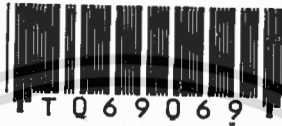


สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาความสะอาดของพื้นผิวซิลิกอนด้วยเทคนิค

ไอเจอิเล็กทรอนิกส์สเปกโทรสโกปี

STUDY OF SILICON SURFACE CLEANLINES USING TECHNIQUE OF
AUGER ELECTRON SPECTROSCOPY



ณัฐรา โยธาคำ
NATRADA YOTHAKHAM

ฉพ.
๓๖349๗
2549

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 69069
วัน,เดือน,ปี..... - 7 ก.พ. 2550

b... 117 00529
i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**STUDY OF SILICON SURFACE CLEANLINESSE USING TECHNIQUE OF
AUGER ELECTRON SPECTROSCOPY**



**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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ **2006** เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2006

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินทางปัญญาของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ขออนุญาตจากสถาบันฯ ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษาความสะอาดของพื้นผิวซิลิกอนด้วยเทคนิค
ไอเจ็ลอิเล็กตรอนเปกโทรสโกปี

นักศึกษา

นางสาวฉัฐรดา โยธาคำ

รหัสประจำตัว

45064005

ปริญญา

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต

สาขาวิชา

ฟิสิกส์ประยุกต์

พ.ศ.

2549

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ผศ.ดร.วราวุฒิ เถาลัดดา

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาและตรวจสอบความสะอาดพื้นผิวของซิลิกอนด้วยเทคนิคไอเจ็ลอิเล็กตรอนเปกโทรสโกปี ซึ่งได้ทำความสะอาดแผ่นซิลิกอนเพื่อกำจัดคราบไขมันและออกไซด์ ด้วยกระบวนการทำความสะอาด 2 วิธี คือวิธีการทางเคมีและวิธีการสปีดเตอร์ด้วยลำไอออนพลังงานสูง ความสะอาดของพื้นผิวจะถูกวิเคราะห์ด้วยเทคนิคไอเจ็ลอิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปีเปรียบเทียบทั้งก่อนและหลังการทำความสะอาด โดยใช้ตัวบ่งชี้ถึงความสะอาดคือขนาดสัญญาณไอเจ็ลของซิลิกอน(พลังงาน 92 อิเล็กตรอนโวลต์) คาร์บอน(พลังงาน 272 อิเล็กตรอนโวลต์) และออกซิเจน(พลังงาน 508 อิเล็กตรอนโวลต์) สัญญาณไอเจ็ลของซิลิกอนที่มีขนาดใหญ่ขึ้นในขณะที่สัญญาณไอเจ็ลของคาร์บอนและออกซิเจนที่มีขนาดเล็กลงจะแสดงว่าพื้นผิวมีความสะอาดมากขึ้น สำหรับกระบวนการทางเคมีใช้วิธีการล้างด้วยกระบวนการ RCA พบว่าเงื่อนไขที่ดีที่สุดคือใช้สารละลาย $\text{NH}_4\text{OH} : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O}$ อัตราส่วน 1:1:5 ที่ 80°C เป็นเวลา 10 นาที สำหรับการกำจัดคราบไขมัน และสารละลาย $\text{HF} : \text{H}_2\text{O}$ อัตราส่วน 1:10 ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 15 วินาที สำหรับการกำจัดออกไซด์ จากการวิเคราะห์พบว่าสัญญาณไอเจ็ลของคาร์บอนและออกซิเจนลดลงเหลือประมาณ 18.32 % และ 47.22 % ตามลำดับ และพบว่าสัญญาณไอเจ็ลของซิลิกอนมีขนาดเพิ่มขึ้นประมาณ 2 เท่า สำหรับการทำความสะอาดโดยการสปีดเตอร์ด้วยลำไอออนของอาร์กอนพลังงาน 2 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ เป็นเวลา 150 นาที พบว่าสัญญาณไอเจ็ลของคาร์บอนและออกซิเจนลดลงเหลือประมาณ 3.61 % และ 17.70 % ตามลำดับ และพบว่าสัญญาณไอเจ็ลของซิลิกอนมีขนาดเพิ่มขึ้นประมาณ 7 เท่า จากการตรวจสอบโครงสร้างผลึกของพื้นผิวด้วยเทคนิค LEED หลังการอบสารตัวอย่างที่อุณหภูมิประมาณ 1000°C เป็นเวลา 2 นาที พบโครงสร้าง $\text{Si}(100)-2\times 1$ อย่างชัดเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | |
|-----------------------|---|
| Thesis Title | Study of Silicon Surface Cleanliness Using Technique of Auger Electron Spectroscopy |
| Student | Miss Natrada Yothakham |
| Student ID. | 45064005 |
| Degree | Master of Science |
| Program | Applied Physics |
| Year | 2006 |
| Thesis Advisor | Asst. Prof. Dr. Warawoot Thowladda |

ABSTRACT

This thesis proposes a study and identification of semiconductor surface cleanliness using Auger electron spectroscopy. Hydrocarbon and native oxide contamination on silicon surface were removed by 2 cleaning processes : chemical process and ion sputtering process. Before and after cleaning processes the surface cleanliness was evaluated by Auger signal of silicon (92 eV), carbon (272 eV) and oxygen (508 eV). The higher of silicon signal in addition to the lower of carbon and oxygen signals indicate the cleanliness of the surface. RCA process was used as chemical cleaning. For hydrocarbon contamination removal a mixture solution of $\text{NH}_4\text{OH} : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O}$ in a ratio of 1:1:5 at 80°C for 10 minutes was used. A mixture solution of $\text{HF} : \text{H}_2\text{O}$ in a ratio of 1:10 at room temperature for 15 s was used to remove the native silicon dioxide thin film on the surface. By comparing before and after cleaning, it was found that Auger signal of silicon was 2 times higher and Auger signal of carbon and oxygen were decreased to 18.32 % and 47.22% respectively. For sputtering cleaning process the silicon surface was bombarded with 2 keV Ar^+ for 150 minutes. By comparing before and after sputtering found that Auger signal of silicon was 7 times higher and Auger signal of carbon and oxygen were decreased to 3.61 % and 17.7 % respectively. After annealing the sample to 1000°C for 2 minute the crystal structure ordering of the surface was investigated by the technique of low energy electron diffraction. LEED pattern of silicon surface display clearly a $\text{Si}(100)\text{-}2\times 1$ reconstruction.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้ดี เนื่องจากได้รับความเมตตากรุณาเป็นอย่างยิ่งจาก ผศ. ดร. วราวุฒิ เถาถัดดา อาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้ซึ่งให้คำปรึกษาและแนะนำแนวทางในการดำเนินงานวิจัย รวมทั้งให้โอกาสข้าพเจ้าได้เรียนรู้และได้รับประสบการณ์หลายด้าน ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการดำเนินชีวิตได้ในอนาคต ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์ และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. เจริญชัย ไชยสิทธิ์ ที่กรุณาช่วยให้คำปรึกษาและเสนอแนะแนวทางการแก้ไขรูปแบบวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ อ.ศ. ทิพวรรณ คล้ายบุญมี ผู้ช่วยแนะนำและให้ข้าพเจ้าได้ฝึกหัดทำงานตั้งแต่เริ่มดำเนินงานวิจัย

ขอขอบคุณ คุณวิชัย ทิภา ที่ช่วยให้งานวิจัยดำเนินการได้ในขั้นต้น คุณเจริญชัย เหลืองอ่อน ที่ให้ความอนุเคราะห์ด้านสารตัวอย่าง

ขอขอบคุณ พี่อมร และ พี่ชิวะ ผู้ที่เป็นทั้งพี่และเพื่อนและอยู่เป็นเพื่อนข้าพเจ้าเสมอ

ขอขอบคุณ พี่แหลม รวมทั้งเพื่อนๆ ในห้องวิจัย และผู้มีส่วนร่วมในงานวิจัยที่ไม่ได้เอ่ยชื่อทุกๆ ท่าน

สุดท้ายข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ขอขอบพระคุณ คุณความรักที่ บิดา มารดา รวมทั้งพี่ชาย ที่มีต่อข้าพเจ้า ซึ่งล้วนเป็นแรงใจ ส่งเสริมให้ข้าพเจ้ามีชีวิตที่ดี และมีส่วนให้สามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขออุทิศแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

ณัฐรดา โยธาคำ

สารบัญ

| | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | I |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | II |
| กิตติกรรมประกาศ..... | III |
| สารบัญ..... | IV |
| สารบัญตาราง..... | VII |
| สารบัญรูป..... | VIII |
| บทที่ 1 บทนำ..... | 1 |
| 1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย..... | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย..... | 2 |
| 1.3 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในงานวิจัย..... | 2 |
| 1.4 ขอบเขตของงานวิจัย..... | 3 |
| 1.5 วิธีการดำเนินการ การทำวิทยานิพนธ์..... | 3 |
| 1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย..... | 4 |
| บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี..... | 5 |
| 2.1 กระบวนการเกิดไอเจอิเล็กทรอนิกส์..... | 5 |
| 2.2 การกระเจิงของอิเล็กตรอน..... | 7 |
| 2.2.1 การกระตุ้นพลาสมอน (Plasmon excitaion)..... | 8 |
| 2.2.2 การปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electrons)..... | 8 |
| 2.2.3 การปลดปล่อยรังสีเอกซ์ต่อเนื่อง (continuous X-ray)..... | 8 |
| 2.2.4 โฟนอน (phonon)..... | 8 |
| 2.3 ปริมาตรในการวิเคราะห์ไอเจอิเล็กทรอนิกส์ (Auger analytical Volumes)..... | 11 |
| 2.4 ภาคตัดขวางของการแตกตัวเป็นไอออน (Ionization Cross Section)..... | 12 |
| 2.5 ความลึกของการหลบหนี (Escape Depth)..... | 13 |
| 2.6 การเลือกพลังงานของอิเล็กตรอนปฐมภูมิ (Choice of primary beam energy)..... | 14 |
| 2.7 การเลื่อนเชิงเคมี (Chemical Shifts)..... | 17 |
| 2.8 ไอเจอิเล็กทรอนิกส์สเปกโทรสโกปี..... | 18 |
| 2.8.1 การบันทึกข้อมูล (Data recording)..... | 20 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตเห็นไปเสียประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ IV ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|--|------|
| 2.9 ประโยชน์ของไอเจ็ล็กตรอนสเปกโทรสโกปี..... | 23 |
| 2.10 ข้อจำกัดของไอเจ็ล็กตรอนสเปกโทรสโกปี..... | 24 |
| 2.11 การวิเคราะห์เชิงปริมาณ..... | 24 |
| 2.12 การวิเคราะห์โครงสร้างเชิงลึกด้วยไอเจ็ล็กตรอนสเปกโทรสโกปี..... | 26 |
| 2.13 เครื่องมือในการวิเคราะห์ไอเจ็ล็กตรอนสเปกโทรสโกปี..... | 27 |
| 2.13.1 ความเป็นมา..... | 27 |
| 2.13.2 เครื่องวิเคราะห์พลังงานของอิเล็กตรอน (Electron Energy Analyzer)..... | 28 |
| 2.13.3 แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนปฐมภูมิ..... | 29 |
| 2.13.4 ตัวตรวจวัด ไอเจ็ล็กตรอน (AES Detectors) | 30 |
| 2.14 Low Energy Electron Diffraction (LEED) | 31 |
| 2.14.1 ทฤษฎีพื้นฐานของ LEED..... | 31 |
| 2.14.2 Reciprocal Lattices ของพื้นผิว..... | 33 |
| 2.15 การทำความสะอาดพื้นผิวสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor Surface Cleaning)..... | 36 |
| 2.15.1 การทำความสะอาดพื้นผิวด้วยการล้างทางเคมี (Chemical Cleaning)..... | 36 |
| 2.15.2 การทำความสะอาดพื้นผิวด้วยลำไอออน (Ion Sputtering Cleaning)..... | 39 |
| บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย..... | 44 |
| 3.1 ระบบสุญญากาศ..... | 44 |
| 3.1.1 ระบบปั๊มสุญญากาศ..... | 44 |
| 3.1.2 แคมเบอร์สุญญากาศ..... | 46 |
| 3.1.3 แคมเบอร์สุญญากาศระดับความดันสุญญากาศสูงยิ่ง..... | 48 |
| 3.2 ระบบวิเคราะห์ด้วยเทคนิคไอเจ็ล็กตรอนสเปกโทรสโกปี | 50 |
| 3.2.1 ไอเจ็ล็กตรอนสเปกโทรมิเตอร์..... | 51 |
| 3.2.2 การเชื่อมต่ออุปกรณ์..... | 55 |
| 3.3 แหล่งกำเนิดไอออนพลังงานสูง..... | 56 |
| 3.4 การใช้งานระบบวิเคราะห์ไอเจ็ล็กตรอนสเปกโทรสโกปี..... | 56 |
| 3.4.1 วิธีการวัด..... | 56 |
| 3.4.2 การใช้โปรแกรม AES Analysis | 57 |
| 3.5 ขั้นตอนการทำความสะอาดแผ่นซิลิกอน..... | 60 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการใช้งานเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเห็นใบเซิร์ฟเวอร์ของตนมีการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|---|------------|
| 3.5.1 การทำความสะอาดด้วยกระบวนการทางเคมี..... | 60 |
| 3.5.2 การทำความสะอาดโดยการสปีดเตอร์..... | 63 |
| 3.6 การศึกษาโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค LEED..... | 64 |
| บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล..... | 66 |
| 4.1 ผลการทดลองการอบแรมเบอร์สูญญากาศ..... | 66 |
| 4.2 การศึกษาความสะอาดของพื้นผิวซิลิกอน โดยการล้างด้วยกระบวนการเคมี..... | 68 |
| 4.2.1 การศึกษาการทำความสะอาดขั้นตอนการล้างกำจัดคราบไขมัน..... | 69 |
| 4.2.2 การศึกษาการทำความสะอาดขั้นตอนการล้างกำจัดชั้นออกไซด์..... | 95 |
| 4.2.3 การศึกษาการทำความสะอาดด้วยกระบวนการ RCA..... | 104 |
| 4.2.4 การศึกษาการทำความสะอาดด้วยกระบวนการปีรันยา (piranha)..... | 107 |
| 4.2.5 การศึกษาการทำความสะอาดด้วยเงื่อนไขที่เหมาะสม..... | 110 |
| 4.3 การศึกษาความสะอาดของพื้นผิวซิลิกอนหลังผ่านกระบวนการสปีดเตอร์..... | 113 |
| 4.4 การศึกษาโครงสร้างผลึกของพื้นผิวด้วยเทคนิค LEED..... | 117 |
| บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ..... | 119 |
| 5.1 สรุปผลการวิจัย..... | 119 |
| 5.1.1 การล้างกำจัดคราบไขมัน..... | 119 |
| 5.1.2 การล้างกำจัดชั้นออกไซด์..... | 120 |
| 5.1.3 การล้างด้วยกระบวนการ RCA เปรียบเทียบกับเงื่อนไขที่ดีที่สุด..... | 120 |
| 5.1.4 การทำความสะอาดด้วยกระบวนการสปีดเตอร์..... | 121 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ..... | 121 |
| เอกสารอ้างอิง..... | 123 |
| ประวัติผู้เขียน..... | 125 |

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|---|------|
| 2.1 ขนาดของสัญญาณ โอเจและแบกกราวด์ที่เปลี่ยนแปลงตามพลังงานของอิเล็กตรอนปฐมภูมิ...16 | |
| 4.1 ข้อมูลขนาดความสูงของสัญญาณ โอเจของคาร์บอนจากการล้างด้วยเวลาต่างๆ.....71 | |
| 4.2 ข้อมูลขนาดความสูงของสัญญาณ โอเจของซัลฟอนจากการล้างด้วยเวลาต่างๆ.....72 | |
| 4.3 ข้อมูลขนาดความสูงของสัญญาณ โอเจของออกซิเจนจากการล้างด้วยเวลาต่างๆ.....72 | |
| 4.4 ข้อมูลขนาดความสูงของสัญญาณ โอเจของคาร์บอน ซัลฟอนและออกซิเจนเมื่อล้างด้วย $\text{NH}_4\text{OH} : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O}$ อัตราส่วน 2:2:5 ที่เวลาต่างๆ.....76 | |
| 4.5 ข้อมูลขนาดความสูงของสัญญาณ โอเจของคาร์บอน ซัลฟอนและออกซิเจนเมื่อล้างด้วย $\text{NH}_4\text{OH} : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O}$ อัตราส่วน 1:1:10 ที่เวลาต่างๆ.....80 | |
| 4.6 ข้อมูลขนาดความสูงของสัญญาณ โอเจของคาร์บอน ซัลฟอนและออกซิเจนเมื่อล้างด้วย $\text{NH}_4\text{OH} : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O}$ อัตราส่วน 1:1:5 ที่เวลาต่างๆ.....86 | |
| 4.7 ข้อมูลขนาดความสูงของสัญญาณ โอเจของคาร์บอน ซัลฟอนและออกซิเจนเมื่อล้างด้วย $\text{NH}_4\text{OH} : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O}$ อัตราส่วน 1:1:5 ในช่วงเวลา 10 นาทีแรก.....93 | |
| 4.8 ข้อมูลขนาดความสูงของสัญญาณ โอเจของคาร์บอน ซัลฟอนและออกซิเจนเมื่อล้างด้วย $\text{HF}:\text{H}_2\text{O}$ ในอัตราส่วนต่างๆ.....100 | |
| 4.9 ข้อมูลขนาดความสูงของสัญญาณ โอเจของคาร์บอน ซัลฟอนและออกซิเจนเมื่อล้างด้วย กระบวนการ RCA ครบทุกขั้นตอน.....105 | |
| 4.10 ข้อมูลขนาดความสูงของสัญญาณ โอเจของคาร์บอน ซัลฟอนและออกซิเจนเมื่อล้างด้วย กระบวนการปรีนยา.....107 | |
| 4.11 ข้อมูลขนาดความสูงของสัญญาณ โอเจของคาร์บอน ซัลฟอนและออกซิเจนเมื่อล้างด้วย เงื่อนไขที่เหมาะสม.....111 | |
| 4.12 ข้อมูลขนาดความสูงของสัญญาณ โอเจของคาร์บอน ซัลฟอนและออกซิเจนเปรียบเทียบ ระหว่างการล้างด้วยกระบวนการRCAและเงื่อนไขที่เหมาะสม.....112 | |
| 4.13 ข้อมูลขนาดสัญญาณ โอเจของซัลฟอน คาร์บอนและออกซิเจนเมื่อสปีดเตอร์ที่เวลาต่างๆ....113 | |

สารบัญรูป

| รูปที่ | หน้า |
|--------|---|
| 2.1 | กระบวนการเกิดไอเจอิเล็กทรอนิกส์เปรียบเทียบกับกระบวนการเกิดรังสีเอกซ์.....6 |
| 2.2 | พลังงานไอเจอิเล็กทรอนิกส์ของธาตุต่าง ๆ.....7 |
| 2.3 | สเปกตรัมของอิเล็กทรอนิกส์จากสารตัวอย่างโบรอน เมื่อยิงด้วยอิเล็กทรอนิกส์ ปฐมภูมิพลังงาน 1 keV.....10 |
| 2.4 | ปริมาณในการวิเคราะห์ไอเจอิเล็กทรอนิกส์.....11 |
| 2.5 | ภาคตัดขวางของการแตกตัวเป็นไอออนเป็น ฟังก์ชันของพลังงานของอิเล็กทรอนิกส์ ปฐมภูมิ E_p และระดับพลังงานชั้นใน E_w13 |
| 2.6 | ระยะปลอดการชนของไอเจอิเล็กทรอนิกส์ λ ที่ขึ้นกับพลังงานจลน์.....14 |
| 2.7 | ตัวอย่างของ chemical Shift ใน AES17 |
| 2.8 | ระดับพลังงานของอะลูมิเนียมในองค์ประกอบที่แตกต่างกัน.....18 |
| 2.9 | อุปกรณ์การทดลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ไอเจอิเล็กทรอนิกส์สเปกโทรสโกปี.....19 |
| 2.10 | สเปกตรัมของอิเล็กทรอนิกส์ที่หลุดออกมาจากของแข็ง เมื่อถูกยิงด้วยลำอิเล็กทรอนิกส์ปฐมภูมิ พลังงาน 2 กิโลอิเล็กทรอนิกส์โวลต์ ส่วนรูปที่แทรกเป็นการขยายให้เห็นสัญญาณ ไอเจ อิเล็กทรอนิกส์.....19 |
| 2.11 | สเปกตรัม $N(E)$ ประกอบด้วยสามส่วนคือ แบกกราวด์ต่อเนื่อง ซึ่งอยู่ในรูปของฟังก์ชัน AE^{-M} ส่วนโค้งเกาส์เซียนของสัญญาณ ไอเจและส่วนพลังงานต่ำซึ่งอยู่ในรูปของฟังก์ชัน $A'E^{-M}$ ส่วนสเปกตรัมที่อยู่ด้านล่าง เป็นสเปกตรัมจากการหาอนุพันธ์อันดับที่ 1 โดยที่ พลังงาน E_A มีค่าต่ำที่สุด ซึ่งจะสอดคล้องกับความชันสูงสุดของเส้นสเปกตรัม $N(E)$21 |
| 2.12 | การเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่างของสัญญาณ ไอเจกับ โวลตจที่ใช้ในการมอดูเลต.....23 |
| 2.13 | อุปกรณ์ในการทดลอง ไอเจอิเล็กทรอนิกส์สเปกโทรสโกปีร่วมกับแหล่งกำเนิดลำไอออน ที่ใช้ในการสปีดเตอร์สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างเชิงลึก.....27 |
| 2.14 | เครื่องวิเคราะห์พลังงานของอิเล็กทรอนิกส์แบบ cylindrical mirror analyzer(CMA).....28 |
| 2.15 | เครื่องวิเคราะห์พลังงานอิเล็กทรอนิกส์แบบ retarding-field analyzer (RFA).....29 |
| 2.16 | โครงสร้างของเครื่องขยายสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์.....30 |
| 2.17 | การเลี้ยวเบนของอิเล็กทรอนิกส์.....32 |
| 2.18 | โครงสร้าง fcc(100) ของพื้นผิว.....33 |
| 2.19 | โครงสร้าง fcc(100) ของพื้นผิวและ reciprocal space.....34 |

สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 2.20 หน่วยเซลล์ (unit cell) ของพื้นผิวโลหะที่มีโครงผลึกเป็น fcc และ bcc ที่ระนาบต่าง ๆ และภาพการแทรกสอด (diffraction image) หรือ LEED pattern ของพื้นผิวที่ระนาบต่าง ๆ..... | 34 |
| 2.21 LEED pattern ของพื้นผิวที่เป็นไปได้ทั้งหมด 5 แบบ..... | 35 |
| 2.22 LEED pattern ของพื้นผิว Cu(110) ที่พลังงานของลำอิเล็กตรอน 90 และ 140 อิเล็กตรอนโวลต์..... | 35 |
| 2.23 การจัดแบ่งลักษณะพื้นผิว..... | 37 |
| 2.24 การชนในกระบวนการสปีดเตอริง..... | 40 |
| 2.25 สปีดเตอริงยึดของธาตุ Li ถึง Si ที่มุม 45 องศา..... | 41 |
| 2.26 สปีดเตอริงยึดของธาตุ Si เป็นฟังก์ชันของพลังงานและชนิดของลำไอออน..... | 42 |
| 2.27 ค่ายึดของการสปีดเตอริงเป็นฟังก์ชันของมุมตกกระทบของลำไอออน | 43 |
| 3.1 ไดอะแกรมแซมเบอร์สัจญูภาคที่ใช้ในงานวิจัย..... | 47 |
| 3.2 แซมเบอร์สัจญูภาคที่ใช้ในงานวิจัย..... | 47 |
| 3.3 ผลของการอบระบบสัจญูภาคที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงความดันตามเวลา..... | 49 |
| 3.4 ระบบวิเคราะห์พื้นที่ประกอบด้วยเทคนิคไอเจอิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี..... | 51 |
| 3.5 Back-Display LEED-AUGER สเปกโทรมิเตอร์ รุ่น BOL 800..... | 52 |
| 3.6 แหล่งกำเนิดลำอิเล็กตรอน(electron gun) รุ่น G 10..... | 53 |
| 3.7 Back-Display LEED-AUGER สเปกโทรมิเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัย..... | 53 |
| 3.8 แผนภาพแสดงไดอะแกรมของระบบวิเคราะห์วัดด้วยไอเจอิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี | 55 |
| 3.9 แหล่งกำเนิดลำไอออน รุ่น NGI 3000 ของ LK Technologies..... | 56 |
| 3.10 หน้าต่างโปรแกรม AES Analysis..... | 58 |
| 3.11 ไดอะล็อกบ็อกซ์ setting parameter..... | 59 |
| 3.12 ตัวอย่างหน้าต่างโปรแกรมที่วัดด้วยโปรแกรม AES Analysis..... | 59 |
| 3.13 แผ่นซิลิกอนที่ใช้ในการทดลอง..... | 60 |
| 3.14 ห้อง clean room สำหรับการทดลองล้างสารตัวอย่าง..... | 61 |
| 3.15 อุปกรณ์และสารเคมี..... | 61 |
| 3.16 แผนภาพแสดงขั้นตอนการล้างด้วยกระบวนการ RCA | 63 |
| 3.17 การจัดตำแหน่งสารตัวอย่างสำหรับการสปีดเตอริง..... | 64 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ผู้ใดเห็นไปใช้ประโยชน์ในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 4.1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของหลอดความร้อนและผนังแชมเบอร์ตามเวลา..... | 67 |
| 4.2 ระบบสุญญากาศที่มีความดันระดับ 10^{-10} มิลลิบาร์หลังการอบ..... | 68 |
| 4.3 สเปกตรัมของสัญญาณ โอเจแสดงให้เห็นสัญญาณ โอเจของซิติคอน คาร์บอน และออกซิเจน ปรากฏที่พลังงาน 92, 272 และ 508 อิเล็กตรอนโวลต์ตามลำดับ..... | 69 |
| 4.4 ขนาดของสัญญาณ โอเจของคาร์บอนที่เวลาต่าง ๆ เมื่อล้างด้วยขั้นตอน SC1..... | 70 |
| 4.5 ขนาดของสัญญาณ โอเจของคาร์บอนโดยเฉลี่ยจากสารตัวอย่างทั้ง 3 ชั้นที่เวลาต่างๆ เมื่อล้างด้วยขั้นตอนSC1..... | 71 |
| 4.6 สเปกตรัมของสัญญาณที่วัดจากแผ่นซิติคอนก่อนล้างและหลังสิ้นสุดการล้าง (35 นาที)..... | 73 |
| 4.7 ความสูงของสัญญาณ โอเจของซิติคอน โดยเฉลี่ยจากสารตัวอย่างทั้ง 3 ชั้นที่เวลาต่างๆ เมื่อล้างด้วยขั้นตอนSC1..... | 73 |
| 4.8 ขนาดของสัญญาณ โอเจของออกซิเจน โดยเฉลี่ยจากสารตัวอย่างทั้ง 3 ชั้นที่เวลาต่างๆ เมื่อล้างด้วยขั้นตอนSC1..... | 74 |
| 4.9 สเปกตรัมสัญญาณ โอเจของคาร์บอนเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังล้าง..... | 74 |
| 4.10 สเปกตรัมสัญญาณ โอเจของออกซิเจนเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังล้าง..... | 75 |
| 4.11 ขนาดของสัญญาณ โอเจของคาร์บอนที่เวลาต่างๆเมื่อล้างด้วยขั้นตอนSC1โดยการเพิ่ม อัตราส่วนของสารเคมีเป็น 2:2:5..... | 76 |
| 4.12 ขนาดของสัญญาณ โอเจของซิติคอนที่เวลาต่างๆเมื่อล้างด้วยอัตราส่วน 2:2:5..... | 77 |
| 4.13 ขนาดของสัญญาณ โอเจของออกซิเจนที่เวลาต่างๆเมื่อล้างด้วยอัตราส่วน 2:2:5..... | 77 |
| 4.14 สเปกตรัมเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังล้างด้วยอัตราส่วน2:2:5..... | 78 |
| 4.15 สัญญาณ โอเจของคาร์บอนเปรียบเทียบก่อนและหลังล้าง ด้วยอัตราส่วน 2:2:5..... | 78 |
| 4.16 สเปกตรัมสัญญาณ โอเจของคาร์บอนหลังการล้างที่เวลาต่าง ๆ ด้วยอัตราส่วน2:2:5..... | 79 |
| 4.17 สัญญาณ โอเจของออกซิเจนเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังล้างด้วยอัตราส่วน 2:2:5..... | 79 |
| 4.18 ขนาดของสัญญาณ โอเจของคาร์บอนที่เวลาต่างๆเมื่อล้างด้วยขั้นตอนSC1โดยการลด อัตราส่วนของสารเคมีเป็น 1:1:10..... | 81 |
| 4.19 ขนาดของสัญญาณ โอเจของซิติคอนที่เวลาต่างๆเมื่อล้างด้วยอัตราส่วน 1:1:10..... | 82 |
| 4.20 ขนาดของสัญญาณ โอเจของออกซิเจนที่เวลาต่างๆเมื่อล้างด้วยอัตราส่วน 1:1:10..... | 82 |
| 4.21 สเปกตรัมเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังล้างด้วยอัตราส่วน 1:1:10..... | 83 |

สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 4.22 สเปกตรัมสัญญาณ โอเจของคาร์บอนเปรียบเทียบกับระหว่างก่อนล้างกับหลังล้างที่นาที่ต่างๆ ด้วยอัตราส่วน 1:1:10..... | 83 |
| 4.23 สเปกตรัมสัญญาณ โอเจของคาร์บอนเมื่อล้างที่นาที่ต่างๆด้วยอัตราส่วน1:1:10..... | 84 |
| 4.24 สเปกตรัมสัญญาณ โอเจของออกซิเจนเปรียบเทียบกับระหว่างก่อนและหลังล้างด้วยอัตราส่วน 1:1:10..... | 84 |
| 4.25 ขนาดของสัญญาณ โอเจของคาร์บอนที่เวลาต่างๆเมื่อล้างด้วยขั้นตอนSC1โดยใช้อัตราส่วน ของสารเคมีเป็นอัตราส่วนมาตรฐาน 1:1:5..... | 86 |
| 4.26 ขนาดของสัญญาณ โอเจของซิลิกอนที่เวลาต่างๆเมื่อล้างด้วยอัตราส่วน 1:1:5..... | 87 |
| 4.27 ขนาดของสัญญาณ โอเจของออกซิเจนที่เวลาต่างๆเมื่อล้างด้วยอัตราส่วน 1:1:5..... | 87 |
| 4.28 สเปกตรัมที่วัดได้จากแผ่นซิลิกอนเปรียบเทียบกับระหว่างก่อนและหลังล้างด้วย อัตราส่วน1:1:5..... | 88 |
| 4.29 สเปกตรัมสัญญาณ โอเจของคาร์บอนเปรียบเทียบกับระหว่างก่อนล้างกับหลังล้างที่นาที่ต่างๆ ด้วยอัตราส่วน 1:1:5..... | 89 |
| 4.30 สเปกตรัมสัญญาณ โอเจของคาร์บอนเมื่อล้างที่นาที่ต่างๆด้วยอัตราส่วน1:1:5..... | 89 |
| 4.31 สเปกตรัมสัญญาณ โอเจของออกซิเจนเปรียบเทียบกับระหว่างก่อนและหลังล้างด้วยอัตราส่วน 1:1:5..... | 90 |
| 4.32 ขนาดของสัญญาณ โอเจของคาร์บอนที่อัตราส่วนต่างกันที่เวลาต่างๆ..... | 91 |
| 4.33 สเปกตรัมสัญญาณ โอเจของคาร์บอนเมื่อล้างด้วยอัตราส่วนต่างกันที่เวลา 15 นาที..... | 91 |
| 4.34 สเปกตรัมสัญญาณ โอเจของคาร์บอนเปรียบเทียบกับระหว่างก่อนล้างกับหลังล้างเป็นเวลา 25 นาที ด้วยอัตราส่วนต่างกัน..... | 92 |
| 4.35 ขนาดของสัญญาณ โอเจของคาร์บอนที่เวลาต่างๆเมื่อล้างด้วยขั้นตอนSC1โดยใช้ อัตราส่วนของสารเคมีเป็นอัตราส่วนมาตรฐาน 1:1:5 พิจารณาในช่วงเวลา 10 นาที..... | 94 |
| 4.36 ขนาดของสัญญาณ โอเจของซิลิกอนที่เวลาต่างๆเมื่อล้างด้วยขั้นตอนSC1โดยใช้ อัตราส่วนของสารเคมีเป็นอัตราส่วนมาตรฐาน 1:1:5 พิจารณาในช่วงเวลา 10 นาที..... | 94 |
| 4.37 ขนาดของสัญญาณ โอเจของออกซิเจนที่เวลาต่างๆเมื่อล้างด้วยขั้นตอนSC1โดยใช้ อัตราส่วนของสารเคมีเป็นอัตราส่วนมาตรฐาน 1:1:5 พิจารณาในช่วงเวลา 10 นาที..... | 95 |
| 4.38 สเปกตรัมที่วัดได้จากแผ่นซิลิกอนเปรียบเทียบกับระหว่างก่อนและหลังล้างกำจัดชั้น ออกไซด์ด้วยอัตราส่วน 1:50..... | 96 |

สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 4.39 สเปกตรัมสัญญาณ ไอเจของออกซิเจนเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังล้างกำจัดชั้น ออกไซด์ด้วยอัตราส่วน 1:50..... | 97 |
| 4.40 สเปกตรัมที่วัดได้จากแผ่นซิลิกอนเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังล้างกำจัดชั้น ออกไซด์ด้วยอัตราส่วน 1:30..... | 98 |
| 4.41 สเปกตรัมสัญญาณ ไอเจของออกซิเจนเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังล้างกำจัดชั้น ออกไซด์ด้วยอัตราส่วน 1:30..... | 98 |
| 4.42 สเปกตรัมที่วัดได้จากแผ่นซิลิกอนเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังล้างกำจัดชั้น ออกไซด์ด้วยอัตราส่วน 1:10..... | 99 |
| 4.43 สเปกตรัมสัญญาณ ไอเจของออกซิเจนเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังล้างกำจัดชั้น ออกไซด์ด้วยอัตราส่วน 1:10..... | 100 |
| 4.44 ขนาดของสัญญาณ ไอเจของออกซิเจนเมื่อล้างกำจัดชั้นออกไซด์ด้วยเปอร์เซ็นต์ของ HF ต่างกัน..... | 101 |
| 4.45 ขนาดของสัญญาณ ไอเจของออกซิเจนเฉลี่ยจากสารตัวอย่างทั้ง 3 ชั้นเมื่อล้างกำจัด ชั้นออกไซด์ด้วยเปอร์เซ็นต์ของHFต่างกัน..... | 101 |
| 4.46 ขนาดของสัญญาณ ไอเจของซิลิกอนเฉลี่ยจากสารตัวอย่างทั้ง 3 ชั้นเมื่อล้างกำจัด ชั้นออกไซด์ด้วยเปอร์เซ็นต์ของHFต่างกัน..... | 102 |
| 4.47 ขนาดของสัญญาณ ไอเจของคาร์บอนเฉลี่ยจากสารตัวอย่างทั้ง 3 ชั้นเมื่อล้างกำจัด ชั้นออกไซด์ด้วยเปอร์เซ็นต์ของ HF ต่างกัน..... | 103 |
| 4.48 สเปกตรัมสัญญาณ ไอเจของออกซิเจนเปรียบเทียบระหว่างการล้างกำจัดชั้นออกไซด์ ด้วยอัตราส่วน HF:H ₂ O ต่างกัน..... | 103 |
| 4.49 สเปกตรัมสัญญาณ ไอเจของออกซิเจนเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังล้างกำจัดชั้น ออกไซด์ด้วยอัตราส่วน HF:H ₂ O ต่างกัน..... | 104 |
| 4.50 สเปกตรัมที่วัดได้จากแผ่นซิลิกอนเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังล้างด้วย กระบวนการ RCA..... | 105 |
| 4.51 สเปกตรัมสัญญาณ ไอเจของคาร์บอนเปรียบเทียบระหว่างก่อนล้างกับหลังล้างด้วย กระบวนการ RCA..... | 106 |
| 4.52 สเปกตรัมสัญญาณ ไอเจของออกซิเจนเปรียบเทียบระหว่างก่อนล้างกับหลังล้างด้วย | |

สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| กระบวนการ RCA..... | 106 |
| 4.53 สเปกตรัมที่วัดได้จากแผ่นซิลิกอนเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังล้างด้วย กระบวนการปรีนยา..... | 108 |
| 4.54 สเปกตรัมสัญญาณ ไอเจของคาร์บอนเปรียบเทียบระหว่างก่อนล้างกับหลังล้างด้วย กระบวนการปรีนยา..... | 108 |
| 4.55 สเปกตรัมสัญญาณ ไอเจของออกซิเจนเปรียบเทียบระหว่างก่อนล้างกับหลังล้างด้วย กระบวนการปรีนยา..... | 109 |
| 4.56 สเปกตรัมที่วัดได้จากแผ่นซิลิกอนเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังล้างด้วย เงื่อนไขที่เหมาะสม..... | 110 |
| 4.57 สเปกตรัมสัญญาณ ไอเจของคาร์บอนเปรียบเทียบระหว่างก่อนล้างกับหลังล้างด้วย เงื่อนไขที่เหมาะสม..... | 111 |
| 4.58 สเปกตรัมสัญญาณ ไอเจของออกซิเจนเปรียบเทียบระหว่างก่อนล้างกับหลังล้างด้วย เงื่อนไขที่เหมาะสม..... | 112 |
| 4.59 สเปกตรัมสัญญาณ ไอเจที่วัดได้จากแผ่นซิลิกอนก่อนและหลังสปีดเตอร์..... | 113 |
| 4.60 ขนาดของสัญญาณ ไอเจของซิลิกอนเมื่อสปีดเตอร์เป็นเวลาต่างๆ..... | 114 |
| 4.61 ขนาดของสัญญาณ ไอเจของคาร์บอนเมื่อสปีดเตอร์เป็นเวลาต่างๆ..... | 114 |
| 4.62 ขนาดของสัญญาณ ไอเจของออกซิเจนเมื่อสปีดเตอร์เป็นเวลาต่างๆ..... | 115 |
| 4.63 สเปกตรัมสัญญาณ ไอเจของซิลิกอนเมื่อสปีดเตอร์เป็นเวลาต่างๆ..... | 115 |
| 4.64 สเปกตรัมสัญญาณ ไอเจของคาร์บอนเมื่อสปีดเตอร์เป็นเวลาต่างๆ..... | 116 |
| 4.65 สเปกตรัมสัญญาณ ไอเจของออกซิเจนเมื่อสปีดเตอร์เป็นเวลาต่างๆ..... | 116 |
| 4.66 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสของเส้นลวดความร้อนและอุณหภูมิของสารตัวอย่าง..... | 117 |
| 4.67 LEED pattern Si(100) | 118 |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ปัจจุบันเทคโนโลยีด้านสารกึ่งตัวนำมีการพัฒนาและเจริญรุดหน้าไปอย่างรวดเร็ว เนื่องจากสารกึ่งตัวนำได้เข้ามามีอิทธิพลต่อการดำเนินชีวิตของมนุษย์ในยุคปัจจุบันแทบทุกด้าน เครื่องมือเครื่องใช้ที่ประกอบขึ้นจากวัสดุอิเล็กทรอนิกส์เกือบทุกชนิด จะสังเกตเห็นว่าวัสดุอิเล็กทรอนิกส์เหล่านี้แทบทั้งหมดผลิตจากสารกึ่งตัวนำ แม้แต่ในด้านการตลาด การแข่งขันด้านการค้าก็ได้มีแนวคิดใหม่ๆรวมทั้งการออกแบบเพื่อลดขนาดของวัสดุอิเล็กทรอนิกส์เหล่านี้ ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ออกสู่ตลาดอย่างต่อเนื่อง แรงผลักดันที่ทำให้เทคโนโลยีด้านสารกึ่งตัวนำมีการพัฒนาอย่างไม่หยุดนิ่งนั้น มีจุดประสงค์หลักเพื่อยกระดับประสิทธิภาพของการทำงานให้สูงขึ้นขณะที่มีพื้นที่หรือขนาดเล็กลงรวมทั้งมีราคาถูกลงด้วย เมื่อการออกแบบเป็นไปในแนวทางเพื่อลดขนาดของสารกึ่งตัวนำ ดังนั้นผลที่ตามมาคือ จุดบกพร่อง (defect) ที่เกิดขึ้นในตัววัสดุจึงมีขนาดเล็กลงไปด้วย จุดบกพร่องเหล่านี้สาเหตุส่วนใหญ่เกิดจากสิ่งปนเปื้อนหรือสิ่งตกค้างบนพื้นผิว การบอกลักษณะและหาสาเหตุของสิ่งปนเปื้อนเป็นเรื่องที่สำคัญและน่าสนใจ จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาวิธีการตรวจวัดความสะอาดของพื้นผิวทั้งก่อนและหลังการทำความสะอาดด้วยเทคนิคที่มีความไวและมีความแม่นยำสูง

ความสะอาดของพื้นผิวของสารกึ่งตัวนำ เช่น แผ่นซิลิกอนเวเฟอร์ ก่อนผ่านขั้นตอนการสร้างเป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ถือเป็นความสำคัญสูงสุด เนื่องจากสารปนเปื้อนสามารถทำให้เกิดความเสียหายต่อสิ่งประดิษฐ์ขั้นร้ายแรงและไม่อาจย้อนกลับไปได้แก้ไขได้อีก สารปนเปื้อนบนพื้นผิวของสารกึ่งตัวนำมีหลายชนิด ได้แก่ อนุภาคของฝุ่นผง (particles) สารอินทรีย์ตกค้าง (organic residues) สารอนินทรีย์ตกค้าง (inorganic residues) ซึ่งส่วนมากเป็นโลหะและออกไซด์ตามธรรมชาติ รวมทั้งสารประกอบของออกไซด์ที่อยู่บนพื้นผิว

ในกระบวนการทำความสะอาดแผ่นสารกึ่งตัวนำซึ่งได้แก่แผ่นซิลิกอนเวเฟอร์ มีจุดมุ่งหมายเพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อนดังกล่าวข้างต้น รวมถึงการควบคุมการเกิดชั้นออกไซด์บนพื้นผิว การทำความสะอาดทางเคมี (chemical cleaning) ด้วยสารละลายเป็นที่นิยมใช้กันโดยทั่วไปในวงการอุตสาหกรรมสารกึ่งตัวนำ เนื่องจากสามารถทำความสะอาดได้ครั้งละจำนวนมาก และการทำความสะอาดโดยกระบวนการสปัตเตอร์ด้วยลำไอออน (ion sputtering) ก็เป็นกระบวนการทำความสะอาดอีกวิธีหนึ่งที่ใช้หลักการถ่ายเทโมเมนตัมเพื่อให้เกิดอันตรกิริยาทางฟิสิกส์ ซึ่งเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการทำความสะอาดเพื่อเตรียมความพร้อมให้แก่พื้นผิวสำหรับขั้นตอนการปลูกฟิล์ม นิยมใช้ใน ห้องปฏิบัติการวิจัยมากกว่าในกระบวนการผลิตเชิงอุตสาหกรรม

การจะได้ข้อมูลทางด้านองค์ประกอบหรือชนิดและปริมาณของสารปนเปื้อนบนพื้นผิวที่ สนใจนั้นจะต้องใช้เครื่องมือที่อาศัยเทคนิคที่มีความไวต่อพื้นผิว (surface sensitive) ซึ่งมีอยู่หลาย เทคนิคด้วยกัน เช่น เทคนิคการวิเคราะห์สเปกตรัมมวลของไอออนทุติยภูมิ (secondary ion mass spectroscopy, SIMS) เทคนิคเอ็กซ์เรย์โฟโตอิมิสชันสเปกโทรสโกปี (x-ray photoemission spectroscopy, XPS) และโอเจอิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี (Auger Electron Spectroscopy, AES) เป็นต้น หนึ่งในจำนวนนั้นโอเจอิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี (Auger Electron Spectroscopy; AES) เป็นเทคนิคที่เหมาะสมและนิยมใช้กันโดยทั่วไปในงานวิเคราะห์พื้นผิวเพื่อตรวจสอบสารปนเปื้อน บนพื้นผิวของสารกึ่งตัวนำ เนื่องจากสามารถบอกชนิดของธาตุที่เป็นองค์ประกอบบนพื้นผิวนั้นได้ โดยตรง ซึ่งเทคนิคอื่นๆจะบอกข้อมูลของพื้นผิวที่แตกต่างออกไป เช่น เทคนิค SIMS ข้อมูลที่ได้จะ บ่งบอกถึงธาตุต่างๆในรูปของสารประกอบ (compounds) จุดเด่นอีกประการหนึ่งคือการวัดเป็น แบบไม่ทำลายพื้นผิว อีกทั้งการทำงานของเครื่องมือก็ไม่สลับซับซ้อนมากนัก ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้ จึงได้เลือกใช้การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโอเจอิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปีในการประเมินความสะอาด ของพื้นผิวสารกึ่งตัวนำ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาวิธีการวิเคราะห์พื้นผิวด้วยเทคนิคโอเจอิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี
- 1.2.2 เพื่อศึกษาวิธีการทำความสะอาดพื้นผิวของแผ่นซิลิกอนด้วยกระบวนการทำความสะอาด สะอาด 2 วิธี คือกระบวนการล้างทางเคมี และวิธีการสปัตเตอร์ด้วยลำไอออน พลังงานสูง
- 1.2.3 เพื่อประเมินสะอาดพื้นผิวของแผ่นซิลิกอน ก่อนและหลังผ่านกระบวนการทำ ความสะอาด
- 1.2.4 เพื่อหาเงื่อนไขในกระบวนการล้างที่ทำให้ได้แผ่นซิลิกอนที่สะอาดที่สุด

1.3 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในงานวิจัย

โอเจอิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี เป็นเทคนิคที่ใช้กันโดยทั่วไป สำหรับการวิเคราะห์ พื้นผิวของวัสดุและฟิล์มบาง ทั้งในห้องปฏิบัติการวิจัยและในอุตสาหกรรมการผลิตวัสดุ อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งจะจำแนกชนิดของธาตุองค์ประกอบบนพื้นผิว โดยการวัดพลังงานของโอเจ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิเล็กตรอน การปลดปล่อยไอเจิลีكتروนเกิดจากการกระตุ้นสารตัวอย่างโดยการยิงด้วยลำอิเล็กตรอนหรือโฟตอน พลังงานของไอเจิลีكتروนมีค่าเฉพาะตัวสำหรับธาตุแต่ละชนิด ดังนั้นถ้าสามารถวัดพลังงานของไอเจิลีكتروน ที่ปลดปล่อยจากสารตัวอย่างได้ ก็จะทราบว่าสารตัวอย่างนั้นประกอบด้วยธาตุชนิดใด

แผ่นซิลิกอนจะถูกทำความสะอาดเพื่อกำจัดคราบไขมันและออกไซด์ ด้วยกระบวนการทำความสะอาด 2 วิธี คือวิธีการทางเคมีและวิธีการสปีดเตอร์ด้วยลำไอออนพลังงานสูง ความสะอาดของพื้นผิวจะถูกวิเคราะห์ด้วยเทคนิคไอเจิลีكتروนสเปกโทรสโกปี เปรียบเทียบทั้งก่อนและหลังการทำความสะอาด โดยใช้ตัวบ่งชี้ถึงความสะอาดคือขนาดสัญญาณไอเจิลีكتروนของซิลิกอนซึ่งมีพลังงาน 92 eV สัญญาณไอเจิลีكتروนของคาร์บอน ซึ่งมีพลังงาน 272 eV และสัญญาณไอเจิลีكتروนของออกซิเจน ซึ่งมีพลังงาน 508 eV สัญญาณไอเจิลีكتروนของซิลิกอนที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ในขณะที่สัญญาณไอเจิลีكتروนของคาร์บอนและออกซิเจนที่มีขนาดเล็กลง จะแสดงว่าพื้นผิวมีความสะอาดมากขึ้น

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.4.1 ศึกษา ติดตั้งและทดสอบการทำงานของระบบวิเคราะห์พื้นผิวด้วยเทคนิคไอเจิลีكتروนสเปกโทรสโกปี
- 1.4.2 ทำความสะอาดพื้นผิวแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์ด้วยวิธีการทางเคมีและการสปีดเตอร์ด้วยลำไอออน ด้วยเงื่อนไขต่างๆ
- 1.4.3 ทำการวัดและเปรียบเทียบสัญญาณ ไอเจิลีكتروนก่อนและหลังการทำความสะอาด
- 1.4.4 ประเมินผลความสะอาดของพื้นผิวสารกึ่งตัวนำจากสัญญาณ ไอเจิลีكتروนของซิลิกอน คาร์บอนและออกซิเจน

1.5 วิธีการดำเนินการ การทำวิทยานิพนธ์

- 1.5.1 ศึกษาหลักการและเตรียมความพร้อมในระบบสุญญากาศ
- 1.5.2 ติดตั้งเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิเคราะห์ไอเจิลีكتروนสเปกโทรสโกปี
- 1.5.3 ทดสอบเครื่องมือ ศึกษาการใช้งาน และหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการวัด
- 1.5.4 ทำความสะอาดแผ่นซิลิกอนด้วยกระบวนการทางเคมีในเงื่อนไขต่างๆ
- 1.5.5 ทำความสะอาดแผ่นซิลิกอนด้วยการสปีดเตอร์ในเงื่อนไขต่างๆ
- 1.5.6 รวบรวมข้อมูลและวิเคราะห์ผล
- 1.5.7 สรุปการทำวิทยานิพนธ์และแนวทางในการศึกษาต่อไปในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้เพื่อใช้ในการเรียนการสอนและเป็นเอกสารที่เผยแพร่โดยไม่หวังผลตอบแทนใดๆ ในโอกาสที่ข้าพเจ้าได้มีโอกาสได้เรียนการสอนที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6 ประโยชน์ที่ได้จากงานวิจัย

- 1.6.1 ได้ข้อมูลของการทำความสะอาดแผ่นซีดีคอนเวเฟอร์ทั้งการทำความสะอาดทางเคมี และการสปีดเตอร์ด้วยลำไอออน โดยการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโอเจอิเล็กทรอนิกส์สเปกโทรสโกปี
- 1.6.2 ได้เงื่อนไขการทำความสะอาดที่ทำให้แผ่นซีดีคอนเวเฟอร์สะอาดที่สุด
- 1.6.3 เป็นแนวทางในการศึกษาและเปรียบเทียบความสะอาดของแผ่นซีดีคอนเวเฟอร์โดยอาศัยเทคนิคอื่นๆต่อไปได้
- 1.6.4 สามารถวิเคราะห์ความสะอาดพื้นผิวของสารตัวอย่างจากห้องวิจัยทั้งทางภาครัฐและเอกชน



บทที่ 2

หลักการและทฤษฎี

สำหรับในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการและทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในงานวิจัย การวิเคราะห์พื้นผิวด้วยเทคนิคไอเจอิเล็กทรอนิกส์รอนสเปกโทรสโกปี โดยเฉพาะทฤษฎีพื้นฐานต่างๆของกระบวนการเกิดไอเจอิเล็กทรอนิกส์รอนตลอดจนหลักการการทำงานของเครื่องมือวิเคราะห์

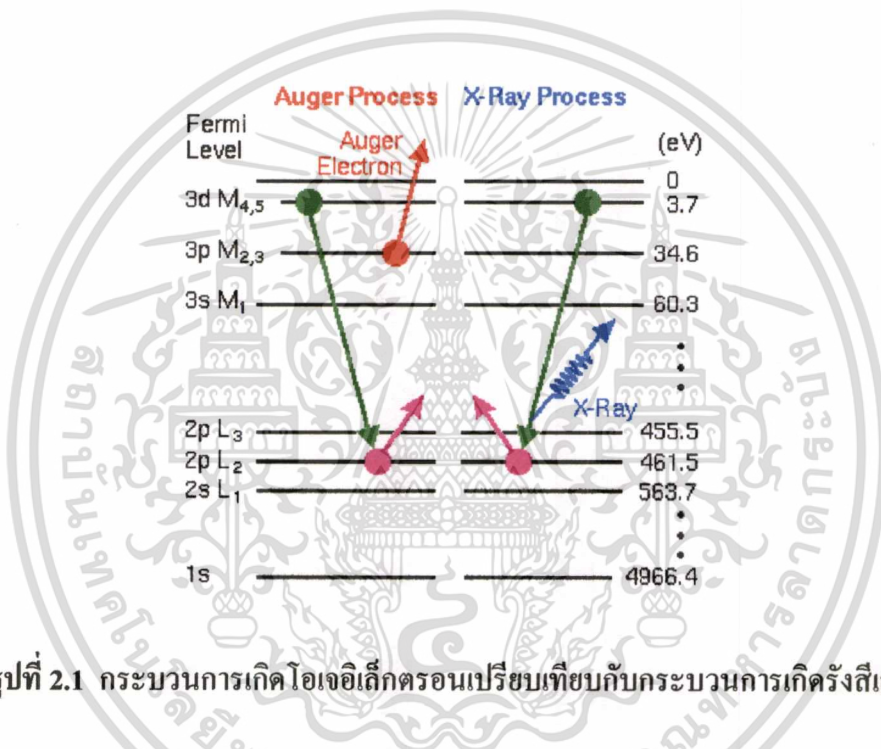
ไอเจอิเล็กทรอนิกส์รอนสเปกโทรสโกปี (Auger electron spectroscopy, AES) เป็นเทคนิคที่ใช้ศึกษาธาตุองค์ประกอบบนพื้นผิว โดยการวัดพลังงานของไอเจอิเล็กทรอนิกส์รอนที่ถูกปลดปล่อยออกมา โดยการยิงพื้นผิวของสารตัวอย่างด้วยลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิหรือรังสีเอกซ์ พลังงานของไอเจอิเล็กทรอนิกส์รอนมีค่าเฉพาะตัวสำหรับธาตุแต่ละชนิด ดังนั้นถ้าสามารถวัดพลังงานของไอเจอิเล็กทรอนิกส์รอนที่ปลดปล่อยจากพื้นผิวของสารตัวอย่างได้ ก็จะทราบว่าสารตัวอย่างนั้นประกอบด้วยธาตุชนิดใด ปัจจุบัน ไอเจอิเล็กทรอนิกส์รอนสเปกโทรสโกปีเป็นเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของพื้นผิวฟิล์มบางและรอยต่อมากที่สุด เนื่องจากเป็นเทคนิคที่มีความไวต่อการวิเคราะห์พื้นผิวสูง (surface sensitive) การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคไอเจอิเล็กทรอนิกส์รอนสเปกโทรสโกปีจะ ได้ข้อมูลที่ระดับความลึกระหว่าง 0.5 ถึง 15 nm จากพื้นผิว สามารถวิเคราะห์ธาตุได้ทุกชนิดในตารางธาตุยกเว้นเพียงไฮโดรเจนและฮีเลียมเท่านั้น มีความไว (sensitivity) ระดับ 100 ppm (0.01%)

2.1 กระบวนการเกิดไอเจอิเล็กทรอนิกส์รอน

กระบวนการพื้นฐานของการเกิดไอเจอิเล็กทรอนิกส์รอน เริ่มต้นที่อะตอมเกิดการสูญเสียอิเล็กตรอนจากชั้นพลังงานชั้นในทำให้เกิดช่องว่างขึ้น การสูญเสียนี้อาจเกิดเนื่องจากอิเล็กตรอนจากชั้นพลังงานชั้นในของอะตอมได้รับพลังงานจากรังสีเอกซ์หรือถูกยิงด้วยลำอิเล็กตรอนพลังงานสูง จากนั้นอิเล็กตรอนตัวที่สองจากระดับพลังงานที่สูงกว่าจะตกลงเติมเต็มสถานะที่ว่างนี้และทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่เป็นไปได้ 2 ประการ คือ (1) เกิดการปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของโฟตอนที่มีพลังงานในย่านรังสีเอกซ์ เรียกว่า ปรากฏการณ์เรืองรังสีเอกซ์ (x-ray fluorescence) มีความน่าจะเป็นที่จะเกิดกับธาตุที่มีเลขอะตอมสูงมากกว่า และ (2) พลังงานที่ถูกปลดปล่อยออกมาในรูปของโฟตอนถูกดูดกลืนโดยอิเล็กตรอนตัวที่สาม ทำให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนที่เรียกว่าไอเจอิเล็กทรอนิกส์รอนแทนการปลดปล่อยโฟตอน เรียกว่า ปรากฏการณ์ปลดปล่อยไอเจอิเล็กทรอนิกส์รอน กระบวนการนี้จะทำให้อะตอมกลายเป็นไอออนที่มีประจุ +2 (doubly charged ion) มีความน่าจะเป็นที่จะเกิดกับธาตุที่มีเลขอะตอมต่ำมากกว่า ($Z < 15$ จะเกิดกระบวนการปลดปล่อยไอเจอิเล็กทรอนิกส์รอนเกือบทั้งหมด) นอกจากเลขอะตอมแล้ว พลังงานของอิเล็กตรอนปฐมภูมิหรือโฟตอนก็มี

