัยนี้แหล่งกำเนิดไอออนสามารถผลิตลำไอออนจากก๊าซเท่านั้นจึงเลือกใช้ ออกซิเจนเป็นหลัก ซึ่งโดยทั่วไปพลังงานของไอออนมีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 30 keV ไอออนปฐมภูมิที่ยิงลงบนสารตัวอย่างจะฝังตัวและรวมกับอะตอมของสารตัวอย่างอยู่ในระดับความลึกประมาณ 1 ถึง 10 นาโนเมตร สำหรับอัตราการสปัตเตอริง มีค่าอยู่ระหว่าง 0.5 และ 5 นาโนเมตร/วินาที ซึ่งอัตราการสปัตเตอริงขึ้นอยู่กับความเข้มของลำไอออนปฐมภูมิ ชนิดของสารตัวอย่างและโครงสร้างเชิงผลึก

2.3 ลำไอออนปฐมภูมิ (Primary beam)

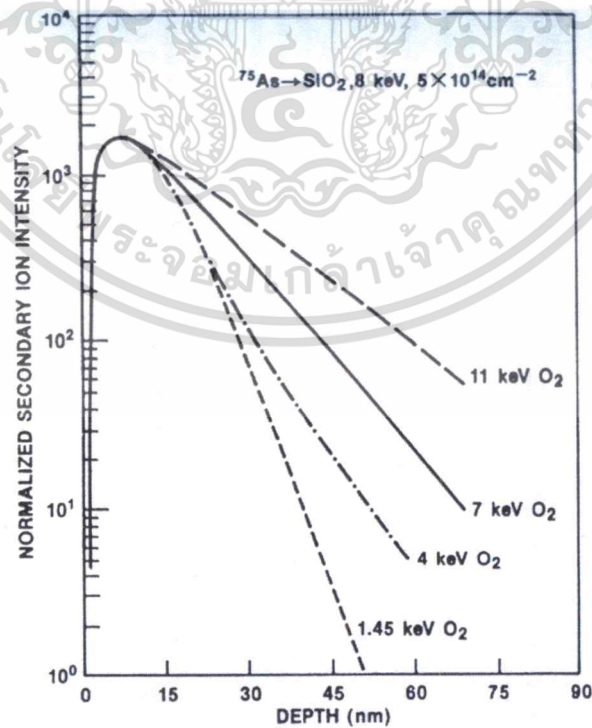
ชนิดของลำไอออนปฐมภูมิ ที่นิยมนำมาใช้ในระบบการวิเคราะห์มวลของไอออนทุติยภูมิ มีดังนี้ ซีเซียม (Cs^+), ออกซิเจน (O_2^+), อาร์กอน (Ar^+) และแกเลเรียม (Ga^+) ซึ่งการเลือกใช้นี้ขึ้นอยู่กับชนิดของลำไอออนปฐมภูมิจะขึ้นอยู่กับชนิดของไอออนทุติยภูมิที่ต้องการวัด เพราะถ้าใช้ลำไอออนปฐมภูมิ ออกซิเจนทำให้เกิดไอออนบวกทุติยภูมิได้มากขึ้น เนื่องจากออกซิเจนมีความสามารถในการดึงคู่อิเล็กตรอนในพันธะเข้ามาหาตัวเองได้ดีหรือเรียกว่า อิเล็กโตรเนกาติวิตี (electronegativity) ในขณะที่

เอกซารันที่ใช้ลำไอออนปฐมภูมิของซีเซียม จะทำให้เกิดไอออนลบทุติยภูมิได้มาก เนื่องจากเป็นธาตุโลหะที่ไม่ว่องไวใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิเล็กตรอนวงนอกเพียง 1 ตัวจึงมีการสูญเสียอิเล็กตรอนได้ง่าย ดังนั้นการที่จะเลือกวัดไอออนทุติยภูมิชนิดต่างๆ จำเป็นจะต้องเลือกลำไอออนปฐมภูมิให้เหมาะสมด้วย

2.4 พลังงานของลำไอออนปฐมภูมิ (Primary Beam Energy)

พลังงานของลำไอออนปฐมภูมิที่ยิงลงบนสารตัวอย่างนั้น จะมีผลต่อความละเอียดในการวัดโครงสร้างเชิงลึก (depth resolution) ยึดค้ของไอออนบวกทุติยภูมิ และสปีดเตอร์ฮิลด์ โดยทั่วไปแล้วเมื่อลำไอออนพลังงานสูงวิ่งเข้าชนพื้นผิววัสดุ โอกาสที่ไอออนปฐมภูมิจะกระแทกอะตอมของวัสดุให้ฝังลึกลงไปภายใต้พื้นผิวขณะที่ทำการวัดโครงสร้างเชิงลึก (depth profile) มากขึ้น ถ้าพลังงานของลำไอออนปฐมภูมิที่ตกกระทบมีค่ามากดังในรูปที่ 2.5 แสดงโปรไฟล์ของอาร์เซนิก (As) ที่ฝังตัวในชั้นของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ที่เป็นผลมาจากการใช้พลังงานไอออนปฐมภูมิต่างกัน ซึ่งถ้าพลังงานไอออนปฐมภูมิมากก็จะทำให้อาร์เซนิกฝังลึกเข้าไปในเนื้อสารตัวอย่างมากขึ้นด้วย และมีความเป็นไปได้ที่การใช้พลังงานไอออนปฐมภูมิของออกซิเจนที่มีค่ามาก ออกซิเจนจะรวมตัวเกิดเป็นชั้นสะสมของออกซิเจนปริมาณมาก (oxygen rich layer) หรืออาจจะเกิดเป็นชั้นออกไซด์ จึงทำให้ความละเอียดในการวัดโครงสร้างเชิงลึกตกลงด้วย ดังนั้นความละเอียดในการวัดโครงสร้างเชิงลึกที่คั่นนั้นควรจะใช้พลังงานไอออนปฐมภูมิตกกระทบมีค่าน้อยๆ

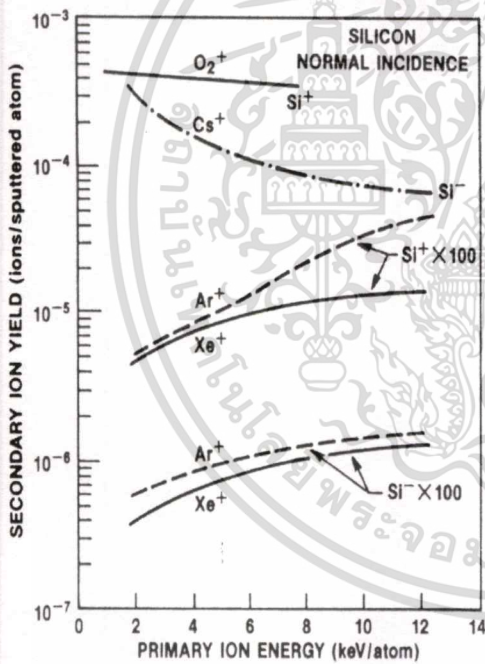


รูปที่ 2.5 As ฝังตัวในชั้นของ SiO_2 วัดโดยใช้ไอออนปฐมภูมิของออกซิเจนแตกต่างกัน [2]

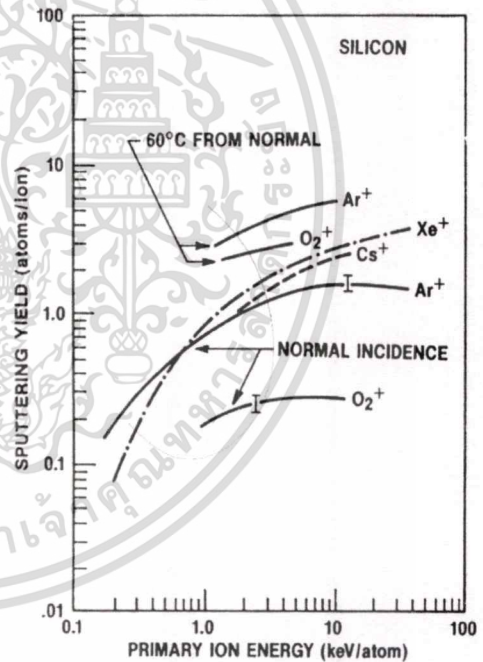
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเนื้อหาเว็บไซต์หรือเซิร์ฟเวอร์ดำเนินการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยิลด์ไอออนบวกทุติยภูมิและสปีดเตอร์ยิลด์ ก็มีความเกี่ยวข้องกับพลังงานที่ตกกระทบ เช่นกัน ยิลด์ไอออนบวกทุติยภูมิ คือจำนวนของไอออนบวกทุติยภูมิที่เกิดขึ้นต่อไอออนปฐมภูมิที่ตกกระทบจากรูปที่ 2.6 แสดงยิลด์ไอออนบวกทุติยภูมิที่ขึ้นอยู่กับพลังงานตกกระทบต่างๆ สำหรับซิลิกอนที่ยิงด้วยลำไอออนปฐมภูมิของ O_2^+ , Cs^+ , Ar^+ และ Xe^+ ทำมุม 0 องศา กับเส้นปกติจากรูป จะเห็นว่าพลังงานไอออนเพิ่มขึ้นจาก 2 ถึง 12 keV/atom ทำให้ยิลด์ไอออนทุติยภูมิเพิ่มขึ้นสำหรับ Ar^+ และ Xe^+ แต่สำหรับ Cs^+ ยิลด์ไอออนทุติยภูมิลดลง กรณีของ O_2^+ ยิลด์ไอออนบวกทุติยภูมิยังคงที่เมื่อพลังงานไอออนตกกระทบเพิ่มขึ้น สปีดเตอร์ยิลด์ คือจำนวนอะตอมที่หลุดออกมาต่อไอออนปฐมภูมิที่ตกกระทบ สปีดเตอร์ยิลด์จะเพิ่มขึ้น เมื่อพลังงานตกกระทบอยู่ในช่วง 0 ถึง 10 keV/atom และจะมีค่าลดลงถ้าพลังงานตกกระทบมีค่ามากขึ้น แต่พลังงานในช่วงนี้จะไม่ใช่ในการวิเคราะห์สเปกตรัมของมวลไอออนทุติยภูมิ ดังในรูปที่ 2.7 แสดงสปีดเตอร์ยิลด์จะเพิ่มขึ้น เมื่อพลังงานตกกระทบเพิ่มสำหรับซิลิกอน โดยทำมุมตกกระทบ 0 กับ 60 องศาจากเส้นปกติ



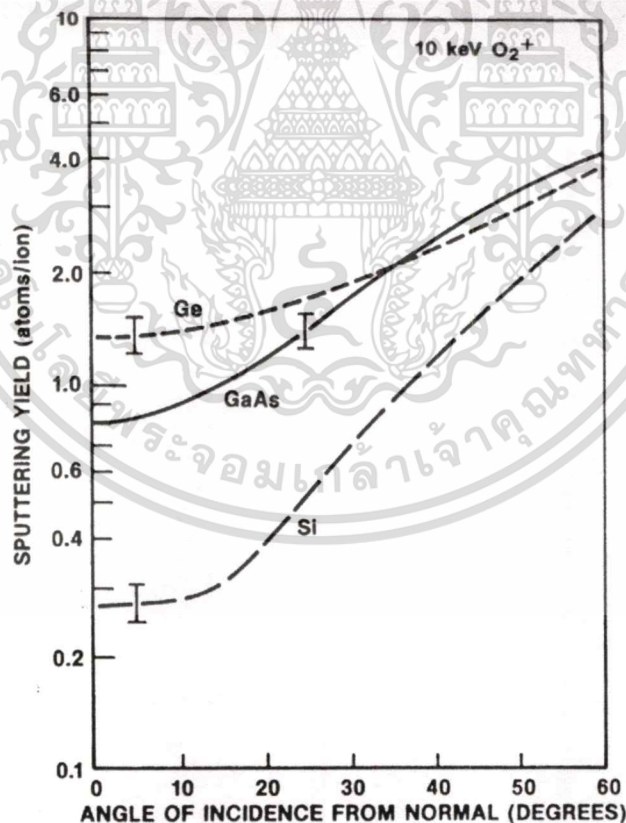
รูปที่ 2.6 ยิลด์ไอออนบวกทุติยภูมิของซิลิกอนซึ่งขึ้นอยู่กับพลังงานไอออนปฐมภูมิที่ตกกระทบ สำหรับไอออนปฐมภูมิต่างๆ ทำมุม 0 องศา กับเส้นปกติ [2]



รูปที่ 2.7 สปีดเตอร์ยิลด์ของซิลิกอนสำหรับไอออนปฐมภูมิแต่ละชนิดที่ทำมุมตกกระทบ 0 และ 60 องศา กับเส้นปกติ [2]

2.5 มุมตกกระทบของลำไอออนปฐมภูมิ (Primary Angle of Incidence)

มุมตกกระทบของลำไอออนปฐมภูมิ จะมีผลต่อความละเอียดในการวัดโครงสร้างเชิงลึก และสปีดเตอร์ฮิลด์ โดยมุมตกกระทบที่ทำให้มีความละเอียดในการวัดโครงสร้างเชิงลึกได้ดี คือมุมที่ลาดเอียงห่างออกจากเส้นปกติ เพราะว่าการชนกันอย่างต่อเนื่องจากกระบวนการสปีดเตอร์ของอะตอมภายใต้พื้นผิว จะเกิดมากที่บริเวณใกล้พื้นผิวหน้าสารตัวอย่างและยังช่วยลดการเกิดพื้นผิวที่ขรุขระที่อาจจะเกิดจากการรวมตัวของลำไอออนปฐมภูมิกับสารตัวอย่าง เกิดเป็นชั้นของออกไซด์ได้มากกว่าที่มุมตกกระทบ 0 องศา สำหรับสปีดเตอร์ฮิลด์จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมุมตกกระทบเบนจากเส้นปกติมากขึ้นและจะมีค่ามากที่สุดที่มุมหนึ่งเท่านั้น เมื่อมุมเบนมากกว่านี้(มากกว่า60องศา) จะมีค่าลดลง ดังรูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ของสปีดเตอร์ฮิลด์กับมุมตกกระทบต่างๆ สำหรับซิลิกอน ที่ลำไอออนปฐมภูมิทำมุม 30 องศา จะมีสปีดเตอร์ฮิลด์ประมาณ 2 เท่าเมื่อเทียบกับมุมตกกระทบ 0 องศา และที่มุม 60 จะเพิ่มถึง 10 เท่าเมื่อเทียบกับมุม 0 องศาเช่นกัน ส่วนอัตราการสปีดเตอร์ (sputter rate) เป็นสัดส่วนโดยตรงกับสปีดเตอร์ฮิลด์ที่เกิดขึ้น

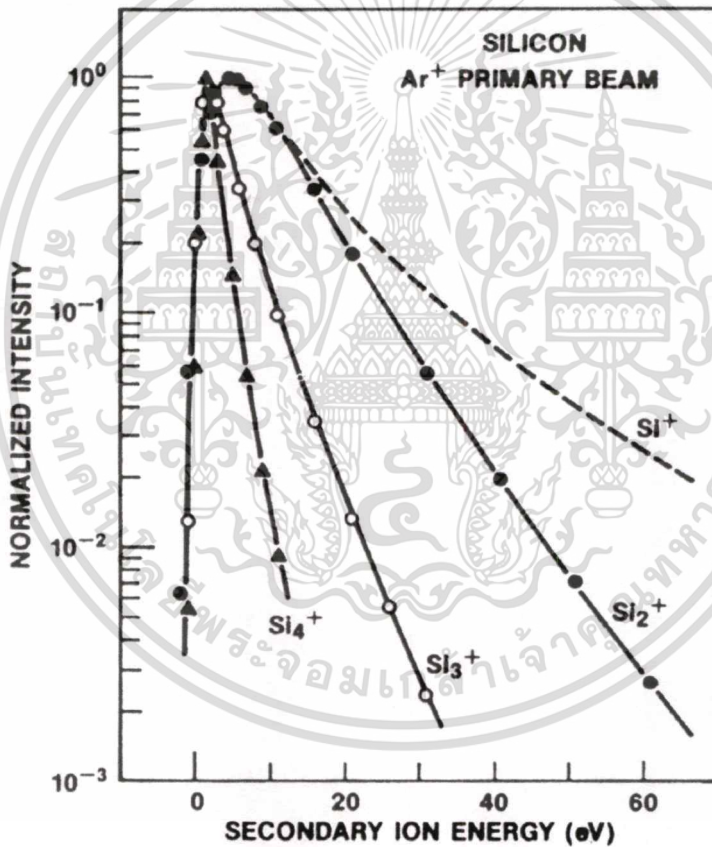


รูปที่ 2.8 สปีดเตอร์ฮิลด์ของ Si, Ge และ GaAs ที่มุมตกกระทบ 0 ถึง 60 องศา กับเส้นปกติ สำหรับไอออนปฐมภูมิของออกซิเจนพลังงาน 10 keV [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 การกระจายพลังงานของไอออนทุติยภูมิ (Energy Distribution)

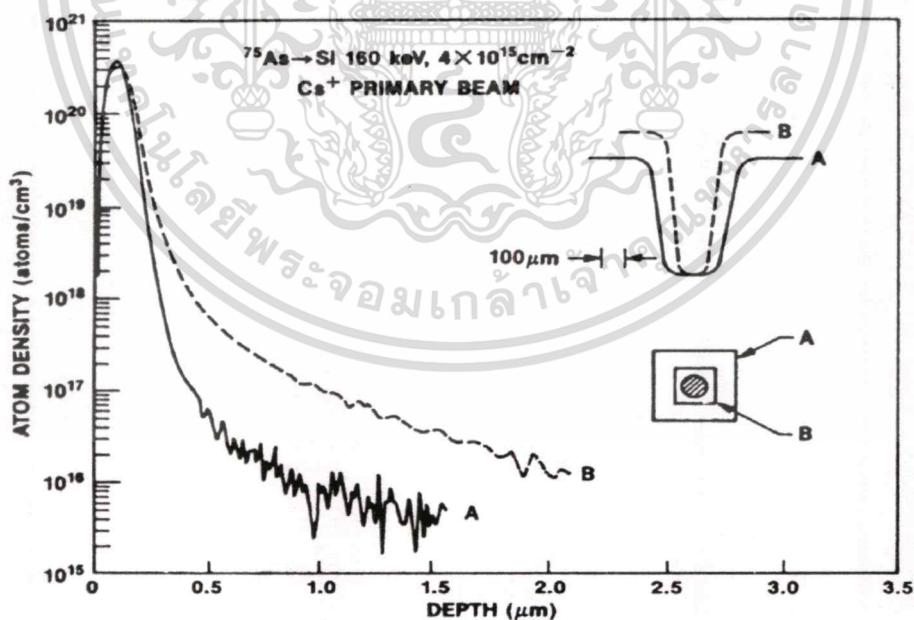
การกระจายพลังงานของไอออนทุติยภูมิที่หลุดออกมาจากพื้นผิวสารตัวอย่างจากกระบวนการสปีดเตอริง แต่ละชนิดไอออนมีค่าแตกต่างกัน ดังรูปที่ 2.9 ซึ่งแสดงตัวอย่างการกระจายพลังงานสำหรับไอออนแต่ละชนิด ซึ่งจะเห็นว่า ไอออนของโมเลกุลโดยทั่วไปจะมีการกระจายพลังงานอยู่ในช่วงที่แคบกว่าไอออนของอะตอมเดี่ยว เนื่องจากโมเลกุลจะมีช่วงพลังงานในการเคลื่อนที่น้อย เพราะพลังงานจลน์ของโมเลกุลจะเกิดจากการสั่นและการหมุน สำหรับอะตอมพลังงานจลน์ทั้งหมดเกิดจากการเคลื่อนที่ จึงทำให้มีช่วงพลังงานที่กว้างกว่าไอออนของโมเลกุล



รูปที่ 2.9 การกระจายพลังงานของซิลิกอนและไอออนโมเลกุลของซิลิกอน[2]

2.7 พื้นที่การตรวจวัด (Detected Area)

ในการวัดลักษณะโครงสร้างเชิงลึก ไอออนทุติยภูมิที่หลุดออกมาจากพื้นที่ในการสแกนไม่สามารถนำมาตรวจวัดได้หมด เนื่องจากมีไอออนบางส่วนที่หลุดจากผนังของหลุมที่ถูกสปีดเตอร์ มีความเป็นไปได้ที่ไม่ได้มาจากพื้นที่ที่ทำการวิเคราะห์ ซึ่งจะทำให้ความละเอียดในการวัดโครงสร้างเชิงลึกลดลง ถ้าต้องการให้มีความละเอียดสูงต้องเพิ่มพื้นที่ในการวิเคราะห์ โดยที่อัตราการสปีดเตอร์จะลดลงถ้าความหนาแน่นกระแสไอออนปฐมภูมิคงที่ ในขณะที่พื้นที่ในการสแกนเพิ่มขึ้น ดังนั้นในการวัดลักษณะโครงสร้างเชิงลึกควรจะใช้พื้นที่สแกนและพื้นที่ตรวจวัดที่แตกต่างกัน จะสามารถหลีกเลี่ยงผลกระทบที่เกิดจากผนังของหลุมได้ และทำให้อัตราการสปีดเตอร์และความละเอียดในการวัดโครงสร้างเชิงลึกได้ดี ดังรูปที่ 2.10 แสดงลักษณะโครงสร้างเชิงลึก ที่เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของพื้นที่ตรวจวัด $60\ \mu\text{m}$ ลักษณะโครงสร้างเชิงลึกของกราฟรูป (A) แสดงหลุมมีขนาด $220 \times 220\ \mu\text{m}$ และ รูป (B) ซึ่งมีพื้นที่หลุม $80 \times 80\ \mu\text{m}$ โดยจะเห็นว่ากราฟรูป (B) ผิดรูปไปเมื่อเปรียบเทียบกับรูป (A) เนื่องจากอัตราส่วนของพื้นที่สแกนและพื้นที่ตรวจวัดมีค่าน้อย และมีอีกโปรไฟล์หนึ่งที่มีพื้นที่หลุมขนาด $160 \times 160\ \mu\text{m}$ จะแสดงกราฟเช่นเดียวกับกราฟรูป (A) ดังนั้นความละเอียดในการวัดจะขึ้นอยู่กับลักษณะรูปร่างของลำไอออน หรืออาจจะกำหนดให้หลุมกว้างประมาณ 2.5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางพื้นที่ตรวจวัด



รูปที่ 2.10 ลักษณะโครงสร้างเชิงลึกของกราฟรูป(A) และ(B)พื้นที่สแกนขนาด $220 \times 220\ \mu\text{m}$ และ $80 \times 80\ \mu\text{m}$ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางพื้นที่ตรวจวัด $60\ \mu\text{m}$
(วิเคราะห์ด้วยอุปกรณ์ชุด CAMECA IMS-3f. [2])

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 การวัดโครงสร้างเชิงลึก

การวัดโครงสร้างเชิงลึก ซึ่งสามารถทำได้โดยการวัดจำนวนไอออนทุติยภูมิต่อหนึ่งหน่วยเวลาของธาตุๆ หนึ่ง เป็นฟังก์ชันของเวลา จากนั้นทำการเปลี่ยนแกนเวลาให้เป็นแกนความลึกโดยใช้เครื่องวัดโครงสร้างของพื้นผิวนำมาวัดความลึกของหลุมที่เกิดจากการสปีดเตอร์ด้วยลำไอออนปฐมภูมินำความลึกที่ได้หารด้วยเวลาที่ใช้ในการสปีดเตอร์จะได้อัตราการสปีดเตอร์ จากนั้นทำการคำนวณความลึกจากเวลาที่ใช้

$$\text{อัตราการสปีดเตอร์} = \frac{\text{ความลึกของหลุม}}{\text{เวลาทั้งหมดที่ใช้สปีดเตอร์}}$$

2.9 สมการพื้นฐาน

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้จะทำการวิเคราะห์มวลไอออนทุติยภูมิ ดังนั้นแล้วการเกิดไอออนทุติยภูมิจะขึ้นอยู่กับสถานะเชิงอิเล็กทรอนิกส์ของธาตุหรือวัสดุสำหรับการวิเคราะห์ ซึ่งเป็นสิ่งที่ยากและซับซ้อนสำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงปริมาณของเทคนิคการวิเคราะห์สเปกตรัมของมวลไอออนทุติยภูมิ ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากสมการพื้นฐานดังนี้ คือ

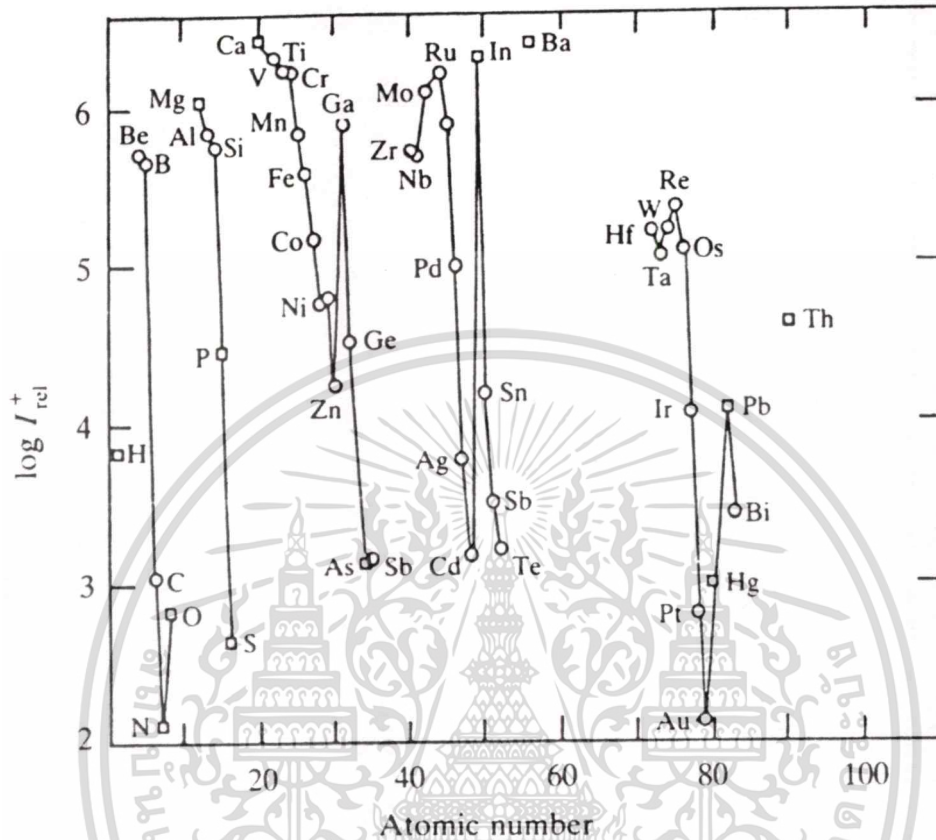
$$I_s^m = I_p y_m \alpha^+ \theta_m \eta \quad (2.1)$$

- เมื่อ
- I_s^m คือ กระแสไอออนทุติยภูมิของสาร m
 - I_p คือ กระแสไอออนปฐมภูมิ
 - y_m คือ สปีดเตอร์ยิลด์ (sputter yield)
 - α^+ คือ ความน่าจะเป็นของการเกิดไอออนบวก
 - θ_m คือ สัดส่วนความหนาแน่นของสาร m บนพื้นผิวที่ทำการวิเคราะห์
 - η คือ ค่าการส่งผ่านของระบบวิเคราะห์มวล

พารามิเตอร์สปีดเตอร์ยิลด์ (y_m) คืออนุภาครวมทั้งหมดที่หลุดออกจากพื้นผิว ได้แก่อนุภาคที่เป็นกลางและไอออนเมื่อสาร m ถูกชนด้วยอนุภาคปฐมภูมิหนึ่งอนุภาค ซึ่งจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเชิงเส้นกับความหนาแน่นของกระแสไอออนปฐมภูมิ นอกจากนี้ยังเพิ่มขึ้นตามมวล ประจุ และพลังงานของอนุภาคปฐมภูมิแต่ไม่เป็นเชิงเส้น ส่วนโครงสร้างทางผลึกและความเรียบของพื้นผิวก็มีผลต่อสปีดเตอร์ยิลด์ เช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE SIMS PHENOMENON



รูปที่ 2.11 ยิลด์ของไอออนบวกทุติยภูมิของธาตุต่างๆ เรียงตามลำดับเลขอะตอม

เนื่องมาจาก การเกิดเป็นไอออนของอนุภาคที่ปลดปล่อยจากพื้นผิว ได้รับอิทธิพลมาจากสถานะเชิงอิเล็กตรอนของพื้นผิว ทำให้ธาตุแต่ละชนิดในตารางธาตุมีสปีดเตอร์ยิลด์ที่แตกต่างกันได้ถึงหลายสิบเท่าดังรูปที่ 2.11 ยิลด์ของไอออนบวกทุติยภูมิของธาตุต่างๆ นอกจากนี้ยังขึ้นกับสถานะเชิงเคมีของพื้นผิวอย่างมากด้วย ดังนั้นปริมาณของไอออนทุติยภูมิของธาตุชนิดหนึ่งๆ ที่หลุดออกจากพื้นผิวก็จะไม่เท่ากันด้วย เช่น ไอออนทุติยภูมิของโลหะจากพื้นผิวบริสุทธิ์เมื่อเทียบกับพื้นผิวที่มีออกไซด์ของโลหะนั้นจะมีปริมาณที่ต่างกันมาก ดังแสดงในตารางที่ 2.1 จากตารางจะเห็นว่าการออกซิเดชัน (oxidation) สามารถเปลี่ยนค่า y_m ของธาตุได้ ด้วยเหตุนี้จึงเป็นเรื่องที่ซับซ้อนและยากที่จะวิเคราะห์พื้นผิวเชิงปริมาณด้วยเทคนิค SIMS

ตารางที่ 2.1 สปีดเทอรี่ยิลด์ของไอออนทุติยภูมิจากผิวโลหะบริสุทธิ์และผิวโลหะที่เป็นออกไซด์

Metal	Clean metals M ⁺ yield	Oxide M ⁺ yield
Mg	0.01	0.9
Al	0.007	0.7
Si	0.0084	0.58
Ti	0.0013	0.4
V	0.001	0.3
Cr	0.0012	1.2
Mn	0.0006	0.3
Fe	0.0015	0.35
Ni	0.0006	0.045
Cu	0.0003	0.007
Ge	0.0044	0.02
Sr	0.0002	0.16
Nb	0.0006	0.05
Mo	0.00065	0.4
Ba	0.0002	0.03
Ta	0.00007	0.02
W	0.00009	0.035

ในกรณีของวิเคราะห์สเปกตรัมของมวลไอออนทุติยภูมิแบบสถิต มีเงื่อนไขที่สำคัญ คือ องค์ประกอบของพื้นผิวจะต้องไม่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากการยิงด้วยลำไอออนปฐมภูมิตลอด ช่วงเวลาที่ทำการวัด นั่นคือ ลำไอออนปฐมภูมิจะต้องมีความหนาแน่นกระแสต่ำในระดับที่เหมาะสม ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก surface monolayer lifetime, t_m ที่จะใช้ในการวิเคราะห์ ดังความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$t_m = \frac{10^{15}}{I_p} \times \frac{A}{y} \quad (2.2)$$

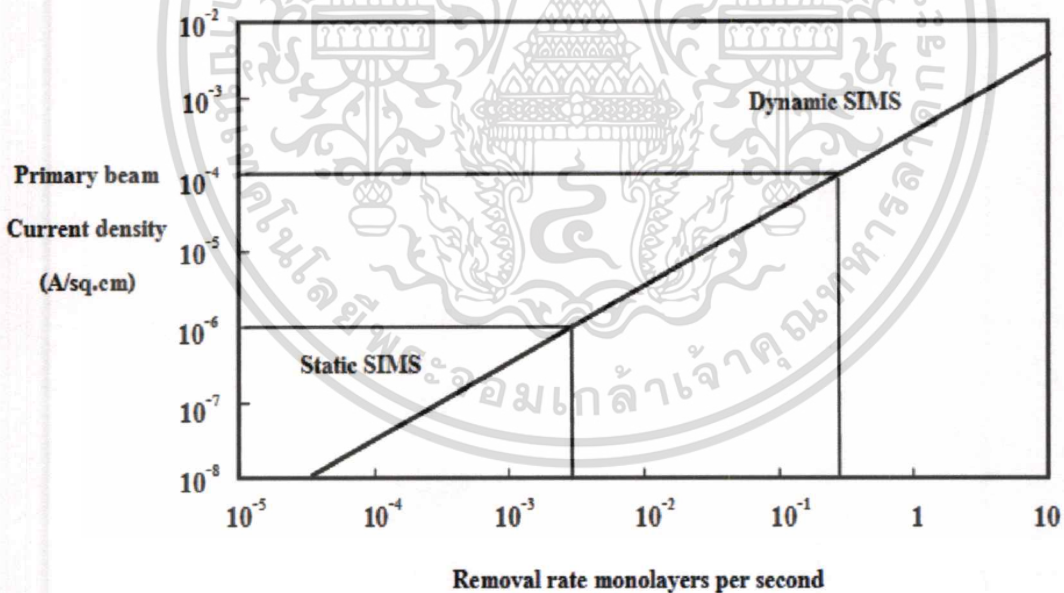
เมื่อพื้นที่ A (หน่วย cm^2) ของพื้นผิว (พื้นผิวมีความหนาแน่นของอะตอม 10^{15} cm^{-2}) ถูกชนด้วย ลำไอออนปฐมภูมิที่มีความหนาแน่นอนุภาคต่อตารางเซนติเมตร (I_p) และมีสปีดเทอรี่ยิลด์ (sputter yield, y) โดยปกติแล้วจะวัดความหนาแน่นของลำอนุภาคในรูปของความหนาแน่น

กระแสมีหน่วยเป็น Amps cm^{-2} (กระแส 1 A สมพันธ์กับกำลังเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีประจุจำนวน 10^{18} อนุภาคต่อวินาที) อย่างไรก็ตาม การวัดความหนาแน่นของลำอนุภาคในรูปของความหนาแน่นกระแสมีข้อเสียคือ ค่าที่วัดได้จะขึ้นกับพื้นที่ของลำอนุภาคที่ใช้ในการวัด และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2×10^{18} ต่อวินาที) โดยความสัมพันธ์ข้างต้นจะให้ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นอนุภาคต่อตารางเซนติเมตร (I_p) และ t_m ดังตารางที่ 2.2 จากตารางพบว่าถ้าต้องใช้เวลาในการวิเคราะห์พื้นผิวด้วยเทคนิควิเคราะห์สเปกตรัมของมวลไอออนทุติยภูมิแบบสถิต เป็นเวลา 20 นาที (1200s) จะต้องใช้ลำไอออนปฐมภูมิที่มีความหนาแน่นกระแสประมาณ 1 nA cm^{-2} หรือน้อยกว่าช่วงความหนาแน่นกระแสของลำไอออนปฐมภูมิที่ใช้สำหรับวิเคราะห์สเปกตรัมของมวลไอออนทุติยภูมิแบบสถิตและแบบไดนามิก แสดงดังรูปที่ 2.12

ตารางที่ 2.2 surface monolayer lifetime, t_m ขึ้นกับความหนาแน่นของไอออนปฐมภูมิ

$I_p \text{ (A cm}^{-2}\text{)}$	$t_m \text{ (s)}$
10^{-5}	16
10^{-7}	1600
10^{-9}	1.6×10^5
10^{-11}	1.6×10^7

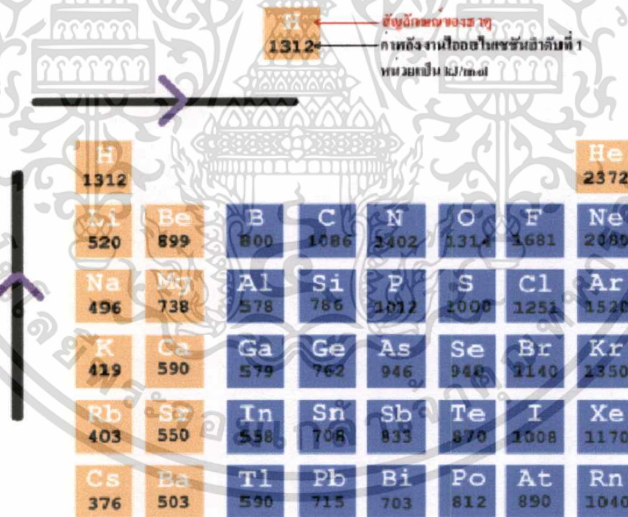


รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นกระแสของลำไอออนปฐมภูมิกับอัตราการหลุดออกของชั้นพื้นผิวสำหรับการวิเคราะห์สเปกตรัมของมวลไอออนทุติยภูมิแบบสถิตและแบบไดนามิก

2.10 ปริมาณการเกิดไอออนทุติยภูมิ

อัตราการผลิตหรือปริมาณการเกิดไอออนทุติยภูมิขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ที่ เรียกว่า ยิลด์ ไอออนทุติยภูมิ (Secondary Ion Yields) ซึ่ง อธิบายว่า คือ อัตราส่วนระหว่างจำนวนของไอออน ทุติยภูมิที่เกิดขึ้นต่อจำนวนไอออนปฐมภูมิที่ตกกระทบ ซึ่งค่านี้มีค่าแตกต่างกันได้อย่างมากขึ้นกับ ชนิดของธาตุอันเนื่องมาจากความแตกต่างกันในลักษณะของพลังงานไอออไนเซชัน (ionization potential) สำหรับการเกิดไอออนบวก และกรณีของไอออนลบแตกต่างกันในลักษณะของ สัมพรรคภาพอิเล็กตรอน (electron affinity) นอกจากนี้จะขึ้นอยู่กับชนิดของธาตุที่ต้องการศึกษาแล้ว ยังขึ้นอยู่กับทางเลือกใช้ไอออนปฐมภูมิด้วย เช่น การยิงพื้นผิวด้วยลำออกซิเจน (O_2^+) จะทำให้มี โอกาสเกิด ไอออนบวกทุติยภูมิได้มากขึ้น ในขณะที่เดียวกันถ้าใช้ลำไอออนซีเซียม (Cs^+) จะทำให้มี โอกาสเกิด ไอออนลบทุติยภูมิได้มาก เป็นต้น

2.11 พลังงานไอออไนเซชัน (Ionization energy)



รูปที่ 2.13 แนวโน้มพลังงานไอออไนเซชันของธาตุต่างๆ ในตารางธาตุ

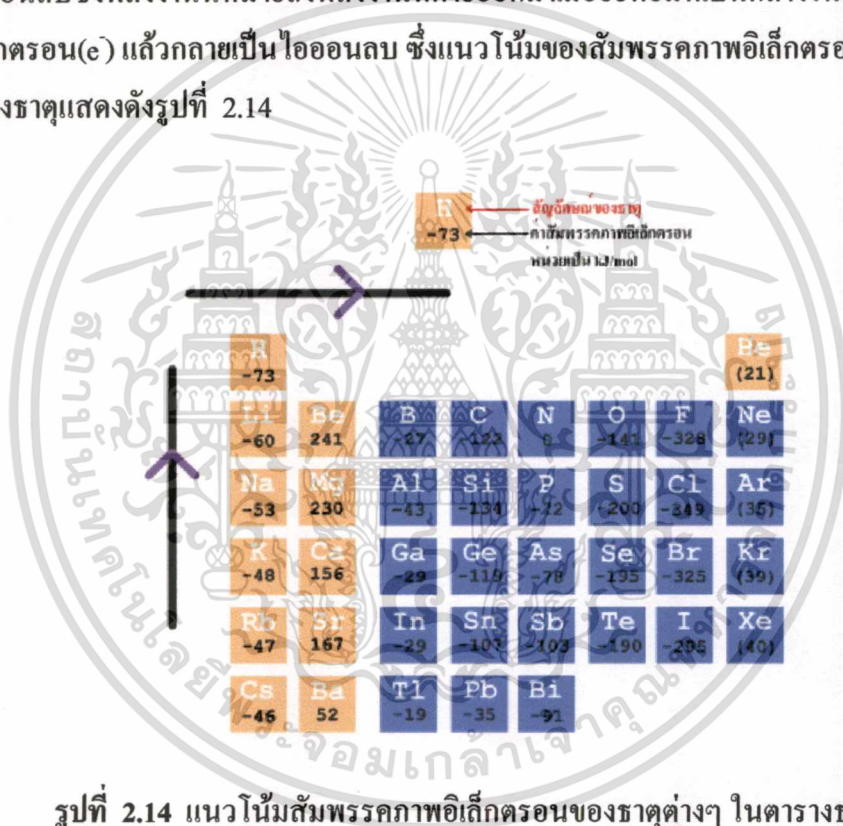
ยิลด์ไอออนทุติยภูมิจะมีค่าแตกต่างกันมาก ขึ้นอยู่กับพลังงานไอออไนเซชันสำหรับการ เกิดไอออนบวกซึ่งพลังงานนี้ หมายถึงพลังงานปริมาณน้อยที่สุดที่จะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจาก อะตอมในสถานะก๊าซ หรือหมายถึง พลังงานที่ใช้ในการดึงอิเล็กตรอนหรือเพื่อทำให้อิเล็กตรอน หลุดออกจากอะตอมในสภาวะที่เป็นก๊าซแล้วทำให้เกิดเป็นไอออนบวกซึ่งพลังงานไอออไนเซชันนี้

บางที่เรียกว่าไอออไนเซชันโพเทนเชียล (Ionization potential) ซึ่งแนวโน้มของพลังงานไอออไนเซชันของธาตุต่างๆ ในตารางธาตุแสดงดังรูปที่ 2.13