ผลต่อการเกิดปรากฏการณ์ปลดปล่อยไอเจอิเล็กทรอนิกส์เช่นกัน โดยอิเล็กทรอนิกส์ปรวมภูมิหรือโฟตอนที่ มีพลังงานน้อยกว่า 2 keV จะมีโอกาสทำให้เกิดการปลดปล่อยไอเจอิเล็กทรอนิกส์มากกว่า 95%

สำหรับธาตุที่มีเลขอะตอมต่ำ ๆ แล้ว มีความเป็นไปได้สูงที่อิเล็กทรอนิกส์จากระดับพลังงาน-K (K-level) จะหลุดออกเมื่อถูกยิงด้วยลำอิเล็กทรอนิกส์ปรวมภูมิ อิเล็กทรอนิกส์จากระดับพลังงาน-L (L-level) จะตกลงมาแทนที่ และอิเล็กทรอนิกส์อีกตัวหนึ่งจากระดับพลังงาน-L จะถูกปลดปล่อยออกมา เป็นไอเจอิเล็กทรอนิกส์ กระบวนการปลดปล่อยไอเจอิเล็กทรอนิกส์นี้ใช้สัญลักษณ์ว่า KLL สำหรับธาตุ ที่มีเลขอะตอมสูงๆ จะมีโอกาสเกิดไอเจอิเล็กทรอนิกส์ด้วยกระบวนการ LMM และ MNN มากกว่า KLL



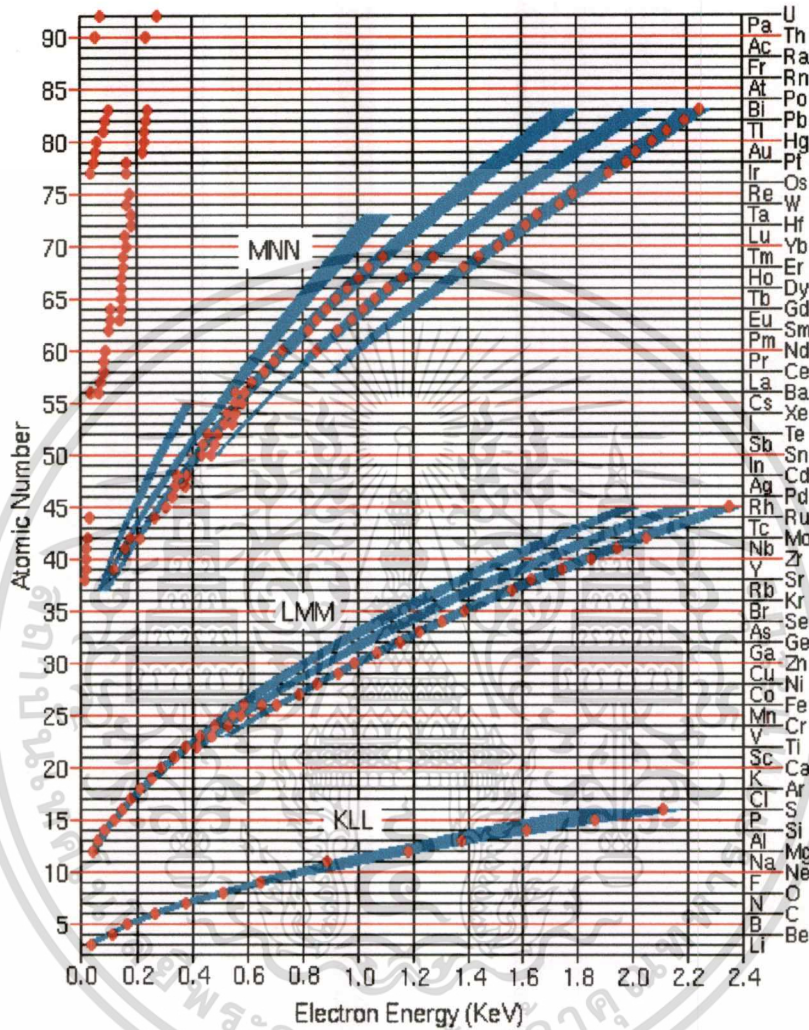
รูปที่ 2.1 กระบวนการเกิดไอเจอิเล็กทรอนิกส์เปรียบเทียบกับกระบวนการเกิดรังสีเอกซ์

กระบวนการเกิดไอเจอิเล็กทรอนิกส์ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งเป็นการทรานซิชันตามเส้นทาง LMMเปรียบเทียบกับกระบวนการเกิดรังสีเอกซ์ในสารตัวอย่างที่เป็นไทเทเนียม (Ti) ซึ่งพลังงานของไอเจอิเล็กทรอนิกส์คือ 423 อิเล็กตรอนโวลต์ ($E_{\text{Auger}} = E_{L_2} - E_{M_4} - E_{M_3}$) และพลังงานของรังสีเอกซ์คือ 457.8 อิเล็กตรอนโวลต์ ($E_{\text{bv}} = E_{L_2} - E_{M_4}$)

ไอเจอิเล็กทรอนิกส์ที่ถูกปลดปล่อยออกจากอะตอมในสารตัวอย่างจะเดินทางผ่านเนื้อสารตัวอย่างซึ่งเป็นของแข็งและมีการสูญเสียพลังงานเนื่องจากการชนแบบไม่ยืดหยุ่นกับอิเล็กทรอนิกส์ในอะตอม อย่างไรก็ตาม ถ้าไอเจอิเล็กทรอนิกส์ถูกปลดปล่อยจากอะตอมบริเวณที่อยู่ใกล้ผิวของสารตัวอย่างเพียงพอ จะมีโอกาสที่จะหลุดออกจากพื้นผิวโดยมีการสูญเสียพลังงานเพียงเล็กน้อยหรือไม่สูญเสียเลย ไอเจอิเล็กทรอนิกส์เหล่านี้จะถูกตรวจวัดได้โดยสเปกโทรมิเตอร์ สัญญาณของไอเจอิเล็กทรอนิกส์ที่วัดได้โดยสเปกโทรมิเตอร์จะซ้อนทับอยู่บนแบบคร่าวๆที่เป็นสัญญาณจากอิเล็กทรอนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่กระเจิงกลับ (back-scattered electron) ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของพื้นผิวสารตัวอย่างนี้จะหาได้จากพลังงานของพีคของไอเจิล็กตรอนที่ปรากฏบนสเปกตรัม โดยการเทียบกับสเปกตรัมมาตรฐานของไอเจิล็กตรอนจากคู่มือสเปกตรัมของไอเจิล็กตรอน หรือจากแผนภูมิดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 พลังงานไอเจิล็กตรอนของธาตุต่าง ๆ

2.2 การกระเจิงของอิเล็กตรอน

พลังงานของอิเล็กตรอนปฐมภูมิมีความสำคัญต่อการวัดสเปกตรัมของไอเจิล็กตรอน อิเล็กตรอนปฐมภูมิจะต้องมีพลังงานสูงพอที่จะกระตุ้นให้เกิดการปลดปล่อยไอเจิล็กตรอนได้ โดยทั่วไปอิเล็กตรอนปฐมภูมิที่ใช้จะมีพลังงานในช่วง 2-10 keV เมื่อลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิเข้าชนพื้นผิวของสารตัวอย่าง จะทำให้เกิดการกระเจิงทั้งแบบยืดหยุ่นและแบบไม่ยืดหยุ่น การกระเจิงแบบเอ็กสาร์นี้เป็นเอ็กสาร์ที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอ็กสาร์ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยึดหยุ่นจะเกิดขึ้นเมื่อลำอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูง (1 ถึง 30 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์) ตกกระทบบนพื้นผิวของสารตัวอย่าง อิเล็กตรอนเหล่านี้จะสูญเสียพลังงานเพียงเล็กน้อยให้กับอะตอมของสารตัวอย่างที่ตกกระทบ อิเล็กตรอนส่วนใหญ่จะกระเจิงกลับ (back scattering) จากผิวของสารตัวอย่าง การกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่นมีกลไกการเกิดหลายแบบ ลักษณะการกระเจิงชนิดนี้อิเล็กตรอนปฐมภูมิจะถ่ายโอนพลังงานจนทำให้กับอะตอมของสารตัวอย่างในขณะที่เคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในเนื้อสารจนกระทั่งหลุดออกจากพื้นผิวหรือสูญเสียพลังงานจนหมดในเนื้อสาร นอกจากการสูญเสียพลังงานให้อิเล็กตรอนวงในของอะตอมแล้วทำให้เกิดไอเจอิเล็กตรอนหรือรังสีเอกซ์ แล้วอิเล็กตรอนปฐมภูมิจะมีการสูญเสียพลังงานโดยกลไกต่าง ๆ ดังนี้

2.2.1. การกระตุ้นพลาสมอน (Plasmon excitation)

พลาสมอนคืออิเล็กตรอนอิสระรอบ ๆ แกนไอออน (ion core) มีความน่าจะเป็นสูงที่อิเล็กตรอนปฐมภูมิจะสูญเสียพลังงานไปในการกระตุ้นพลาสมอน ซึ่งมีค่าประมาณ 15 อิเล็กตรอนโวลต์

2.2.2. การปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electrons)

เมื่ออิเล็กตรอนปฐมภูมิเกิดอันตรกิริยากับอิเล็กตรอนในแถบนำกระแสที่มีพลังงานยึดเหนี่ยวต่ำ จะทำให้อิเล็กตรอนนั้นหลุดออกจากอะตอมกลายเป็นอิเล็กตรอนทุติยภูมิ กรณีนี้จะมีการสูญเสียพลังงานระหว่าง 0 – 50 อิเล็กตรอนโวลต์

2.2.3. การปลดปล่อยรังสีเอกซ์ต่อเนื่อง (continuous X-ray)

เมื่ออิเล็กตรอนปฐมภูมิเดินทางภายในเนื้อสาร จะเกิดอันตรกิริยากับสนามไฟฟ้าของอะตอม ทำให้อิเล็กตรอนปฐมภูมิเคลื่อนที่ด้วยความหน่วง จึงเกิดการคายพลังงานออกมาในรูปของรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานต่อเนื่องในช่วงกว้างตั้งแต่ 0 อิเล็กตรอนโวลต์ จนถึงค่าสูงสุดเท่ากับพลังงานของอิเล็กตรอนปฐมภูมิ

2.2.4. โฟนอน (phonon)

อิเล็กตรอนปฐมภูมิจะสูญเสียพลังงานโดยการกระตุ้นให้เกิดการสั่นของโครงผลึก (โฟนอน) ทำให้อิเล็กตรอนปฐมภูมิถ่ายโอนพลังงานของอิเล็กตรอนปฐมภูมิให้แก่ผลึกในรูปของความร้อน

เนื่องจากมีอันตรกิริยาหลายรูปแบบเกิดขึ้นระหว่างสารตัวอย่างกับอิเล็กตรอนปฐมภูมิ การคำนวณการกระเจิงของอิเล็กตรอนในของแข็งจึงซับซ้อนมาก อย่างไรก็ตาม จากการทดลองพบว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความลึกของการทะลุทะลวง (R) ของอิเล็กตรอนในของแข็ง เป็นค่าที่ขึ้นกับความหนาแน่นของวัสดุและพลังงานของอิเล็กตรอน E_0 โดย

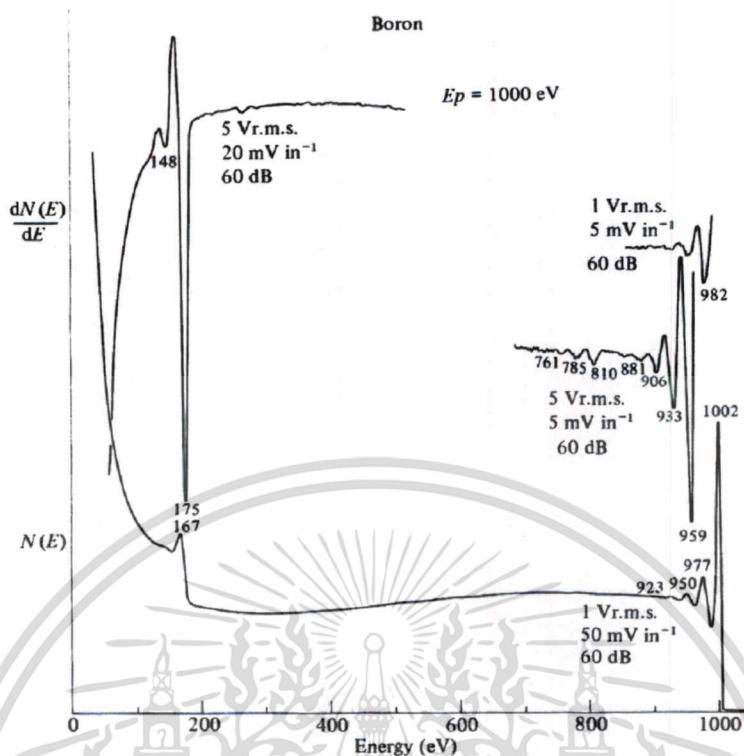
$$R = \frac{K}{\rho} E_0^\gamma \quad (2.1)$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่น (g/cm^3)

K คือ ค่าคงที่ไม่ขึ้นกับชนิดของวัสดุ มีค่า 0.064

γ มีค่าระหว่าง 1.2 – 1.7

รูปที่ 2.3 เป็นตัวอย่างสเปกตรัมโดยทั่วไปของอิเล็กตรอนที่กระเจิงกลับจากสารตัวอย่าง โบรอนที่ถูกยิงด้วยลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิพลังงาน 1 keV จากสเปกตรัม (ล่าง) จะเห็นว่า ที่พลังงานของอิเล็กตรอนปฐมภูมิพลังงาน (1000 eV) จะปรากฏพีคขนาดใหญ่และคม พีคนี้เกิดจากการกระเจิงกลับแบบยืดหยุ่นของอิเล็กตรอนปฐมภูมิจากสารตัวอย่าง โดยไม่มีการสูญเสียพลังงาน ถ้าสารตัวอย่างมีโครงสร้างเป็นผลึก อิเล็กตรอนเหล่านี้จะให้ข้อมูลของการเลี้ยวเบน (diffraction information) ซึ่งใช้ประโยชน์ในการศึกษาโครงสร้างผลึกของพื้นผิวด้วยเทคนิค low energy electron diffraction (LEED) และ reflection high-energy electron diffraction (RHEED)



รูปที่ 2.3 สเปกตรัมของอิเล็กตรอนจากสารตัวอย่าง โบรอน เมื่อยิงด้วยอิเล็กตรอนปฐมภูมิพลังงาน 1 keV
(ล่าง) สัญญาณ โดยตรงของอิเล็กตรอน
(บน) อนุพันธ์ของสัญญาณอิเล็กตรอน

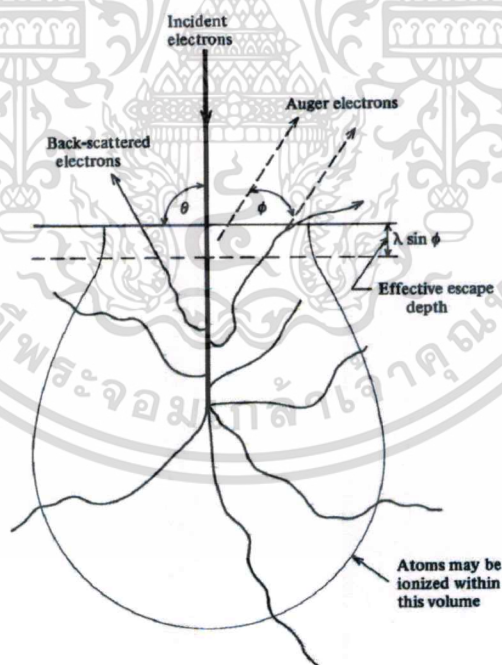
ที่พลังงานต่ำลงมามากขึ้นจะเห็นพีกที่เล็กกว่าอีกหลายพีก เกิดจากอิเล็กตรอนที่กระเจิงกลับแบบไม่ยืดหยุ่น อิเล็กตรอนมีการสูญเสียพลังงานไปเล็กน้อย เช่น มีการสูญเสียพลังงานไปในการกระตุ้นพลาสมอน เป็นต้น จากนั้นพีกต่าง ๆ ที่ถูกกลืนหายไปเป็นช่วงของสเปกตรัมต่อเนื่องที่เกิดจากการกระเจิงกลับแบบไม่ยืดหยุ่นของอิเล็กตรอนปฐมภูมิ ส่วนของสเปกตรัมนี้จะใช้ประโยชน์ในการศึกษาอันตรกิริยาของอิเล็กตรอนกับพื้นผิวด้วยเทคนิค electron energy loss spectroscopy (EELS)

ทางปลายด้านพลังงานต่ำของสเปกตรัม จะเป็นพีกขนาดใหญ่ของอิเล็กตรอนทุติยภูมิ ช่วงต่อระหว่างอิเล็กตรอนทุติยภูมิกับอิเล็กตรอนที่กระเจิงกลับแบบไม่ยืดหยุ่นไม่สามารถแยกได้แน่ชัด แต่ช่วงรอยต่อนี้จะเคลื่อนไปทางพลังงานที่สูงขึ้นเมื่อเพิ่มพลังงานของอิเล็กตรอนปฐมภูมิ ในบริเวณนี้จะมีพีกของโอเจอิเล็กตรอนซ้อนทับอยู่บนแบกกราวด์ที่ค่อนข้างเรียบ ในรูปนี้คือพีกของโบรอนปรากฏที่พลังงานประมาณ 165 อิเล็กตรอนโวลต์ (โบรอน KLL = 179 อิเล็กตรอนโวลต์) พีกของโอเจอิเล็กตรอนจะมีรูปแบบเฉพาะตัว (inelastic tails) ที่แตกต่างกันไปบ้าง เนื่องจากเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่นทำให้มีการสูญเสียพลังงานบางส่วนในขณะที่เคลื่อนที่ผ่านเนื้อสาร ก่อนที่จะหลุดออกจากพื้นผิว เพื่อให้เห็นพิกของสัญญาณ ไอเจอิเล็กทรอนิกส์ที่ซ่อนตัวอยู่บนแบก กราวด์ที่ค่อนข้างเรียบของอิเล็กทรอนิกส์และอิเล็กทรอนิกส์ที่กระเจิงกลับแบบไม่ยืดหยุ่น นิยมที่จะแสดงสเปกตรัมของไอเจอิเล็กทรอนิกส์ในรูปของอนุพันธ์ $dN(E)/dE$ (รูปที่ 2.3 บน) แทน $N(E)$

2.3 ปริมาตรในการวิเคราะห์ไอเจอิเล็กทรอนิกส์ (Auger analytical Volumes)

ความเข้มของสัญญาณ ไอเจอิเล็กทรอนิกส์และแหล่งที่มาภายใต้พื้นผิวของสารตัวอย่าง ขึ้นกับพื้นที่ใต้พื้นผิวที่เกิดการไอออไนซ์เมื่อลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิตกกระทบ ดังรูปที่ 2.4 ปริมาตรของอะตอมที่เกิดการไอออไนซ์นี้มีขนาดประมาณ 1 ลูกบาศก์ไมโครเมตร (1×10^{-12} cc) ด้วยความลึกประมาณ 1 ไมโครเมตร ข้อมูลส่วนใหญ่ที่ได้จากพื้นผิวในปริมาตรนี้มาจากรังสีเอกซ์ที่แผ่ออกมาถึงพื้นผิว ส่วนไอเจอิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถเคลื่อนที่มาถึงพื้นผิวได้จะมาจากความลึกเพียงประมาณ 2 ถึง 3 นาโนเมตร เท่านั้น ดังนั้นถ้าลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิมีขนาด 10 นาโนเมตร ไอเจอิเล็กทรอนิกส์จะเกิดขึ้นจากปริมาตรที่เล็กเพียงประมาณ 3×10^{-19} cc เท่านั้น



รูปที่ 2.4 ปริมาตรในการวิเคราะห์ไอเจอิเล็กทรอนิกส์

ความเข้มของสัญญาณ ไอเจจากธาตุ A (I_A) เมื่อถูกยิงด้วยลำอิเล็กตรอนดังรูปที่ 2.4 ที่

สามารถตรวจวัดได้โดยสเปกโตรมิเตอร์คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_A = I_p \cdot N_A \cdot T(E_A) \cdot \sigma_w(E_w)(1 + r(E_w, E_p)) \cdot \gamma \cdot \lambda(E_A) \sin \phi \cdot \operatorname{cosec} \theta \quad (2.2)$$

- เมื่อ I_p คือ ความเข้มของลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิ
 E_p คือ พลังงานของลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิ
 E_A คือ พลังงานของไอเจ็อิเล็กตรอนของธาตุ A
 E_w คือ พลังงานของการแตกตัวเป็นไอออนของธาตุ A
 N_A คือ ความหนาแน่นอะตอมของธาตุ A
 $T(E_A)$ คือ ประสิทธิภาพในการตรวจวัดของสเปกโทรมิเตอร์
 $\sigma_w(E_w)$ คือ ภาคตัดขวางของการแตกตัวเป็นไอออนสำหรับระดับพลังงานที่เกี่ยวข้อง
 $r(E_w, E_p)$ คือ สัดส่วนของการแตกตัวเป็นไอออนที่เกิดจากการกระเจิงกลับของอิเล็กตรอน
 γ คือ ความน่าจะเป็นของการแตกตัวเป็นไอออนแล้วทำให้เกิดไอเจ็อิเล็กตรอน
 $\lambda(E_A)$ คือ ระยะปลอดการชนสำหรับอิเล็กตรอนพลังงาน E_A
 θ คือ มุมตกกระทบของลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิ
 ϕ คือ มุมของไอเจ็อิเล็กตรอนที่เข้าสู่สเปกโทรมิเตอร์

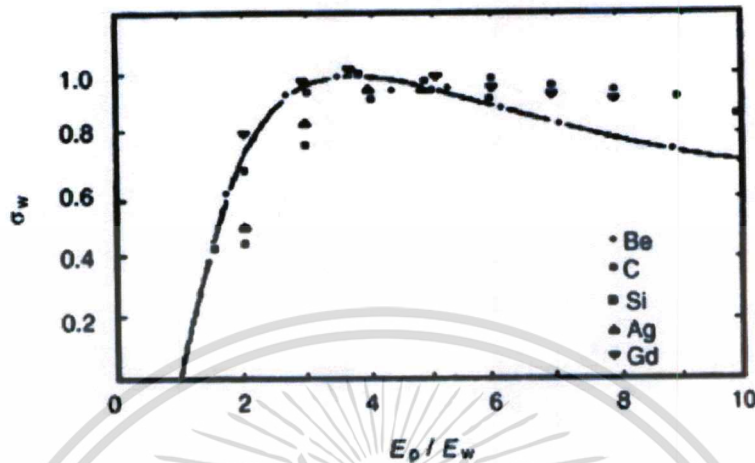
2.4 ภาคตัดขวางของการแตกตัวเป็นไอออน (Ionization Cross Section)

ความน่าจะเป็นในการเกิดไอเจ็อิเล็กตรอน ขึ้นกับความน่าจะเป็นของการแตกตัวเป็นไอออนที่เกิดจากการหลุดออกของอิเล็กตรอนชั้นใน (core level) W และความน่าจะเป็นของกระบวนการปลดปล่อยไอเจ็อิเล็กตรอนหรือโฟตอน พิจารณาลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิที่มีพลังงาน E_p เมื่อตกกระทบพื้นผิวจะทำให้อะตอมแตกตัวเป็นไอออน โดยเริ่มจากบริเวณพื้นผิวของสารตัวอย่าง ภาคตัดขวาง (cross-section), $\sigma_w(E_p)$ สำหรับการแตกตัวเป็นไอออนที่เกิดจากการหลุดออกของอิเล็กตรอนชั้นใน คำนวณจากกลศาสตร์ควอนตัมได้ดังสมการ

$$\sigma_w = \frac{\pi e^4}{UE_w^2} \quad (2.3)$$

เมื่อ $U = E_p/E_w$ โดย E_w คือ พลังงานของการแตกตัวเป็นไอออนที่เกิดจากการหลุดออกของอิเล็กตรอนชั้นใน W (W คือ ระดับพลังงาน K,L,M ของอะตอม) จากสมการ (2.3) จะเห็นว่า σ_w เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นฟังก์ชันของพลังงานของอิเล็กตรอนปฐมภูมิ E_p และระดับพลังงานชั้นใน E_w ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ภาคตัดขวางของการแตกตัวเป็น ไอออนเป็น เป็นฟังก์ชันของพลังงานของอิเล็กตรอนปฐมภูมิ E_p และระดับพลังงานชั้นใน E_w

รูปที่ 2.5 แสดงค่า σ_w ที่ได้จากการทดลองพร้อมทั้งค่าที่ได้จากการคำนวณโดยสมการ (2.3) จากรูปจะเห็นว่า σ_w มีค่าสูงสุดเมื่อ E_p/E_w มีค่าระหว่าง 3 ถึง 4 สำหรับ $E_w = 100$ eV และ $E_p/E_w = 4$ ภาคตัดขวางจะมีค่า $1.6 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$

2.5 ความลึกของการหลบหนี (Escape Depth)

พารามิเตอร์ที่แสดงว่าเทคนิคการวิเคราะห์พื้นผิวด้วยไอเจอิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี เป็นเทคนิคที่มีความไวต่อการวิเคราะห์พื้นผิว (surface sensitive) คือค่าระยะปลอดการชนของไอเจอิเล็กตรอน (mean free path) λ ซึ่งนิยามที่จะกล่าวในรูปของความลึกของการหลบหนี (escape depth) Λ โดย

เมื่อ ϕ คือ มุมที่ไอเจอิเล็กตรอนหลุดออกมา เมื่อเทียบกับเส้นตั้งฉากกับพื้นผิว ความน่าจะเป็นที่ไอเจอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ในเนื้อสารเป็นระยะทาง x โดยไม่มีการชนจะเป็นสัดส่วนกับ $\exp(-x/\Lambda)$ ซึ่งสัญญาณของไอเจอิเล็กตรอนที่วัดได้ 95 % มาจากที่ความลึกไม่เกิน 3Λ ได้พื้นผิว

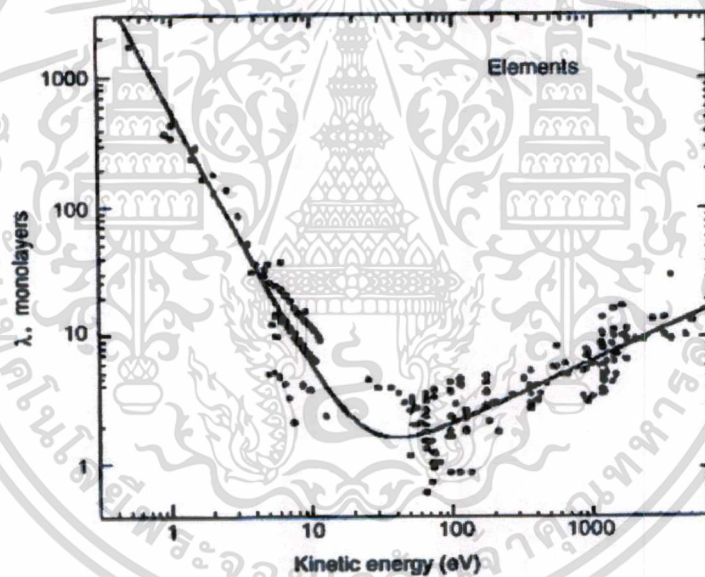
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระยะปลอดการชนของไอเจ็ล็กตรอนที่มีพลังงาน E_{kin} ในเนื้อสาร λ สามารถประมาณได้ดังสมการ

$$\lambda = 0.41a^{1.5}E_{kin}^{0.5} \quad (2.5)$$

เมื่อ a คือ ความหนาของหนึ่งชั้นอะตอม (monolayer thickness) ในหน่วยนาโนเมตร สำหรับโลหะ ความหนาของหนึ่งชั้นอะตอม มีค่าประมาณ 0.2 ถึง 0.25 นาโนเมตร

รูปที่ 2.6 แสดงค่าระยะปลอดการชนของไอเจ็ล็กตรอน λ ที่ขึ้นกับพลังงานจลน์ จากรูปจะเห็นว่าระยะปลอดการชนของไอเจ็ล็กตรอน มีค่าระหว่าง 2 ถึง 20 ชั้นอะตอม หรือประมาณ 0.5 ถึง 5 นาโนเมตร สำหรับพลังงานปกติทั่วไปของไอเจ็ล็กตรอนจนถึง 2000 อิเล็กตรอนโวลต์ นั่นคือ สัญญาณของไอเจ็ล็กตรอนจะมาจากความลึกไม่เกิน $3\lambda = 15$ นาโนเมตร



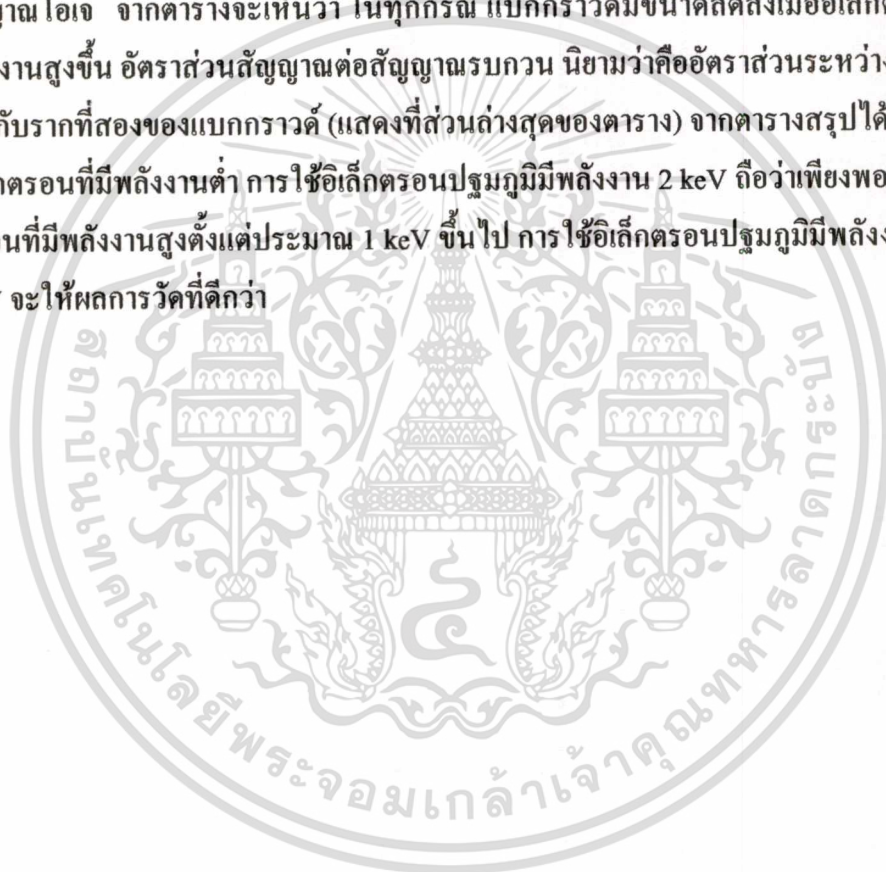
รูปที่ 2.6 ระยะปลอดการชนของ ไอเจ็ล็กตรอน λ ที่ขึ้นกับพลังงานจลน์

2.6 การเลือกพลังงานของอิเล็กตรอนปฐมภูมิ (Choice of primary beam energy)

การเลือกใช้พลังงานของอิเล็กตรอนปฐมภูมิให้เหมาะสมในการวิเคราะห์พื้นผิวด้วยเทคนิคไอเจ็ล็กตรอนสเปกโทรสโกปี ขึ้นกับพลังงานของไอเจ็ล็กตรอนที่ต้องการวัด เนื่องจากภาคตัดขวางของการแตกตัวเป็นไอออนเป็นค่าที่ขึ้นกับพลังงานดังได้กล่าวในหัวข้อ 2.4 จากรูปที่ 2.5 จะเห็นว่าค่า σ_w มีค่าเริ่มตั้งแต่ศูนย์เมื่ออิเล็กตรอนปฐมภูมิมีพลังงาน E_p เท่ากับพลังงานของการเอกสาร์นี้เป็นเอกสาร์ที่ส่งวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แตกตัวเป็นไอออนจากระดับพลังงานชั้นใน E_w และจะเพิ่มขึ้นจนถึงค่าสูงสุดเมื่ออิเล็กตรอนปฐมภูมิมีพลังงานประมาณ 3-4 เท่าของ E_w จากนั้นจึงลดลงเมื่ออิเล็กตรอนปฐมภูมิมีพลังงานเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่สัญญาณของอิเล็กตรอนที่กระเจิงกลับจะมีช่วงพลังงานที่กว้างและอยู่ทางด้านพลังงานสูงของสเปกตรัม ในทางปฏิบัติจะไม่เลือกใช้พลังงานของอิเล็กตรอนปฐมภูมิที่ทำให้ได้พีคของสัญญาณไอเจอิเล็กตรอนสูงสุด แต่จะเลือกค่าที่ทำให้ได้ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (signal-to-noise ratio) ของการวัดสูงที่สุด ในที่นี้สัญญาณรบกวนก็คือแบกกราวด์ (เกิดจากอิเล็กตรอนที่กระเจิงกลับ) ที่พีคของสัญญาณไอเจอิเล็กตรอนซ้อนทับอยู่

ตารางที่ 2.1 แสดงให้เห็นผลของพลังงานของอิเล็กตรอนปฐมภูมิที่มีต่อขนาดของขนาดของสัญญาณไอเจ จากตารางจะเห็นว่า ในทุกกรณี แบกกราวด์มีขนาดลดลงเมื่ออิเล็กตรอนปฐมภูมิมีพลังงานสูงขึ้น อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน นิยามว่าเป็นอัตราส่วนระหว่างขนาดของสัญญาณกับรากที่สองของแบกกราวด์ (แสดงที่ส่วนล่างสุดของตาราง) จากตารางสรุปได้ว่า สำหรับไอเจอิเล็กตรอนที่มีพลังงานต่ำ การใช้อิเล็กตรอนปฐมภูมิมีพลังงาน 2 keV ถือว่าเพียงพอ ส่วนไอเจอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงตั้งแต่ประมาณ 1 keV ขึ้นไป การใช้อิเล็กตรอนปฐมภูมิมีพลังงานในช่วง 5-10 keV จะให้ผลการวัดที่ดีกว่า



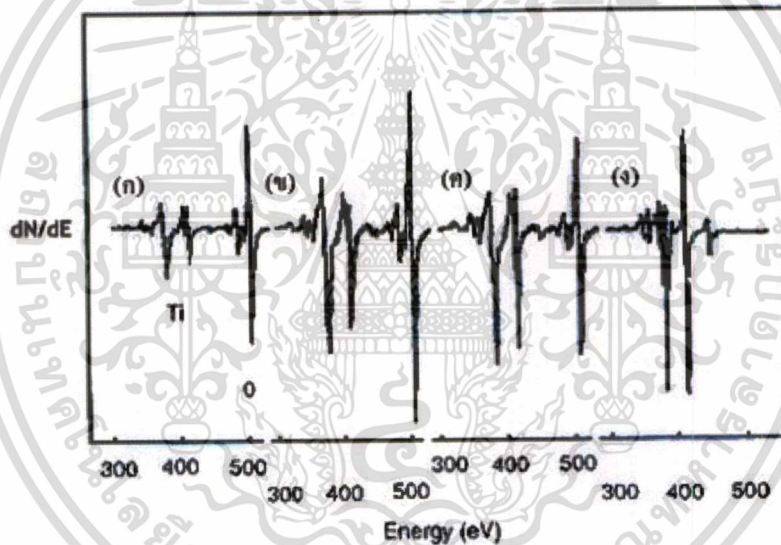
ตารางที่ 2.1 ขนาดของสัญญาณ ไอเจและแบกกราวด์ที่เปลี่ยนแปลงตามพลังงานของอิเล็กตรอนปฐมภูมิ

| Beam energy keV | Cu | | | Ta | |
|--------------------------------|-------|--------|--------|--------|---------|
| | 57 eV | 912 eV | 164 eV | 164 eV | 1670 eV |
| 2 | 7500 | 3150 | 7500 | - | - |
| 5 | 5050 | 7500 | 5400 | 1950 | 1950 |
| 10 | 3000 | 6100 | 3950 | 5150 | 5150 |
| 20 | 1600 | 4150 | 2400 | 3800 | 3800 |
| 30 | 1300 | 3350 | 1350 | 3500 | 3500 |
| Corresponding background | | | | | |
| 2 | 60000 | 93000 | 46500 | - | - |
| 5 | 31500 | 24000 | 29000 | 60000 | 60000 |
| 10 | 18000 | 10500 | 18500 | 23500 | 23500 |
| 20 | 10200 | 5200 | 10500 | 11300 | 11300 |
| 30 | 7700 | 3550 | 8000 | 8000 | 8000 |
| Peak/background | | | | | |
| 2 | 0.125 | 0.03 | 0.16 | - | - |
| 5 | 0.16 | 0.32 | 0.19 | 0.03 | 0.03 |
| 10 | 0.17 | 0.58 | 0.21 | 0.22 | 0.22 |
| 20 | 0.16 | 0.80 | 0.23 | 0.34 | 0.34 |
| 30 | 0.16 | 0.93 | 0.23 | 0.44 | 0.44 |
| Peak/background ^{1/2} | | | | | |
| 2 | 31 | 10.9 | 35 | - | - |
| 5 | 28 | 49 | 32 | 7.9 | 7.9 |
| 10 | 22 | 59 | 29 | 33 | 33 |
| 20 | 16 | 57 | 24 | 36 | 36 |
| 30 | 15 | 56 | 21 | 39 | 39 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 การเลื่อนเชิงเคมี (Chemical Shifts)

โดยทั่วไปฟิสิกของสัญญาณ ไอเจอิเล็กทรอนิกส์จะใช้ในการระบุชนิดของธาตุที่เป็นองค์ประกอบของพื้นผิวเท่านั้น แต่มีสัญญาณ ไอเจอิเล็กทรอนิกส์บางส่วน โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่เกิดจากแถบพลังงานวาเลนซ์ (valence electron) จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับสถานะเชิงเคมีของพื้นผิวได้ ด้วยเนื่องจากสถานะทางเคมีของพื้นผิว มีผลต่อการเลื่อนของพลังงานยึดเหนี่ยวในระดับพลังงานแถบวาเลนซ์ ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การเลื่อนเชิงเคมี (Chemical Shifts) ซึ่งโดยทั่วไปข้อมูลนี้จะได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XPS เท่านั้น ข้อมูลเกี่ยวกับสถานะเชิงเคมีของพื้นผิวอาจปรากฏในรูปของฟิสิกของสัญญาณ ไอเจที่เลื่อนไปหรือรูปร่างของฟิสิกที่เปลี่ยนไป แต่ส่วนใหญ่พบว่าปรากฏทั้งสองแบบร่วมกัน



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างของ chemical Shift ใน AES

(ก) TiO_2

(ข) Ti_2O_3

(ค) TiO

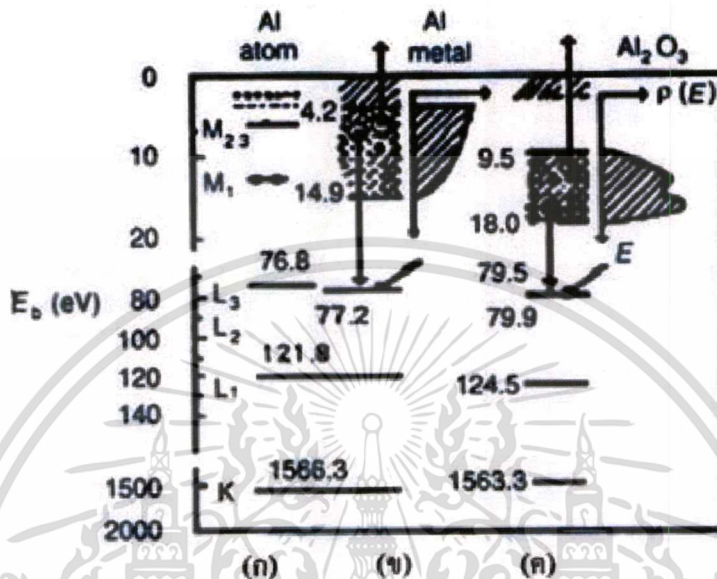
(ง) โลหะ Ti

อย่างไรก็ตาม เนื่องจากการเกิดไอเจอิเล็กทรอนิกส์เกี่ยวข้องกับอิเล็กตรอน 3 ตัว จากระดับพลังงาน 3 ระดับ ฟิสิกของสัญญาณ ไอเจที่เลื่อนไปจึงไม่ใช่เรื่องง่ายที่จะระบุถึงการเลื่อนของชั้นพลังงานชั้นใดชั้นหนึ่งได้อย่างถูกต้อง ดังนั้นโครงสร้างโดยละเอียดของฟิสิกที่แน่นอนของธาตุและเป็นที่รู้จักกันอย่างดี (เช่น คาร์บอน ซิลิกอนและอะลูมิเนียม) จะถูกใช้เพื่อแยกแยะความแตกต่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของสถานะเชิงเคมี โดยดูจากพีคที่เลื่อนไปและรูปร่างที่เปลี่ยนไป ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ส่วนรูปที่ 2.8 เป็นตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงระดับชั้นพลังงานของอะลูมิเนียมในองค์ประกอบที่แตกต่างกัน ซึ่งจะพบว่าความหนาแน่นอิเล็กตรอน $\rho(E)$ ในระดับชั้นพลังงาน M มีค่าที่แตกต่างกันด้วย



รูปที่ 2.8 ระดับพลังงานของอะลูมิเนียมในองค์ประกอบที่แตกต่างกัน

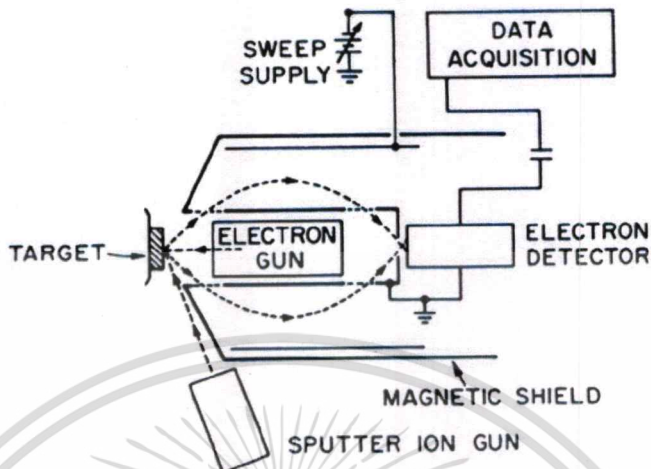
- (ก) อะตอมของ Al
- (ข) โลหะ Al
- (ค) Al₂O₃

2.8 ไอเจอิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี

ไอเจอิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี (AES) เป็นเทคนิควิเคราะห์ที่เหมือนกับเทคนิคอิเล็กตรอน สเปกโทรสโกปีทั่วไป คือต้องทำการทดลองภายใต้สภาวะที่เป็นสุญญากาศสูงยิ่ง (ultrahigh vacuum, UHV) รูปที่ 2.9 แสดงแผนภาพการจัดอุปกรณ์การทดลองประกอบด้วยเครื่องวิเคราะห์พลังงานแบบ cylindrical mirror analyzer: CMA ที่มีแหล่งกำเนิดลำอิเล็กตรอน (electron gun) อยู่ภายใน สามารถโฟกัสลำอิเล็กตรอนไปยังสารตัวอย่างและเมื่อลำอิเล็กตรอนตกกระทบพื้นผิวของสารตัวอย่างจะกระตุ้นให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนจากพื้นผิว อิเล็กตรอนที่หลุดออกจากสารตัวอย่างจะผ่านไปยังช่องทางออกของ CMA ไปสู่ส่วนขยายสัญญาณอิเล็กตรอน (electron multiplier) อิเล็กตรอนที่ผ่านไปได้มีค่าพลังงาน E ที่สอดคล้องกับศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่ระบอบตัว

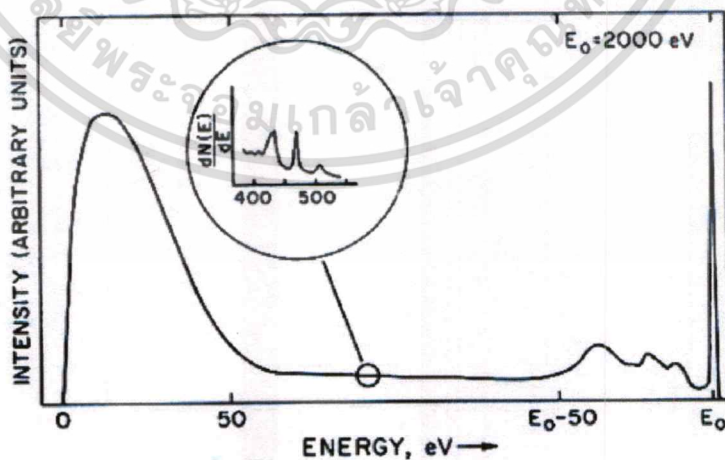
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากช่วงพลังงานของอิเล็กตรอนที่ผ่านไปจะมีค่า ΔE ซึ่งจะกำหนดด้วยค่าความละเอียด $R = \Delta E / E$ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะมีค่าเป็น 0.2 - 0.5 %



รูปที่ 2.9 อุปกรณ์การทดลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ไอเจอิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี

รูปที่ 2.10 เป็นแผนภาพ แสดงสเปกตรัมของอิเล็กตรอนทั้งหมดที่หลุดออกมาจากของแข็ง ที่ถูกยิงด้วยลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิพลังงาน 2 กิโลอิเล็กตรอน โวลต์ พิกที่มีลักษณะแคบทางด้านซ้ายมือ (ด้านพลังงานสูง) มาจากอิเล็กตรอนที่กระเจิงกลับแบบยืดหยุ่น (ไม่สูญเสียพลังงาน) ที่พลังงานต่ำลงมาเป็นสัญญาณจากอิเล็กตรอนที่มีการสูญเสียพลังงานจากกระกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น ส่วนของสเปกตรัมทางด้านพลังงานต่ำ เป็นส่วนของอิเล็กตรอนทุติยภูมิ ไอเจอิเล็กตรอน โดยทั่วไปปรากฏเป็นสัญญาณขนาดเล็กซ้อนทับอยู่บนแบกกราวด์ขนาดใหญ่ที่มีลักษณะเรียบของอิเล็กตรอนทุติยภูมิ



รูปที่ 2.10 สเปกตรัมของอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจากของแข็ง เมื่อถูกยิงด้วยลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิพลังงาน 2 กิโลอิเล็กตรอน โวลต์ ส่วนรูปที่แทรกเป็นการขยายให้เห็นสัญญาณ ไอเจอิเล็กตรอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.1 การบันทึกข้อมูล (Data recording)

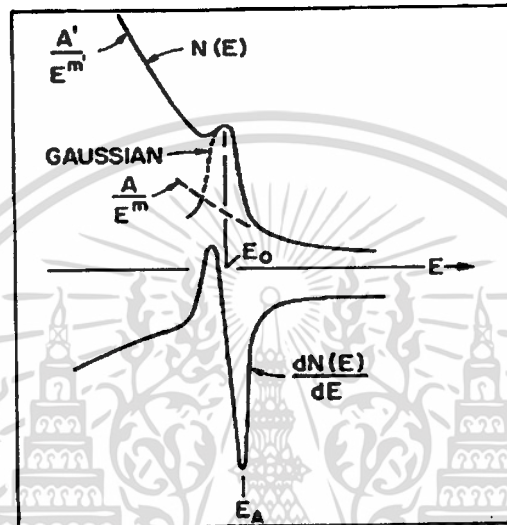
จากรูปที่ 2.3 จะเห็นว่าสัญญาณจากไอเจอิเล็กทรอนิกส์ปรากฏเป็นพีคซ้อนทับอยู่บนแบกกราวด์ที่เรียบของสัญญาณจากอิเล็กทรอนิกส์ที่กระเจิงกลับ ในกรณีที่พื้นผิวสารตัวอย่างที่วัดมีความสะอาดดังตัวอย่างในรูปที่ 2.3 พีคหลัก ๆ ของสัญญาณไอเจจะปรากฏให้เห็นอย่างชัดเจน และระบุตำแหน่งได้อย่างแน่นอน แต่ในกรณีที่มีสารปนเปื้อนบนพื้นผิว พีคของสัญญาณไอเจจะมีขนาดเล็กจนยากที่จะแยกออกจากแบกกราวด์ได้ ในกรณีนี้การเพิ่มกำลังการขยายของเครื่องวัดก็ไม่สามารถช่วยอะไรได้มากนัก

สเปกตรัมในรูปที่ 2.3 เป็นตัวอย่างที่แสดงให้เห็นการบันทึกและแสดงสเปกตรัมที่สามารถทำได้ใน 2 รูปแบบ รูปถ่ายเป็นการบันทึกและแสดงสเปกตรัมจากข้อมูลที่วัดได้โดยตรง (direct spectrum) ส่วนรูปบนเป็นการแสดงสเปกตรัมของอนุพันธ์อันดับที่ 1 ของข้อมูล (differential spectrum) การแสดงผลแบบนี้สามารถทำได้จากการบันทึกผลข้อมูลใน 2 วิธี วิธีแรกซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้ในเครื่องสมัยใหม่ที่ทำงานในระบบดิจิทัล คือบันทึกข้อมูลของสัญญาณโดยตรงในรูปแบบสัญญาณดิจิทัล คือ $N(E)$ จากนั้นจึงนำข้อมูลมาคำนวณหาอนุพันธ์อันดับที่ 1 จะได้ $dN(E)/dE$ และแสดงผลสเปกตรัมด้วยคอมพิวเตอร์ วิธีที่สองซึ่งเป็นวิธีที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ เป็นการทำงานแบบแอนะล็อก โดยการมอดูเลตสัญญาณรูปไซน์ เข้าที่เครื่องวิเคราะห์พลังงานอิเล็กทรอนิกส์ (electron energy analyzer) และใช้เครื่องขยายล็อก-อิน (lock-in amplifier) วัดขนาดของสัญญาณจากเครื่องวิเคราะห์พลังงานอิเล็กทรอนิกส์ที่เป็นฮาร์โมนิกที่ 2 ของสัญญาณจะได้ $dN(E)/dE$ จากนั้นเชื่อมต่อข้อมูลเข้าคอมพิวเตอร์เพื่อแสดงผล จะได้สเปกตรัมของอนุพันธ์อันดับที่ 1 ของข้อมูลที่ต้องการ

เมื่อพิจารณาส่วนของสัญญาณไอเจอิเล็กทรอนิกส์มีขนาดเล็กมาก ซึ่งซ้อนทับอยู่บนแบกกราวด์ซึ่งเป็นสัญญาณจากอิเล็กทรอนิกส์จะเกิดการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก ดังรูปที่ 2.11 จะเห็นว่าส่วนของสเปกตรัมนี้ประกอบด้วยสัญญาณ 3 ส่วนคือ แบกกราวด์ต่อเนื่อง ซึ่งอยู่ในรูปของฟังก์ชัน AE^{-M} ส่วนโค้งเกาส์เซียนของสัญญาณไอเจและส่วนพลังงานต่ำซึ่งอยู่ในรูปของฟังก์ชัน $A'E^{-m}$ เมื่อทำการหาอนุพันธ์อันดับที่ 1 จะได้ $dN(E)/dE$ ของสัญญาณส่วนนี้ ทำให้แบกกราวด์หายไปและเห็นพีคของสัญญาณชัดเจนขึ้น

จุดเด่นที่สุดของการแสดงสเปกตรัมของสัญญาณไอเจในรูปแบบอนุพันธ์คือ สัญญาณส่วนที่เป็นจุดต่ำสุดที่อยู่ทางด้านพลังงานสูงของพีคที่เป็นอนุพันธ์อันดับที่ 1 ของสัญญาณไอเจ จะมีตำแหน่งตรงกับสัญญาณไอเจส่วนที่มีความชันสูงสุด ซึ่งจะใช้เป็นจุดกำหนดพลังงานของสัญญาณไอเจในสเปกตรัม โดยรวมแล้วการแสดงสเปกตรัมของสัญญาณไอเจในรูปแบบอนุพันธ์มีข้อได้เปรียบดังนี้

- 1) สามารถแยกพีคไอเจออกจากแบกกราวด์ได้ชัดเจน โดยแบกกราวด์จะมีค่าเป็นศูนย์ ยกเว้นในช่วงพลังงานต่ำ ๆ
- 2) พีคไอเจจะมีความคมชัดและไม่มีปัญหาเรื่องการซ้อนทับกันระหว่างพีค
- 3) ขนาดของสัญญาณ ไอเจสามารถวัดได้ง่ายจากค่ายอดถึงยอดของพีค (peak-to-peak height)



รูปที่ 2.11 สเปกตรัม $N(E)$ ประกอบด้วยสามส่วนคือ แบกกราวด์ต่อเนื่อง ซึ่งอยู่ในรูปของฟังก์ชัน $A'E^m$ ส่วนโค้งเกาส์เซียนของสัญญาณ ไอเจและส่วนพลังงานต่ำซึ่งอยู่ในรูปของฟังก์ชัน $A'E^m$ ส่วนสเปกตรัมที่อยู่ด้านล่าง เป็นสเปกตรัมจากการหาอนุพันธ์อันดับที่ 1 โดยที่พลังงาน E_A มีค่าต่ำที่สุด ซึ่งจะสอดคล้องกับความชันสูงสุดของเส้นสเปกตรัม $N(E)$

2.8.1.1 การบันทึกข้อมูลด้วยเครื่องขยายล็อก-อิน (Data recording by lock-in amplifier)

เทคนิคการวัดสัญญาณ ไอเจอิเล็กทรอนิกส์ด้วยเครื่องขยายล็อก-อิน ข้อมูลที่ได้จะเป็นสัดส่วนกับอนุพันธ์อันดับที่ 1 ของสัญญาณ ไอเจอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งมีวิธีการดังนี้ ระบบควบคุม ไอเจอิเล็กทรอนิกส์สเปกโทรมิเตอร์จะสร้างสัญญาณรูปไซน์ที่มีความถี่ ω ในช่วง 1 – 20 kHz สัญญาณนี้จะใช้เป็นความถี่อ้างอิงให้กับเครื่องขยายล็อก-อิน และถูกมอดูเลตเข้ากับศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในการคัดกรองพลังงานอิเล็กทรอนิกส์ของเครื่องวิเคราะห์พลังงานอิเล็กทรอนิกส์ (electron energy analyzer) ซึ่งได้แก่ ศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับกระบอกตัวนอกของเครื่องวิเคราะห์พลังงานแบบ CMA หรือศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับกริดของเครื่องวิเคราะห์พลังงานแบบ retarding field analyzer (RFA) ที่ใช้ใน

วิทยาศาสตร์นี้ องค์ประกอบที่เป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ (ที่เกิดเนื่องจากการมอดูเลต) จะถูกวัดโดยเครื่องขยายล็อก-อิน สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าศักย์ไฟฟ้าที่เป็นลบขนาด V_r ถูกป้อนให้กับกริดของเครื่องวิเคราะห์พลังงานแบบ RFA ดังนั้น อิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยจากสารตัวอย่าง ที่มีพลังงานน้อยกว่า eV_r จะถูกผลักออกไม่สามารถเคลื่อนเข้าสู่ตัวตรวจวัดอิเล็กตรอน (collector) ได้ กระแสอิเล็กตรอนที่วัดได้จะเป็นฟังก์ชันของศักย์ที่ใช้ผลักอิเล็กตรอนโดย

$$i(V_r) \propto \int_{eV_r}^{\infty} N(E) dE \quad (2.6)$$

เมื่อ $N(E)$ คือจำนวนอิเล็กตรอนที่มีพลังงาน E ซึ่ง $N(E)$ และ $dN(E)/dE$ หาได้โดย

$$\frac{di(V_r)}{dV_r} \propto N(E) \quad \text{และ} \quad \frac{d^2i(V_r)}{dV_r^2} \propto \frac{dN(E)}{dE}$$

จากอนุกรมเทย์เลอร์ (Taylor series) สำหรับฟังก์ชัน $f(x)$ รอบ ๆ ค่า $x = a$ เขียนได้ว่า

$$f(x) = f(a) + f'(a)(x-a) + \frac{f''(a)(x-a)^2}{2!} + \dots + \frac{f^{(n-1)}(a)(x-a)^{n-1}}{(n-1)!} + \frac{f^{(n)}(x_0)(x-a)^n}{n!} \quad (2.7)$$