- ธาตุในหมู่เดียวกัน พลังงานไอออไนเซชันลดลงจากบนลงล่าง
- ธาตุในคาบเดียวกัน พลังงานไอออไนเซชันเพิ่มขึ้นจากซ้ายไปขวา

2.12 สัมพรรคภาพอิเล็กตรอน (Electron Affinity; EA)

อิเล็กโตรอนทิวติวิตีจะมีค่าแตกต่างกันมากขึ้นอยู่กับสัมพรรคภาพอิเล็กตรอน สำหรับการเกิดไอออนลบซึ่งพลังงานนี้หมายถึงพลังงานที่คายออกมาเมื่ออะตอมที่เป็นกลางในสถานะก๊าซ เมื่อรับ อิเล็กตรอน(e^-) แล้วกลายเป็น ไอออนลบ ซึ่งแนวโน้มของสัมพรรคภาพอิเล็กตรอนของธาตุต่างๆ ในตารางธาตุแสดงดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 แนวโน้มสัมพรรคภาพอิเล็กตรอนของธาตุต่างๆ ในตารางธาตุ

- ค่าสัมพรรคภาพอิเล็กตรอนเป็นลบเพราะระบบ(อะตอม)คายพลังงานออกมาเมื่อรับอิเล็กตรอนเข้าไป

ถ้าเราพิจารณาค่าสัมพรรคภาพอิเล็กตรอนโดยไม่คำนึงถึงค่าที่เป็นลบ จะเห็นว่า

- ธาตุในหมู่เดียวกัน สัมพรรคภาพอิเล็กตรอนลดลงจากบนลงล่าง
- ธาตุในคาบเดียวกัน สัมพรรคภาพอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นจากซ้ายไปขวา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากความแตกต่างของพลังงานไอออไนเซชันและสัมพรรคภาพอิเล็กตรอนของธาตุต่าง ๆ ในตารางธาตุ ดังนั้นจากตารางธาตุคั่งรูปที่ 2.15 ข้างล่างนี้แสดงให้เห็นถึงการเลือกใช้ค่าไอออนปฐมภูมิให้เหมาะกับชนิดของไอออนทุติยภูมิที่จะทำการศึกษาดังนี้ เช่นธาตุที่แถบเงาบางๆ (สีเขียว) หมายความว่า ถ้าใช้ไอออนปฐมภูมิลอกซิเจนจะมีโอกาสเกิดไอออนบวกทุติยภูมิได้มาก ส่วนธาตุที่แถบเงาทึบ(สีเขียว) หมายความว่า ถ้าใช้ค่าไอออนปฐมภูมิซีเซียม จะมีโอกาสเกิดไอออนลบทุติยภูมิได้มาก

O ₂ ⁺ Primary		Postive Secondary		Cs ⁺ Primary		Negative Secondary																													
H							He																												
Li	Be					B	C N O F Ne																												
Na	Mg					Al	Si P S Cl Ar																												
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe Co Ni Cu Zn Ga Ge As Se Br Kr																												
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru Rh Pd Ag Cd In Sn Sb Te I Xe																												
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os Ir Pt Au Hg Tl Pb Bi Po At Rn																												
Fr	Ra	Ac																																	
<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td>Ce</td><td>Pr</td><td>Nd</td><td>Pm</td><td>Sm</td><td>Eu</td><td>Gd</td><td>Tb</td><td>Dy</td><td>Ho</td><td>Er</td><td>Tm</td><td>Yb</td><td>Lu</td> </tr> <tr> <td>Th</td><td>Pa</td><td>U</td><td>Np</td><td>Pu</td><td>Am</td><td>Cm</td><td>Bk</td><td>Cf</td><td>Es</td><td>Fm</td><td>Md</td><td>No</td><td>Lr</td> </tr> </table>								Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr
Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu																						
Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr																						

รูปที่ 2.15 การเลือกใช้ค่าไอออนปฐมภูมิให้เหมาะกับชนิดของไอออนทุติยภูมิที่จะทำการศึกษา

2.13 ตัวประกอบความไวสัมพัทธ์ (Relative Sensitivity Factor)

โดยธรรมชาติของการวัดด้วยระบบการวิเคราะห์สเปกตรัมของมวล ไอออนทุติยภูมิข้อมูลที่ได้จะเป็นเชิงคุณภาพ ส่วนข้อมูลเชิงปริมาณสามารถคำนวณได้โดยใช้ความสัมพันธ์ ดังนี้

$$\frac{I_R}{C_R} = RSF_E \cdot \frac{I_E}{C_E} \quad (2.3)$$

- เมื่อ
- RSF_E = ตัวประกอบความไวสัมพัทธ์ของธาตุ E
 - I_E = ปริมาณของไอออนทุติยภูมิ (Secondary Ion Intensity) สำหรับธาตุ E
 - I_R = ปริมาณของไอออนทุติยภูมิ สำหรับธาตุอ้างอิง R
 - C_E = ความหนาแน่น ของธาตุ E (Concentration of E)
 - C_R = ความหนาแน่นของธาตุอ้างอิง R (Concentration of R)

โดยทั่วไปจะใช้ธาตุหุ้มมาก (matrix) เป็นธาตุอ้างอิง (reference) ดังนั้นจึงเขียนสมการใหม่โดยแทนสัญลักษณ์ R เป็น M

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C_E = RSF_E \cdot \frac{I_E C_M}{I_M} \quad (2.4)$$

ระหว่างการวิเคราะห์ที่สมมุติให้ความหนาแน่นของธาตุหุ้มมาก (C_M) ไม่มีการเปลี่ยนแปลงกำหนดให้

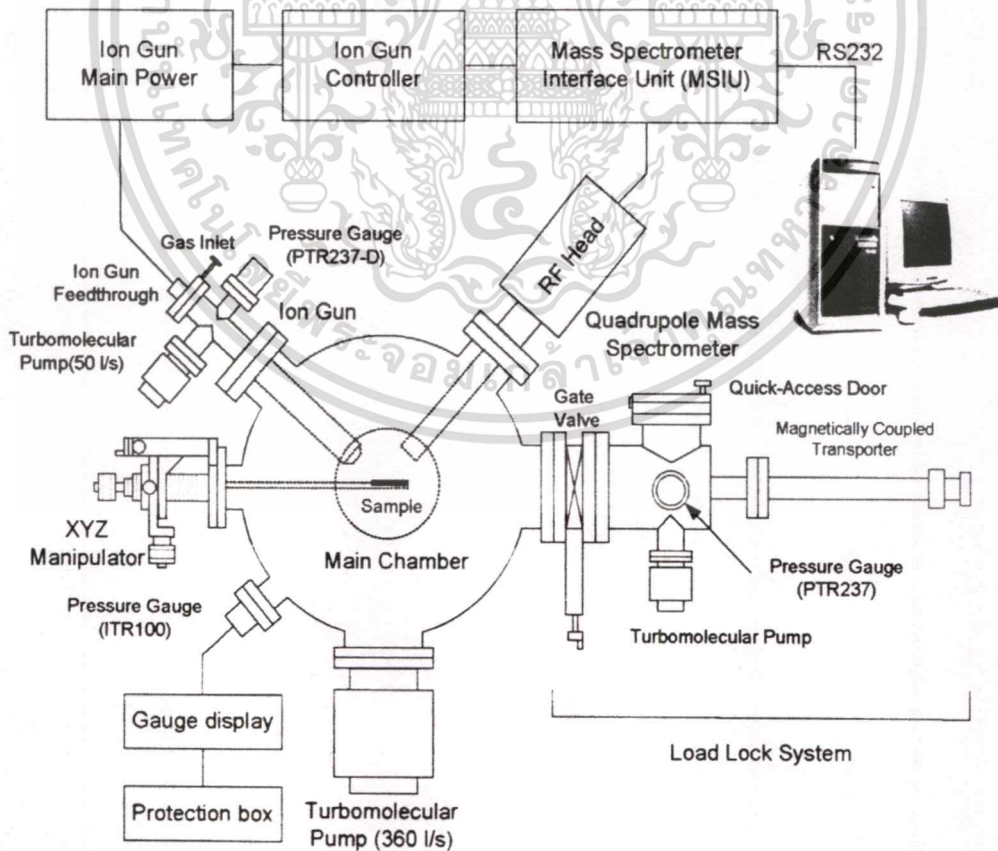
$$RSF = C_M \cdot RSF_E \quad (2.5)$$

เมื่อ RSF คือตัวประกอบความไวสัมพัทธ์จากนั้นแทนค่า RSF_E จากสมการ (2.5) ลงในสมการ (2.4) จะได้ ความหนาแน่นของธาตุ E ดังนี้

$$C_E = RSF \cdot \frac{I_E}{I_M} \quad (2.6)$$

2.14 องค์ประกอบเครื่องมือพื้นฐาน

องค์ประกอบของเครื่องมือพื้นฐาน ของระบบการวิเคราะห์สเปกตรัมของมวลไอออนทุติยภูมิ มีองค์ประกอบระบบโครงสร้าง ดังรูปที่ 2.16 ซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วน หลักๆ ได้แก่ แหล่งกำเนิดไอออนปฐมภูมิและระบบวิเคราะห์มวล (mass spectrometer)



รูปที่ 2.16 องค์ประกอบของระบบการวิเคราะห์สเปกตรัมของมวลไอออนทุติยภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.14.1 แหล่งกำเนิดไอออนปฐมภูมิ

แหล่งกำเนิดไอออนปฐมภูมิที่ใช้ในระบบการวิเคราะห์สเปกตรัมของมวลไอออนทุติยภูมิ แบ่งออกเป็นชนิดต่างๆ ได้ 4 ชนิดคือ

- 2.14.1.1 แหล่งกำเนิดไอออนที่เกิดจากการยิงด้วยลำอิเล็กตรอน
- 2.14.1.2 แหล่งกำเนิดไอออนที่เกิดจากระบบพลาสมา
- 2.14.1.3 แหล่งกำเนิดไอออนจากการกระตุ้นโดยผ่านความถี่คลื่นวิทยุ
- 2.14.1.4 แหล่งกำเนิดไอออนชนิดโลหะเหลว

แหล่งกำเนิดไอออนปฐมภูมิที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นชนิดที่เกิดจากการยิงด้วยลำอิเล็กตรอน ซึ่งจะใช้ลำอิเล็กตรอนความหนาแน่นสูงในการชนให้ก๊าซแตกตัวเป็นไอออน แหล่งกำเนิดไอออนนี้สามารถใช้กับทั้งก๊าซเฉื่อยและออกซิเจน อิเล็กตรอนจะกำเนิดจากขั้วคาโทดที่ร้อน (ซึ่งปกติจะเป็นทังสเตนหรืออิริเดียมที่ถูกปรับสภาพผิวให้สามารถปลดปล่อยอิเล็กตรอนให้ได้มาก) อิเล็กตรอนจะถูกเร่งไปยังขั้วบวกเพื่อให้มีพลังงานสูงพอ เมื่ออิเล็กตรอนชนกับอะตอมของก๊าซก็จะทำให้อิเล็กตรอนแตกตัวเป็นไอออน จากนั้นลำไอออนจะถูกดึงออกจากแหล่งกำเนิดไอออนและถูกเร่งให้มีพลังงานสูงและถูกโฟกัสให้มีขนาดเล็กเมื่อเข้าชนพื้นผิวของสารตัวอย่าง

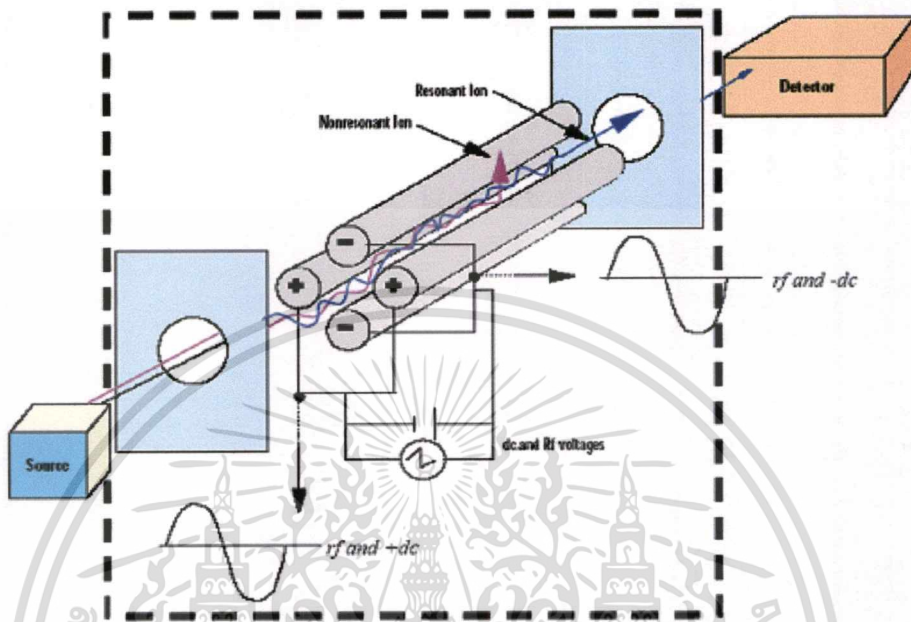
2.14.2 ระบบวิเคราะห์มวล (mass spectrometers)

ระบบวิเคราะห์มวลเป็นส่วนสำคัญของระบบการวิเคราะห์สเปกตรัมของมวลไอออนทุติยภูมิทำหน้าที่คัดเลือกรวมของ ไอออนทุติยภูมิที่ถูกสปีดเตอร์จากพื้นผิวสารตัวอย่างมีสามชนิดที่นิยมใช้กัน ได้แก่

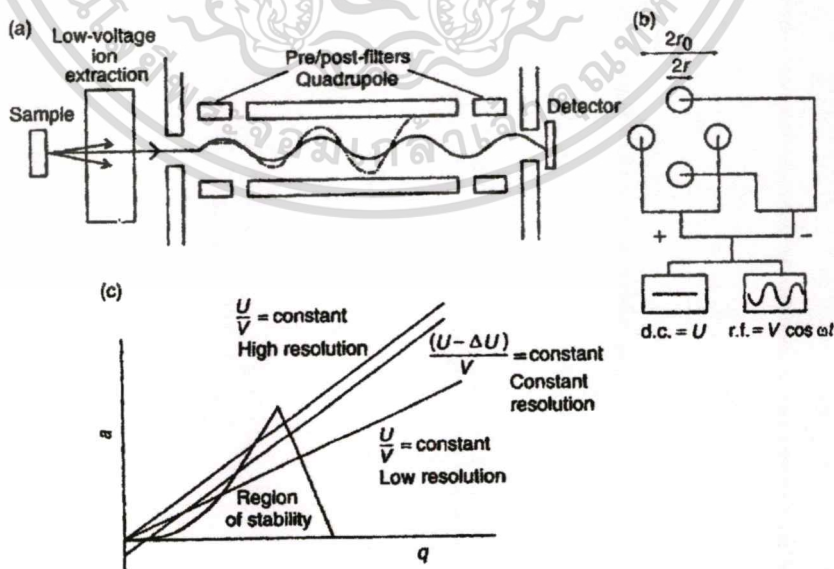
- 2.14.2.1 ระบบวิเคราะห์มวลแบบควอดรูโพล (Quadrupole mass spectrometers)
- 2.14.2.2 ระบบวิเคราะห์มวลแบบแมกเนติกเซกเตอร์ (Magnetic sector mass spectrometer)
- 2.14.2.3 ระบบวิเคราะห์มวลแบบไทม์ ออฟ ฟ্লাइट (Time of flight mass spectrometer)

สำหรับในงานวิจัยในครั้งนี้จะใช้ระบบวิเคราะห์มวลแบบควอดรูโพล ซึ่งควอดรูโพลทำหน้าที่กำหนดค่ามวลต่อประจุของไอออนที่เข้าสู่หัวตรวจวัดไอออนควอดรูโพล ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าโลหะที่มีลักษณะเป็นแท่งยาว 4 ขั้ววางขนานกันดังรูปที่ 2.17 ขั้วไฟฟ้าทั้งสองจะถูกป้อนด้วยศักย์ไฟฟ้าที่ประกอบด้วย ส่วนที่เป็นศักย์กระแสตรงบวกกับศักย์ไฟฟ้ากระแสสลับที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ($U+V \cos \omega t$) โดยที่ U คือศักย์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC component) และ $V \cos \omega t$ คือ

ศักย์ไฟฟ้ากระแสสลับที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (RF component) โดยป้อนเข้าที่คู่ของขั้วไฟฟ้าคู่หนึ่ง ซึ่งอยู่ตรงกันข้าม ส่วนขั้วอีกคู่หนึ่งก็ป้อนศักย์ไฟฟ้าค่าเท่ากันแต่มีศักย์ตรงกันข้าม $(-U + V \cos \omega t)$



รูปที่ 2.17 การจับวางขั้วไฟฟ้าระบบวิเคราะห์มวลแบบควอดรูโพล



รูปที่ 2.18 การทำงานของระบบวิเคราะห์มวลแบบควอดรูโพล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไอออนบวกที่เคลื่อนที่เข้าสู่ช่องว่างระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองนี้จะถูกผลักด้วยขั้วไฟฟ้าที่ขั้วนั้น มีศักย์เป็นบวกและถูกดูดด้วยขั้วไฟฟ้าที่ขั้วนั้น มีศักย์เป็นลบ เนื่องจากศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องตามเวลาและสนามไฟฟ้ามีทิศทางตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของไอออนเท่านั้น ดังนั้นจะทำให้ไอออนมีการออสซิลเลตในทิศทางตั้งฉากกับขั้วไฟฟ้า ในขณะที่ไอออนยังคงเคลื่อนที่ต่อไปในแนวขนานกับขั้วไฟฟ้างดแสดงในรูปที่ 2.17 ไอออนส่วนใหญ่จะมีแอมพลิจูดของการออสซิลเลตมากขึ้นเรื่อยๆ จนในที่สุดจะชนกับขั้วไฟฟ้าและไม่สามารถเดินทางผ่านไปถึงหัวตรวจวัดได้ อย่างไรก็ตามจะมีไอออนที่มีอัตราส่วนมวลต่อประจุ ค่าหนึ่งเท่านั้นที่มีเส้นทางเดินที่เสถียรและสามารถผ่านไปถึงหัวตรวจวัดได้ ศักย์ไฟฟ้าที่ตำแหน่งใดๆ ระหว่างขั้วไฟฟ้าที่เวลา t ใดๆ เป็นผลบวกของศักย์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC) และศักย์ไฟฟ้ากระแสสลับ (RF) ดังนี้

$$E(x, y) = \frac{(x^2 + y^2)(U + V \cos \omega t)}{r_0^2} \quad (2.7)$$

ถึงแม้สมการนี้ใช้ได้กับขั้วไฟฟ้าที่มีลักษณะโค้งแบบไฮเปอร์โบลาร์แต่ประมาณว่าถูกต้องสำหรับขั้วไฟฟ้ารูปทรงกระบอกในกรณีนี้ด้วย ในสมการนี้ x และ y คือตำแหน่งของไอออนบนระนาบที่ตั้งฉากกับขั้วไฟฟ้า ($x=0, y=0$ คือจุดกึ่งกลางระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง) r_0 คือระยะจากจุดกึ่งกลางระหว่างขั้วไฟฟ้าถึงขอบด้านในของขั้วไฟฟ้า แรงเนื่องจากสนามไฟฟ้ากระทำต่อไอออนในแนวแกน x และ แกน y คือ

$$F_x = -z \frac{dE}{dx} = -z \frac{(U + V \cos \omega t) 2x}{r_0^2} \quad (2.8)$$

$$F_y = -z \frac{dE}{dy} = -z \frac{(U + V \cos \omega t) 2y}{r_0^2} \quad (2.9)$$

เนื่องจาก $F_x = ma_x = m \frac{d^2x}{dt^2} \quad (2.10)$

$$F_y = ma_y = m \frac{d^2y}{dt^2} \quad (2.11)$$

ดังนั้นจะได้ $\frac{d^2x}{dt^2} + \left(\frac{z}{m}\right) \frac{2x(U + V \cos \omega t)}{r_0^2} = 0 \quad (2.12)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + \left(\frac{z}{m}\right) \frac{2y(U + V \cos \omega t)}{r_0^2} = 0 \quad (2.13)$$

จากสมการ Mathieu equation เป็นสมการการเคลื่อนที่ของไอออนที่มีมวล m ประจุ z ในขั้วไฟฟ้าทั้งสอง แสดงดังสมการที่ 2.14

$$\frac{d^2 U}{d\xi^2} + (a - 2q \cos(2\xi))U = 0 \quad (2.14)$$

เมื่อ $U = x, y$

$a = a_x, a_y$

$q = q_x, q_y$

กำหนดให้

$$t = 2\xi / \omega \rightarrow \omega = 2\xi / t$$

(2.15)

$$t^2 = 4\xi^2 / \omega^2 \rightarrow dt^2 = 4d\xi^2 / \omega^2$$

แทนค่า t และ dt^2 ลงในสมการ (2.12) และ (2.13) จะได้

$$\frac{d^2 x}{d\xi^2} + \left[\frac{8zUx}{m\omega^2 r_0^2} + \frac{8zV \cos(2\xi)x}{m\omega^2 r_0^2} \right] = 0 \quad (2.16)$$

$$\frac{d^2 y}{d\xi^2} + \left[\frac{8zUy}{m\omega^2 r_0^2} + \frac{8zV \cos(2\xi)y}{m\omega^2 r_0^2} \right] = 0 \quad (2.17)$$

สมการข้างต้น (2.14), (2.16) และ (2.17) นี้เป็นสมการการเคลื่อนที่ของไอออนผ่านขั้วไฟฟ้าของระบบวิเคราะห์มวล จากสมการดังกล่าวนี้จะได้พารามิเตอร์ 2 พารามิเตอร์ที่แสดงถึงเสถียรภาพของการเคลื่อนที่ในรูปที่ 2.18 คือ

$$a = \left(\frac{8U}{r_0^2 \omega^2} \right) \left(\frac{z}{m} \right) \quad (2.18)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$q = \left(\frac{4V}{r_0^2 \omega^2} \right) \left(\frac{z}{m} \right) \quad (2.19)$$

- เมื่อ
- a = คือพารามิเตอร์ที่เป็นฟังก์ชันศักย์ไฟฟ้ากระแสตรง
 - q = คือพารามิเตอร์ที่เป็นฟังก์ชันศักย์ไฟฟ้ากระแสสลับ
 - U = คือ ศักย์ไฟฟ้ากระแสตรง
 - V = คือศักย์ไฟฟ้ากระแสสลับ
 - ω = ความถี่เชิงมุม
 - m = มวลไอออนทุติยภูมิ
 - z = ประจุไอออนทุติยภูมิ
 - r_0 = คือระยะจากจุดกึ่งกลางระหว่างขั้วไฟฟ้าถึงขอบด้านในของขั้วไฟฟ้า

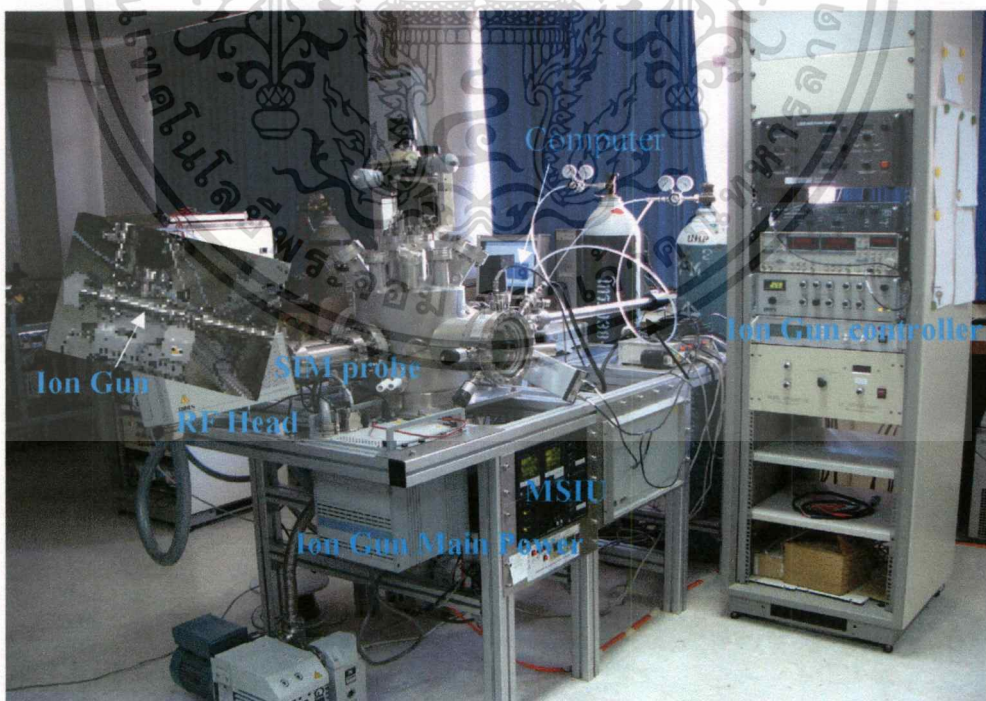
พารามิเตอร์นี้เป็นฟังก์ชันของ z/m โดยที่ z คือประจุของไอออน และ m คือมวลของไอออน สเปกตรัมของมวลสามารถหาได้โดยการปรับค่าความถี่เชิงมุม (ω) เพิ่มขึ้นในขณะที่ให้ U/V มีค่าคงที่หรือปรับเปลี่ยนค่า U/V ในขณะที่ให้ความถี่เชิงมุมมีค่าคงที่ก็ได้

บทที่ 3

ขั้นตอนดำเนินงานวิจัย

การวิเคราะห์พื้นผิวด้วยเทคนิคการวิเคราะห์สเปกตรัมของมวลไอออนทุติยภูมิ ต้องทำในระบบสุญญากาศที่มีระดับความดันที่ต่ำมากถึงระดับ 10^{-9} – 10^{-10} มิลลิบาร์ เท่านั้น ดังนั้นการดำเนินการในขั้นต้นคือการติดตั้งระบบการวิเคราะห์สเปกตรัมของมวลไอออนทุติยภูมิเข้ากับห้องสุญญากาศ ซึ่งประกอบด้วยการติดตั้งอุปกรณ์การวิเคราะห์มวลแบบควอดรูโพลและการติดตั้งแหล่งกำเนิดลำไอออน จากนั้นจึงเป็นขั้นตอนของการใช้งานและการทดลอง ซึ่งจะกล่าวถึง การป้อนห้องสุญญากาศ การใช้งานแหล่งกำเนิดลำไอออน การใช้โปรแกรม MASsoft และการปรับพารามิเตอร์ของอุปกรณ์การวิเคราะห์มวลแบบอัตโนมัติ รวมถึงการปลูกฟิล์ม การทำความสะอาดสารตัวอย่าง การวัดความถี่ของท่วงที่เกิดจากการสปีดเตอร์ด้วยเครื่องวัด โครงร่างของพื้นผิวและการวัดความหนาของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

3.1 การติดตั้งระบบการวิเคราะห์สเปกตรัมของมวลไอออนทุติยภูมิ



รูปที่ 3.1 อุปกรณ์ของระบบที่ติดตั้งในระบบสุญญากาศพร้อมจะใช้งาน

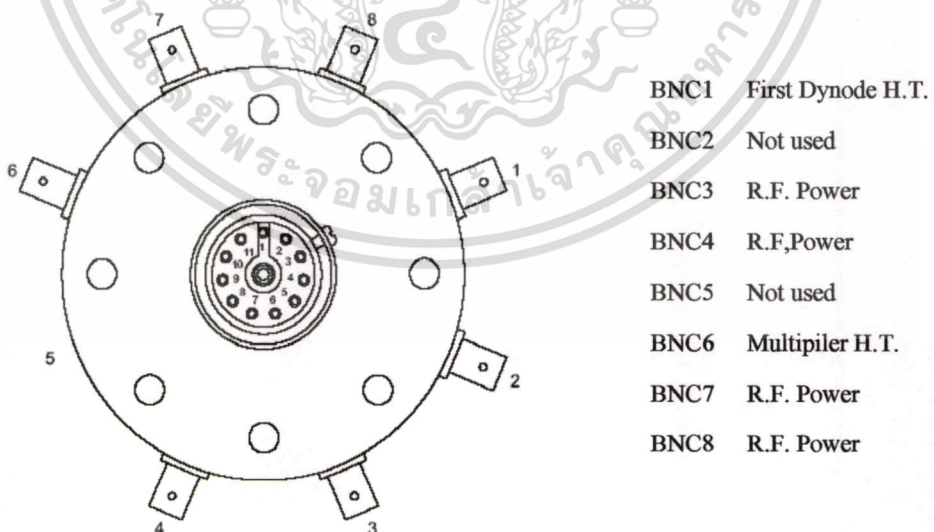
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบการวิเคราะห์สเปกตรัมของมวลไอออนทุติยภูมิประกอบด้วยองค์ประกอบ 2 ส่วนหลักๆ ได้แก่ อุปกรณ์วิเคราะห์มวลของไอออนทุติยภูมิและชุดแหล่งกำเนิดลำไอออนปฐมภูมิ สำหรับอุปกรณ์วิเคราะห์มวลของไอออนทุติยภูมิ ประกอบด้วย ชุดวิเคราะห์มวลแบบควอดรูโพล (SIM probe) ชุดกำเนิดสัญญาณความถี่สูงย่านความถี่คลื่นวิทยุ (RF Head) ชุดควบคุมการตรวจวัดมวลของไอออนทุติยภูมิและเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์ (Mass Spectrometer Interface Unit : MSIU) ส่วนชุดแหล่งกำเนิดลำไอออนปฐมภูมิ ประกอบด้วย แหล่งกำเนิดลำไอออน (Ion Gun) แหล่งจ่ายกำลังงานสำหรับแหล่งกำเนิดลำไอออน (Ion Gun Main Power) และชุดควบคุมแหล่งกำเนิดไอออน (Ion Gun Controller) โดยมีคอมพิวเตอร์เป็นหน่วยควบคุมและแสดงผล ดังแสดงในรูปที่ 3.1

3.1.1 การติดตั้งอุปกรณ์การวิเคราะห์มวลแบบควอดรูโพล

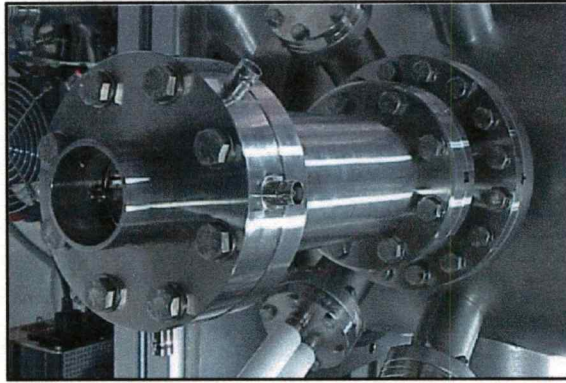
การติดตั้งอุปกรณ์การวิเคราะห์มวลแบบควอดรูโพล มีขั้นตอนดังนี้

- 3.1.1.1 ตรวจสอบขั้วไฟฟ้าเชื่อมต่อฟีดทรูทั้ง 12 ขวาชื่อติดกันหรือไม่ โดยขาที่ 3 และ 6 ควรต่อถึงกันแต่ไม่ถึงกราวด์ ส่วนขาอื่นๆ ต้องไม่ต่อถึงกันและไม่ต่อถึงกราวด์ด้วย หัววัดมวลที่ใช้เป็นรุ่น HAL SIM 300 ของบริษัท ไฮเดนอนาไลติคอลล จำกัด (Hiden Analytical Ltd.) ประเทศอังกฤษมีช่วงการวัดมวล 300 amu มีเส้นลวดความร้อน (filament) 2 อันสำหรับกำเนิดอิเล็กตรอน 2 ชุด



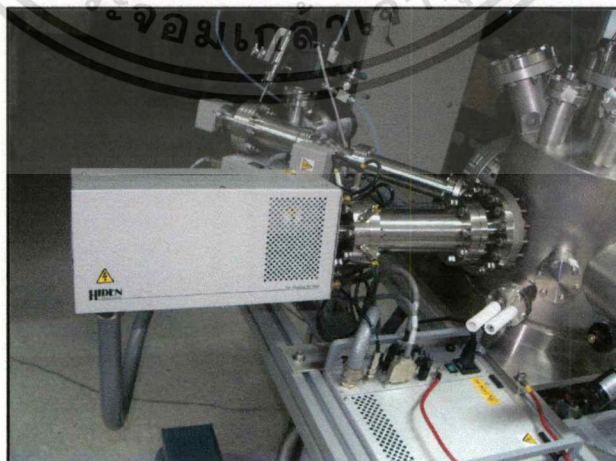
รูปที่ 3.2 ขั้วไฟฟ้าเชื่อมต่อฟีดทรูที่ด้านท้ายของชุดตรวจวัดมวลและที่ต้องต่อเข้ากับชุดกำเนิดสัญญาณความถี่สูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



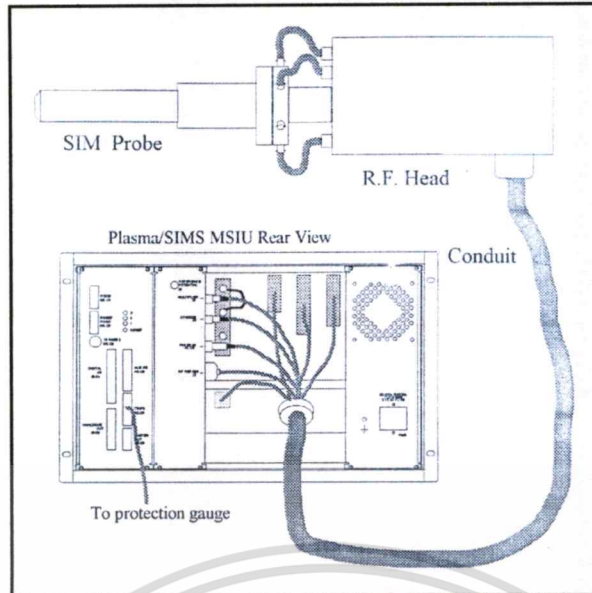
รูปที่ 3.3 อุปกรณ์การวิเคราะห์มวลแบบควอดรูโพลรูน HAL SIM 300 ที่ติดตั้งเข้ากับระบบสุญญากาศ

- 3.1.1.2 ติดตั้งหัววัดมวลเข้ากับระบบสุญญากาศดังรูปที่ 3.3 ผ่านทางหน้าแปลนห้องสุญญากาศ และมีระยะที่อื่นเข้าในห้องสุญญากาศห่างจากสารตัวอย่างพอเหมาะสำหรับการใช้งาน
- 3.1.1.3 ตรวจสอบเช็ค ขาที่ 3, 6 และ 9 ควรต่อกันแต่ไม่ถึงกราวด์ ส่วนขาอื่นๆ ต้องไม่ต่อกันและไม่ถึงกราวด์ด้วย
- 3.1.1.4 ป้อนระบบสุญญากาศให้มีความดันอยู่ในระดับไม่เกิน 10^{-6} มิลลิบาร์ไว้เพื่อยืดอายุการใช้งานของหัววัดมวลไอออน
- 3.1.1.5 ติดตั้งชุดกำเนิดสัญญาณความถี่สูงเข้ากับหัววัดมวล ดังรูปที่ 3.4
- 3.1.1.6 เปิดฝาครอบวงจรด้านหลังเครื่อง MSIU ออก มีป้ายเตือนว่าแรงดันไฟฟ้าแรงดันสูง โดยขันน็อต 2 ตัวออก



รูปที่ 3.4 ชุดกำเนิดสัญญาณความถี่สูงที่ติดตั้งเข้ากับหัวตรวจวัดมวล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 การเชื่อมต่อหัวตรวจวัดมวลและชุดกำเนิดสัญญาณความถี่สูงเข้ากับชุดควบคุมและเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์(MSIU)

- 3.1.1.7 นำสายของหัวตรวจวัดมวลมาต่อเข้ากับเครื่อง MSIU ดังรูปที่ 3.5 โดยตั้งเกตสัญญาณที่ติดอยู่ที่ตรงกับที่ด้านหลังของเครื่อง MSIU
- 3.1.1.8 ต่อพอร์ต AC 04 เข้ากับเครื่องป้องกันระบบความดันเกิน (protection gauge box)
- 3.1.1.9 ต่อพอร์ต AC 03 ไปยังพอร์ต 02 ด้านหลังเครื่องควบคุมแหล่งกำเนิดลำไอออน
- 3.1.1.10 ต่อสาย RS-232 จากพอร์ต MC-04 ของ MSIU เข้ากับ Com 1 ของคอมพิวเตอร์

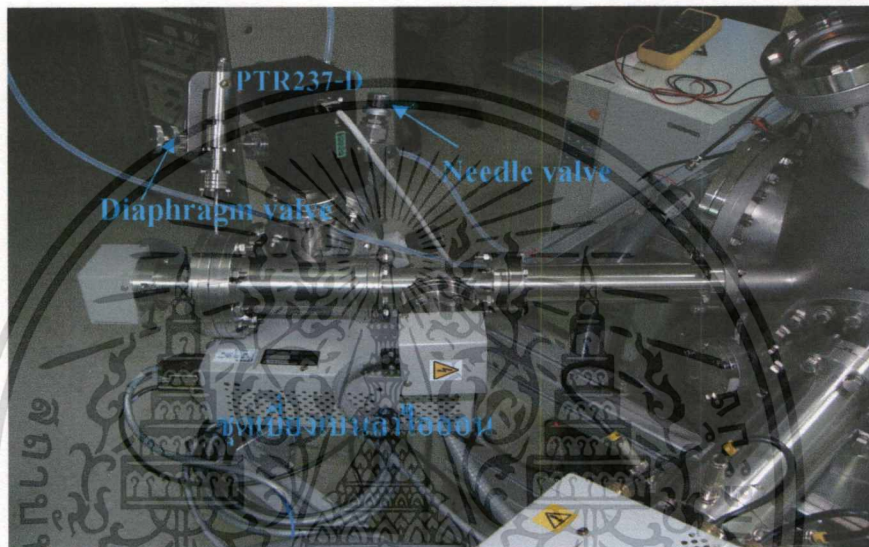
3.1.2 การติดตั้งแหล่งกำเนิดลำไอออน

การติดตั้งแหล่งกำเนิดลำไอออน มีขั้นตอน ดังนี้

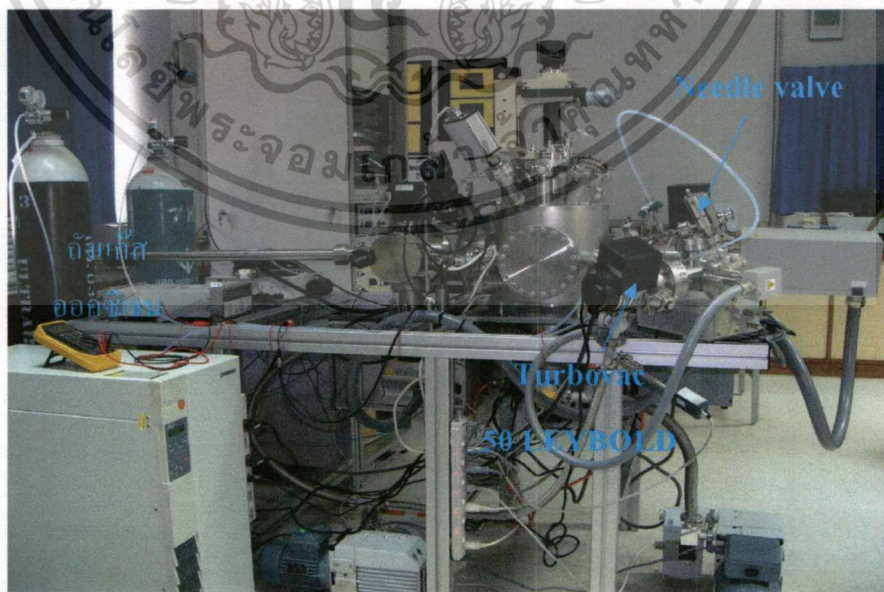
- 3.1.2.1 ติดตั้งแหล่งกำเนิดลำไอออนรุ่น HAL IG20 ของบริษัทไฮเดน อนาคตไคติคอล จำกัด จากประเทศอังกฤษ เข้ากับระบบสุญญากาศ ดังรูปที่ 3.6 โดยให้มีระยะที่ยื่นเข้าไปในห้องสุญญากาศห่างจากสารตัวอย่างพอเหมาะสำหรับการใช้งาน
- 3.1.2.2 ติดตั้งปั๊มสุญญากาศโทเบอร์โมเลกุลลาร์ (Turbovac 50 LEYBOLD) ขนาด 50 ลิตรต่อวินาที เข้าที่ช่องปั๊ม(pumping port) ของแหล่งกำเนิดลำไอออน(ดังรูป 3.7)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3.1.2.3 ติดตั้งเกจวัดความดัน (PTR237-D) เข้าที่ช่องวัดความดัน (gauge port) ของแหล่งกำเนิดลำไอออน (ดังรูปที่ 3.6)
- 3.1.2.4 ติดตั้งชุดเบี่ยงเบนลำไอออน โดยยึดด้วยน็อต 3 ตัวเข้ากับแท่งโลหะ (ดังรูปที่ 3.6)
- 3.1.2.5 ติดตั้งสายแก๊สต่อระหว่างถังแก๊สกับช่องต่อแก๊ส (Gas Inlet) ของแหล่งกำเนิดลำไอออนผ่านทางนิตเด็กลวาล์ว (needle valve) และไดอะแฟรมวาล์ว (diaphragm valve) (ดังรูปที่ 3.6 และ 3.7)



รูปที่ 3.6 แหล่งกำเนิดลำไอออน รุ่น HAL IG 20 ที่ติดตั้งเรียบร้อยแล้ว



รูปที่ 3.7 การติดตั้งโทเบอร์โมเลกุลลาร์ เกจวัดความดัน และนิตเด็กลวาล์ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การป้มน้ห้องสุญญากาศ

เนื่องจาก การใช้งานระบบการวิเคราะห์สเปกตรัมมวลของไอออนทุติยภูมิ ต้องทำให้ห้องสุญญากาศมีระดับความดันที่ต่ำมากอยู่ในระดับ $10^{-9} - 10^{-10}$ มิลลิบาร์ และมีส่วนประกอบหลายส่วนเพื่อหลีกเลี่ยงความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นได้ จึงจำเป็นต้องปฏิบัติตามขั้นตอนอย่างเคร่งครัดดังนี้

- 3.2.1 ตรวจสอบระบบเครื่องและสภาวะวาล์วปิดและพร้อมทำงาน
- 3.2.2 เปิดสวิตซ์หลักของเครื่องป้องกันความดันเกินที่ด้านหลังเครื่อง
- 3.2.3 กดปุ่มสีแดงที่ด้านหน้าของเครื่องป้องกันระบบความดันเกิน
- 3.2.4 เปิดสวิตซ์สีเขียวที่ด้านหน้าของเครื่องป้องกันระบบความดันเกิน
- 3.2.5 เปิดเครื่องปั๊มโรตารีตัวที่ 1 สำหรับปั๊มเทอร์โบโมเลกุลาร์ของห้องสุญญากาศหลัก
- 3.2.6 เปิดเครื่องปั๊มโรตารีตัวที่ 2 สำหรับปั๊มเทอร์โบโมเลกุลาร์ในส่วนของแหล่งกำเนิดลำไอออนและระบบโพลคัลลอค
- 3.2.7 เปิดวาล์วตัวที่ 1 และตัวที่ 2 ที่กั้นระหว่างปั๊มโรตารีกับเทอร์โบโมเลกุลาร์ทั้งสอง เปิดเครื่องอ่านความดันจาก IT23/1 ที่ช่อง S1 และ S2 (TTR211 และ TTR90 gauge head) สำหรับปั๊มโรตารีทั้งสอง เมื่อความดันลดลงต่ำกว่า 10^{-1} มิลลิบาร์ จึงเปิดปั๊มเทอร์โบโมเลกุลาร์
- 3.2.8 รอจนแน่ใจว่า ความดันในห้องสุญญากาศหลักและแหล่งกำเนิดลำไอออนมีความดันต่ำกว่า 10^{-4} มิลลิบาร์ จึงเปิดเครื่องอ่านความดันที่ช่อง ITR ของ IT23/1 (ITR100 gauge head) เพื่ออ่านค่าความดันในห้องสุญญากาศหลักและ IT23/2 ช่อง S1 (PR237-D gauge head) เพื่ออ่านค่าความดันในแหล่งกำเนิดลำไอออน (IT23/2 ช่อง S2:PR237 gauge head สำหรับห้องโพลคัลลอค)
- 3.2.9 รอจนกระทั่งความดันห้องสุญญากาศหลัก (จาก IT23/1) ต่ำกว่า $10^{-9} - 10^{-10}$ มิลลิบาร์
- 3.2.10 ปรับมุมและตำแหน่งของสารตัวอย่างที่อยู่บนตัวยึดจับให้อยู่ในตำแหน่งที่ต้องการ จะทำการทดลอง

3.3 การใช้งานแหล่งกำเนิดลำไอออน

ขั้นตอนการใช้งานแหล่งกำเนิดลำไอออน มีขั้นตอนดังนี้

- 3.3.1 ปรับสวิตซ์ของเครื่องควบคุมแหล่งกำเนิดลำไอออน (ขณะปิดเครื่อง) ดังนี้

gun power	off
-----------	-----

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

emission current	off
blanking	scan
scan source	off

3.3.2 เปิดเครื่องแหล่งจ่ายไฟของแหล่งกำเนิดลำไอออน (Ion Gun Power Supply)

3.3.3 เปิดเครื่องควบคุมแหล่งกำเนิดลำไอออน (Ion Gun Controller) โดยเปิดสวิตช์ที่แหล่งจ่ายกำลังของเครื่อง (Switch the Gun Power) ในกรณีระบบเริ่มป้อนจากความดันบรรยากาศ จะต้องทำการปลดปล่อยแก๊สออก (degas) เพื่อปลดปล่อยออกซิเจนที่ฝังตัวอยู่ที่เส้นลวดความร้อน (filament) ของแหล่งกำเนิดลำไอออนออกให้หมดก่อน เป็นเวลา 20 นาที โดยการตั้งค่าพื้นฐาน ดังนี้

พลังงาน ไอออน(Ion energy)	3.0	keV
โฟกัส 1(Focus1)	1.80	keV
โฟกัส 2(Focus2)	1.80	keV
พลังงานอิเล็กตรอน(Electron energy)	100	keV
X- DEF	0	V
Y- DEF	0	V
กระแสปลดปล่อย(Emission current)	1.0	mA

3.3.4 เมื่อครบ 20 นาที ให้เริ่มเปิดวาล์วให้แก๊สออกซิเจน เข้าสู่แหล่งกำเนิดลำไอออนในปริมาณน้อยๆ จนมีความดันไม่เกิน 7×10^{-5} มิลลิบาร์ จากนั้นกำหนดค่าของการควบคุมแหล่งกำเนิดลำไอออนใหม่ตามเทคนิคการวิเคราะห์พื้นผิวแต่ละแบบ และสารตัวอย่างแต่ละชนิดที่ทำการทดลอง

3.3.5 ปรับ X align และ Y align เพื่อให้ได้ค่ากระแสไอออนสูงสุด

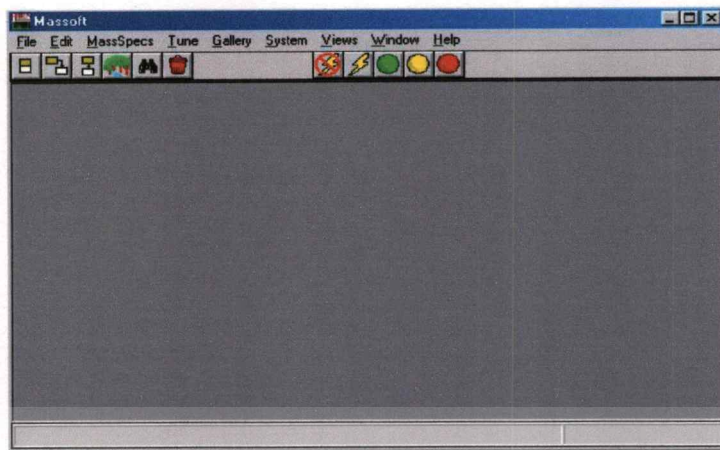
3.3.6 วัดกระแสไอออนที่เข้าขณสารตัวอย่าง

3.4 การใช้โปรแกรม (MASsoft)

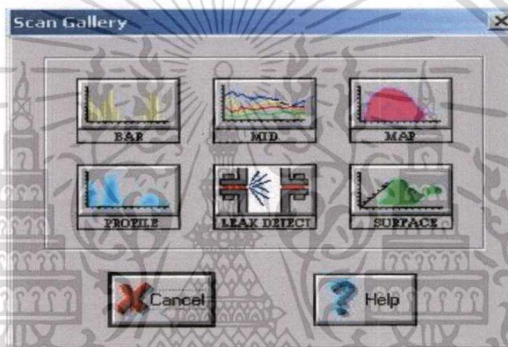
ระบบวิเคราะห์มวลที่ใช้ในการวิจัยนี้จะถูกควบคุมด้วยโปรแกรม MASsoft ของบริษัทไฮเดนอนาไลติคอล จากประเทศอังกฤษ ซึ่งมีวิธีการใช้เบื้องต้น ดังนี้

3.4.1 หลังจากเปิดโปรแกรมจะปรากฏหน้าจอตั้งรูปที่ 3.8 เมื่อโปรแกรมสามารถเชื่อมต่อกับระบบได้จากนั้นทำการเลือกเมนูแกลเลอรี(Gallery)จะปรากฏหน้าจอแสดงรูปที่ 3.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 หน้าต่างโปรแกรม (MASsoft)



รูปที่ 3.9 ไอคอนเลือกของสแกนแกแลลอรี่ (Scan Gallery)

BAR scan คือการสแกนแบบเชิงเส้น โดยเริ่มจากค่ามวลเริ่มต้นและค่ามวลสุดท้าย โดยการสแกนจะค่อยๆ เพิ่มมวลทีละ 1 amu จนกระทั่งถึงค่ามวลสุดท้ายที่กำหนดแล้วแสดงข้อมูลที่ได้แบบสเปกตรัมของมวล

PROFILE scan คือการสแกนช่วงมวลแคบๆ ที่สนใจ เพื่อดูการกระจายพลังงานของมวลต่อประจุที่มีค่าเท่ากัน แต่เป็นธาตุคนละชนิด เช่น มวลต่อประจุ 28 อาจเป็น $^{14}\text{N}_2^+$ และ $^{28}\text{Si}^+$

MID scan คือการสแกนเฉพาะมวลต่อประจุที่กำหนดเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงที่เป็นฟังก์ชันเวลา

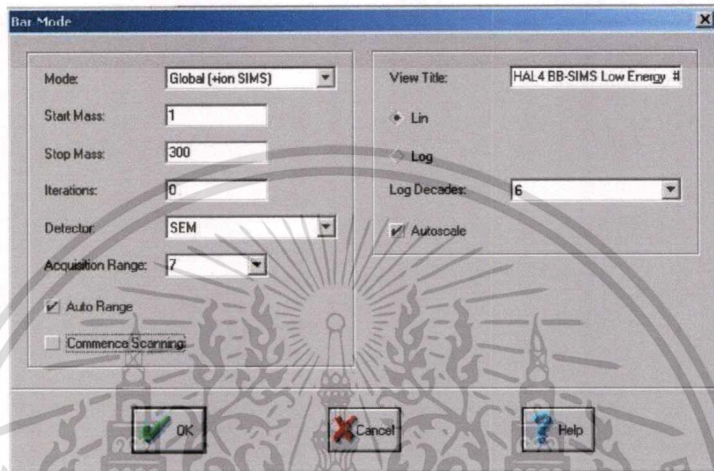
LEAK DETECT scan คือการสแกนเพียงมวลเพียงมวลเดียวที่ตั้งค่าไว้ เพื่อหารอยรั่วของระบบ

MAP scan คือการสแกน เพื่อเลือกค่าพารามิเตอร์ของระบบวิเคราะห์มวลที่เหมาะสมเฉพาะมวลไอออนที่กำหนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SURFACE scan คือการสแกนเพื่อเลือกค่าพารามิเตอร์ของระบบวิเคราะห์มวลที่เหมาะสม แต่สามารถเลือกสแกนได้เพียง 2 พารามิเตอร์ที่สนใจกับมวลไอออนที่กำหนด ข้อมูลที่ได้แสดงเป็นกราฟ 2 มิติ


3.4.2 เลือกการสแกนแบบเชิงเส้น (BAR scan) จะปรากฏไอคอนบ็อกซ์ดังรูปที่ 3.10 และทำการกำหนดพารามิเตอร์ต่างๆที่ปรากฏในรูป ดังนี้

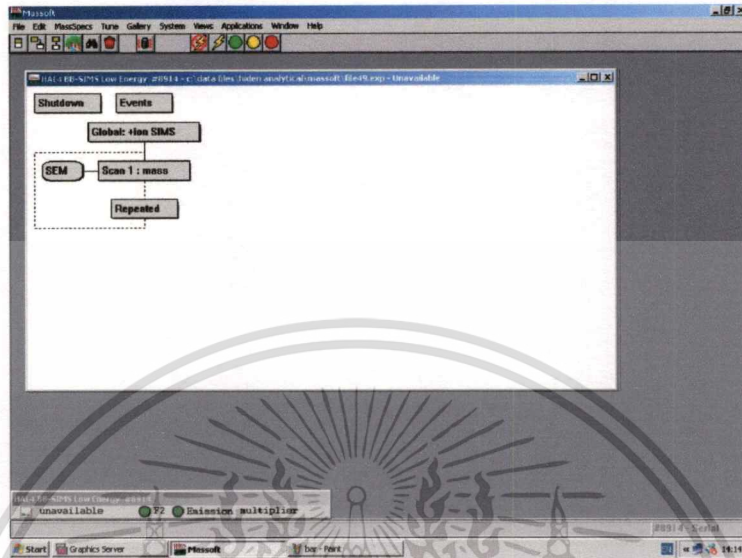


รูปที่ 3.10 ไอคอนบ็อกซ์การสแกนแบบเชิงเส้น

- โหมด (mode) เลือกโหมดการวัดแบบไอออนบวกของไอออนทุติยภูมิ (+Ion SIMS)
- กำหนดมวลเริ่มต้น (start mass) ในหน่วยมวลอะตอม (amu)
- กำหนดมวลสุดท้าย (stop mass) ในหน่วยมวลอะตอม (amu)
- กำหนดจำนวนรอบของการสแกน(iteration) ถ้าเป็น 0 ระบบจะทำการสแกนไปเรื่อยๆ จนกว่าผู้ใช้จะหยุดเอง
- เลือกชนิดของหัววัด(detector) ปกติจะกำหนดเป็นชนิดที่ขยายสัญญาณของอิเล็กตรอนทุติยภูมิอย่างทวีคูณ (secondary electron multiplier)
- กำหนดช่วงการแสดงผล (acquisition Range) เป็นเลขยกกำลังของ 10 ใช้กำหนดค่าับสูงสุดที่จะแสดงในกราฟ
- กำหนดช่วงอัตโนมัติ (autorange)
- กำหนดให้หัววัดเริ่มทำงานทันที (commence scanning) เมื่อเลือกหัวข้อนี้แล้วทำการกดปุ่มทำงาน (O K) จะทำให้ระบบเริ่มวัดทันที ซึ่งปกติจะไม่เลือกหัวข้อนี้
- กำหนดชื่อกราฟที่จะแสดง (view title)
- กำหนดกราฟเป็นแบบเชิงเส้นหรือแบบลอการิทึม (lin/log)

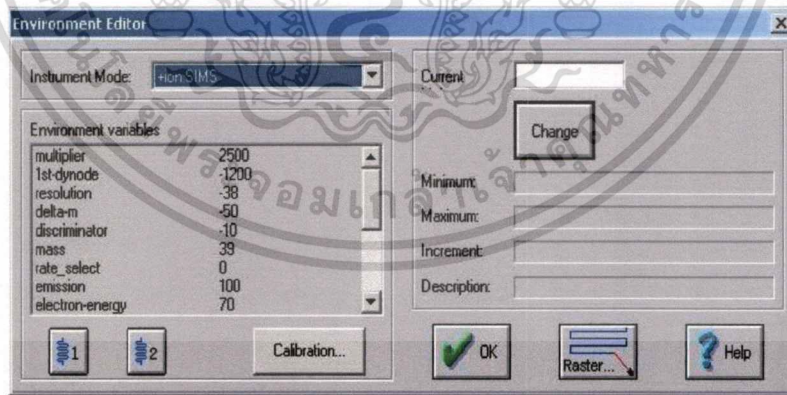
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อกำหนดพารามิเตอร์ในไดอะล็อกบ็อกซ์นี้แล้ว จึงคลิก  จะปรากฏวินโดวส์คอนโทรลขึ้นมาดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 สแกนที่สามที่กำหนดและเพิ่มบ็อกซ์ได้อีกเมื่อต้องการ

3.4.3 ดับเบิ้ลคลิก  จะปรากฏไดอะล็อกบ็อกซ์ ดังรูปที่ 3.12

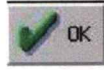


รูปที่ 3.12 ไดอะล็อกบ็อกซ์แสดงพารามิเตอร์ ของโหมดการวัดไอออนบวก

- กำหนดโหมดไอออนบวกของไอออนทุติยภูมิ(+Ion SIMS).
- กำหนดพารามิเตอร์ (Environment variables) ต่างๆ ให้กับหัววัดก่อนจึงจะสามารถทำการวัดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

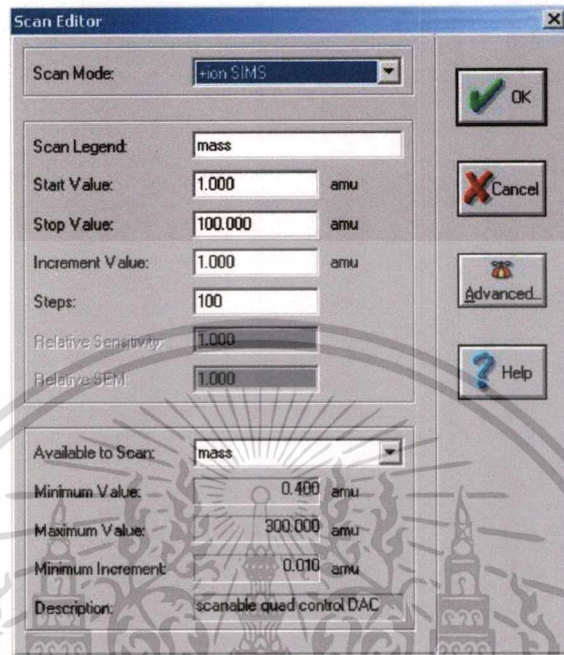
3.4.4 กดปุ่ม



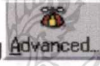
3.4.5 ค้างเบิ้ลคลิก

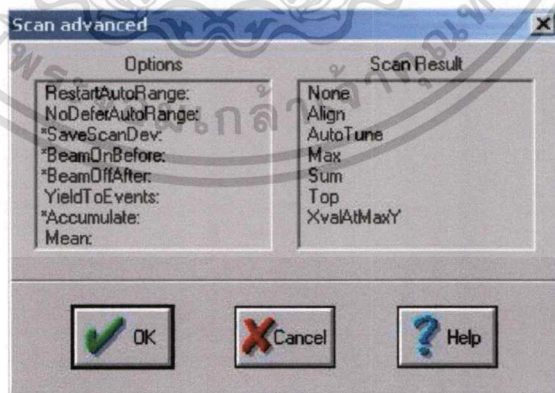
Scan 1 : mass

ปรากฏไดอะล็อกบ็อกซ์ ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 ไดอะล็อกบ็อกซ์แสดงพารามิเตอร์สำหรับการสแกน

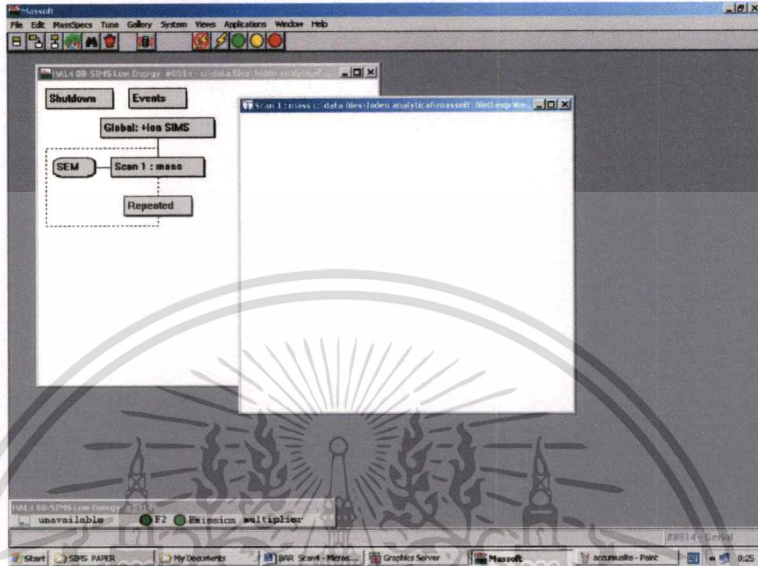
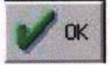
เมื่อกำหนดพารามิเตอร์ต่างๆ แล้วคลิกปุ่ม  Advanced จะปรากฏไดอะล็อกบ็อกซ์ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 ไดอะล็อกบ็อกซ์สำหรับเลือกสแกนการนับแบบสะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

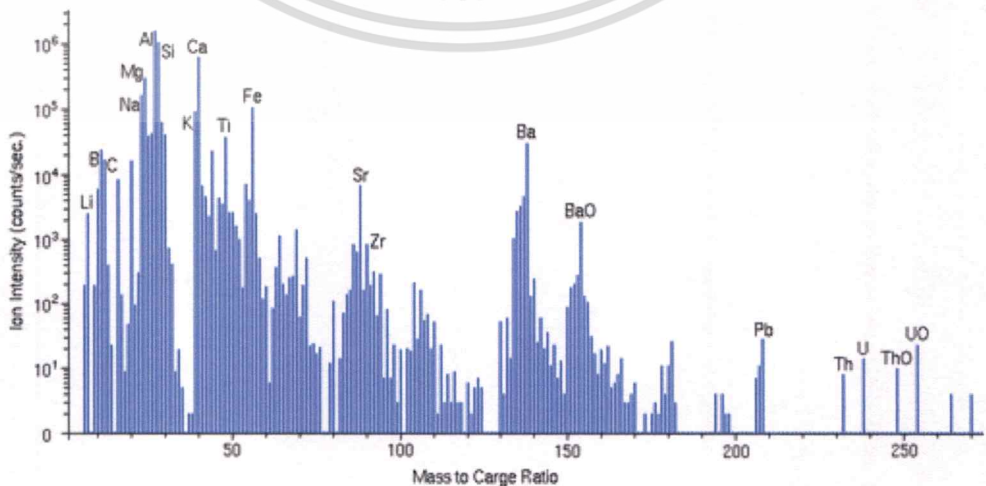
3.4.6 ทำเครื่องหมายคอกจันหน้าหัวข้อ (*Accumulate) กำหนดให้การนับเป็นแบบสะสมเพื่อให้กราฟแสดงผลวิเคราะห์ชัดเจนยิ่งขึ้นจากนั้นกดปุ่มตกลง ระบบจะอยู่ในสถานะที่พร้อมจะทำงาน ดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 คอนโทรลวินโดวส์ที่พร้อมจะทำงาน

3.4.7 กดปุ่ม  ระบบเริ่มสแกน และกดปุ่ม  ถ้าต้องการหยุดสแกน

ข้อมูลที่ได้จะแสดงในรูปของกราฟที่เรียกว่า สเปกตรัมของมวลโดยที่แกนนอนเป็นอัตราส่วนมวลต่อประจุ และแกนตั้งแสดงจำนวน ไอออนทุติยภูมิในหน่วยจำนวนนับต่อวินาที (counts/second) ดังแสดงในรูปที่ 3.16



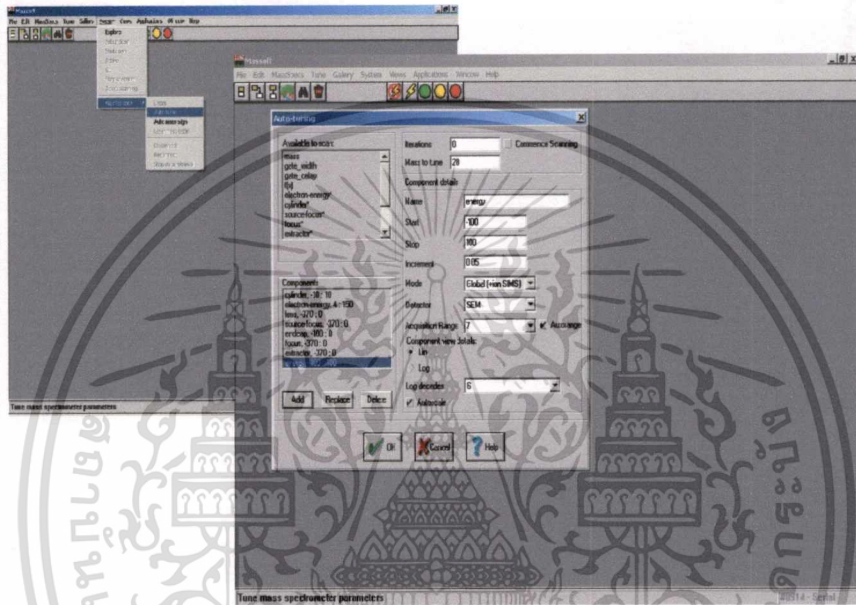
รูปที่ 3.16 สเปกตรัมของมวลที่แสดงธาตุต่างๆ ในตารางธาตุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต หรือใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 การปรับพารามิเตอร์แบบอัตโนมัติ

ก่อนทำการทดลองจะต้องมีการปรับพารามิเตอร์ของระบบวิเคราะห์มวลให้เหมาะสมกับค่ามวลต่อประจุของไอออนบวกที่ทำการทดลอง เช่น ถ้าต้องการวัดไอออนบวกทุติยภูมิของซิลิกอน ซึ่งมีมวลต่อประจุเป็น $^{28}\text{Si}^+$ จะมีวิธีการปรับพารามิเตอร์แบบอัตโนมัติ ดังนี้

3.5.1 จากแถบเมนูเลือก **System**, **Maintenance**, **Auto tune** จะปรากฏดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 วินโดวส์สำหรับการปรับพารามิเตอร์แบบอัตโนมัติ

3.5.2 จากรูปที่ 3.17 ทำการเลือกพารามิเตอร์ของระบบวิเคราะห์มวลสำหรับค่าที่ต้องการปรับ

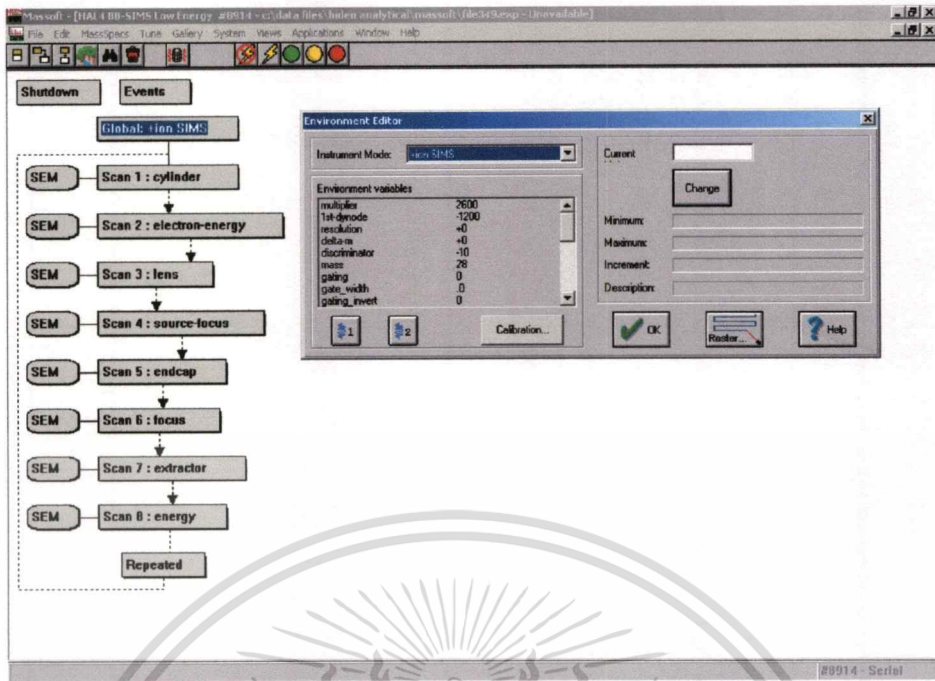
3.5.3 กดปุ่ม  จะปรากฏดังรูปที่ 3.18

3.5.4 เลือกโหมดการวัดไอออนบวกทุติยภูมิ มวลที่ต้องการวัด และกำหนดรอบสำหรับการสแกน

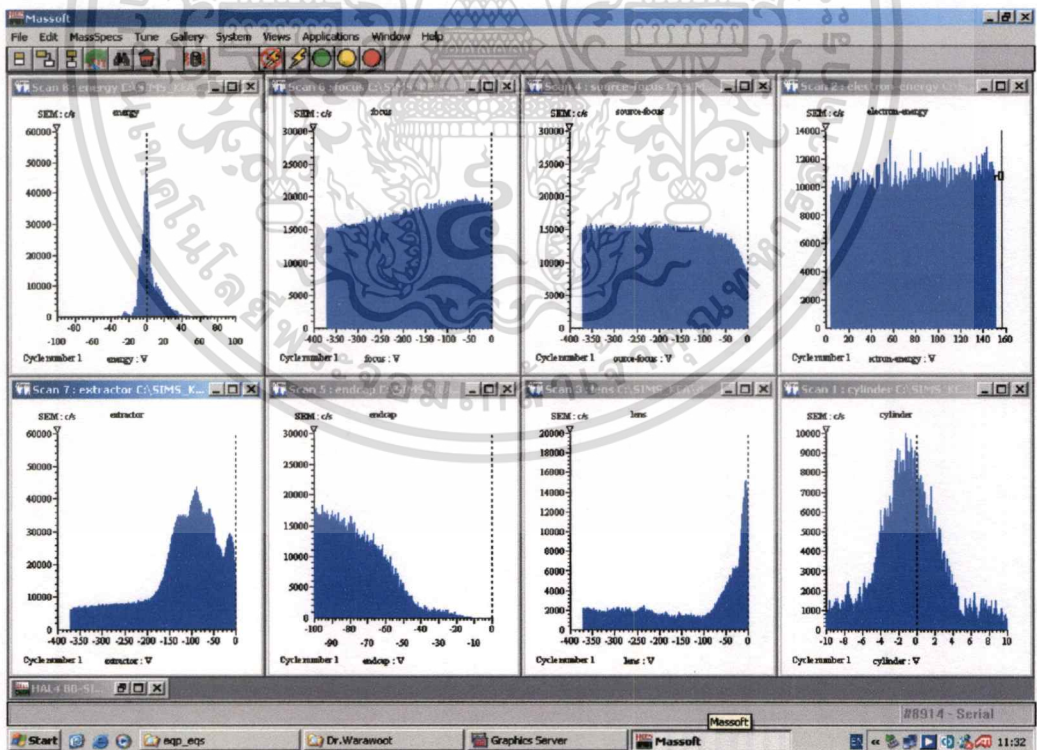
3.5.5 กดปุ่ม  จากนั้นระบบเริ่มสแกนโดยกดปุ่มเริ่มทำงาน 

3.5.6 เมื่อสแกนเสร็จพารามิเตอร์ของระบบวิเคราะห์มวลจะปรากฏใน Environment Editor โดยอัตโนมัติ ช่วงค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมแสดงดังกราฟรูปที่ 3.19 ซึ่งค่าเหล่านี้จะถูกบันทึกไว้โดยอัตโนมัติสำหรับการปรับค่าปัจจุบันและจะถูกแทนที่โดยค่าใหม่เมื่อมีการสแกนปรับค่าในครั้งต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.18 สแกนทรีแสดงพารามิเตอร์ที่ทำการปรับค่า



รูปที่ 3.19 พารามิเตอร์ของระบบวิเคราะห์มวลที่เหมาะสม ที่ได้จากการปรับพารามิเตอร์

แบบอัตโนมัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 การปลูกฟิล์มโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อน (Thermal Evaporation)



รูปที่ 3.20 ระบบการปลูกฟิล์มโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อน

การปลูกฟิล์มโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อน คือการนำสารที่ต้องการปลูกฟิล์ม เช่น อลูมิเนียม ซึ่งมีจุดหลอมเหลวประมาณ 700°C ใส่ในโบท (boat) ซึ่งต่ออยู่กับขดลวดความร้อน ทั้งสแตน เมื่อให้กระแสแก่ขดลวดจะเกิดความร้อนขึ้นจนทำให้สารเกิดการหลอมเหลวและระเหย กลายเป็นไอไปจับเป็นฟิล์มบางที่ผิวของแผ่นรองรับ (substrate) ในห้องสุญญากาศ ระบบการปลูกฟิล์มโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนที่ใช้ในการทดลอง แสดงดังรูปที่ 3.20

3.7 การปลูกฟิล์มด้วยเทคนิคอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง (RF Magnetron Sputtering)



รูปที่ 3.21 ระบบการปลูกฟิล์มโดยเทคนิคอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง

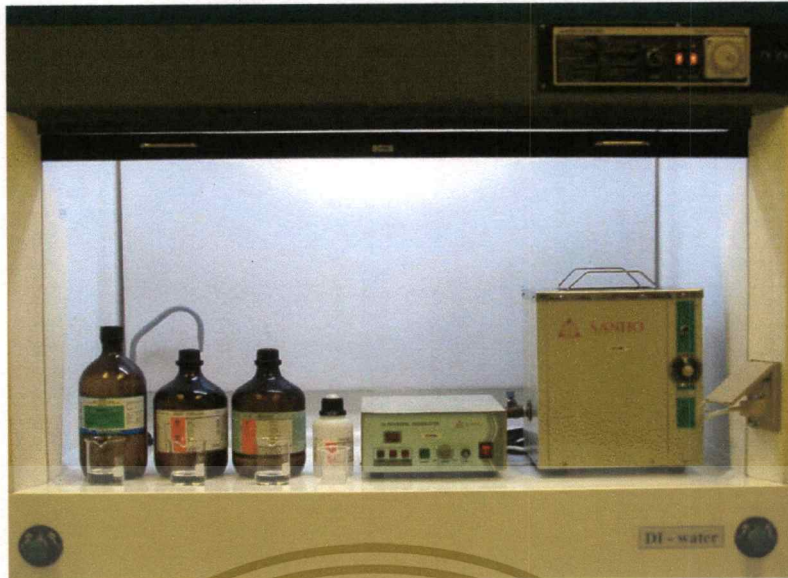
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การปลูกฟิล์มโดยเทคนิคอาร์เอฟแมกนีตรอนสปีดเตอริง การสปีดเตอริง คือกระบวนการที่ทำให้อะตอม หรือ โมเลกุลที่ผิวหน้าของวัสดุที่เป็นของแข็งหลุดออกมาจากผิวของวัตถุนั้นด้วยการชนของอนุภาคพลังงานสูง โดยมีการแลกเปลี่ยนพลังงานและโมเมนตัมระหว่างอนุภาคที่วิ่งชนกับอะตอมหรือโมเลกุลที่ผิวหน้าของวัสดุ ซึ่งใช้แหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ 13.56 เมกะเฮิรตซ์ กระตุ้นให้ก๊าซในระบบแตกตัวเป็นไอออนมากขึ้น ระบบการปลูกฟิล์มโดยเทคนิคอาร์เอฟแมกนีตรอนสปีดเตอริง แสดงดังรูปที่ 3.21 ซึ่งมีกระบวนการดังนี้

- 3.7.1 อาศัยการดิสชาร์จไฟฟ้าของก๊าซอาร์กอน เพื่อให้แตกตัวเป็นไอออน
- 3.7.2 ทำการเร่งไอออนให้วิ่งเข้าชนแผ่นสารเคลือบหรือวัตถุเป้าหมายซึ่งตั้งอยู่กับขั้วลบของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูง
- 3.7.3 สารเคลือบที่ถูกชนด้วยไอออนของก๊าซจะหลุดออก และวิ่งด้วยความเร็วสูงมายังแผ่นรองรับในทุกทิศทาง ซึ่งพลังงานของอนุภาคของสารเคลือบที่หลุดออกมาด้วยวิธีสปีดเตอริงนั้นจะมีค่าสูงกว่าพลังงานของอนุภาคที่หลุดออกมาจากวิธีระเหยมา ดังนั้นเมื่ออนุภาคของสารเคลือบตกกระทบฐานรองรับจึงเกิดการฝังตัวลงในเนื้อฐานรองรับ

3.8 การทำความสะอาดสารกึ่งตัวนำซิลิกอน

ก่อนทำการทดลองด้วยเทคนิคนี้ สารกึ่งตัวนำซิลิกอนชนิดพีต้องทำความสะอาดก่อนทุกครั้ง โดยใช้สารเคมีและเครื่องอัลตราโซนิค ดังรูปที่ 3.22 ซึ่งในงานวิจัยนี้มีขั้นตอนการทำความสะอาด โดยเริ่มจากการล้างไขมันบนแผ่นซิลิกอนด้วย ไดคลอโรมีเทน (Dichloromethane : CH_2Cl_2) เป็นเวลา 10 นาที ล้างด้วยอะซิโตน (Acetone: CH_3COOH_3) 10 นาที จากนั้นล้างด้วยเมทานอล (Methanol: CH_3OH) 10 นาที เพื่อกำจัดไขมันที่เหลือในขั้นตอนทั้งสามจะทำในเครื่องอัลตราโซนิคส์ (Ultrasonic cleaner) จากนั้นล้างด้วยน้ำไร้ประจุ (deionized water : DI water) เสร็จแล้วเป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน สำหรับขั้นตอนต่อไปจะทำการกัดชั้นออกไซด์ที่ผิวหน้าของแผ่นซิลิกอนด้วยกรดไฮโดรฟลูออริก (HF 48%) เวลา 3 นาที แล้วล้างด้วยน้ำไร้ประจุและเป่าด้วยก๊าซไนโตรเจนให้แห้ง จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



รูปที่ 3.22 สารเคมีและเครื่องอัลตราโซนิกที่ใช้ในการทำความสะอาด

3.9 การวัดความลึกของหลุม

ในงานวิจัยนี้ มีการวัดโครงสร้างเชิงลึกของสารตัวอย่าง ซึ่งทำได้โดยการวัดจำนวนไอออนทุติยภูมิต่อหนึ่งหน่วยเวลาของธาตุ ๆ หนึ่ง เป็นฟังก์ชันของเวลา จากนั้นทำการแปลงแกนเวลาให้เป็นความลึก โดยการใช้เครื่องวัดโครงสร้างของพื้นผิวของบริษัท Veeco รุ่น Dektak 3ST ดังรูปที่ 3.23 สำหรับการวัดความลึกของหลุมที่เกิดจากการสปีดเตอร์ด้วยลำไอออนปฐมภูมิ เมื่อนำความลึกที่ได้หารด้วยเวลาทั้งหมดที่ใช้ จะได้อัตราการสปีดเตอร์ จากนั้นคำนวณความลึกจากเวลาที่ใช้ได้ เพื่อนำไปศึกษาลักษณะ โครงสร้างเชิงลึกของสารตัวอย่างและสำหรับการวัดความหนาของฟิล์มบางของออลูมิเนียมและอินเดียมทินออกไซด์บนแผ่นซิลิกอน

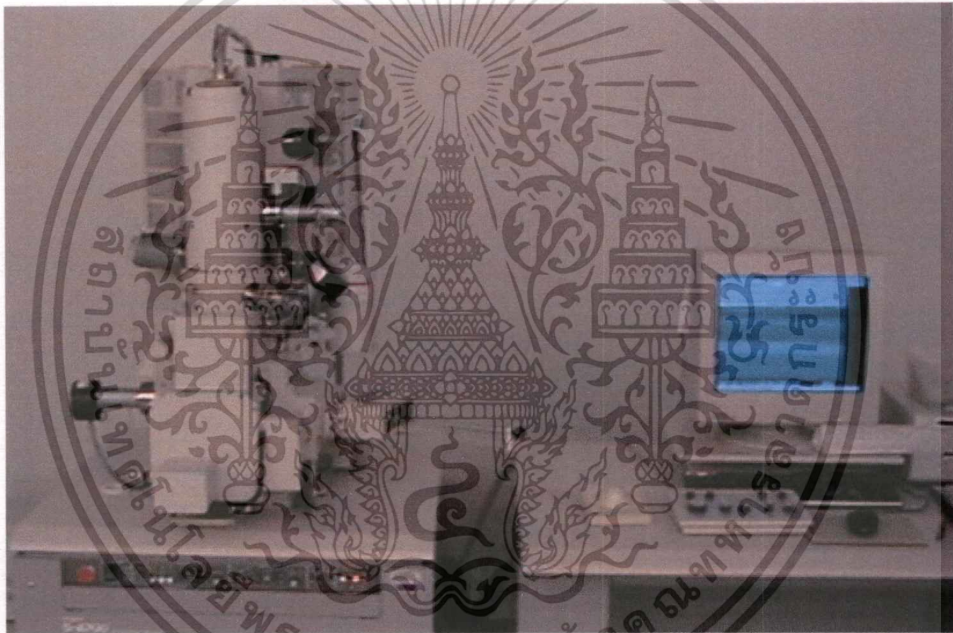


รูปที่ 3.23 เครื่องวัดโครงสร้างของพื้นผิวของบริษัท Veeco รุ่น Dektak 3ST

เอกสารนี้เป็นเอกสารของศูนย์วิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและอวกาศศึกษาของศูนย์อวกาศและอวกาศศึกษา ซึ่งศูนย์อวกาศและอวกาศศึกษาขอสงวนลิขสิทธิ์ในเอกสารนี้ ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.10 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope)

ในงานวิจัยนี้ ได้ทำการสอบเทียบระดับความหนาฟิล์มบางของอลูมิเนียมและอินเดียมทินออกไซด์บนแผ่นซิลิกอน ด้วยเครื่องวัดโครงสร้างของพื้นผิวแล้ว ยังมีอีกวิธีหนึ่งที่น่ามาสอบเทียบความหนาที่วัดได้จากการทดลองในครั้งนี้ คือการวัดความหนาฟิล์มบางโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดยี่ห้อฮิตาชิรุ่น S-4700 SE-SEM มีกำลังขยาย 10-300,000 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 3.24 ฟิล์มบางบนแผ่นรองรับ เช่น ฟิล์มของอลูมิเนียมบนแผ่นซิลิกอน จะถูกกริดให้เป็นรอยและหักออก ให้เห็นภาคตัดขวางของชั้นฟิล์มและฐานรองรับ เมื่อถ่ายภาพของภาคตัดขวางนี้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จะทำให้สามารถวัดความหนาของฟิล์มบางได้