ถ้าสัญญาณรูปไซน์ที่ใช้ในการมอดูเลตที่กริดคือ $V_m \sin \omega t$ สัญญาณนี้จะบวกเข้ากับศักย์ไฟฟ้า V_r ดังนั้นกระแสอิเล็กตรอนที่วัดได้จะเป็นฟังก์ชัน $i(V_r + V_m \sin \omega t)$ ซึ่งสามารถเขียนในรูปของอนุกรมเทย์เลอร์ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} i(V_r + V_m \sin \omega t) &= i(V_r) + V_m \sin \omega t \frac{di(V_r)}{dV_r} + \frac{(V_m \sin \omega t)^2}{2!} \frac{d^2i(V_r)}{dV_r^2} + \dots \\ &= I_0 + I_1 \sin \omega t + I_2 \cos 2\omega t + \dots \end{aligned} \quad (2.8)$$

ในที่นี่ องค์ประกอบของกระแสที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาทั้งหมดคือ $I_0 = i(V_r) + \frac{1}{4} V_m^2 \frac{d^2i(V_r)}{dV_r^2}$

แอมพลิจูดของกระแสที่มีความถี่ ω คือ $I_1 = V_m \frac{di(V_r)}{dV_r} + \frac{1}{8} V_m^2 \frac{d^3i(V_r)}{dV_r^3} + \dots$

และแอมพลิจูดของกระแสที่มีความถี่ 2ω คือ $I_2 = -\frac{1}{4} V_m^2 \frac{d^2i(V_r)}{dV_r^2} - \frac{1}{48} V_m^4 \frac{d^4i(V_r)}{dV_r^4} + \dots$

เนื่องจากโดยทั่วไปแล้วแอมพลิจูดของสัญญาณที่ใช้ในการมอดูเลต V_m จะมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับ V_r

ดังนั้น จะได้ว่า $I_2 \approx -\frac{1}{4} V_m^2 \frac{d^2i(V_r)}{dV_r^2}$ ซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ $dN(E)/dE$ ซึ่งในทางปฏิบัติ

แอมพลิจูดของกระแสที่มีความถี่ 2ω นี้ จะวัดได้โดยการปรับความถี่อ้างอิงของเครื่องขยายล็อก-อิน ให้เป็น 2 เท่าของความถี่ที่ใช้ในการมอดูเลต

แอมพลิจูดของสัญญาณที่ใช้ในการมอดูเลต V_m ที่ใช้จะมีผลต่อความไว (sensitivity) และความแยกชัด (resolution) ของการวัด แอมพลิจูด V_m ที่สูงขึ้นจะทำให้ได้สัญญาณที่วัดได้มีขนาดใหญ่ขึ้นและความแยกชัดของสัญญาณจะต่ำลง การเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่างของสัญญาณ ไอเจอิเล็กทรอนิกส์ตามขนาดของสัญญาณที่ใช้ในการมอดูเลตแสดงดังรูปที่ 12 ถ้า V_m มีค่าต่ำกว่าความแยกชัดของเครื่องวิเคราะห์พลังงาน (analyzer resolution) ขนาดของสัญญาณที่วัดได้จะเพิ่มขึ้นตาม V_m โดยที่ไม่ทำให้รูปร่างของสัญญาณเสียไป แต่ถ้าเพิ่ม V_m ให้มากกว่าความแยกชัดของเครื่องวิเคราะห์พลังงานแล้ว ขนาดของสัญญาณที่วัดได้จะเพิ่มขึ้นตาม V_m แต่จะสูญเสียความแยกชัดของสัญญาณไป จากรูปจะเห็นว่า การมอดูเลตด้วยสัญญาณขนาด 5 V ถือว่าเหมาะสม เนื่องจากสัญญาณที่วัดได้มีขนาดใหญ่ขึ้นมากพอสมควรและสัญญาณยังคงรูปร่างเดิมไว้ได้



รูปที่ 12 การเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่างของสัญญาณไอเจกับโวลเตจที่ใช้ในการมอดูเลต

2.9 ประโยชน์ของไอเจอิเล็กทรอนิกส์สเปกโทรสโกปี

ไอเจอิเล็กทรอนิกส์สเปกโทรสโกปี เป็นเทคนิคที่ให้ข้อมูลเป็นธาตุองค์ประกอบบนพื้นผิวของวัสดุ เช่น พิล์มบางและชั้นรอยต่อ ชนิดของสารตัวอย่างเป็นได้ทั้งวัสดุสารกึ่งตัวนำคิหรือวัสดุอิเล็กทรอนิกส์ที่เสร็จสมบูรณ์แล้ว วัสดุทั้งหลายเหล่านี้ประกอบด้วยชั้นบาง ๆ ตัวอย่างเช่น ไอเจอิเล็กทรอนิกส์สเปกโทรสโกปี สามารถแยกแยะระหว่าง Si และ SiO_2 บนแผ่นซิลิกอนที่หนา 10 นาโนเมตร เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมตรได้ เนื่องจากปริมาตรในการวิเคราะห์ไอเจ็ล็กตรอนมีค่าต่ำ ซึ่งมีค่าประมาณ 3×10^{-19} ซีซี จึงสามารถวิเคราะห์เฉพาะส่วนเล็กๆ ของวัสดุอิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างเสร็จสมบูรณ์แล้วหรือสมบูรณ์เป็นบางส่วนได้ และการวิเคราะห์ปริมาตรขนาดเล็กระดับไมโครเมตรเพื่อแยกแยะและบอกชนิดของธาตุบนพื้นผิววัสดุที่เป็นเนื้อเดียว (homogeneous) ก็สามารถวัดได้ เช่น การตรวจสอบพื้นผิวที่แตกร้าวและมีปัญหา ซึ่งอาจจะพบธาตุแปลกปลอมอยู่บนขอบของเกรน (grain boundaries) เป็นต้น

2.10 ข้อจำกัดของไอเจ็ล็กตรอนสเปกโทรสโกปี

ถึงแม้ไอเจ็ล็กตรอนสเปกโทรสโกปีจะมีประโยชน์และใช้กันอย่างกว้างขวาง แต่เทคนิคนี้ก็ยังมีข้อจำกัด นั่นคือ ไม่สามารถตรวจวัดไฮโดรเจนและฮีเลียม ไม่สามารถวิเคราะห์โครงสร้างเชิงลึกโดยที่ไม่ทำลายพื้นผิวได้ ต้องใช้สารตัวอย่างที่มีขนาดเล็กและเข้ากับสภาวะที่เป็นสุญญากาศสูงได้ดี สารตัวอย่างที่ไม่นำไฟฟ้าอาจทำให้เกิดการสะสมประจุ ในระหว่างการยิงลำอิเล็กตรอน ทำให้วิเคราะห์ได้ยาก และการวิเคราะห์เชิงปริมาณด้วยไอเจ็ล็กตรอนสเปกโทรสโกปียังขึ้นอยู่กับทั้ง เครื่องมือ สถานะทางเคมีและปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับสารตัวอย่างด้วย

2.11 การวิเคราะห์เชิงปริมาณ

การวิเคราะห์เชิงปริมาณ จะพิจารณาขนาดสัญญาณของไอเจ็ล็กตรอนเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นหรือปริมาณของธาตุ แต่อย่างไรก็ตามจากหลักการนี้อาจเป็นการยากในการบอกปริมาณของธาตุ เนื่องจากปัจจัยของเครื่องมือมีอิทธิพลต่อขนาดความสูงของสัญญาณ นอกจากนี้พลังงานของลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิ ทิศทางการจัดเรียงตัวของอะตอมในสารตัวอย่าง สถานะทางเคมีของธาตุในสารตัวอย่าง ความแยกชัดของวิเคราะห์พลังงานและมุมที่ติดตั้งเครื่องวิเคราะห์พลังงานของอิเล็กตรอน ปัจจัยเหล่านี้ล้วนมีอิทธิพลต่อการวิเคราะห์เชิงปริมาณด้วยเทคนิคไอเจ็ล็กตรอนสเปกโทรสโกปีด้วยกันทั้งสิ้น

ทั้งความเข้ม และ รูปร่างของสัญญาณจะแปรเปลี่ยนไปเป็นฟังก์ชันของสถานะออกซิเดชันของสารตัวอย่าง การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของสัญญาณมีความสำคัญมาก เมื่อดำเนินการวิเคราะห์เชิงปริมาณในการแสดงผลข้อมูลในรูปของการหาอนุพันธ์

เพื่อให้การวัดมีความละเอียดแม่นยำ สารตัวอย่างควรมีความเป็นเนื้อเดียว (homogeneous) ในทิศทางตามขวาง และสอดคล้องกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิ สัญญาณของไอเจ็ล็กตรอนได้จากปริมาตรวิเคราะห์ที่มีขนาดเล็ก ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิเป็นหลัก ความหนาของปริมาตรที่วิเคราะห์ มีขนาดเล็กน้อยมากเนื่องจากไอเจ็ล็กตรอน

อิเล็กทรอนิกส์เปล่งโทสรโกปีมีความไวสูงต่อเฉพาะพื้นผิว ดังนั้นการวิเคราะห์จะไม่รวมถึงเนื้อวัสดุ สารตัวอย่างจำพวกโลหะจะถูกเคลือบด้วยชั้นบางๆของออกไซด์ เมื่อเปิดตู้บรรยากาศ ดังนั้นจึงมีผลต่อเงื่อนไขที่ว่าไออิเล็กทรอนิกส์เปล่งโทสรโกปีวิเคราะห์เฉพาะบนพื้นผิว ซึ่งการวิเคราะห์ ปริมาณความเข้มข้นของธาตุจะต้องอยู่ในกรณีที่มีการวัดตัวประกอบความไวสัมพัทธ์ (relative sensitivity factors; RSF) ในธาตุหมู่มากเดียวกัน เนื่องจากความเข้มข้นของธาตุทั้งหมด (รวมถึง ธาตุหมู่มาก) สามารถแปรค่าได้ในการวัดด้วยเทคนิคนี้ จึงจำเป็นต้องบอกความเข้มข้นเป็น เปอร์เซ็นต์ ($C_E\%$) ที่สอดคล้องกับผลรวมของธาตุอื่นๆทั้งหมด

$$C_E\% = 100\% \frac{C_E}{\sum C_X} \quad (2.9)$$

เมื่อ

C_X คือ ความเข้มข้นของธาตุทั้งหมดรวมถึงธาตุหมู่มาก

การวิเคราะห์เชิงปริมาณจะพิจารณาความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องกับ ตัวประกอบความไวสัมพัทธ์ (RSF) ดังความสัมพันธ์

$$\frac{I_R}{C_R} = RSF_E \cdot \frac{I_E}{C_E} \quad (2.10)$$

เมื่อ

RSF_E คือ ตัวประกอบความไวสัมพัทธ์ สำหรับธาตุที่พิจารณา

I_R คือ ความเข้มของอิเล็กทรอนิกส์ของธาตุอ้างอิง

C_R คือ ความเข้มข้นของธาตุอ้างอิง

โดยทั่วไปจะใช้ธาตุหมู่มากเป็นธาตุอ้างอิง ดังนั้นจึงเขียนสมการ (2.10) ใหม่ได้ดังนี้

$$C_E = RSF_E \frac{I_E C_M}{I_M} \quad (2.11)$$

ในระหว่างการวิเคราะห์สมมติให้ความเข้มข้นของธาตุหมู่มาก (C_M) ไม่มีการเปลี่ยนแปลง จะได้

$$RSF = C_M RSF_E \quad (2.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่า RSF_E จากสมการที่ (2.12) ลงในสมการ (2.11) จะได้

$$C_E = RSF \cdot \frac{I_E}{I_M} \quad (2.13)$$

เมื่อ

- C_E คือ ความเข้มข้นของธาตุที่พิจารณา
- I_E คือ ความเข้มของอิเล็กตรอนของธาตุที่พิจารณา
- I_M คือ ความเข้มของอิเล็กตรอนของธาตุหมู่มาก
- RSF คือ ตัวประกอบความไวสัมพัทธ์ (สำหรับธาตุที่พิจารณาและธาตุหมู่มาก)

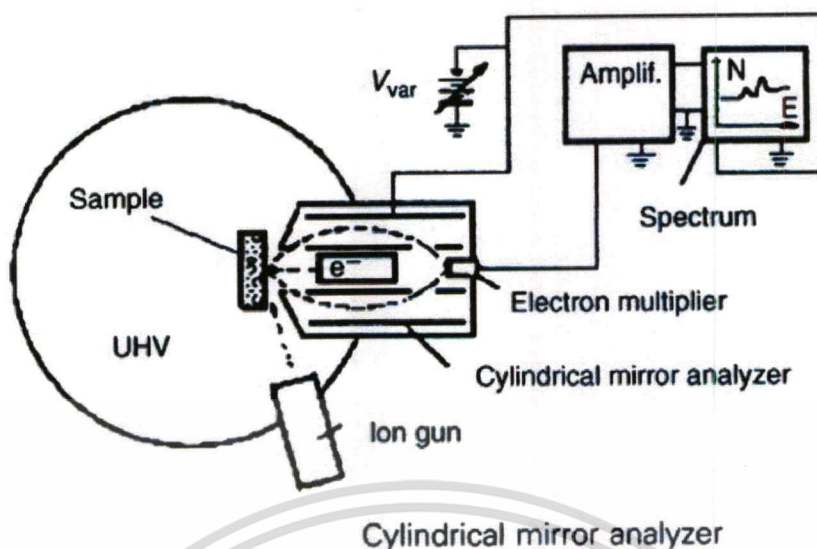
แทนค่า C_E จากสมการ (2.13) ลงในสมการ (2.9) ส่วน C_X พิจารณาเช่นเดียวกับสมการ (2.13) แล้วแทนในสมการ (2.11) เพื่อกำจัดเทอมของ I_M จะได้ $C_E\%$ ดังสมการที่ (2.14) ซึ่งเป็นสูตรที่ใช้ทั่วไปในวิธีการหาปริมาณธาตุด้วยไอเจ็ล็กตรอนสเปกโทรสโกปี

$$C_E\% = 100\% \frac{RSF_E \cdot I_E}{\sum RSF_X \cdot I_X} \quad (2.14)$$

2.12 การวิเคราะห์โครงสร้างเชิงลึกด้วยไอเจ็ล็กตรอนสเปกโทรสโกปี

การวิเคราะห์โครงสร้างเชิงลึกด้วยไอเจ็ล็กตรอนสเปกโทรสโกปี เป็นการพิจารณาธาตุองค์ประกอบในสารตัวอย่างเป็นฟังก์ชันกับความลึก เช่นในฟิล์มบาง หรือสารตัวอย่างที่มีโครงสร้างเป็นชั้น ๆ เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 2.13 ซึ่งประกอบด้วยแหล่งกำเนิดลำอิเล็กตรอน เครื่องวิเคราะห์พลังงานของอิเล็กตรอน รวมทั้งแหล่งกำเนิดลำไอออนสำหรับการสปีดเตอริง

ในการวัด จะใช้ลำไอออนสปีดเตอริงผิวหน้าของสารตัวอย่างไปพร้อม ๆ กับการวัดสเปกตรัมของไอเจ็ล็กตรอน หรืออาจจะสลับกันระหว่างการสปีดเตอริง แล้ววัดสัญญาณไอเจ็ล็กตรอน การศึกษาเชิงลึกจะแสดงผลในรูปของ ความสูงของสัญญาณไอเจ็ล็กตรอนกับการสปีดเตอริง แล้วนำค่ามาเปรียบเทียบเพื่อเปลี่ยนเวลาในการสปีดเตอริงเป็นความลึก และความสูงของสัญญาณเป็นความเข้มข้น หรือปริมาณของธาตุ



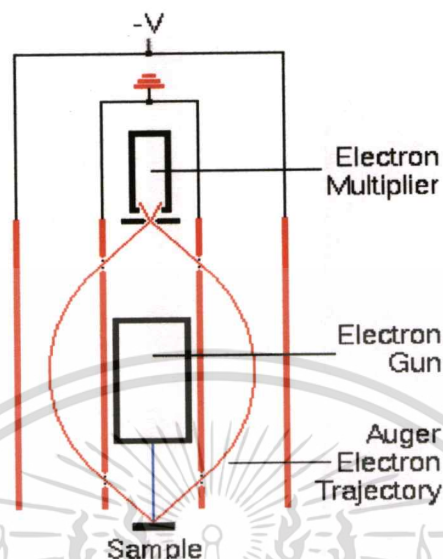
รูปที่ 2.13 อุปกรณ์ในการทดลองโอเจอิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปีร่วมกับแหล่งกำเนิดลำไอออนที่ใช้ในการสปีดเตอร์สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างเชิงลึก

2.13 เครื่องมือในการวิเคราะห์โอเจอิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี

2.13.1 ความเป็นมา

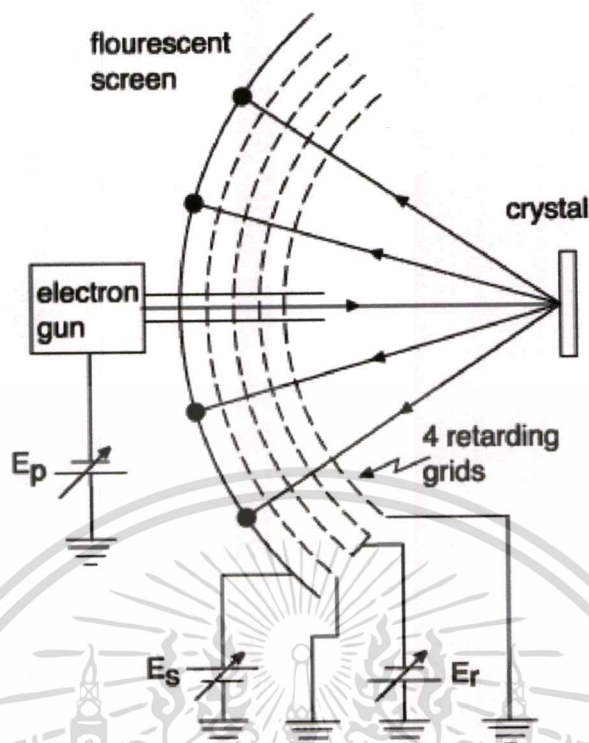
ในปี ค.ศ. 1923 Pierre Auger ได้ค้นพบกระบวนการโอเจ (Auger Process) และโอเจอิเล็กตรอน ขณะที่ฉายรังสีเอกซ์ไปยังสารตัวอย่าง แนวความคิดในการใช้ลำอิเล็กตรอนกระตุ้นสารตัวอย่างให้ได้สัญญาณโอเจเพื่อใช้ในงานวิเคราะห์พื้นผิวเริ่มต้นขึ้นเมื่อปี ค.ศ. 1953 โดย J.J. Lander อย่างไรก็ตาม ผลลัพธ์ที่ได้ยังไม่ดีนักจนกระทั่งปี ค.ศ. 1967 Larry Harris ได้ทำการทดลองโดยใช้เทคนิคการหาอนุพันธ์อันดับที่ 1 ของสัญญาณไฟฟ้าเพื่อยกระดับสัญญาณโอเจอิเล็กตรอน การพัฒนามีความสำคัญต่อความไวในการวัดสัญญาณและเป็นประโยชน์ต่อการทดลองเป็นอย่างมาก ในช่วงแรกเครื่องมือจะเป็นระบบแอนาลอกใช้ร่วมกับเครื่องขยายล็อก-อิน เพื่อให้ได้สเปกตรัมของอนุพันธ์ของสัญญาณ จากนั้นจึงมีการพัฒนาเรื่อยมาเพื่อให้ได้สเปกตรัมจากการหาอนุพันธ์โดยตรงด้วยอัลกอริทึมของการแสดงผลข้อมูลผ่านคอมพิวเตอร์ ทุกวันนี้เทคนิคโอเจอิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี เป็นวิธีการวิเคราะห์พื้นผิวที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย ซึ่งครอบคลุมธาตุทั่วทั้งตารางธาตุยกเว้น ไฮโดรเจนและ ฮีเลียม

2.13.2 เครื่องวิเคราะห์พลังงานของอิเล็กตรอน (Electron Energy Analyzer)



รูปที่ 2.14 เครื่องวิเคราะห์พลังงานของอิเล็กตรอนแบบ cylindrical mirror analyzer(CMA)

เครื่องวิเคราะห์พลังงานของอิเล็กตรอน จะวัดจำนวนของอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาเป็นฟังก์ชันของพลังงานอิเล็กตรอน เครื่องวิเคราะห์พลังงานจะติดตั้งอยู่ภายในภาชนะสุญญากาศที่เป็นอิสระจากสนามแม่เหล็ก ได้แก่ สนามแม่เหล็กโลก ซึ่งมีผลทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ผิดทิศทาง รูปที่ 2.14 เป็นแผนภาพแสดงภาคตัดขวางของเครื่องวิเคราะห์พลังงานแบบ cylindrical mirror analyzer (ใน ส่วนสีแดง) เมื่อลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิพุ่งชนผิวหน้าสารตัวอย่าง ไอเจอิเล็กตรอนจะหลุดออกมาในทุกทิศทาง และบางส่วนจะผ่านไปยังกริดที่คลุมช่องที่ระบอดตัวใน สักย์ไฟฟ้าลบที่แปรค่าในระบอดตัวนอก ทำให้ไอเจอิเล็กตรอนโค้งกลับเข้าสู่ช่องที่ระบอดตัวใน หลังจากนั้นอิเล็กตรอนจะผ่านไปช่องทางออกตรงแกนกลางของเครื่องวิเคราะห์พลังงาน ซึ่งพลังงานของอิเล็กตรอนที่ผ่านเข้ามาจะเป็นสัดส่วนกับศักย์ไฟฟ้าลบ (-V) ที่ระบอดตัวนอก สำหรับรูปที่ 2.15 แสดงแผนภาพเครื่องวิเคราะห์พลังงานแบบ retarding-field analyzer (RFA) ซึ่งใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ เครื่องมือประกอบด้วยแหล่งกำเนิดลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิ ชั้นของกริดที่ทำหน้าที่คัดกรองพลังงานของอิเล็กตรอน และชั้นของฉากเรืองแสง ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวตรวจวัดปริมาณอิเล็กตรอน เมื่อลำอิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิดวิ่งชนพื้นผิวของสารตัวอย่าง ซึ่งมีศักย์ไฟฟ้าเป็นกราวด์ ก็จะกระตุ้นให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาสู่บริเวณปลอดสนามไฟฟ้า (field-free region) แล้วผ่านเข้าสู่ตัวตรวจวัดโดยผ่านตัวคัดกรองพลังงาน ซึ่งในรูปคือกริด 2 และกริด 3 เครื่องวิเคราะห์พลังงานแบบ RFA สามารถใช้ศึกษาโครงสร้างผลึกของพื้นผิวด้วยเทคนิค low energy electron diffraction (LEED) โดยการเปลี่ยนแปลงวงจรไฟฟ้าภายนอกเพียงเล็กน้อย



รูปที่ 2.15 เครื่องวิเคราะห์พลังงานอิเล็กตรอนแบบ retarding-field analyzer (RFA)

2.13.3 แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนปฐมภูมิ

แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนปฐมภูมิที่ใช้ในไอเจอิเล็กตรอนเปกโทรสโกปี โดยทั่วไปมี 3 ชนิด ได้แก่

2.13.3.1 แหล่งกำเนิดทังสเตนแคโทด (tungsten cathode source)

ประกอบด้วย เส้นลวดทังสเตน มีรูปร่างโค้งงอ ทำงานที่อุณหภูมิประมาณ 2700 เคลวิน โดยการให้กระแสไฟฟ้าแก่ลวดต้านทาน (resistive heating) ทังสเตนแคโทดนิยมใช้กันมากที่สุด เนื่องจากใช้งานได้ดีและราคาถูก แต่มีข้อจำกัดเนื่องจากทังสเตนแคโทดมีความหนาแน่นกระแสเพียง 1.75 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร

2.13.3.2 แลนทานัมเฮกซะโบไรด์แคโทด (lanthanum hexaboride (LaB₆) cathodes)

มีความหนาแน่นกระแสสูง เนื่องจาก LaB₆ มีค่าเวิร์คฟังก์ชันต่ำ และมีค่าการปลดปล่อยอิเล็กตรอน (electron emissivity) ที่ดีกว่าทังสเตน ที่อุณหภูมิ 2000 เคลวิน ความหนาแน่นกระแสมีค่าประมาณ 100 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งความหนาแน่นกระแสที่สูงนี้ สามารถทำให้ได้ขนาดของลำอิเล็กตรอนที่เล็ก เป็นข้อได้เปรียบเมื่อนำไปใช้วิเคราะห์สารตัวอย่างที่มีขนาดเล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

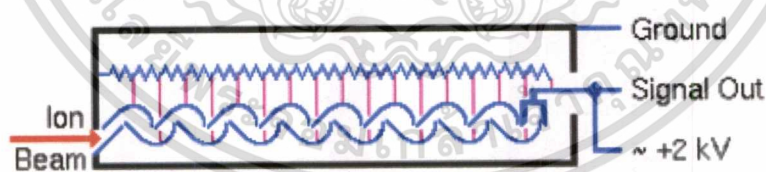
2.13.3.3 แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนแบบฟิลด์อิมิชชัน (field emission electron source)

ทำจากทั้งสแตนเช่นกัน แต่ไม่ได้ใช้หลักการปลดปล่อยอิเล็กตรอนด้วยความร้อน (thermionic emission) แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนแบบฟิลด์อิมิชชัน ใช้หลักการ การทะลุผ่านกำแพง ศักย์แบบควอนตัม (quantum tunneling) ให้ความเข้มของอิเล็กตรอนสูงมาก และสามารถโฟกัสลำอิเล็กตรอนให้มีขนาดเล็กถึง 10 นาโนเมตรได้ ใช้ในการวิเคราะห์ไอเจที่สารตัวอย่างมีขนาดเล็ก แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนแบบนี้มีราคาสูงและต้องการ การดูแลรักษาเป็นพิเศษ

แหล่งกำเนิดลำอิเล็กตรอน (electron gun) โดยทั่วไปมีลักษณะเป็นคอลัมน์ปี่ของอิเล็กตรอน ปฐมภูมิ คล้ายกับอิเล็กตรอนไมโครสโคปของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด(SEM) ในคอลัมน์ประกอบด้วย เลนส์ไฟฟ้า (electrostatic) และเลนส์แม่เหล็ก (magnetic lenses) สำหรับ โฟกัสลำอิเล็กตรอนรวมทั้งมีตัวเบี่ยงเบนแบบสี่ขั้ว (quadruple deflectors) เพื่อควบคุมทิศทางของ ลำอิเล็กตรอน

2.13.4 ตัวตรวจวัดไอเจอิเล็กตรอน (AES Detectors)

ไอเจอิเล็กตรอนเปกโทรสโกปี ใช้ส่วนขยายสัญญาณอิเล็กตรอน เครื่องขยายสัญญาณอิเล็กตรอนโดยทั่วไปจะทำงานในโหมดการนับพัลส์ ซึ่งนับอิเล็กตรอนทั้งหมดที่มาถึงตัวตรวจวัด รูปที่ 2.16 แสดงโครงสร้างของเครื่องขยายสัญญาณอิเล็กตรอน ซึ่งประกอบด้วยชุดของอิเล็กโทรดที่เรียกว่าไดโนด ซึ่งแต่ละอันจะต่อเชื่อมกันด้วยเส้นลวดต้านทาน สัญญาณเอาต์พุตจะออกที่ปลายด้านหนึ่งซึ่งต่อเข้ากับศักย์ไฟฟ้าสูงที่เป็นบวก ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งต่อเข้ากับกราวด์ของระบบ



รูปที่ 2.16 โครงสร้างของเครื่องขยายสัญญาณอิเล็กตรอน

ศักย์ไฟฟ้าที่ไดโนดจะมีค่าต่างกันเป็นลำดับขั้น เมื่ออนุภาคในนี้คืออิเล็กตรอนวิ่งเข้าชนกับไดโนดตัวแรกก็จะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิแล้วอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกเร่งให้พุ่งชนไดโนดตัวถัดไปซึ่งอิเล็กตรอนแต่ละตัวจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิจำนวนมากเป็นทวีคูณ โดยที่ศักย์ไฟฟ้าที่ไดโนดจะเป็นตัวควบคุมการอัตราการขยายอิเล็กตรอนของเครื่องขยายสัญญาณ

2.14 การเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนพลังงานต่ำ (Low Energy Electron Diffraction , LEED)

เทคนิค Low Energy Electron Diffraction เป็นเทคนิคที่ใช้ศึกษาโครงสร้างผลึกของพื้นผิว โดยการแทรกสอดของลำอิเล็กตรอน รั่วแทรกสอดจะเกิดขึ้นและสามารถวัดได้โดยเทคนิคนี้เมื่ออะตอมบนพื้นผิวของผลึกมีการเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบเท่านั้น อะตอมของสารปนเปื้อนบนพื้นผิวจะไม่มีความเป็นระเบียบ ดังนั้นพื้นผิวที่มีสารปนเปื้อนจึงไม่สามารถทำให้เกิดรั่วแทรกสอดได้ วิทยานิพนธ์นี้จึงใช้เทคนิค Low Energy Electron Diffraction เพื่อยืนยันความสะอาดของพื้นผิวหลังผ่านขั้นตอนการทำความสะอาด

2.14.1 ทฤษฎีพื้นฐานของ LEED

โครงสร้างผลึกของวัสดุสามารถตรวจวัดได้โดยเทคนิคการเลี้ยวเบน (diffraction techniques) ของรังสีที่มีความยาวคลื่นในระดับเดียวกับระยะห่างระหว่างอะตอมในโครงผลึก เช่น ใช้โฟตอนที่มีความยาวคลื่นระดับกิโลอิเล็กตรอน โวลต์ ซึ่งอยู่ในย่านรังสีเอกซ์ในการศึกษาโครงสร้างผลึกในของแข็ง ส่วนการศึกษาโครงสร้างผลึกของพื้นผิวจะใช้สมบัติความเป็นคลื่นของลำอิเล็กตรอน พลังงานของอิเล็กตรอนที่ใช้จะต่ำในระดับ ~ 100 อิเล็กตรอน โวลต์ อิเล็กตรอนจะเลี้ยวเบนเมื่อตกกระทบอะตอมบนพื้นผิวที่มีการเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ ทำให้เกิดการแทรกสอดแบบเสริมและหักล้างเช่นเดียวกับแสงที่เลี้ยวเบนจากเกรตติงเลี้ยวเบน รูปแบบการแทรกสอดของอิเล็กตรอนจะปรากฏเป็นจุดมืด-จุดสว่างบนฉากเรืองแสงซึ่งเป็นข้อมูลของโครงสร้างผลึกของพื้นผิว เทคนิคที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกของพื้นผิวนี้ เรียกว่า เทคนิค Low Energy Electron Diffraction (LEED) เครื่องมือที่ใช้ศึกษามีโครงสร้างดังรูปที่ 2.15 ซึ่งเป็นเครื่องมือเดียวกันกับที่ใช้ในเทคนิคโอเจอิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี แต่จะใช้เฉพาะอิเล็กตรอนจากการกระเจิงจากพื้นผิวสารตัวอย่างแบบยืดหยุ่นเท่านั้น อิเล็กตรอนส่วนใหญ่ที่มีการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น (โอเจอิเล็กตรอนอิเล็กตรอนทุติยภูมิและอิเล็กตรอนที่กระตุ้นพลาสมอน) จะถูกกำจัดออกไปโดยสนามไฟฟ้า

จากสมบัติความเป็นคลื่นของอิเล็กตรอน ความยาวคลื่นของอิเล็กตรอนขึ้นกับโมเมนตัมหรือพลังงานของอิเล็กตรอน โดยความสัมพันธ์ของ de Broglie ดังนี้

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2mE}} = \frac{h}{\sqrt{2meV}} \quad (2.15)$$

เมื่อ λ คือ ความยาวคลื่นของอิเล็กตรอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

h คือ ค่าคงที่ของพลังค์เท่ากับ 6.63×10^{-34} J.s

p คือ โมเมนตัมของอิเล็กตรอน

m คือ มวลของอิเล็กตรอน

E คือ พลังงานของอิเล็กตรอน

c คือ มวลของอิเล็กตรอน

V คือ ศักย์ไฟฟ้าที่ใช้เร่งอิเล็กตรอนจนมีพลังงานเท่ากับ E ในหน่วย อิเล็กตรอนโวลต์

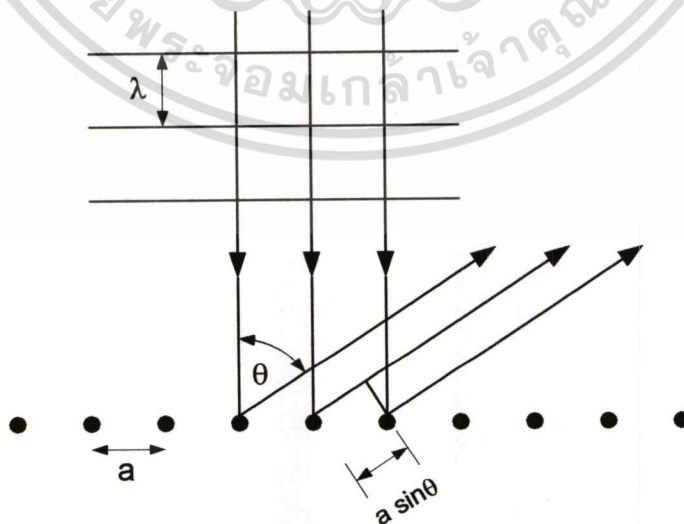
พิจารณาระยะห่างระหว่างอะตอมในโครงผลึกซึ่งมีค่าประมาณ 1 อังสตรอม จะสมนัยกับความยาวคลื่นของอิเล็กตรอนพลังงาน 150 อิเล็กตรอนโวลต์ (โฟตอนความยาวคลื่น 1 อังสตรอม จะมีพลังงาน 12.4 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์)

อิเล็กตรอนที่มีความยาวคลื่น λ ตกตั้งฉากกับแถวของอะตอมบนพื้นผิวที่มีระยะห่างระหว่างอะตอมเท่ากับ a ดังรูปที่ 2.17 เมื่ออิเล็กตรอนกระเจิงจากพื้นผิว คลื่นที่กระเจิงจากอะตอมหนึ่งจะแทรกสอดกับคลื่นที่กระเจิงจากอะตอมข้างเคียง โดยคลื่นจะเกิดการแทรกสอดแบบเสริมเมื่อ

$$n\lambda = a \sin\theta$$

(2.16)

เมื่อ n คือ เลขจำนวนเต็ม คำนึงสำหรับ a และ λ ค่าหนึ่ง มุม θ ที่เกิดจุดสว่างจะมีได้หลายค่า ขึ้นกับ n นอกจากนี้ จากความสัมพันธ์ข้างต้น ยังแสดงให้เห็นว่า มุม θ ที่เกิดจุดสว่างจะมีค่ามากขึ้น (ระยะห่างระหว่างจุดสว่างมากขึ้น) เมื่อระยะห่างระหว่างอะตอมลดลงและมุม θ ที่เกิดจุดสว่างจะมีค่าน้อยลง (ระยะห่างระหว่างจุดสว่างน้อยลง) เมื่ออิเล็กตรอนมีพลังงานสูงขึ้น (ความยาวคลื่นสั้นลง)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 2.17 การเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอน กรุณาอย่านำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาพื้นผิวใน 2 มิติ ที่มีระยะห่างระหว่างอะตอมเป็น a_1 และ a_2 การแทรกสอดแบบเสริมจะต้องสอดคล้องกับเงื่อนไขทั้งสองพร้อมกันคือ

$$n_1 \lambda = a_1 \sin \theta_1 \quad (2.17)$$

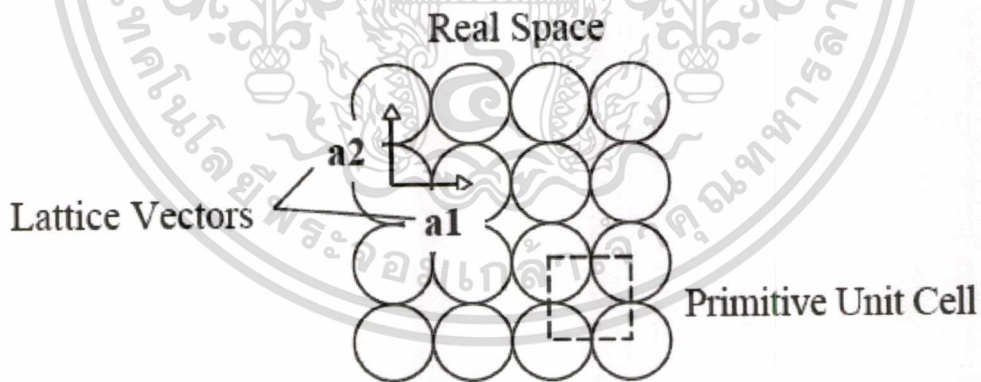
และ
$$n_2 \lambda = a_2 \sin \theta_2 \quad (2.18)$$

2.14.2 แลตทิซส่วนกลับของพื้นผิว (Reciprocal Lattices)

ให้ตำแหน่งของอะตอมบนระนาบของพื้นผิวถูกระบุโดยเวกเตอร์ \mathbf{a}_1 และ \mathbf{a}_2 ดังรูป 2.18 แลตทิซส่วนกลับของพื้นผิวหรือ LEED pattern ซึ่งเป็นภาพการแทรกสอดของลำอิเล็กตรอนจากพื้นผิวที่ได้จากเทคนิค LEED จะนิยามโดยเวกเตอร์ \mathbf{a}'_1 และ \mathbf{a}'_2 เมื่อ

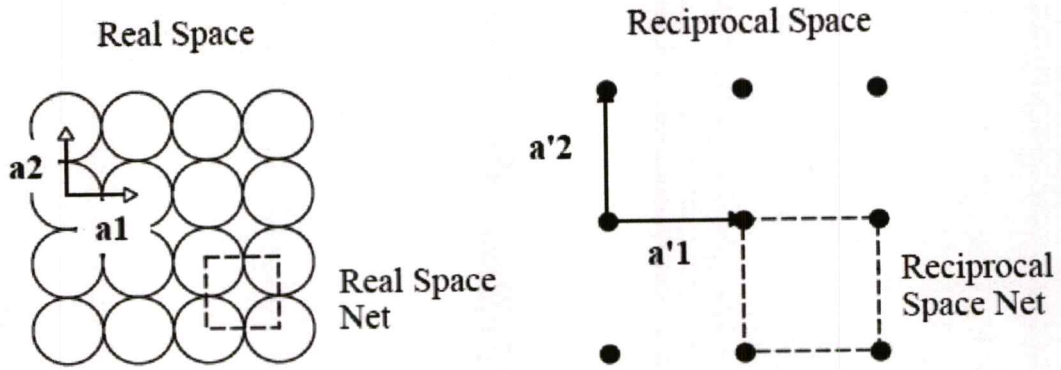
$$\left. \begin{aligned} \mathbf{a}_1 \cdot \mathbf{a}'_2 &= 0 \\ \mathbf{a}_2 \cdot \mathbf{a}'_1 &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2.19)$$

และ
$$\left. \begin{aligned} \mathbf{a}_1 \cdot \mathbf{a}'_1 &= 1 \\ \mathbf{a}_2 \cdot \mathbf{a}'_2 &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (2.20)$$



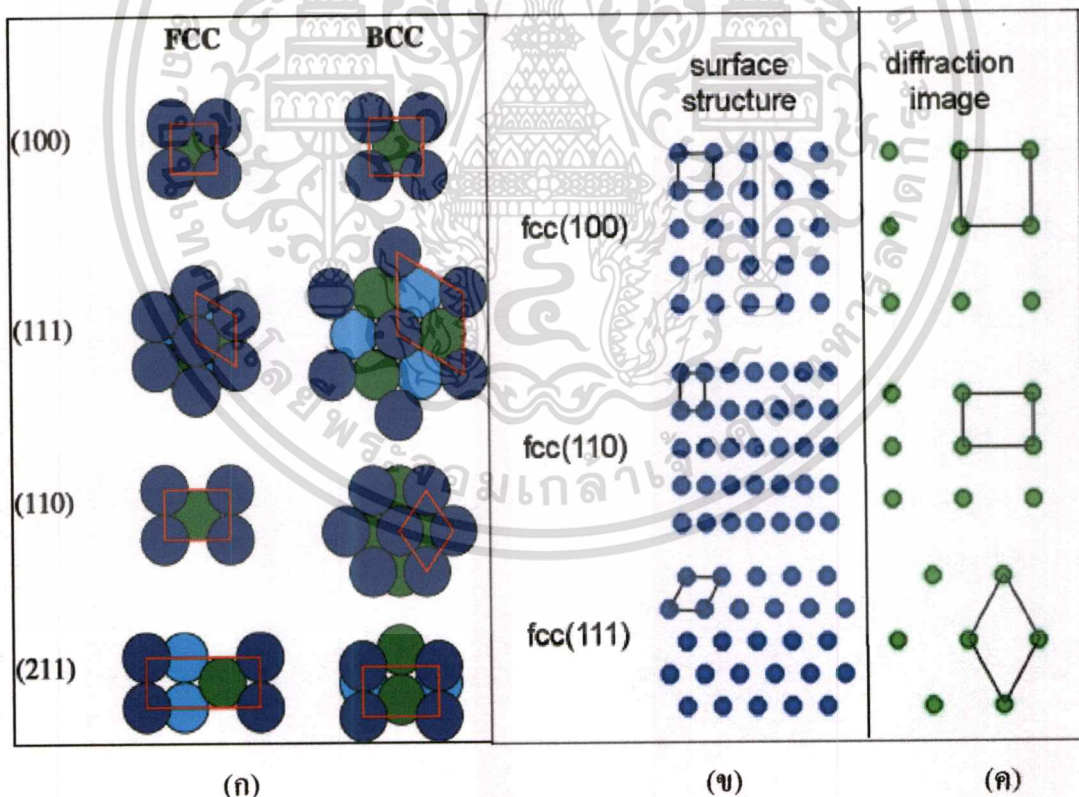
รูปที่ 2.18 โครงผลึก fcc(100) ของพื้นผิว

ในแลตทิซส่วนกลับของพื้นผิวหรือ LEED pattern ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของเวกเตอร์ \mathbf{a}_1 และ \mathbf{a}_2 บนพื้นผิวกับ \mathbf{a}'_1 และ \mathbf{a}'_2 ของโครงผลึก fcc(100) ในแลตทิซส่วนกลับของพื้นผิวดังรูปที่ 19 หาได้จากสมการ (2.20) คือ $|\mathbf{a}_1| = \frac{1}{|\mathbf{a}'_1|}$ และ $|\mathbf{a}_2| = \frac{1}{|\mathbf{a}'_2|}$



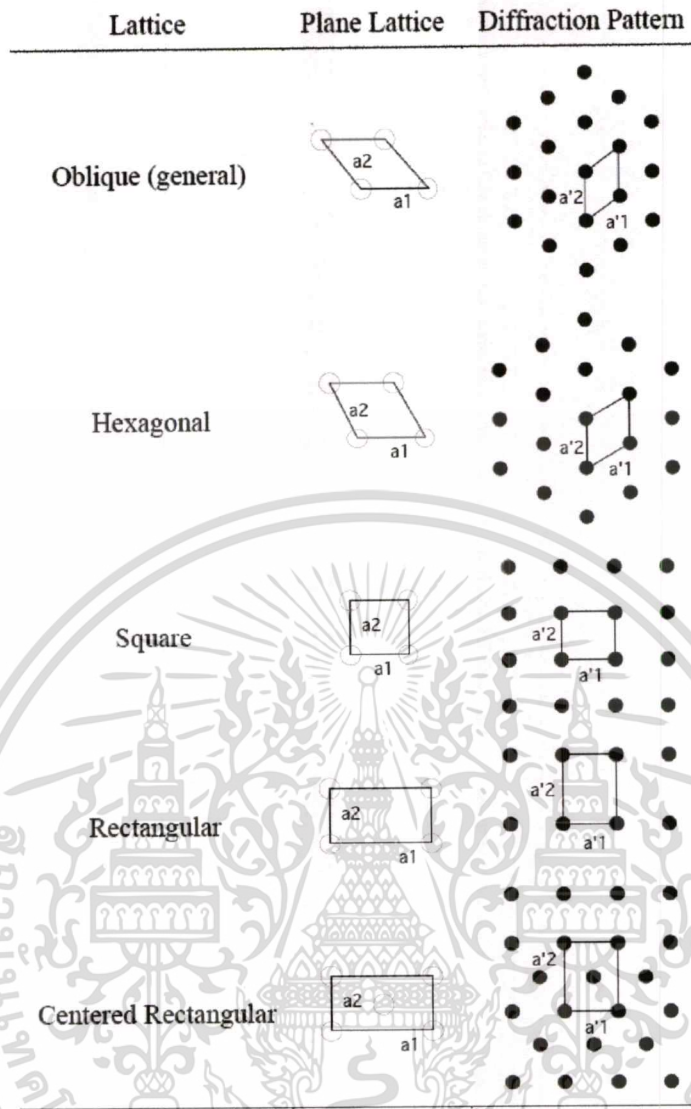
รูปที่ 2.19 โครงผลึก fcc(100) ของพื้นผิว (ซ้าย) และแลตทิซส่วนกลับของพื้นผิว(ขวา)

รูปที่ 2.20 เป็นตัวอย่างของหน่วยเซลล์ (unit cell) ของพื้นผิวของโลหะที่มีโครงสร้างผลึกเป็น fcc และ bcc ที่ระนาบต่าง ๆ และภาพการแทรกสอด (diffraction image) หรือ LEED pattern โดยภาพที่เกิดจากการแทรกสอดของพื้นผิวจะเป็นแลตทิซส่วนกลับของพื้นผิวจริง LEED pattern ของพื้นผิวที่เป็นไปได้ทั้งหมด 5 แบบ แสดงดังรูปที่ 2.21



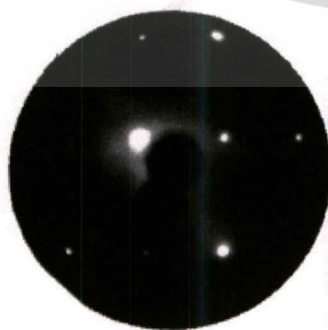
รูปที่ 2.20- (ก) และ (ข) หน่วยเซลล์ (unit cell) ของพื้นผิวโลหะที่มีโครงสร้างผลึกเป็น fcc และ bcc ที่ระนาบต่าง ๆ (ค) ภาพการแทรกสอด (diffraction image) หรือ LEED pattern ของพื้นผิวที่ระนาบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.21 LEED pattern ของพื้นผิวที่เป็นไปได้ทั้งหมด 5 แบบ

Cu(110)



90 eV



140 eV

รูปที่ 2.22 LEED pattern ของพื้นผิว Cu(110) ที่พลังงานของลำอิเล็กตรอน 90 eV และ 140 eV เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.22 แสดง LEED pattern ของพื้นผิวผลึกของทองแดง ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบ fcc ที่ระนาบ (110) หรือ Cu (110) ที่มีพลังงานของลำอิเล็กตรอนพลังงานต่างกัน 2 ค่า คือ 90 และ 140 อิเล็กตรอนโวลต์ เงาที่เห็นตรงกลางคือแหล่งกำเนิดลำอิเล็กตรอน (electron gun) LEED pattern ในกรณีสามารถอธิบายโครงสร้างผลึกได้ว่า ริวแทรกสอดที่เป็นจุดสว่างเรียงกันในแนวตั้ง เกิดจากอิเล็กตรอนที่กระเจิงจากแถวของอะตอมที่เรียงตัวในแนวอนบนพื้นผิว ส่วนจุดสว่างเรียงกันในแนวนอน เกิดจากอิเล็กตรอนที่กระเจิงจากแถวของอะตอมที่เรียงตัวในแนวตั้งบนพื้นผิว จุดสว่างจากทั้งสองแนวตัดกันที่จุด (00) ซึ่งในรูปนี้อยู่ที่ด้านบนซ้ายของแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน เมื่อเปรียบเทียบ LEED pattern ที่ศึกษาโดยลำอิเล็กตรอนพลังงาน 90 และ 140 อิเล็กตรอนโวลต์ พบว่าเมื่อใช้ลำอิเล็กตรอนพลังงาน 140 อิเล็กตรอนโวลต์ จุดสว่างทั้งในแนวแกนตั้งและแนวนอนจะเลื่อนเข้าใกล้กันมากขึ้น (เห็นจำนวนจุดสว่างบนฉากมากขึ้น) ส่วนรายละเอียดของโครงสร้างผลึกจะได้จากการศึกษาโครงสร้างใน reciprocal space

2.15 การทำความสะอาดพื้นผิวสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor Surface Cleaning)

วิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาการทำความสะอาดพื้นผิวของแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์และประเมินความสะอาดโคนเทคนิคไอเจอิเล็กตรอนสปีก โทรสโกปี ซึ่งได้ใช้กระบวนการทำความสะอาด 2 แบบ คือ การทำความสะอาดด้วยวิธีการทางเคมีและการทำความสะอาดโดยการสเปคเตอร์ด้วยลำไอออนพลังงานสูง

ในทางอุตสาหกรรมการผลิตอุปกรณ์หรือสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ กระบวนการทำความสะอาดแผ่นเวเฟอร์ของสารกึ่งตัวนำถือได้ว่าเป็นกระบวนการสำคัญ โดยมีจุดประสงค์หลัก คือ เพื่อเป็นการกำจัดสิ่งปนเปื้อนออกไปโดยปราศจากการทำลายผิวหน้าของแผ่นเวเฟอร์นั้น การเลือกใช้วิธีการทำความสะอาดให้เหมาะสมขึ้นกับชนิดของสิ่งปนเปื้อนที่ต้องการกำจัดและต้องการความสะอาดมากน้อยเพียงใด

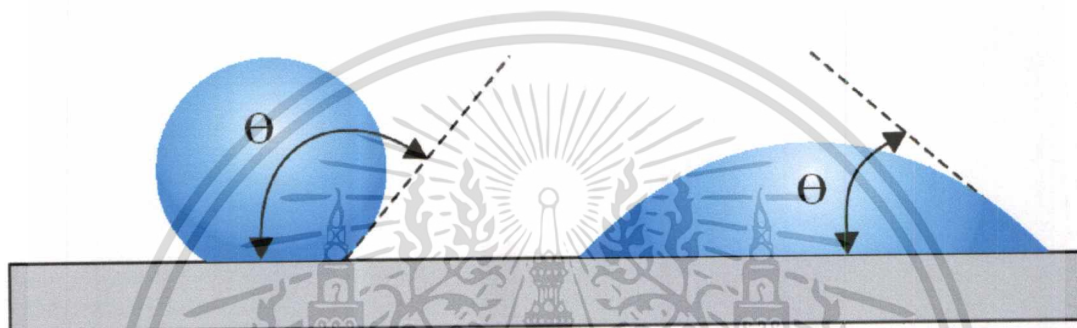
2.15.1 การทำความสะอาดพื้นผิวด้วยการล้างทางเคมี (Chemical Cleaning)

2.15.1.1 ชนิดของผิวหน้าของชิ้นงาน (Surface types)

วิธีการทำความสะอาดแต่ละวิธีจะมีประสิทธิภาพมากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับปัจจัย 2 ประการ คือ ชนิดของผิวหน้าที่จะทำความสะอาด และ ชนิดของสิ่งสกปรกที่อยู่บนผิวนั้นนั้น ก่อนเริ่มกระบวนการสร้างสิ่งประดิษฐ์ลงบนผิวหน้าของแผ่นเวเฟอร์ ผิวหน้าของแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์

หรือซิลิกอนไดออกไซด์ ส่วนแผ่นเวเฟอร์ที่ผ่านขบวนการผลิตแล้วพื้นผิวจะมีชั้นบาง ๆ ของโลหะปกคลุมอยู่ ซึ่งทำให้วิธีการทำความสะอาดของแผ่นเวเฟอร์ในกรณีทั้งสองจะมีความแตกต่างกัน

พื้นผิวของวัสดุที่ต้องการทำความสะอาดด้วยการล้างทางเคมี แบ่งได้เป็น 2 ลักษณะ คือ แบบเปียกน้ำได้ (hydrophobic) และ แบบไม่เปียกน้ำ (hydrophilic) ซึ่งเมื่อพื้นผิวทั้งสองสัมผัสกับน้ำจะมีลักษณะดังรูปที่ 2.23 การจัดแบ่งลักษณะผิวหน้าว่าเป็นลักษณะใดขึ้นอยู่กับมุมสัมผัส (contact angle, θ) ที่ผิวของน้ำที่สัมผัสกับพื้นผิววัสดุนั้น โดยถ้ามุมสัมผัสมีค่ามากกว่า 90 องศา จัดว่าเป็นผิวหน้าแบบไม่เปียกน้ำ แต่ถ้ามุมสัมผัสของโมเลกุลน้ำมีค่าน้อยกว่า 90 องศา จัดว่าเป็นผิวหน้าแบบเปียกน้ำได้



(ก)

(ข)

รูปที่ 2.23 การจัดแบ่งลักษณะพื้นผิว

(ก) พื้นผิวแบบเปียกน้ำได้

(ข) พื้นผิวแบบไม่เปียกน้ำ

ผิวหน้าแบบเปียกน้ำได้ อย่างเช่น ผิวหน้าของ ซิลิกอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็น ผิวหน้าที่สามารถทำให้เปียกน้ำได้ จึงสามารถทำความสะอาดได้ง่ายด้วยสารละลาย อนุภาคของสิ่งปนเปื้อนบนผิวหน้าแบบนี้จะสามารถหลุดออกมาได้และถูกกำจัดออกไปพร้อมกับสารละลาย สำหรับผิวหน้าของซิลิกอน จัดเป็นแบบไม่เปียกน้ำ ซึ่งผิวหน้าในลักษณะนี้จะทำความสะอาดได้ยากกว่า อนุภาคของสิ่งปนเปื้อนบนผิวหน้าในลักษณะนี้จะไม่หลุดออกมากับโมเลกุลน้ำ

2.15.1.2 สารปนเปื้อน (Contaminants)

สารปนเปื้อนบนพื้นผิวสารกึ่งตัวนำที่มีผลถึงความล้มเหลวในการผลิตสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภท ได้แก่

1) ฝุ่นผง (particles)

ฝุ่นผงที่ตกค้างอยู่บนพื้นผิว จะรบกวนกระบวนการสร้างชั้นของสารไวแสงและกระบวนการปลูกฟิล์ม อนุภาคของฝุ่นอาจทำให้เกิดจากลวดวงจรหรือเปิดวงจรของตัวนำได้

2) โลหะ (metal)

โลหะตกค้างบนพื้นผิวจะลดช่วงชีวิตของพาหะข้างน้อยในสารกึ่งตัวนำลดศักยภาพของวงจรรวม และทำให้เกิดการรั่วที่รอยต่อ โลหะปนเปื้อนอาจมาจากเครื่องยิงฝังไอออน (ion implanter) และจากเครื่องกัดผิวด้วยพลาสมา (plasma etching equipment)

3) สารอินทรีย์

สารอินทรีย์ทำให้ความเป็นฉนวนของชั้นออกไซด์ลดลงและทำให้เกิดจุดบกพร่องบนฟิล์มที่ปลูกได้ สารอินทรีย์ปนเปื้อนซึ่งได้แก่ สารประเภทไฮโดรคาร์บอน อาจมาจากอากาศและก๊าซที่ปล่อยจากพลาสติกที่ใช้เป็นหีบห่อขณะขนส่ง เป็นต้น

4) ออกไซด์โดยธรรมชาติ (native oxide)

ออกไซด์ที่เกิดขึ้นโดยธรรมชาติบนสารกึ่งตัวนำจะมีคุณภาพต่ำ ทำให้เกรตของสิ่งประดิษฐ์มีคุณภาพต่ำลง ออกไซด์จะเกิดขึ้นบนพื้นผิวสารกึ่งตัวนำอย่างรวดเร็วถ้าไม่มีการป้องกันที่ถูกต้อง

2.15.1.3 กระบวนการ RCA (RCA clean)

กระบวนการทำความสะอาดแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์อย่างมีระบบถูกพัฒนาขึ้นใช้ที่บริษัท RCA (Radio Corporation of America) ตั้งแต่ปี 1965 และเรียกกระบวนการทำความสะอาดนี้ว่า กระบวนการ RCA เป็นกระบวนการทำความสะอาดที่ใช้กันมากที่สุดในเชิงอุตสาหกรรม จะใช้ทำความสะอาดแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์ก่อนกระบวนการผลิต กระบวนการ RCA แบบดั้งเดิมมีขั้นตอนดังนี้

1) Standard Clean 1 (SC1) ทำความสะอาดด้วยสารละลาย แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH_4OH) 29% ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) 30% และน้ำ (H_2O) ในอัตราส่วน 1:1:5 ที่อุณหภูมิ 70 - 80°C เป็นเวลา 20 นาที

2) ล้างด้วยน้ำปลอดประจุ (DI water)

3) Standard Clean 2 (SC2) ทำความสะอาดด้วยสารละลาย กรดไฮโดรคลอริก (HCl) 37% ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) 30% และน้ำ (H_2O) ในอัตราส่วน 1:1:6 ที่อุณหภูมิ $70^{\circ}C$ เป็นเวลา 20 นาที

4) ล้างด้วยน้ำปอดคประจุ (DI water) และอบให้แห้ง

ขั้นตอน SC1 เป็นการกำจัดฝุ่นผงและสารอินทรีย์ตกค้าง SC1 ทำความสะอาดพื้นผิวโดยการสร้างฟิล์มของไฮดรอกไซด์ (hydrous oxide film) ซึ่งทำให้เกิดความขรุขระขึ้นบนพื้นผิวเป็นผลให้พื้นผิวเปลี่ยนจากแบบไม่ดูดซึมน้ำเป็นแบบดูดซึมน้ำได้ ส่วนขั้นตอน SC2 จะเป็นการกำจัดสิ่งปนเปื้อนที่เป็นโลหะตกค้าง ในปัจจุบันมีการเพิ่มขั้นตอนการกำจัดออกไซด์ ด้วยสารละลาย กรดไฮโดรฟลูออริก (HF) 49% และน้ำ (H_2O) ในอัตราส่วน 1:50 ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 10 วินาที

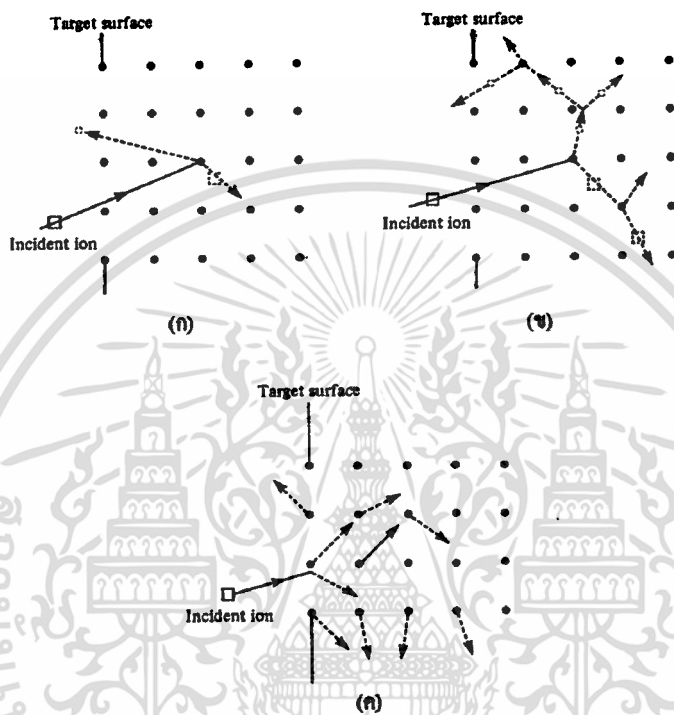
2.15.2' การทำความสะอาดพื้นผิวด้วยลำไอออน (Ion Sputtering Cleaning)

2.15.2.1 กลไกการสปีดเตอร์ (Sputtering mechanisms)

เมื่อลำไอออนพลังงานสูงตกกระทบพื้นผิวของวัสดุ จะทำให้อะตอมที่ผิวหน้าของวัสดุหลุดออกโดยมีการแลกเปลี่ยนพลังงาน และโมเมนตัมระหว่างอนุภาคที่วิ่งเข้าชนกับอะตอมที่ผิววัสดุ เรียกกระบวนการนี้ว่า การสปีดเตอร์ิง กระบวนการนี้อนุภาคที่วิ่งเข้าชนอาจเป็นกลางทางไฟฟ้าหรือมีประจุก็ได้ เมื่อลำไอออนพลังงานสูงตกกระทบพื้นผิวของวัสดุ จะทำให้อะตอมของวัสดุเกิดการเคลื่อนตัวได้ลำไอออนมีการถ่ายเทพลังงานให้กับอะตอมมากกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวและอะตอมหรือโมเลกุลที่พื้นผิวจะหลุดออกถ้าได้รับพลังงานจากไอออนมากกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของพื้นผิว อะตอมที่เคลื่อนตัวอยู่ภายใต้พื้นผิวหลังจากถูกชนด้วยไอออน จะชนกับอะตอมอื่น ๆ อย่างต่อเนื่อง จนมีอะตอมตามส่วนเคลื่อนที่มาถึงผิววัสดุและหลุดออกจากพื้นผิวในที่สุด

การชนที่ทำให้เกิดการสปีดเตอร์ิงของอะตอมสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ลักษณะ คือการชนแบบครั้งเดียว (single knock-on) การชนแบบต่อเนื่อง (linear cascade) และการชนแบบการแทง (spike) ดังแสดงในรูปที่ (2.24) ในการชนแบบครั้งเดียว ไอออนมีพลังงานพอที่จะถ่ายเทให้กับอะตอม ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอะตอมได้แต่ทั้งไอออนและอะตอมไม่มีพลังงานมากพอที่จะถ่ายเทให้กับอะตอมอื่นได้อีก อะตอมที่เคลื่อนที่นี้ถ้าอยู่ใกล้พื้นผิวมากพอก็สามารถเกิดการสปีดเตอร์ิงได้ ในการชนแบบต่อเนื่องนั้น อะตอมที่ถูกชนและไอออนยังมีพลังงานมากพอที่จะชนและถ่ายเทพลังงานให้อะตอมอื่นได้อย่างต่อเนื่อง แต่มีอะตอมที่กำลังเคลื่อนที่ไม่มากนัก ในขณะที่การชนแบบการแทงจะมีอะตอมที่กำลังเคลื่อนที่จำนวนมาก เมื่อไอออนมีพลังงานต่ำกว่า 1 กิโล

อิเล็กตรอนโวลต์ การชนส่วนมากจะเป็นแบบการชนแบบครั้งเดียว เมื่อพลังงานสูงขึ้น การชนส่วนมากจะเป็นแบบต่อเนื่อง ยกเว้นถ้าไอออนเป็นชนิดไอออนหนัก (heavy ion) จะมีการถ่ายเทพลังงานในการชนอย่างรวดเร็ว ซึ่งเป็นการชนแบบการแทง เมื่อไอออนมีพลังงานเพิ่มขึ้นจากพลังงานขีดเริ่มที่ทำให้เกิดการสปีดเตอร์จนเกิดการชนแบบต่อเนื่องแล้ว ยึดของการสปีดเตอร์จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพลังงานของไอออน



รูปที่ 2.24 การชนในกระบวนการสปีดเตอร์

- (ก) การชนแบบครั้งเดียว
 (ข) การชนแบบต่อเนื่อง
 (ค) การชนแบบการแทง

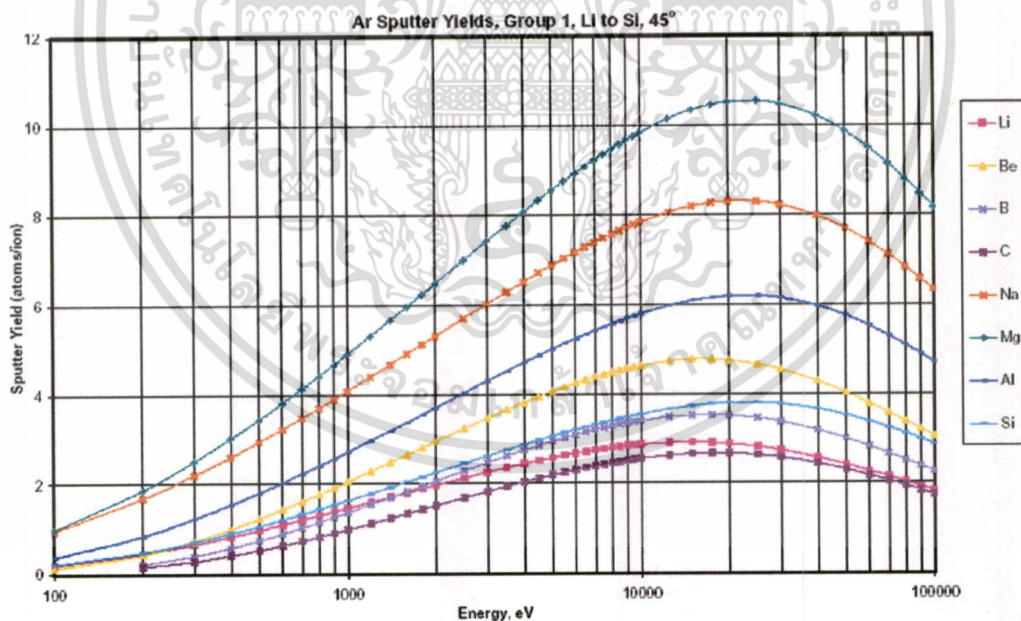
เมื่อลำไอออนพลังงานสูงเข้าชนพื้นผิวของวัสดุ อาจทำให้เกิดปรากฏการณ์ต่างๆดังนี้

- 1) เกิดการสะท้อนกลับของไอออนจากผิวหน้า (reflected ions and neutrals) ซึ่งส่วนใหญ่จะสะท้อนกลับออกมาในรูปของอะตอมที่เป็นกลางทางไฟฟ้าอันเกิดจากการรวมตัวกับอิเล็กตรอนที่ผิวสารเป้า
- 2) อาจเกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron emission) ออกจากสารเป้า เมื่อไอออนที่เข้าชนมีพลังงานสูงพอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3) ไอออนอาจฝังตัวลงในผิวสารเป้า (Ion implantation) ระดับความลึกของการฝังตัวจะแปรผันโดยตรงกับพลังงานของไอออน ซึ่งมีค่าประมาณ 10 อังสตรอมต่อพลังงานไอออน 1 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ (สำหรับไอออนของก๊าซอาร์กอนที่ฝังตัวในแผ่นทองแดง)
- 4) อาจเกิดการเรียงตัวของอะตอมที่ผิวสารเป้าใหม่ และเกิดความบกพร่องของโครงสร้างผลึก (Structural changes possible) เราเรียกการจัดตัวใหม่ของโครงสร้างผลึกนี้ว่า Altered surface layers
- 5) อาจเกิดกระบวนการชนแบบต่อเนื่อง ระหว่างอะตอมของสารเป้ากับไอออนหลายครั้ง จนในที่สุดสามารถเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวของผลึกสารเป้า ทำให้เกิดการปลดปล่อยอะตอมออกจากสารเป้า ซึ่งเรียกว่ากระบวนการสปัตเตอริง (Sputtering)

2.15.2.2 ค่าyieldของการสปัตเตอริง (Sputter Yields)



รูปที่ 2.25 สปัตเตอริง yield ของธาตุ Li ถึง Si ที่มุม 45 องศา

ค่า yield ของการสปัตเตอริง Y คือ ค่าเฉลี่ยของการหลุดออกของอะตอมที่ผิวสารเป้าเนื่องจากการชนของไอออน ซึ่งสามารถกำหนดเป็น ค่าเฉลี่ยของจำนวนอะตอมที่หลุดออกจากผิวสารเป้าต่อค่าเฉลี่ยของจำนวนไอออนที่ตกกระทบสารเป้า มีหน่วยเป็นอะตอมต่อไอออน (atom/ion)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

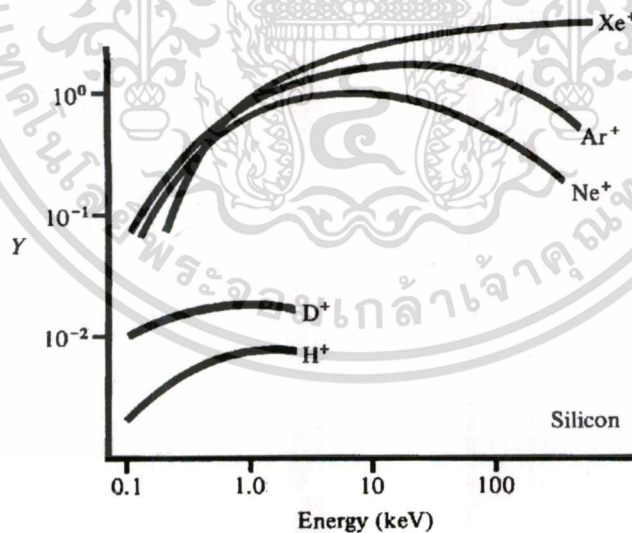
$$Y = \text{อะตอมที่หลุดออก/ไอออนที่ตกกระทบ} \quad (2.21)$$

รูปที่ 2.25 เป็นตัวอย่างของค่าสปีดเตอริงยิลด์กับพลังงานของลำไอออน สำหรับธาตุ Li ถึง Si ที่มีมุม 45 องศา

การสปีดเตอริงมีสาเหตุมาจากอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคตกกระทบกับอะตอมของสารเป้า ดังนั้นค่ายิลด์ของการสปีดเตอริงจะแปรเปลี่ยนตามปัจจัยหลายอย่าง เช่น

1) พลังงานของไอออน

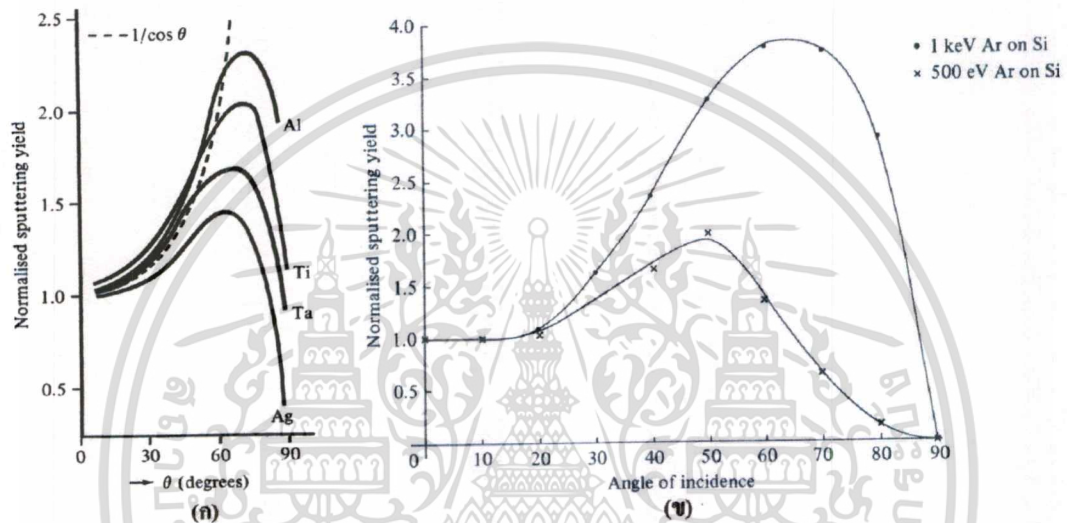
จากรูปที่ 2.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสปีดเตอริงยิลด์ กับพลังงานของไอออนที่ตกกระทบ จากรูปจะเห็นว่า ในขณะที่พลังงานของไอออนมีค่าต่ำมาก ค่ายิลด์ของการสปีดเตอริงมีค่าเป็นศูนย์ เนื่องจากไม่สามารถเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมบนสารเป้าได้ ค่ายิลด์ของการสปีดเตอริงจะมีค่าสูงสุดเมื่อไอออนมีพลังงานประมาณ 20 กิโลอิเล็กตรอน โวลต์ จากนั้นจะลดลงเมื่อไอออนมีพลังงานสูงมากยิ่งขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเกิดการฝังตัวของไอออนบนผิวสารเป้าเพิ่มขึ้น (ion implantation) นอกจากนี้ชนิดของไอออน (มีมวลต่างกัน) ก็มีผลต่อค่ายิลด์ของการสปีดเตอริงเช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.26



รูปที่ 2.26 สปีดเตอริงยิลด์ของธาตุ Si เป็นฟังก์ชันของพลังงานและชนิดของลำไอออน

2) มุมตกกระทบของไอออน

มุมที่ลำไอออนตกกระทบพื้นผิวจะมีผลต่อค่าyieldของการสปีดเตอร์ ในการทำความสะอาดพื้นผิว โดยกระบวนการไอออนสปีดเตอร์จึง ควรจัดให้ลำไอออนตกกระทบพื้นผิวด้วยมุมที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ค่าyieldของการสปีดเตอร์ รูปที่ 2.27 แสดงให้เห็นว่า yieldของการสปีดเตอร์มีค่าสูงขึ้นตาม มุมตกกระทบที่วัดจากเส้นปกติที่เพิ่มขึ้น จนมีค่าสูงสุดที่มุมระหว่าง $60 - 70^\circ$ โดยแทบไม่ขึ้นกับ ชนิดของวัสดุ



รูปที่ 2.27 ค่าyieldของการสปีดเตอร์เป็นฟังก์ชันของมุมตกกระทบของลำไอออน

(ก) ลำไอออนของอาร์กอนพลังงาน 1.05 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์

(ข) สปีดเตอร์yieldของ Si เมื่อถูกยิงด้วยลำไอออนของอาร์กอน

บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีเป็นการศึกษาถึงขั้นตอนและวิธีในการทำความสะอาดผิวหน้าของแผ่นซิลิกอนด้วยกัน 2 วิธี คือ วิธีทางกระบวนการทางเคมี และ วิธีการสปัตเตอร์ด้วยลำไอออนพลังงานสูง โดยนำเทคนิคโอเจิล็กตรอนสเปกโทรสโกปีมาใช้ในการวิเคราะห์ระดับความสะอาดของผิวหน้าของแผ่นซิลิกอนที่ได้ผ่านกระบวนการทำความสะอาดในลักษณะต่าง ๆ กัน ซึ่งจำเป็นต้องทำภายใต้สภาวะความเป็นสุญญากาศ ดังนั้นในขั้นตอนของการดำเนินงานวิจัยจึงเป็นการติดตั้งเครื่องมือและอุปกรณ์ต่าง ๆ เข้ากับระบบสุญญากาศ โดยเครื่องมือที่มีความสำคัญต่องานวิจัยนี้ที่ต้องทำการติดตั้งเข้ากับระบบสุญญากาศ ได้แก่ ระบบวิเคราะห์พื้นผิวด้วยเทคนิคโอเจิล็กตรอนสเปกโทรสโกปี และแหล่งกำเนิดลำไอออนสำหรับการสปัตเตอร์ หลังจากนั้นจึงเป็นการเตรียมระบบสุญญากาศให้ได้ระดับความดันเหมาะสมต่อการดำเนินงาน โดยระบบสุญญากาศที่ใช้งานวิจัยนี้จะต้องมีสภาวะความเป็นสุญญากาศสูงยิ่ง พร้อมทั้งต้องทำการศึกษาถึงวิธีการใช้งานเครื่องมือ และ วิธีการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการวัด ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 ระบบสุญญากาศ

3.1.1 ระบบปั๊มสุญญากาศ

ระบบปั๊มสุญญากาศ ทำหน้าที่ดูดอากาศออกจากระบบ จะต้องเลือกขนาดของปั๊มให้มีความเหมาะสม มีความเร็วปั๊มสูงพอที่จะสามารถรักษาความดันให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานได้ ระบบปั๊มสำหรับงานวิจัยนี้ประกอบด้วยปั๊ม 2 ตัวได้แก่ ปั๊มเทอร์โบโมเลกุลาร์และปั๊มโรตารี

ปั๊มเทอร์โบโมเลกุลาร์สำหรับงานวิจัยนี้เลือกใช้ รุ่น Turbovac 361 ของบริษัท Leybold หน้าแปลนของปากปั๊มมี ขนาด 8 นิ้ว ทำความดันได้ต่ำสุดถึง 1×10^{-10} มิลลิบาร์ มีความเร็วปั๊ม 400 ลิตรต่อวินาที สำหรับก๊าซไนโตรเจน ซึ่งเป็นอัตราเร็วของการปั๊มที่ ปากของปั๊ม ในการใช้งานจะมีช่วงคอต่อเชื่อมระหว่างตัวปั๊มกับแชนเบอร์สุญญากาศเป็นผลให้ความเร็วปั๊มที่แท้จริงที่เรียกว่า ความเร็วปั๊มยังผล (effective pumping speed) ของระบบมีค่าลดลง ซึ่งสามารถคำนวณ ได้โดย

$$\frac{1}{S_e} = \frac{1}{S_p} + \frac{1}{C} \quad (3.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | | | |
|-------|-------|-----|--------------------------------------|
| เมื่อ | S_e | คือ | ความเร็วปั๊มยังผล |
| | S_p | คือ | ความเร็วปั๊มของปั๊มเทอร์โบโมเลกุลาร์ |
| | C | คือ | ความนำของท่อ |

สำหรับงานวิจัยนี้ ท่อต่อระหว่างแฮมเบอร์ กับปากปั๊มเทอร์โบโมเลกุลาร์มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 146 mm มีความยาว 100 mm จากการคำนวณ จะได้ว่าท่อมีค่าความนำ = $12.1 \times D^3/L = 12.1(14.6)^3/10 = 3766$ ลิตรต่อวินาที ดังนั้น

$$\frac{1}{S_e} = \frac{1}{400} + \frac{1}{3766} \quad (3.2)$$

$$S_e = 360 \text{ l/s}$$

สำหรับปั๊มโรตารี การคำนวณความเร็วปั๊มสามารถทำได้ดังนี้

$$S_{rot} \geq \frac{Q_{max}}{CBP} \quad (3.3)$$

| | | | |
|-------|-----------|-----|--|
| เมื่อ | S_{rot} | คือ | ความเร็วของปั๊มโรตารี |
| | Q_{max} | คือ | อัตราการปลดปล่อยโมเลกุลแก๊สสูงสุด (maximum throughput) |
| | CBP | คือ | critical backing pressure |

Q_{max} หาได้จาก กราฟคุณลักษณะของปั๊ม (pump characteristic curve) โดยทั่วไปที่ความดัน 10^{-2} มิลลิบาร์ ความเร็วปั๊มจะมีค่า = 200 l/s ดังนั้น $Q_{max} = (200 \text{ l/s})(10^{-2} \text{ mbar}) = 2.0 \text{ mbar.l/s}$ สำหรับ CBP เป็นสมบัติของปั๊มเทอร์โบโมเลกุลาร์ที่ต่ออยู่ในกรณีของปั๊ม รุ่น Turbovac 361 มีค่า $CBP = 5 \times 10^{-1}$ มิลลิบาร์ ดังนั้น

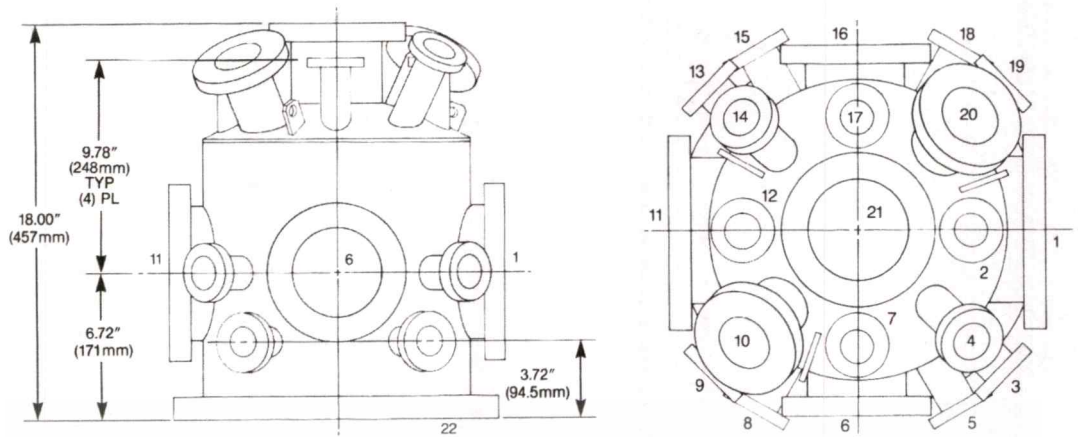
$$\begin{aligned}
 S_{\text{rot}} &\geq \frac{Q_{\text{max}}}{\text{CBP}} \\
 &\geq \frac{2.0 \text{ mbar.l/s}}{0.5 \text{ mbar}} \\
 &\geq 4 \text{ l/s} \\
 &\geq \frac{(4 \text{ l/s})(3600 \text{ s/hr})}{(1000 \text{ l/m}^3)} \\
 &\geq 14.4 \text{ m}^3/\text{hr}
 \end{aligned}$$

ดังนั้นจึงเลือกใช้ ปั๊มกลโรตารี รุ่น Trivac D16B ของบริษัท Leybold ซึ่งมีความเร็วปั๊ม 22 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ทำความดันได้ต่ำสุดถึง 1×10^{-4} มิลลิบาร์

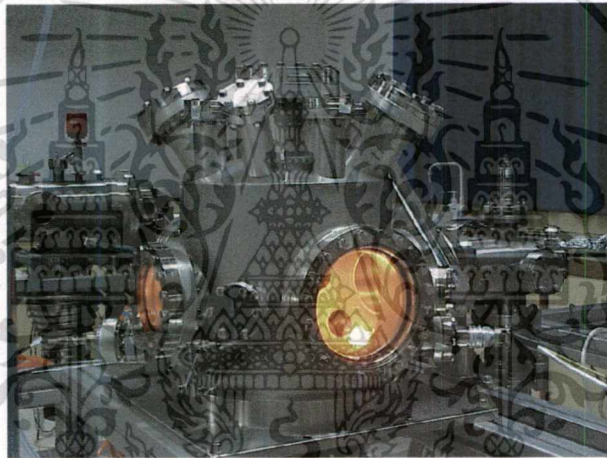
3.1.2 แคมเบอร์สุญญากาศ

แคมเบอร์สุญญากาศเป็นบริเวณที่ใช้สำหรับติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการทดลอง จะต้องออกแบบให้มีปริมาตรเหมาะสมกับระบบปั๊มสุญญากาศ และมีรูปร่างเหมาะสมสำหรับที่จะติดตั้งอุปกรณ์ทั้งหมดที่มีรวมถึงอุปกรณ์ที่อาจมีในอนาคตด้วย โดยในงานวิจัยนี้ แคมเบอร์สุญญากาศทำจากโลหะสแตนเลส มีลักษณะเป็นทรงกระบอกในแนวตั้ง มีพอร์ตสำหรับการติดตั้งอุปกรณ์ต่าง ๆ โดยทุก ๆ พอร์ต จะต้องมียุ่หน้าแปลนเป็นเขียวโลหะขบกันบนปะเก็นทองแดง (CF Flange) ในงานวิจัยนี้แคมเบอร์สุญญากาศจะมีอยู่ด้วยกัน 2 แคมเบอร์ คือ แคมเบอร์สำหรับติดตั้งเครื่องมือวิเคราะห์ ซึ่งต้องเป็นสุญญากาศระดับสูงยิ่ง ซึ่งจะเรียกว่า แคมเบอร์หลัก และ แคมเบอร์สำหรับรอการส่งสารตัวอย่างเข้าสู่แคมเบอร์หลัก ซึ่งจะเรียกว่า แคมเบอร์รอง

ลักษณะของแคมเบอร์หลัก แสดงดังรูปที่ 3.1 และ 3.2 โดยมีปริมาตรประมาณ 33 ลิตร มีหน้าพอร์ตขนาดต่าง ๆ ทั้งหมด 22 พอร์ต สำหรับงานวิจัยนี้จะติดตั้งระบบ Back-Display LEED – AUGER สเปกโทรมิเตอร์ รุ่น BOL 800 ของบริษัท OCI Microengineering, INC เข้ากับแคมเบอร์หลัก กับพอร์ตที่มีหน้าแปลน ขนาด 8 นิ้ว (DN160CF) และ ติดตั้ง แหล่งกำเนิดไอออนสปีดเตอร์ริง รุ่น NGI3000 ของบริษัท LK Technologies เข้ากับพอร์ตที่มีหน้าแปลนขนาด 2.75 นิ้ว (DN40CF) รวมทั้งใช้พอร์ตเหล่านี้ในการติดตั้งหัววัดความดันซึ่งในงานวิจัยนี้มีอยู่ด้วยกัน 2 ชนิด ได้แก่ Cold Cathode Gauge 1 ตัว ใช้วัดความดันในช่วง 10^{-3} - 10^{-9} มิลลิบาร์ และใช้ Pirani Gauge 1 ตัว สำหรับวัดความดันในช่วงสูงกว่า 10^{-3} มิลลิบาร์ ของบริษัท Leybold Vacuum, GMBH



รูปที่ 3.1 ไคอะแกรมแชมเบอร์สุญญากาศที่ใช้ในงานวิจัย



รูปที่ 3.2 แชมเบอร์สุญญากาศที่ใช้ในงานวิจัย

การใช้งานระบบสุญญากาศที่ถูกวิธีจะทำให้ระบบทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและต่อเนื่อง การใช้งานผิดวิธีหรือขาดการบำรุงรักษาอาจทำให้ระบบไม่สามารถทำความดันสุดท้ายให้ได้เท่าที่ต้องการและอาจมีคราบน้ำมันเคลือบที่ผนัง แชมเบอร์ และอุปกรณ์ที่ติดตั้งอยู่ภายในได้ การใช้งานระบบสุญญากาศที่ถูกต้องมีดังนี้

- 1) การปล่อยก๊าซเข้าระบบ (venting) เพื่อกลับสู่ความดันบรรยากาศ จะต้องใช้ก๊าซไนโตรเจนแห้งแทนอากาศ เพื่อป้องกันไอน้ำเข้าสู่ระบบ ในกรณีที่ต้องเปิด แชมเบอร์ พยายามให้ระบบสัมผัสกับอากาศในเวลาสั้นที่สุดเท่าที่จะทำได้ และถ้าไม่ใช้งานระบบจะต้องให้ระบบอยู่ในสภาวะสุญญากาศโดยการปิดวาล์วทุกตัว ถ้าต้องมีการปล่อยก๊าซเข้า (venting) จะต้องปล่อยก๊าซเข้าทางด้านทางเข้า (inlet side) เสมอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตเห็นาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 2) ต้องมีการตรวจเช็คระบบรักษาความปลอดภัยของระบบอย่างสม่ำเสมอ
- 3) ในกรณีไฟฟ้าขัดข้องจะต้องปิดวาล์วทุกตัว
- 3) ถ้าระบบใช้ปั๊มโรตารีทำหน้าที่เป็นปั๊มส่วนหน้าจะต้องเปลี่ยนเป็นปั๊มสุญญากาศระดับสูง (high vacuum) ให้เร็วพอเพื่อให้แน่ใจว่าจะไม่เกิดไอน้ำมันย้อนกลับ (backstreaming) โดยมีหลักว่า ไอน้ำมันย้อนกลับจะไม่เกิดถ้าผลคูณของความดันในหน่วย torr กับเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อระหว่างปั๊มโรตารีกับปั๊มสุญญากาศระดับสูงในหน่วย เซนติเมตร มีค่าน้อยกว่า 0.3 เช่นถ้าท่อมีขนาด 3 เซนติเมตร จะต้องเริ่มเปิดปั๊มสุญญากาศระดับสูง เมื่อความดันในท่อไม่ต่ำกว่า 0.1 torr

3.1.3 แคมเบอร์สุญญากาศระดับความดันสุญญากาศสูงยิ่ง

สุญญากาศระดับสูงยิ่ง (ultrahigh vacuum, UHV) คือ ความดันสุญญากาศระดับ 10^{-7} ถึง 10^{-12} มิลลิบาร์ ความดันในระดับนี้เราจะไม่สนใจความหมายของความดันในแง่แรงต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ แต่จะเกี่ยวข้องกับความหนาแน่นของโมเลกุลต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรในแคมเบอร์สุญญากาศมากกว่า ซึ่งจะเกี่ยวข้องโดยตรงต่อความสะอาดของพื้นผิวหรือปริมาณของก๊าซที่ถูกดูดซับ (adsorption) ไว้โดยพื้นผิว ความดันระดับ UHV จะถูกใช้ในกรณีที่ต้องการคงความสะอาดของพื้นผิวไว้นาน ๆ เช่นถ้าพื้นผิวอยู่ในระบบสุญญากาศระดับ 10^{-6} มิลลิบาร์ ที่อุณหภูมิห้อง ภายในเวลา 2-3 วินาที พื้นผิวนี้อาจจะมีการดูดซับโมเลกุลของก๊าซด้วยความหนาแน่น 1 ชั้นของโมเลกุล (1 monolayer, ML) แต่จะใช้เวลาหลายชั่วโมงในการดูดซับโมเลกุลของก๊าซด้วยความหนาแน่น 1 ชั้นของโมเลกุล เมื่อพื้นผิวอยู่ในสุญญากาศระดับ 10^{-10} มิลลิบาร์ ทำให้มีเวลาในการวัดหรือการปลูกฟิล์มเพียงพอ โดยไม่ถูกรบกวนจากการดูดซับก๊าซของพื้นผิวดังกล่าว

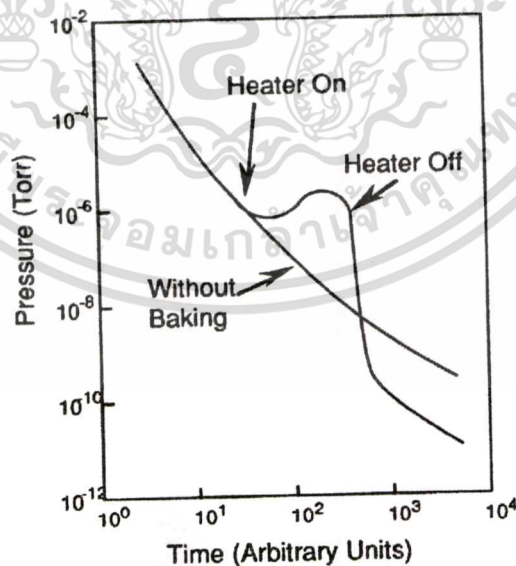
หลักการพื้นฐานในการออกแบบระบบสุญญากาศให้มีความดันระดับ UHV คือต้องออกแบบให้ระบบมีความเร็วปั๊มสูงมาก ๆ และให้มีอัตราการปล่อยก๊าซภายในระบบสุญญากาศต่ำมาก ๆ จำนวนโมเลกุลของก๊าซในระบบสุญญากาศเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราการปล่อยก๊าซภายในระบบสุญญากาศโดยรวม (รวมถึงการรั่วของระบบด้วย) และเป็นสัดส่วนผกผันกับความเร็วปั๊ม (pumping speed) การเพิ่มความเร็วปั๊มให้สูงขึ้นในระดับที่ต้องการจะต้องเสียค่าใช้จ่ายมาก ดังนั้นวิธีที่เหมาะสมกว่าคือการลดการรั่ว (รวมทั้งการซึมของก๊าซผ่านปะเก็น (gasket) และลดอัตราการปล่อยก๊าซจากผนัง แคมเบอร์ สุญญากาศ (outgassing) โดยวิธีการเตรียมพื้นผิว (surface treatment) ที่เหมาะสม

เทคนิคสำคัญที่ทำให้สามารถสร้างระบบสุญญากาศระดับ UHV ได้คือการใส่ปะเก็นโลหะ (metal gasket) แทนปะเก็นยาง (elastomer gasket) ซึ่งนอกจากจะทำจัดการซึมผ่านของก๊าซแล้วยัง

ลดอัตราการปล่อยก๊าซลง 10 ถึง 1000 เท่าด้วย วิธีทำเป็นอีกวิธีหนึ่งคือการเพิ่มอุณหภูมิของ แคมเบอร์สุญญากาศให้สูงขึ้น ซึ่งจะทำให้เกิดออกซิเดชันของพื้นผิวและปล่อยก๊าซออกมาในปริมาณที่น้อยลง อย่างไรก็ตาม การเพิ่มอุณหภูมิอาจทำให้เกิดการปนเปื้อนของพื้นผิวได้ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เบอร์ สูญญากาศในขณะที่ทำการปั๊มระบบสุญญากาศ เพื่อเพิ่มพลังงานให้แก่ก๊าซที่ถูกดูดซับเป็นการช่วยเพิ่มอัตราการปลดปล่อยก๊าซออกจากผนัง แคมเบอร์ ทำให้โมเลกุลของก๊าซที่ถูกดูดซับไว้โดยผนังแคมเบอร์ หลุดออกและหมดไปอย่างรวดเร็ว กระบวนการนี้เรียกว่า การอบ (baking) วิธีการเพิ่มพลังงานให้แก่ก๊าซที่ถูกดูดซับซึ่งโดยปกติได้แก่ไอน้ำ อาจทำได้โดยการยิงด้วยลำอิเล็กตรอนหรือไอออน หรือการฉายด้วยแสงที่มีความเข้มสูงเป็นต้น แต่การอบที่อุณหภูมิระหว่าง 100°C ถึง 250°C เป็นวิธีที่นิยมกันมากที่สุด

เวลาที่ใช้ในการปั๊มระบบสุญญากาศให้มีความดันระดับ 10^{-10} มิลลิบาร์ ขึ้นอยู่กับขนาดของปั๊ม (ความเร็วปั๊ม) และความสะอาดของระบบ โดยปกติจะใช้เวลาประมาณ 1 ชั่วโมงในการปั๊มสู่ระดับความดัน 10^{-8} มิลลิบาร์ จากนั้นจะต้องใช้เวลาอีกมากกว่า 15 ชั่วโมงสำหรับการปั๊มสู่ระดับความดัน 10^{-10} มิลลิบาร์ ในช่วงความดันนี้ ปัจจัยที่กำหนดเวลาในการปั๊มไม่ใช่ความเร็วปั๊มแต่เป็นอัตราการปลดปล่อยก๊าซจากผนัง แคมเบอร์ ความดันของระบบมีค่าเกือบคงที่ที่ระดับความดันนี้เนื่องจากอัตราการปลดปล่อยก๊าซเป็นไปอย่างช้า ๆ แต่ต่อเนือง วิธีเดียวที่จะลดความดันของระบบได้คือการลดปริมาณของก๊าซที่ปลดปล่อยจากผนัง แคมเบอร์ ซึ่งทำได้โดยการอบที่อุณหภูมิระหว่าง 100°C ถึง 250°C โดยใช้แหล่งกำเนิดความร้อนที่ติดตั้งภายใน (heating lamp) หรือภายนอก (heating tape) ผลของการอบแสดงดังรูปที่ 3.3 จากกราฟจะเห็นว่าเมื่อเริ่มให้ความร้อน ความดันของระบบจะสูงขึ้น หลังจากหยุดให้ความร้อนและระบบมีอุณหภูมิลดลงสู่อุณหภูมิต้องความดันของระบบจะลดลงสู่ระดับ 10^{-10} มิลลิบาร์ อย่างรวดเร็ว



รูปที่ 3.3 ผลของการอบระบบสุญญากาศที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงความดันตามเวลา

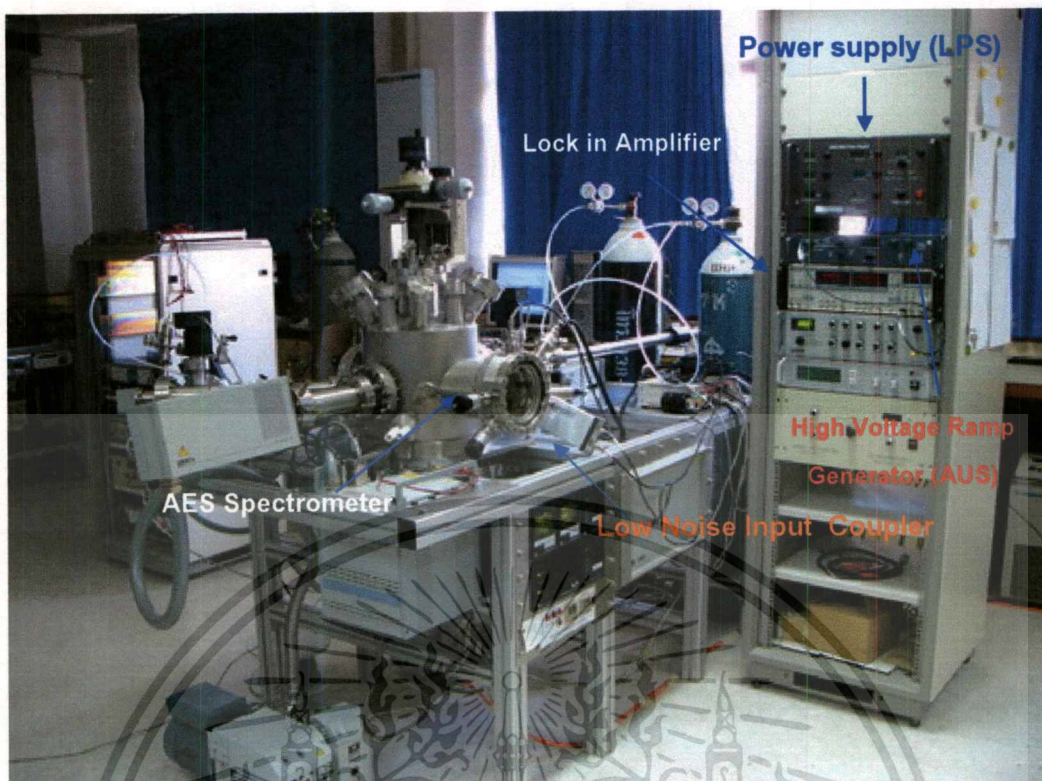
สำหรับการอบแคมเบอร์สุญญากาศสามารถทำได้เมื่อความดันภายในแคมเบอร์มีค่าต่ำกว่า

10^{-7} มิลลิบาร์ และ มีค่าคงที่ซึ่งมีขึ้นตอนนี้นี้ ศึกษานี้ ไม่นุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3.1.3.1 ถอดชิ้นส่วนของอุปกรณ์ที่ไม่ทนต่อความร้อนโดยเฉพาะชิ้นส่วนที่มีส่วนประกอบเป็นสารแม่เหล็ก
- 3.1.3.2 ทำการต่อไฟฟ้ากระแสสลับให้กับ heating lamp โดยควบคุมระดับโวลเตจที่ป้อนด้วย variac
- 3.1.3.3 ใช้แผ่นฟอยล์อลูมิเนียมปิดส่วนที่เป็นช่องมองแก้ว(viewport) ทั้งหมด เพื่อป้องกันไม่ให้ส่วนที่เป็นแก้วเกิดการแตกได้เนื่องจากอัตราการขยายตัวของแก้วกับโลหะที่แตกต่างกัน
- 3.1.3.4 เริ่มป้อนโวลต์เตจให้กับ heating lamp ที่ระดับ 40 โวลต์ และ เพิ่มขึ้นทีละ 10 โวลต์ ทุก ๆ 15 นาที จนถึง 200 โวลต์ บันทึกความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับโวลต์เตจ และ ต้องระวังไม่ให้มีอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมากกว่า 10 องศาเซลเซียสต่อนาที
- 3.1.3.5 เมื่อเพิ่มโวลต์เตจจนถึง 200 โวลต์ แล้ว ทิ้งไว้ให้ครบ 12 ชั่วโมง หลังจากนั้นจึงเริ่มลดโวลต์เตจลงทีละ 10 โวลต์ ทุกๆ 15 นาที จนเหลือ 0 โวลต์
- 3.1.3.6 รอจนระบบเริ่มเย็นลงแล้วจึงติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ เข้าดังเดิม

3.2 ระบบวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโอเจอิเล็กทรอนิกส์รอนสเปกโทรสโกปี

เมื่อติดตั้งระบบการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโอเจอิเล็กทรอนิกส์รอนและอุปกรณ์ต่างๆ เข้ากับแชนเนลเรจิสเตอร์ต่อเชื่อมเข้าแหล่งจ่ายกระแส และ ต่อเชื่อมเข้าคอมพิวเตอร์แล้ว ระบบโอเจอิเล็กทรอนิกส์รอนสเปกโทรสโกปีที่ติดตั้งเข้ากับระบบสุญญากาศพร้อมใช้งานมีลักษณะเป็นดังรูปที่ 3.4 รายละเอียดของส่วนของการวิเคราะห์และวิธีการใช้งานมีดังนี้



รูปที่ 3.4 ระบบวิเคราะห์พื้นที่ประกอบด้วยเทคนิคไอเจอิเล็กทรอนิกส์สเปกโทรสโกปี

3.2.1 ไอเจอิเล็กทรอนิกส์สเปกโทรมิเตอร์

ไอเจอิเล็กทรอนิกส์สเปกโทรมิเตอร์ ประกอบด้วย ส่วนสำคัญดังนี้

- Back-Display LEED-AUGER สเปกโทรมิเตอร์ รุ่น BDL 800 ของบริษัท OCI Vacuum Microengineering
- แหล่งจ่ายไฟ รุ่น LPS 300
- เครื่องกำเนิดแรงดันสูงแบบลาดเอียง (High Voltage Ramp Generator) รุ่น AUS 200
- กล่องอุปกรณ์ช่วยลดสัญญาณรบกวนขนาดเล็ก (Low Noise Input Coupler box) รุ่น AUS 30
- เครื่องขยายล็อก-อิน (Lock in Amplifier)
- คอมพิวเตอร์ควบคุมและแสดงผล

ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1.1 Back-Display LEED-AUGER สเปกโทรมิเตอร์

โอเจอิเล็กตรอนสเปกโทรมิเตอร์เป็นเครื่องมือที่รวมเอาเทคนิควิเคราะห์พื้นผิวสองเทคนิคเข้าไว้ด้วยกัน ซึ่งได้แก่ เทคนิค Low Energy Electron Diffraction (LEED) และเทคนิคโอเจอิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี (AES) ซึ่ง LEED เป็นเครื่องมือที่ใช้ศึกษาโครงสร้างพื้นผิวของผลึกของพื้นผิว โดยอาศัยการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนพลังงานต่ำ และ AES เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการจำแนกชนิดของธาตุที่เป็นองค์ประกอบบนพื้นผิวโดยการตรวจวัดระดับพลังงานของโอเจอิเล็กตรอนที่หลุดออกมา Back-Display LEED-AUGER สเปกโทรมิเตอร์ ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้มีลักษณะดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 Back-Display LEED-AUGER สเปกโทรมิเตอร์ รุ่น BDL 800

Back-Display LEED-AUGER สเปกโทรมิเตอร์ ประกอบด้วย ส่วนวิเคราะห์พลังงานแบบ retarding field (RFA) ชนิดครึ่งวงกลม (hemisphere) แหล่งกำเนิดลำอิเล็กตรอนขนาดเล็ก และจอแก้ว(อยู่ด้านหลังของแหล่งกำเนิดลำอิเล็กตรอน) สเปกโทรมิเตอร์รุ่น BOL 800 นี้ออกแบบให้มีขนาดกะทัดรัด ใช้ติดตั้งบนหน้าแปลนขนาด 8 นิ้วของแอมเบอร์สุญญากาศ ในส่วนของวิเคราะห์พลังงาน ประกอบด้วย ชุดของกริด 4 ชั้น โดยมีแกนกลางร่วมกัน ระยะเวลาห่างจากสารตัวอย่าง 20 มิลลิเมตร มีลักษณะเป็นหลอดตาข่าย ทำจากวัสดุที่เป็นทั้งสแตนเลสเคลือบด้วยทอง

สำหรับแหล่งกำเนิดลำอิเล็กตรอนที่ใช้กับสเปกโทรมิเตอร์นี้เป็นรุ่น G10 มีลักษณะดังรูปที่ 3.6 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ยาว 80 มิลลิเมตร ซึ่งใช้หลักการจากการให้ความร้อนผ่านเส้นใยทั้งสแตน สามารถปรับค่าพลังงานได้ 2 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ถึง 3 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ทำให้ได้กระแสของลำอิเล็กตรอนมีค่าสูงถึง 50 ไมโครแอมป์ที่ระดับพลังงาน 3 กิโลอิเล็กตรอน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โวลต์ ขนาดของลำอิเล็กตรอนมีขนาด 1 มิลลิเมตร ถึง 250 ไมโครเมตร ควบคุมได้โดยการปรับค่าศักย์ไฟฟ้าที่ Wehnelt cylinder สามารถยึดหดในแนวตรงระหว่างสารตัวอย่างได้ 100 มิลลิเมตร นอกจากนี้มีฉากแก้วเคลือบด้วยชั้นไฟฟ้าโปร่งแสงและสารเรือง P31 phosphor (สีเขียว) ทำหน้าที่เป็นตัวตรวจวัดไอเจิล็กตรอน (Auger electron collector) และทำหน้าที่เป็นฉากเรืองแสงสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค LEED สามารถวัดอิเล็กตรอนที่กระเจิงกลับจากสารตัวอย่างด้วยมุมกว้าง 100 องศา เมื่อติดตั้ง Back-Display LEED-AUGER สเปกโทรมิเตอร์ รุ่น BDL 800 เข้ากับระบบสุญญากาศแล้วมีลักษณะดังรูปที่ 3.7

รูปที่ 3.6 แหล่งกำเนิดลำอิเล็กตรอน (electron gun) รุ่น G 10



รูปที่ 3.7 Back-Display LEED-AUGER สเปกโทรมิเตอร์ ที่ติดตั้งกับระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1.2 แหล่งจ่ายไฟ รุ่น LPS 300

แหล่งจ่ายไฟ รุ่น LPS 300 เป็นแหล่งจ่ายไฟให้กับสเปกโทรมิเตอร์ทั้งเมื่อทำงานในโหมด AES และ LEED สามารถปรับช่วงพลังงานของแหล่งกำเนิดลำอิเล็กตรอนได้ 0 ถึง 3 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ จ่ายกระแสให้กับเส้นลวดความร้อน (filament current) ระหว่าง 0 ถึง 3 แอมป์ สักย์ไฟฟ้าที่ Wehnelt 0 ถึง 17 โวลต์ เทียบกับศักย์ของเส้นลวดความร้อน สร้างศักย์ไฟฟ้ารีทาร์ดิง (retarding voltage) ในช่วงระหว่าง 50 % ถึง 100 % ของศักย์ไฟฟ้าของลำอิเล็กตรอน สร้างศักย์ไฟฟ้าที่เป็นบวกสำหรับโพกัสลำอิเล็กตรอนที่ค่าระหว่าง 0.7 ถึง 1.8 เท่าของพลังงานของลำอิเล็กตรอน ศักย์ไฟฟ้าที่ฉากเรืองแสง 0 ถึง 5000 โวลต์ ให้กระแสของลำอิเล็กตรอนอยู่ในช่วง 200 ไมโครแอมป์

3.2.1.3 ส่วนควบคุมการวิเคราะห์พลังงานของอิเล็กตรอน

ส่วนนี้ประกอบด้วย เครื่องกำเนิดศักย์ไฟฟ้าสูงแบบลาดเอียง (High Voltage Ramp Generator) รุ่น AUS 200 และ กล่องอุปกรณ์ช่วยลดสัญญาณรบกวนขนาดเล็ก (Low Noise Input Coupler box) ซึ่งต่อกับโอเจสเปกโทรมิเตอร์โดยตรง

1) เครื่องกำเนิดศักย์ไฟฟ้าสูงแบบลาดเอียง (High Voltage Ramp Generator)

เครื่องกำเนิดแรงดันสูงแบบลาดเอียง จะสร้างศักย์ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง (sweep voltage) ป้อนให้กับกริดของสเปกโทรมิเตอร์เพื่อทำหน้าที่คัดกรองพลังงานโอเจอิเล็กตรอน ศักย์ไฟฟ้านี้สามารถควบคุมให้เพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง 2000 โวลต์ ในช่วงเวลาตั้งแต่ 5 ถึง 15 นาที มีวงจรรอสซิลเลเตอร์ภายใน กำเนิดสัญญาณรูปซายน์ที่มีความถี่ 1.457 kHz แอมพลิจูดระหว่าง 0.5 ถึง 20 V_{PP} ซึ่งสามารถควบคุมได้จากทั้งภายในและภายนอกด้วยคอมพิวเตอร์ เพื่อใช้ในการมอดูเลตเข้ากับ ศักย์ไฟฟ้าของกริด

2) อุปกรณ์ช่วยลดสัญญาณรบกวนขนาดเล็ก (Low Noise Input Coupler box)

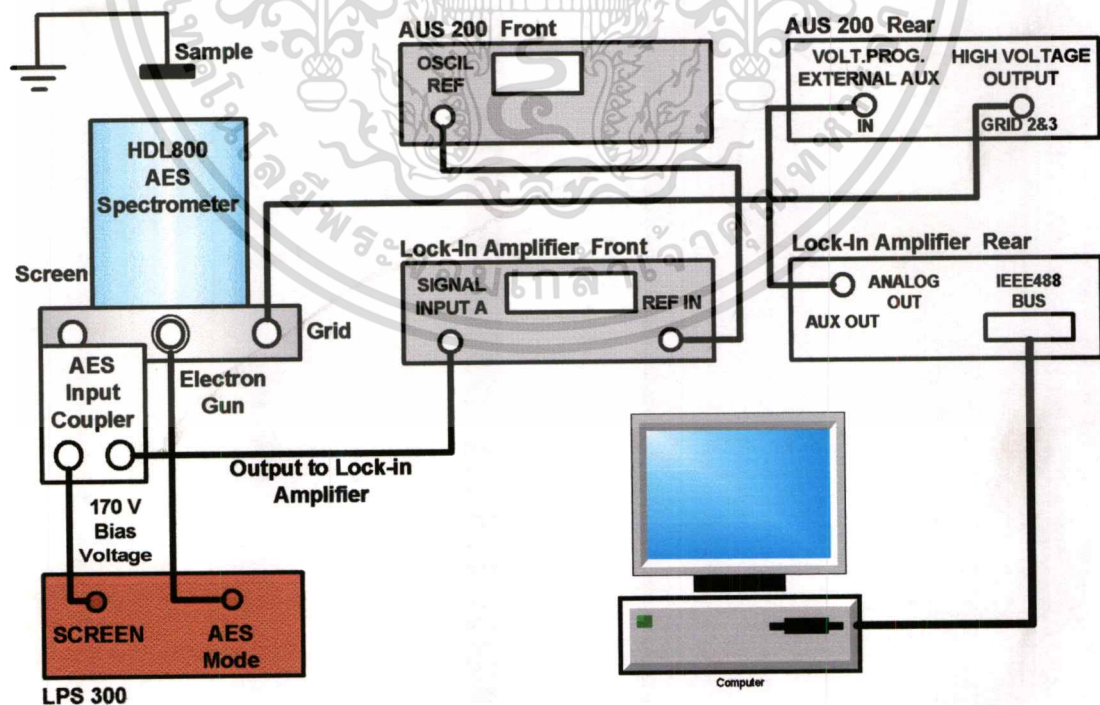
อุปกรณ์ช่วยลดสัญญาณรบกวนขนาดเล็ก เป็น low noise bandpass filter ที่ทำงานที่ความถี่ 2.95 kHz ซึ่งเป็นความถี่ที่เป็น 2 เท่า ของสัญญาณจากวงจรรอสซิลเลเตอร์ที่ใช้ในการมอดูเลตสัญญาณโอเจจากตัวตรวจวัดอิเล็กตรอนของสเปกโทรมิเตอร์ เฉพาะที่ความถี่นี้เท่านั้นจึงจะผ่านไป ยังเครื่องขยายล็อก-อิน เนื่องจากฮาร์โมนิกที่ 2 ของสัญญาณโอเจเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอนุพันธ์อันดับที่ 1 ของสัญญาณโอเจ ดังได้กล่าวในบทที่ 2

3.2.2 การเชื่อมต่ออุปกรณ์

หลังจากติดตั้งสเปกโทรมิเตอร์ในระบบสุญญากาศแล้วทำการเชื่อมต่ออุปกรณ์ดังต่อไปนี้

- 3.2.2.1. ต่อสายระหว่างขั้วต่อของแหล่งกำเนิดลำอิเล็กตรอนที่สเปกโทรมิเตอร์เข้ากับขั้วต่อ AES mode ที่ด้านหลังของเครื่อง LPS 300
- 3.2.2.2. ต่อกริด 2&3 ที่สเปกโทรมิเตอร์เข้ากับเอาต์พุตของ AUS200 (ด้านหลัง)
- 3.2.2.3. ต่อเอาต์พุตอ้างอิงของ AUS 200 เข้ากับอินพุตอ้างอิงของเครื่องขยายล็อกอิน
- 3.2.2.4. ต่อเอาต์พุตของอุปกรณ์ช่วยคลัสต์ยูนิตรบกวนเข้ากับอินพุตของเครื่องขยายล็อกอิน
- 3.2.2.5. ต่ออินพุตของอุปกรณ์ช่วยคลัสต์ยูนิตรบกวนขนาดเล็กเข้ากับฉาก (screen) ของสเปกโทรมิเตอร์
- 3.2.2.6. ต่อ External AUX ที่ด้านหลังของ AUS 200 เข้ากับ Analog out (Out put 1) ที่ด้านหลังของเครื่องขยายล็อกอิน
- 3.2.2.7. เชื่อมต่อเครื่องขยายล็อกอินเข้ากับคอมพิวเตอร์ผ่านทางพอร์ต IEEE 488