รูปที่ 3.24 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลอง ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

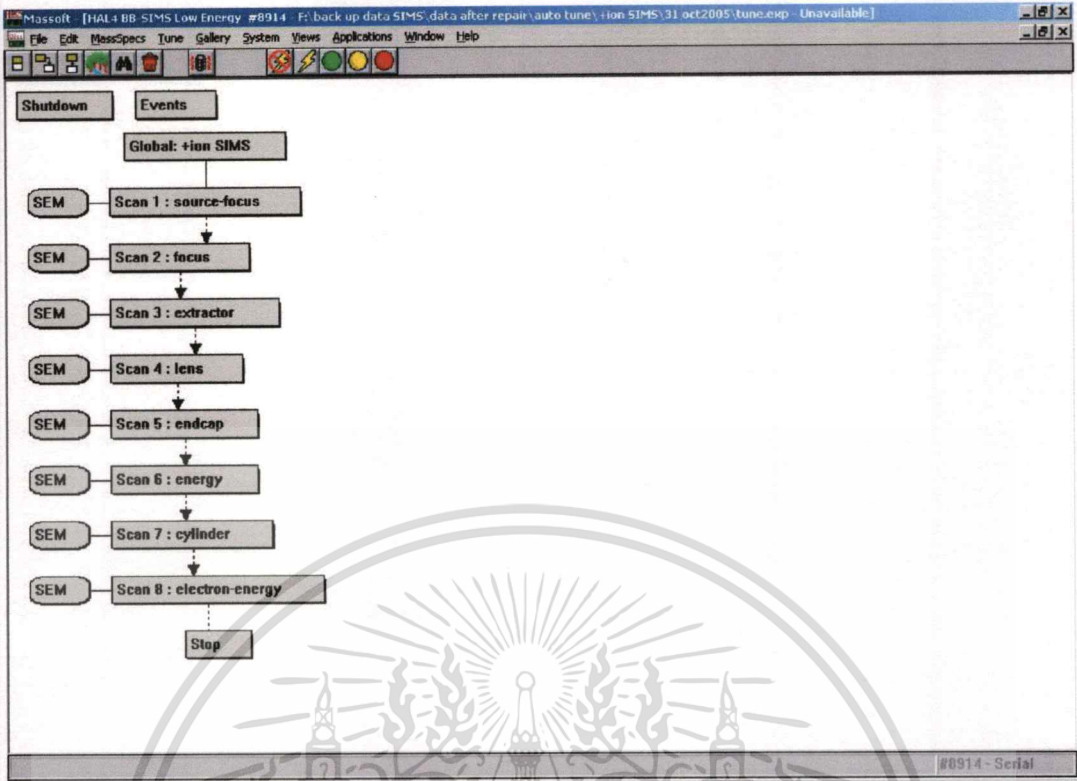
บทนี้กล่าวถึงการทดลอง ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์พื้นผิวด้วยเทคนิคการวิเคราะห์สเปกตรัมของมวลไอออนทุติยภูมิ โดยใช้ลำไอออนของออกซิเจนเป็นลำไอออนปฐมภูมิ เพื่อศึกษาองค์ประกอบของพื้นผิวและโครงสร้างเชิงลึกของสารตัวอย่าง โดยสารตัวอย่างที่นำมาศึกษาได้แก่ สารกึ่งตัวนำซิลิกอนชนิดพี อลูมิเนียมฟอสไฟด์ ซึ่งมีความหนา 20 ไมโครเมตร พิล์มบางของอลูมิเนียมบนสารกึ่งตัวนำซิลิกอนที่มีความหนาแตกต่างกัน 2 ตัวอย่าง และฟิล์มบางของอินเดียมทินออกไซด์บนสารกึ่งตัวนำซิลิกอน การทดลองเริ่มต้นที่การหาพารามิเตอร์ของระบบวิเคราะห์มวลที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานในแต่ละกรณี จากนั้นจึงเป็นการทดลองเพื่อศึกษาผลของมุมตกกระทบที่มีต่อปริมาณการเกิดไอออนทุติยภูมิจากพื้นผิว ข้อมูลจากการทดลองทั้งสองนี้จะนำมาใช้สำหรับการทดลองเพื่อศึกษาองค์ประกอบของพื้นผิวและโครงสร้างเชิงลึกของสารตัวอย่างชนิดต่างๆ ด้วยวิธีการวิเคราะห์แบบสถิตและแบบไดนามิกตามลำดับ

4.1 การหาพารามิเตอร์ของระบบวิเคราะห์มวล

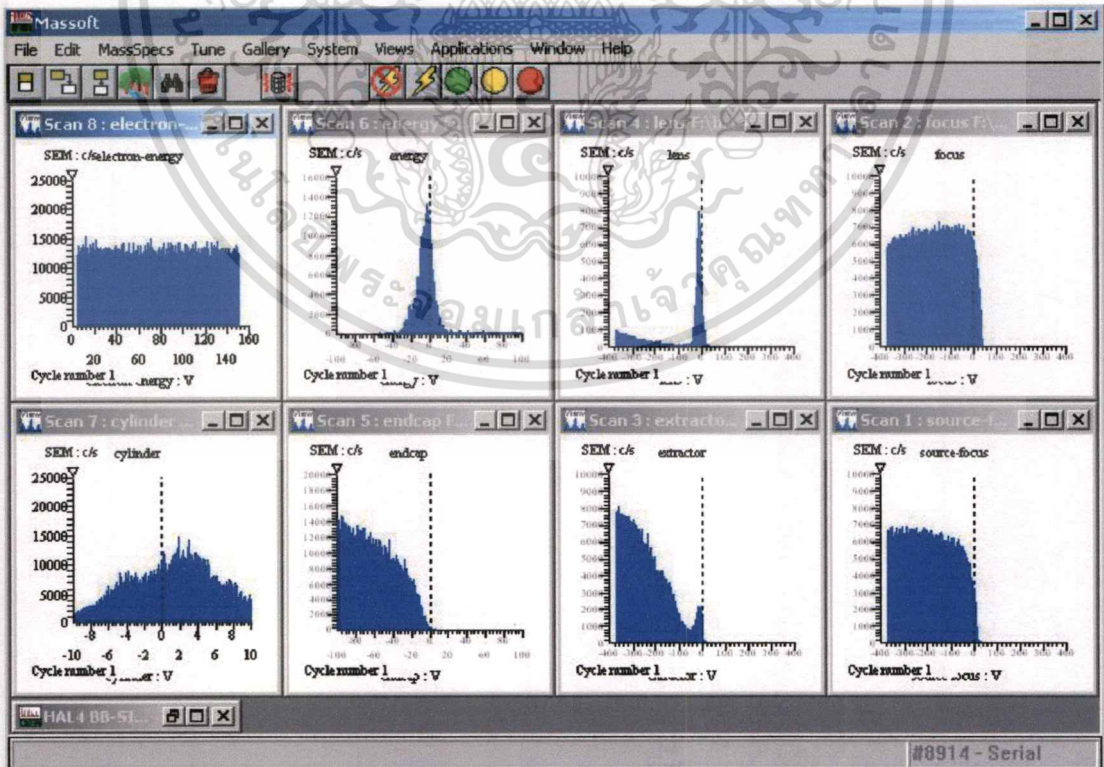
การหาพารามิเตอร์ของระบบวิเคราะห์มวลทำได้โดยวิธีการปรับพารามิเตอร์แบบอัตโนมัติ (Auto tune) ดังที่กล่าวในหัวข้อ 3.5 มีวัตถุประสงค์เพื่อหาพารามิเตอร์ของระบบวิเคราะห์มวลที่ทำให้ระบบวิเคราะห์มวลมีประสิทธิภาพสูงสุดกล่าวคือมีความไวสูงสุดสำหรับการวัดมวลไอออนทุติยภูมิที่ต้องการ เช่น การตั้งค่าพารามิเตอร์ของระบบเลนส์และระบบโพกัสของระบบวิเคราะห์มวลให้เหมาะสมเพื่อทำให้ระบบสามารถส่งผ่านไอออนทุติยภูมิที่สนใจเข้าสู่ดีเทคเตอร์ของระบบวิเคราะห์มวลให้ได้มากที่สุด เป็นต้น

การทดลองต่อไปนี้เป็นตัวอย่างการหาพารามิเตอร์ของระบบวิเคราะห์มวลเพื่อให้ระบบมีความไวสูงสุดสำหรับการวัดไอออนทุติยภูมิของซิลิกอน (มวล = 28) โดยกำหนดพารามิเตอร์ที่ถูกปรับทั้งสิ้น 8 ตัวคือ Source-focus, focus, extractor, lens, endcap, energy, cylinder, electron-energy โดยพารามิเตอร์ทั้ง 8 นี้จะปรากฏในสแกนทรี (scan tree) ดังรูปที่ 4.1 และเมื่อการหาพารามิเตอร์ของระบบวิเคราะห์มวลทำได้โดยวิธีการปรับพารามิเตอร์แบบอัตโนมัติเสร็จสิ้นจะปรากฏหน้าต่างแสดงผลการปรับพารามิเตอร์ดังรูปที่ 4.2 โดยมีรายละเอียดของการปรับพารามิเตอร์แต่ละตัวดังแสดงดังรูปที่ 4.3 ถึง 4.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

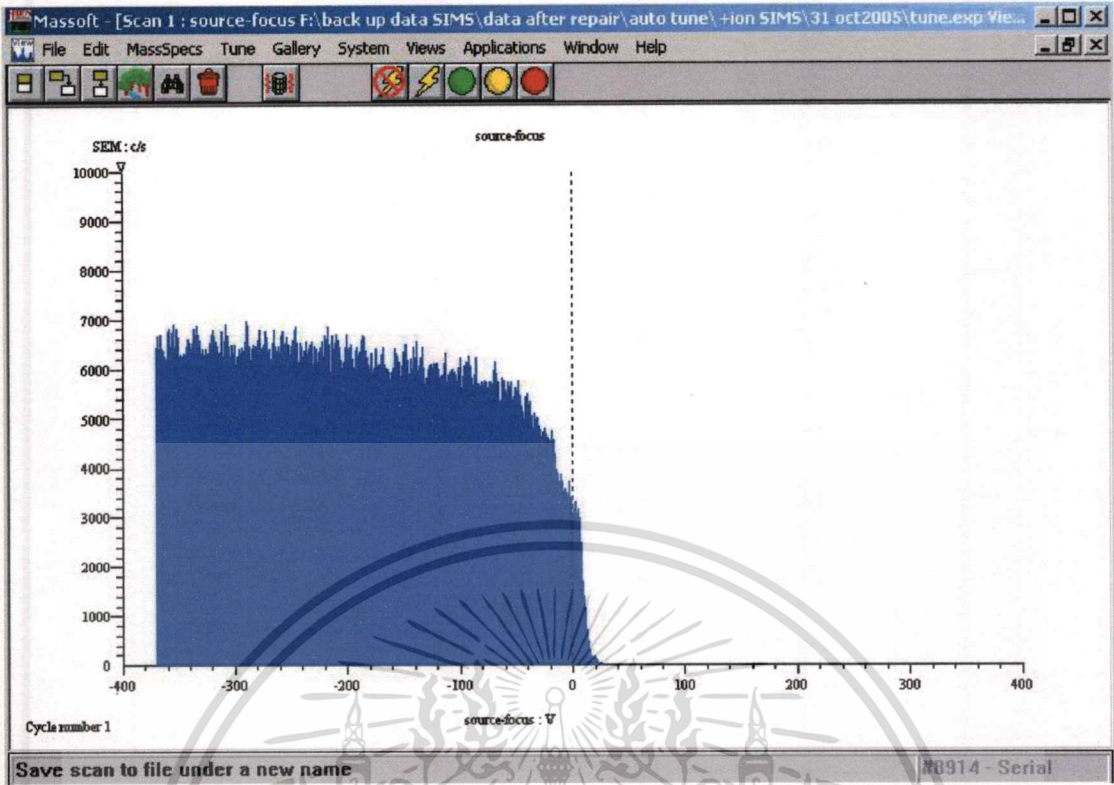


รูปที่ 4.1 สแกนที่สำหรับการปรับพารามิเตอร์แบบอัตโนมัติของมวลชนิดิกอน

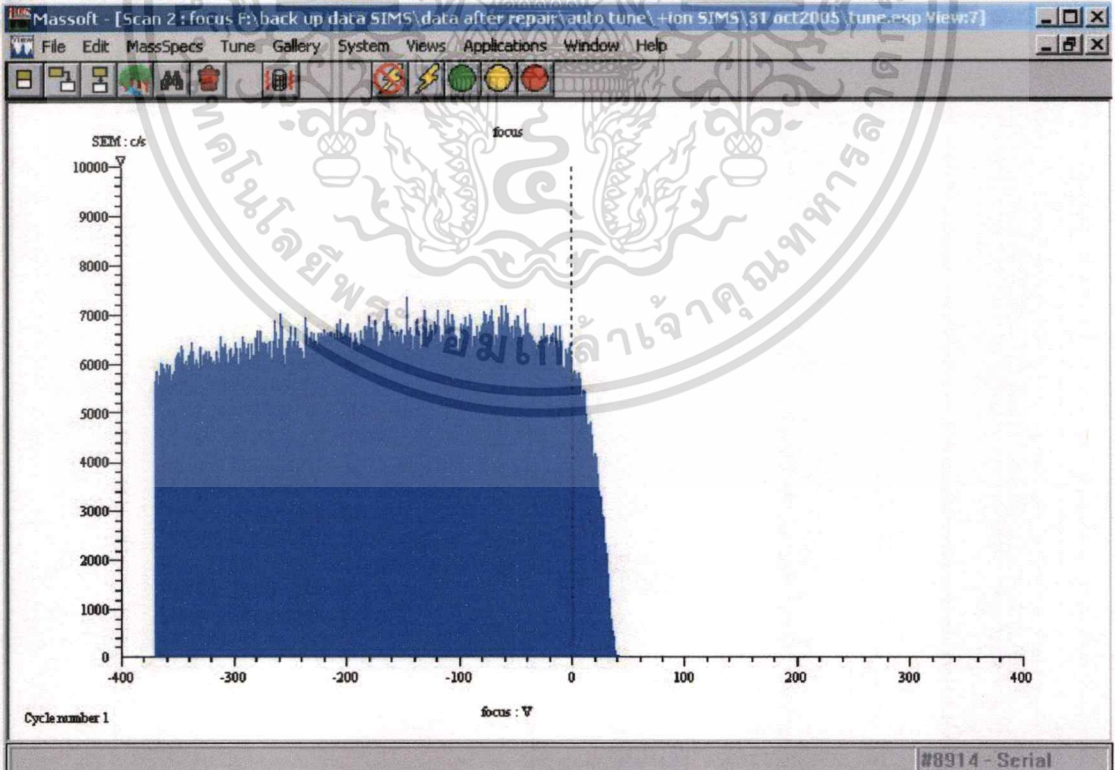


รูปที่ 4.2 หน้าต่างแสดงผลของการปรับพารามิเตอร์ทั้ง 8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

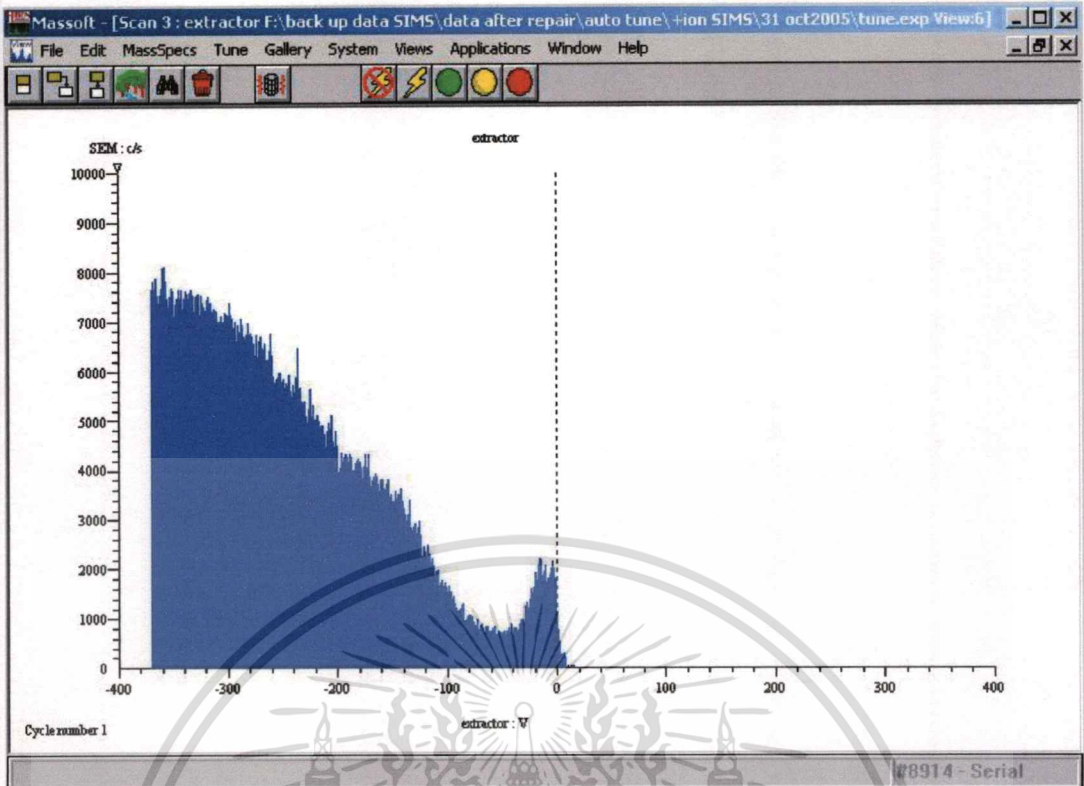


รูปที่ 4.3 หน้าต่างแสดงผลของการปรับพารามิเตอร์ Source-focus

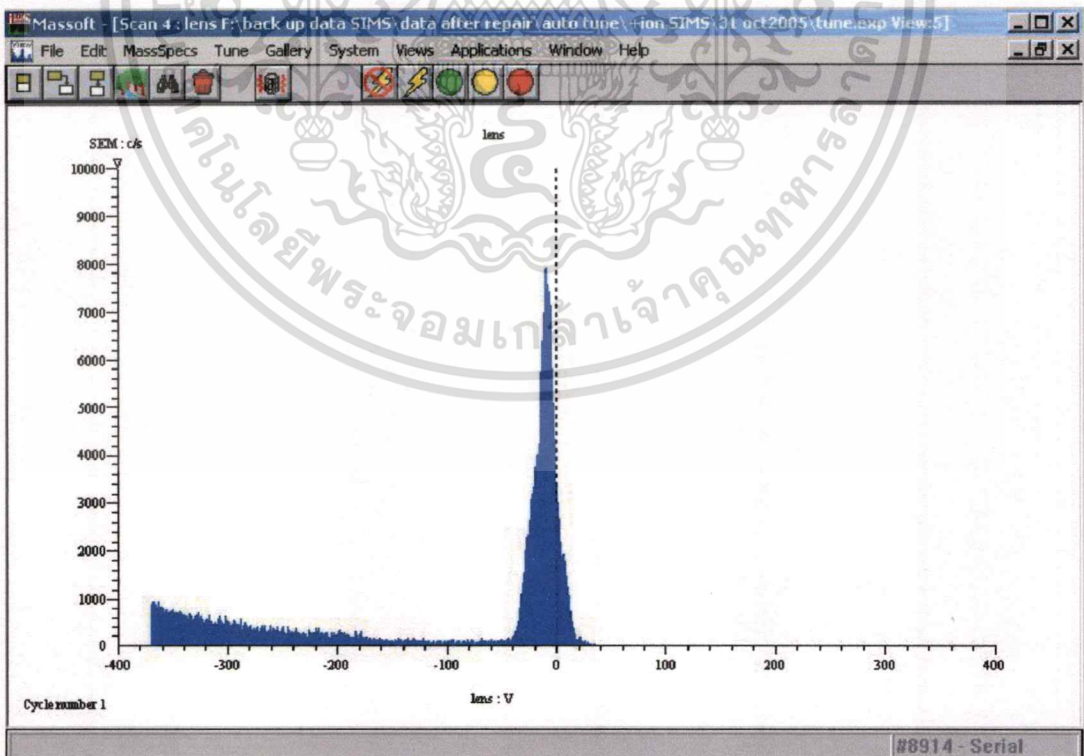


รูปที่ 4.4 หน้าต่างแสดงผลของการปรับพารามิเตอร์ focus

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

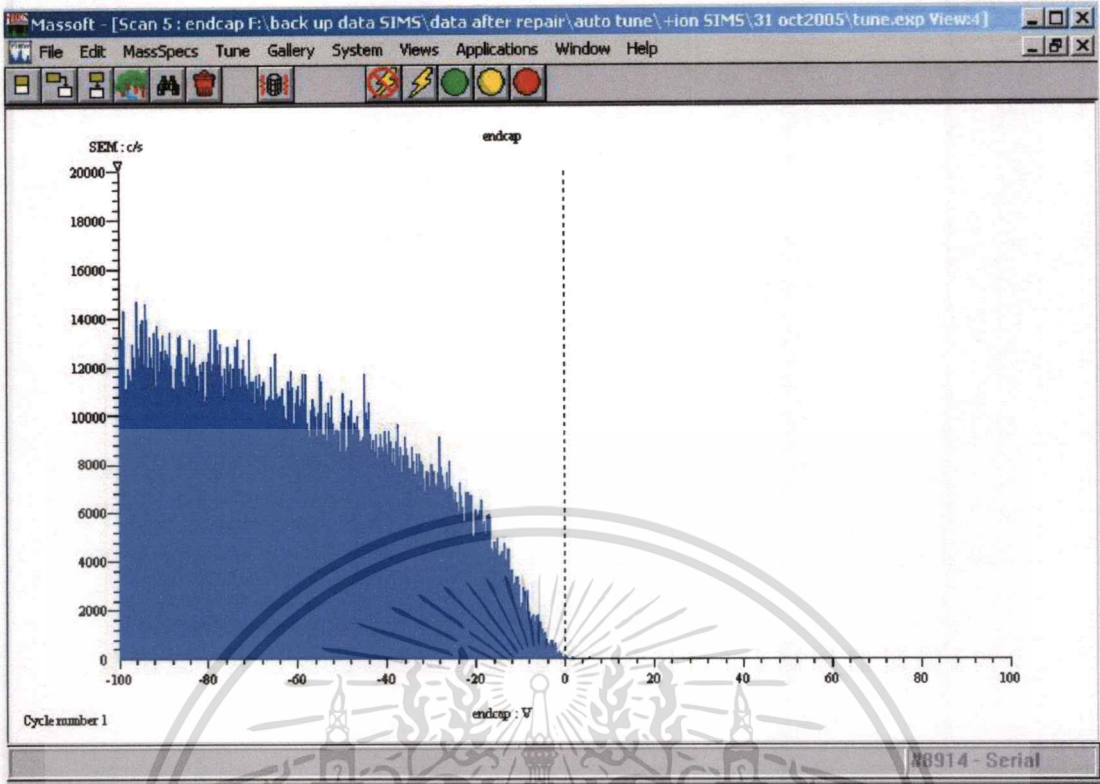


รูปที่ 4.5 หน้าต่างแสดงผลของการปรับพารามิเตอร์ extractor

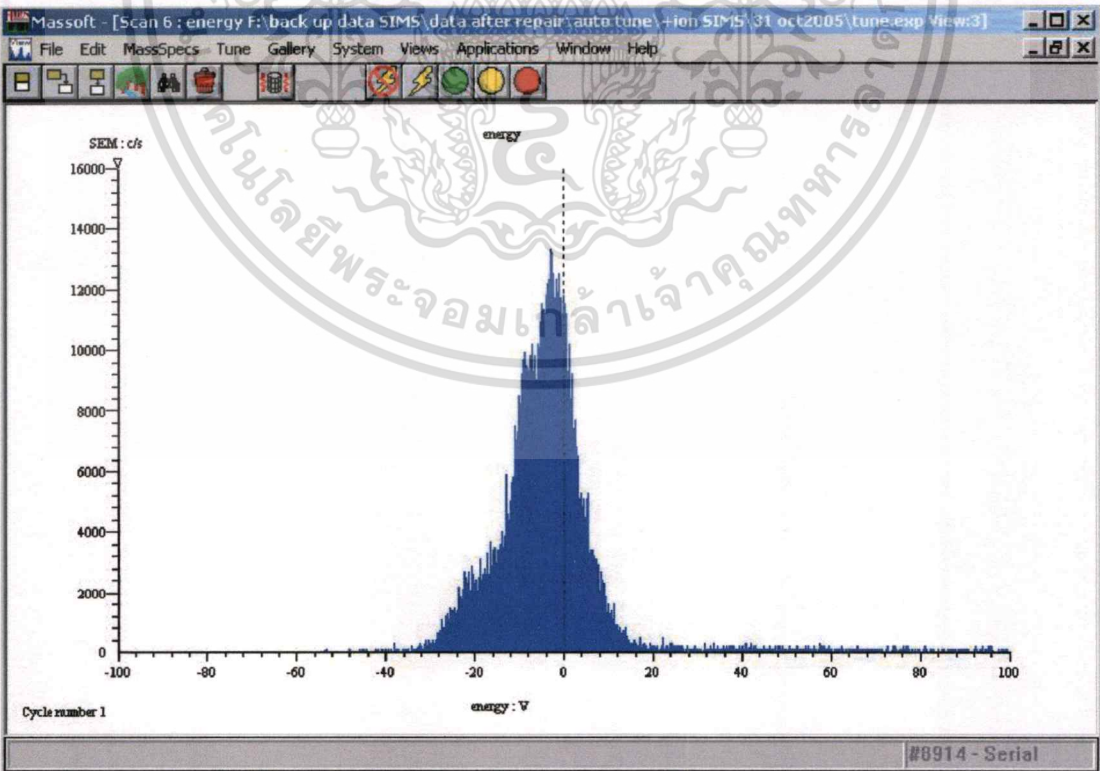


รูปที่ 4.6 หน้าต่างแสดงผลของการปรับพารามิเตอร์ lens

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

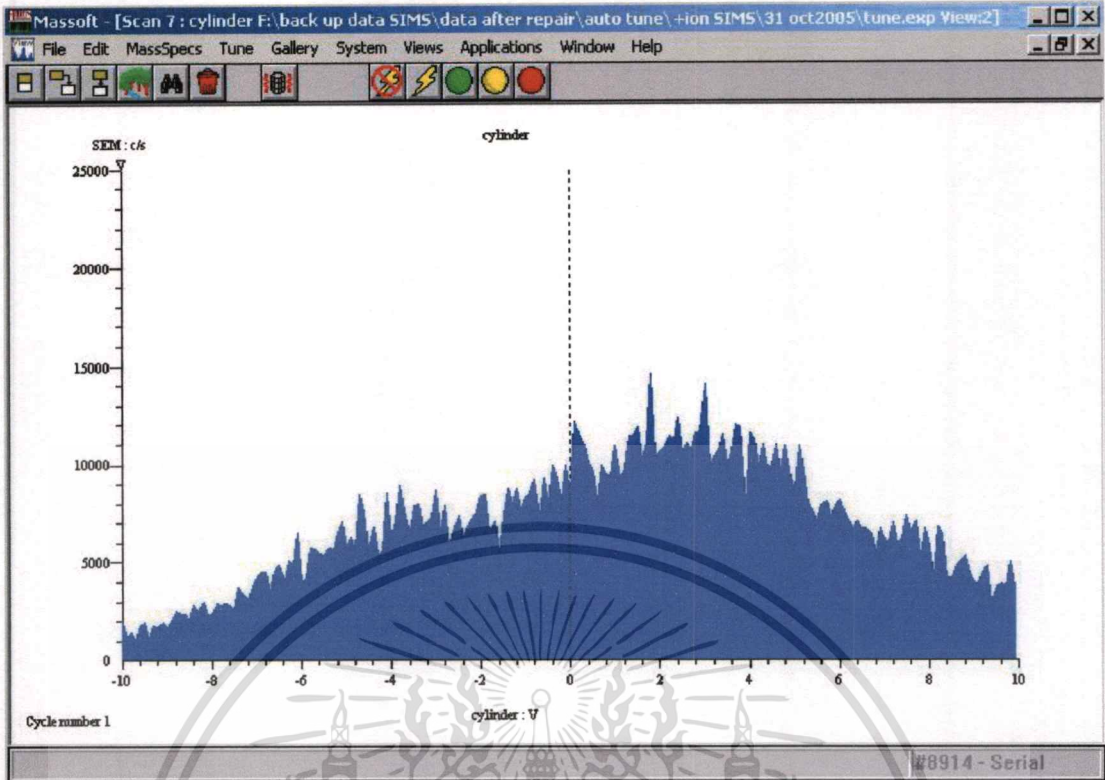


รูปที่ 4.7 หน้าต่างแสดงผลของการปรับพารามิเตอร์ endcap

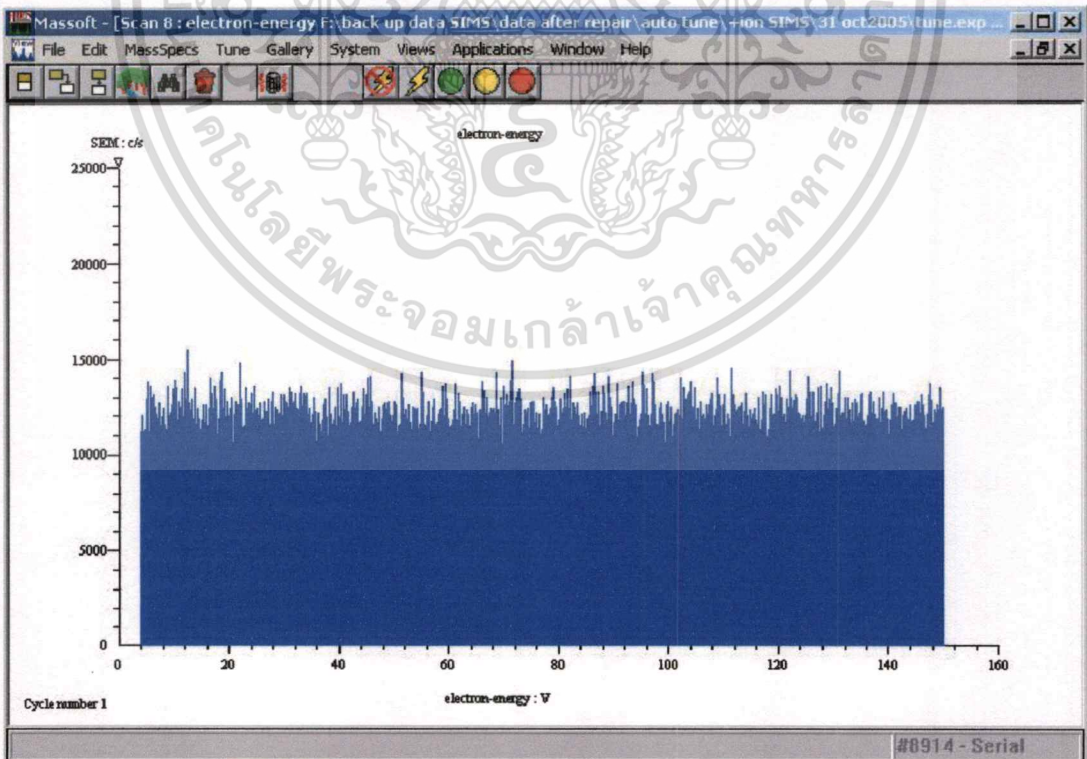


รูปที่ 4.8 หน้าต่างแสดงผลของการปรับพารามิเตอร์ energy

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



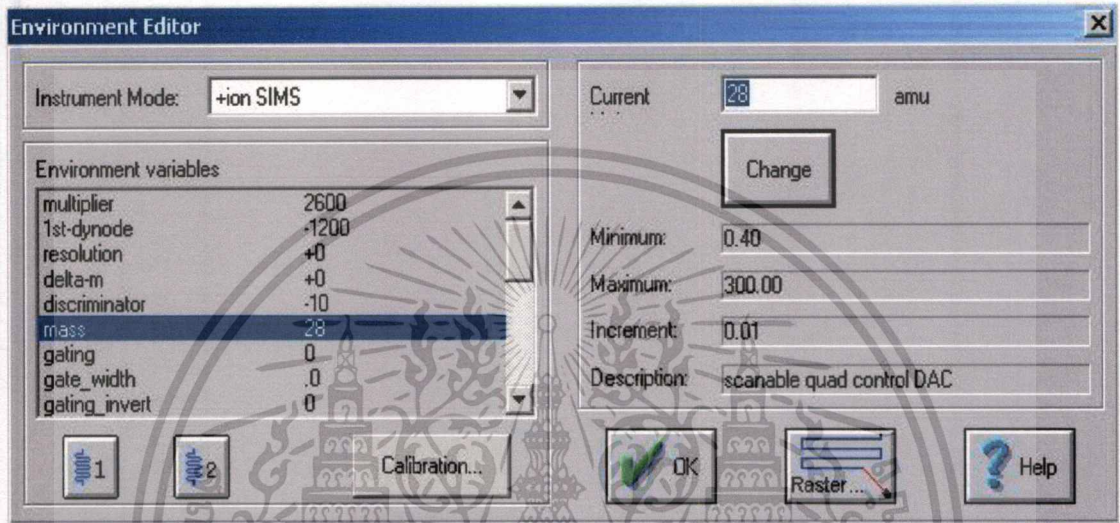
รูปที่ 4.9 หน้าต่างแสดงผลของการปรับพารามิเตอร์ cylinder



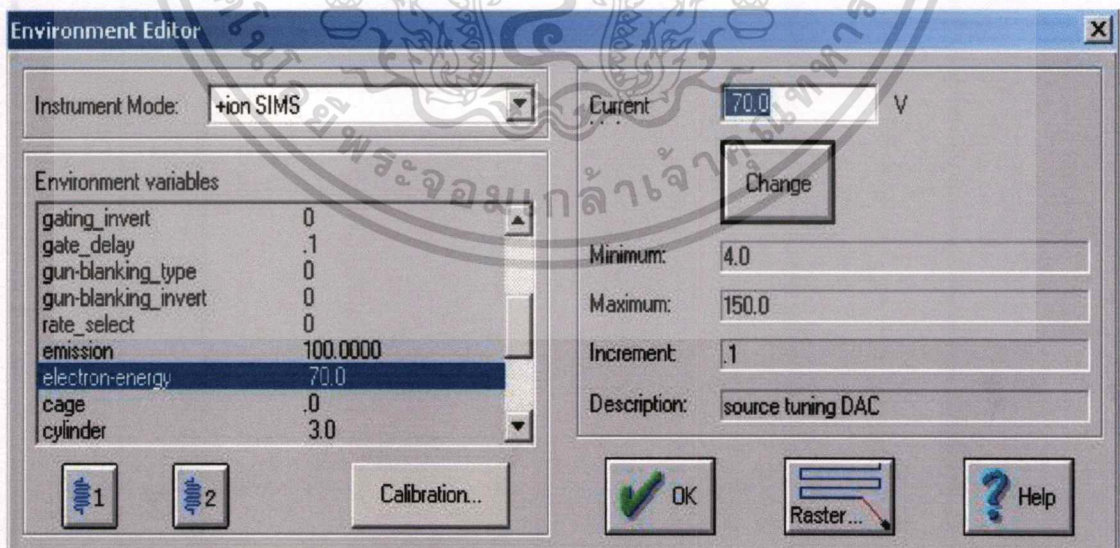
รูปที่ 4.10 หน้าต่างแสดงผลของการปรับพารามิเตอร์ electron-energy

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อกระบวนการปรับพารามิเตอร์แบบอัตโนมัติเสร็จสิ้นแล้วจะพบว่า ค่าของพารามิเตอร์ที่ทำให้ได้สัญญาณการวัดของระบบวิเคราะห์ห้วงมวลมีค่าสูงสุดจะปรากฏในกรอบ Environment variables ของ Environment Editor ดังรูปที่ 4.11 ถึง 4.13 ตัวอย่างที่เห็นได้ชัด เช่น lens voltage และ energy มีค่า -8 V และ -2.20 V ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับค่าที่ให้สัญญาณสูงสุดในสเปกตรัมการปรับพารามิเตอร์สำหรับ lens และ energy ในรูปที่ 4.6 และ 4.8 ตามลำดับ

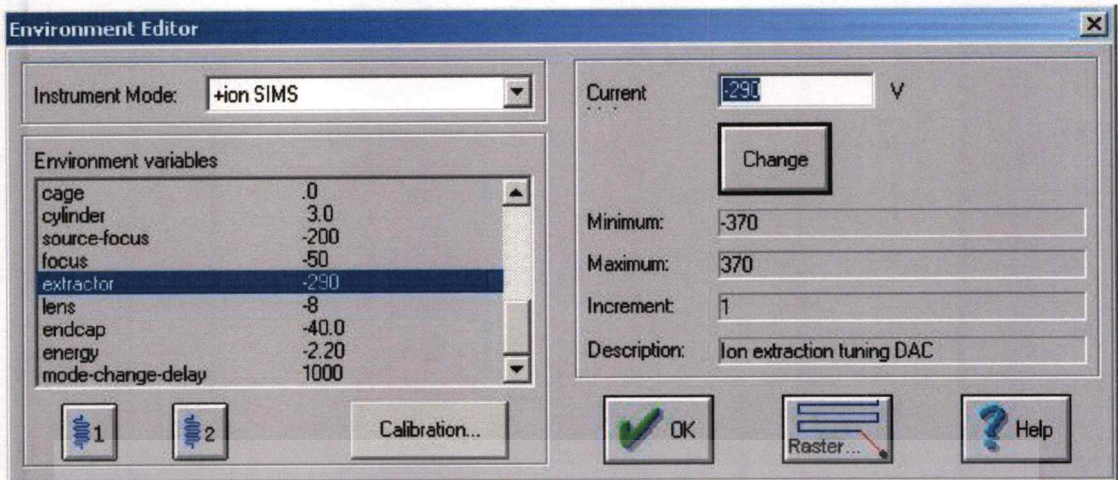


รูปที่ 4.11 Environment Editor แสดงค่าของตัวแปรที่ถูกปรับ



รูปที่ 4.12 Environment Editor แสดงค่าของตัวแปรที่ถูกปรับ (ต่อ)

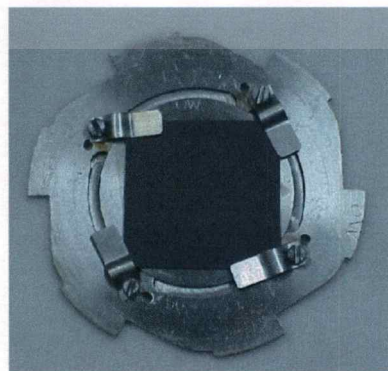
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 Environment Editor แสดงค่าของตัวแปรที่ถูกปรับ (ต่อ)

4.2 การศึกษาผลของมุมตกกระทบของลำไอออนปฐมภูมิ

การศึกษาผลของมุมตกกระทบของลำไอออนปฐมภูมิ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของมุมตกกระทบของลำไอออนปฐมภูมิต่อปริมาณการเกิดไอออนทุติยภูมิ เนื่องจากปริมาณของไอออนทุติยภูมิที่เกิดจากกระบวนการสปีดเตอริงนั้น นอกจากจะขึ้นกับพลังงานและความหนาแน่น(กระแส)ของไอออนปฐมภูมิที่ตกกระทบบนสารตัวอย่างแล้วยังขึ้นกับมุมตกกระทบด้วย ในการวิเคราะห์พื้นผิวด้วยเทคนิคการวิเคราะห์สเปกตรัมของมวลไอออนทุติยภูมิ ทั้งแบบสถิตและแบบไดนามิก ต้องอาศัยการเกิดไอออนทุติยภูมิด้วยกระบวนการ สปีดเตอริง เช่นกัน เมื่อพลังงานของไอออนปฐมภูมิถูกจำกัดที่ 3 keV และ 5 keV สำหรับการวิเคราะห์แบบสถิตและไดนามิก ตามลำดับ ดังนั้นความไวของระบบวัดซึ่งขึ้นกับปริมาณ ไอออนทุติยภูมิที่ได้รับจึงขึ้นกับมุมของลำไอออนปฐมภูมิที่ตกกระทบบนสารตัวอย่างด้วย ดังนั้นในการใช้งานจำเป็นต้องยิงลำไอออนปฐมภูมิใช้ตกกระทบบนสารตัวอย่างด้วยมุมที่เหมาะสม



รูปที่ 4.14 สารกึ่งตัวนำซิลิกอนชนิดพีติดตั้งบนแผ่นจับยึดสารตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ของระบบวิเคราะห์มวล