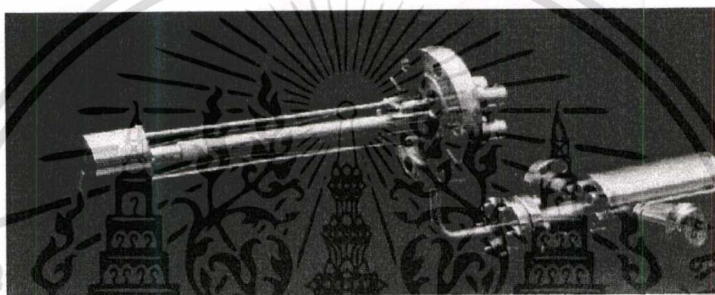
แผนภาพการเชื่อมต่ออุปกรณ์ทั้งหมดในระบบแสดงดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 แผนภาพแสดงโคอะแกรมของระบบวิเคราะห์ด้วยไอเจ็ล็กตรอนสเปกโทรมิเตอร์
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 แหล่งกำเนิดไอออนพลังงานสูง

แหล่งกำเนิดลำไอออนพลังงานสูง ใช้ทำหน้าที่สำหรับการทำความสะอาดผิวหน้าด้วย ขบวนการสปัตเตอร์ริง แหล่งกำเนิดลำไอออนพลังงานสูงที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้เป็นของบริษัท LK Technologies รุ่น NGI 3000 ดังในรูปที่ 3.9 ซึ่งจะติดตั้งอยู่บนหน้าแปลนขนาด 2.75 นิ้ว ลำไอออนที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นไอออนของแก๊สอาร์กอนมีระดับพลังงาน 2 keV ระดับกระแสไอออน 15 ไมโครแอมป์ ที่ความดันระดับ 10^{-6} มิลลิบาร์ ลำไอออนมีขนาด 8 mm ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิด 25 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.9 แหล่งกำเนิดลำไอออน รุ่น NGI 3000 ของ LK Technologies

3.4 การใช้งานระบบวิเคราะห์ไอเจ็ลอิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี

3.4.1 วิธีการวัด

หลังจากที่ทำการ โอนถ่ายสารตัวอย่างเข้าสู่แชมเบอร์สุญญากาศหลักและความดันอยู่ในระดับที่พร้อมใช้งานแล้ว จากนั้นจัดตำแหน่งของสารตัวอย่างในแกน x, y, z และระยะห่างระหว่างสารตัวอย่างกับไอเจสเปกโตรมิเตอร์ให้เหมาะสม (ประมาณ 2 เซนติเมตร) เปิดชุดเตอร์ของไอเจสเปกโตรมิเตอร์ แล้วทำตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 3.4.1.1 ก่อนเปิดสวิตช์หลักของ LPS 300 ตรวจสอบก่อนว่าปุ่มปรับทุกปุ่มได้ปรับหมุนทวนเข็มนาฬิกาจนสุด
- 3.4.1.2 ถอดสายอินพุทของเครื่องขยายล็อก-อินออก
- 3.4.1.3 เปิดสวิตช์ของเครื่อง LPS 300
- 3.4.1.4 ปรับค่ากระแสของเส้นลวดความร้อน (filament current) อย่างช้า ๆ จนได้ 2.83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ซึ่งไม่ได้ใช้จริงในการวิจัยหรือเปิดระบบสู่
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

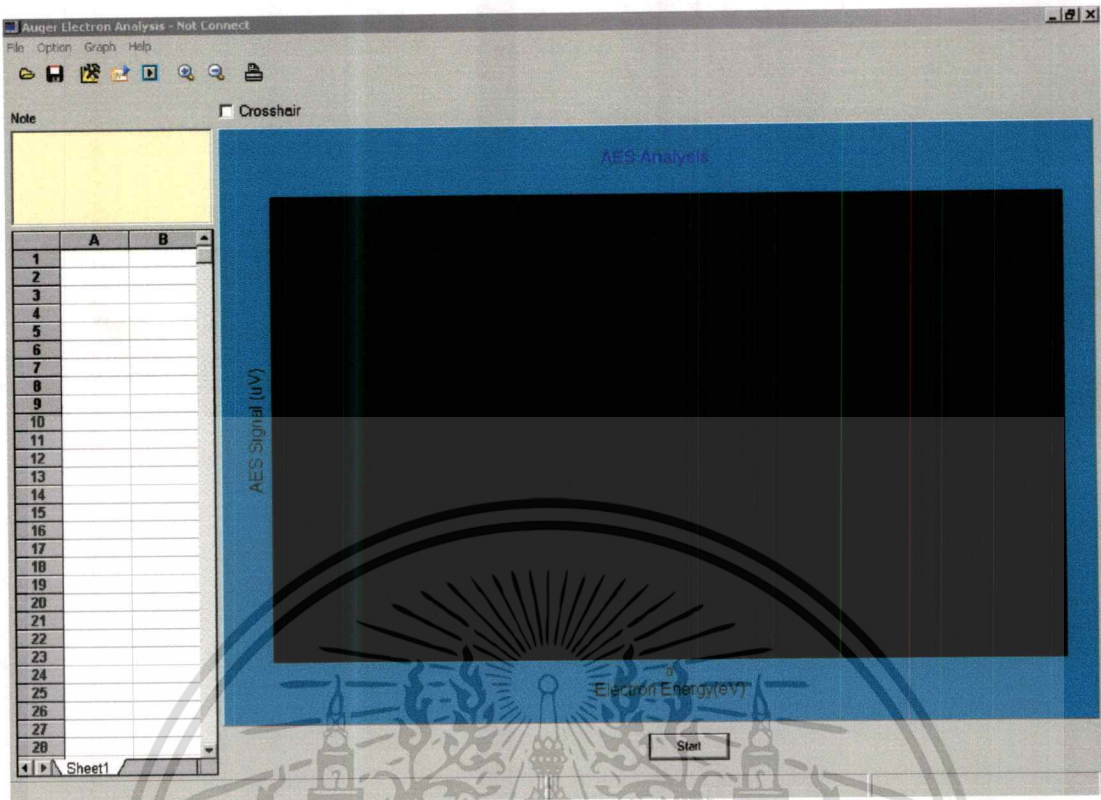
ความดันบรรยากาศ จะต้องทำการปลดปล่อยแก๊ส (degas) จากเส้นลวดความร้อน (filament) ของแหล่งกำเนิดลำอิเล็กตรอนก่อนการใช้งาน โดยการปรับค่ากระแสของเส้นลวดความร้อนเป็น 2.85 แอมป์ ทิ้งไว้ประมาณ 30 นาที

- 3.4.1.5 ปรับค่าพลังงานของลำอิเล็กตรอน (beam energy) ให้ได้ -2.0 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์
- 3.4.1.6 ปรับค่าศักย์ไฟฟ้าที่ Wehnlt (Wehnelt voltage) ให้ได้ -17 โวลต์
- 3.4.1.7 ปรับค่าโฟกัสลำอิเล็กตรอน (focus-AES) เพื่อให้ได้กระแสของลำอิเล็กตรอนมีค่าสูงสุด (ค่าโฟกัสเท่ากับ -1.68 กิโลโวลต์จะได้กระแสที่อ่านจากจอแสดงค่ากระแสของลำอิเล็กตรอนประมาณ 50 ไมโครแอมป์)
- 3.4.1.8 ต่อสัญญาณ ไอเจเข้าที่อินพุทของเครื่องขยายลือก-อินตามเดิม
- 3.4.1.9 เปิดสวิตซ์หลักของเครื่อง AUS 200
- 3.4.1.10 เปิดสวิตซ์หลักของเครื่องขยายลือก-อิน
- 3.4.1.11 ปรับค่าความถี่อ้างอิงจาก AUS 200 ให้ได้ความถี่ 1.475 กิโลเฮิร์ต (อ่านค่าความถี่จาก เครื่องขยายลือก-อิน
- 3.4.1.12 ตั้งพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของเครื่องขยายลือก-อิน ดังต่อไปนี้

| | | | |
|-----------|-------|----------------|-------------|
| Band pass | ON | Line | On |
| Line x 2 | ON | Dyn resolution | NORM |
| Display | X | Expand | OFF |
| Del | - | Offset | - |
| Post | 1 Sec | Sinewave | ON |
| Phase | 0 Deg | Sensitivity | 200 μ V |
| Slope | 18 dB | Time constant | 3 s |
| Harmonic | 2 | | |


3.4.2 การใช้โปรแกรม AES Analysis

ระบบวิเคราะห์พื้นผิวด้วยไอเจอิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปีที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะถูกควบคุมด้วยโปรแกรม AES Analysis ที่พัฒนาขึ้นเอง เมื่อเปิดโปรแกรมจะปรากฏหน้าจอดังรูปที่ 3.10

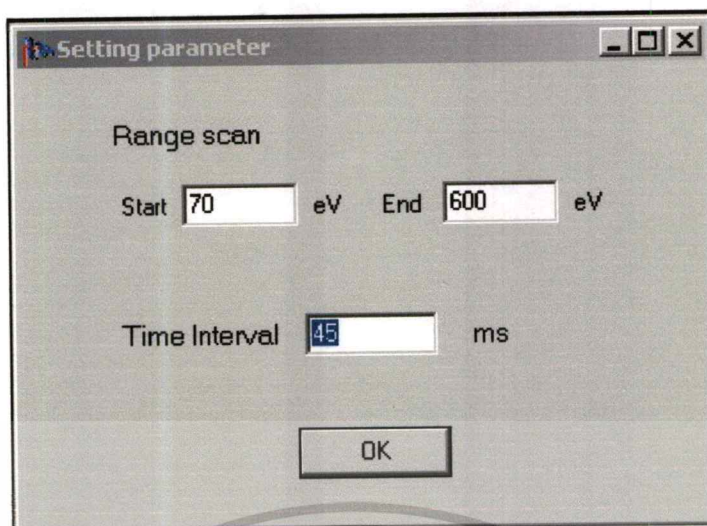


รูปที่ 3.10 หน้าต่างโปรแกรม AES Analysis


การใช้งานโปรแกรมทำตามขั้นตอนต่อไปนี้

- 3.4.2.1 เลือกไอคอน  จะปรากฏไดอะล็อกบ็อกซ์ การตั้งค่าพารามิเตอร์ (setting parameter) ดังรูปที่ 3.11
- 3.4.2.2 ในไดอะล็อกบ็อกซ์ setting parameter ให้กำหนดค่าช่วงพลังงานของการสแกน จากค่าพลังงานเริ่มต้นถึงค่าพลังงานสุดท้ายตามค่าพลังงานจลน์ของไอเจอิเล็กตรอนของธาตุที่สนใจ
- 3.4.2.3 กำหนดค่า time interval ซึ่งเป็นค่าของช่วงเวลาในการเก็บค่าข้อมูล โดยทั่วไปจะกำหนดเป็น 10 % ของ ค่า time constant (ที่ตั้งจากเครื่องขยายไดอะล็อก-อิน) ในงานวิจัยกำหนดเป็น 300 ms แล้วกดปุ่ม
- 3.4.2.4 กดปุ่ม เพื่อเริ่มการสแกน

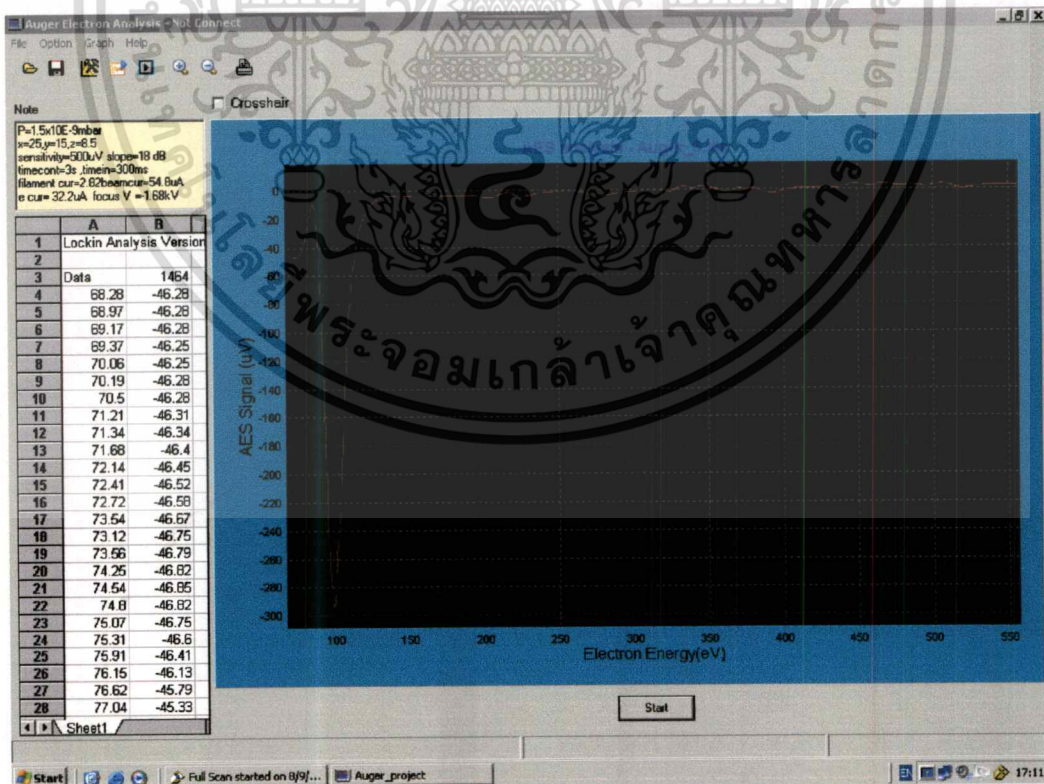
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 ไดอะล็อกบ็อกซ์ setting parameter ของโปรแกรม AES Analysis

3.4.2.5 ในระหว่างการสแกนหากต้องการหยุดสแกนให้กดปุ่ม 

เมื่อสิ้นสุดการสแกนจะปรากฏหน้าจอของการวัดด้วยโปรแกรม AES Analysis แสดงในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 ตัวอย่างหน้าต่างแสดงสัญญาณโอเจทีวัดได้โปรแกรม AES Analysis

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

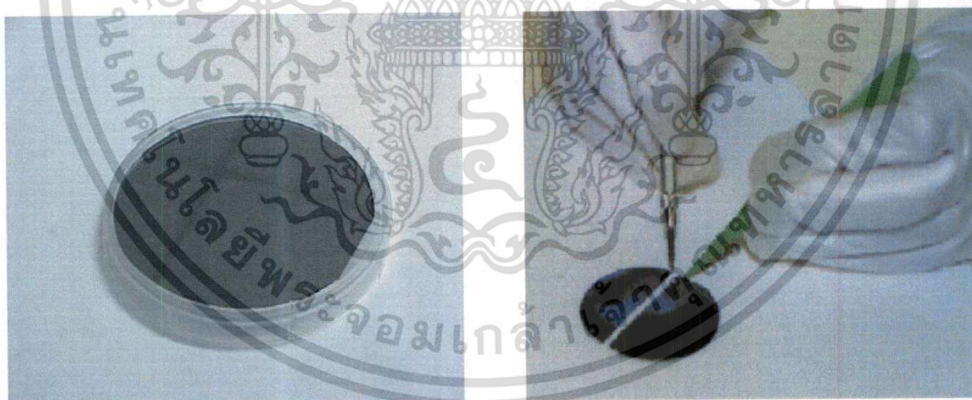
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 ขั้นตอนการทำความสะอาดแผ่นซีลิกอน

ขั้นตอนในการทำความสะอาดแผ่นซีลิกอนแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกจะทำความสะอาดด้วยกระบวนการทางเคมี และส่วนที่สองเป็นการทำความสะอาดโดยกระบวนการสปีดเตอร์ด้วยลำไอออนพลังงานสูง

3.5.1 การทำความสะอาดด้วยกระบวนการทางเคมี

การทำความสะอาดด้วยกระบวนการทางเคมีจะทำความสะอาดด้วยกระบวนการมาตรฐานในการล้างแผ่นซีลิกอน ซึ่งเรียกว่ากระบวนการ RCA ประกอบด้วย ขั้นตอนการล้างกำจัดสารปนเปื้อนประเภทไขมัน ขั้นตอนการล้างกำจัดชั้นออกไซด์ และขั้นตอนการล้างกำจัดอะตอมของโลหะ ก่อนทำการล้างนำแผ่นซีลิกอนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้วมาตัดแบ่งเป็นชิ้นตามขนาดที่เหมาะสม ในการทดลองนี้เลือกขนาดประมาณ 15 x 15 ตารางมิลลิเมตร เพื่อนำมาใช้เป็นชิ้นสารตัวอย่าง ดังรูปที่ 3.13 ซึ่งสถานที่ทำการล้างสารตัวอย่างจะทำภายในห้อง Clean room ดังรูปที่ 3.14 เพื่อป้องกันฝุ่นและรักษาความสะอาดให้กับชิ้นสารตัวอย่างให้ได้มากที่สุด อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้แสดงดังรูปที่ 3.15



(ก)

(ข)

รูป 3.13 แผ่นซีลิกอนที่ใช้ในการทดลอง

(ก) แผ่นซีลิกอนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว

(ข) การตัดแบ่งแผ่นซีลิกอน



รูปที่ 3.14 ห้อง clean room สำหรับทำการทดลองล้างสารตัวอย่าง



(ก)

(ข)

รูปที่ 3.15 อุปกรณ์และสารเคมี

(ก) อุปกรณ์การล้างทำความสะอาดสารตัวอย่าง

(ข) สารเคมี

3.5.1.1 ล้างสิ่งปนเปื้อนประเภทไขมัน (SC1: Standard Clean 1)

การล้างสิ่งปนเปื้อนประเภทไขมันด้วยสารละลาย APM (Ammonium hydroxide Hydrogen Peroxide water Mixture) ประกอบด้วย แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (Ammonium Hydroxide; NH_4OH) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen Peroxide; H_2O_2) และน้ำไร้ประจุ (DI water ; H_2O) โดยใช้ $\text{NH}_4\text{OH} : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O}$ ในอัตราส่วน 1:1:5 ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับว่าเห็นชอบไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1) ผสมสารละลาย APM ให้เข้ากัน
- 2) ทำให้ร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส
- 3) ทำการล้างสารตัวอย่างเป็นเวลา 15 นาที
- 4) นำสารตัวอย่างไปล้างในน้ำไร้ประจุเป็นเวลา 5 นาที

3.5.1.2 ล้างกำจัดชั้นออกไซด์

การล้างกำจัดชั้นออกไซด์ด้วยสารละลาย DHF (Dilute HF solution) ประกอบด้วย กรดไฮโดรฟลูออริก (Hydrofluoric acid ; HF) น้ำไร้ประจุ (DI water ; H₂O) โดยใช้ HF :H₂O ในอัตราส่วน 1: 50 ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

- 1) ผสมสารละลาย DHF ให้เข้ากัน (ในภาชนะพลาสติก)
- 2) ทำการล้างสารตัวอย่างเป็นเวลา 15 วินาที
- 3) นำสารตัวอย่างไปล้างในน้ำไร้ประจุเป็นเวลา 30 วินาที

3.5.1.3 ล้างกำจัดอะตอมของโลหะ (SC2: Standard Clean 2)

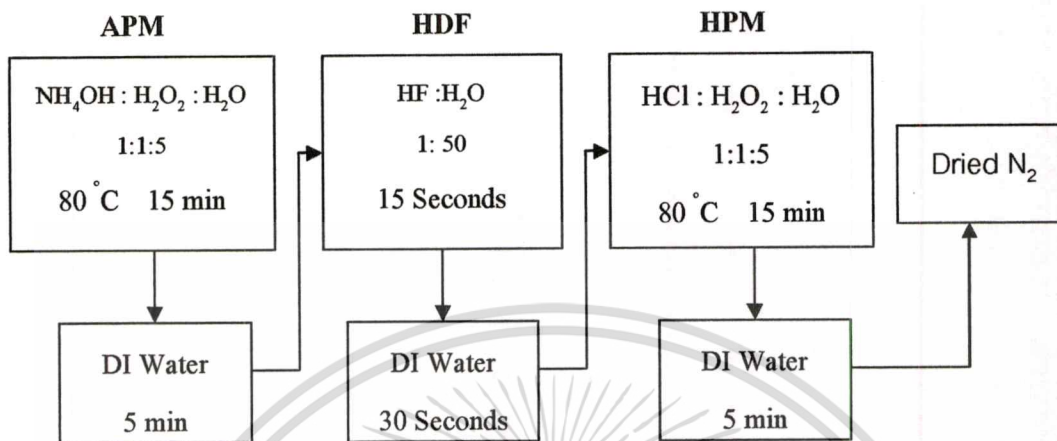
การล้างกำจัดอะตอมของโลหะด้วยสารละลาย HPM (Hydrochloric acid hydrogen Peroxide water Mixture) ประกอบด้วย กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid; HCl) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen Peroxide; H₂O₂) และน้ำไร้ประจุ (DI water ;H₂O) โดยใช้ HCl:H₂O₂ :H₂O ในอัตราส่วน 1:1:5 มีขั้นตอนดังนี้

- 1) ผสมสารละลาย HPM ให้เข้ากัน
- 2) ทำให้ร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส
- 3) ทำการล้างสารตัวอย่างเป็นเวลา 15 นาที
- 4) นำสารตัวอย่างไปล้างในน้ำไร้ประจุเป็นเวลา 5 นาที

3.5.1.4 เป่าแห้ง

หลังจากทำการล้างทุกขั้นตอนแล้วจะทำการเป่าสารตัวอย่างให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน ขั้นตอนการล้างด้วยกระบวนการ RCA สามารถสรุปให้เห็นได้ดังแผนภาพที่ 3.16

RCA Clean



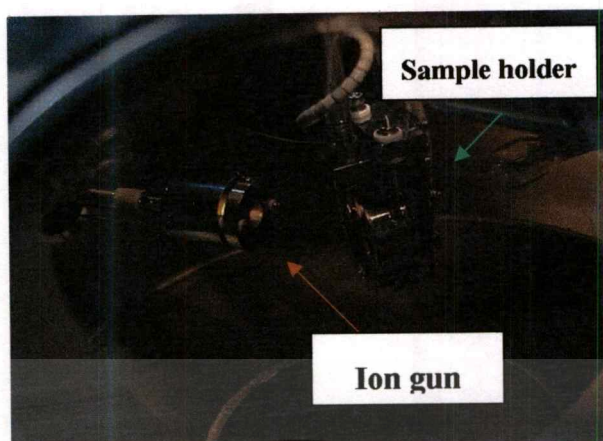
รูปที่ 3.16 แผนภาพแสดงขั้นตอนการล้างด้วยกระบวนการ RCA

3.5.2 การทำความสะอาดโดยการสปัตเตอร์

การทดลองในขั้นตอนนี้ จะศึกษาคุณภาพการทำความสะอาดตามเวลาในการสปัตเตอร์ โดยการเพิ่มเวลาในการสปัตเตอร์ พร้อมกับวัดสัญญาณไอจจากสารตัวอย่างจนกว่าจะได้สัญญาณไอจของซิลิกอนมีขนาดสูงที่สุด ขณะที่สัญญาณไอจของคาร์บอนและออกซิเจนจะลดลงหรือหมดไป การจัดตำแหน่งสารตัวอย่างขณะทำการสปัตเตอร์ แสดงดังในรูปที่ 13.17 โดยการสปัตเตอร์มีขั้นตอนดังนี้

- 3.5.2.1 จัดตำแหน่งสารตัวอย่างให้ห่างจากแหล่งกำเนิดไอออนประมาณ 30 มิลลิเมตร ให้ลำไอออนตกกระทบทำมุม 45° กับระนาบของสารตัวอย่าง
- 3.5.2.2 เปิดเครื่องควบคุมแหล่งกำเนิดลำไอออน ในกรณีที่ไม้ได้ใช้งานมานานหรือเปิดระบบสู่ความดันบรรยากาศ จะต้องทำการปลดปล่อยแก๊สออกจากเส้นลวดความร้อน โดยการปรับค่า Emission เป็น 20 มิลลิแอมป์ ทิ้งไว้ประมาณ 20 นาทีก่อน
- 3.5.2.3 เปิดวาล์วให้ก๊าซอาร์กอนเข้าสู่แชมเบอร์อย่างช้า ๆ จนอ่านความดันได้ประมาณ 3.5×10^{-6} มิลลิบาร์
- 3.5.2.4 ปรับค่า Emission อย่างช้า ๆ ให้ได้ค่าประมาณ 10 มิลลิแอมป์
- 3.5.2.5 ปรับค่า Extractor เพื่อให้ค่ากระแสที่วัด ที่สารตัวอย่างได้ค่าสูงสุด
- 3.5.2.6 ปรับค่า Beam Energy เป็น 2 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 13.17 การจัดตำแหน่งสารตัวอย่างสำหรับการสเปคเตอร์

3.6 การศึกษาโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค LEED

หลังจากการทำความสะอาดด้วยวิธีการสเปคเตอร์แล้ว เมื่อพบว่าสารตัวอย่างมีความสะอาดในระดับหนึ่งจนไม่สามารถตรวจวัดสัญญาณไอเจของคาร์บอนและออกซิเจนแล้ว จะทำการตรวจสอบโครงสร้างผลึกของพื้นผิวเพื่อเป็นข้อมูลยืนยันความสะอาดของสารตัวอย่าง เนื่องจากเมื่อพื้นผิวของสารตัวอย่างซีกอนซึ่งเป็นผลึกที่ผิวหน้าเป็นระนาบ (100) ที่ปราศจากสารปนเปื้อนอย่างแท้จริงและยังคงสภาพการเป็นผลึกที่สมบูรณ์ จะสามารถเห็น LEED pattern ได้อย่างชัดเจน แต่ถ้าพื้นผิวยังคงมีสารปนเปื้อนอยู่ LEED pattern ที่ได้จะไม่ชัดเจนจนถึงไม่สามารถวัดได้เลยขึ้นกับปริมาณสารปนเปื้อน

ในการศึกษาการศึกษาโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค LEED จะต้องทำการอบ (annealing) สารตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการสเปคเตอร์แล้ว ที่อุณหภูมิประมาณ 1000°C เป็นเวลาประมาณ 2-3 นาที เพื่อปรับสภาพพื้นผิวให้มีความเรียบ สำหรับขั้นตอนการศึกษาด้วยเทคนิค LEED มีขั้นตอนดังนี้

- 3.6.1 ปิดสวิตช์หลักของเครื่อง LPS 300 Power Supply
- 3.6.2 เลือกโหมดจาก AES เป็น LEED จากสวิตช์ด้านหน้าของเครื่อง LPS 300
- 3.6.3 ต่อสายไฟระหว่างขั้วต่อของแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนที่สเปกโทรมิเตอร์เข้ากับขั้วต่อที่โหมด LEED ที่ด้านหลังของ LPS 300 แทนการต่อที่โหมด AES
- 3.6.4 ถอด Low Noise Input Coupler box ออก แล้วต่อตัวตรวจวัดอิเล็กตรอนหรือฉากเรืองแสง (screen) ที่สเปกโทรมิเตอร์เข้ากับช่อง screen ที่ด้านหลังของ LPS 300

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6.5 ต่อสายกริด 2 & 3 จากสายต่อของแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนเข้ากับขั้วต่อกริด 2 & 3 ของสเปกโทรมิเตอร์

การใช้งานระบบ LEED หลังจากเปิดสวิตช์หลักของเครื่อง LPS 300 ทำการปรับพารามิเตอร์ต่าง ๆ จนเห็น LEED pattern ที่มีความคมชัดและระดับความสว่างตามต้องการ ค่าที่ให้ต่อไปนี้เป็นเพียงตัวอย่างการปรับพารามิเตอร์ที่เกิด LEED pattern ในกรณีหนึ่งดังนี้

- ❑ ปรับกระแสของเส้นลวดความร้อนอย่างช้า ๆ จนได้ 2.8 แอมป์ กระแสนี้มีผลต่อความสว่างของภาพ แต่ไม่ควรปรับเกิน 2.9 แอมป์
- ❑ ปรับค่าพลังงานของอิเล็กตรอน ซึ่งปรับได้ระหว่าง 5 – 700 อิเล็กตรอน โวลต์ (มีค่าเป็นลบ) ค่าพลังงานที่สูงขึ้นจะทำให้จุดสว่างบน LEED pattern เลื่อนเข้าใกล้กันมากขึ้น เช่น ปรับเป็น -60 อิเล็กตรอน โวลต์
- ❑ ปรับ Focus Voltage เพื่อให้จุดสว่างมีความคมชัดที่สุด เช่น ปรับไปที่ 88 โวลต์
- ❑ ปรับ Wehnelt Voltage เพื่อปรับขนาดของลำอิเล็กตรอน การปรับจะมีผลต่อความคมชัดและความสว่างของ LEED pattern เช่น ปรับเป็น -3.65 โวลต์
- ❑ ปรับ Screen Voltage เพื่อเพิ่มหรือลดความสว่างของฉากโดยรวม (LEED pattern) และแบกกราวด์ เช่นปรับเป็น 2.63 กิโลโวลต์
- ❑ ปรับ Retarding Voltage การปรับจะมีผลในการลดแบกกราวด์ของฉากให้มีดีดลง ทำให้เห็น LEED pattern ชัดเจนขึ้น (เป็นการลดปริมาณที่กระเจิงกลับแบบไม่ยืดหยุ่น เช่น อิเล็กตรอนทุติยภูมิ เป็นต้น) เช่น ปรับเป็น -60 โวลต์

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

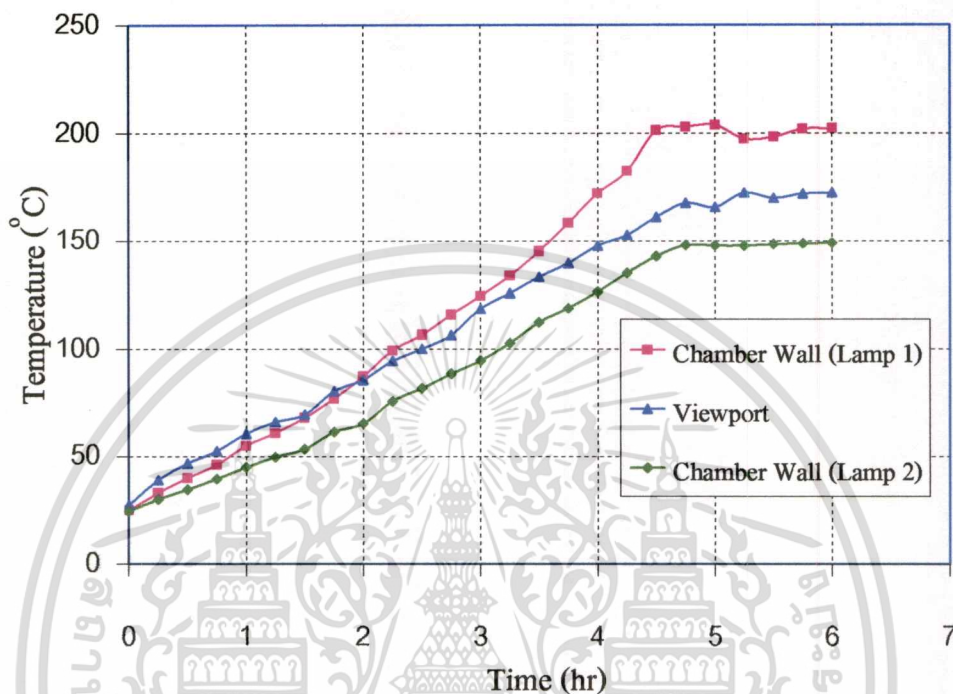
บทนี้เกี่ยวข้องกับผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการศึกษาความสะอาดของพื้นผิวสารตัวอย่างที่เป็นแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์ (silicon wafer) ด้วยเทคนิคโอเจอิเล็กทรอนิกส์โพลโทสโกปี โดยพิจารณาสัญญาณโอเจอิเล็กทรอนิกส์ทั้งก่อนและหลังผ่านกระบวนการทำความสะอาดใน 2 วิธี คือวิธีการทางเคมีและวิธีการสปีเตอร์ด้วยลำไอออนพลังงานสูง เพื่อกำจัดคราบไขมันและชั้นออกไซด์ ผลของการทดลองเริ่มจากผลของการอบแห้งเบอร์สูญญากาศ เพื่อให้ระบบสูญญากาศในงานวิจัยมีความดันในระดับ UHV (ความดันต่ำกว่า 10^{-9} มิลลิบาร์) ซึ่งเป็นระดับความดันที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์พื้นผิวด้วยเทคนิคที่มีความไวต่อพื้นผิว จากนั้นเป็นผลของการล้างทำความสะอาดสารตัวอย่างด้วยกระบวนการทางเคมี โดยใช้วิธีมาตรฐานทั่วไปในการล้างทำความสะอาดแผ่นซิลิกอน คือกระบวนการ RCA ในกระบวนการนี้ได้พิจารณาขั้นตอนการล้างกำจัดคราบไขมัน และขั้นตอนการล้างกำจัดชั้นออกไซด์ สำหรับขั้นตอนการล้างกำจัดคราบไขมันได้ศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงเวลาและอัตราส่วนของสารเคมี ส่วนขั้นตอนการล้างกำจัดชั้นออกไซด์ได้ศึกษาผลของการเปลี่ยนอัตราส่วนของสารเคมี ซึ่งในการล้างกำจัดคราบไขมันนั้นยังได้เปรียบเทียบกับวิธีการล้างด้วยวิธีที่เรียกว่าปิรันยา (piranha clean) อีกด้วย ทั้งนี้เพื่อหาเงื่อนไขที่ดีที่สุดแล้วนำเงื่อนไขนี้มาใช้เพื่อศึกษาผลของการทำความสะอาดอีกครั้ง ในส่วนสุดท้ายเป็นผลของการศึกษาการทำความสะอาดด้วยกระบวนการสปีเตอร์ด้วยลำไอออนพลังงานสูง โดยพิจารณาความสะอาดตามเวลาในการสปีเตอร์ ทั้งนี้เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบความสะอาดจากการวัดสัญญาณโอเจของซิลิกอน คาร์บอน และออกซิเจนเทียบกันในแต่ละกรณี นอกจากนี้ยังได้แสดงผลการศึกษา LEED pattern เพื่อยืนยันความสะอาดหลังการสปีเตอร์ด้วย

4.1 ผลการทดลองการอบแห้งเบอร์สูญญากาศ

เมื่อเปิดปั๊มเทอร์โบโมเลกุลาร์เป็นครั้งแรก ความดันของระบบมีค่าต่ำสุดที่ระดับ 10^{-8} มิลลิบาร์ ในเวลาประมาณ 8 ชั่วโมง เนื่องจากมีก๊าซและไอน้ำถูกดูดซับไว้ที่ผนังด้านในของแชมเบอร์สูญญากาศ ในปริมาณสูง เวลาในการปั๊มจะลดลงสำหรับการปั๊มในครั้งต่อไปเนื่องจากระบบมีความสะอาดมากขึ้น หลังจากทำการปั๊มต่อเนื่องหลายวันพบว่าเวลาในการปั๊มจะลดลงเหลือต่ำกว่า 2 ชั่วโมง จากนั้นเมื่อความดันคงที่ เริ่มเปิดหลอดความร้อน (Lamp 1 และ Lamp 2) และเพิ่มโวลเตจให้หลอดความร้อนสูงขึ้น หลอดความร้อนจะให้แสงที่มีความเข้มสูงมากและอุณหภูมิของ

หลอดความร้อนจะสูงขึ้นอย่างรวดเร็วทำให้ก๊าซและไอน้ำฝั่งตัวอยู่ที่ผนังแชมเบอร์หลุดออกอย่างรวดเร็ว

Chamber Wall and Viewport Temperature



รูปที่ 4.1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของผนังแชมเบอร์และช่องมองแก้วตามเวลา

จากผลการวัดอุณหภูมิดังรูปที่ 4.1 พบว่าอุณหภูมิของผนังแชมเบอร์ใกล้เคียงกับตำแหน่งที่ติดตั้งหลอดความร้อนทั้งสอง (Lamp 1 และ Lamp 2) สูงขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อเพิ่มโวลเตจให้กับหลอดความร้อน 10 โวลต์ ทุกๆ 15 นาที หลังจากนั้นอุณหภูมิของผนังแชมเบอร์ทั้งสองจะมีค่าคงที่ที่ประมาณ 200 องศาเซลเซียส และ 150 องศาเซลเซียส ช่องมองแก้วมีอุณหภูมิคงที่ประมาณ 170 องศาเซลเซียส เมื่อเวลาผ่านไป 4.5 ชั่วโมง

เมื่อพิจารณาอุณหภูมิของช่องมองแก้วซึ่งอยู่ใกล้กับหลอดความร้อน Lamp 1 เทียบกับอุณหภูมิของผนังแชมเบอร์ทั้งสอง พบว่าอุณหภูมิของช่องมองแก้วในช่วง 120 นาทีแรก (วัดโดยเทอร์โมคัปเปิลที่สัมผัสที่แผ่นฟอยล์อุณหภูมิเหนียวที่ปิดทับอยู่) มีค่าเท่ากับอุณหภูมิของผนังแชมเบอร์ที่ตำแหน่ง Lamp 1 และอุณหภูมิจะเริ่มต่างกันอย่างชัดเจน เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ในขณะที่อุณหภูมิของช่องมองแก้วจะสูงกว่าผนังแชมเบอร์ที่ตำแหน่ง Lamp 2 อยู่ประมาณ 20 องศาเซลเซียส หลังจากเมื่ออุณหภูมิคงที่แล้ว อุณหภูมิของผนังแชมเบอร์ทั้งสองจะต่างจากช่องมองแก้วไม่เกิน 30 องศาเซลเซียส ความต่างของอุณหภูมิระหว่างช่องมองแก้วและผนังแชมเบอร์มีความสำคัญที่ต้องเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณา โดยจะต้องควบคุมไม่ให้อุณหภูมิต่างกันมากนัก เนื่องจากแก้วและผนังแชมเบอร์โลหะมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวแตกต่างกัน ถ้าอุณหภูมิต่างกันมากอาจเป็นสาเหตุให้ช่องมองแก้วแตกได้ ดังนั้นต้องควบคุมไม่ให้มีอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิสูงมากเกินไป

หลังจากอุณหภูมิกึ่งที่แก้วจะทำการอบแชมเบอร์ที่อุณหภูมินี้ต่ออีกประมาณ 12 ชั่วโมง จากนั้นจึงปิดหลอดความร้อนโดยการลดโวลเตจลงอย่างช้า ๆ แล้วรอนแชมเบอร์มีอุณหภูมิลดลงเท่ากับอุณหภูมิห้อง (นับเวลาดังแต่เริ่มเปิดหลอดความร้อนรวมทั้งสิ้นประมาณ 20 ชั่วโมง) ทำการติดตั้งวงแหวนแม่เหล็กของเกอวัตความดันชนิด cold cathode เข้าดังเดิม แล้วเปิดเกจเพื่อวัดความดันของระบบสุญญากาศ พบว่าความดันมีค่าต่ำลงอย่างรวดเร็วและภายในเวลาไม่เกิน 12 ชั่วโมง ความดันลดต่ำลงถึงระดับ 10^{-10} มิลลิบาร์ จึงสรุปได้ว่าระบบสุญญากาศสามารถทำความดันได้ในระดับ UHV รูปที่ 4.2 แสดงระบบสุญญากาศที่มีความดันระดับ 6.02×10^{-10} มิลลิบาร์ หลังการอบ



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.2 ระบบสุญญากาศที่มีความดันระดับ 10^{-10} มิลลิบาร์หลังการอบ

(ก) ระบบสุญญากาศหลังการอบ

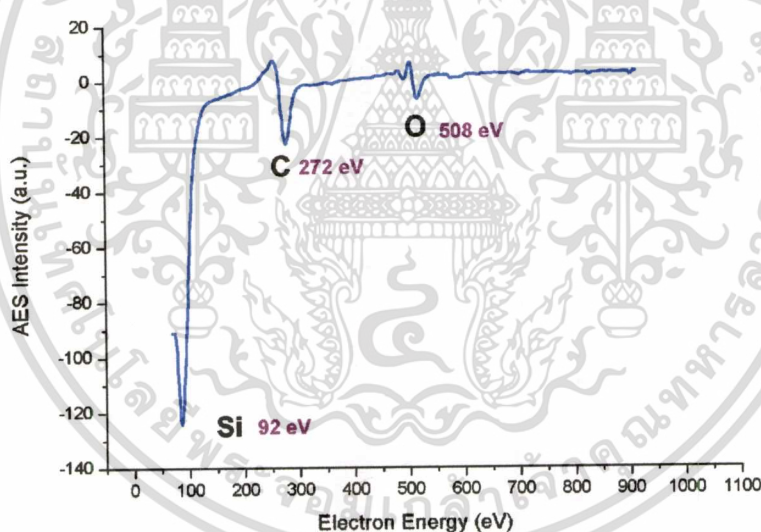
(ข) แชมเบอร์สุญญากาศหลักและระบบแหล่งกำเนิดลำไอออนที่มีความดัน 6.02×10^{-10} มิลลิบาร์และ 2.8×10^{-9} มิลลิบาร์ ตามลำดับ

4.2 การศึกษาความสะอาดของพื้นผิวซิลิกอนโดยการล้างด้วยกระบวนการเคมี

จุดประสงค์ของการล้างแผ่นซิลิกอนโดยทั่วไปคือการกำจัดอนุภาค (particle) รวมถึงคราบไขมัน (organic) ชั้นออกไซด์ (oxide layer) และอะตอมของโลหะ (inorganic) ที่ปนเปื้อนอยู่บนแผ่นซิลิกอน ทั้งนี้เพื่อเป็นการเตรียมความสะอาดให้กับพื้นผิวก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิต (ในส่วนของอุตสาหกรรมด้านสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ) ในขั้นตอนต่อไป วิทยานิพนธ์นี้ การทำความสะอาดพื้นผิวโดยการล้างด้วยกระบวนการทางเคมีนั้นมีจุดประสงค์เพื่อเปรียบเทียบความสะอาดจากการล้างในแต่ละขั้นตอน ซึ่งได้เปลี่ยนเวลาในการล้างและอัตราส่วนของสารเคมี โดยใช้วิธีการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ล้างด้วยกระบวนการ RCA ซึ่งประกอบด้วย ขั้นตอนการล้างกำจัดคราบไขมัน การล้างกำจัดชั้นออกไซด์และการล้างกำจัดอะตอมของโลหะ แต่เนื่องจากการศึกษาความสะอาดของแผ่นซิลิกอนจะพิจารณาความสะอาดโดยการวัดสัญญาณไอเจของซิลิกอน คาร์บอนและออกซิเจนเปรียบเทียบกัน คือเมื่อสัญญาณ ไอเจของซิลิกอนมีขนาดใหญ่ขึ้นในขณะที่สัญญาณ ไอเจของคาร์บอนและออกซิเจนมีขนาดเล็กแสดงว่าพื้นผิวมีความสะอาดมากขึ้น เพราะฉะนั้นในการล้างด้วยกระบวนการทางเคมีจึงพิจารณาเฉพาะขั้นตอนการล้างเพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อนที่มีธาตุคาร์บอนและออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ ซึ่งได้แก่ขั้นตอนการล้างกำจัดคราบไขมันและขั้นตอนการล้างกำจัดชั้นออกไซด์เท่านั้น

ก่อนถึงขั้นตอนการทำความสะอาดจะต้องทำการตรวจสอบพื้นผิวของสารตัวอย่างทุกชิ้นด้วยเทคนิคไอเอเอ็ล็กตรอนสเปกโทรสโกปี เพื่อบันทึกขนาดของสัญญาณ ไอเจของซิลิกอน คาร์บอนและออกซิเจน ไว้เป็นค่าอ้างอิง ผลการวัดสัญญาณไอเจในช่วงพลังงานตั้งแต่ 0 ถึง 900 อิเล็กตรอนโวลต์ แสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 สเปกตรัมของสัญญาณไอเจแสดงให้เห็นสัญญาณ ไอเจของซิลิกอน คาร์บอนและออกซิเจน ปรากฏที่พลังงาน 92, 272 และ 508 อิเล็กตรอนโวลต์ตามลำดับ

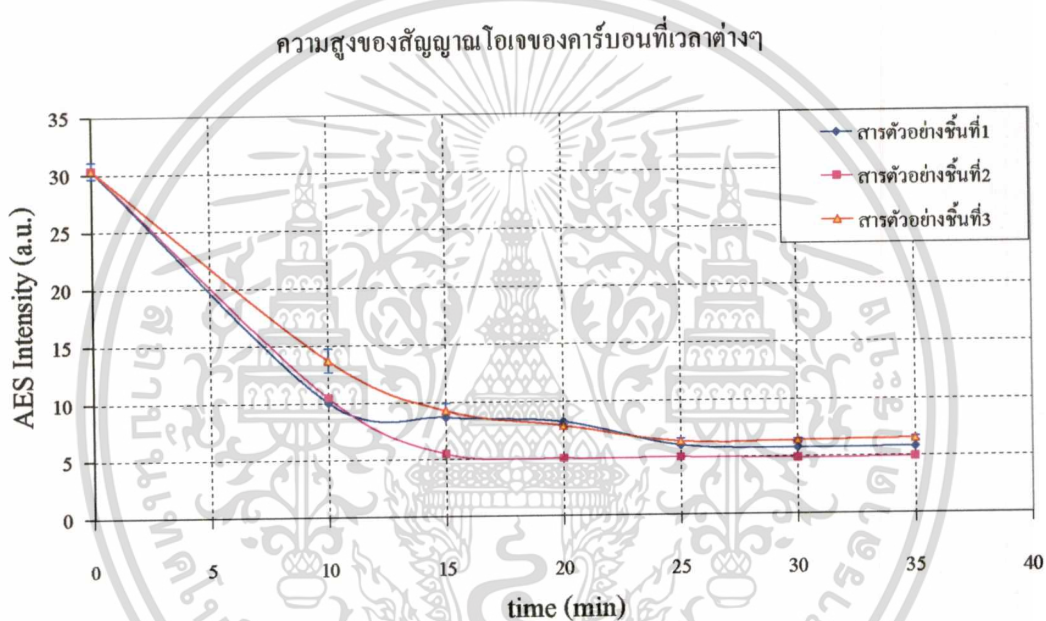
4.2.1 การศึกษาการทำความสะอาดขั้นตอนการล้างกำจัดคราบไขมัน

การล้างกำจัดคราบไขมันเป็นขั้นตอนหนึ่งในกระบวนการ RCA ซึ่งเรียกว่า SC1 หรือ Standard Clean 1 ด้วยสารละลาย APM (Ammonium hydroxide Hydrogen Peroxide water) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Mixture) ประกอบด้วย $\text{NH}_4\text{OH} : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O}$ อัตราส่วน 1:1:5 ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 15 นาที แล้วนำสารตัวอย่างไปล้างในน้ำไว้ประจุเป็นเวลา 5 นาที ในขั้นตอนนี้ได้ศึกษาผลของการเปลี่ยนเวลาและอัตราส่วนของสารเคมีในการล้าง ซึ่งได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

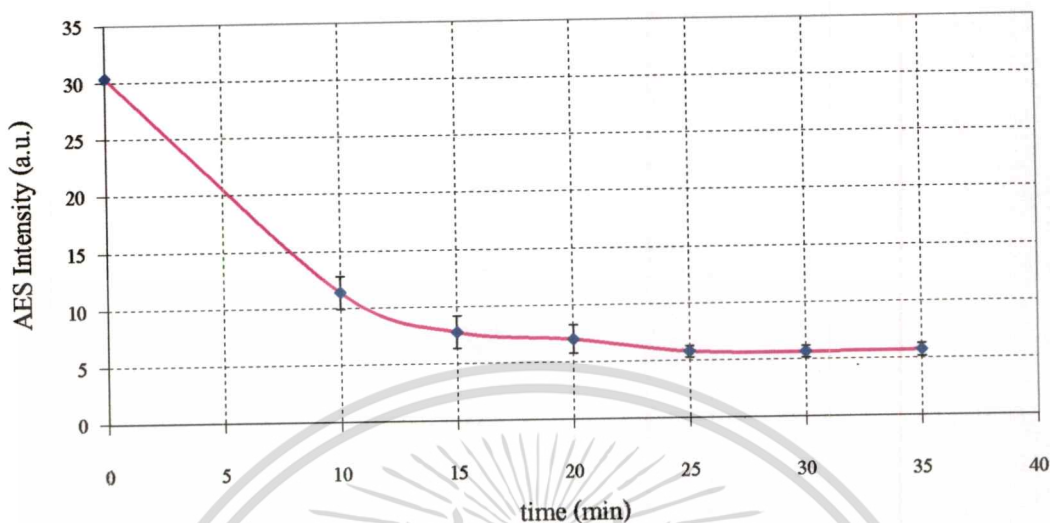
4.2.1.1 การศึกษาผลของเวลาในการล้าง

ในการทดลองใช้สารตัวอย่าง 3 ชั้น ล้างด้วยขั้นตอน SC1 ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว แต่เริ่มต้นที่เวลา 10 นาที แล้วเพิ่มเวลาให้มากขึ้นทีละ 5 นาที โดยดูผลของเวลาในการล้างที่มีต่อขนาดสัญญาณไอเจของคาร์บอนที่วัดได้



รูปที่ 4.4 ขนาดของสัญญาณ ไอเจของคาร์บอนที่เวลาต่าง ๆ เมื่อล้างด้วยขั้นตอน SC1

ความสูงของสัญญาณ โอเจของคาร์บอนที่เวลาต่างๆ



รูปที่ 4.5 ขนาดของสัญญาณ โอเจของคาร์บอนเฉลี่ยจากสารตัวอย่างทั้ง 3 ชั้นที่เวลาต่างๆ เมื่อล้างด้วยชั้นตอน SC1

จากการวัดด้วย AES พบว่าสัญญาณ โอเจของคาร์บอนของสารตัวอย่างทั้ง 3 ชั้น ลดลงอย่างต่อเนื่องและเริ่มคงที่หลังการล้างตั้งแต่ 25 นาที ขึ้นไป ขนาดของสัญญาณ โอเจของคาร์บอนที่เวลาต่างๆเมื่อล้างด้วยชั้นตอน SC1 แสดงดังรูปที่ 4.4 รูปที่ 4.5 เป็นขนาดของสัญญาณ โอเจของคาร์บอนที่เฉลี่ยจากสารตัวอย่างทั้ง 3 ชั้นที่เวลาต่างๆ ข้อมูลของค่าขนาดสัญญาณ โอเจของคาร์บอนที่ล้างด้วยเวลาต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.1 ตารางที่ 4.2 และตารางที่ 4.3 เป็นข้อมูลของค่าขนาดสัญญาณ โอเจของซิลิกอนและออกซิเจนที่ล้างด้วยเวลาต่างๆ ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลขนาดความสูงของสัญญาณ โอเจของคาร์บอนจากการล้างด้วยเวลาต่างๆ

| เวลาในการล้าง (นาที) | ขนาดของสัญญาณ โอเจของคาร์บอนจากสารตัวอย่าง (a.u.) | | | |
|-------------------------|---|-----------|-----------|--------|
| | ชั้นที่ 1 | ชั้นที่ 2 | ชั้นที่ 3 | เฉลี่ย |
| 0 | 30.37 | 30.37 | 30.37 | 30.37 |
| 10 | 10.00 | 10.41 | 13.69 | 11.37 |
| 15 | 8.65 | 5.47 | 9.23 | 7.78 |
| 20 | 8.20 | 5.00 | 7.85 | 7.02 |
| 25 | 6.06 | 5.02 | 6.38 | 5.82 |
| 30 | 5.76 | 4.89 | 6.38 | 5.68 |
| 35 | 5.80 | 4.92 | 6.52 | 5.75 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ข้อมูลขนาดความสูงของสัญญาณ โอเจของซิกนอลจากการล้างด้วยเวลาต่างๆ

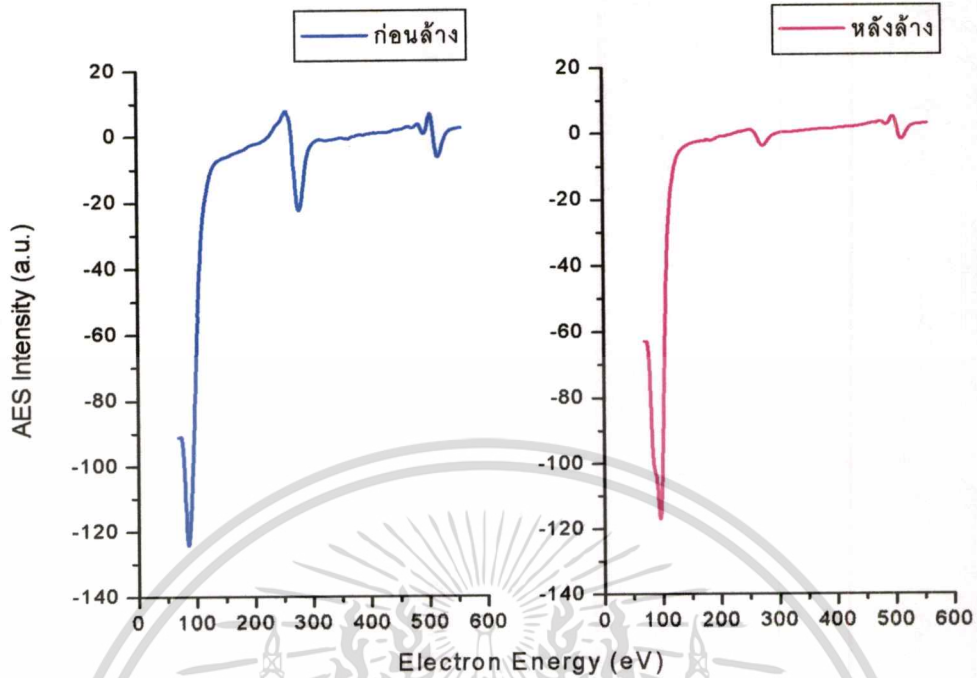
| เวลาในการล้าง (นาที) | ขนาดของสัญญาณ โอเจของซิกนอลจากสารตัวอย่าง (a.u.) | | | |
|-------------------------|--|-----------|-----------|--------|
| | ชั้นที่ 1 | ชั้นที่ 2 | ชั้นที่ 3 | เฉลี่ย |
| 0 | 40.64 | 40.64 | 40.64 | 40.64 |
| 10 | 71.30 | 59.40 | 54.51 | 61.74 |
| 15 | 84.77 | 83.97 | 80.64 | 83.13 |
| 20 | 67.00 | 80.69 | 79.91 | 75.87 |
| 25 | 88.20 | 73.63 | 55.71 | 72.51 |
| 30 | 84.70 | 87.33 | 70.60 | 80.88 |
| 35 | 77.00 | 65.16 | 79.66 | 73.94 |

ตารางที่ 4.3 ข้อมูลขนาดความสูงของสัญญาณ โอเจของออกซิเจนจากการล้างด้วยเวลาต่างๆ

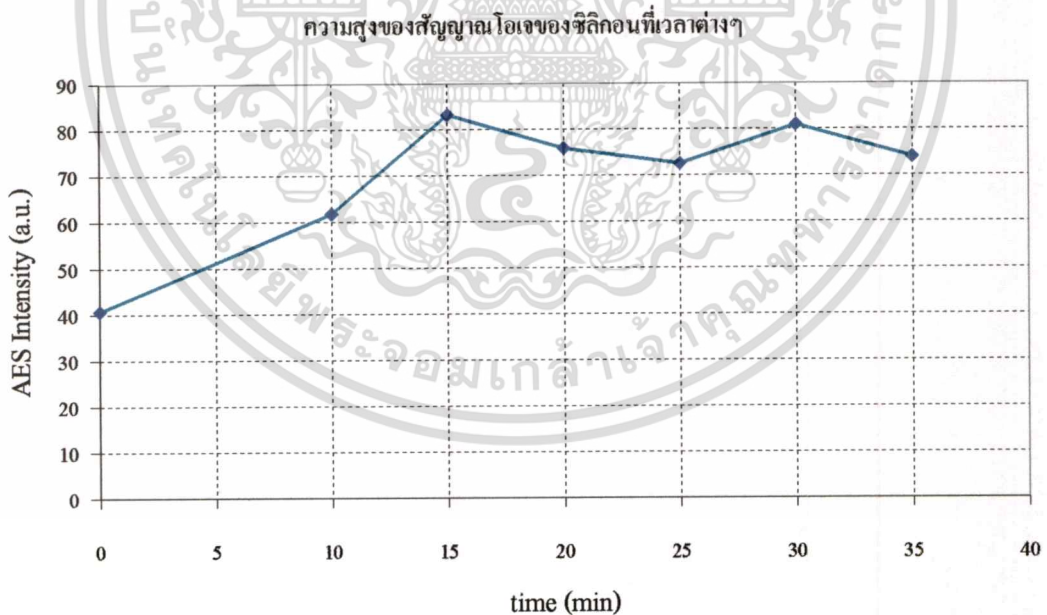
| เวลาในการล้าง (นาที) | ขนาดของสัญญาณ โอเจของออกซิเจนจากสารตัวอย่าง (a.u.) | | | |
|-------------------------|--|-----------|-----------|--------|
| | ชั้นที่ 1 | ชั้นที่ 2 | ชั้นที่ 3 | เฉลี่ย |
| 0 | 14.92 | 14.92 | 14.92 | 14.92 |
| 10 | 13.98 | 13.73 | 14.04 | 13.92 |
| 15 | 12.94 | 14.03 | 14.34 | 13.77 |
| 20 | 13.02 | 11.75 | 13.49 | 12.76 |
| 25 | 14.60 | 14.33 | 11.05 | 13.33 |
| 30 | 10.07 | 11.69 | 11.72 | 11.16 |
| 35 | 10.17 | 10.00 | 10.80 | 10.32 |