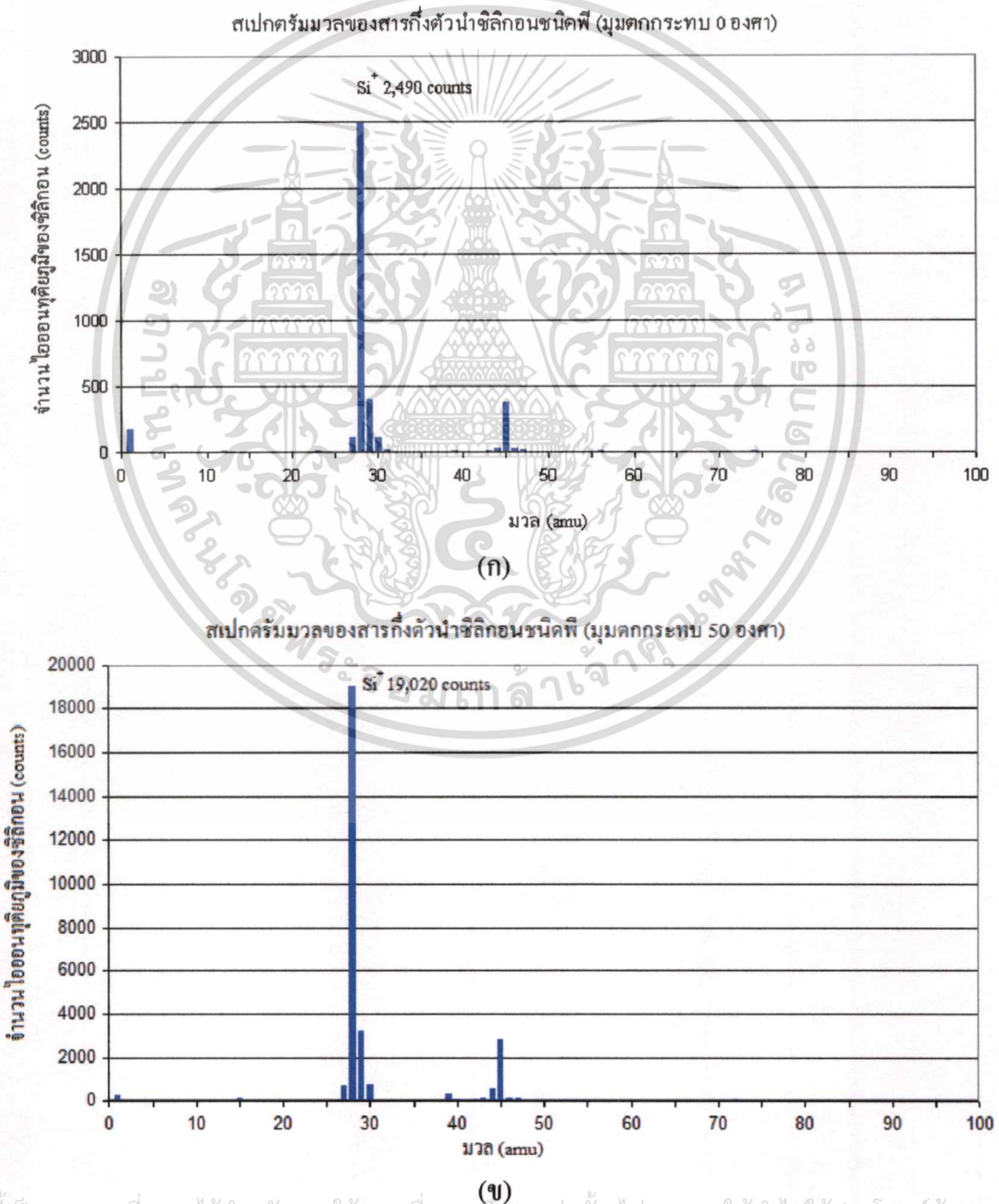
mode-change-delay	1000	ms	rate_select	0	(0=100K,1=10M c/s FSD)
energy	0.10	V	gun-blanking_invert	0	(0=normal, 1=invert)
endcap	-32.0	V	gun-blanking_type	0	(0=point, 1=raster)
lens	-363	V	gate_delay	0.1	μ S
extractor	-364	V	gating_invert	0	(0=normal, 1=invert)
focus	-35	V	gate_width	0	μ S
source-focus	-364	V	gating	0	(1=on, 0=off)
cylinder	-1.9	V	mass	28	amu
cage	0	V	discriminator	-10	%
electron-energy	82.1	V	delta-m	0	%
emission	100	μ A	resolution	0	%
multiplier	2600	V	1 st-dynode	-1200	V

ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์ของระบบควบคุมแหล่งกำเนิดไอออนปฐมภูมิ

Pressure main chamber	3.29×10^{-9}	mbar	X align	-2.3	V
Pressure main chamber *	2.50×10^{-8}	mbar	Y align	5.67	V
Pressure Ion Gun	2.30×10^{-9}	mbar	X DEF	0	V
Pressure Ion Gun *	2.10×10^{-5}	mbar	Y DEF	0	V
Focus 1	1.86	kV	Emission Current	10	mA
Focus 2	1.86	kV	Ion Energy	3	kV
Filament Current	3.0	A	Ion Current	0.06	μ A

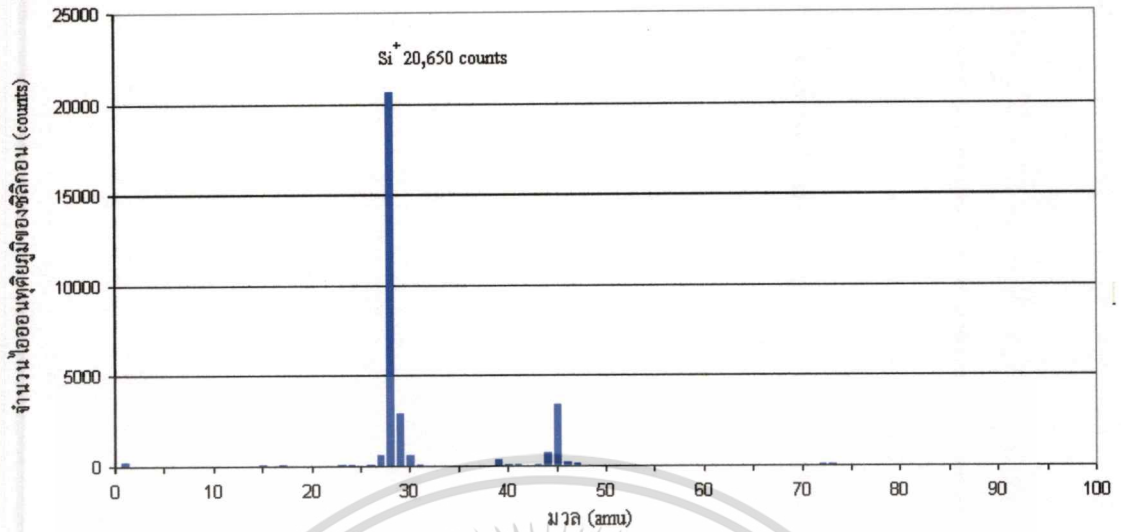
* หลังจากปล่อยก๊าซออกซิเจนเข้าสู่แหล่งกำเนิดไอออน

ในการทดลองนี้จะใช้ลำไอออนปฐมภูมิเป็นลำไอออนของออกซิเจน (O^+) พลังงาน 3 keV ที่ระดับกระแสไอออน 0.06 μA ยิงลงบนสารตัวอย่างซิลิกอนชนิดพี ที่ใช้โบรอนเป็นสารเจือ (Boron doped p-Type Silicon) ขนาด 1.5×1.5 cm มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 4.14 โดยยังทำมุมต่างๆ ดังนี้ 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60 และ 70 องศา วัดจากเส้นปกติ (surface normal) ทำการวัดสเปกตรัมมวลด้วยการวิเคราะห์สเปกตรัมของมวลไอออนทุติยภูมิแบบสถิต โดยกำหนดพารามิเตอร์ของระบบวิเคราะห์มวลและระบบควบคุมแหล่งกำเนิดไอออนปฐมภูมิดังตารางที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ ตัวอย่างผลการวัดสเปกตรัมมวลสำหรับมุมตกกระทบ 0, 50, 60 และ 70 องศา แสดงดังรูปที่ 4.15



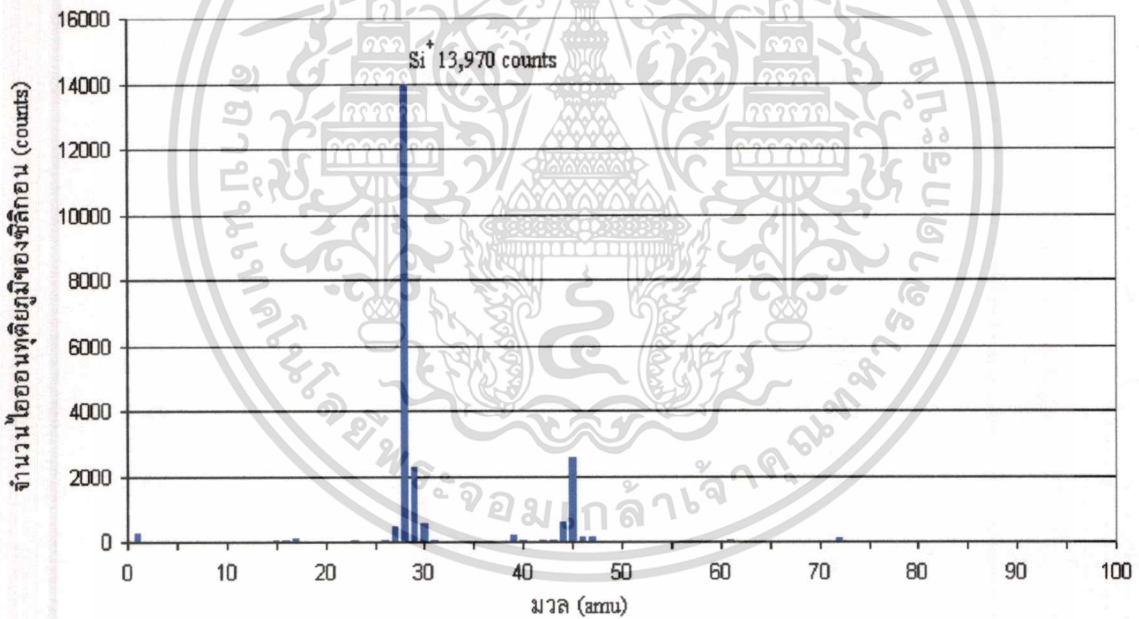
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สเปกตรัมมวลของสารกึ่งตัวนำซิลิกอนชนิดพี (มุมตกกระทบ 60 องศา)



(ค)

สเปกตรัมมวลของสารกึ่งตัวนำซิลิกอนชนิดพี (มุมตกกระทบ 70 องศา)



(ง)

รูปที่ 4.15 สเปกตรัมมวลของสารตัวอย่างซิลิกอนเมื่อลำไอออนปฐมภูมิตกกระทบทำมุม

- (ก) 0 องศา วัดจากเส้นปกติ (ข) 50 องศา วัดจากเส้นปกติ
(ค) 60 องศา วัดจากเส้นปกติ (ง) 70 องศา วัดจากเส้นปกติ

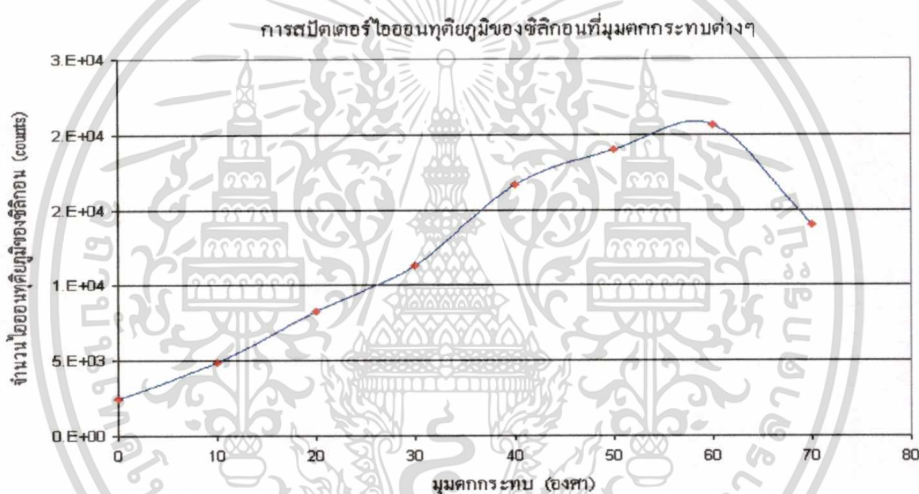
จากการทดลองพบว่าปริมาณของไอออนทุติยภูมิของซิลิกอนเมื่อลำไอออนปฐมภูมิตก

กระทบทำมุมต่าง ๆ มีค่าดังตารางที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ปริมาณของไอออนทุติยภูมิของซัลฟอนเมื่อลำไอออนปฐมภูมิตกกระทบบำมุ่มต่าง ๆ

มุมตกกระทบบ (องศา)	ปริมาณ ไอออนทุติยภูมิของซัลฟอน (counts)
0	2,490
10	4,870
20	8,260
30	11,300
40	16,670
50	19,020
60	20,650
70	13,970



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ ไอออนทุติยภูมิของซัลฟอนกับมุมตกกระทบบของลำไอออนปฐมภูมิ

เมื่อเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ ไอออนทุติยภูมิของซัลฟอนกับมุมตกกระทบบของลำไอออนปฐมภูมิ แสดงดังรูปที่ 4.16 จากผลการทดลองพบว่าปริมาณ ไอออนทุติยภูมิของซัลฟอนจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อลำไอออนปฐมภูมิทำมุมตกกระทบบเพิ่มขึ้น โดยมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 2,490 counts ที่มุม 0 องศา จนกระทั่งมีค่าสูงสุด 20,650 counts ที่มุม 60 องศา จากนั้นปริมาณ ไอออนทุติยภูมิของซัลฟอนจะมีค่าลดลง โดยมีค่า 13,970 counts ที่มุม 70 องศา

จากการทดลองสรุปได้ว่า ในการวิเคราะห์สเปกตรัมของมวลไอออนทุติยภูมินั้นจำนวน ไอออนทุติยภูมิที่เกิดขึ้นจากพื้นผิวสารตัวอย่างเมื่อถูกยิงด้วยลำไอออน มีค่าขึ้นอยู่กับมุมตกกระทบบของลำไอออนปฐมภูมิ มุมตกกระทบบที่ทำให้เกิดไอออนทุติยภูมิมากที่สุด คือมุม 60 องศา ผลการทดลองที่ได้นี้จะ ใช้เป็นข้อมูลสำหรับการจัดระบบสำหรับการวัดในการทดลองตอนต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การวิเคราะห์พื้นผิวของสารตัวอย่าง

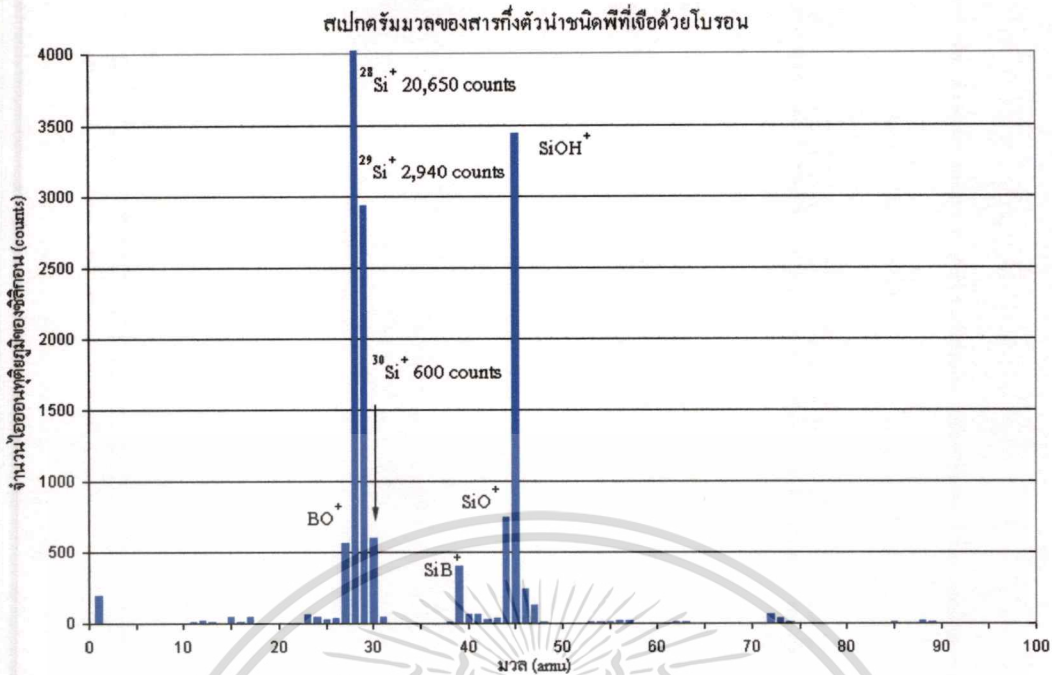
การวิเคราะห์พื้นผิวของสารตัวอย่าง มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาองค์ประกอบของพื้นผิวของสารตัวอย่างและวัดความหนาของฟิล์มบางโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์สเปกตรัมของมวลไอออนทุติยภูมิแบบสถิตและแบบไดนามิก ตามลำดับ โดยสารตัวอย่างที่ใช้ศึกษาองค์ประกอบของพื้นผิว ได้แก่ สารกึ่งตัวนำซิลิกอนชนิดพีและออลูมิเนียมฟอสฟอไรด์ ในส่วนของการศึกษาโครงสร้างเชิงลึกและการวัดความหนาของฟิล์มบางจะใช้ สารกึ่งตัวนำซิลิกอนชนิดพีซึ่งเคลือบด้วยออลูมิเนียมที่มีความหนาแตกต่างกัน 2 ตัวอย่าง และสารกึ่งตัวนำซิลิกอนชนิดพีซึ่งเคลือบด้วยอินเดียมทินออกไซด์ เป็นสารตัวอย่าง ในการทดลองจะใช้ลำไอออนของออกซิเจนเป็นลำไอออนปฐมภูมิ พลังงาน 3 keV และ 5 keV สำหรับการวิเคราะห์แบบสถิตและแบบไดนามิก ตามลำดับ โดยทำการทดลองดังนี้

4.3.1 สารกึ่งตัวนำซิลิกอนชนิดพี

ซิลิกอนเวเฟอร์ (silicon wafer) เป็นสารกึ่งตัวนำที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์และความสะอาดของเวเฟอร์ก็เป็นหัวใจสำคัญในกระบวนการการผลิต การตรวจสอบความสะอาดด้วยเทคนิคการวิเคราะห์สเปกตรัมของมวลไอออนทุติยภูมิแบบสถิตก็เป็นวิธีหนึ่งที่ยอมรับใช้กันโดยทั่วไป ในการทดลองนี้เป็นการศึกษาวิธีการตรวจวัดสิ่งเจือปนหรือองค์ประกอบของธาตุบนพื้นผิวของแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์สเปกตรัมของมวลไอออนทุติยภูมิแบบสถิต โดยใช้สารกึ่งตัวนำซิลิกอนชนิดพีซึ่งมีโบรอนเป็นสารเจือ เป็นสารตัวอย่าง

ในการทดลองนี้จะใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดลองเรื่อง การศึกษาผลของมุมตกกระทบของไอออนปฐมภูมิ ในหัวข้อ 4.2 ซึ่งเป็นการวัดสเปกตรัมของมวลไอออนทุติยภูมิแบบสถิตของสารตัวอย่าง คือสารกึ่งตัวนำซิลิกอนชนิดพีซึ่งมีโบรอนเป็นสารเจือ โดยจะนำสเปกตรัมมวลในรูปที่ 4.15(ค) มาวิเคราะห์ เมื่อนำสเปกตรัมมวลในรูปที่ 4.15(ค) มาขยายสเกลเพื่อให้เห็นรายละเอียดของไอออนทุติยภูมิที่มีปริมาณน้อยๆ จะได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.17 จากรูป จะเห็นไอโซโทปทั้ง 3 ของซิลิกอนคือ ^{28}Si , ^{29}Si , และ ^{30}Si โดยการคำนวณสัดส่วนของไอโซโทปทั้ง 3 เป็นเปอร์เซ็นต์จะได้ค่าดังนี้ ^{28}Si : 85.4 %, ^{29}Si : 12.2 % และ ^{30}Si : 2.5 % เมื่อเทียบกับค่า natural abundance of isotope ที่ยอมรับคือ ^{28}Si : 92.2 %, ^{29}Si : 4.7 % และ ^{30}Si : 3.1 % (ข้อมูลจาก CRC Handbook of Chemistry and Physics, Boca Raton, FL : CRC Press, c2004) พบว่าต่างกันเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจาก ผลการวัดที่ถูกต้องจะต้องเป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากการวัดสารตัวอย่างจำนวนที่มากพอ และสารตัวอย่างจะต้องมาจากหลายแหล่ง แต่การทดลองนี้ทำการวัดสารตัวอย่างเพียงชิ้นเดียวทำให้ค่าที่ได้แตกต่างกันไปบ้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



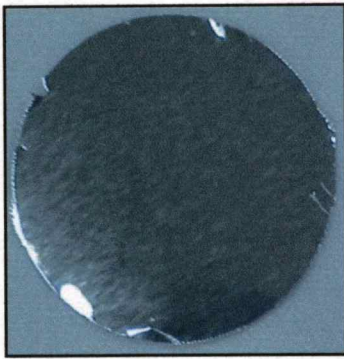
รูปที่ 4.17 สเปกตรัมมวลของสารกึ่งตัวนำชนิดพีที่มีโบรอนเป็นสารเจือ (นำรูปที่ 4.15(ค) มาขยายสเกลให้เห็นรายละเอียดมากขึ้น)

จากสเปกตรัมมวลแสดงให้เห็นว่าแทบจะไม่พบโบรอน (^{11}B) ในรูปของธาตุเดี่ยว ๆ เลย แต่จะพบในรูปของสารประกอบ BO และ SiB มากกว่า การวัดปริมาณสารเจือ (โบรอน) ในสารกึ่งตัวนำในการทดลองนี้ทำได้ค่อนข้างยาก เนื่องจากปริมาณสารเจือจะน้อยมากเมื่อเทียบกับความหนาแน่นของซิลิกอน ปริมาณไอออนทุติยภูมิของ B จึงต่ำมาก ทำให้ไม่สามารถทำการปรับพารามิเตอร์ของระบบวิเคราะห์มวลแบบอัตโนมัติสำหรับมวลของโบรอนได้ นอกจากนี้ยังพบ H รวมทั้งสารประกอบ SiO และ SiOH ปรากฏในสเปกตรัมมวลด้วย แสดงว่าพื้นผิวมีความชื้นและมีออกไซด์อยู่บ้าง

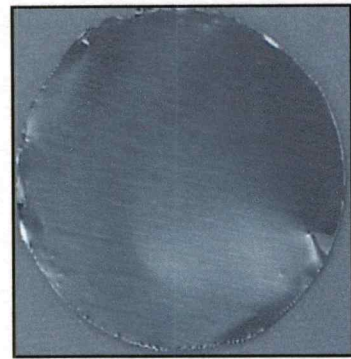
4.3.2 อลูมิเนียมฟอยล์

การทดลองต่อไปนี้เป็นการใช้ระบบวิเคราะห์สเปกตรัมของมวลไอออนทุติยภูมิทั้งแบบสถิตและแบบไดนามิก ในการศึกษาสิ่งปนเปื้อนบนพื้นผิวและที่ความลึกใต้พื้นผิวของสารตัวอย่าง โดยสารตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ ได้แก่ อลูมิเนียมฟอยล์ (Aluminum Foil) โดยในการทดลองนี้จะทำการวัดองค์ประกอบและสิ่งเจือปนบนพื้นผิวของสารตัวอย่างอลูมิเนียมฟอยล์ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์สเปกตรัมของมวลไอออนทุติยภูมิแบบสถิตและทำการศึกษาร่องรอยองค์ประกอบและสิ่งเจือปนที่ความลึกใต้พื้นผิว (depth profile) ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์สเปกตรัมของมวลไอออนทุติยภูมิแบบไดนามิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.18 ลักษณะของแผ่นนิกเกิลเคลือบฟอสฟอรัสที่ใช้ในการทดลอง
(ก) ด้านหน้า (ด้านเงา) (ข) ด้านหลัง (ด้านหยาบ)

การศึกษารสด้วยเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์จะทำการทั้งสองด้าน ลักษณะของแผ่นนิกเกิลเคลือบฟอสฟอรัสที่ใช้ในการทดลองทั้งด้านหน้าและด้านหลังแสดงดังรูป 4.18 ในที่นี้ด้านหน้าคือด้านที่มีลักษณะเงาส່วนด้านหลังคือด้านที่มีลักษณะหยาบ การทดลองจะใช้ลำไอออนปรอทเป็น O^+ ที่พลังงาน 3 keV สำหรับการวิเคราะห์แบบสถิตและ พลังงาน 5 keV สำหรับการวิเคราะห์แบบไดนามิก จัดตำแหน่งของสารตัวอย่างให้เส้นปกติเฉียงทำมุม 60 องศากับลำไอออน

4.3.2.1 การวิเคราะห์แบบสถิต

กำหนดพารามิเตอร์ของระบบวิเคราะห์มวลและระบบควบคุมแหล่งกำเนิดไอออน ดังตารางที่ 4.4 และ 4.5 ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์แบบสถิต ได้สเปกตรัมมวลของนิกเกิลเคลือบฟอสฟอรัสทั้งด้านหน้าและด้านหลังแสดงดังรูปที่ 4.19 (ก) และ 4.20 (ก) โดยขยายสเกลให้เห็นมวลที่มีปริมาณไอออนน้อย ๆ ดังรูปที่ 4.19 (ข) และ 4.20 (ข) จากสเปกตรัมมวลในรูปที่ 4.19 และ 4.20 พบว่านอกจากนิกเกิลแล้ว บนพื้นผิวของแผ่นนิกเกิลเคลือบฟอสฟอรัสยังประกอบด้วยสารประกอบของนิกเกิล เช่น AIC (มวล = 39), AIN (มวล = 41), AIO (มวล = 43) และ AIOH (มวล = 44) เป็นต้น นอกจากนี้ยังพบสิ่งเจือปนอื่น ๆ เช่น Mg (มวล = 24) เป็นต้น นอกจากนี้ยังพบว่า สารประกอบของนิกเกิลที่ผิวด้านหลัง (ด้านหยาบ) ซึ่งได้แก่ AIC, AIN, AIO และ AIOH จะมีปริมาณน้อยกว่าผิวด้านหน้า แสดงว่าผิวด้านหลังมีความสะอาดมากกว่า เป็นไปได้ว่าอาจเกิดจากวิธีการจัดเก็บโดยการม้วนซึ่งผิวด้านเรียบเงา (ด้านหน้า) จะอยู่ด้านนอกทำให้สัมผัสกับสิ่งแวดล้อมมากกว่า ดังนั้นจึงเหมาะที่จะใช้ห่ออาหารหรือวัตถุที่ต้องการปกป้องจากสิ่งสกปรกโดยให้ผิวด้านหลัง (ด้านหยาบ) สัมผัสกับอาหารหรือวัตถุ

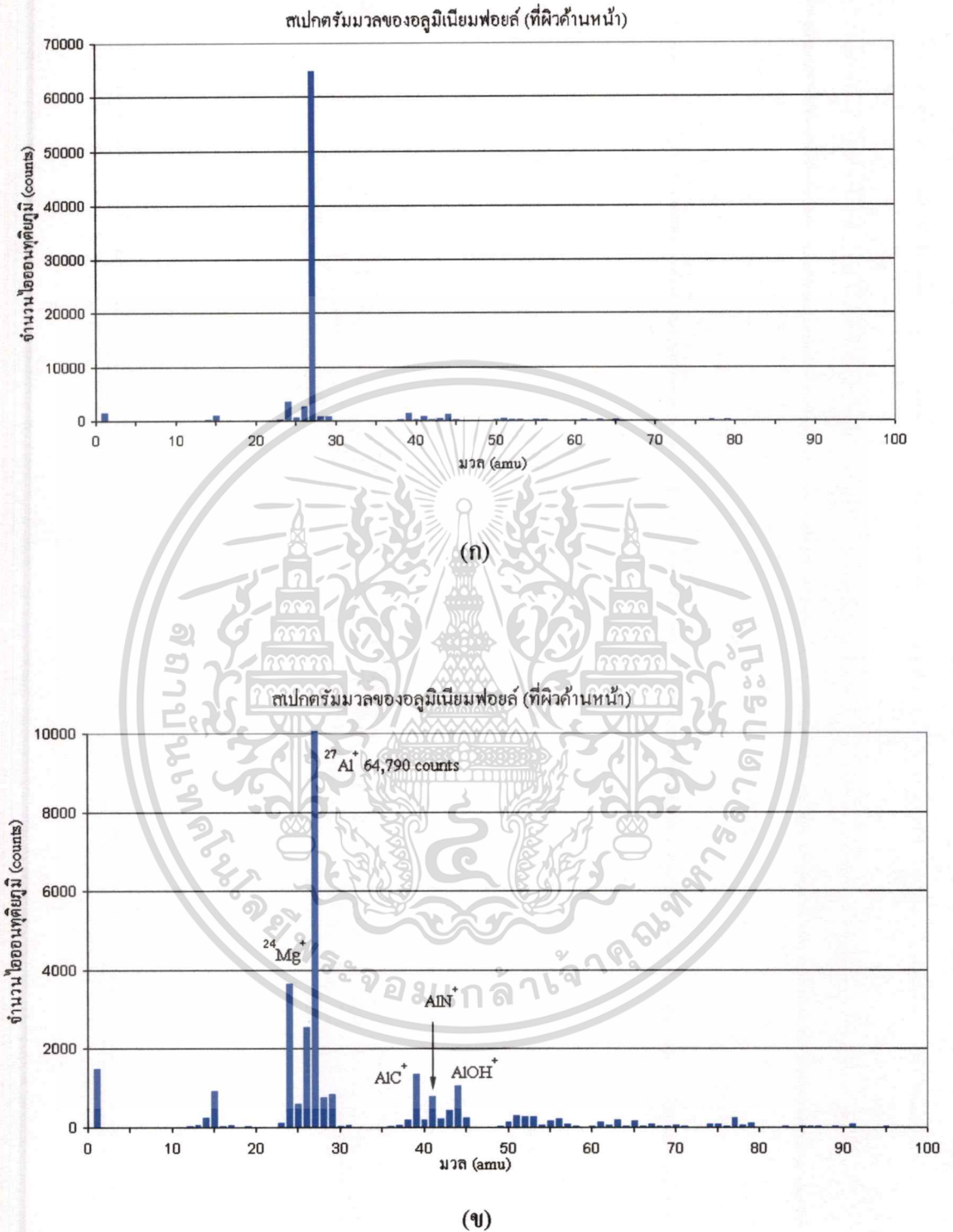
ตารางที่ 4.4 พารามิเตอร์สำหรับระบบวิเคราะห์มวล

mode- change-delay	1000 ms	rate_select	0 (0=100K,1=10M c/s FSD)
energy	0 V	gun-blanking_invert	0 (0=normal, 1=invert)
endcap	-30.3 V	gun-blanking_type	0 (0=point, 1=raster)
lens	-364 V	gate_delay	0.1 μ S
extractor	-239 V	gating_invert	0 (0=normal, 1=invert)
focus	-28 V	gate_width	0 μ S
source-focus	-356 V	gating	0 (1=on, 0=off)
cylinder	0.9 V	mass	27 amu
cage	0 V	discriminator	-10 %
electron-energy	118.4 V	delta-m	0 %
emission	-100 μ A	resolution	0 %
multiplier	2600 V	1 st-dynode	-1200 V

ตารางที่ 4.5 พารามิเตอร์สำหรับระบบควบคุมแหล่งกำเนิดลำไอออน

Pressure main chamber	3.02×10^{-9} mbar	X align	-2.71 V
Pressure main chamber *	2.55×10^{-8} mbar	Y align	5.66 V
Pressure Ion Gun	2.20×10^{-9} mbar	X DEF	0 V
Pressure Ion Gun *	2.05×10^{-5} mbar	Y DEF	0 V
Focus 1	1.85 kV	Emission Current	10 mA
Focus 2	1.85 kV	Ion Energy	3 kV
Filament Current	3.0 A	Ion Current	0.07 μ A

* หลังจากปล่อยก๊าซออกซิเจนเข้าสู่แหล่งกำเนิดไอออน

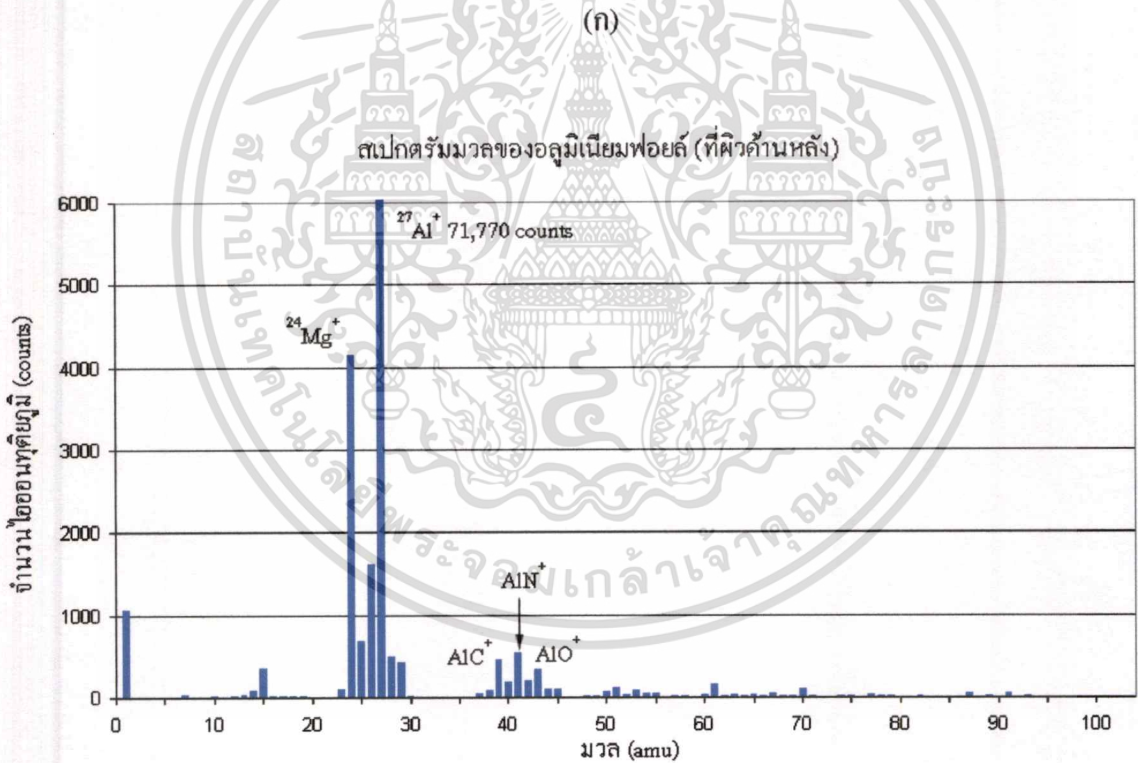
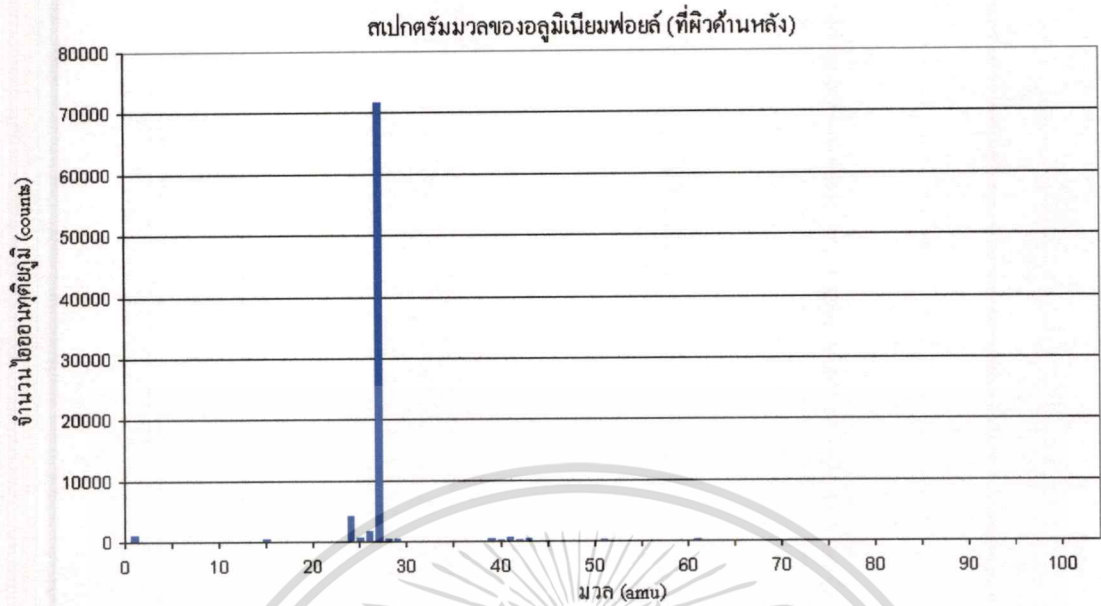


รูปที่ 4.19 สเปกตรัมมวลของอลูมิเนียมฟอยล์ที่ผิวด้านหน้า

(ก) แสดงสเกลสูงสุดที่ 70000 count

(ข) แสดงสเกลสูงสุดที่ 10000 count

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)

รูปที่ 4.20 สเปกตรัมมวลของอลูมิเนียมฟอยล์ที่ผิวด้านหลัง

(ก) แสดงสเกลสูงสุดที่ 80000 count

(ข) แสดงสเกลสูงสุดที่ 6000 count

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

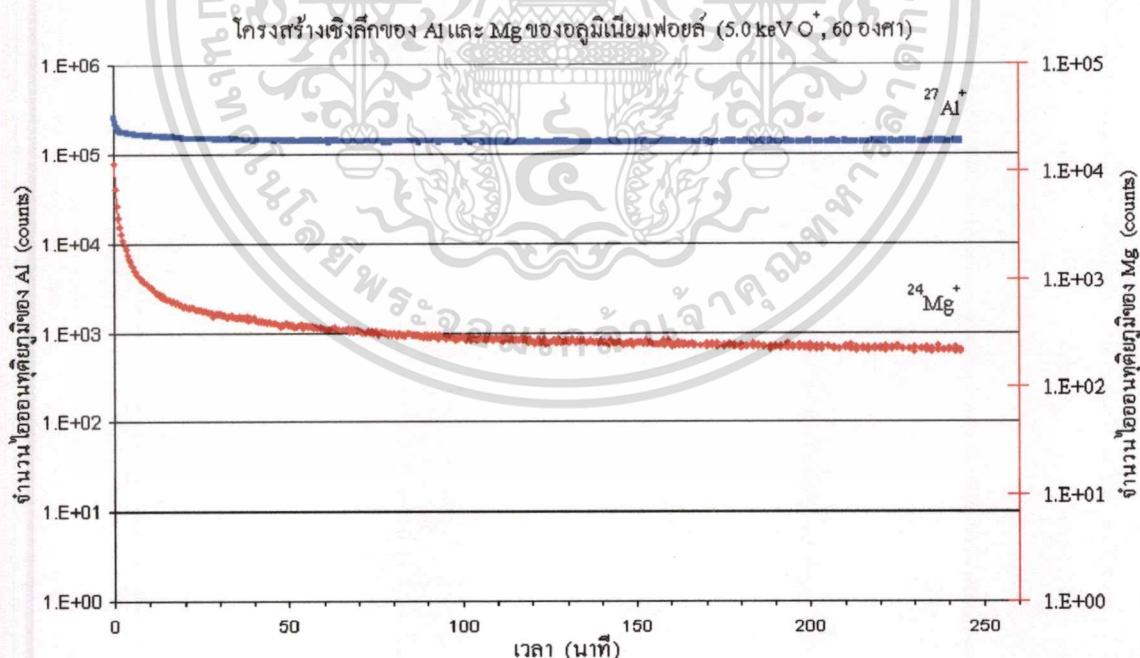
4.3.2.2 การวิเคราะห์แบบไดนามิก

กำหนดพารามิเตอร์ของระบบควบคุมแหล่งกำเนิดไอออน ดังตารางที่ 4.6 (พารามิเตอร์ของระบบวิเคราะห์มวลยังคงใช้เหมือนกรณีการวิเคราะห์แบบสถิต)

ตารางที่ 4.6 พารามิเตอร์สำหรับระบบควบคุมแหล่งกำเนิดไอออน

Pressure main chamber	3.28×10^{-9} mbar	X align	-2.71 V
Pressure main chamber *	3.70×10^{-8} mbar	Y align	5.66 V
Pressure Ion Gun	4.4×10^{-9} mbar	X DEF	0 V
Pressure Ion Gun *	3.13×10^{-5} mbar	Y DEF	0 V
Focus 1	3.06 kV	Emission Current	10 mA
Focus 2	3.07 kV	Ion Energy	5 kV
Filament Current	3.04 A	Ion Current	0.7 μ A

* หลังจากปล่อยก๊าซออกซิเจนเข้าสู่แหล่งกำเนิดไอออน



รูปที่ 4.21 โครงสร้างเชิงลึกของ Al และ Mg ของอลูมิเนียมฟอยล์ด้านหน้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการวิเคราะห์สเปกตรัมของมวล ไอออนทุติยภูมิแบบไดนามิกของออลูมิเนียมพอยล์ที่ด้านหน้า จะได้โครงสร้างเชิงลึกของออลูมิเนียมและแมกนีเซียม แสดงดังรูปที่ 4.21 (โครงสร้างเชิงลึกที่ด้านหลังของออลูมิเนียมพอยล์จะมีลักษณะคล้ายกัน)