รูปที่ 4.6 เป็นสเปกตรัมของสัญญาณที่วัดจากแผ่นซิกนอลก่อนล้างและหลังสิ้นสุดการล้างเปรียบเทียบกัน จากรูปจะเห็นว่าสัญญาณ โอเจของคาร์บอนลดลงอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับก่อนล้าง ส่วนสัญญาณ โอเจของซิกนอลมีขนาดสูงขึ้นเมื่อเทียบกับก่อนล้าง

เมื่อวัดสัญญาณ โอเจของซิกนอลจากค่าเฉลี่ยของสารตัวอย่างทั้ง 3 ชั้น ที่เวลาต่าง ๆ พบว่าขนาดสัญญาณ โอเจของซิกนอลมีค่าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงนาทีที่ 20 สัญญาณเริ่มมีแนวโน้มที่จะคงที่ ดังรูปที่ 4.7 และเมื่อวัดขนาดสัญญาณ โอเจของออกซิเจนจากค่าเฉลี่ยของสารตัวอย่างทั้ง 3 ชั้น ที่เวลาต่าง ๆ พบว่าสัญญาณ โอเจของออกซิเจนมีขนาดเล็กลงเล็กน้อย ดังรูปที่ 4.8

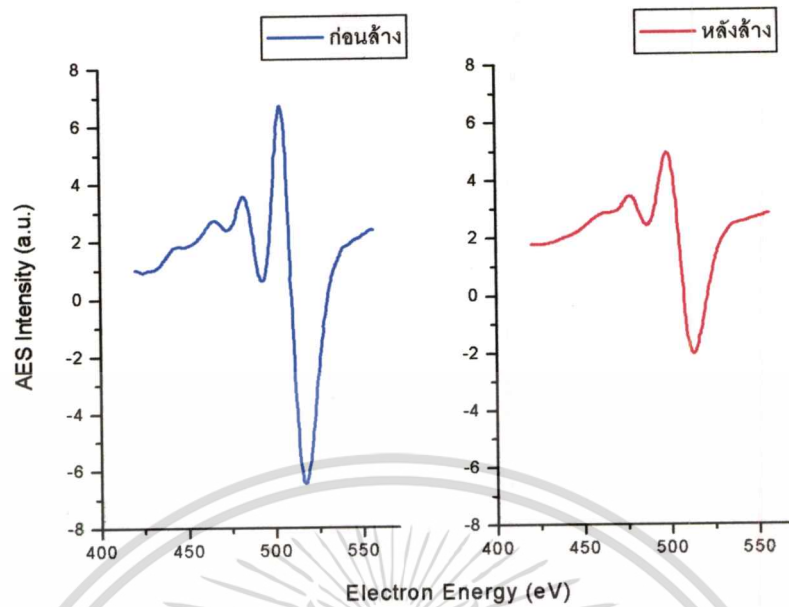


รูปที่ 4.6 สเปกตรัมของสัญญาณที่วัดจากแผ่นซิลิกอนก่อนล้างและหลังสิ้นสุดการล้าง (35 นาที)



รูปที่ 4.7 ขนาดของสัญญาณ ไอเจของซิลิกอนเฉลี่ยจากสารตัวอย่างทั้ง 3 ชั้นที่เวลาต่างเมื่อล้างด้วยชั้นตอนSC1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 สเปกตรัมสัญญาณ โอเจของออกซิเจนเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังล้าง

สรุปจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าในขั้นตอนการล้างกำจัดคราบไขมัน สามารถลดขนาดสัญญาณ โอเจของคาร์บอนลงได้อย่างชัดเจนจากขนาด 30.37 ก่อนล้าง เหลือ 5.75 เมื่อล้างถึงวันที่ที่ 35 และสามารถทำให้ขนาดสัญญาณ โอเจของซิลิกอนสูงขึ้นจากก่อนล้าง 40.64 เป็น 83.13 ในวันที่ที่ 15 หลังจากนั้นจะไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก นอกจากนี้ยังสามารถกำจัดออกไซด์ได้บางส่วน เนื่องจากทำให้ขนาดสัญญาณ โอเจของออกซิเจนลดลงเล็กน้อยจากขนาด 14.92 ก่อนล้าง เป็น 10.32 เมื่อล้างถึงวันที่ที่ 35 ดังรูปที่ 4.8 และ 4.10

4.2.1.2 การศึกษาผลของการเปลี่ยนอัตราส่วน

การล้างกำจัดคราบไขมันด้วยขั้นตอน SC 1 ได้เปลี่ยนอัตราส่วนของสารเคมีให้มากขึ้นและลดลงจากอัตราส่วนมาตรฐาน 1:1:5 ของ $\text{NH}_4\text{OH} : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O}$ เป็น 2:2:5 และ 1:1:10 และล้างด้วยเวลาต่าง ๆ เพื่อศึกษาผลของอัตราส่วนของสารเคมีที่มีต่อขนาดสัญญาณ โอเจของคาร์บอน รวมทั้งดูผลที่มีต่อขนาดสัญญาณ โอเจของซิลิกอนและออกซิเจนด้วย

1) เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของสารเคมี

เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของสารเคมีของ $\text{NH}_4\text{OH} : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O}$ เป็น 2:2:5 โดยทำการล้างสารตัวอย่างที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลาต่าง ๆ แล้ววัดขนาดสัญญาณ โอเจของคาร์บอนได้ ดัง

ตารางที่ 4.4 ซึ่งในตารางได้แสดงค่าขนาดความสูงของสัญญาณโอเจของซัลฟอนและออกซิเจนไว้ด้วย

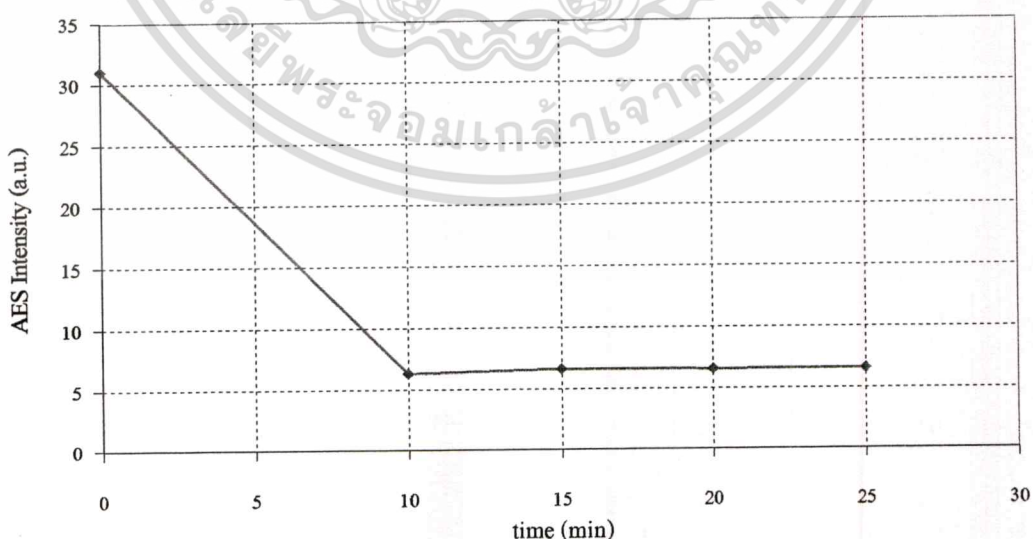
ตารางที่ 4.4 ข้อมูลขนาดความสูงของสัญญาณโอเจของคาร์บอน ซัลฟอนและออกซิเจนเมื่อล้างด้วย

$\text{NH}_4\text{OH} : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O}$ อัตราส่วน 2:2:5 ที่เวลาต่างๆ

| เวลาในการล้าง (นาที) | ขนาดของสัญญาณโอเจ (a.u.) | | |
|-------------------------|--------------------------|--------|----------|
| | คาร์บอน | ซัลฟอน | ออกซิเจน |
| 0 | 31.04 | 47.87 | 21.85 |
| 10 | 6.29 | 127.34 | 24.87 |
| 15 | 6.63 | 112.23 | 18.23 |
| 20 | 6.57 | 83.88 | 15.82 |
| 25 | 6.60 | 90.39 | 16.75 |

จากรูปที่ 4.11 เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของสารเคมีของ $\text{NH}_4\text{OH} : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O}$ เป็น 2:2:5 ขนาดความสูงของสัญญาณโอเจของคาร์บอนลดลงอย่างรวดเร็วตั้งแต่นาทีที่ 10 เมื่อทำการล้างสารตัวอย่างต่อไปอีกเป็น 15 นาทีโดยเพิ่มเวลาขึ้นทีละ 5 นาที พบว่าขนาดความสูงของสัญญาณโอเจของคาร์บอนมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งหมายความว่าจากนาทีที่ 10 เป็นต้นไปสัญญาณโอเจของคาร์บอนมีค่าคงที่ เมื่อวัดสัญญาณโอเจของซัลฟอนพบว่าขนาดสัญญาณโอเจของซัลฟอนมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเวลา 10 นาทีแรก หลังจากนั้นขนาดสัญญาณเริ่มมีค่าลดลง ดังรูปที่ 4.12

ความสูงของสัญญาณโอเจของคาร์บอนที่เวลาต่างๆ

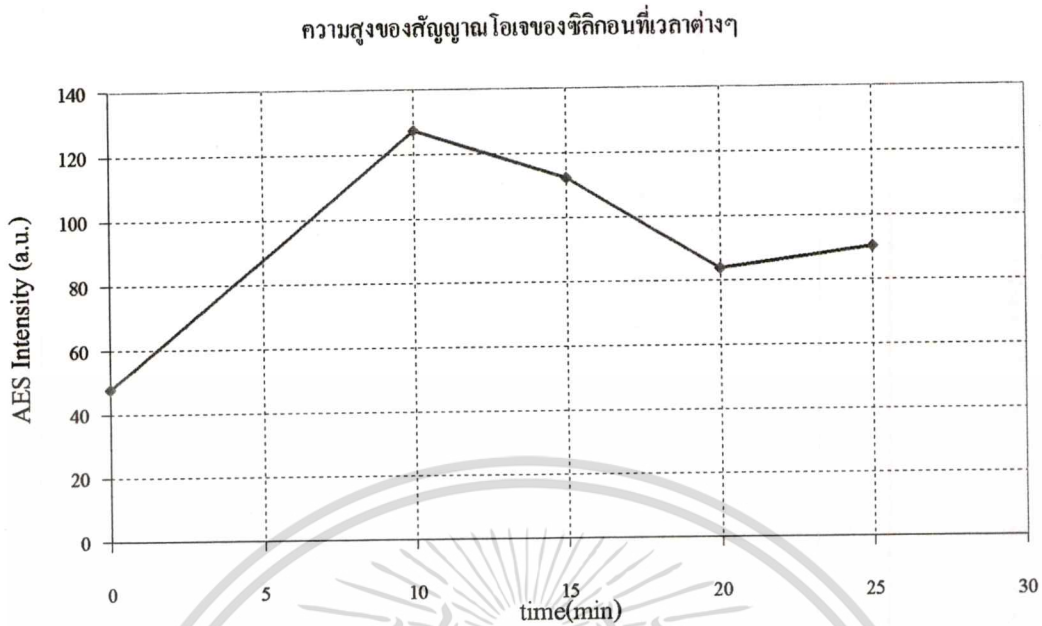


รูปที่ 4.11 ขนาดของสัญญาณโอเจของคาร์บอนที่เวลาต่างๆเมื่อล้างด้วยขั้นตอนSC1โดยการเพิ่ม

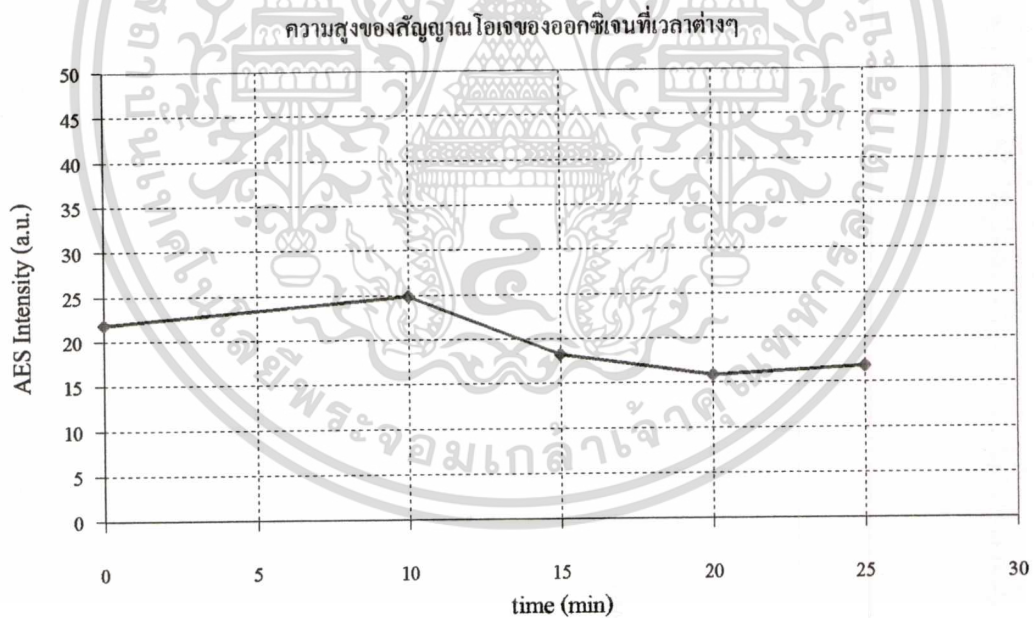
อัตราส่วนของสารเคมีเป็น 2:2:5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

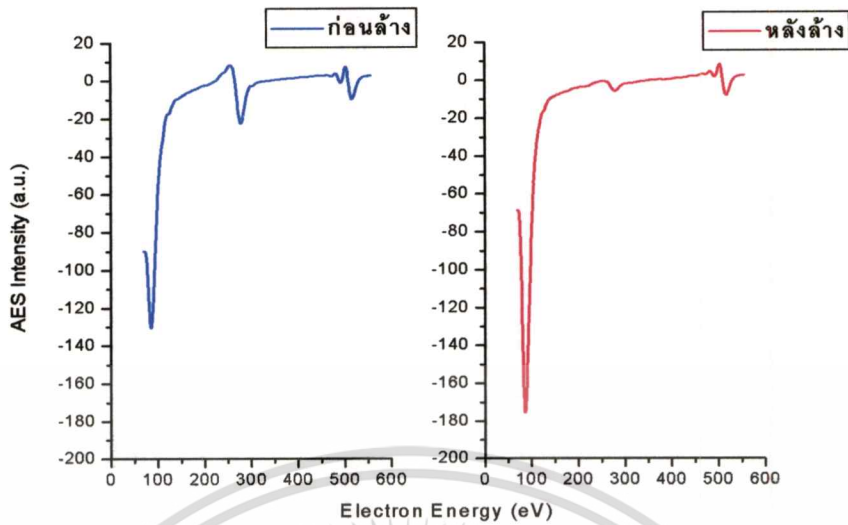


รูปที่ 4.12 ขนาดของสัญญาณ โอเจของซิลิกอนที่เวลาต่างๆเมื่อล้างด้วยอัตราส่วน 2:2:5



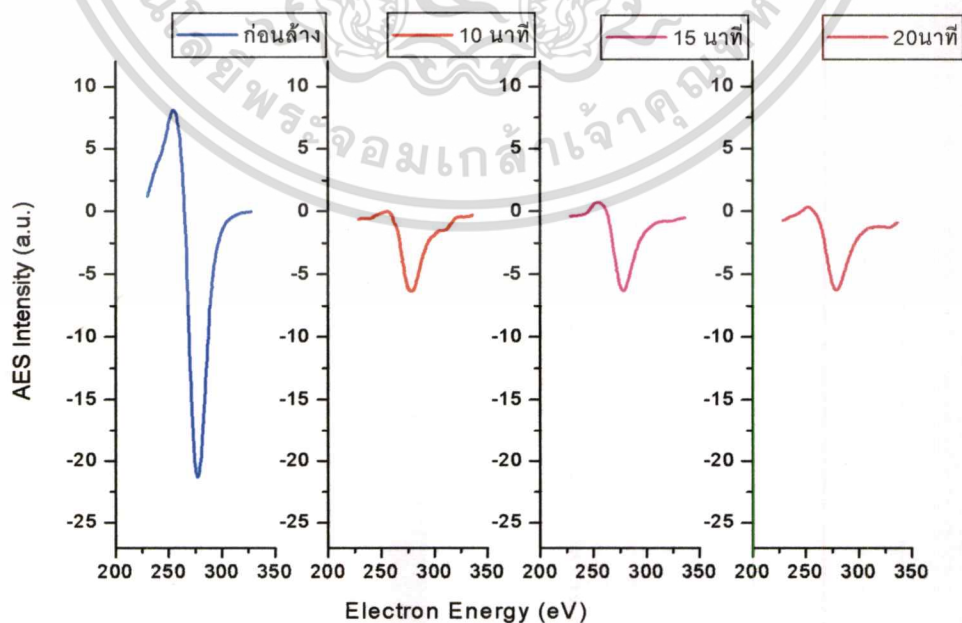
รูปที่ 4.13 ขนาดของสัญญาณ โอเจของออกซิเจนที่เวลาต่างๆเมื่อล้างด้วยอัตราส่วน 2:2:5

เมื่อวัดสัญญาณ โอเจของออกซิเจนพบว่า ก่อนการล้างและหลังการล้างขนาดสัญญาณ โอเจของออกซิเจน ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ ดังแสดงในรูปที่ 4.13

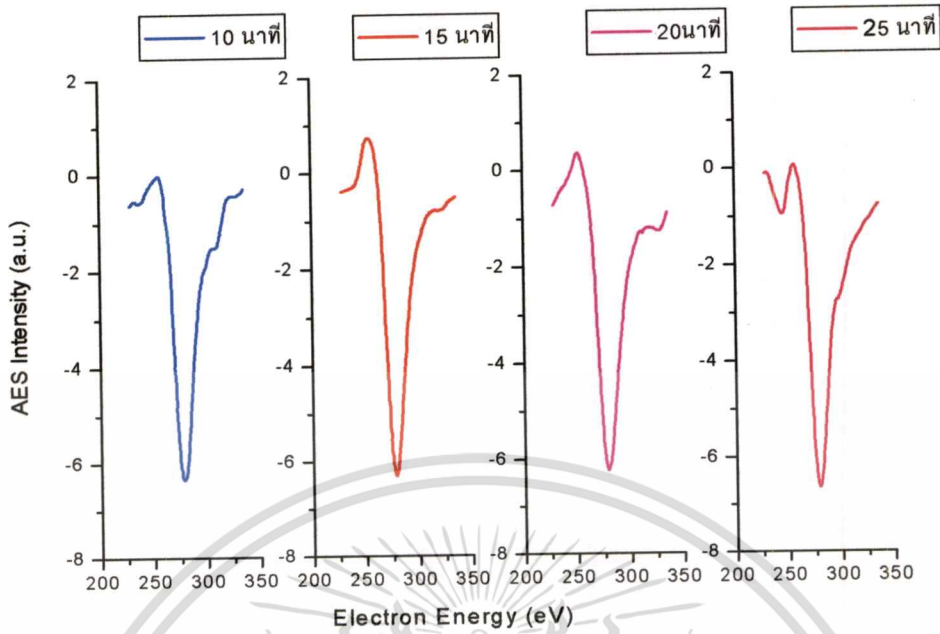


รูปที่ 4.14 สเปกตรัมเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังล้างด้วยอัตราส่วน 2:2:5

รูปที่ 4.14 เป็นสเปกตรัมของสัญญาณที่วัดจากแผ่นซิลิกอน เปรียบเทียบก่อนล้างและหลังสิ้นสุดการล้างในเวลา 25 นาที ด้วยอัตราส่วน 2:2:5 จากรูปจะเห็นว่าสัญญาณไอของคาร์บอนลดลงอย่างชัดเจน ส่วนสัญญาณไอของซิลิกอนมีขนาดสูงขึ้นเมื่อเทียบกับก่อนล้าง ในขณะที่สัญญาณไอของออกซิเจนมีขนาดไม่เปลี่ยนแปลง รูปที่ 4.15 เป็นสเปกตรัมสัญญาณไอของคาร์บอนเปรียบเทียบเพื่อให้เห็นชัดเจนขึ้นระหว่างก่อนล้างกับหลังล้างด้วยเวลาต่าง ๆ กัน ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อล้างสารตัวอย่างด้วยเวลา 10 นาที สัญญาณไอของคาร์บอนลดลงอย่างชัดเจนและหลังจากนั้นจะมีค่าที่

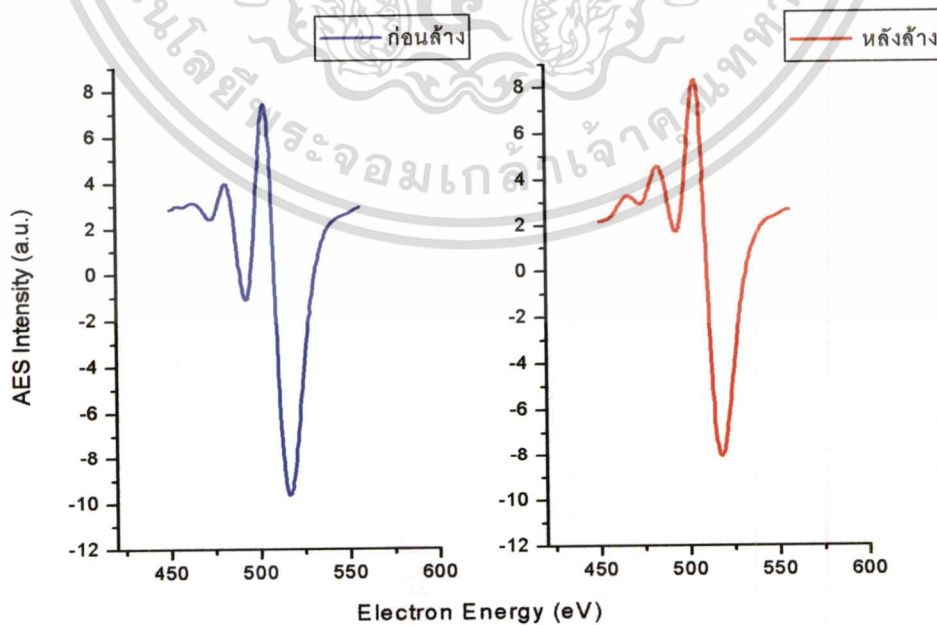


เอกสารนี้เป็นรูปที่ 4.15 สัญญาณไอของคาร์บอนเปรียบเทียบก่อนและหลังล้าง ด้วยอัตราส่วน 2:2:5 การดำเนินการ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 สเปกตรัมสัญญาณไอเจของคาร์บอนหลังการล้างที่เวลาต่าง ๆ ด้วยอัตราส่วน 2:2:5

รูปที่ 4.16 เป็นภาพขยายให้เห็นขนาดของสเปกตรัมสัญญาณไอเจของคาร์บอนเมื่อล้างที่เวลาต่าง ๆ ได้ชัดเจนขึ้น จากรูปจะเห็นว่าขนาดความสูงของสัญญาณเมื่อล้างด้วยเวลาดั้งแต่ 10 นาที และเพิ่มเวลาขึ้นอีกทีละ 5 นาที มีค่าใกล้เคียงกัน นั่นคือขนาดสัญญาณไอเจของคาร์บอนเริ่มคงที่ตั้งแต่เวลา 10 นาที



รูปที่ 4.17 สัญญาณไอเจของออกซิเจนเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังล้างด้วยอัตราส่วน 2:2:5

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้จัดทำเห็นว่าไม่เหมาะสมต่อการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.17 เป็นสเปกตรัมสัญญาณ โอเจของออกซิเจนเปรียบเทียบให้เห็นชัดเจนขึ้น ระหว่างก่อนและหลังล้าง ซึ่งจะเห็นว่าขนาดความสูงของสัญญาณ โอเจของออกซิเจนไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ

สรุปผลการทดลองขั้นตอนการล้างกำจัดคราบไขมันเมื่อเปลี่ยนอัตราส่วนของสารเคมีเป็น 2:2:5 ทำให้ขนาดสัญญาณ โอเจของคาร์บอนลดลงจากก่อนล้างคือ 31.04 เป็น 6.60 ในเวลา 25 นาที แต่ขนาดสัญญาณเริ่มคงที่ตั้งแต่ 10 นาทีแรก และขนาดสัญญาณ โอเจของออกซิเจนไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนขนาดสัญญาณ โอเจของซิลิกอนเพิ่มขึ้นจากก่อนล้างคือ 47.87 เป็น 127.34 ในเวลา 10 นาที แต่เมื่อล้างต่อไปกลับมีขนาดลดลง

เมื่อพิจารณาจากสเปกตรัมของสัญญาณ โอเจโดยรวมก็ไม่พบว่ามีสิ่งแปลกปลอมบนพื้นผิว ในขณะที่สัญญาณ โอเจทั้งของคาร์บอนและออกซิเจนมีค่าคงที่ อาจสรุปได้ว่า เวลาในการล้างที่เหมาะสมที่สุดสำหรับอัตราส่วนของสารเคมีนี้คือ 10 นาที การล้างด้วยเวลาที่มากขึ้นไม่ทำให้พื้นผิวสะอาดขึ้น แต่อาจเป็นผลให้พื้นผิวเกิดความเสียหาย เช่น เกิดความขรุขระหรือมีรูพรุน ทำให้ขนาดของสัญญาณ โอเจของซิลิกอนที่วัด ได้มีความ ไม่แน่นอน

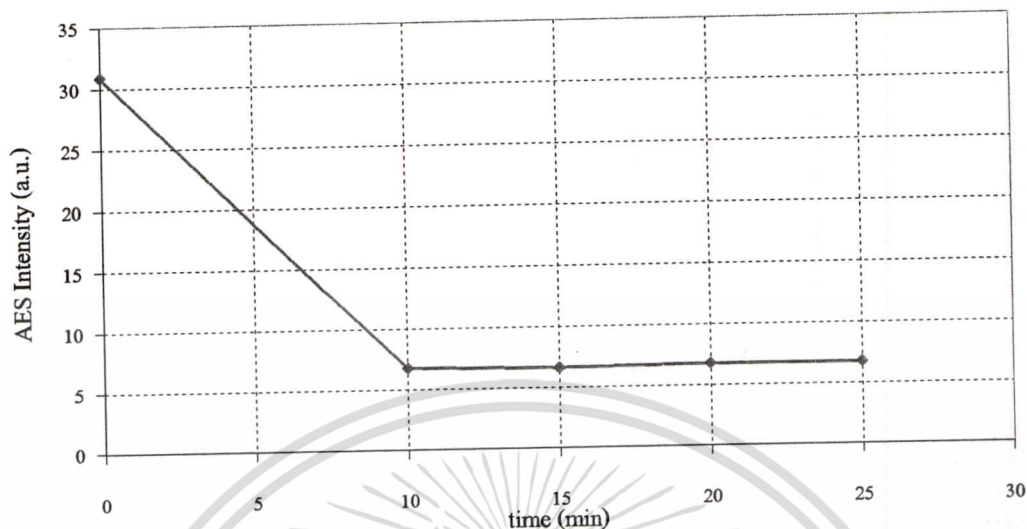
2) เมื่อลดอัตราส่วนของสารเคมี

เมื่อลดอัตราส่วนของสารเคมีของ $\text{NH}_4\text{OH} : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O}$ เป็น 1:1:10 โดยทำการล้างสารตัวอย่าง ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลาด่าง ๆ แล้ววัดขนาดสัญญาณ โอเจของคาร์บอนได้ดังตารางที่ 4.5 ซึ่งในตารางที่ 4.5 ได้แสดงค่าขนาดความสูงของสัญญาณ โอเจของซิลิกอนและออกซิเจนไว้ด้วย

ตารางที่ 4.5 ข้อมูลขนาดความสูงของสัญญาณ โอเจของคาร์บอน ซิลิกอนและออกซิเจนเมื่อล้างด้วย $\text{NH}_4\text{OH} : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O}$ อัตราส่วน 1:1:10 ที่เวลาต่างๆ

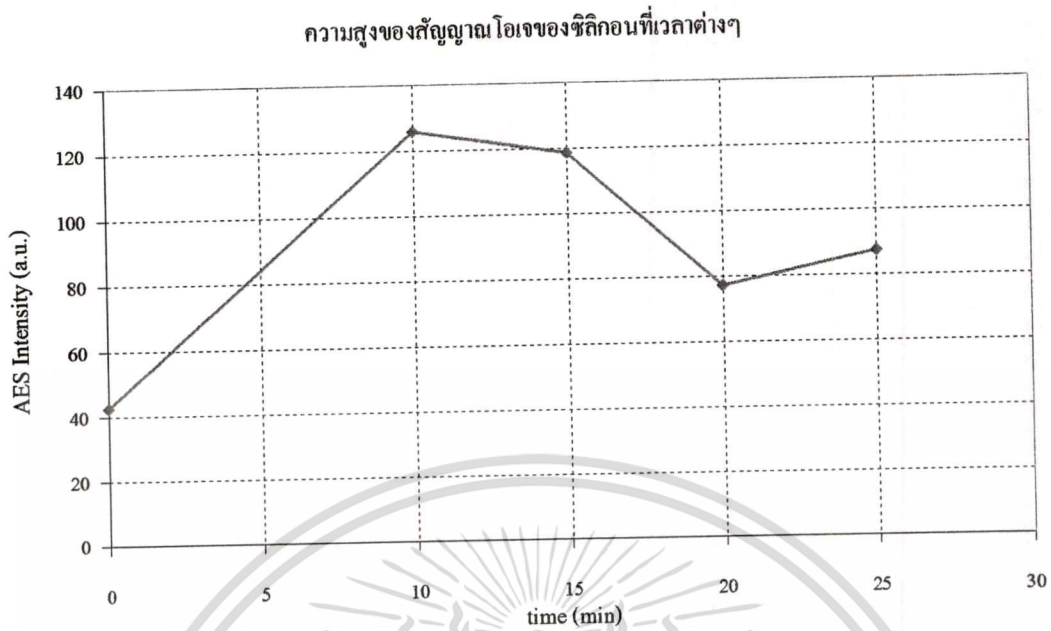
| เวลาในการล้าง (นาที) | ขนาดของสัญญาณ โอเจ (a.u.) | | |
|-------------------------|---------------------------|---------|----------|
| | คาร์บอน | ซิลิกอน | ออกซิเจน |
| 0 | 30.88 | 42.63 | 18.98 |
| 10 | 6.77 | 125.84 | 25.76 |
| 15 | 6.61 | 118.62 | 25.20 |
| 20 | 6.77 | 77.27 | 14.26 |
| 25 | 6.77 | 87.41 | 13.78 |

ความสูงของสัญญาณ ไอเจของคาร์บอนที่เวลาต่างๆ



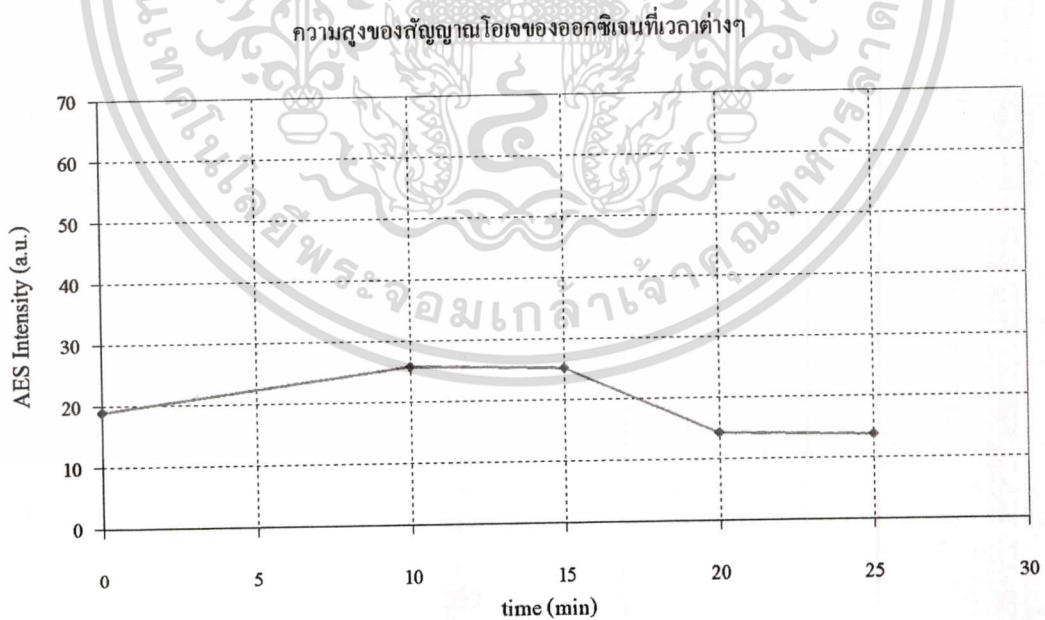
รูปที่ 4.18 ขนาดของสัญญาณ ไอเจของคาร์บอนที่เวลาต่างๆเมื่อล้างด้วยชั้นตอน SC1 โดยการลดอัตราส่วนของสารเคมีเป็น 1:1:10

รูปที่ 4.18 เป็นขนาดของสัญญาณ ไอเจของคาร์บอนเมื่อล้างสารตัวอย่างด้วยเวลาต่างๆด้วยชั้นตอน SC1 โดยการลดอัตราส่วนของสารเคมีเป็น 1:1:10 ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อลดอัตราส่วนของสารเคมีของ $\text{NH}_4\text{OH} : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O}$ เป็น 1:1:10 ขนาดความสูงของสัญญาณ ไอเจของคาร์บอนลดลงอย่างรวดเร็วตั้งแต่วันที่ 10 เมื่อทำการล้างสารตัวอย่างต่อไปเป็น 15 นาที และเพิ่มขึ้นทีละ 5 นาที พบว่าขนาดความสูงของสัญญาณ ไอเจของคาร์บอนมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งหมายความว่าจากนาทีที่ 10 เป็นต้นไปสัญญาณ ไอเจของคาร์บอนมีค่าคงที่ และยังมีค่าใกล้เคียงกับการล้างสารตัวอย่างด้วยการเพิ่มอัตราส่วนของสารเคมี เป็น 2:2:5 อีกด้วย



รูปที่ 4.19 ขนาดของสัญญาณ ไอเจของซิติคอนที่เวลาต่าง ๆ เมื่อล้างด้วยอัตราส่วน 1:1:10

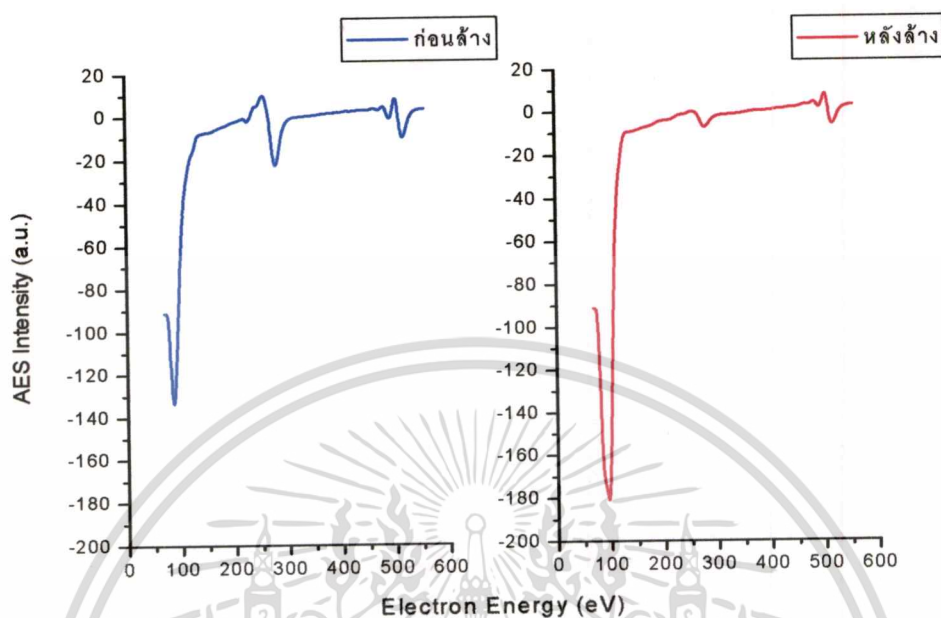
เมื่อวัดสัญญาณ ไอเจของซิติคอนพบว่าขนาดสัญญาณ ไอเจของซิติคอนมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเวลา 10 นาทีแรก หลังจากนั้นขนาดสัญญาณเริ่มมีค่าลดลง ดังรูปที่ 4.19 และเมื่อวัดสัญญาณ ไอเจของออกซิเจนพบว่าขนาดสัญญาณ ไอเจของออกซิเจนมีค่าลดลงเล็กน้อย ดังรูปที่ 4.20



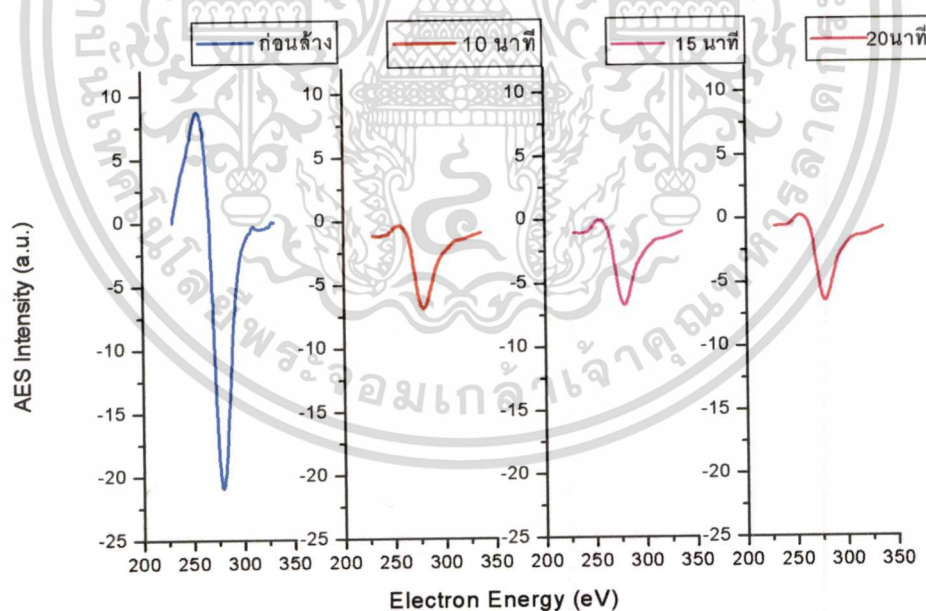
รูปที่ 4.20 ขนาดของสัญญาณ ไอเจของออกซิเจนที่เวลาต่างๆเมื่อล้างด้วยอัตราส่วน 1:1:10

รูปที่ 4.21 เป็นสเปกตรัมของสัญญาณวัดที่จากแผ่นซิติคอนก่อนล้างและหลังสิ้นสุดการล้างในนาที่ที่ 25 ด้วยอัตราส่วน 1:1:10 เปรียบเทียบกัน จากรูปจะเห็นว่าสัญญาณ ไอเจของคาร์บอนไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลดลงอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับก่อนล้าง สัญญาณไอเจนของซิลิกอนมีขนาดสูงขึ้นเมื่อเทียบกับก่อนล้าง

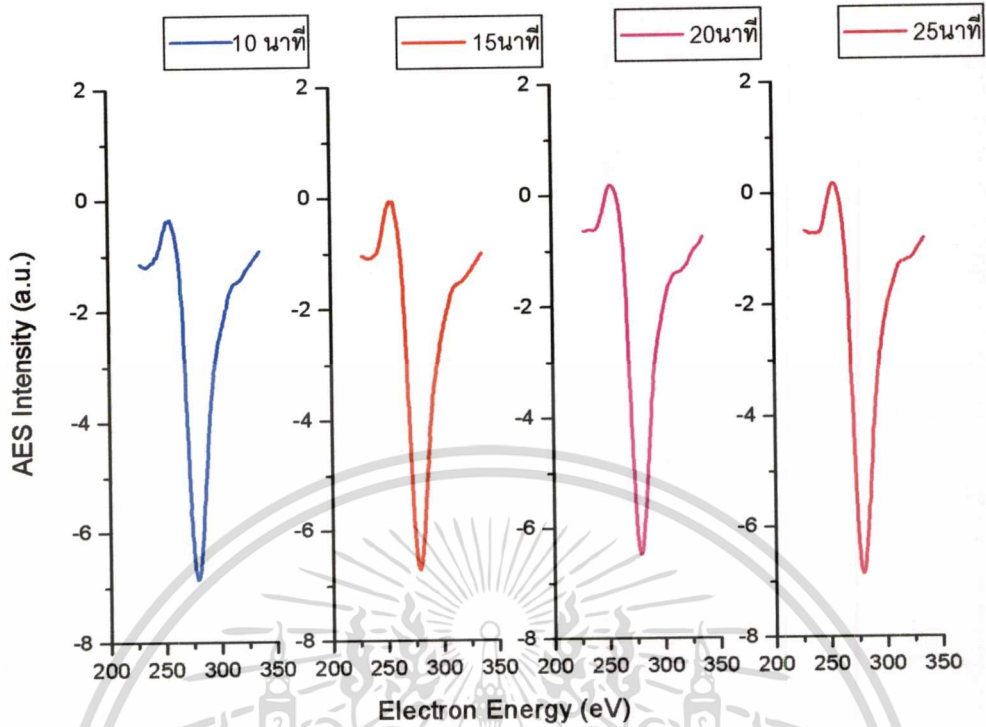


รูปที่ 4.21 สเปกตรัมเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังล้างด้วยอัตราส่วน 1:1:10

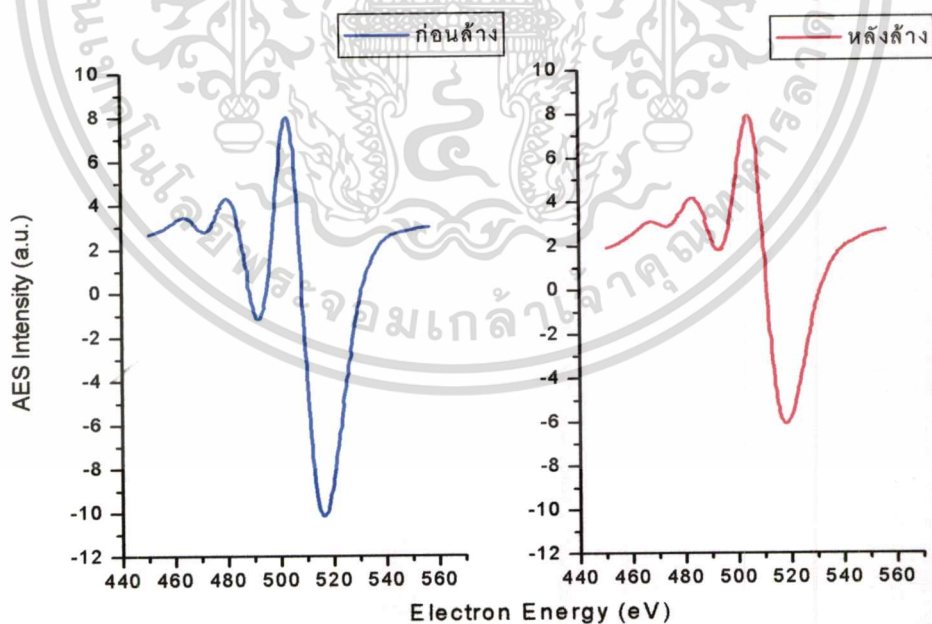


รูปที่ 4.22 สเปกตรัมสัญญาณ ไอเจนของคาร์บอนเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังล้างที่เวลาต่าง ๆ ด้วยอัตราส่วน 1:1:10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.23 สเปกตรัมสัญญาณไอเจของคาร์บอนหลังล้างที่เวลาต่าง ๆ ด้วยอัตราส่วน 1:1:10



รูปที่ 4.24 สเปกตรัมสัญญาณไอเจของออกซิเจนเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังล้างด้วยอัตราส่วน 1:1:10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.22 เป็นสเปกตรัมสัญญาณไอของคาร์บอนเปรียบเทียบระหว่างก่อนล้างกับหลังล้างที่เวลาต่าง ๆ กัน เพื่อให้เห็นชัดเจนขึ้น ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อล้างสารตัวอย่างด้วยเวลา 10 นาที ในอัตราส่วน 1:1:10 สัญญาณไอของคาร์บอนลดลงอย่างชัดเจน และรูปที่ 4.23 เป็นสเปกตรัมสัญญาณไอของคาร์บอนเมื่อล้างที่เวลาต่าง ๆ จากรูปจะเห็นว่าขนาดความสูงของสัญญาณเมื่อล้างที่เวลาต่าง ๆ มีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งคล้ายกับกรณีของการล้างด้วยอัตราส่วน 2:2:5 รูปที่ 4.24 เป็นสเปกตรัมสัญญาณไอของออกซิเจนเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังล้างเพื่อให้เห็นชัดเจนขึ้น ซึ่งจะเห็นว่าขนาดความสูงของสัญญาณไอของออกซิเจนลดลงเพียงเล็กน้อย

สรุปผลการล้างคราบไขมันโดยการลดอัตราส่วนของ $\text{NH}_4\text{OH} : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O}$ เป็น 1:1:10 ทำให้ขนาดสัญญาณไอของคาร์บอนลดลงจากก่อนล้างคือ 30.88 เป็น 6.77 ในเวลา 25 นาที แต่ขนาดสัญญาณเริ่มคงที่ตั้งแต่ 10 นาทีแรก และขนาดสัญญาณไอของออกซิเจนไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนัก ส่วนขนาดสัญญาณไอของซิลิกอนเพิ่มขึ้นจากก่อนล้างคือ 42.60 เป็น 125.84 ในเวลา 10 นาที แต่เมื่อล้างต่อไปกลับมีขนาดลดลง จะเห็นว่าผลการทดลองที่ได้ไม่ต่างจากการใช้อัตราส่วน 2:2:5

จากผลการทดลองที่ผ่านมาจะเห็นว่าผลของการศึกษาการล้างกำจัดคราบไขมันเพื่อคุณภาพของเวลาที่ใช้ในการล้างในหัวข้อ 4.2.1.1 ขนาดสัญญาณไอของคาร์บอนลดลงอย่างรวดเร็วในเวลา 10 นาที แต่ขนาดสัญญาณไอของคาร์บอนที่เหลือจากสารตัวอย่างทั้ง 3 ชั้น มีค่า 11.37 ซึ่งมีค่ามากกว่าขนาดสัญญาณไอของคาร์บอนเมื่อล้างโดยการเพิ่มและลดอัตราส่วนของสารเคมี ซึ่งมีค่าเป็น 6.29 และ 6.77 ตามลำดับ ที่เวลา 10 นาทีเท่ากัน ดังนั้นจึงได้ศึกษาผลของการใช้อัตราส่วนของ $\text{NH}_4\text{OH} : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O}$ เป็น 1:1:5 อีกครั้ง โดยการใช้สารตัวอย่างในการทดลอง 1 ชั้น

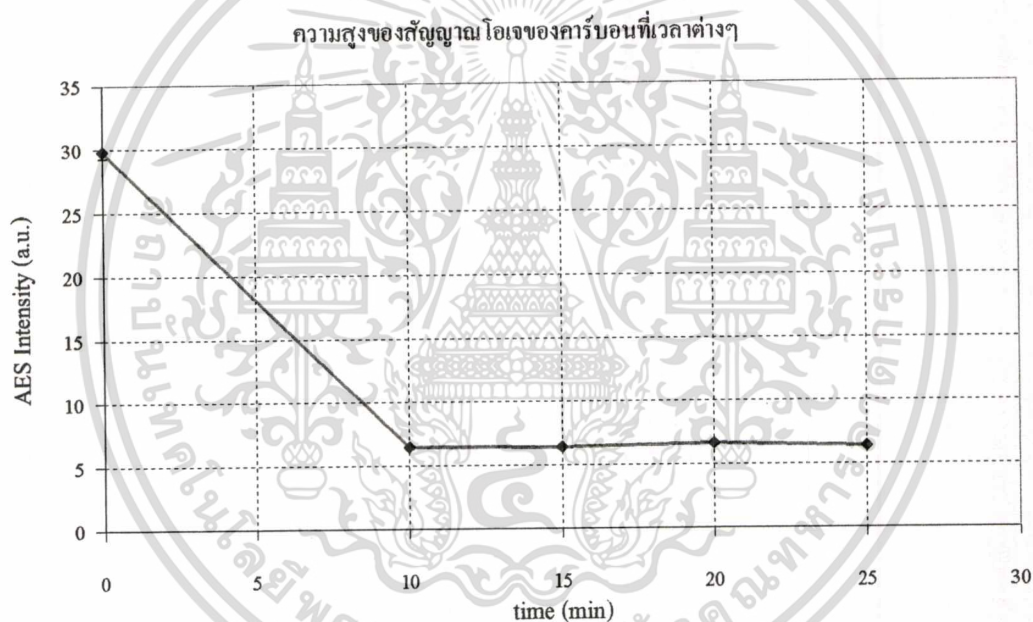
3) เมื่อใช้อัตราส่วนมาตรฐาน

เมื่อล้างสารตัวอย่างด้วยอัตราส่วนสารเคมีที่เป็นอัตราส่วนมาตรฐาน $\text{NH}_4\text{OH} : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O}$ เป็น 1:1:5 ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลาต่าง ๆ แล้ววัดขนาดสัญญาณไอของคาร์บอนได้ดังตารางที่ 4.6 ซึ่งในตารางได้แสดงค่าขนาดความสูงของสัญญาณไอของซิลิกอนและออกซิเจนไว้ด้วย รูปที่ 4.25 เป็นขนาดของสัญญาณไอของคาร์บอนเมื่อล้างสารตัวอย่างที่เวลาต่าง ๆ ด้วยขั้นตอน SC1 อัตราส่วนของสารเคมีเป็นอัตราส่วนมาตรฐานคือ 1:1:5 ซึ่งจะเห็นว่าขนาดความสูงของสัญญาณไอของคาร์บอนลดลงอย่างรวดเร็วตั้งแต่นาทีที่ 10 เมื่อทำการล้างสารตัวอย่างต่อไปเป็น 15 นาที และเพิ่มขึ้นทีละ 5 นาทีพบว่าขนาดความสูงของสัญญาณไอของคาร์บอนมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งหมายความว่าจากนาทีที่ 10 เป็นต้นไปสัญญาณไอของคาร์บอนมีค่าคงที่ และยังมีค่าใกล้เคียงกับการล้างสารตัวอย่างด้วยการเพิ่มอัตราส่วนของสารเคมี เป็น 2:2:5 และลดอัตราส่วนของสารเคมีเป็น 1:1:10 อีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

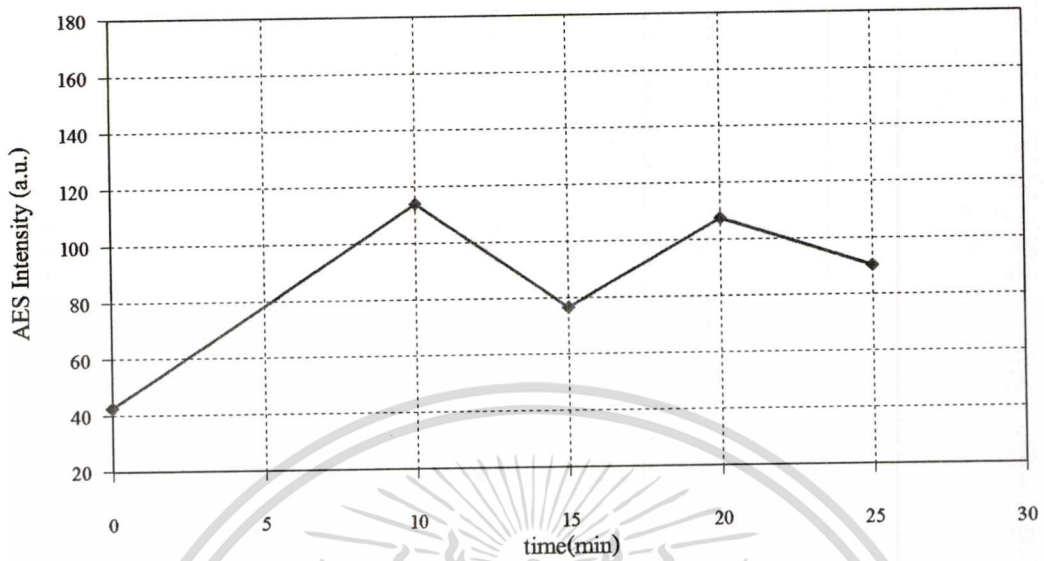
ตารางที่ 4.6 ข้อมูลขนาดความสูงของสัญญาณ ไอเจของคาร์บอน ซิลิกอนและออกซิเจนเมื่อล้างด้วย $\text{NH}_4\text{OH} : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O}$ อัตราส่วน 1:1:5 ที่เวลาต่างๆ

| เวลาในการล้าง (นาที) | ขนาดของสัญญาณ ไอเจ(a.u.) | | |
|-------------------------|--------------------------|---------|----------|
| | คาร์บอน | ซิลิกอน | ออกซิเจน |
| 0 | 29.82 | 42.57 | 16.87 |
| 10 | 6.47 | 113.94 | 20.77 |
| 15 | 6.42 | 76.60 | 15.48 |
| 20 | 6.66 | 107.43 | 13.73 |
| 25 | 6.40 | 90.22 | 13.63 |



รูปที่ 4.25 ขนาดของสัญญาณ ไอเจของคาร์บอนที่เวลาต่างๆเมื่อล้างด้วยขั้นตอน SC1 โดยใช้ อัตราส่วนของสารเคมีเป็นอัตราส่วนมาตรฐาน 1:1:5

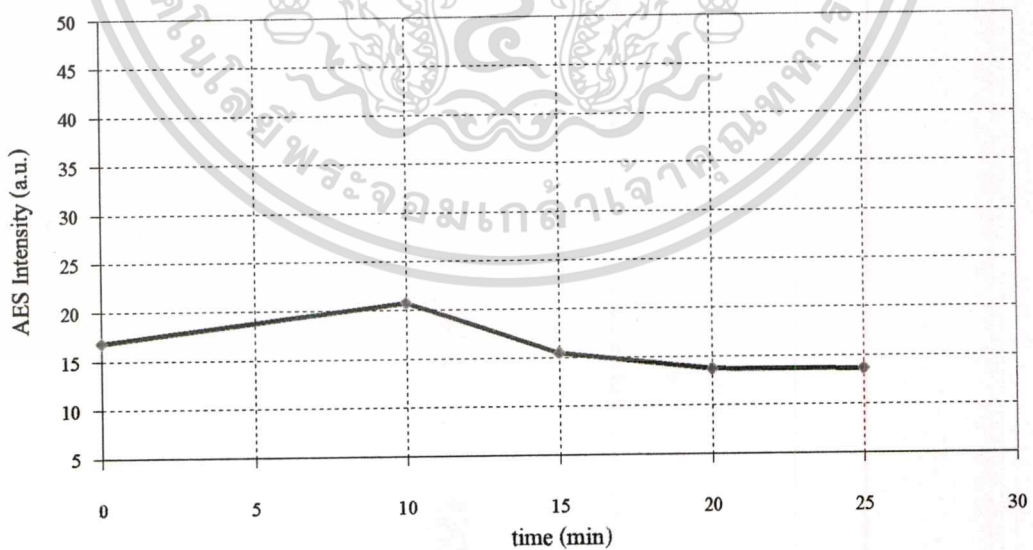
ความสูงของสัญญาณ ไอเจของซัลฟอนที่เวลาต่างๆ



รูปที่ 4.26 ขนาดของสัญญาณ ไอเจของซัลฟอนที่เวลาต่าง ๆ เมื่อล้างด้วยอัตราส่วน 1:1:5

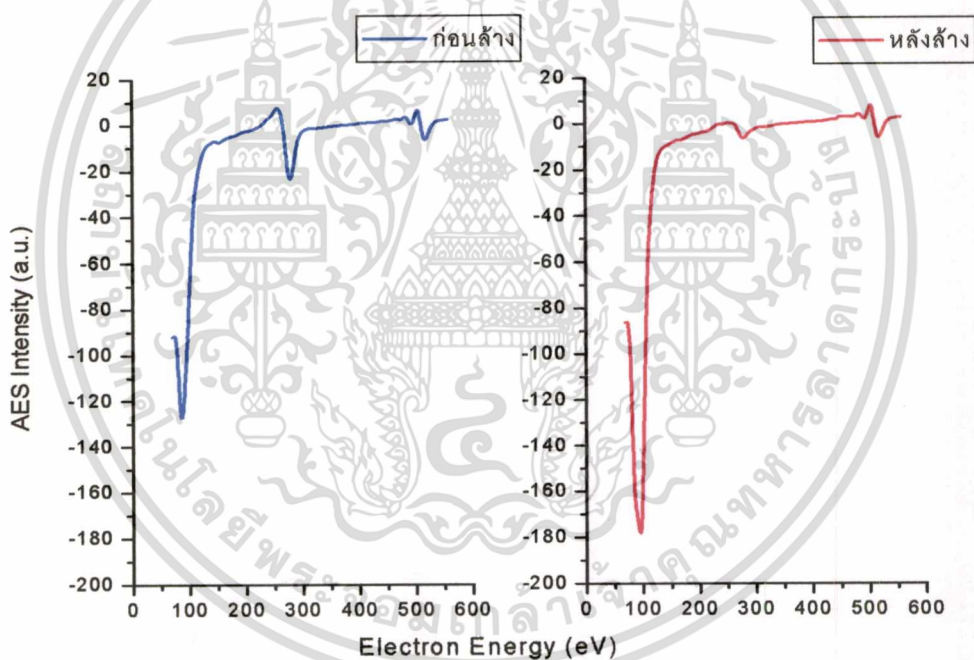
เมื่อวัดสัญญาณ ไอเจของซัลฟอนพบว่าขนาดสัญญาณ ไอเจของซัลฟอนมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเวลา 10 นาทีแรก หลังจากนั้นขนาดสัญญาณ โดยเฉลี่ยมีแนวโน้มคงที่ ดังรูปที่ 4.26

ความสูงของสัญญาณ ไอเจของออกซิเจนที่เวลาต่างๆ

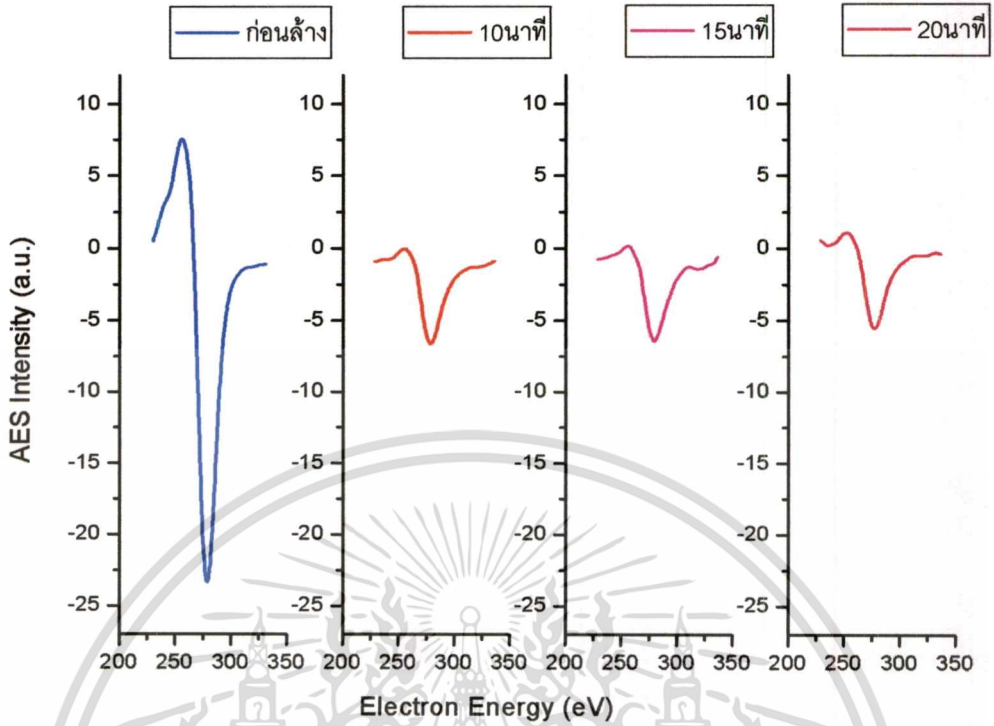


รูปที่ 4.27 ขนาดของสัญญาณ ไอเจของออกซิเจนที่เวลาต่าง ๆ เมื่อล้างด้วยอัตราส่วน 1:1:5

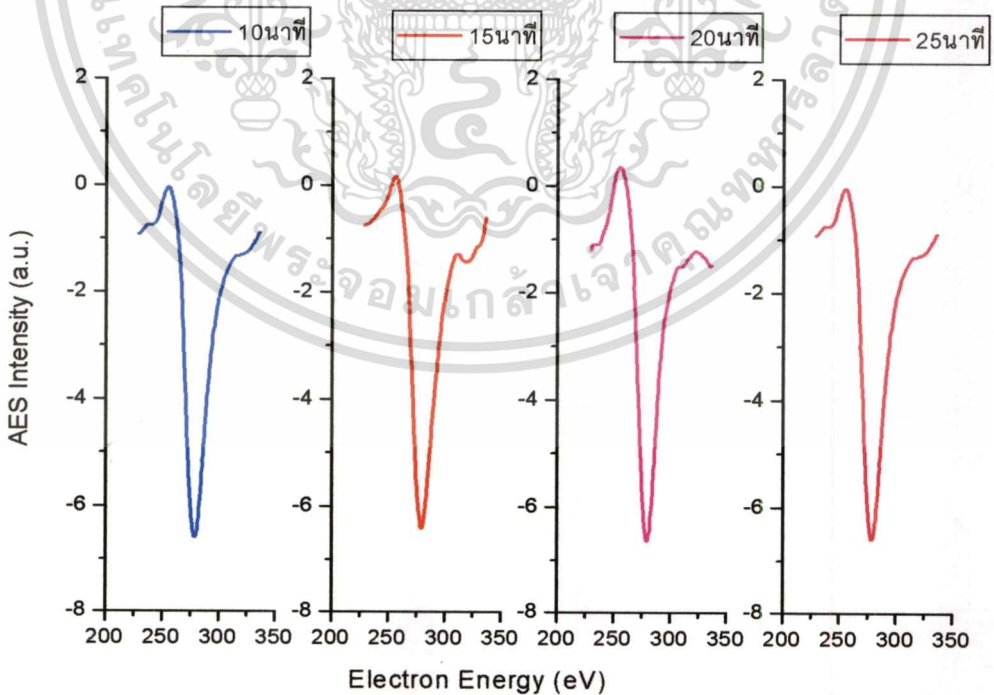
เมื่อวัดสัญญาณไอเจของออกซิเจนพบว่าขนาดสัญญาณไอเจของออกซิเจนมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก ดังรูปที่ 4.27 รูปที่ 4.28 เป็นสเปกตรัมของสัญญาณที่วัดจากแผ่นซิลิกอน เพื่อเปรียบเทียบก่อนล้างและหลังสิ้นสุดการล้างในนาที่ที่ 25 ด้วยอัตราส่วน 1:1:5 จากรูปจะเห็นว่าสัญญาณไอเจของคาร์บอนลดลงอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับก่อนล้าง และสัญญาณไอเจของซิลิกอนมีขนาดสูงขึ้นเมื่อเทียบกับก่อนล้าง ในขณะที่ขนาดของสัญญาณไอเจของออกซิเจนไม่มีการเปลี่ยนแปลงที่เด่นชัด รูปที่ 4.29 เป็นสเปกตรัมสัญญาณไอเจของคาร์บอนเปรียบเทียบระหว่างก่อนล้างกับหลังล้างที่เวลาต่าง ๆ กัน ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อล้างสารตัวอย่างด้วยเวลา 10 นาที ในอัตราส่วน 1:1:5 สัญญาณไอเจของคาร์บอนลดลงอย่างชัดเจน รูปที่ 4.30 เป็นสเปกตรัมสัญญาณไอเจของคาร์บอนหลังการล้างที่เวลาต่าง ๆ จากรูปจะเห็นว่าขนาดความสูงของสัญญาณหลังการล้าง 10 นาทีไปแล้ว มีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งคล้ายกับกรณีของการเพิ่มอัตราส่วนของสารเคมีเป็น 2:2:5 และกรณีของการลดอัตราส่วนของสารเคมีเป็น 1:1:10



รูปที่ 4.28 สเปกตรัมที่วัดได้จากแผ่นซิลิกอนเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังล้างด้วยอัตราส่วน 1:1:5

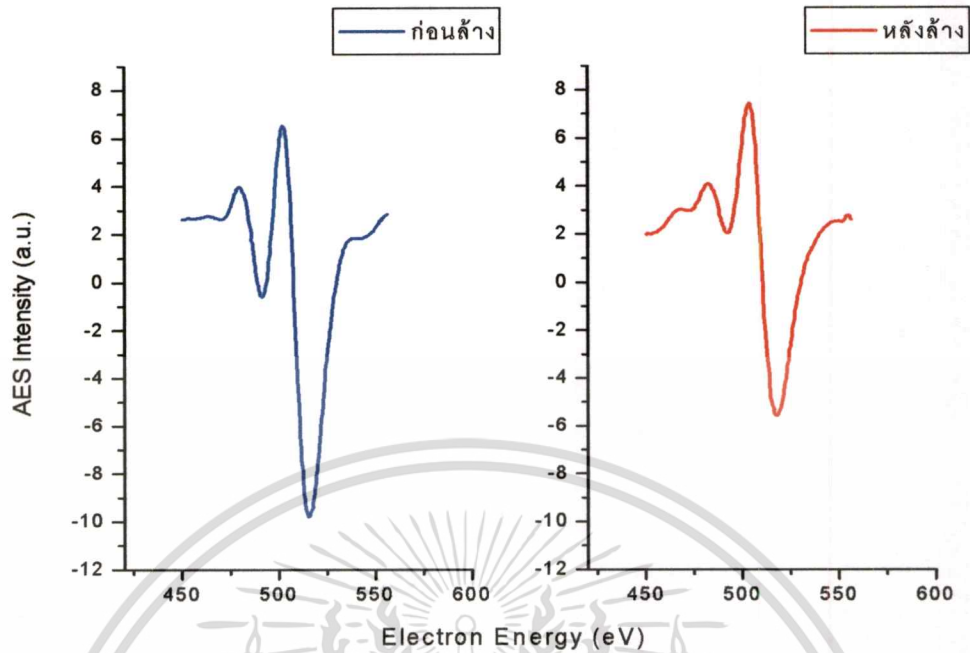


รูปที่ 4.29 สัญญาณ ไอเจของคาร์บอนเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังการล้างที่เวลาต่าง ๆ ด้วยอัตราส่วน 1:1:5



รูปที่ 4.30 สเปกตรัมสัญญาณ ไอเจของคาร์บอนหลังการล้างที่เวลาต่าง ๆ ด้วยอัตราส่วน 1:1:5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

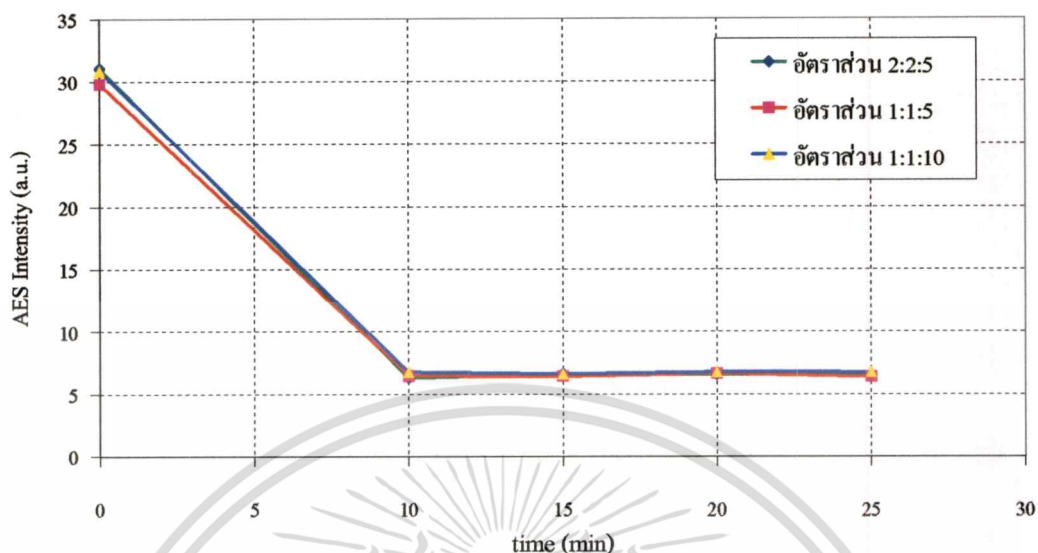


รูปที่ 4.31 สเปกตรัมสัญญาณ ไอเจของออกซิเจนเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังล้างด้วย อัตราส่วน 1:1:5

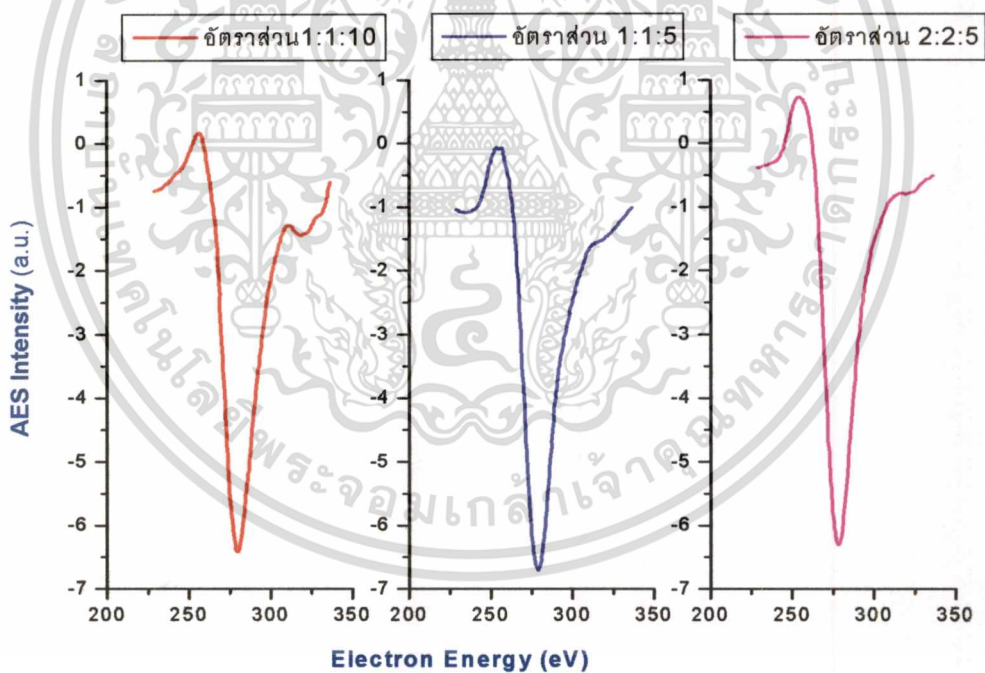
รูปที่ 4.31 เป็นสเปกตรัมสัญญาณ ไอเจของออกซิเจนเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังล้าง ซึ่งจะเห็นว่าขนาดความสูงของสัญญาณ ไอเจของออกซิเจนลดลงแต่ไม่มากนักเมื่อเทียบกับก่อนล้าง สรุปลงจากการล้างคราบ ไหม้นด้วยอัตราส่วนของ $\text{NH}_4\text{OH} : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O}$ เป็น 1:1:5 ทำให้ขนาดสัญญาณ ไอเจของคาร์บอนลดลงจากก่อนล้างคือ 29.82 เป็น 6.44 ในเวลา 25 นาที แต่ขนาดสัญญาณเริ่มคงที่ตั้งแต่ 10 นาทีแรก และขนาดสัญญาณ ไอเจของออกซิเจนมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก ส่วนขนาดสัญญาณ ไอเจของซิลิกอนเพิ่มขึ้นจากก่อนล้างคือ 42.57 เป็น 113.94 ในเวลา 10 นาที หลังจากนั้นโดยเฉลี่ยถือว่ามีความคงที่

เมื่อนำผลของการล้างสารตัวอย่าง โดยการเปลี่ยนอัตราส่วนของสารเคมีมาเปรียบเทียบกัน พบว่าสัญญาณ ไอเจของคาร์บอนลดลงและมีการเปลี่ยนแปลงที่ใกล้เคียงกันมาก ในทั้ง 3 อัตราส่วน ดังรูปที่ 4.32 รูปที่ 4.33 เป็นสเปกตรัมสัญญาณ ไอเจของคาร์บอนที่ล้างด้วยอัตราส่วนต่างกันที่เวลา 15 นาที ซึ่งจะเห็นว่าขนาดสัญญาณมีความใกล้เคียงกัน

ความสูงของสัญญาณไอเจของคาร์บอนที่อัตราส่วนต่างกันที่เวลาต่างๆ



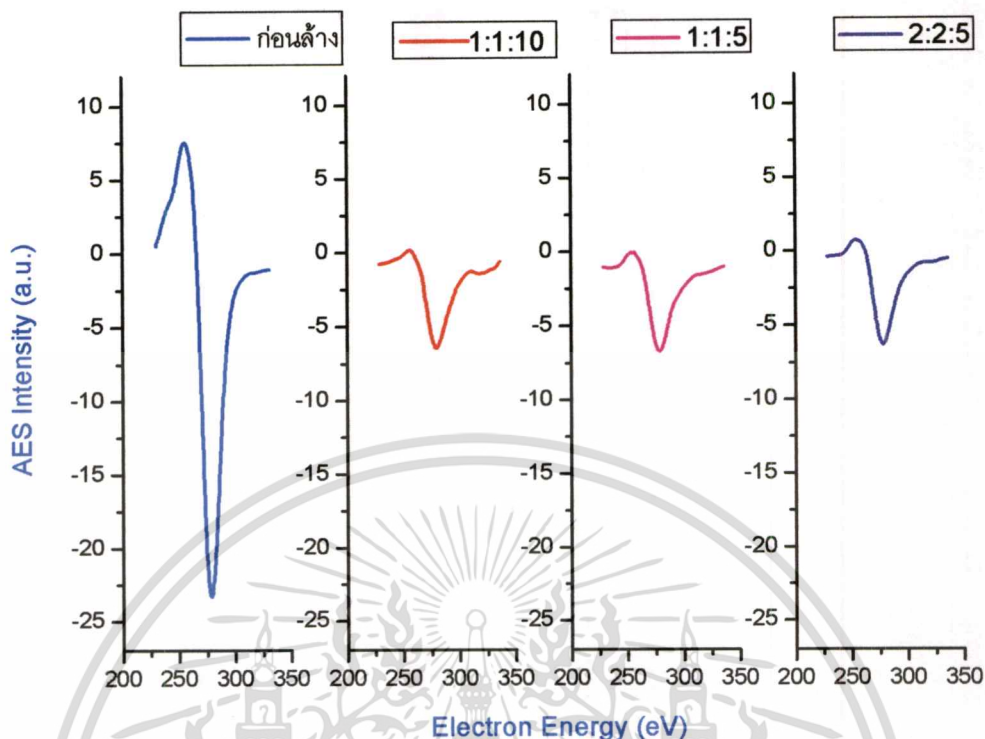
รูปที่ 4.32 ขนาดของสัญญาณ ไอเจของคาร์บอนที่อัตราส่วนต่างกันที่เวลาต่างๆ



รูปที่ 4.33 สเปกตรัมสัญญาณ ไอเจของคาร์บอนเมื่อล้างด้วยอัตราส่วนต่างกันที่เวลา 15 นาที

สเปกตรัมสัญญาณ ไอเจของคาร์บอนเปรียบเทียบระหว่างก่อนล้างกับหลังล้างที่อัตราส่วนต่างกัน ดังรูปที่ 4.34 จะเห็นว่าขนาดของสัญญาณ ไอเจของคาร์บอนหลังล้างลดลงอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับก่อนล้าง และขนาดสัญญาณ ไอเจของคาร์บอนในการล้างในแต่ละอัตราส่วนมีค่าใกล้เคียงกันด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.34 สเปกตรัมสัญญาณ ไอเจของคาร์บอนเปรียบเทียบระหว่างก่อนล้างกับหลังล้างเป็นเวลา 25 นาที ด้วยอัตราส่วนต่างกัน

จากผลของการศึกษาการล้างกำจัดคราบไขมันเพื่อดูผลของเวลาที่ใช้ในการล้างด้วยอัตราส่วน 1:1:5 ในหัวข้อ 4.2.1.1 ขนาดสัญญาณไอเจของคาร์บอนลดลงอย่างรวดเร็วในเวลา 10 นาที แต่ขนาดสัญญาณไอเจของคาร์บอนที่เจือจางสารตัวอย่างทั้ง 3 ชั้น มีค่า 11.37 ซึ่งมีค่ามากกว่าขนาดสัญญาณไอเจของคาร์บอนเมื่อล้างโดยการเพิ่มและลดอัตราส่วนของสารเคมี ซึ่งมีค่าเป็น 6.29 และ 6.77 ตามลำดับ และเมื่อล้างสารตัวอย่างด้วยอัตราส่วน 1:1:5 อีกครั้งโดยใช้สารตัวอย่าง 1 ชั้น ปรากฏว่าสัญญาณไอเจของคาร์บอนลดลงจาก 29.82 เป็น 6.44 ภายใน 10 นาที เหตุผลที่เป็นไปได้เนื่องจากการทดลองของการเปลี่ยนแปลงเวลาในการล้างซึ่งล้างด้วยอัตราส่วน 1:1:5 ได้ใช้สารตัวอย่างถึง 3 ชั้น แต่ในการทดลองเพื่อศึกษาผลของการเปลี่ยนอัตราส่วนของสารเคมีในแต่ละอัตราส่วนใช้สารตัวอย่างเพียง 1 ชั้น นั่นคือสารตัวอย่าง 1 ชั้น ล้างในปริมาณของสารเคมีที่เท่ากับการล้างสารตัวอย่าง 3 ชั้น ประสิทธิภาพหรืออัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีในการกำจัดสิ่งปนเปื้อนจึงต่างกัน ทำให้วัดสัญญาณไอเจของคาร์บอนได้ต่างกันในแต่ละช่วงเวลา และจากผลของการศึกษาการเปลี่ยนอัตราส่วนของสารเคมีผ่านมาพบว่าสัญญาณไอเจของคาร์บอนลดลงอย่างรวดเร็วตั้งแต่ 10 นาทีแรก และเมื่อเพิ่มเวลาของการล้างให้มากขึ้นสัญญาณไอเจของคาร์บอนยังคงมีค่าไม่ต่างกัน ดังนั้นต่อไปจึงได้ศึกษาผลของการล้างในช่วงเวลา 10 นาทีแรก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) การศึกษาผลของการล้างในช่วงเวลา 10 นาทีแรก

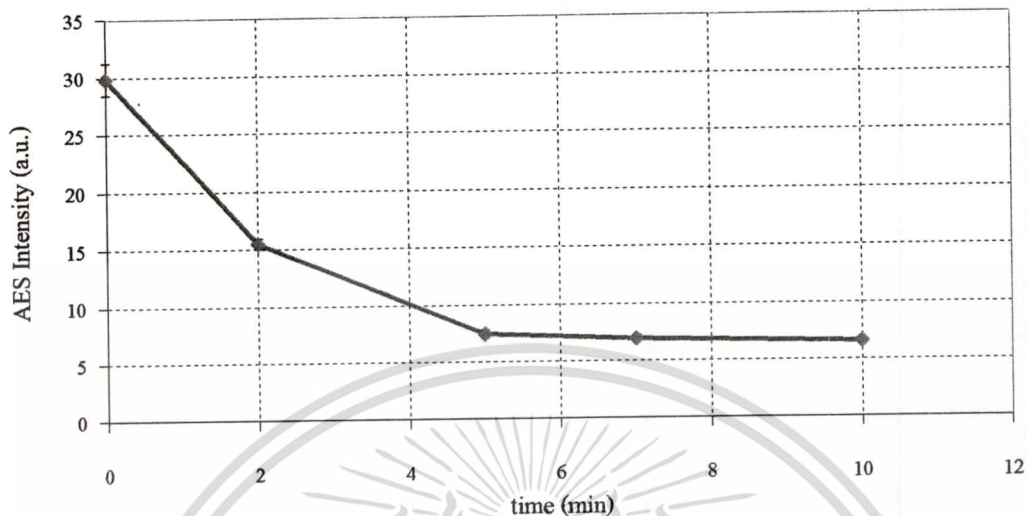
การล้างสารตัวอย่างในช่วงเวลา 10 นาทีแรก ด้วย $\text{NH}_4\text{OH} : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O}$ อัตราส่วน 1:1:5 ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เพื่อศึกษาผลของการล้างที่เวลาไม่เกิน 10 นาทีว่าสัญญาณ ไอเจของคาร์บอนมีการเปลี่ยนแปลงอย่างไรเมื่อเทียบกับผลการทดลองที่ผ่านมา เวลาที่ใช้ในการล้างด้วยขั้นตอนนี้เริ่มจาก 2 นาที แล้วเพิ่มขึ้นทีละน้อย เวลาในการล้างและสัญญาณ ไอเจของคาร์บอนที่วัดได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.7 ซึ่งในตารางได้แสดงค่าขนาดความสูงของสัญญาณ ไอเจของซิลิกอนและออกซิเจนไว้ด้วย

ตารางที่ 4.7 ข้อมูลขนาดความสูงของสัญญาณ ไอเจของคาร์บอน ซิลิกอนและออกซิเจนเมื่อล้างด้วย $\text{NH}_4\text{OH} : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O}$ อัตราส่วน 1:1:5 ในช่วงเวลา 10 นาทีแรก

| เวลาในการล้าง (นาที) | ขนาดของสัญญาณ ไอเจ (a.u.) | | |
|-------------------------|---------------------------|---------|----------|
| | คาร์บอน | ซิลิกอน | ออกซิเจน |
| 0 | 29.81 | 60.74 | 21.90 |
| 2 | 15.50 | 90.76 | 22.40 |
| 5 | 7.47 | 94.04 | 19.14 |
| 7 | 6.94 | 97.09 | 14.06 |
| 10 | 6.60 | 98.44 | 14.08 |

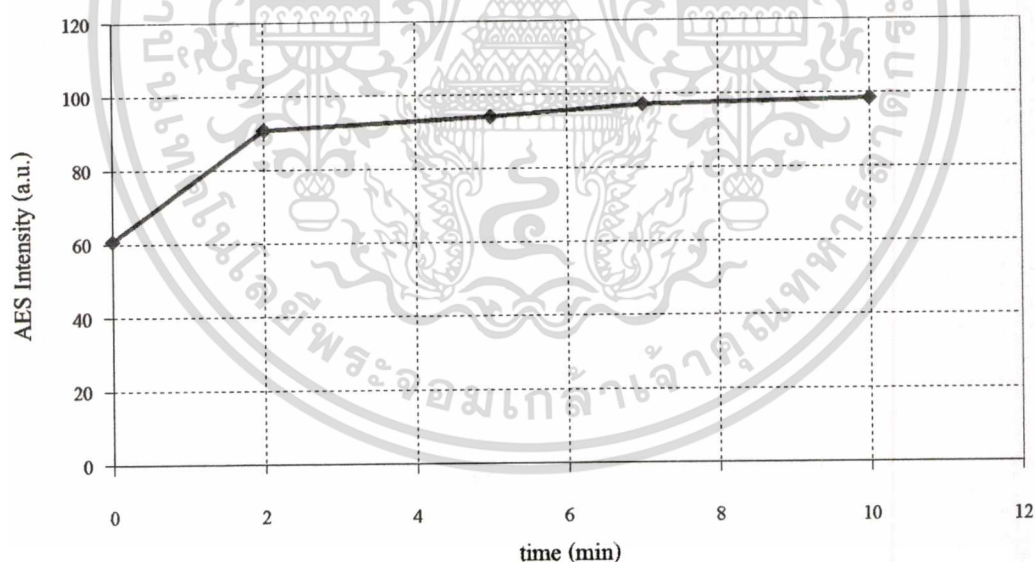
รูปที่ 4.35 แสดงให้เห็นว่าขนาดของสัญญาณ ไอเจของคาร์บอนลดลงอย่างต่อเนื่องจาก 29.81 เหลือ 6.60 ใน 10 นาที และขนาดสัญญาณ ไอเจของซิลิกอนมีค่าสูงขึ้นจากก่อนล้าง 60.74 เป็น 98.44 ส่วนขนาดสัญญาณ ไอเจของออกซิเจนมีค่าลดลงเล็กน้อยจาก 21.90 เป็น 14.08 เมื่อสิ้นสุดการล้างด้วยเวลา 10 นาที ดังรูปที่ 4.36 และ รูปที่ 4.37 ตามลำดับ

ความสูงของสัญญาณไอเจของคาร์บอนที่เวลาต่างๆ



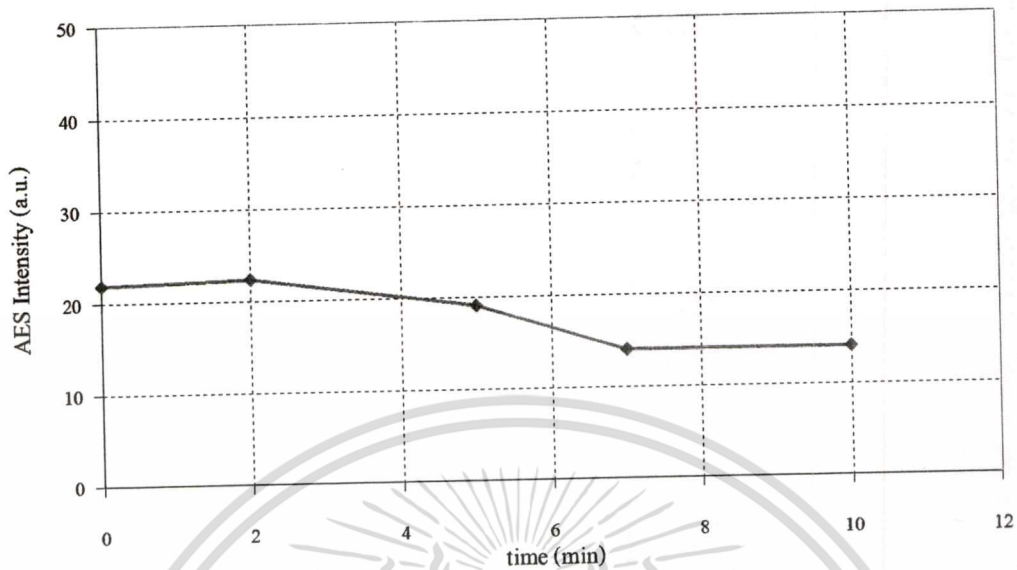
รูปที่ 4.35 ขนาดของสัญญาณ ไอเจของคาร์บอนที่เวลาต่างๆเมื่อล้างด้วยชั้นตอนSC1 โดยใช้ อัตราส่วนของสารเคมีเป็นอัตราส่วนมาตรฐาน 1:1:5 พิจารณาในช่วงเวลา 10 นาที

ความสูงของสัญญาณ ไอเจของซิลิกอนที่เวลาต่างๆ



รูปที่ 4.36 ขนาดของสัญญาณ ไอเจของซิลิกอนที่เวลาต่างๆเมื่อล้างด้วยชั้นตอนSC1 โดยใช้ อัตราส่วนของสารเคมีเป็นอัตราส่วนมาตรฐาน 1:1:5 พิจารณาในช่วงเวลา 10 นาที

ความสูงของสัญญาณ ไอเจของออกซิเจนที่เวลาต่างๆ



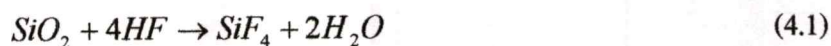
รูปที่ 4.37 ขนาดของสัญญาณ ไอเจของออกซิเจนที่เวลาต่างๆเมื่อล้างด้วยขั้นตอนSC1โดยใช้ อัตราส่วนของสารเคมีเป็นอัตราส่วนมาตรฐาน 1:1:5 พิจารณาในช่วงเวลา 10 นาที

จากผลการทดลองที่ผ่านมาทั้งหมดในขั้นตอนการล้างกำจัดคราบไขมัน เพื่อศึกษาผลของการเปลี่ยนเวลาในการล้างและการเปลี่ยนอัตราส่วนของสารเคมีพบว่าในแต่ละอัตราส่วนของสารเคมีที่ใช้ สามารถล้างกำจัดคาร์บอนได้ใกล้เคียงกัน เนื่องจากสัญญาณ ไอเจของคาร์บอนที่วัดได้จากการล้างโดยใช้สารเคมีในทั้ง 3 อัตราส่วนมีค่าใกล้เคียงกัน และมีค่าคงที่ที่เวลา 10 นาที สัญญาณไอเจของซิลิกอนมีค่าสูงขึ้นจากก่อนล้างแต่จะสังเกตเห็นว่าสัญญาณไอเจของซิลิกอนที่วัดจากสารตัวอย่างที่ล้างโดยใช้เวลากิน 15 นาที ได้ผลไม่ค่อยแน่นอน อาจเป็นผลเนื่องจากพื้นผิวเกิดความเสียหาย เช่น เกิดความขรุขระหรือมีรูพรุน เมื่อใช้เวลาในการล้างนานเกินไป และในขั้นตอนการล้างกำจัดคราบไขมันนี้ยังสามารถกำจัดอะตอมของธาตุออกซิเจนได้เป็นบางส่วนเนื่องจากสัญญาณไอเจของออกซิเจนมีขนาดลดลงเล็กน้อยทุกเงื่อนไขในขั้นตอนการล้างกำจัดคราบไขมันเมื่อเทียบกับก่อนล้าง เป็นไปได้ว่าออกซิเจนที่วัดได้โดยไอเจสเปกโตรมิเตอร์ บางส่วนเป็นออกไซด์ของคาร์บอน เมื่อคาร์บอนถูกกำจัดไปออกซิเจนส่วนนี้จึงถูกกำจัดไปด้วย

4.2.2 การศึกษาการทำความสะอาดขั้นตอนการล้างกำจัดชั้นออกไซด์

การกำจัดชั้นออกไซด์เป็นขั้นตอนหนึ่งในกระบวนการ RCA ด้วยสารละลาย DHF (Dilute HF solution) ประกอบด้วยกรดไฮโดรฟลูออริก (Hydrofluoric acid ; HF) น้ำไร้ประจุ (DI water ;H₂O) โดยใช้ HF :H₂O ในอัตราส่วน 1 : 50 ที่อุณหภูมิห้อง เวลา 15 วินาที แล้วนำสารเอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งมอบไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างไปล้างในน้ำไว้ประจุเป็นเวลา 30 วินาที ในขั้นตอนนี้ได้ศึกษาผลของการเปลี่ยนอัตราส่วนของสารเคมีในการล้าง ซึ่งกลไกการเกิดปฏิกิริยาเคมีในการล้างกำจัดชั้นออกไซด์เป็นดังนี้

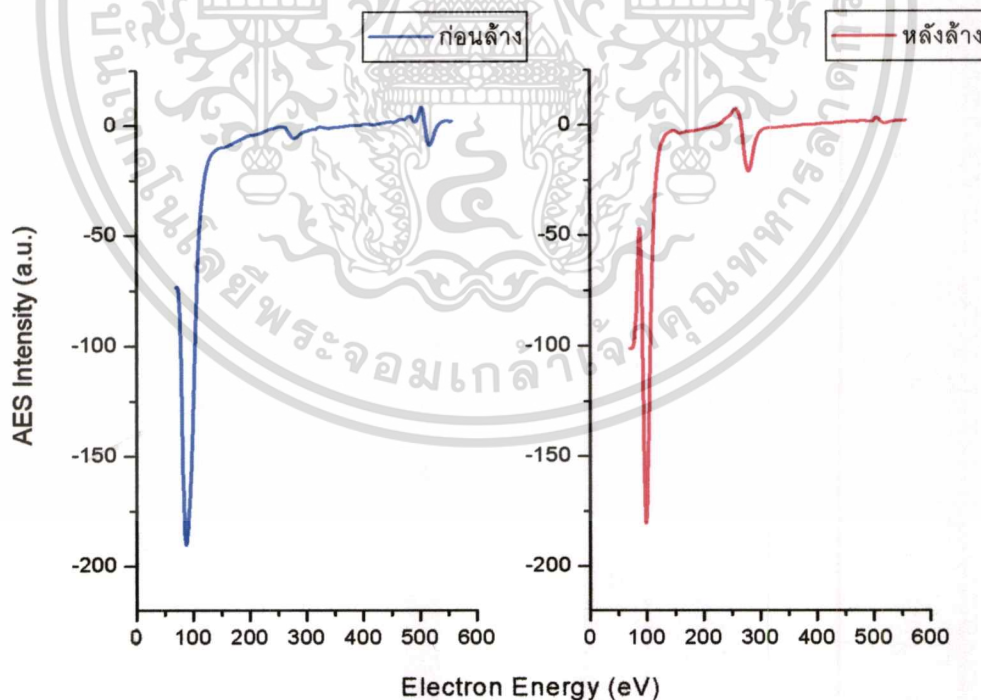


4.2.2.1 การศึกษาผลของการเปลี่ยนอัตราส่วน

การเปลี่ยนอัตราส่วนของสารเคมีเพื่อศึกษาผลของเปอร์เซ็นต์ของกรด HF ที่มีต่อการกำจัดชั้นออกไซด์โดยการวัดสัญญาณไอเจของออกซิเจน ในการทดลองได้เปลี่ยนอัตราส่วนของ HF:H₂O จาก 1:50 เป็น 1:30 และ 1:10

1) อัตราส่วนของ HF :H₂O เป็น 1: 50

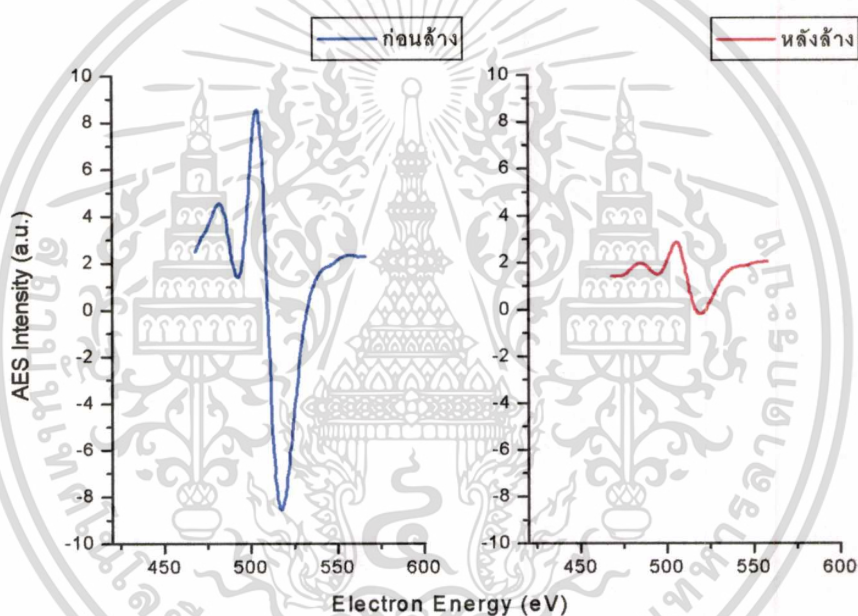
ในการทดลองใช้สารตัวอย่าง 3 ชิ้น ทำการล้างในขั้นตอนการล้างกำจัดชั้นออกไซด์ตามอัตราส่วนมาตรฐาน HF:H₂O เป็น 1: 50 เป็นเวลา 15 วินาที แล้วล้างด้วยน้ำไว้ประจุเป็นเวลา 30 วินาที



รูปที่ 4.38 สเปกตรัมที่วัดได้จากแผ่นซิลิกอนเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังล้างกำจัดชั้นออกไซด์ด้วยอัตราส่วน 1:50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการล้างกำจัดชั้นออกไซด์ ด้วย $\text{HF}:\text{H}_2\text{O}$ ในอัตราส่วน 1: 50 พบว่าขนาดสัญญาณ ไอเจของออกซิเจนมีค่าลดลงจากก่อนล้าง 16.13 เป็น 2.75 ขนาดสัญญาณ ไอเจของซิลิกอนมีค่าสูงขึ้นจากก่อนล้างคือ 122.17 เป็น 128.24 ส่วนขนาดสัญญาณ ไอเจของคาร์บอนกลับมีขนาดใหญ่ขึ้นจากก่อนล้างคือ 3.97 เป็น 22.21 รูปที่ 4.38 เป็นสเปกตรัมที่วัดได้จากแผ่นซิลิกอนเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังล้างด้วย $\text{HF}:\text{H}_2\text{O}$ ในอัตราส่วน 1 : 50 ซึ่งจะเห็นได้ว่าขนาดสัญญาณ ไอเจของออกซิเจนลดลงอย่างชัดเจนจากก่อนล้าง สัญญาณ ไอเจของซิลิกอนก็มีขนาดที่สูงขึ้นจากก่อนล้าง และขนาดสัญญาณ ไอเจของคาร์บอนมีขนาดใหญ่ขึ้นจากก่อนล้าง รูปที่ 4.39 เป็นสเปกตรัมสัญญาณ ไอเจของออกซิเจนเปรียบเทียบระหว่างก่อนล้างและหลังล้าง ด้วย $\text{HF}:\text{H}_2\text{O}$ อัตราส่วน 1: 50 ซึ่งจะเห็นว่าขนาดสัญญาณ ไอเจของออกซิเจนมีค่าลดลงจากก่อนล้างอย่างชัดเจน



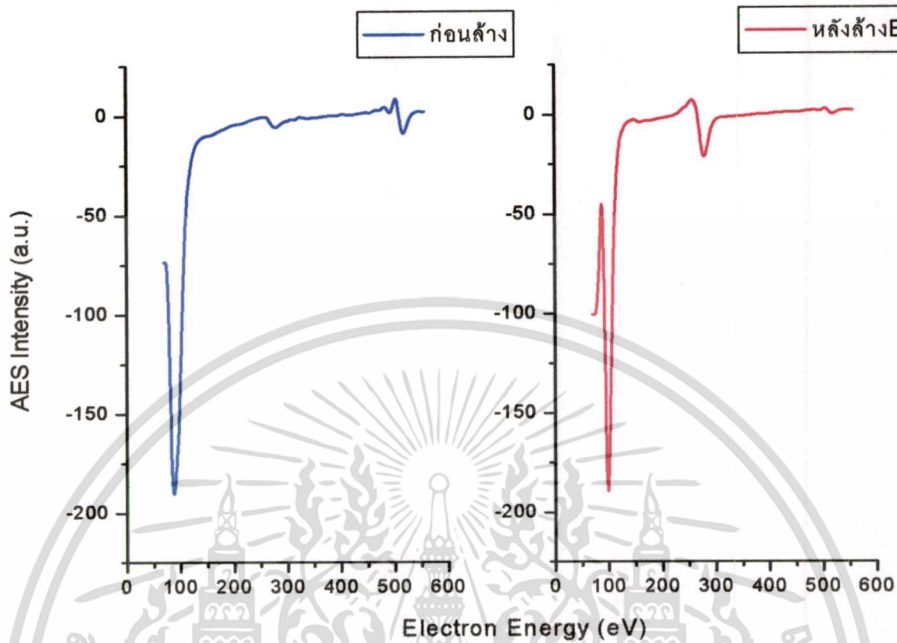
รูปที่ 4.39 สเปกตรัมสัญญาณ ไอเจของออกซิเจนเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังล้างกำจัดชั้นออกไซด์ด้วยอัตราส่วน 1:50

2) อัตราส่วนของ $\text{HF}:\text{H}_2\text{O}$ เป็น 1: 30

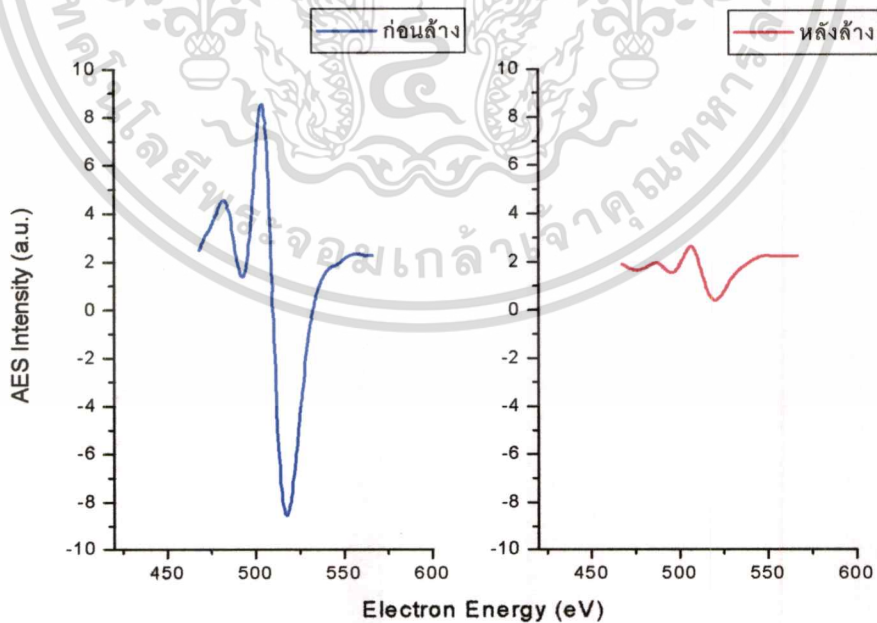
การทดลองใช้สารตัวอย่าง 3 ชิ้น ทำการล้างในขั้นตอนการล้างกำจัดชั้นออกไซด์ตามอัตราส่วน $\text{HF}:\text{H}_2\text{O}$ เป็น 1 : 30 เป็นเวลา 15 วินาที แล้วล้างด้วยน้ำไร้ประจุเป็นเวลา 30 วินาที พบว่าขนาดสัญญาณ ไอเจของออกซิเจนมีค่าลดลงจากก่อนล้าง 16.13 เป็น 2.24 ขนาดสัญญาณ ไอเจของซิลิกอนมีค่าสูงขึ้นจากก่อนล้างคือ 122.17 เป็น 145.97 ส่วนขนาดสัญญาณ ไอเจของคาร์บอนกลับมีขนาดใหญ่ขึ้นจากก่อนล้างคือ 3.97 เป็น 25.81 รูปที่ 4.40 เป็นสเปกตรัมที่วัดได้จากแผ่นซิลิกอนเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังล้างด้วย $\text{HF}:\text{H}_2\text{O}$ ในอัตราส่วน 1 : 30 ซึ่งจะเห็นได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นาใบโฆษณาชิ้นด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดสัญญาณไอเจของออกซิเจนลดลงอย่างชัดเจนจากก่อนล้าง สัญญาณ ไอเจของซิลิกอนมีขนาดที่สูงขึ้นจากก่อนล้าง รวมทั้งขนาดสัญญาณไอเจของคาร์บอนที่มีขนาดใหญ่ขึ้นจากก่อนล้าง



รูปที่ 4.40 สเปกตรัมที่วัดได้จากแผ่นซิลิกอนเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังล้างกำจัดชั้นออกไซด์ด้วยอัตราส่วน 1:30



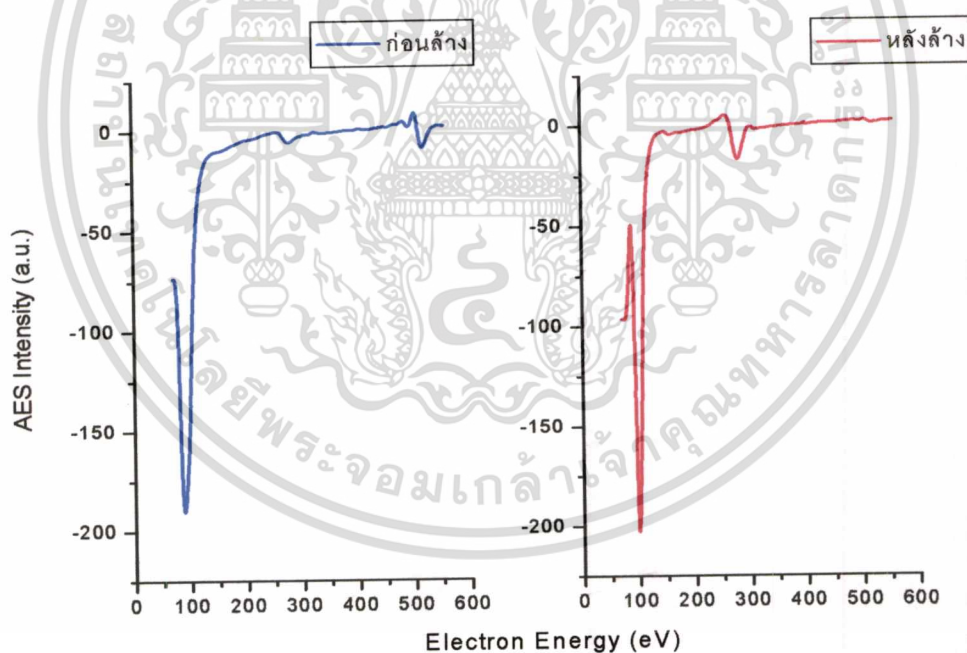
รูปที่ 4.41 สเปกตรัมสัญญาณไอเจของออกซิเจนเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังล้างกำจัดชั้นออกไซด์ด้วยอัตราส่วน 1:30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.41 เป็นสเปกตรัมสัญญาณ ไอเจของออกซิเจนเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังล้างด้วย HF :H₂O อัตราส่วน 1 : 30 ซึ่งจะเห็นว่าขนาดสัญญาณ ไอเจของออกซิเจนมีค่าลดลงจากก่อนล้างอย่างชัดเจน

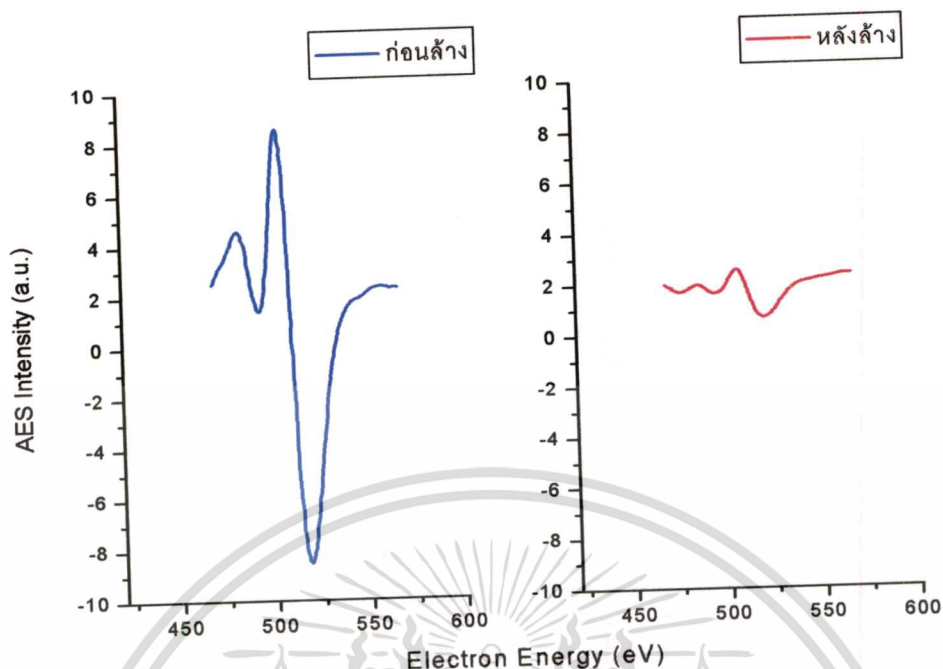
3) อัตราส่วนของ HF :H₂O เป็น 1 : 10

การทดลองใช้สารตัวอย่าง 3 ชิ้น ทำการล้างในขั้นตอนการล้างกำจัดชั้นออกไซด์ตามอัตราส่วน HF : H₂O เป็น 1 : 10 เป็นเวลา 15 วินาที แล้วล้างด้วยน้ำไว้ประจุเป็นเวลา 30 วินาที พบว่าขนาดสัญญาณ ไอเจของออกซิเจนมีค่าลดลงจากก่อนล้าง 16.13 เป็น 1.91 ขนาดสัญญาณ ไอเจของซิลิกอนมีค่าสูงขึ้นจากก่อนล้างคือ 122.17 เป็น 150.82 ส่วนขนาดสัญญาณ ไอเจของคาร์บอนกลับมีขนาดใหญ่ขึ้นจากก่อนล้างคือ 3.97 เป็น 24.53 รูปที่ 4.42 เป็นสเปกตรัมที่วัดได้จากแผ่นซิลิกอนเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังล้างด้วย HF : H₂O ในอัตราส่วน 1 : 10 ซึ่งจะเห็นว่าขนาดสัญญาณ ไอเจของออกซิเจนลดลงอย่างชัดเจนจากก่อนล้าง สัญญาณ ไอเจของซิลิกอนก็มีขนาดที่สูงขึ้นจากก่อนล้าง รวมทั้งขนาดสัญญาณ ไอเจของคาร์บอนที่มีขนาดใหญ่ขึ้นจากก่อนล้าง



รูปที่ 4.42 สเปกตรัมที่วัดได้จากแผ่นซิลิกอนเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังล้างกำจัดชั้นออกไซด์ด้วยอัตราส่วน 1:10

รูปที่ 4.43 เป็นสเปกตรัมสัญญาณ ไอเจของออกซิเจนเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังล้างด้วย HF : H₂O อัตราส่วน 1 : 10 ซึ่งจะเห็นว่าขนาดสัญญาณ ไอเจของออกซิเจนมีค่าลดลงจากก่อนล้างอย่างชัดเจน



รูปที่ 4.43 สเปกตรัมสัญญาณไอเจของออกซิเจนเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังล้างกำจัดชั้นออกไซด์ด้วยอัตราส่วน 1:10

สัญญาณ ไอเจของออกซิเจนก่อนและหลังล้างด้วยอัตราส่วนต่างๆ พร้อมกับสัญญาณ ไอเจของซิลิกอนและคาร์บอนจัดไว้ในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ข้อมูลขนาดความสูงของสัญญาณไอเจของคาร์บอน ซิลิกอนและออกซิเจนเมื่อล้างด้วย HF:H₂O ในอัตราส่วนต่างๆ

| อัตราส่วนของ HF:H ₂ O | คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของ HF | ขนาดของสัญญาณ ไอเจ (a.u.) | | |
|----------------------------------|--------------------------|---------------------------|---------|---------|
| | | ออกซิเจน | ซิลิกอน | คาร์บอน |
| 0 | 0 | 16.13 | 122.17 | 3.97 |
| 1:50 | 1.96 | 2.75 | 128.24 | 22.21 |
| 1:30 | 3.23 | 2.24 | 145.97 | 25.81 |
| 1:10 | 9.06 | 1.91 | 150.82 | 24.53 |

เมื่อนำผลการทดลองในขั้นตอนการล้างกำจัดชั้นออกไซด์โดยการเปลี่ยนอัตราส่วนของ HF:H₂O เป็น 1:50 1:30 และ 1:10 มาเปรียบเทียบกัน โดยแต่ละอัตราส่วนคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของ HF ดังตารางที่ 4.8 จะได้ดังรูปที่ 4.44 ซึ่งเป็นขนาดของสัญญาณ ไอเจของออกซิเจนจากสารตัวอย่าง 3 ชิ้น ที่วัดได้จากการล้างกำจัดชั้นออกไซด์ด้วยเปอร์เซ็นต์ของ HF ต่างกัน รูปที่ 4.45 เป็นขนาดของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า เปรียบเทียบเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