จากผลการทดลองพบว่า ที่พื้นผิวของแผ่นออลูมิเนียมพอยล์ที่ใช้ในการทดลองนี้มีสิ่งเจือปนอื่น ๆ อยู่บาง เช่น Mg เป็นต้น สิ่งเจือปนเหล่านี้อาจมีมาตั้งแต่กระบวนการการผลิตหรืออาจเกิดขึ้นในภายหลังจากการปนเปื้อนของสิ่งแวดล้อมในธรรมชาติก็เป็นได้ จากการวัดโครงสร้างเชิงลึก พบว่าสิ่งเจือปนเหล่านี้ (เช่น Mg) จะมีอยู่ที่บริเวณพื้นผิวและลดลงอย่างรวดเร็วภายใต้พื้นผิวสังเกตได้จากการที่ไอออนทุติยภูมิของ Mg มีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว ในขณะที่ไอออนทุติยภูมิของ Al จะมีค่าคงที่ จากโครงสร้างเชิงลึก จะดูเหมือนว่า Mg อยู่ลึกกลงไปในพื้นผิวของออลูมิเนียมพอยล์มากพอสมควร ซึ่งในความเป็นจริงแล้วไม่เป็นเช่นนั้น แต่การที่ผลการวัดปรากฏเช่นนั้น เนื่องจากอะตอมของ Mg บางส่วนถูกไอออนของออกซิเจนกระแทกให้ฝังลึกกลงไปภายใต้พื้นผิวในขณะที่ทำการวัดโครงสร้างเชิงลึกนั่นเอง

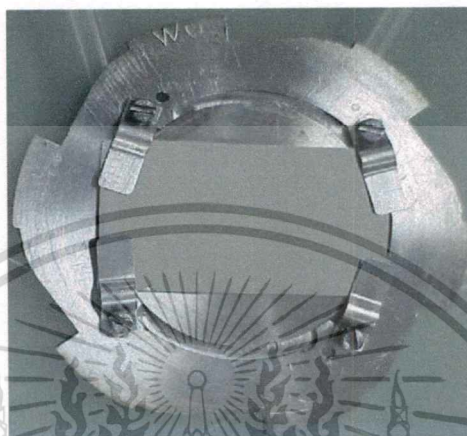
ในส่วนของสารประกอบของออลูมิเนียม เช่น AlN, AlO และ AlOH นั้น น่าจะเกิดขึ้นภายหลังเนื่องจากการทำปฏิกิริยาเคมีกับอากาศ นอกจากนี้จากการวิเคราะห์แบบสถิติ ยังพบว่า H (มวล = 1) ที่ผิวของแผ่นออลูมิเนียมพอยล์อีกด้วย ซึ่งน่าจะเกิดจากความชื้นเนื่องจากไอน้ำบนพื้นผิว แต่จากผลการวัดแทบจะไม่พบมวลของน้ำ (H_2O , มวล = 18) และออกซิเจน (O หรือ O_2 , มวล = 16 หรือ 32) แสดงว่าเมื่อโมเลกุลของน้ำถูกชนด้วยไอออนปฐมภูมิจะแตกตัวเป็นไอออนของไฮโดรเจนและออกซิเจน แต่เนื่องจากออกซิเจนมีความไวต่อปฏิกิริยาเคมีจึงไม่สามารถตรวจพบไอออนของออกซิเจน แต่จะพบในรูปของออกไซด์และไฮดรอกไซด์ เช่น AlO^+ และ $AlOH^+$ มากกว่า นอกจากนี้ออกซิเจนยังมีแนวโน้มที่จะเป็นไอออนลบมากกว่าไอออนบวกและการทดลองนี้ตั้งคาระบบวิเคราะห์มวลในโหมดการวัดไอออนบวกจึงไม่สามารถตรวจวัด O^- และ O_2^- จากการทดลองนี้ได้

4.3.3 ฟิล์มบางออลูมิเนียมบนสารกึ่งตัวนำซิลิกอน (ตัวอย่างที่ 1)

ระบบวิเคราะห์สเปกตรัมของมวล ไอออนทุติยภูมิเป็นระบบที่สามารถใช้ศึกษาฟิล์มบางได้ดี กล่าวคือนอกจากจะใช้ศึกษาองค์ประกอบของฟิล์มที่ปลูกขึ้นแล้วยังสามารถศึกษาเพื่อหาสิ่งปนเปื้อนที่อาจเกิดขึ้นในขณะที่ปลูกฟิล์มได้โดยใช้การวิเคราะห์แบบสถิติ นอกจากนี้ยังสามารถใช้วัดความหนาของฟิล์มได้โดยใช้การวิเคราะห์แบบไดนามิกอีกด้วย ในการทดลองต่อไปนี้เป็นการศึกษาฟิล์มบางของออลูมิเนียมบนแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาองค์ประกอบและสิ่งปนเปื้อนของฟิล์มบางออลูมิเนียมบนแผ่นซิลิกอนและวัดความหนาของฟิล์มบางออลูมิเนียม

4.3.3.1 การวิเคราะห์แบบสถิต

ฟิล์มบางของอลูมิเนียมบนสารกึ่งตัวนำซิลิกอน (ตัวอย่างที่ 1) ขนาด 2.0 x 1.5 เซนติเมตร ปลูกด้วยเทคนิคการระเหยด้วยความร้อน(thermal evaporation) ที่ความหนา 100 นาโนเมตร ตามขั้นตอนที่กล่าวในหัวข้อ 3.6 มีลักษณะดังรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.22 ฟิล์มบางของอลูมิเนียมบนสารกึ่งตัวนำซิลิกอน (ตัวอย่างที่ 1) ติดตั้งบนแผ่นจับยึดสารตัวอย่าง

จัดตำแหน่งสารตัวอย่างให้เส้นปกติทำมุม 30 องศากับลำไอออน ทำการวิเคราะห์โดยใช้ไอออนของออกซิเจนเป็นลำไอออนปฐมภูมิ ที่พลังงาน 3 keV ระดับกระแสไอออน 0.06 μA กำหนดพารามิเตอร์ของระบบวิเคราะห์มวลและระบบควบคุมแหล่งกำเนิดไอออน ดังตารางที่ 4.7 และ 4.8 ตามลำดับ สเปกตรัมมวลของฟิล์มบางของอลูมิเนียมบนสารกึ่งตัวนำซิลิกอน(ตัวอย่างที่ 1) แสดงดังรูปที่ 4.23

ตารางที่ 4.7 พารามิเตอร์ของระบบวิเคราะห์มวล

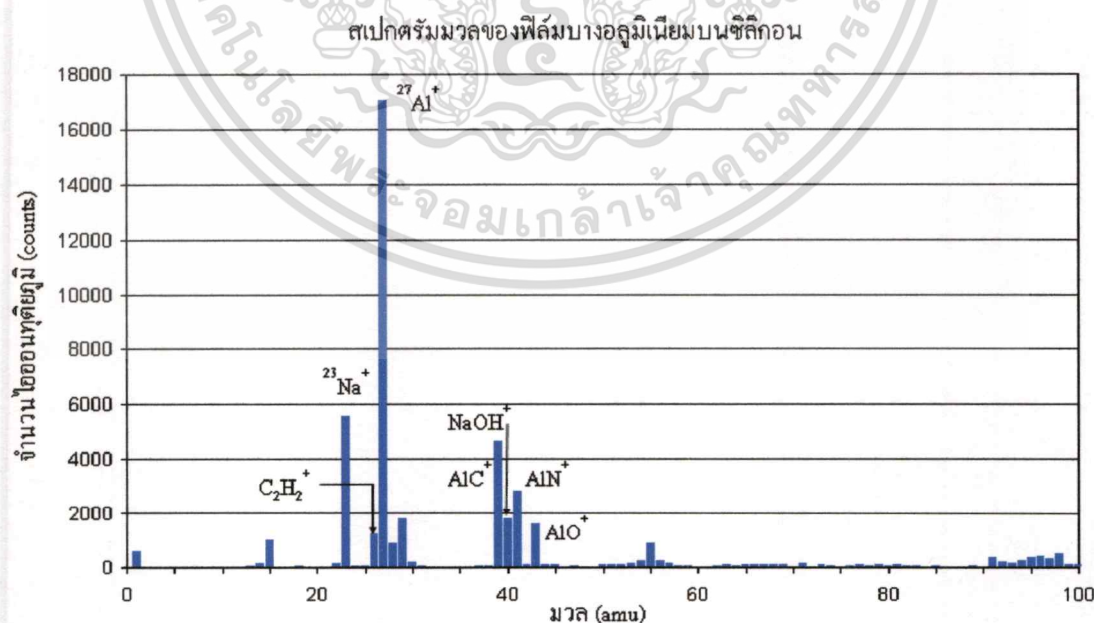
mode- change-delay	1000 ms	rate_select	0 (0=100K,1=10M c/s FSD)
energy	0 V	gun-blanking_invert	0 (0=normal, 1=invert)
endcap	-30.3 V	gun-blanking_type	0 (0=point, 1=raster)
lens	-364 V	gate_delay	0.1 μS
extractor	-239 V	gating_invert	0 (0=normal, 1=invert)
focus	-28 V	gate_width	0 μS
source-focus	-356 V	gating	0 (1=on, 0=off)

cylinder	0.9 V	mass	27 amu
cage	0 V	discriminator	-10 %
electron-energy	118.4 V	delta-m	0 %
emission	100 μ A	resolution	0 %
multiplier	2600 V	1 st-dynode	-1200 V

ตารางที่ 4.8 พารามิเตอร์ของระบบควบคุมแหล่งกำเนิดไอออน

Pressure main chamber	7.03×10^{-9} mbar	X align	-2.66 V
Pressure main chamber*	1.53×10^{-8} mbar	Y align	6.16 V
Pressure Ion Gun	3.0×10^{-9} mbar	X DEF	0 V
Pressure Ion Gun *	1.03×10^{-5} mbar	Y DEF	0 V
Focus 1	1.87 kV	Emission Current	10 mA
Focus 2	1.95 kV	Ion Energy	3 kV
Filament Current	3.03 A	Ion Current	0.06 μ A

* หลังจากปล่อยก๊าซออกซิเจนเข้าสู่แหล่งกำเนิดไอออน



รูปที่ 4.23 สเปกตรัมมวลของฟิล์มบางอลูมิเนียมบนซิลิกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการวิเคราะห์สเปกตรัมของมวลไอออนทุติยภูมิแบบสถิตได้สเปกตรัมมวลของสารตัวอย่างฟิล์มบางของออลูมิเนียมบนซิลิกอนแสดงดังรูปที่ 4.23 จากสเปกตรัมมวล พบว่ามีสารประกอบของออลูมิเนียม เช่น AIC (มวล = 39) และ AIN (มวล = 41) อยู่ด้วย คาร์บอนและไนโตรเจนอาจเป็นสารปนเปื้อนเนื่องมาจากสิ่งแวดล้อม ในส่วนของโซเดียมและสารประกอบ NaOH รวมถึง C_2H_2 อาจเป็นสิ่งที่ตกค้างจากกระบวนการทำความสะอาด

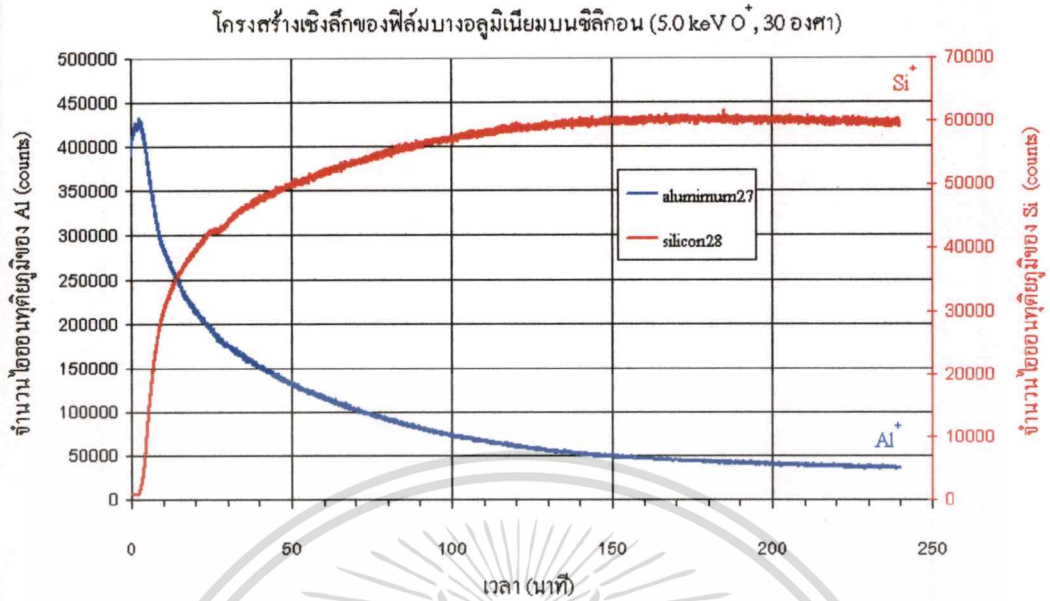
4.3.3.2 การวิเคราะห์แบบไดนามิก

จัดตำแหน่งสารตัวอย่างให้เส้นปกติทำมุม 30 องศากับลำไอออน ทำการวิเคราะห์โดยใช้ไอออนของออกซิเจนเป็นลำไอออนปฐมภูมิ ที่พลังงาน 5 keV ระดับกระแสไอออน 0.8 μA กำหนดพารามิเตอร์ของระบบควบคุมแหล่งกำเนิดไอออน ดังตารางที่ 4.9 (พารามิเตอร์ของระบบวิเคราะห์มวลยังใช้เหมือนกรณีการวิเคราะห์แบบสถิต) ผลการวิเคราะห์แบบไดนามิก จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไอออนทุติยภูมิที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาในการสปีดเตอร์ของฟิล์มบางของออลูมิเนียมบนสารกึ่งตัวนำซิลิกอน (ตัวอย่างที่ 1) แสดงดังรูปที่ 4.24

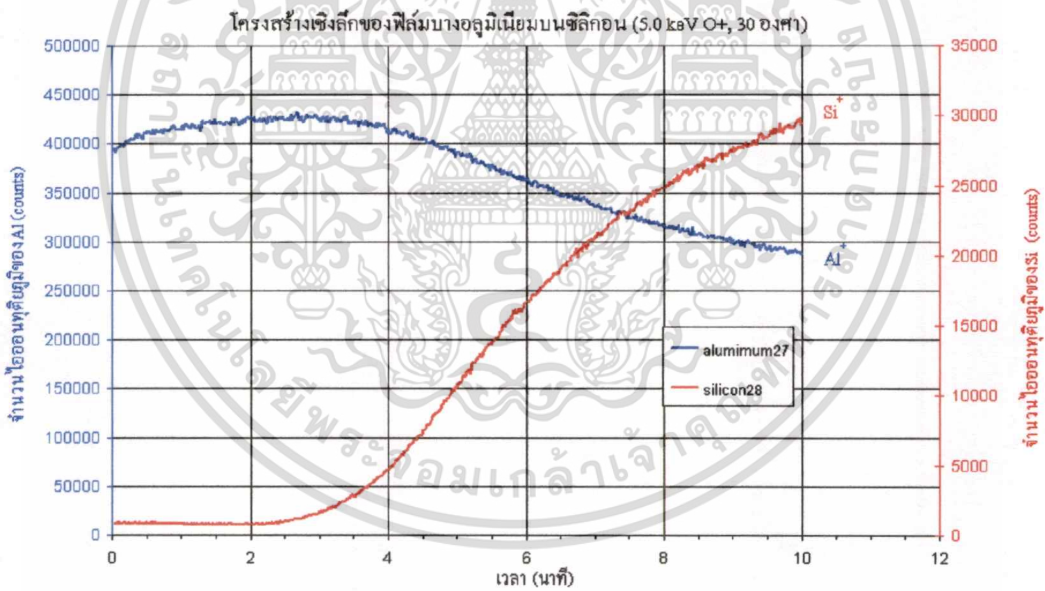
ตารางที่ 4.9 พารามิเตอร์ของระบบควบคุมแหล่งกำเนิดไอออน

Pressure main chamber	5.82×10^{-9} mbar	X align	-2.66 V
Pressure main chamber *	1.75×10^{-8} mbar	Y align	6.16 V
Pressure Ion Gun	2.30×10^{-9} mbar	X DEF	0 V
Pressure Ion Gun *	1.03×10^{-5} mbar	Y DEF	0 V
Focus 1	2.91 kV	Emission Current	10 mA
Focus 2	2.91 kV	Ion Energy	5 kV
Filament Current	3.04 A	Ion Current	0.8 μA

* หลังจากปล่อยก๊าซออกซิเจนเข้าสู่แหล่งกำเนิดไอออน



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไอออนทุติยภูมิ Al และ Si ของฟิล์มบางอลูมิเนียมบนซิลิกอนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา
 (ก) แสดงสเกลเวลาถึง 250 นาที
 (ข) แสดงสเกลเวลาถึง 12 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการวิเคราะห์แบบไดนามิกในรูปที่ 4.24(ก) เป็นผลจากการวัดเป็นเวลาทั้งสิ้น 240 นาที เพื่อให้เห็นสัญญาณในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงได้ง่ายขึ้น จึงแสดงผลการวัดในช่วง 10 นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.24(ข) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปริมาณไอออนทุติยภูมิของอลูมิเนียมเริ่มมีค่าลดลงที่เวลาประมาณ 3 นาที ในขณะที่ปริมาณไอออนทุติยภูมิของซิลิกอนเริ่มเพิ่มขึ้น แสดงว่าเป็นช่วงรอยต่อระหว่างชั้นของฟิล์มบางอลูมิเนียมกับซิลิกอน ความหนาของฟิล์มบางอลูมิเนียมสามารถวัดได้โดยการสอบเทียบสเกลเวลาเป็นความลึก โดยการวัดความลึกของหลุมที่เกิดบนสารตัวอย่างด้วยเครื่องวัดโครงสร้างของพื้นผิว (Surface profilometer) แล้วจึงทำการคำนวณอัตราการสปีดเตอร์ในหน่วยนาโนเมตรต่อนาที ข้อมูลนี้จะทำให้สามารถคำนวณความลึกจากเวลาได้

วิธีการสอบเทียบสเกลเวลาเป็นความลึก จะถูกต้องภายใต้สมมุติฐานที่ว่าอัตราการสปีดเตอร์มีค่าคงที่ ซึ่งเป็นไปได้หรือมีความคลาดเคลื่อนน้อยถ้าสารตัวอย่างเป็นเนื้อเดียวกัน แต่ในกรณีของสารตัวอย่างฟิล์มบางอลูมิเนียมบนซิลิกอนแล้ว อัตราการสปีดเตอร์ของอลูมิเนียมอาจต่างจากซิลิกอนได้ เพื่อให้ได้ข้อมูลดังกล่าวจึงต้องทำการทดลองเพื่อวัดอัตราการสปีดเตอร์ของอลูมิเนียมเปรียบเทียบกับซิลิกอนดังนี้

4.3.3.3 การวัดอัตราการสปีดเตอร์

การวัดอัตราการสปีดเตอร์ของซิลิกอนและอลูมิเนียม ทำโดยการวิเคราะห์แบบไดนามิก โดยมีซิลิกอนและอลูมิเนียมเป็นสารตัวอย่าง โดยใช้ไอออนของออกซิเจนเป็นลำไอออนปฐมภูมิที่พลังงาน 5.0 keV ระดับกระแสไอออน 0.7 μA ทำการวิเคราะห์โดยจัดให้สารตัวอย่างทำมุม 0, 30 และ 60 องศา กับลำไอออนปฐมภูมิ (วัดเทียบกับเส้นปกติ) กำหนดพารามิเตอร์ของระบบวิเคราะห์มวลและระบบควบคุมแหล่งกำเนิดไอออน ดังตารางที่ 4.10 และ 4.11 ตามลำดับ จากนั้นจึงวัดความลึกของหลุมที่เกิดบนสารตัวอย่างด้วยเครื่องวัดโครงสร้างของพื้นผิว แล้วทำการคำนวณอัตราการสปีดเตอร์ในหน่วย นาโนเมตรต่อนาที

ตารางที่ 4.10 พารามิเตอร์ของระบบวิเคราะห์มวลสำหรับซิลิกอน

mode-change-delay	1000 ms	rate_select	0 (0=100K,1=10M c/s FSD)
energy	-0.3 V	gun-blanking_invert	0 (0=normal, 1=invert)
endcap	-95.7 V	gun-blanking_type	0 (0=point, 1=raster)
lens	-7 V	gate_delay	0.1 μS
extractor	-89 V	gating_invert	0 (0=normal, 1=invert)
focus	-62 V	gate_width	0 μS
source-focus	-255 V	gating	0 (1=on, 0=off)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

cylinder	-1.1 V	mass	28 amu
cage	0 V	discriminator	-10 %
electron-energy	138.7 V	delta-m	0 %
emission	100 μ A	resolution	0 %
multiplier	2600 V	1 st-dynode	-1200 V

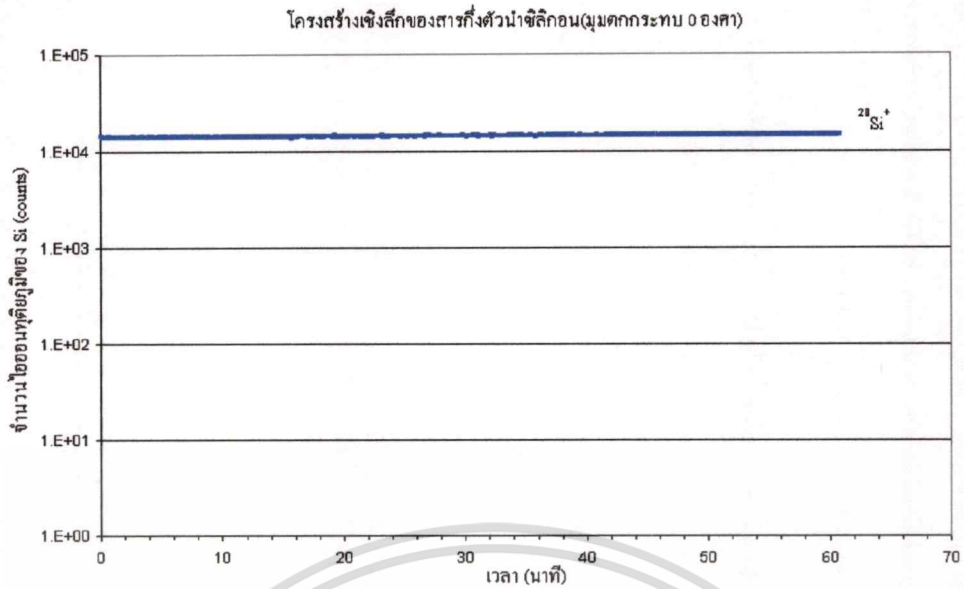
ตารางที่ 4.11 พารามิเตอร์ของระบบควบคุมแหล่งกำเนิดไอออน (ซีลิกอน/อลูมิเนียม)

Pressure main chamber	$2.64 \times 10^{-9} / 2.2 \times 10^{-9}$ mbar	X align	-3.05 V
Pressure main chamber *	$1.65 \times 10^{-8} / 1.78 \times 10^{-8}$ mbar	Y align	6.15 V
Pressure Ion Gun	$3.50 \times 10^{-9} / 2.0 \times 10^{-9}$ mbar	X DEF	0 V
Pressure Ion Gun *	$1.35 \times 10^{-5} / 1.28 \times 10^{-5}$ mbar	Y DEF	0 V
Focus 1	2.98/2.98 kV	Emission Current	10 mA
Focus 2	2.98/2.98 kV	Ion Energy	5.0 kV
Filament Current	2.92/2.90 A	Ion Current	0.7/0.7 μ A

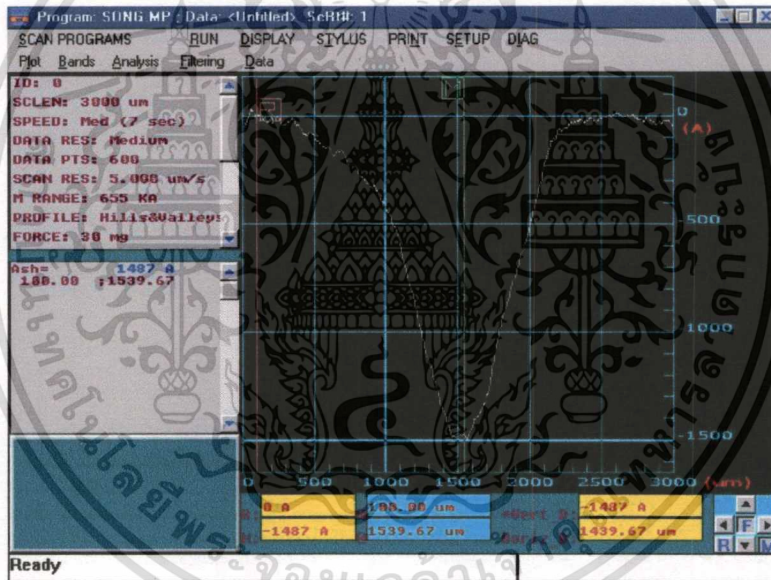
* หลังจากปล่อยก๊าซออกซิเจนเข้าสู่แหล่งกำเนิดไอออน

4.3.3.3.1 อัตราการสปีดเตอร์ของซีลิกอน

ในการวัดอัตราการสปีดเตอร์ของซีลิกอนจะใช้สารกึ่งตัวนำซีลิกอนชนิดพี ซึ่งมีโบรอนเป็นสารเจือปนเป็นสารตัวอย่าง ทำการวิเคราะห์แบบไดนามิกของมวลซีลิกอนที่มุม 0 องศา 4 ครั้ง ใช้เวลาในการวัดระหว่างประมาณ 60 – 90 นาที แล้วนำผลที่ได้มาคำนวณอัตราการสปีดเตอร์เฉลี่ย ตัวอย่างผลการวิเคราะห์แบบไดนามิกและหลุมที่เกิดจากการสปีดเตอร์ที่เวลา 60.8 นาที แสดงดังรูปที่ 4.25 และ 4.26 ตามลำดับ ผลการวัดอัตราการสปีดเตอร์ของซีลิกอน แสดงดังตารางที่ 4.12



รูปที่ 4.25 โครงสร้างเชิงลึกของซิลิกอน (มุมตกกระทบ 0 องศา) ในเวลา 60.8 นาที



รูปที่ 4.26 หลุมที่เกิดจากการสปีดเตอร์ด้วยลำไอออนที่มุม 0 องศาเป็นเวลา 60.8 นาที

ตารางที่ 4.12 อัตราการสปีดเตอร์ที่มุมตกกระทบ 0 องศา

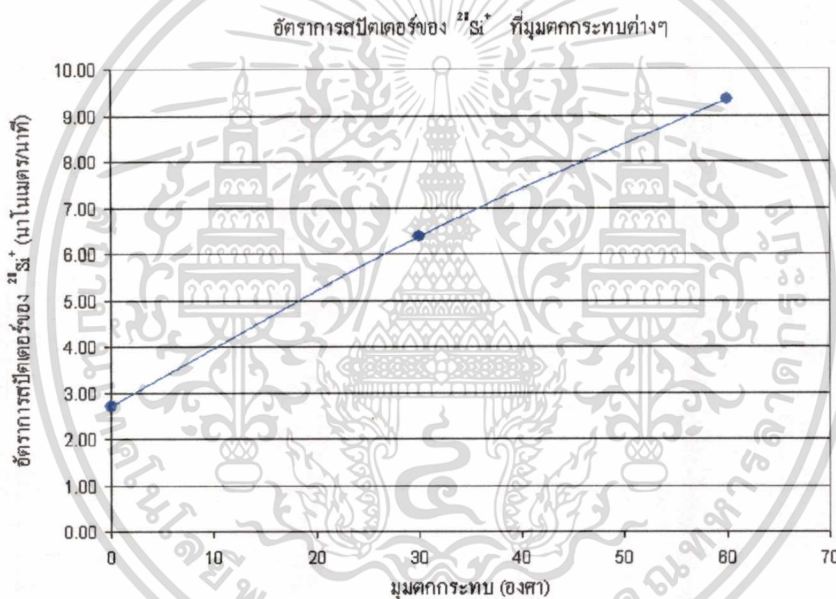
ครั้งที่	ความลึก (nm)	เวลา (นาที)	อัตราการสปีดเตอร์ (นาโนเมตรต่อนาที)
1	179.4	63.1	2.8
2	148.7	60.8	2.4
3	218.4	90.0	2.4
4	282.1	90.1	3.1
อัตราการสปีดเตอร์เฉลี่ย			2.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวชนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการวัดอัตราการสปีดเตอร์เฉลี่ยของซิกอนเมื่อลำไอออนปฐมภูมิตกกระทบทำมุม 0, 30 และ 60 องศา แสดงดังตารางที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสปีดเตอร์และมุมตกกระทบของลำไอออนปฐมภูมิ แสดงดังรูปที่ 4.27

ตารางที่ 4.13 อัตราการสปีดเตอร์เฉลี่ยของซิกอนที่มุมตกกระทบ 0, 30 และ 60 องศา

มุมตกกระทบ (องศา)	อัตราการสปีดเตอร์ (นาโนเมตรต่อนาที)
0	2.7
30	6.4
60	9.4



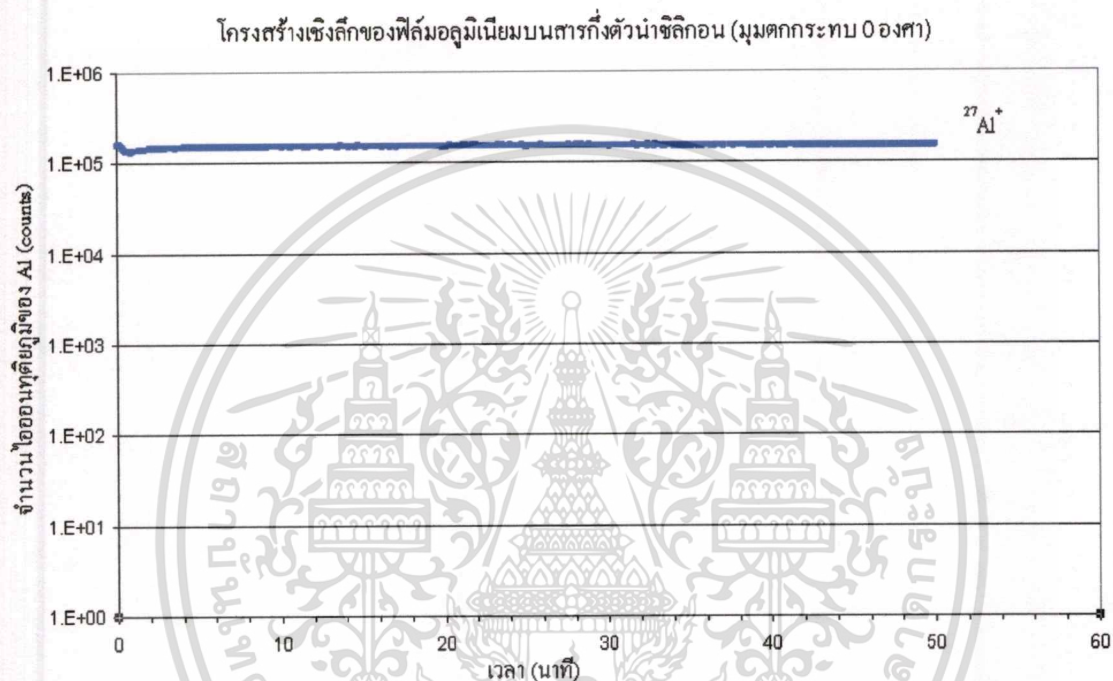
รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมตกกระทบและอัตราการสปีดเตอร์ของซิกอน

4.3.3.3.2 อัตราการสปีดเตอร์ของอูมิเนียม

การวัดอัตราการสปีดเตอร์ของอูมิเนียมจะใช้ฟิล์มของอูมิเนียมที่เคลือบอยู่บนสารกึ่งตัวนำซิกอนเป็นสารตัวอย่าง ทำการทดลองเช่นเดียวกับการหาอัตราการสปีดเตอร์ของซิกอน ในหัวข้อ 4.3.3.3.1 แต่ต้องควบคุมเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์แบบไดนามิกให้เหมาะสม เพื่อไม่ให้หลุมที่เกิดลึกกว่าความหนาของฟิล์มอูมิเนียม ตัวอย่างผลการวิเคราะห์แบบไดนามิกของมวลอูมิเนียมที่มุม 0 องศา เป็นเวลา 50 นาที แสดงดังรูปที่ 4.28 จากผลการวัดจะเห็นว่าปริมาณ

ไอออนทุติยภูมิของอูมิเนียมยังคงมีค่าคงที่ในช่วงเวลา 50 นาที แสดงว่าการสปีดเตอร์ยังอยู่ที่ชั้นเอกสารเป็นเอกสารที่ลงวนในสารสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญูญาดเหนาเปเซบระเยชนดานการค้ำไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของอลูมิเนียมเท่านั้น ส่วนการทดลองที่มุม 30 และ 60 องศา ต้องใช้เวลาในการวัดที่สั้นลง และสังเกตผลจากการวัดโครงสร้างเชิงลึกประกอบด้วย ผลการวัดอัตราการสปีดเตอร์เฉลี่ยของอลูมิเนียม เมื่อลำไอออนปรมาณูมีตกกระทบทำมุม 0, 30 และ 60 องศา แสดงดังตารางที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสปีดเตอร์และมุมตกกระทบของลำไอออนปรมาณู แสดงดังรูปที่ 4.29

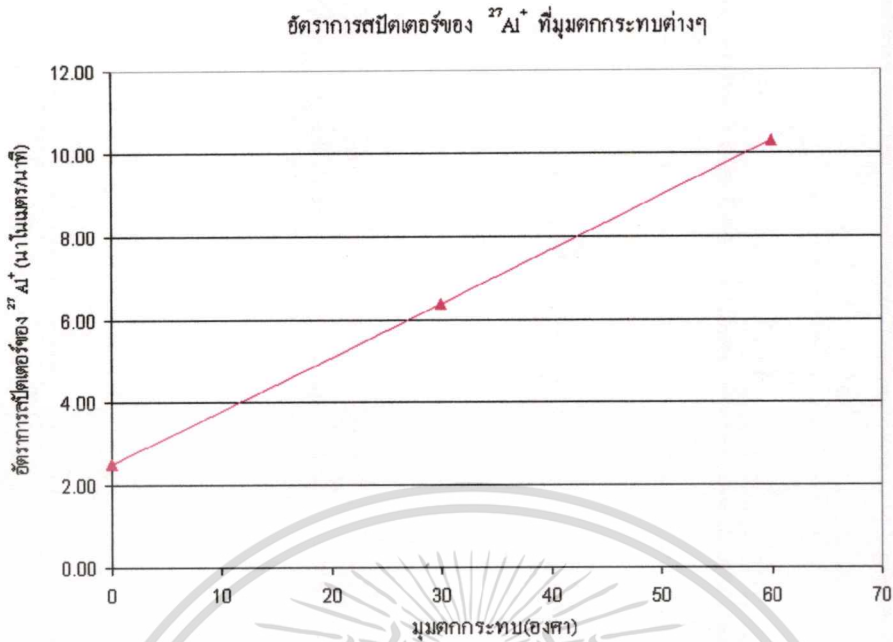


รูปที่ 4.28 โครงสร้างเชิงลึกของอลูมิเนียม (มุมตกกระทบ 0 องศา) ในเวลา 50 นาที

ตารางที่ 4.14 อัตราการสปีดเตอร์เฉลี่ยของอลูมิเนียมที่มุมตกกระทบ 0, 30 และ 60 องศา

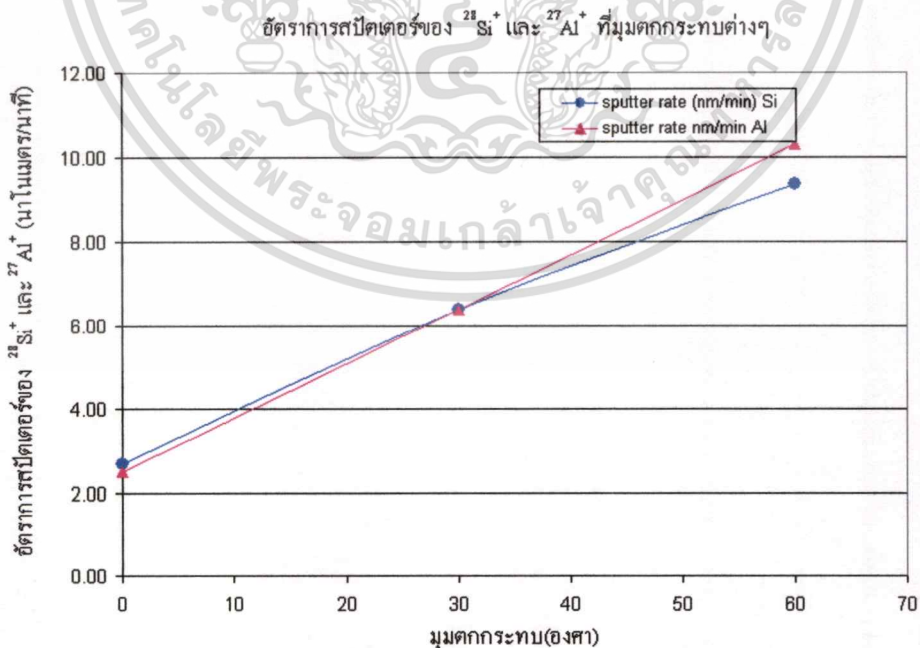
มุมตกกระทบ(องศา)	อัตราการสปีดเตอร์ (นาโนเมตรต่อนาที)
0	2.5
30	6.4
60	10.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมตกกระทบและอัตราการสปีดเตอร์ของอลูมิเนียม

จากผลการทดลองสรุปได้ว่า อัตราการสปีดเตอร์ทั้งของซิลิกอนและอลูมิเนียม มีค่าเพิ่มขึ้นตามมุมตกกระทบของลำไอออนปฐมภูมิที่เพิ่มขึ้น และอัตราการสปีดเตอร์ของซิลิกอนและอลูมิเนียมมีค่าใกล้เคียงกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่มุม 0 และ 30 องศา ดังแสดงในรูปที่ 4.30



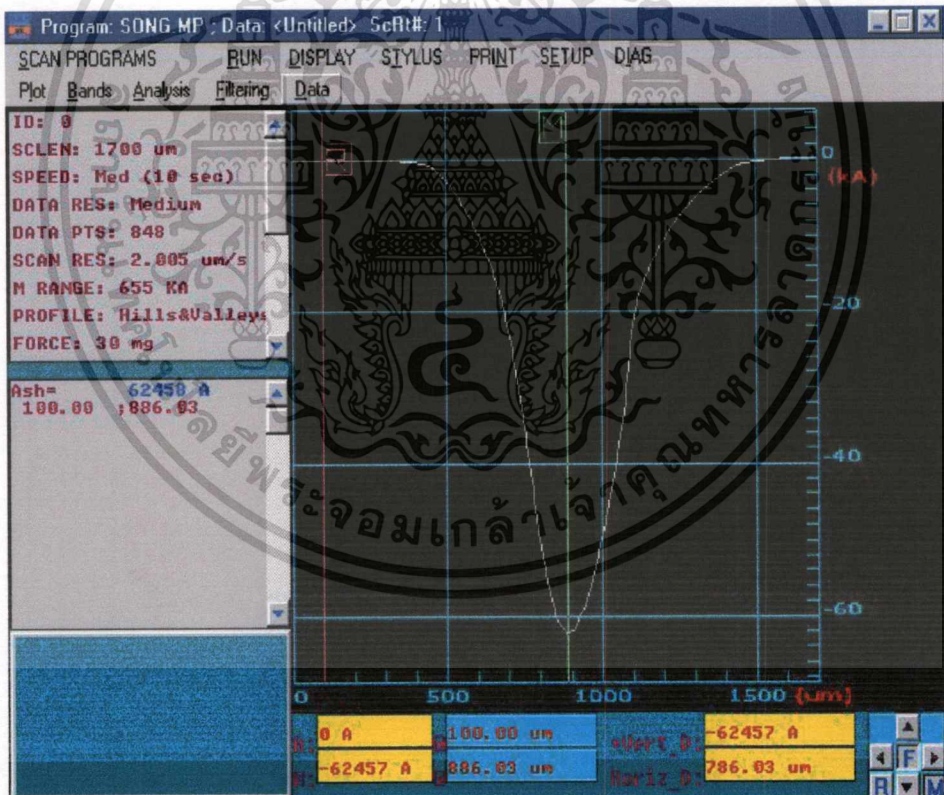
รูปที่ 4.30 อัตราการสปีดเตอร์ของซิลิกอนและอลูมิเนียมที่มุมตกกระทบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3.4 การคำนวณความหนาของฟิล์มบางอลูมิเนียม

จากผลการทดลองในหัวข้อ 4.3.3.3 พบว่าอัตราการสปีดเตอร์ของซิลิกอนและอลูมิเนียมมีค่าต่างกันเพียงเล็กน้อยโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่มุม 0 และ 30 องศา ดังนั้นการสอบเทียบสเกลเวลาเป็นความลึกโดยกำหนดให้อัตราการสปีดเตอร์มีค่าคงที่ จึงทำให้เกิดการคลาดเคลื่อนไม่มาก

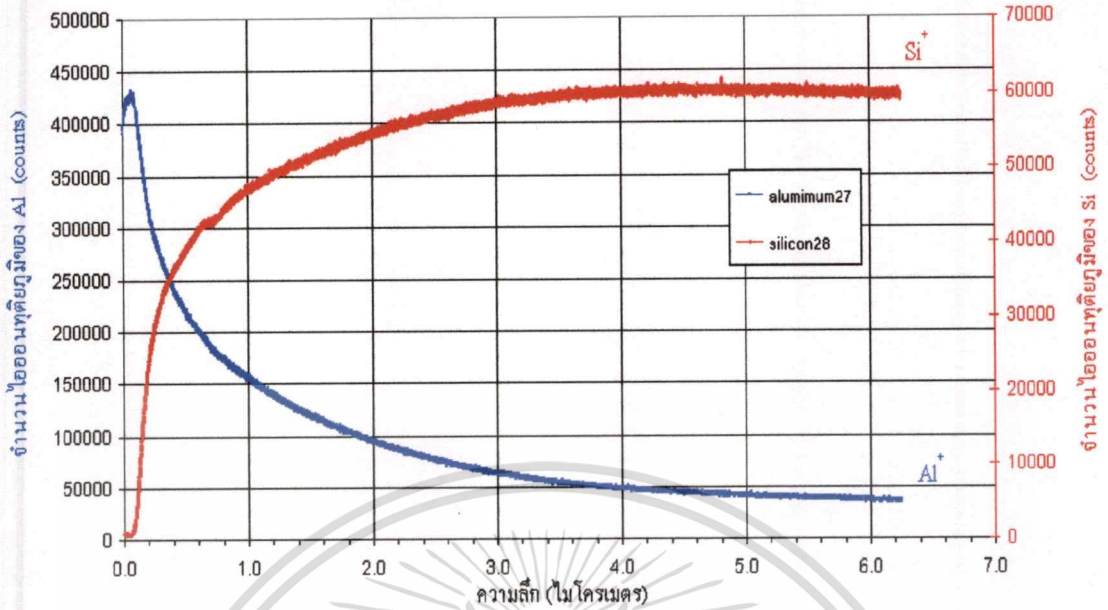
การหาความหนาของฟิล์มบางอลูมิเนียมบนซิลิกอน ทำโดยการนำสารตัวอย่างที่ผ่านการวิเคราะห์แบบไดนามิกเป็นเวลา 240 นาที จากการทดลองในหัวข้อ 4.3.3.2 มาวัดความลึกของหลุมที่เกิดจากการสปีดเตอร์ ด้วยเครื่องวัดโครงร่างของพื้นผิว ของบริษัท Veeco รุ่น Dektak 3ST ได้ผลการวัดดังรูปที่ 4.31 ซึ่งได้ความลึกของหลุม 6.2458 ไมครอน สามารถคำนวณอัตราการสปีดเตอร์ได้เท่ากับ 26.02 นาโนเมตรต่อนาที เมื่อปรับสเกลเวลาเป็นความลึกโดยใช้ค่าอัตราการสปีดเตอร์ข้างต้นจะได้กราฟดังรูปที่ 4.32



รูปที่ 4.31 ผลการวัดความลึกด้วยเครื่องวัดโครงร่างของพื้นผิว

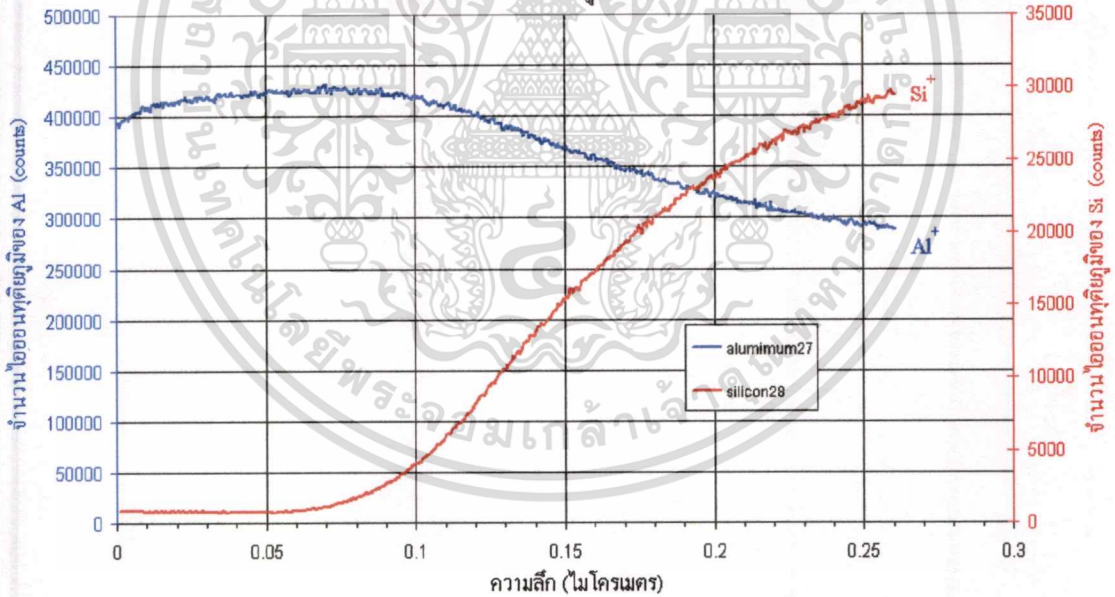
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างเชิงลึกของ Al และ Si ของฟิล์มบางอลูมิเนียมบนซิลิกอน (5.0 keV O⁺, 30 องศา)



(ก)

โครงสร้างเชิงลึกของ Al และ Si ของฟิล์มบางอลูมิเนียมบนซิลิกอน (5.0 keV O⁺, 30 องศา)



(ข)

รูปที่ 4.32 โครงสร้างเชิงลึกของ Al และ Si ของฟิล์มบางอลูมิเนียมบนซิลิกอน

(ก) แสดงสเกลความลึกถึง 7.0 ไมโครเมตร

(ข) แสดงสเกลความลึกถึง 0.3 ไมโครเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการวัด โครงสร้างเชิงลึก จะเห็นว่าปริมาณไอออนทุติยภูมิของอลูมิเนียมมีค่าเริ่มต้นที่ประมาณ 400,000 counts จากนั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นประมาณ 420,000 counts อย่างรวดเร็วภายในความลึกประมาณ 10 นาโนเมตรและจะเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ จนเกือบจะคงที่ไปจนถึงความลึกประมาณ 80 นาโนเมตร จึงลดลงอย่างเห็นได้ชัด โดยมีแนวโน้มว่าจะลดลงไปเรื่อย ๆ ถึงแม้ว่าความลึกมากกว่า 6 ไมครอน ก็ตาม ในขณะที่ ปริมาณไอออนทุติยภูมิของซิลิกอนจะมีค่าเริ่มต้นที่ค่อนข้างต่ำระดับ 1000 counts และมีค่าคงที่ไปจนถึงความลึกประมาณ 60 นาโนเมตร จึงเริ่มเพิ่มขึ้นและเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วไปจนถึงความลึกประมาณ 900 นาโนเมตร จากนั้นจึงเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ จนกระทั่งมีค่าคงที่ในที่สุด

การที่ผิวของฟิล์มบางอลูมิเนียมไม่ได้เป็นจุดที่มีปริมาณไอออนทุติยภูมิของอลูมิเนียมสูงสุดแสดงว่าฟิล์มบางอลูมิเนียมนี้ถูกปกคลุมด้วยสารอื่น ซึ่งจากข้อมูลจากการวิเคราะห์แบบสเปกโทรสโคปีได้ว่าสารที่ปกคลุมผิวหน้าของฟิล์มนี้คือ โซเดียม คาร์บอนและไนโตรเจนในรูปของสารประกอบ

อย่างไรก็ตาม จากผลการวัด โครงสร้างเชิงลึก จะเห็นว่าปริมาณไอออนทุติยภูมิของอลูมิเนียม ปรากฏที่ความลึกค่อนข้างมากซึ่งระยะนี้ไม่น่าจะใช้ความหนาของฟิล์มบางอลูมิเนียม แต่การที่สัญญาณของปริมาณไอออนทุติยภูมิของอลูมิเนียมในการวัด โครงสร้างเชิงลึก ไม่ลดลงอย่างรวดเร็วที่ความลึกเท่ากับความหนาของฟิล์มบางอลูมิเนียม อธิบายได้ว่าเกิดเนื่องจากเมื่อพื้นผิวถูกยิงด้วยลำไอออนปฐมภูมิ อะตอมของอลูมิเนียมบางส่วนจะถูกสปีดเตอร์ให้หลุดออกจากพื้นผิว แต่บางส่วนจะถูกกระแทกให้ฝังลึกลงไปภายใต้พื้นผิวมากขึ้น เป็นเหตุให้พบสัญญาณของปริมาณไอออนทุติยภูมิของอลูมิเนียม ที่ความลึกมากกว่าความหนาของฟิล์มบางอลูมิเนียม ดังนั้น การวัดความลึกของฟิล์มบางในกรณีนี้ ให้มีความถูกต้องจึงควรวัดจาก โครงสร้างเชิงลึกของซิลิกอน

การวัดความหนาของฟิล์มบางอลูมิเนียมจาก โครงสร้างเชิงลึกของซิลิกอนในรูปที่ 4.32(ข) พบว่ามีค่าประมาณ 93 นาโนเมตร อย่างไรก็ตาม ความหนาของฟิล์มบางอลูมิเนียมนี้สามารถตรวจสอบความถูกต้องได้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

การวัดความหนาของฟิล์มบางอลูมิเนียมบนแผ่นซิลิกอนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของบริษัทฮิตาชิ รุ่น S-4700 สามารถทำได้โดยการกรีดแผ่นซิลิกอนที่ถูกเคลือบด้วยฟิล์มบางอลูมิเนียมนี้แล้วหักให้แตกออก เพื่อให้เห็นภาพตัดขวางของชิ้นงานตัวอย่าง เมื่อนำชิ้นงานไปส่องดูภาคตัดขวางด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ด้วยกำลังขยาย 50,000 เท่าจะเห็นส่วนของฟิล์มบางอลูมิเนียมชัดเจนดังแสดงในรูปที่ 4.33 จากรูปจะเห็นว่า ความหนาของฟิล์มตรงตำแหน่งที่วัดมีค่า 99 นาโนเมตร ซึ่งต่างจากความหนาที่ได้จากวิธีการวัด โครงสร้างเชิงลึกเล็กน้อย อย่างไรก็ตามจากรูป จะเห็นว่าฟิล์มบางอลูมิเนียมมีความหนาไม่สม่ำเสมอ บางจุดจะหนากว่า 99 นาโนเมตร เล็กน้อย ในขณะที่มีบางจุดบางกว่า 99 นาโนเมตร เล็กน้อย จึงสรุปได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหนาที่ได้โดยเทคนิคการวิเคราะห์สเปกตรัมของมวลไอออนทุติยภูมิ มีความถูกต้องในระดับที่น่าพอใจ



รูปที่ 4.33 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดด้วยกำลังขยาย 50,000 เท่า แสดงความหนาของฟิล์มบางอลูมิเนียม

สรุปผลจากการทดลองเพื่อศึกษาฟิล์มบางของอลูมิเนียมบนซิลิกอนด้วยเทคนิคการวิเคราะห์สเปกตรัมของมวลไอออนทุติยภูมิทั้งแบบสถิตและแบบไดนามิก พบว่าการวิเคราะห์แบบสถิต สามารถใช้ศึกษาองค์ประกอบของธาตุบนพื้นผิวของฟิล์มบางเพื่อตรวจสอบหาสิ่งเจือปนอันเนื่องจากระบวนการการปลูกฟิล์ม ส่วนการวิเคราะห์แบบไดนามิก สามารถใช้ศึกษาโครงสร้างเชิงลึกของฟิล์มได้ นอกจากนี้ยังพบว่า การวิเคราะห์แบบไดนามิก สามารถวัดความหนาของฟิล์มบางได้อย่างถูกต้องและแม่นยำในระดับที่เชื่อถือได้

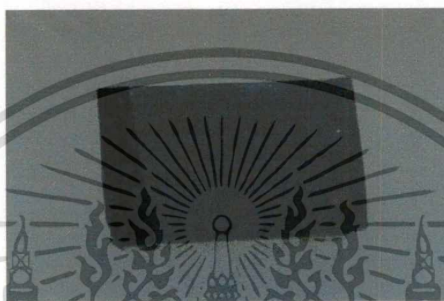
การวัดความหนาของฟิล์มบางด้วยการวิเคราะห์แบบไดนามิก นี้จะมีความละเอียด (resolution) สูงขึ้นได้และสามารถวัดความหนาของฟิล์มที่บางมาก ๆ ในระดับต่ำกว่า 10 nm ได้ถ้าใช้ไอออนปฐมภูมิที่มีพลังงานต่ำลง ซึ่งจะทำให้อัตราการสปีดเตอร์ต่ำลงในระดับ 1 นาโนเมตรต่อนาทีเดียว แต่ก็ต้องใช้ระบบวิเคราะห์สเปกตรัมมวลที่มีความไวสูง ๆ ด้วย เนื่องจากปริมาณไอออนทุติยภูมิจะต่ำมากนั่นเอง

อย่างไรก็ตาม ในการทดลองนี้ใช้สมมุติฐานที่ว่า อลูมิเนียมและซิลิกอนมีอัตราการสปีดเตอร์คงที่และเท่ากัน ซึ่งในกรณีนี้คำนวณได้จากความลึกของหลุมที่เกิดจากการวัดแบบไดนามิก มีค่า 26.02 นาโนเมตรต่อวินาที ซึ่งในความเป็นจริงแล้วไม่เป็นเช่นนั้น กล่าวคืออลูมิเนียมและซิลิกอน มีอัตราการสปีดเตอร์ต่างกันเล็กน้อย ทำให้ความหนาของฟิล์มบางที่วัดได้มีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.4 फिल्मบางอคูมิเนียมบนสารกึ่งตัวนำซิลิกอน (ตัวอย่างที่ 2)

ฟิล์มบางอคูมิเนียมบนสารกึ่งตัวนำซิลิกอน(ตัวอย่างที่ 2) ขนาด 2.0 x 1.5 เซนติเมตร ปลูกด้วยเทคนิคการระเหยด้วยความร้อน ที่ความหนา 170 นาโนเมตร ตามขั้นตอนที่กล่าวใน หัวข้อ 3.6 เช่นเดียวกับฟิล์มบางอคูมิเนียมบนสารกึ่งตัวนำซิลิกอน (ตัวอย่างที่ 1) ต่างกันเล็กน้อยตรงที่นำ แผ่นอคูมิเนียมฟอสล์มาปิดบนแผ่นซิลิกอนไว้บางส่วนในขณะที่ปลูกฟิล์มบางอคูมิเนียม เพื่อไว้เป็น จุดอ้างอิงในการวัดความหนาของฟิล์มบางอคูมิเนียมด้วยเครื่องวัด โครงร่างของพื้นผิว ฟิล์มบาง อคูมิเนียมบนสารกึ่งตัวนำซิลิกอน (ตัวอย่างที่ 2) ที่ใช้ในการทดลองมีลักษณะดังรูปที่ 4.34



รูปที่ 4.34 ฟิล์มบางของอคูมิเนียมบนสารกึ่งตัวนำซิลิกอน(ตัวอย่างที่ 2)

4.3.4.1 การวิเคราะห์แบบสถิต

ฟิล์มบางของอคูมิเนียมบนสารกึ่งตัวนำซิลิกอน(ตัวอย่างที่ 2) จะถูกวิเคราะห์ด้วย เทคนิคการวิเคราะห์สเปกตรัมของมวล ไอออนทุติยภูมิแบบสถิต เพื่อตรวจสอบองค์ประกอบและ สิ่งปนเปื้อนของสารตัวอย่าง โดยทำการวัดที่มุม 60 องศาทำการวิเคราะห์ที่ใช้ไอออนของ ออกซิเจนเป็นลำไอออนปฐมภูมิ ที่พลังงาน 3 keV ระดับกระแสไอออน 0.06 μA กำหนด พารามิเตอร์ของระบบวิเคราะห์มวลและระบบควบคุมแหล่งกำเนิดไอออน ดังตารางที่ 4.15 และ 4.16 ตามลำดับ สเปกตรัมมวลของฟิล์มบางของอคูมิเนียมบนสารกึ่งตัวนำซิลิกอน (ตัวอย่างที่ 2) แสดงดังรูปที่ 4.35

ผลการวิเคราะห์สเปกตรัมของมวล ไอออนทุติยภูมิแบบสถิต ได้สเปกตรัมมวลของสาร ตัวอย่างฟิล์มบางของอคูมิเนียมบนซิลิกอนแสดงดังรูปที่ 4.35 จากสเปกตรัมมวล พบว่ามี สารประกอบของอคูมิเนียม เช่น AIC (มวล = 39), AIN (มวล = 41) และ Na เช่นเดียวกับฟิล์มบาง ของอคูมิเนียมบนสารกึ่งตัวนำซิลิกอน (ตัวอย่างที่ 1) แต่ Na และ AIC มีสัดส่วนที่น้อยลงอย่าง ชัดเจน แสดงว่าการปลูกฟิล์มบางของอคูมิเนียมบนสารกึ่งตัวนำซิลิกอน (ตัวอย่างที่ 2) นี้ทำได้ดีกว่า การปลูกฟิล์มบางของอคูมิเนียมบนสารกึ่งตัวนำซิลิกอน (ตัวอย่างที่ 1) กล่าวคือมีการปนเปื้อน น้อยลงมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

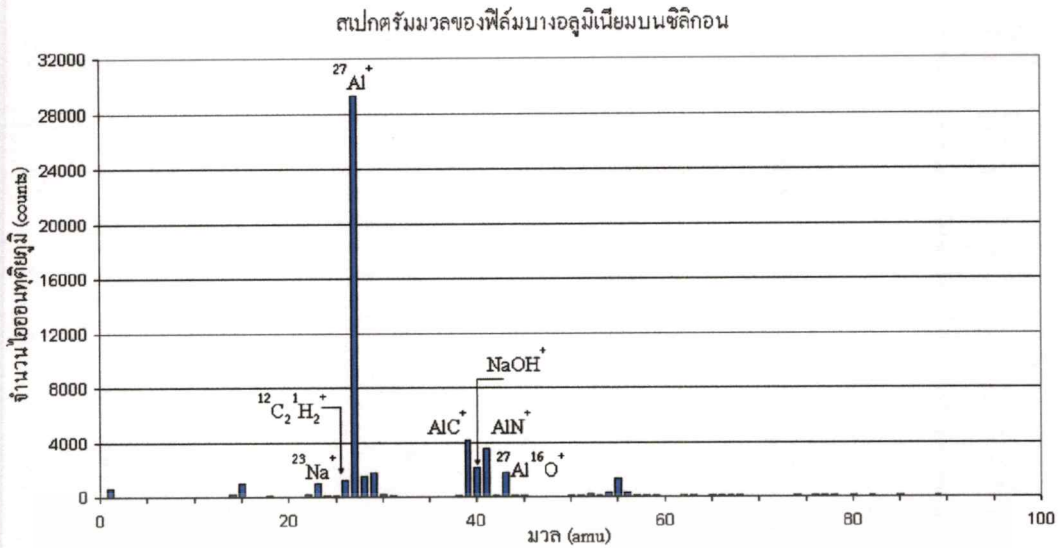
ตารางที่ 4.15 พารามิเตอร์ของระบบวิเคราะห์มวล

mode-change-delay	1000 ms	rate_select	0 (0=100K,1=10M c/s FSD)
energy	-1.05 V	gun-blanking_invert	0 (0=normal, 1=invert)
endcap	-90 V	gun-blanking_type	0 (0=point, 1=raster)
lens	-7 V	gate_delay	0.1 μ S
extractor	-195 V	gating_invert	0 (0=normal, 1=invert)
focus	-110 V	gate_width	0 μ S
source-focus	-302 V	gating	0 (1=on, 0=off)
cylinder	-3.6 V	mass	27 amu
cage	0 V	discriminator	-10 %
electron-energy	135.9 V	delta-m	0 %
emission	100 μ A	resolution	0 %
multiplier	2600 V	1 st-dynode	-1200 V

ตารางที่ 4.16 พารามิเตอร์ของระบบควบคุมแหล่งกำเนิดไอออน

Pressure main chamber	5.32×10^{-9} mbar	X align	-3.05 V
Pressure main chamber *	5.40×10^{-8} mbar	Y align	6.15 V
Pressure Ion Gun	2.80×10^{-9} mbar	X DEF	0 V
Pressure Ion Gun *	1.31×10^{-5} mbar	Y DEF	0 V
Focus 1	1.86 kV	Emission Current	10 mA
Focus 2	1.86 kV	Ion Energy	3 kV
Filament Current	2.89 A	Ion Current	0.06 μ A

* หลังจากปล่อยก๊าซออกซิเจนเข้าสู่แหล่งกำเนิดไอออน



รูปที่ 4.35 สเปกตรัมมวลของฟิล์มบางอลูมิเนียมบนซิลิกอน(ตัวอย่างที่ 2)

4.3.4.2 การวิเคราะห์แบบไดนามิก

การวิเคราะห์แบบไดนามิก มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างเชิงลึกและวัดความหนาของฟิล์มบางอลูมิเนียมบนซิลิกอน โดยใช้วิธีเดียวกับกรณีการศึกษาฟิล์มบางของอลูมิเนียมบนสารกึ่งตัวนำซิลิกอน(ตัวอย่างที่ 1) ต่างกันที่ ในกรณีนี้จะทำการวัดความหนาของฟิล์มโดยใช้ลำไอออนปฐมภูมิ ตกกระทบทำมุม 0 และ 30 องศา เปรียบเทียบผลที่ได้กับความหนาที่วัดได้โดยเครื่องวัดโครงสร้างของพื้นผิว ทำการวิเคราะห์โดยใช้ไอออนของออกซิเจนเป็นลำไอออนปฐมภูมิ ที่พลังงาน 5 keV ระดับกระแสไอออน 0.7 μA กำหนดพารามิเตอร์ของระบบควบคุมแหล่งกำเนิดไอออน ดังตารางที่ 4.17 (พารามิเตอร์ของระบบวิเคราะห์มวลใช้เหมือนกรณีการวิเคราะห์แบบสถิต)

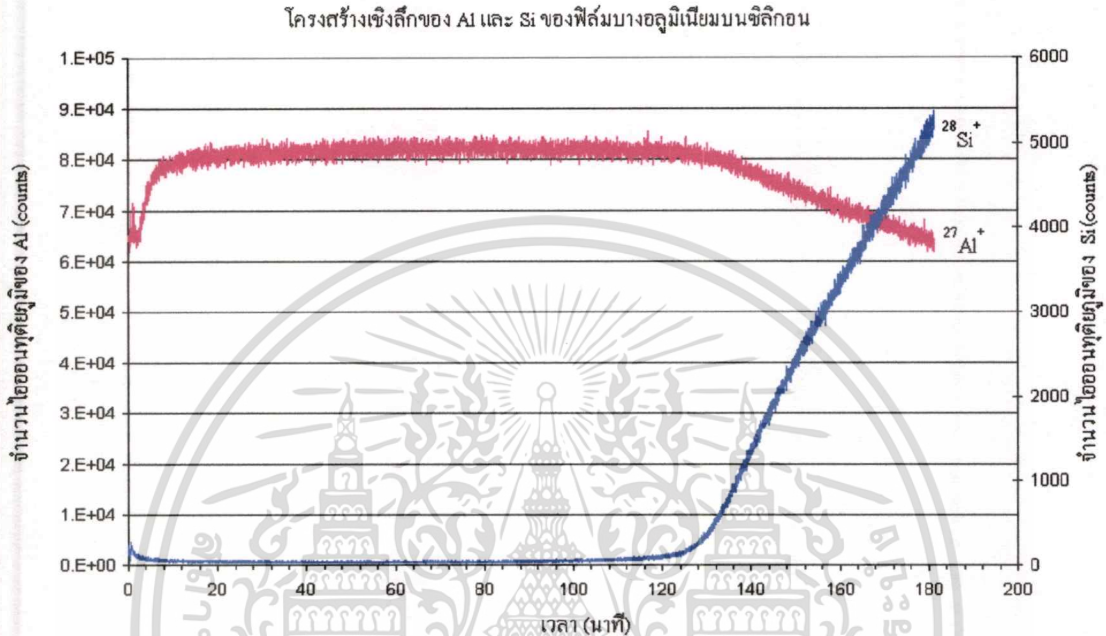
ตารางที่ 4.17 พารามิเตอร์ของระบบควบคุมแหล่งกำเนิดไอออน

Pressure main chamber	5.30×10^{-9} mbar	X align	-3.05 V
Pressure main chamber *	3.97×10^{-8} mbar	Y align	6.15 V
Pressure Ion Gun	3.60×10^{-9} mbar	X DEF	0 V
Pressure Ion Gun *	1.24×10^{-5} mbar	Y DEF	0 V
Focus 1	2.98 kV	Emission Current	10 mA
Focus 2	2.98 kV	Ion Energy	5 kV
Filament Current	2.89 A	Ion Current	0.7 μA

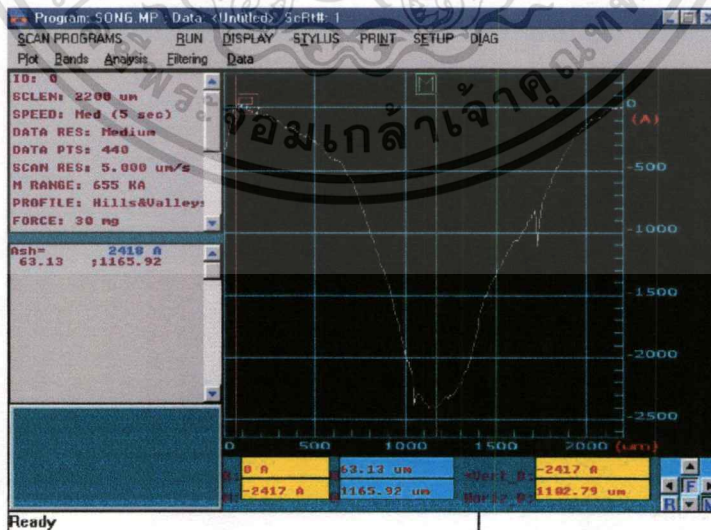
* หลังจากปล่อยก๊าซออกซิเจนเข้าสู่แหล่งกำเนิดไอออน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการวิเคราะห์แบบไดนามิก กรณีที่ลำไอออนปฐมภูมิตกกระทบบำรุง 0 องศา เป็นเวลา 181 นาที จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไอออนทุติยภูมิของอลูมิเนียมและซิลิกอนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาในการสปีดเตอร์ของฟิล์มบางของอลูมิเนียมบนสารกึ่งตัวนำซิลิกอน (ตัวอย่างที่ 2) แสดงดังรูปที่ 4.36 และได้ผลการวัดความลึกด้วยเครื่องวัดโครงสร้างของพื้นผิวดังรูปที่ 4.37



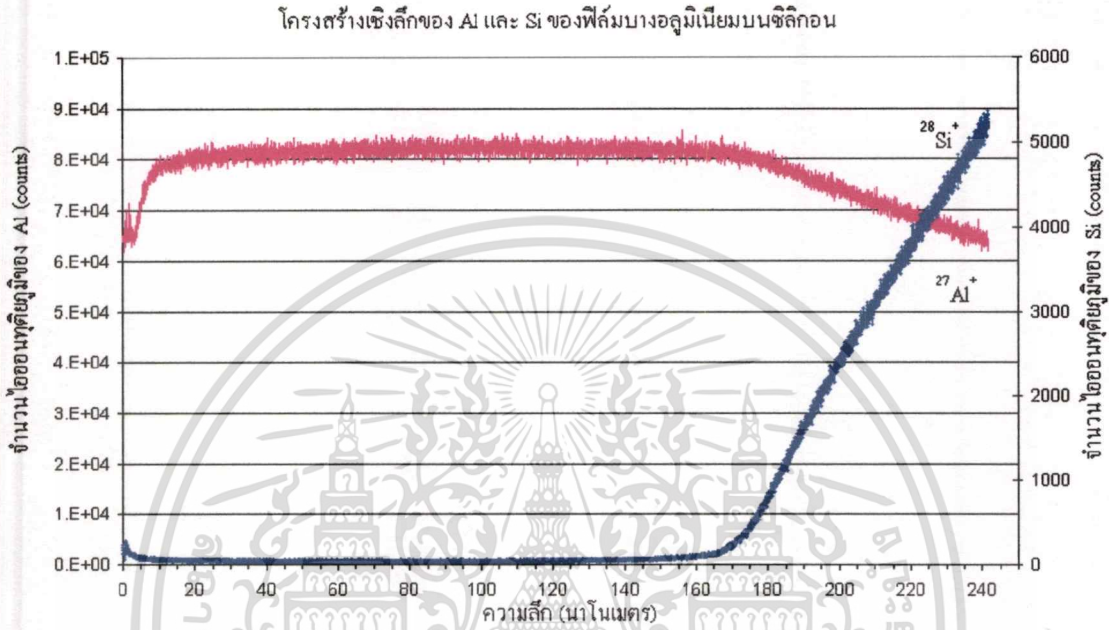
รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไอออนทุติยภูมิ Al และ Si ของฟิล์มบางอลูมิเนียมบนซิลิกอนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา เมื่อลำไอออนปฐมภูมิตกกระทบบำรุง 0 องศา



รูปที่ 4.37 ผลการวัดความลึกด้วยเครื่องวัดโครงสร้างของพื้นผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

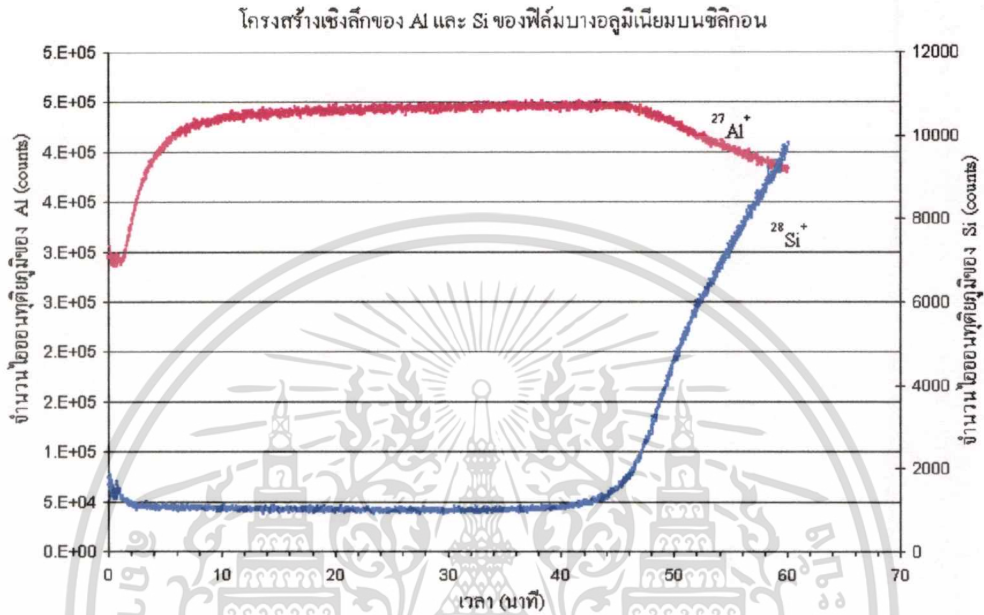
จากการทดลองโดยใช้เวลาในการวัดโครงสร้างเชิงลึก 181 นาที สามารถวัดความลึกของหลุมที่เกิดขึ้นจากการสปีดเตอร์ได้ 241.8 นาโนเมตร ค่าความอัตราสปีดเตอร์ได้เท่ากับ 1.34 นาโนเมตรต่อนาที เมื่อทำการแปลงสเกลเวลาของการวิเคราะห์แบบไดนามิกในรูปที่ 4.36 เป็นความลึก จะได้โครงสร้างเชิงลึกดังรูปที่ 4.38



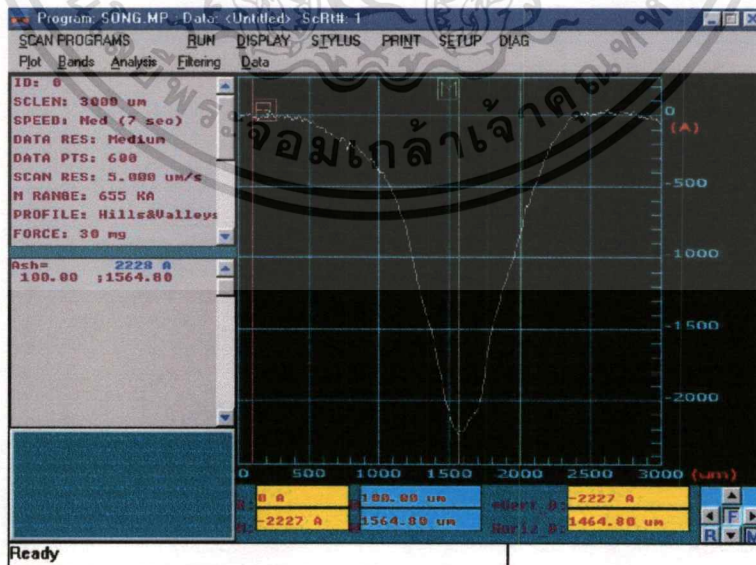
รูปที่ 4.38 โครงสร้างเชิงลึกของ Al และ Si ของฟิล์มบางอลูมิเนียมบนซิลิกอน (0 องศา)

จากรูปที่ 4.38 ลักษณะโครงสร้างเชิงลึกของ Al และ Si ที่มุมตกกระทบ 0 องศา จะเห็นว่าที่บริเวณพื้นผิวมีปริมาณ ไอออนทุติยภูมิของซิลิกอนต่ำมากจนถึงระยะความลึกประมาณ 170 นาโนเมตร หลังจากนั้นปริมาณ ไอออนทุติยภูมิของซิลิกอนจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งเป็นจุดที่อลูมิเนียมถูกสปีดเตอร์ออกจนถึงชั้นซิลิกอน ถ้าพิจารณาปริมาณ ไอออนทุติยภูมิของอลูมิเนียมซึ่งเคลือบอยู่บนพื้นผิวซิลิกอน พบว่า ปริมาณ ไอออนทุติยภูมิของอลูมิเนียมไม่ได้มีค่าสูงสุดที่บริเวณพื้นผิว แต่จะมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงความลึกประมาณ 15 นาโนเมตร จึงมีค่าคงที่ ซึ่งแสดงว่า มีสิ่งปนเปื้อนปกคลุมบริเวณพื้นผิวสารตัวอย่าง ปริมาณ ไอออนทุติยภูมิของอลูมิเนียมจะมีค่าคงที่จนถึงความลึกประมาณ 170 นาโนเมตร จึงลดลงอย่างรวดเร็วและมีแนวโน้มลดลงเรื่อยๆ ซึ่งที่ระยะนี้ อลูมิเนียมถูกสปีดเตอร์ออกจนถึงชั้นของซิลิกอนด้วยอัตราสปีดเตอร์ 1.34 นาโนเมตรต่อนาที ใช้เวลาประมาณ 128 นาที (ดูรูปที่ 4.36) จุดที่ปริมาณ ไอออนทุติยภูมิของซิลิกอนเริ่มเพิ่มขึ้นและปริมาณ ไอออนทุติยภูมิของอลูมิเนียมเริ่มลดลง คือตำแหน่งรอยต่อระหว่างฟิล์มบางอลูมิเนียมกับซิลิกอนที่จุดนี้วัดความหนาของฟิล์มบางอลูมิเนียมได้ 171 นาโนเมตร

การวิเคราะห์แบบไดนามิก กรณีที่ลำไอออนปฐมภูมิตกกระทบทำมุม 30 องศา เป็นเวลา 60 นาที จะ ได้ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไอออนทุติยภูมิของอลูมิเนียมและซิลิกอนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาในการสเปกเตอร์ของฟิล์มบางของอลูมิเนียมบนสารกึ่งตัวนำซิลิกอน (ตัวอย่างที่ 2) แสดงดังรูปที่ 4.39 และได้ผลการวัดความลึกด้วยเครื่องวัดโครงสร้างของพื้นผิวดังรูปที่ 4.40



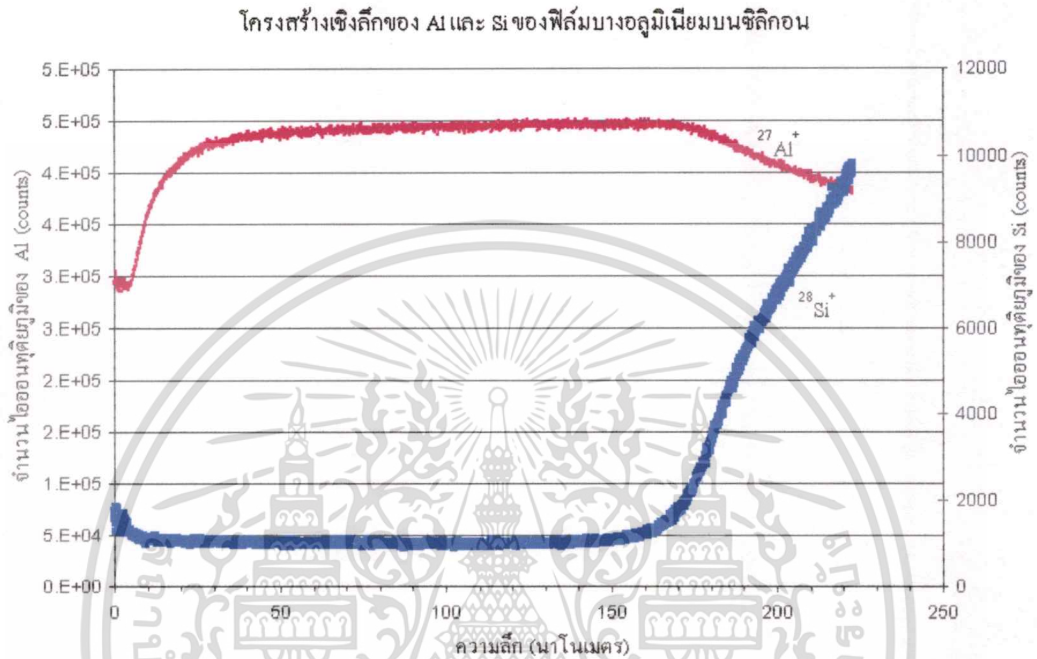
รูปที่ 4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไอออนทุติยภูมิ Al และ Si ของฟิล์มบางอลูมิเนียมบนซิลิกอนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา เมื่อลำไอออนปฐมภูมิตกกระทบทำมุม 30 องศา



รูปที่ 4.40 ผลการวัดความลึกด้วยเครื่องวัดโครงสร้างของพื้นผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

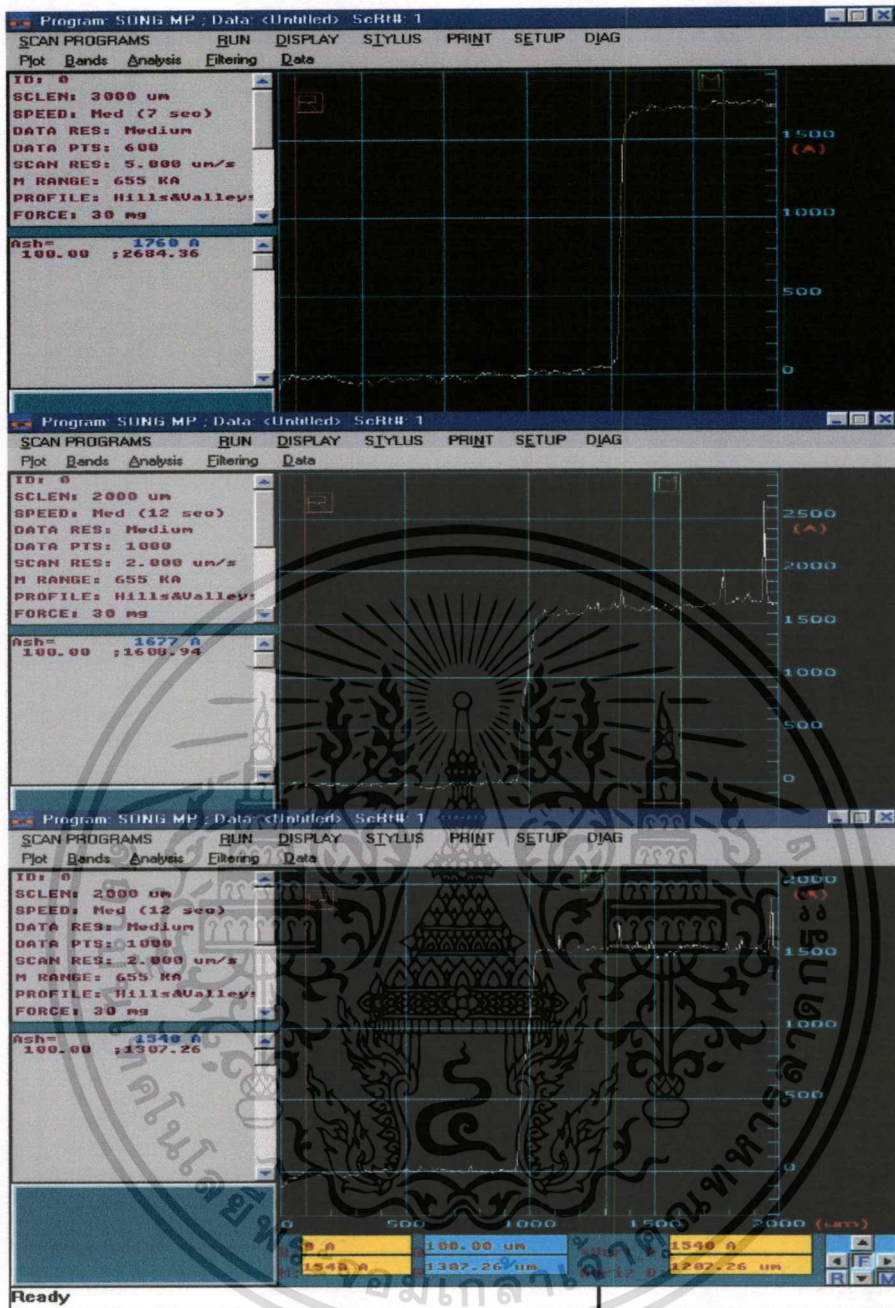
จากการทดลองโดยใช้เวลาในการวัดโครงสร้างเชิงลึก 60 นาที สามารถวัดความลึกของ หลุมที่เกิดขึ้นจากการสปีดเตอร์ได้ 222.8 นาโนเมตร ค่าความอัตราการสปีดเตอร์ได้เท่ากับ 3.71 นาโนเมตรต่อนาที เมื่อทำการแปลงสเกลเวลาของการวิเคราะห์แบบไดนามิกในรูปที่ 4.39 เป็น ความลึก จะได้โครงสร้างเชิงลึกดังรูปที่ 4.41



รูปที่ 4.41 โครงสร้างเชิงลึกของ Al และ Si ของฟิล์มบางอลูมิเนียมบนซิลิกอน (30 อนุภาค)

จากรูปที่ 4.41 ลักษณะโครงสร้างเชิงลึกของ Al และ Si ที่มุมตกกระทบ 30 องศา จะเห็นว่ามีความคล้ายกับกรณีที่ใช้มุมตกกระทบ 0 องศา ซึ่งจะพิจารณาในลักษณะเดียวกันคือ จุดที่ ปริมาณไอออนทุติยภูมิของซิลิกอนเริ่มเพิ่มขึ้นและปริมาณไอออนทุติยภูมิของอลูมิเนียมเริ่มลดลง คือตำแหน่งรอยต่อระหว่างฟิล์มบางอลูมิเนียมกับซิลิกอนที่จุดนี้วัดความหนาของฟิล์มบาง อลูมิเนียมได้ 169 นาโนเมตร

การวัดความหนาของฟิล์มบางอลูมิเนียมจากโครงสร้างเชิงลึกของสารตัวอย่างที่มุม 0 และ 30 องศา พบว่ามีค่า 171 และ 169 นาโนเมตร ตามลำดับ ซึ่งถือว่าใกล้เคียงกันมาก อย่างไรก็ตาม ความหนาของฟิล์มบางอลูมิเนียมสามารถตรวจสอบความถูกต้องได้โดยการวัดความหนาของฟิล์มบางอลูมิเนียมด้วยเครื่องวัดโครงสร้างของพื้นผิว โดยทำการวัดความหนาจากผิวของฟิล์ม บางอลูมิเนียมบนสารตัวอย่างเทียบกับผิวอ้างอิงของแผ่นซิลิกอนบริเวณที่ไม่ได้ถูกเคลือบด้วยฟิล์ม อลูมิเนียม ทำการวัดความหนาที่ 3 ตำแหน่ง คือบริเวณกึ่งกลางและที่ขอบทั้งสองข้าง ได้ผลการวัด ดังรูปที่ 4.42



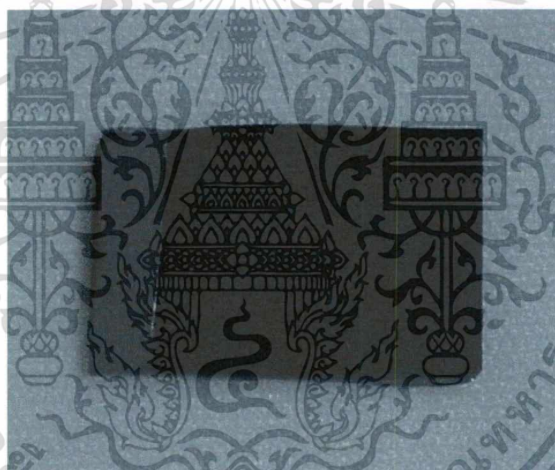
รูปที่ 4.42 ผลการวัดความหนาของฟิล์มบางอลูมิเนียมด้วยเครื่องวัดโครงสร้างของพื้นผิว

จากผลการวัดความหนาของฟิล์มบางอลูมิเนียมด้วยเครื่องวัดโครงสร้างของพื้นผิวที่ตำแหน่งต่างๆ 3 ตำแหน่ง ได้ค่าความหนา 3 ค่า คือ 176.0, 167.7 และ 154.0 นาโนเมตร จากผลการวัดสรุปได้ว่า ฟิล์มอลูมิเนียมที่ตำแหน่งต่างๆ มีความหนาไม่สม่ำเสมอ โดยมีความหนาเฉลี่ยที่ 166 นาโนเมตร ซึ่งต่างจากค่าที่วัดได้โดยวิธีวิเคราะห์สเปกตรัมของมวลไอออนทุติยภูมิแบบไดนามิก เล็กน้อย อย่างไรก็ตาม เนื่องจากฟิล์มบางอลูมิเนียมที่ใช้ในการทดลองนี้มีความหนาค่อนข้างไม่สม่ำเสมอจึงไม่สามารถสรุปความคลาดเคลื่อนในการวัดที่แน่นอนได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.5 พิล์มของอินเดียมทินออกไซด์บนสารกึ่งตัวนำซิลิกอน

การทดลองต่อไปนี้เป็นการศึกษาฟิล์มของอินเดียมทินออกไซด์บนสารกึ่งตัวนำซิลิกอน ฟิล์มของอินเดียมทินออกไซด์ซึ่งปลูกมีสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้าที่โปร่งแสง มีใช้ในอุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ ฟิล์มของอินเดียมทินออกไซด์ที่ใช้ในการทดลองนี้ปลูกบนสารกึ่งตัวนำซิลิกอน โดยวิธีอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง มีส่วนประกอบสำคัญคือ In_2O_3 90% และ SnO_2 10 % ในการปลูกฟิล์มได้นำแผ่นอลูมิเนียมฟอยล์มาปิดบนแผ่นซิลิกอนไว้บางส่วน เพื่อไว้เป็นจุดอ้างอิงในการวัดความหนาของฟิล์มของอินเดียมทินออกไซด์ด้วยเครื่องวัดโครงสร้างของพื้นผิว ฟิล์มของอินเดียมทินออกไซด์บนสารกึ่งตัวนำซิลิกอนที่ใช้ในการทดลองมีลักษณะดังรูปที่ 4.43 ในการทดลองจะใช้เทคนิคการวิเคราะห์สเปกตรัมของมวลไอออนทุติยภูมิแบบสถิต ในการศึกษาองค์ประกอบและสิ่งเจือปนบนพื้นผิวที่เกิดจากการปลูกฟิล์ม และใช้เทคนิคการวิเคราะห์สเปกตรัมของมวลไอออนทุติยภูมิแบบไดนามิก ในการวัดโครงสร้างเชิงลึกและความหนาของฟิล์ม



รูปที่ 4.43 ฟิล์มของอินเดียมทินออกไซด์บนสารกึ่งตัวนำซิลิกอน

4.3.5.1 การวิเคราะห์แบบสถิต

ฟิล์มของอินเดียมทินออกไซด์บนสารกึ่งตัวนำซิลิกอน จะถูกวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์สเปกตรัมของมวลไอออนทุติยภูมิแบบสถิต โดยทำการวัดที่มุม 60 องศา ทำการวิเคราะห์โดยใช้ไอออนของออกซิเจนเป็นลำไอออนปฐมภูมิ ที่พลังงาน 3 keV ระดับกระแสไอออน 0.06 μA กำหนดพารามิเตอร์ของระบบวิเคราะห์มวลและระบบควบคุมแหล่งกำเนิดไอออน ดังตารางที่ 4.18 และ 4.19 ตามลำดับ สเปกตรัมมวลของฟิล์มของอินเดียมทินออกไซด์บนซิลิกอน แสดงดังรูปที่ 4.44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.18 พารามิเตอร์ของระบบวิเคราะห์มวล

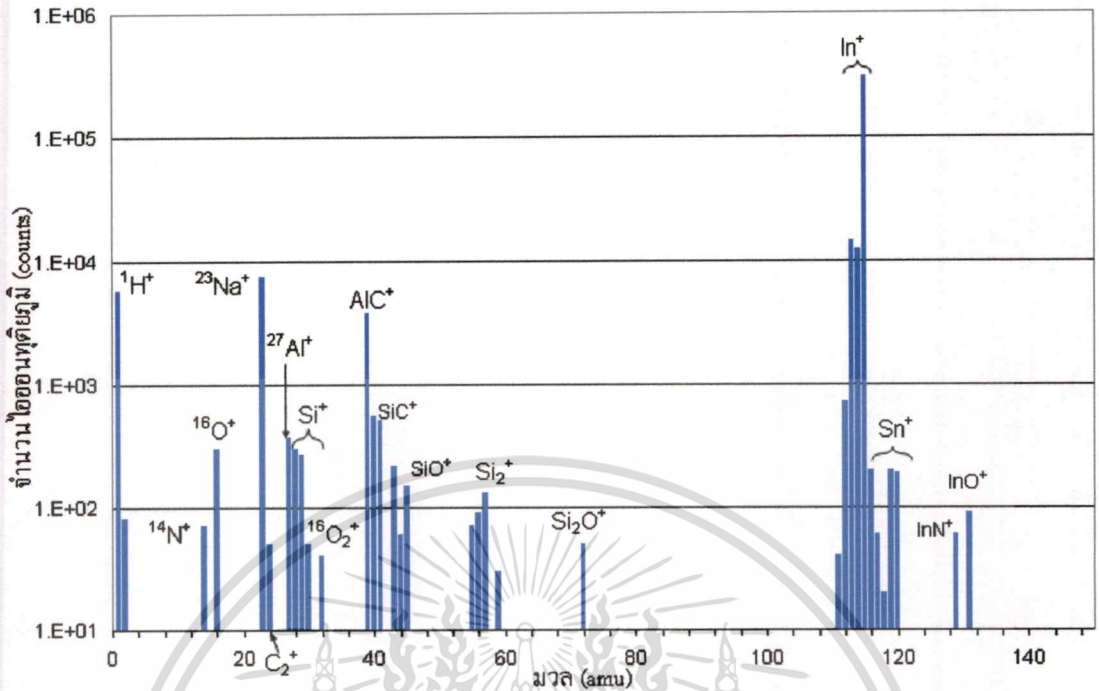
mode- change-delay	1000 ms	rate_select	0 (0=100K,1=10M c/s FSD)
energy	-7.25 V	gun-blanking_invert	0 (0=normal, 1=invert)
endcap	-92.6 V	gun-blanking_type	0 (0=point, 1=raster)
lens	-18 V	gate_delay	0.1 μ S
extractor	-240 V	gating_invert	0 (0=normal, 1=invert)
focus	-75 V	gate_width	0 μ S
source-focus	-364 V	gating	0 (1=on, 0=off)
cylinder	-2.5 V	mass	115 amu
cage	0 V	discriminator	-10 %
electron-energy	8.8 V	delta-m	0 %
emission	100 μ A	resolution	0 %
multiplier	2600 V	1 st-dynode	-1200 V

ตารางที่ 4.19 พารามิเตอร์ของระบบควบคุมแหล่งกำเนิดไอออน

Pressure main chamber	3.06×10^{-9} mbar	X align	-3.05 V
Pressure main chamber *	1.77×10^{-8} mbar	Y align	6.15 V
Pressure Ion Gun	3.40×10^{-9} mbar	X DEF	0 V
Pressure Ion Gun *	1.28×10^{-5} mbar	Y DEF	0 V
Focus 1	1.80 kV	Emission Current	10 mA
Focus 2	1.80 kV	Ion Energy	3 kV
Filament Current	3.0 A	Ion Current	0.06 μ A

* หลังจากปล่อยก๊าซออกซิเจนเข้าสู่แหล่งกำเนิดไอออน

สเปกตรัมมวลของฟิล์มอินเดียมทินออกไซด์บนซิลิกอน



รูปที่ 4.44 สเปกตรัมมวลของฟิล์มของอินเดียมทินออกไซด์บนซิลิกอน

จากสเปกตรัมมวลของฟิล์มของอินเดียมทินออกไซด์บนซิลิกอนในรูปที่ 4.44 จะเห็นว่าประกอบด้วยธาตุและองค์ประกอบเชิงเคมีของพื้นผิวสารตัวอย่างต่างๆ ดังนี้ H^+ , N^+ , O^+ , Na^+ , Si^+ , O_2^+ , AlC^+ , SiC^+ , SiO^+ , Si_2^+ , SiO_2^+ , In^+ , Sn^+ , InN^+ และ InO^+ ซึ่งสเปกตรัมเหล่านี้แสดงถึงสิ่งปนเปื้อนที่บริเวณพื้นผิว เช่น พบออกซิเจนและสารประกอบของออกซิเจนบนพื้นผิว ซึ่งอาจเกิดจากประวัติการใช้งานของระบบปลูกฟิล์มและจากแผ่นออกซิเจนที่นำปัดบนแผ่นซิลิกอนขณะปลูกฟิล์มเพื่อเป็นจุดอ้างอิงในการวัดความหนา ส่วนองค์ประกอบเชิงเคมีของออกซิเจนเกิดจากมีออกซิเจนเป็นส่วนประกอบในสารที่เคลือบ และองค์ประกอบเชิงเคมีของไนโตรเจนเกิดจากกระบวนการเคลือบสารตัวอย่างเนื่องจากการปล่อยก๊าซไนโตรเจนเข้าไปด้วย สำหรับองค์ประกอบเชิงเคมีของคาร์บอน และไฮโดรเจนเกิดจากสิ่งแวดล้อม ซึ่งจะมีอยู่มากเฉพาะบริเวณพื้นผิวเท่านั้น

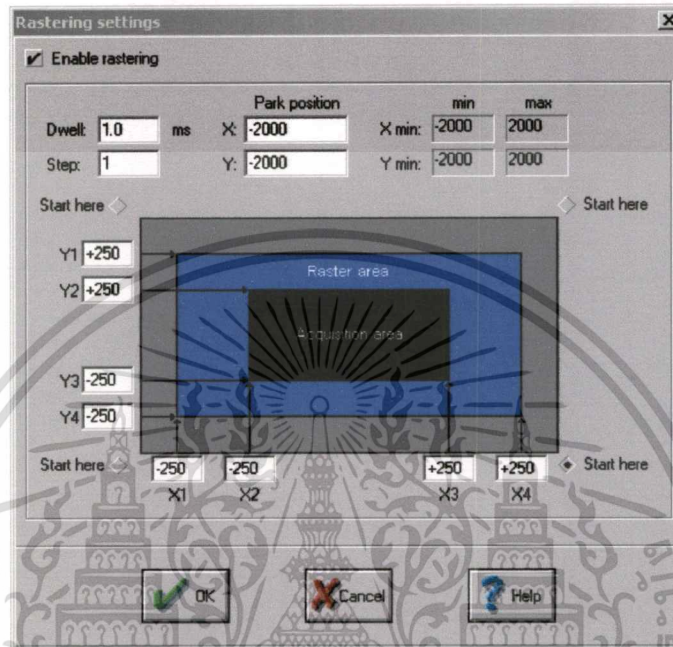
4.3.5.2 การวิเคราะห์แบบไดนามิก

การวิเคราะห์แบบไดนามิก มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างเชิงลึกและวัดความหนาของฟิล์มของอินเดียมทินออกไซด์ โดยใช้วิธีเดียวกับกรณีการศึกษาฟิล์มบางของออกซิเจนบนสารกึ่งตัวนำซิลิกอน ต่างกันที่ ในกรณีนี้จะทำการวัดความหนาของฟิล์มโดยใช้ลำไอออนปฐมภูมิ ตกกระทบทำมุม 45 องศา และทำการวิเคราะห์โดยวิธีการสแกนลำไอออน โดยกำหนดพื้นที่ในการสแกนเป็น ± 250 สเตป (± 250 step DAC) แสดงดังรูปที่ 4.45 จากนั้นจะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่เสียค่าใช้จ่าย

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปรียบเทียบผลการวัดความหนาที่ได้กับความหนาที่วัดได้โดยเครื่องวัดโครงสร้างของพื้นผิว ใช้ไอออนของออกซิเจนเป็นลำไอออนปฐมภูมิ ที่พลังงาน 5 keV ระดับกระแสไอออน 0.7 μA กำหนดพารามิเตอร์ของระบบควบคุมแหล่งกำเนิดไอออน ดังตารางที่ 4.20 (พารามิเตอร์ของระบบวิเคราะห์มวลใช้เหมือนกรณีการวิเคราะห์แบบสถิต)



รูปที่ 4.45 การกำหนดพารามิเตอร์ของการสแกนลำไอออน

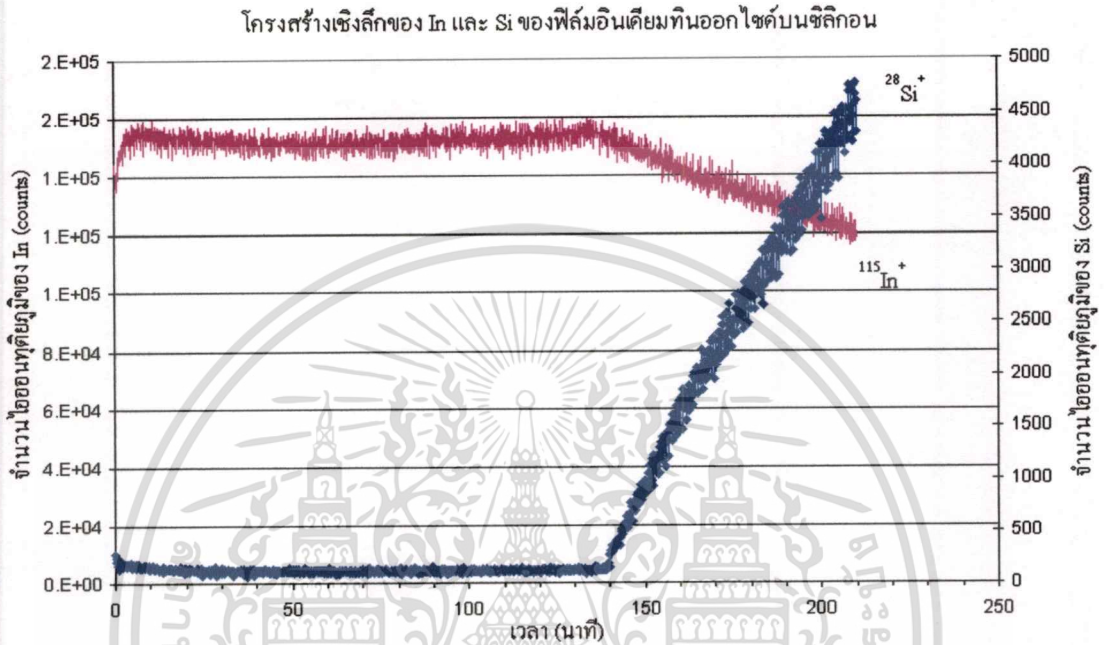
ตารางที่ 4.20 พารามิเตอร์ของระบบควบคุมแหล่งกำเนิดไอออน

Pressure main chamber	2.71×10^{-9}	mbar	X align	-3.05 V
Pressure main chamber*	1.60×10^{-8}	mbar	Y align	6.15 V
Pressure Ion Gun	3.40×10^{-9}	mbar	X DEF	0 V
Pressure Ion Gun *	1.11×10^{-5}	mbar	Y DEF	0 V
Focus 1	2.99	kV	Emission Current	10 mA
Focus 2	2.99	kV	Ion Energy	5 kV
Filament Current	2.77	A	Ion Current	0.7 μA

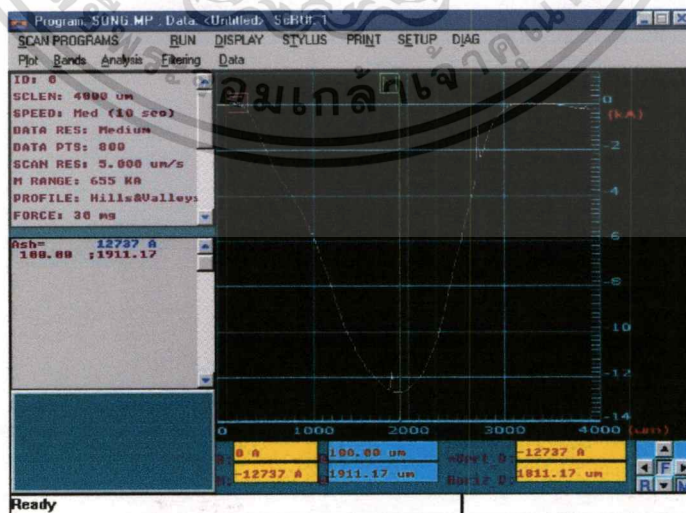
* หลังจากปล่อยก๊าซออกซิเจนเข้าสู่แหล่งกำเนิดไอออน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการวิเคราะห์แบบไดนามิกแบบสแกนลำไอออน กรณีที่ลำไอออนปฐมภูมิตกกระทบบนฟิล์ม 45 องศา เป็นเวลา 210 นาที จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไอออนทุติยภูมิของอินเดียมและซิลิกอนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาในการสปีดเตอร์ของฟิล์มของอินเดียมทินออกไซด์บนซิลิกอน แสดงดังรูปที่ 4.46 และได้ผลการวัดความลึกด้วยเครื่องวัดโครงสร้างของพื้นผิวดังรูปที่ 4.47



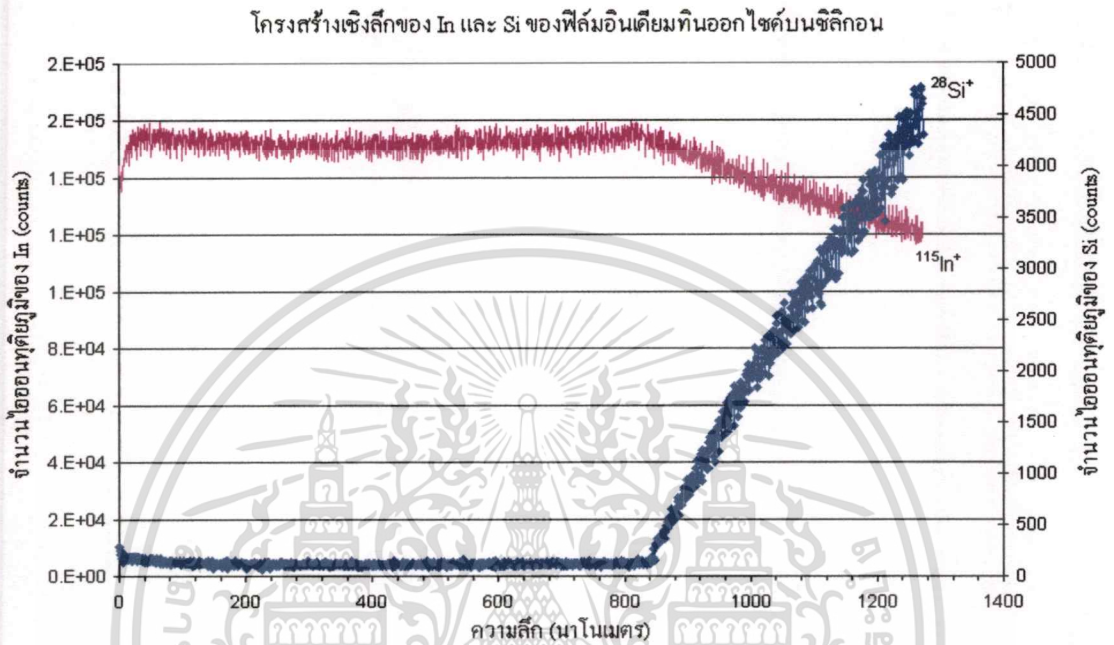
รูปที่ 4.46 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไอออนทุติยภูมิ In และ Si ของฟิล์มอินเดียมทินออกไซด์บนซิลิกอนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา เมื่อมีการสแกนลำไอออน



รูปที่ 4.47 ผลการวัดความลึกด้วยเครื่องวัดโครงสร้างของพื้นผิว

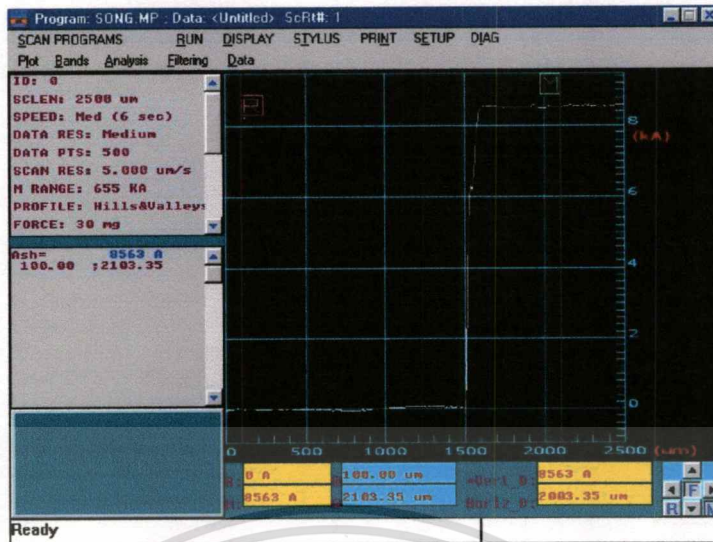
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองโดยใช้เวลาในการวัดโครงสร้างเชิงลึก 210 นาที สามารถวัดความลึกของ หลุมเกิดขึ้น จากการสปีดเตอร์ได้ 1273.7 นาโนเมตร คำนวณอัตราการสปีดเตอร์ได้เท่ากับ 6.1 นาโนเมตรต่ออนาที เมื่อทำการแปลงสเกลเวลาของการวิเคราะห์แบบไดนามิกในรูปที่ 4.46 เป็น ความลึก จะได้โครงสร้างเชิงลึกดังรูปที่ 4.48



รูปที่ 4.48 โครงสร้างเชิงลึกของ In และ Si ของฟิล์มอินเดียมทินออกไซด์บนซิลิกอน เมื่อทำการวัดแบบสแกนลำไอออน

จากรูปที่ 4.48 ลักษณะโครงสร้างเชิงลึกของ In และ Si ที่มุมตกกระทบ 45 องศา เมื่อทำการวิเคราะห์แบบสแกนลำไอออน จะเห็นว่าจุดที่ปริมาณไอออนทุติยภูมิของซิลิกอนเริ่มเพิ่มขึ้น และปริมาณไอออนทุติยภูมิของอินเดียมเริ่มลดลง คือตำแหน่งรอยต่อระหว่างฟิล์มอินเดียมทินออกไซด์กับซิลิกอนที่จุดนี้วัดความหนาของฟิล์มอินเดียมทินออกไซด์ได้ 842 นาโนเมตร เมื่อทำการวัดความหนาของฟิล์มอินเดียมทินออกไซด์บนสารกึ่งตัวนำซิลิกอนด้วยเครื่องวัดโครงสร้างของพื้นผิว ได้ผลการวัดดังรูปที่ 4.49 ซึ่งได้ความหนา 856.3 นาโนเมตร ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับการวิเคราะห์มวลแบบไดนามิก



รูปที่ 4.49 ความหนาของฟิล์มอินเดียมทินออกไซด์วัดด้วยเครื่องวัดโครงสร้างของพื้นผิว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

ในบทนี้เป็นการสรุปผลการศึกษาเทคนิคการวิเคราะห์พื้นผิวด้วยเทคนิคการวิเคราะห์สเปกตรัมของมวล ไอออนทุติยภูมิและข้อเสนอแนะต่าง ๆ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษาเทคนิคการวิเคราะห์พื้นผิวด้วยเทคนิคการวิเคราะห์สเปกตรัมของมวล ไอออนทุติยภูมิ ได้ทำการทดลองวิเคราะห์สารตัวอย่าง ต่าง ๆ ได้แก่ สารกึ่งตัวนำซิลิกอนชนิดพี อลูมิเนียมฟอสเฟต ฟิล์มบางของอลูมิเนียมบนสารกึ่งตัวนำซิลิกอนชนิดพีที่มีความหนาแตกต่างกัน 2 ตัวอย่าง และสารกึ่งตัวนำซิลิกอนชนิดพีซึ่งเคลือบด้วยอินเดียมทินออกไซด์ การทดลองเริ่มต้นที่การหาพารามิเตอร์ของระบบวิเคราะห์มวลที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานในแต่ละกรณี จากนั้นจึงเป็นการทดลองเพื่อศึกษาผลของมุมตกกระทบที่มีต่อปริมาณการเกิด ไอออนทุติยภูมิจากพื้นผิว ข้อมูลจากการทดลองทั้งสองนี้จะนำมาใช้สำหรับการทดลองเพื่อศึกษาองค์ประกอบของพื้นผิวและโครงสร้างเชิงลึกของสารตัวอย่างชนิดต่างๆ ด้วยวิธีการวิเคราะห์แบบสถิตและแบบไดนามิก ตามลำดับผลการทดลองต่าง ๆ สามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 การทดลองเพื่อศึกษาผลของมุมตกกระทบที่มีต่อปริมาณการเกิด ไอออนทุติยภูมิซึ่งทำโดยการวิเคราะห์สารกึ่งตัวนำซิลิกอนชนิดพี ที่มุมต่าง ๆ โดยการวิเคราะห์มวลแบบสถิตพบว่า ปริมาณการเกิด ไอออนทุติยภูมิมีค่าเพิ่มขึ้นตามมุมตกกระทบของลำไอออนปฐมภูมิที่เพิ่มขึ้นจนมีค่าสูงสุดที่มุมตกกระทบประมาณ 60 องศา เมื่อมุมตกกระทบมากกว่า 60 องศา ปริมาณการเกิด ไอออนทุติยภูมิจะเริ่มมีค่าลดลง

5.1.2 จากการศึกษารูปพื้นผิวของสารกึ่งตัวนำซิลิกอนชนิดพีที่มีโบรอนเป็นสารเจือ ระบบวิเคราะห์ไม่สามารถตรวจพบโบรอนในรูปของธาตุเดี่ยว ๆ เลขแต่จะพบในรูปของสารประกอบ BO และ SiB มากกว่า นอกจากนี้ ระบบวิเคราะห์ยังตรวจพบสิ่งตกค้าง ได้แก่ SiO และ SiOH อยู่ด้วย ถึงแม้สารตัวอย่างนี้จะผ่านการทำความสะอาดมาแล้วก็ตาม

5.1.3 ระบบวิเคราะห์พื้นผิวด้วยเทคนิคการวิเคราะห์สเปกตรัมของมวล ไอออนทุติยภูมิ นอกจากใช้ศึกษาองค์ประกอบของพื้นผิวแล้ว ยังสามารถวัด natural abundance of isotope ได้ จากการทดลองพบว่า ^{28}Si : ^{29}Si : ^{30}Si มีค่า 85.4 % : 12.2 % : 2.5 % เมื่อเทียบกับค่ายอมรับคือ 92.2 % : 4.7 % : 3.1 % ถือว่าต่างกันไม่มาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.4 การศึกษาพื้นผิวของอลูมิเนียมฟอยล์ สามารถตรวจพบถึงเจือปน เช่น AIN, AIO, AIOH และ Mg บนพื้นผิวทั้งสองด้าน แต่พบที่พื้นผิวด้านหน้า (ด้านเรียบเงา) มากกว่า โดยการวิเคราะห์แบบไดนามิก พบว่า Mg มีปริมาณลดลงอย่างรวดเร็วตามความลึก แสดงว่า Mg ไม่ใช่องค์ประกอบของเนื้ออลูมิเนียมฟอยล์ แต่เป็นเพียงสิ่งปนเปื้อนที่อาจเกิดจากสิ่งแวดล้อมและวิธีการจัดเก็บ

5.1.5 फिल्मบางของอลูมิเนียมบนซิลิกอน 2 ตัวอย่าง ที่ปลูกด้วยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนด้วยความหนา 100 นาโนเมตร (ตัวอย่างที่ 1) และ 170 นาโนเมตร (ตัวอย่างที่ 2) จากการวิเคราะห์แบบสทิต พบสารปนเปื้อน ได้แก่ Na , AIC, AIN , NaOH และ C_2H_2 บนพื้นผิวของสารตัวอย่างทั้งสอง แต่สารตัวอย่างที่ 2 มีสารปนเปื้อน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง Na และ AIC น้อยกว่ามาก

5.1.6 การศึกษาอัตราการสปีดเตอร์ของซิลิกอนและอลูมิเนียม ที่มุมตกกระทบ 0 , 30 และ 60 องศา พบว่า อัตราการสปีดเตอร์มีค่าสูงขึ้นเมื่อมุมตกกระทบเพิ่มขึ้น โดยอัตราการสปีดเตอร์ของซิลิกอนและอลูมิเนียมมีค่าใกล้เคียงกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่มุม 0 และ 30 องศา

5.1.7 การวัดความหนาของฟิล์มบางอลูมิเนียมบนซิลิกอนทั้ง 2 ตัวอย่าง โดยเทคนิคการวิเคราะห์แบบไดนามิก วัดความหนาของสารตัวอย่างที่ 1 ได้ 93 นาโนเมตร เมื่อเทียบกับการวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ซึ่งวัดได้ 99 นาโนเมตร ส่วนตัวอย่างที่ 2 ทำการวัดที่มุมตกกระทบ 0 และ 30 องศา ได้ความหนาของฟิล์มบางวัดได้ 171 และ 169 นาโนเมตร ตามลำดับ เมื่อสอบเทียบกับการวัดด้วยเครื่องวัดโครงสร้างของพื้นผิว ซึ่งวัดได้ประมาณ 166 นาโนเมตร ซึ่งถือว่ามีความแตกต่างกันเล็กน้อย

5.1.8 สารตัวอย่างสุดท้ายที่ทำการศึกษาคือฟิล์มอินเดียมทินออกไซด์บนแผ่นซิลิกอนซึ่งปลูกโดยวิธีอาร์เอฟแมกนีตรอนสปีดเตอร์ริง (ใช้ก๊าซไนโตรเจน) ซึ่งมีส่วนประกอบสำคัญคือ In_2O_3 90% และ SnO_2 10 % จากการศึกษาโดยการวิเคราะห์แบบสทิต พบอลูมิเนียมและสารประกอบของอลูมิเนียมบนพื้นผิว ซึ่งอาจเกิดจากประวัติการใช้งานของระบบปลูกฟิล์มและจากแผ่นอลูมิเนียมฟอยล์ที่มาปิดบนแผ่นซิลิกอนขณะปลูกฟิล์มเพื่อเป็นจุดอ้างอิงในการวัดความหนา สารประกอบของ คาร์บอนและไฮโดรเจน เกิดมาจากสิ่งแวดล้อมและมีอยู่มากบริเวณพื้นผิว สารประกอบของออกซิเจนเกิดจากองค์ประกอบของสารที่ใช้ปลูกฟิล์ม ส่วนสารประกอบของไนโตรเจนเกิดจากก๊าซที่ใช้ในกระบวนการปลูกฟิล์ม

5.1.9 ความหนาของฟิล์มอินเดียมทินออกไซด์บนแผ่นซิลิกอน ซึ่งวัดโดยการวิเคราะห์แบบไดนามิก โดยทำการวิเคราะห์แบบสแกนลำไอออน ที่มุมตกกระทบ 45 องศา ได้ความหนาประมาณ 842 นาโนเมตร เมื่อเทียบกับการวัดด้วยเครื่องวัดโครงสร้างของพื้นผิว ซึ่งวัดได้ 856.3 นาโนเมตร จะเห็นว่ามีความแตกต่างกันเล็กน้อย

5.2 ข้อเสนอแนะ

เทคนิคที่ใช้ในการศึกษาพื้นผิวของวัสดุหลายวิธี ในปัจจุบันยังไม่มีเทคนิคใดที่ให้ข้อมูลการวิเคราะห์ครบถ้วน แต่ละเทคนิคจะให้ข้อมูลเพียงบางส่วน เช่น เทคนิค SEM (Scanning Electron Microscope) และ AFM (Atomic Force Microscope) จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับโครงสร้างของพื้นผิวหรือการจัดเรียงตัวของอะตอมที่พื้นผิว เทคนิค XPS (X-ray Photoelectron Spectroscopy) และ FTIR (Fourier Transform Infrared) จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับระดับพลังงานและพันธะทางเคมีของอะตอมและโมเลกุล การศึกษาพื้นผิวในวิทยานิพนธ์นี้ใช้เทคนิคการวิเคราะห์มวลของไอออนทุติยภูมิ ซึ่งเป็นเทคนิคที่ให้ข้อมูลเกี่ยวกับธาตุและองค์ประกอบเชิงเคมีของพื้นผิว เป็นเทคนิคที่นิยมใช้วิเคราะห์สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากเป็นวิธีที่มีความเร็วในการวัดและวิเคราะห์ในระดับดี มีความละเอียดในการแยกชั้นความลึกและมีความแม่นยำสูง ตลอดจนมีความไวสูงมากถึงระดับ 1 ppb แต่มีข้อเสียที่มีผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณได้ไม่ดีนัก

ปัญหาอย่างหนึ่งที่พบในการทดลองคือ การแทรกสอดของมวล (mass interference) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่ ไอออนของธาตุหรือ โมเลกุลหรือสารประกอบ ต่างชนิดกัน แต่ปรากฏที่มวลต่อประจุค่าเดียวกันในสเปกตรัมมวล ทำให้การแปลผลมีความยุ่งยากและอาจผิดพลาดได้ ปัญหานี้อาจลดลงได้ในระดับหนึ่งโดยการทำวิเคราะห์แบบ Profile scan ซึ่งทำให้สามารถแยกความแตกต่างระหว่างอะตอมกับ โมเลกุลได้ หรืออาจใช้การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอื่นร่วมด้วย เช่น เทคนิค AES (Auger Electron Spectroscopy) เป็นต้น แต่มีข้อจำกัดที่ AES ให้ข้อมูลเกี่ยวกับธาตุเพียงอย่างเดียว ไม่สามารถให้ข้อมูลเกี่ยวกับองค์ประกอบเชิงเคมีได้ และมีความไวต่ำกว่ามากกล่าวคือต่ำกว่าถึงประมาณ 1 ล้านเท่า

การศึกษาด้านการวิเคราะห์พื้นผิวด้วยเทคนิคการวิเคราะห์มวลของไอออนทุติยภูมิ ที่ควรทำต่อในอนาคตคือการศึกษาคอนสตรัคชันเชิงลึกของฟิล์มบางหลายชั้น เนื่องจากสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำในปัจจุบันมีโครงสร้างเป็นฟิล์มบางหลายชั้นมากขึ้น เทคนิคการวิเคราะห์พื้นผิวด้วยเทคนิคการวิเคราะห์มวลของไอออนทุติยภูมิ สามารถศึกษาองค์ประกอบและความหนาของชั้นฟิล์มได้ การศึกษานอกจากจะได้ทักษะความชำนาญแล้ว ยังทำให้ทราบข้อจำกัดของเครื่องมือที่มีอยู่ด้วย

บรรณานุกรม

- [1] John C. Vickerman, Alan Brown, Nicola M. Reed , **Secondary Ion Mass Spectrometry.** Clarendon Press , Oxford ,1989
- [2] R.G Wilson, F.A. Stevie , C.W. Magee , **Secondary Ion Mass Spectrometry.** New York: John Wiley & Sons, Ltd., 1989.
- [3] John C. Vickerman , **Surface Analysis –The Principal Techniques.** New York: John Wiley & Sons, Ltd., 1997.
- [4] Leonard C. Feldman , James W. Mayer , **Fundamentals of Surface and Thin Film Analysis.** New York :North-Holland, 1986
- [5] A. Benninghoven, F.G. Rudenauer and H.W. Werner , **Secondary Ion Mass Spectrometry basic concepts ,instrument aspects, applications and trends.** New York: John Wiley & Sons, Ltd., 1987.
- [6] C.N. Granger and F. A. Stevie , **Relative Atomic and Molecular Secondary Ion Yields for SIMS O₂⁺ Analysis of Column 13ta Ion Implants in Silicon.** Surface Science Spectra , Vol. 7, No. 2, pp.114-121, Nov 2000.
- [7] C. Hongo, M. Tomita, A. Murakoshi , M. Takenaka and M. Suzuke , **“Depth profiling for ultrashallow implants using backside secondary ion mass spectrometry.”** J. Vac. Sci. Technol. B 21(4), pp.1422-1427, July 2003.
- [8] Steven W. Novak , **“Characterizing flat panel display materials using quadrupole-based secondary ion mass spectrometry.”** J. Vac. Sci. Technol. A 15(3), pp. 1724-1728, Jun 1997.
- [9] MARSBED H. HABLANIAN, **High-Vacuum Technology A Practical Guide.** New York and Basel, 1990
- [10] R. Loesing, G.M. Guryanov, M. S. Phillips, and D.P. Griffis, **“parison of secondary ion mass spectroscopy analysis of ultrashallow phosphorus using Cs⁺ , O₂⁺, and CsC₆-primary ion beam.”** J Vac, Sci, Technol. B 20(2), pp.507-511, Mar/Apr 2002

ประวัติผู้เขียน

นางสาวสุทธินาถ หนูทองแก้ว เกิดเมื่อวันที่ 30 พฤศจิกายน พ.ศ.2520 ที่จังหวัดสุราษฎร์ธานี สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง ในปีการศึกษา 2543 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2545



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้