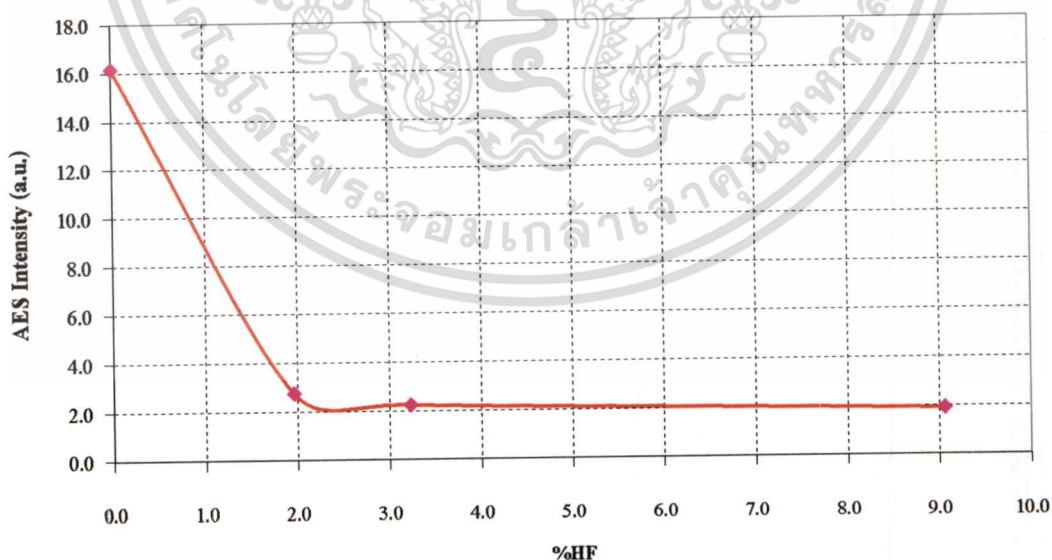
สัญญาณไอเจของออกซิเจนที่เป็นค่าเฉลี่ยจากสารตัวอย่างทั้ง 3 ชั้น เมื่อล้างกำจัดชั้นออกไซด์ด้วยเปอร์เซ็นต์ของ HF ต่างกัน

ความสูงของสัญญาณไอเจของออกซิเจนที่เปอร์เซ็นต์ของ HF ต่างกัน



รูปที่ 4.44 ขนาดของสัญญาณ ไอเจของออกซิเจนเมื่อล้างกำจัดชั้นออกไซด์ด้วยเปอร์เซ็นต์ของ HF ต่างกัน

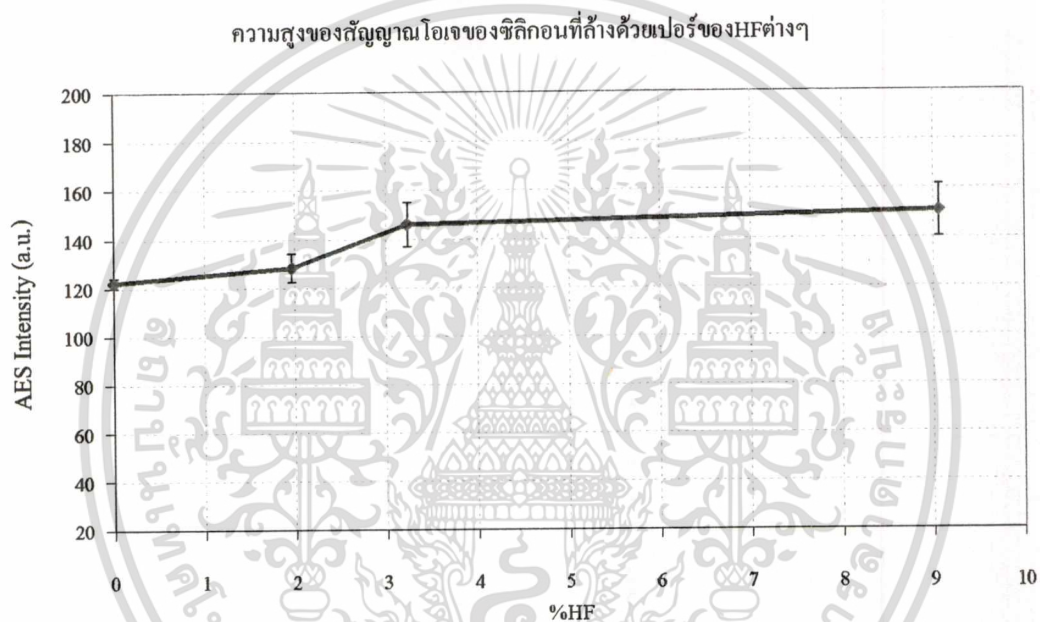
ความสูงของสัญญาณไอเจของออกซิเจนที่เปอร์เซ็นต์ของ HF ต่างๆ



รูปที่ 4.45 ขนาดของสัญญาณ ไอเจของออกซิเจนเฉลี่ยจากสารตัวอย่างทั้ง 3 ชั้นเมื่อล้างกำจัดชั้นออกไซด์ด้วยเปอร์เซ็นต์ของ HF ต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.44 และรูปที่ 4.45 จะเห็นว่าเมื่อล้างกำจัดชั้นออกไซด์ด้วย HF:H₂O อัตราส่วน 1:50 หรือคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของ HF เท่ากับ 1.96 เปอร์เซ็นต์ พบว่าสัญญาณไอเจของออกซิเจนลดลงอย่างรวดเร็วและเมื่อเพิ่มเปอร์เซ็นต์ของ HF มากขึ้นเป็น 3.23 เปอร์เซ็นต์และ 9.06 เปอร์เซ็นต์ยังสามารถทำให้ขนาดสัญญาณไอเจของออกซิเจนลดลงได้อีกจนเหลือเพียง 1.91 (ในการล้างด้วยเปอร์เซ็นต์ของ HF เป็น 9.06 เปอร์เซ็นต์ หรือ HF:H₂O ในอัตราส่วน 1:10) รูปที่ 4.46 เป็นขนาดของสัญญาณไอเจของซิลิกอนเฉลี่ยจากสารตัวอย่างทั้ง 3 ชิ้น เมื่อล้างกำจัดชั้นออกไซด์ด้วยเปอร์เซ็นต์ของ HF ต่างกันซึ่งจะเห็นว่าสัญญาณไอเจของซิลิกอนมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อล้างด้วยเปอร์เซ็นต์ที่สูงขึ้น



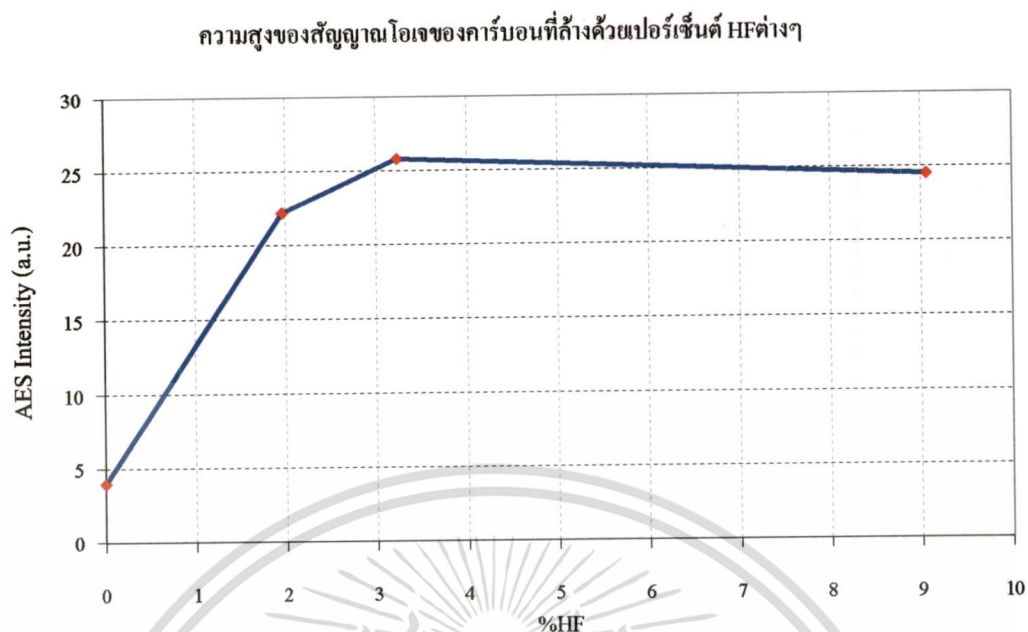
รูปที่ 4.46 ขนาดของสัญญาณไอเจของซิลิกอนเฉลี่ยจากสารตัวอย่างทั้ง 3 ชิ้นเมื่อล้างกำจัดชั้นออกไซด์ด้วยเปอร์เซ็นต์ของ HF ต่างกัน

รูปที่ 4.47 เป็นขนาดของสัญญาณไอเจของคาร์บอนที่เฉลี่ยจากสารตัวอย่างทั้ง 3 ชิ้นเมื่อล้างกำจัดชั้นออกไซด์ด้วยเปอร์เซ็นต์ของกรด HF ต่างกัน จากรูปจะเห็นว่าขนาดสัญญาณไอเจของคาร์บอนมีขนาดสูงขึ้นเมื่อเทียบกับก่อนล้าง

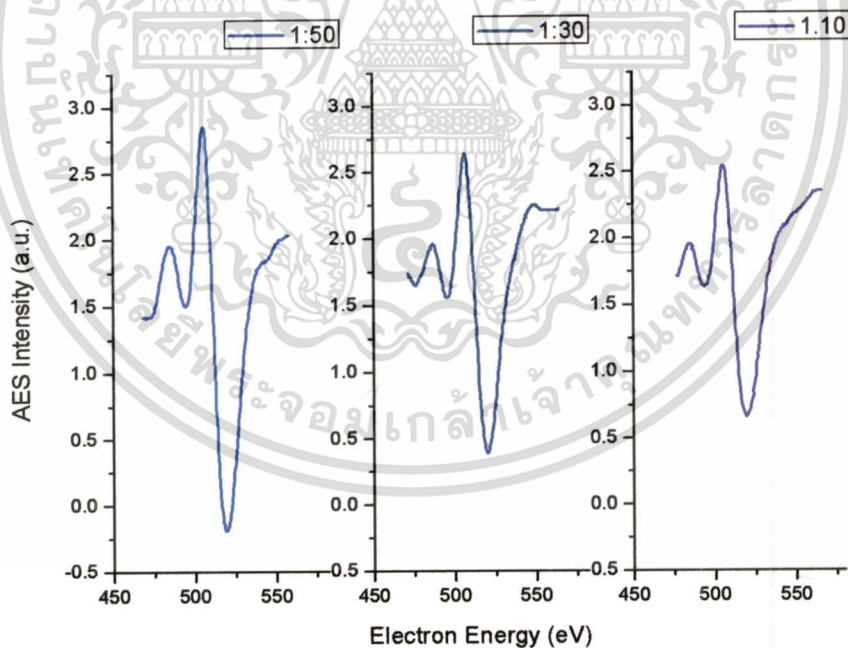
รูปที่ 4.48 เป็นสเปกตรัมสัญญาณไอเจของออกซิเจนเปรียบเทียบระหว่างการล้างกำจัดชั้นออกไซด์ด้วยอัตราส่วน HF : H₂O ต่างกัน จากรูปจะเห็นว่าสเปกตรัมสัญญาณไอเจของออกซิเจนมีขนาดเล็กลงเมื่ออัตราส่วนของ HF : H₂O สูงขึ้น รูปที่ 4.49 เป็นสเปกตรัมสัญญาณไอเจของออกซิเจนเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังล้างกำจัดชั้นออกไซด์ด้วยอัตราส่วน HF : H₂O ต่างกัน เพื่อให้เห็นชัดเจนว่าสัญญาณไอเจของออกซิเจนลดลงอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับก่อนล้าง และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของ HF : H₂O ให้สูงขึ้นก็ยังทำให้สัญญาณไอเจของออกซิเจนลดลงได้อีก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษา เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์ในการนำเอกสารนี้ไปใช้

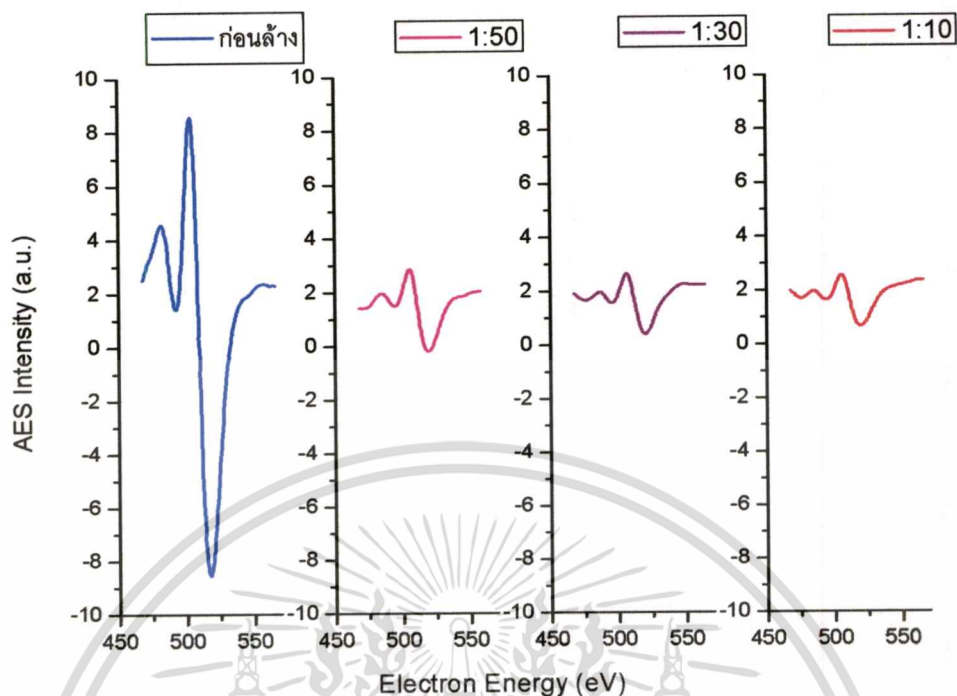
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.47 ขนาดของสัญญาณไอเจของคาร์บอนเฉลี่ยจากสารตัวอย่างทั้ง 3 ชั้นเมื่อล้างกำจัดชั้นออกไซด์ด้วยเปอร์เซ็นต์ของ HF ต่างกัน



รูปที่ 4.48 สเปกตรัมสัญญาณไอเจของออกซิเจนเปรียบเทียบระหว่างการล้างกำจัดชั้นออกไซด์ด้วยอัตราส่วน HF:H₂O ต่างกัน



รูปที่ 4.49 สเปกตรัมสัญญาณไอเจของออกซิเจนเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังล้างกำจัดชั้นออกไซด์ด้วยอัตราส่วน HF:H₂O ต่างกัน

จากผลการทดลองในขั้นตอนการล้างกำจัดชั้นออกไซด์โดยการศึกษาผลของการเปลี่ยนอัตราส่วนของ HF:H₂O เมื่อใช้อัตราส่วนของ HF:H₂O สูงขึ้นหรือเปอร์เซ็นต์ของ HF สูงขึ้นทำให้สามารถล้างกำจัดชั้นออกไซด์ได้มากขึ้น โดยดูผลจากสัญญาณไอเจของออกซิเจนที่วัดได้มีค่าลดลงและลดลงจนเหลือน้อยที่สุดในการล้างด้วย HF:H₂O อัตราส่วน 1:10 และยังทำให้ขนาดสัญญาณไอเจของซิลิกอนสูงขึ้นถึง 150.82 ด้วยอัตราส่วนเดียวกันนี้ แต่กลับพบว่าเมื่อใช้ขั้นตอนการล้างกำจัดชั้นออกไซด์กลับมีผลทำให้ขนาดสัญญาณไอเจของคาร์บอนสูงขึ้น เป็นไปได้ว่าลักษณะของสิ่งปนเปื้อนบนพื้นผิวมีลักษณะเป็นชั้น ในลักษณะที่มีชั้นของออกไซด์บางส่วนอยู่เหนือชั้นของคาร์บอน ทำให้วัดสัญญาณไอเจของคาร์บอนได้ต่ำในตอนแรก เมื่อชั้นออกไซด์ถูกกำจัดออกไปโดยการล้างด้วย HF จึงสามารถวัดสัญญาณไอเจของคาร์บอนได้สูงขึ้น

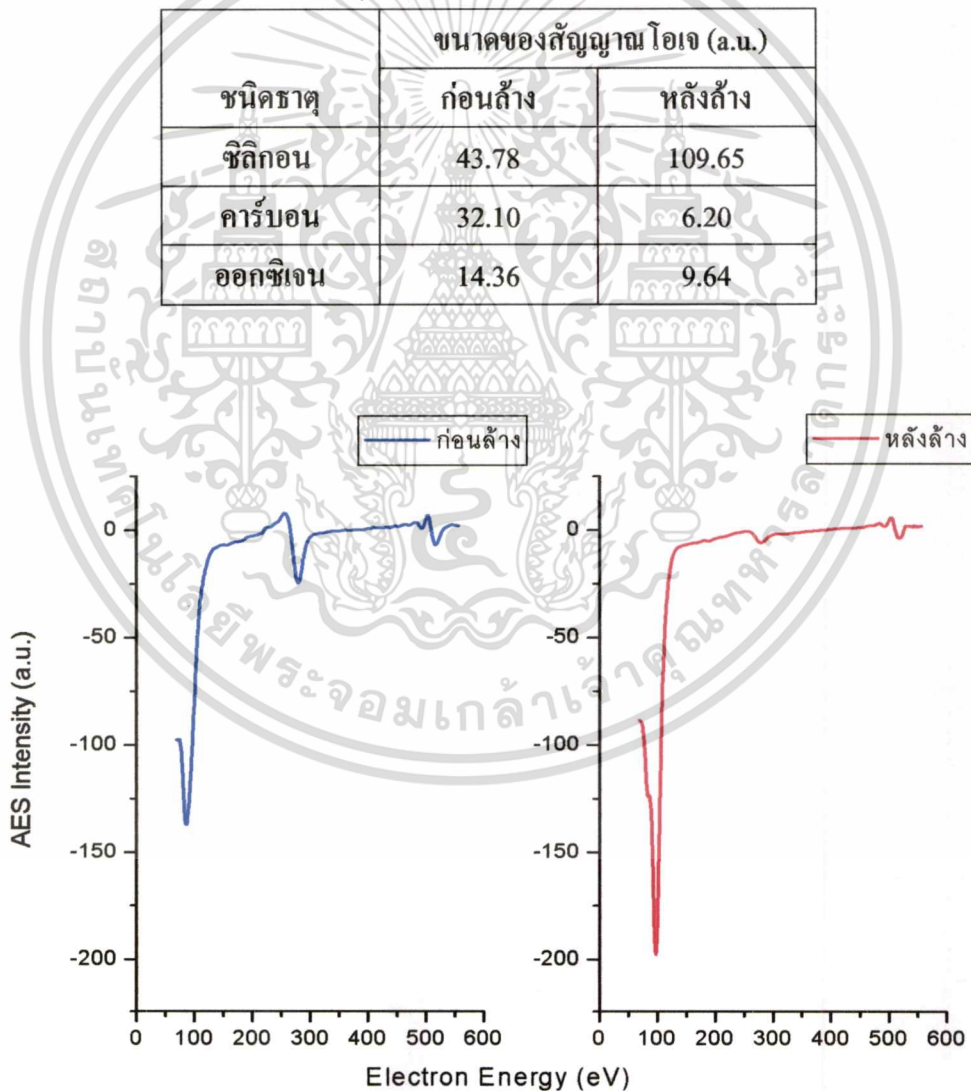
4.2.3 การศึกษาการทำความสะอาดด้วยกระบวนการ RCA

กระบวนการ RCA เป็นกระบวนการทำความสะอาดแผ่นซิลิกอนด้วยสารเคมีที่เป็นวิธีมาตรฐานและใช้กันโดยทั่วไปพัฒนาขึ้นตั้งแต่ปี 1960 ประกอบด้วย ขั้นตอนการล้างคราบไขมัน การล้างชั้นออกไซด์และการล้างอะตอมของโลหะ จุดประสงค์ของการศึกษาการทำความสะอาด

ด้วยกระบวนการนี้เพื่อศึกษาว่าพื้นผิวของแผ่นซิลิกอนมีความสะอาดมากขึ้นเพียงใดหลังจากผ่านเอกซามิเนชันเอ็กซเรฟลูออเรสเซนซ์เพื่อหาปริมาณของสิ่งปนเปื้อนบนพื้นผิว เมื่อผู้ดูแลเห็นประโยชน์ของการใช้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการล้างครบทุกขั้นตอน โดยทำการทดลองด้วยกระบวนการล้างอันประกอบด้วยขั้นตอน SC1 โดยใช้ $\text{NH}_4\text{OH} : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O}$ ในอัตราส่วน 1:1:5 ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที แล้วล้างด้วยน้ำไร้ประจุเป็นเวลา 5 นาที ขั้นตอนการล้างชั้นออกไซด์ ด้วย $\text{HF} : \text{H}_2\text{O}$ ในอัตราส่วน 1:50 เป็นเวลา 15 วินาที ตามด้วยน้ำไร้ประจุเป็นเวลา 30 วินาที และขั้นตอน SC2 โดยใช้ $\text{HCl} : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O}$ ในอัตราส่วน 1:1:5 ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที แล้วล้างด้วยน้ำไร้ประจุเป็นเวลา 5 นาที เป้าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน ได้ผลการวัดขนาดของสัญญาณไอเจของซิลิกอน คาร์บอนและออกซิเจนก่อนและหลังล้างแสดงดังตารางที่ 4.9

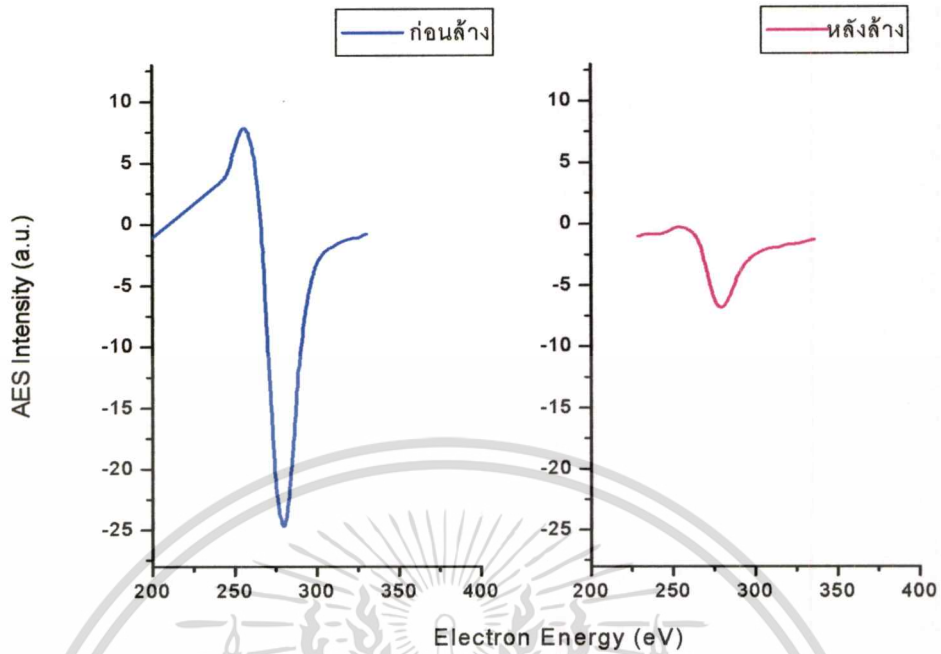
ตารางที่ 4.9 ข้อมูลขนาดความสูงของสัญญาณไอเจของคาร์บอน ซิลิกอนและออกซิเจนเมื่อล้างด้วยกระบวนการ RCA ครบทุกขั้นตอน



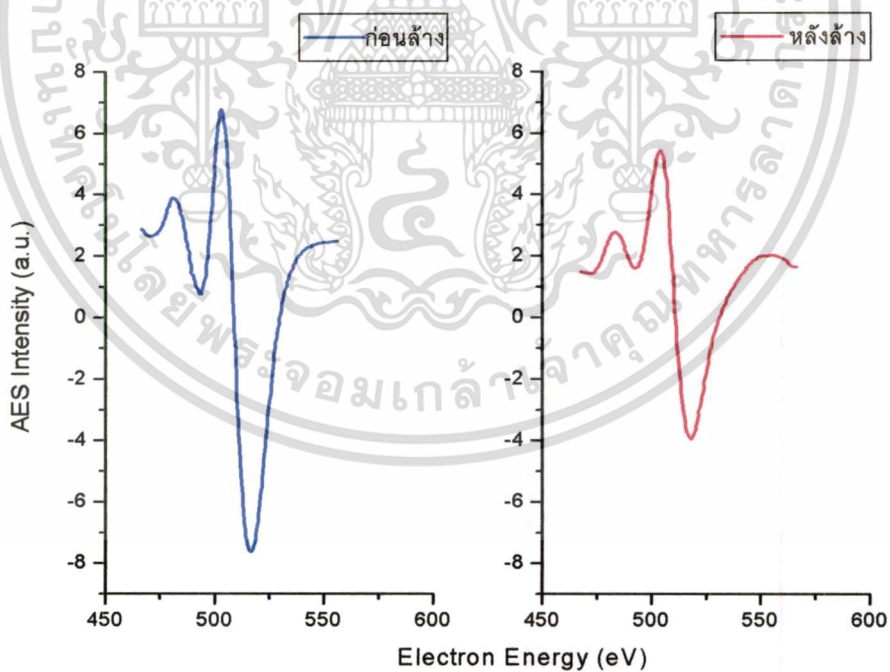
รูปที่ 4.50 สเปกตรัมที่วัดได้จากแผ่นซิลิกอนเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังล้างด้วย

กระบวนการ RCA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.51 สเปกตรัมสัญญาณไอเจของคาร์บอนเปรียบเทียบระหว่างก่อนล้างกับหลังล้างด้วยกระบวนการ RCA



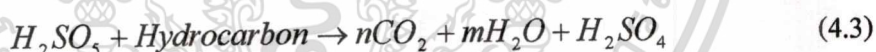
รูปที่ 4.52 สเปกตรัมสัญญาณไอเจของออกซิเจนเปรียบเทียบระหว่างก่อนล้างกับหลังล้างด้วยกระบวนการ RCA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.50 เป็นสเปกตรัมที่วัดได้จากแผ่นซีลิกอนเปรียบเทียบกับระหว่างก่อนและหลังล้างด้วยกระบวนการ RCA จะเห็นว่าขนาดสัญญาณไอของคาร์บอนมีขนาดเล็กลง สัญญาณไอของซีลิกอนมีขนาดใหญ่ขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับก่อนล้าง ส่วนขนาดสัญญาณไอของออกซิเจนมีขนาดเล็กลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับก่อนล้าง เพื่อให้เห็นชัดเจนขึ้นดังรูปที่ 4.51 และรูปที่ 4.52 ซึ่งเป็นสเปกตรัมสัญญาณไอของคาร์บอนและสเปกตรัมสัญญาณไอของออกซิเจนเมื่อเทียบกับก่อนล้างด้วยกระบวนการ RCA ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นสัญญาณไอของคาร์บอนลดลงอย่างชัดเจน ส่วนสัญญาณไอของออกซิเจนก็มีขนาดเล็กลงเมื่อเทียบกับก่อนล้าง

4.2.4 การศึกษาการทำความสะอาดด้วยกระบวนการปีรันยา (piranha)

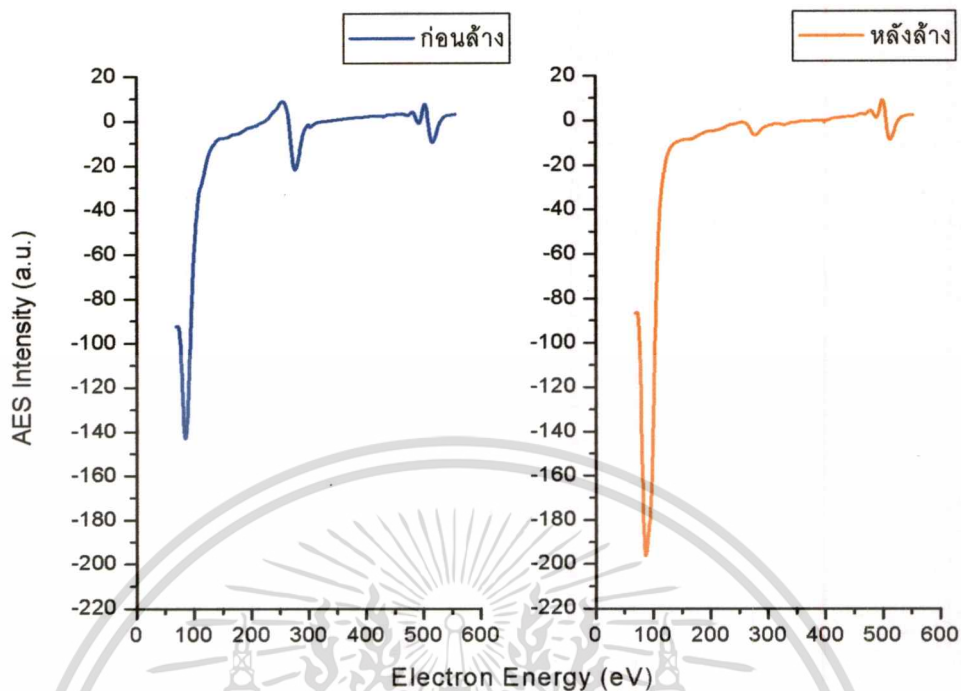
กระบวนการปีรันยา(piranha) เป็นกระบวนการล้างกำจัดฝุ่นและคราบไขมันอีกกระบวนการหนึ่ง โดยการทดลองใช้สารละลาย SPM (Sulfuric acid Hydrogen Peroxide Mixture) ซึ่งประกอบด้วย กรดซัลฟิวริก (sulfuric acid: H_2SO_4) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide : H_2O_2) ด้วยอัตราส่วน $H_2SO_4 : H_2O_2$ เป็น 1:1 ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นล้างด้วยน้ำไร้ประจุเป็นเวลา 5 นาที โดยกลไกการเกิดปฏิกิริยาเคมีของกระบวนการปีรันยาเป็นดังนี้



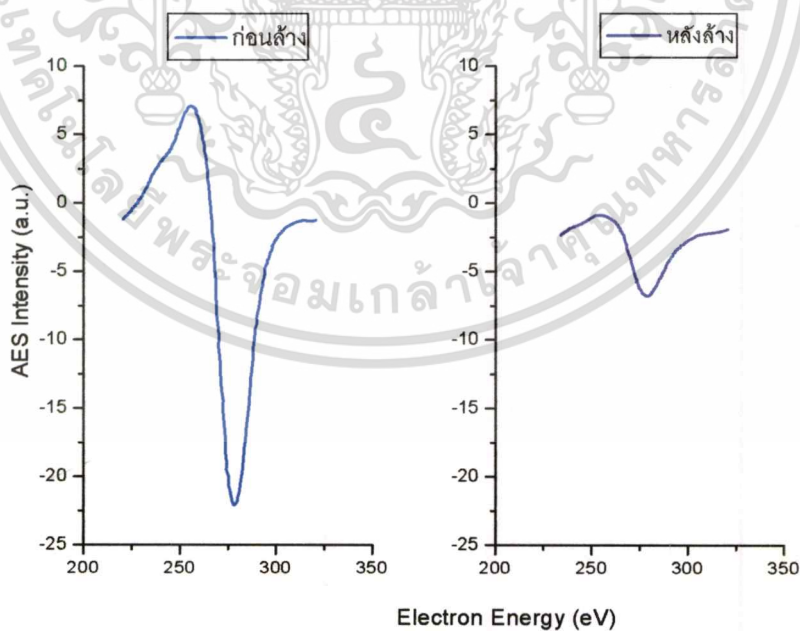
เมื่อทำการทดลองล้างสารตัวอย่างด้วยกระบวนการปีรันยาได้ผลการวัดขนาดสัญญาณไอของซีลิกอน คาร์บอนและออกซิเจนก่อนและหลังล้างดังแสดงในตารางที่ตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ข้อมูลขนาดความสูงของสัญญาณไอของคาร์บอน ซีลิกอนและออกซิเจนเมื่อล้างด้วยกระบวนการปีรันยา

| ชนิดธาตุ | ขนาดของสัญญาณ ไอเอ (a.u.) | |
|----------|---------------------------|----------|
| | ก่อนล้าง | หลังล้าง |
| ซีลิกอน | 43.78 | 103.08 |
| คาร์บอน | 32.10 | 6.41 |
| ออกซิเจน | 14.36 | 14.55 |

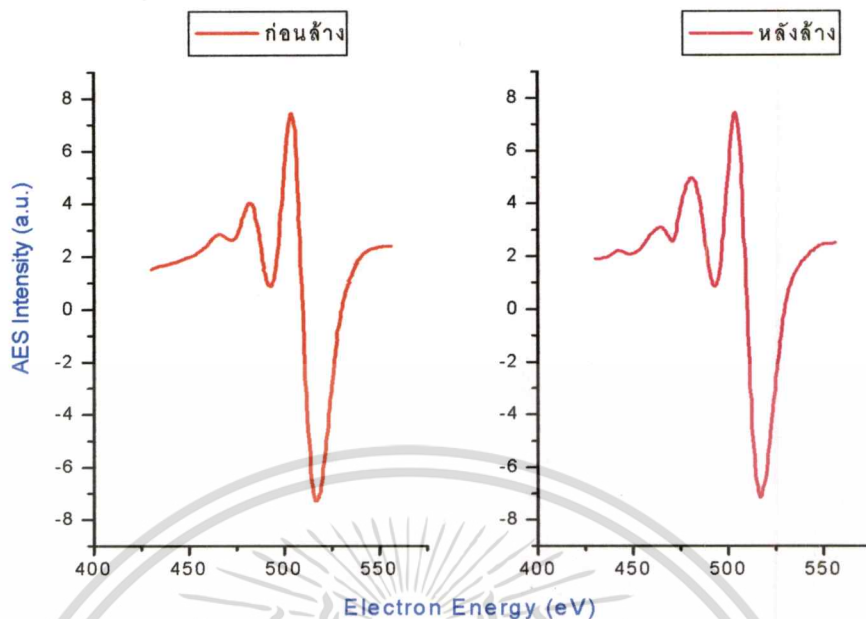


รูปที่ 4.53 สเปกตรัมที่วัดได้จากแผ่นซิลิกอนเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังล้างด้วย
กระบวนการปรีนยา



รูปที่ 4.54 สเปกตรัมสัญญาณไอของคาร์บอนเปรียบเทียบระหว่างก่อนล้างกับหลังล้างด้วย
กระบวนการปรีนยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.55 สเปกตรัมสัญญาณ ไอเจของออกซิเจนเปรียบเทียบระหว่างก่อนล้างกับหลังล้างด้วยกระบวนการปรีนยา

จากรูปที่ 4.53 เป็นสเปกตรัมที่วัดได้จากแผ่นซิลิกอนเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังล้างด้วยกระบวนการปรีนยาจะเห็นว่าขนาดสัญญาณ ไอเจของคาร์บอนมีขนาดเล็กลง สัญญาณ ไอเจของซิลิกอนมีขนาดใหญ่ขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับก่อนล้าง ส่วนขนาดสัญญาณ ไอเจของออกซิเจนมีขนาดไม่เปลี่ยนแปลงจากก่อนล้าง เพื่อให้เห็นชัดเจนขึ้นดังรูปที่ 4.54 และรูปที่ 4.55 ซึ่งเป็นสเปกตรัมสัญญาณ ไอเจของคาร์บอนและสเปกตรัมสัญญาณ ไอเจของออกซิเจนเมื่อเทียบกับก่อนล้างด้วยกระบวนการปรีนยาตามลำดับ ซึ่งจะเห็นสัญญาณ ไอเจของคาร์บอนลดลงอย่างชัดเจน ส่วนสัญญาณ ไอเจของออกซิเจนยังคงมีขนาดไม่ต่างจากก่อนล้าง จากผลการล้างด้วยกระบวนการปรีนยา จะเห็นว่ากระบวนการนี้สามารถล้างกำจัดคาร์บอนให้ลดลงได้ เนื่องจากสัญญาณ ไอเจของคาร์บอนที่วัดได้จากสารตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการล้างมีขนาดเล็กลงในขณะเดียวกันสัญญาณ ไอเจของซิลิกอนก็มีขนาดใหญ่ขึ้น แต่กระบวนการนี้ไม่สามารถทำให้สิ่งปนเปื้อนที่มีธาตุออกซิเจนเป็นองค์ประกอบลดลงได้เนื่องจากสัญญาณ ไอเจของออกซิเจนยังคงมีค่าใกล้เคียงกับค่าขนาดสัญญาณ จากสารตัวอย่างที่ยังไม่ได้ล้างทำความสะอาด

จากผลการทดลองในขั้นตอนการล้างกำจัดคราบไขมันเพื่อศึกษาผลของเวลาและอัตราส่วนของสารเคมีที่จะทำให้ทราบว่าอัตราส่วนของสารเคมีที่ใช้สามารถล้างกำจัดคาร์บอนได้ใกล้เคียงกัน เนื่องจากสัญญาณ ไอเจของคาร์บอนที่วัดได้จากการล้างโดยใช้สารเคมีในทั้ง 3 อัตราส่วนมีค่าใกล้เคียงกัน และมีค่าคงที่ที่เวลา 10 นาที และผลการทดลองในขั้นตอนการล้างกำจัดชั้นออกไซด์ โดยการศึกษาผลของการเปลี่ยนอัตราส่วนของ $\text{HF}:\text{H}_2\text{O}$ เมื่อใช้อัตราส่วนของ $\text{HF}:\text{H}_2\text{O}$ สูงขึ้นหรือ

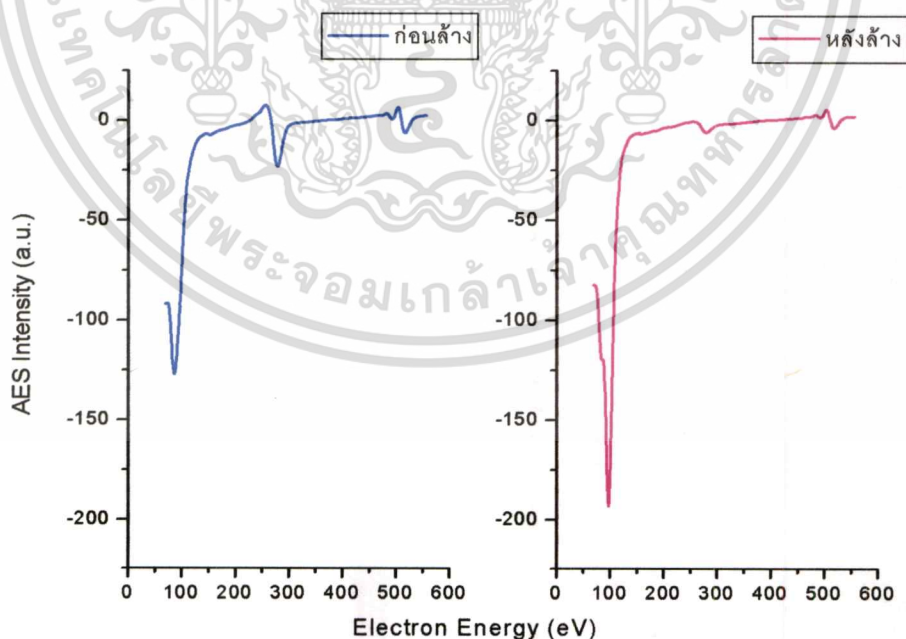
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้ซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปอร์เซ็นต์ของ HF สูงขึ้นทำให้สามารถล้างกำจัดชั้นออกไซด์ได้มากขึ้น โดยดูผลจากสัญญาณไอเจของออกซิเจนที่วัดได้มีค่าลดลงและลดลงจนเหลือน้อยที่สุดในการล้างด้วย HF:H₂O อัตราส่วน 1:10 เมื่อได้เงื่อนไขเหล่านี้ซึ่งคาดว่าเป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการล้างทำความสะอาดสารตัวอย่างที่เป็นแผ่นซิลิกอน ขั้นตอนต่อไปจะทำการศึกษาผลของการล้างทำความสะอาดด้วยเงื่อนไขเหล่านี้

4.2.5 การศึกษาการทำความสะอาดด้วยเงื่อนไขที่เหมาะสม

ในขั้นตอนนี้ได้นำเงื่อนไขในการล้างทำความสะอาดแผ่นซิลิกอนจากผลการทดลองที่ผ่านมาซึ่งคาดว่าจะเป็เงื่อนไขที่ดีที่สุดและเหมาะสมที่สุดในการล้างแผ่นซิลิกอน โดยการปรับเปลี่ยนจากกระบวนการ RCA มาตรฐานในขั้นตอนการล้างกำจัดคราบไขมัน โดยใช้เวลาในการล้างเป็น 10 นาที แต่ใช้อัตราส่วนสารเคมีเท่าเดิมคือ NH₄OH : H₂O₂ : H₂O เป็น 1:1:5 ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ส่วนขั้นตอนการล้างกำจัดชั้นออกไซด์ใช้อัตราส่วนของ HF:H₂O เป็น 1:10 แทน 1:50 และในขั้นตอนการล้างกำจัดอะตอมของโลหะยังคงมีอยู่ตามขั้นตอนปกติ เมื่อทำการทดลองล้างสารตัวอย่างตามเงื่อนไขเหล่านี้ครบทุกขั้นตอน ได้ผลการวัดขนาดสัญญาณไอเจของซิลิกอนคาร์บอนและออกซิเจนก่อนและหลังล้างดังแสดงในตารางที่ตารางที่ 4.11

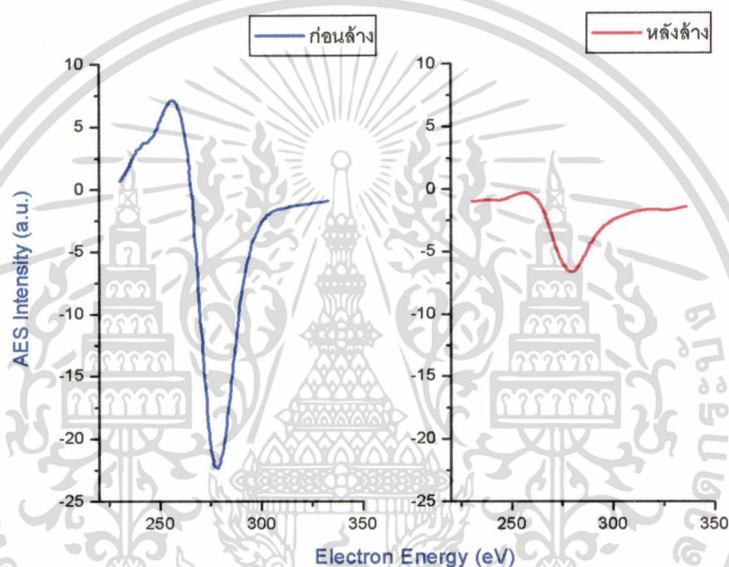


รูปที่ 4.56 สเปกตรัมที่วัดได้จากแผ่นซิลิกอนเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังล้างด้วยเงื่อนไขที่เหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

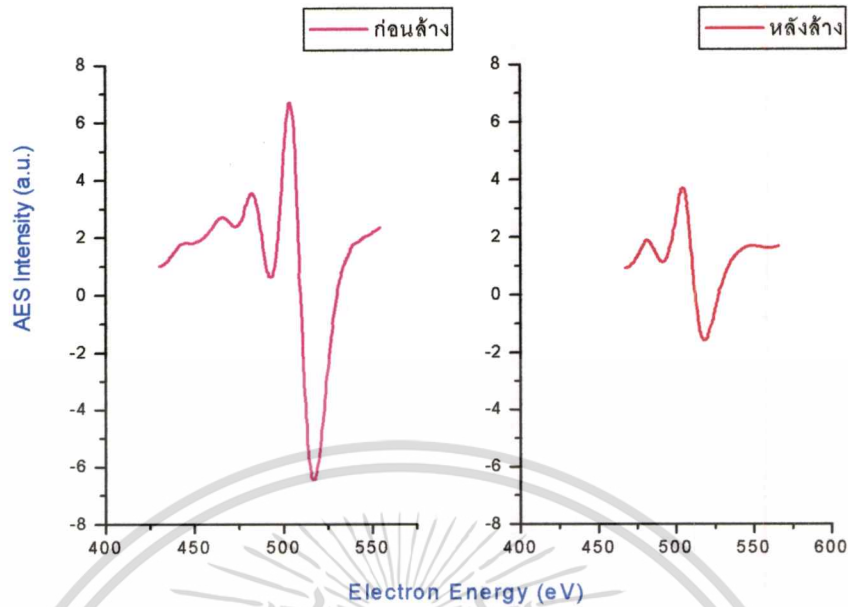
ตารางที่ 4.11 ข้อมูลขนาดความสูงของสัญญาณ ไอเจของคาร์บอน ซิลิกอนและออกซิเจนเมื่อล้างด้วยเจ็อนไ้ที่เหมาะสม

| ชนิดธาตุ | ขนาดของสัญญาณ ไอเจ (a.u.) | |
|----------|---------------------------|----------|
| | ก่อนล้าง | หลังล้าง |
| ซิลิกอน | 43.78 | 112.51 |
| คาร์บอน | 32.10 | 5.88 |
| ออกซิเจน | 14.36 | 6.78 |



รูปที่ 4.57 สเปกตรัมสัญญาณ ไอเจของคาร์บอนเปรียบเทียบระหว่างก่อนล้างกับหลังล้างด้วยเจ็อนไ้ที่เหมาะสม

จากรูปที่ 4.56 เป็นสเปกตรัมที่วัดได้จากแผ่นซิลิกอนเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังล้างด้วยเจ็อนไ้ที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งจะเห็นว่าขนาดสัญญาณ ไอเจของคาร์บอนมีขนาดเล็กลง สัญญาณไอเจของซิลิกอนมีขนาดใหญ่ขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับก่อนล้าง ส่วนขนาดสัญญาณ ไอเจของออกซิเจนนั้นก็มีความเล็กลงแต่ไม่ชัดเจนนักเพื่อให้เห็นชัดเจนขึ้นดังรูปที่ 4.57 และรูปที่ 4.58 ซึ่งเป็นสเปกตรัมสัญญาณ ไอเจของคาร์บอนและสเปกตรัมสัญญาณ ไอเจของออกซิเจนเมื่อเทียบกับก่อนล้างตามลำดับ จะเห็นว่าสัญญาณไอเจของคาร์บอนลดลงอย่างชัดเจนและขนาดสัญญาณ ไอเจของออกซิเจนก็มีความเล็กลงอย่างชัดเจนเช่นกัน



รูปที่ 4.58 สเปกตรัมสัญญาณ ไอเจของออกซิเจนเปรียบเทียบระหว่างก่อนล้างกับหลังล้างด้วย
เงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุด

จากผลการทดลองในขั้นตอนนี้จะเห็นว่าสามารถล้างกำจัดคาร์บอนและล้างกำจัดชั้นออกไซด์ได้ดีกว่ากระบวนการ RCA ที่ใช้โดยทั่วไป เนื่องจากผลการวัดสัญญาณ ไอเจของซิลิกอนจากเงื่อนไขที่เหมาะสมได้ขนาดสัญญาณ ไอเจของซิลิกอนที่มีขนาดใหญ่กว่า และสัญญาณ ไอเจของคาร์บอนและออกซิเจนก็มีขนาดสัญญาณที่เล็กกว่าผลจากการล้างด้วยกระบวนการ RCA ทั่วไป เปรียบเทียบค่าขนาดสัญญาณให้เห็นดังตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 ข้อมูลขนาดความสูงของสัญญาณ ไอเจของคาร์บอน ซิลิกอนและออกซิเจน
เปรียบเทียบระหว่างการล้างด้วยกระบวนการRCAและเงื่อนไขที่เหมาะสม

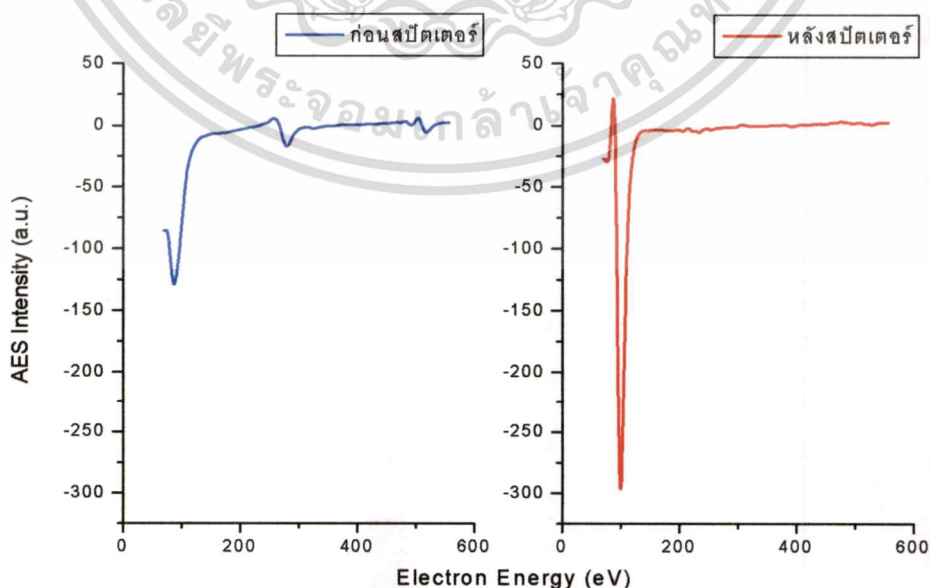
| ชนิดธาตุ | ขนาดของสัญญาณ ไอเจ (a.u.) | | |
|----------|---------------------------|-------------------------------|------------------------------------|
| | ก่อนล้าง | หลังล้างด้วย กระบวนการ RCA | หลังล้างด้วยเงื่อนไข ที่เหมาะสม |
| ซิลิกอน | 43.78 | 109.65 | 112.51 |
| คาร์บอน | 32.10 | 6.20 | 5.88 |
| ออกซิเจน | 14.36 | 9.64 | 6.78 |

4.3 การศึกษาความสะอาดของพื้นผิวซิลิกอนหลังผ่านกระบวนการสปีดเตอร์

การสปีดเตอร์เป็นกระบวนการที่อะตอมผิวหน้าของสารตัวอย่างถูกทำให้หลุดออกมาด้วยการชนของอนุภาคพลังงานสูงโดยมีการแลกเปลี่ยนพลังงาน และโมเมนตัมระหว่างอนุภาคที่วิ่งเข้าชนกับอะตอมที่ผิววัสดุ ในงานวิจัยใช้ลำไอออนของก๊าซอาร์กอน ที่มีพลังงานสูงถึง 2 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ การทดลองเริ่มจากสปีดเตอร์ทำความสะอาดพื้นผิวของสารตัวอย่างที่มุม 45 องศา(จากเส้นตั้งฉากพื้นผิว) ทั้ง 2 ด้าน ทั้งซ้ายและขวา ด้านละ 15 นาทีรวมเวลาในการสปีดเตอร์ในแต่ละครั้งเป็น 30 นาที พบว่าสัญญาณไอเจของซิลิกอนสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในเวลา 30 นาทีแรก และสัญญาณไอเจของคาร์บอนและออกซิเจนก็มีขนาดเล็กลง หลังจากนั้นได้เพิ่มเวลาในการสปีดเตอร์ขึ้นอีก ครั้งละ 30 นาทีจนสัญญาณไอเจของซิลิกอนเริ่มคงที่ ใช้เวลาในการสปีดเตอร์รวมทั้งหมด 150 นาที ซึ่งได้ผลการวัดดังตารางที่ 4.13

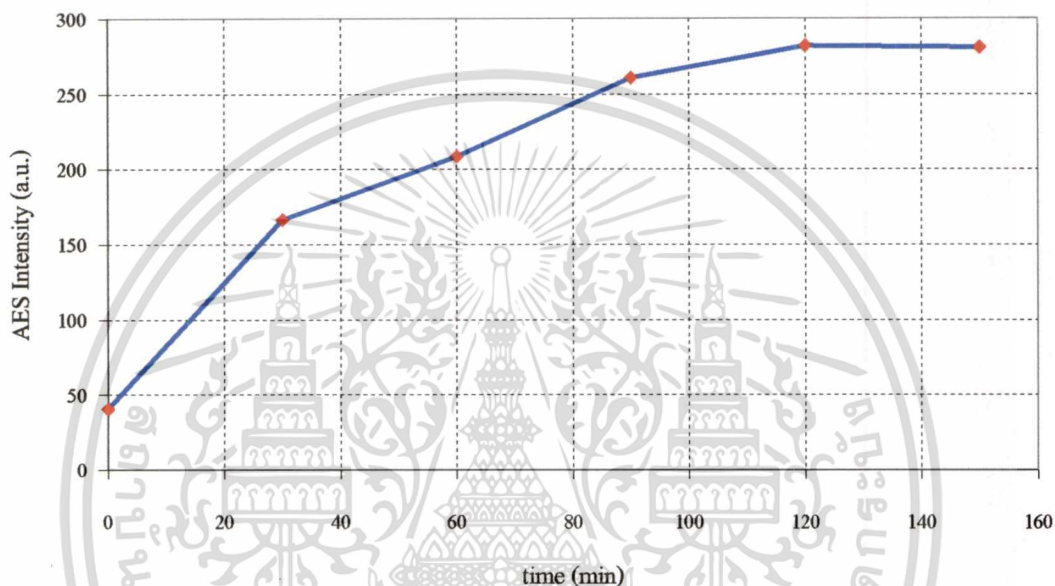
ตารางที่ 4.13 ข้อมูลขนาดสัญญาณ ไอเจของซิลิกอน คาร์บอนและออกซิเจนเมื่อสปีดเตอร์ที่เวลาต่างๆ

| ขนาดสัญญาณ ไอเจ (a.u.) | เวลาในการสปีดเตอร์(นาที) | | | | | |
|---------------------------|--------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 0 | 30 | 60 | 90 | 120 | 150 |
| ซิลิกอน | 40.53 | 166.41 | 208.38 | 260.83 | 281.88 | 280.78 |
| คาร์บอน | 22.97 | 0.98 | 0.96 | 0.66 | 0.87 | 0.83 |
| ออกซิเจน | 10.68 | 3.71 | 2.97 | 1.91 | 2.09 | 1.89 |

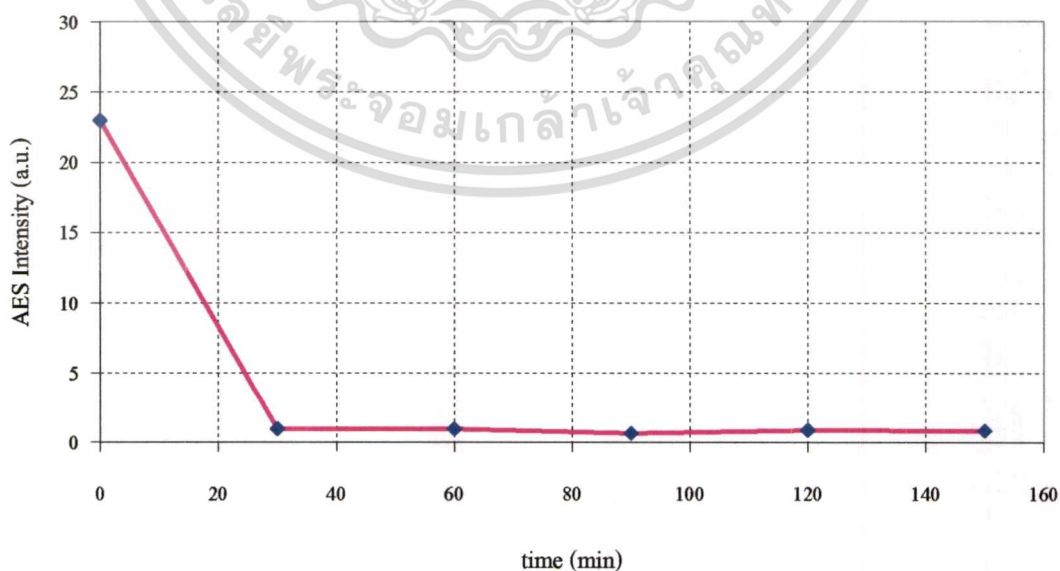


เอกสารนี้เป็นเอกสารรูปที่ 4.59 สเปกตรัมสัญญาณไอเจที่วัดได้จากแผ่นซิลิกอนก่อนและหลังสปีดเตอร์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.59 เป็นสเปกตรัมสัญญาณ ไอเจทีวัดได้จากแผ่นซิลิกอนก่อนและหลังสปีดเตอร์ จากรูปจะเห็นสัญญาณ ไอเจของซิลิกอนมีขนาดสูงขึ้นอย่างชัดเจนและจากรูปที่ 4.60 จะเห็นว่าสัญญาณ ไอเจของซิลิกอนมีขนาดสูงขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อสปีดเตอร์เป็นเวลา 30 นาที และมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อเพิ่มเวลาในการสปีดเตอร์ขึ้นจนขนาดสัญญาณเริ่มคงที่ที่เวลาของการสปีดเตอร์เป็น 150 นาที รูปที่ 4.61 เป็นขนาดของสัญญาณ ไอเจของคาร์บอนเมื่อสปีดเตอร์เป็นเวลาต่างๆ และรูปที่ 4.62 เป็นขนาดของสัญญาณ ไอเจของออกซิเจนเมื่อสปีดเตอร์เป็นเวลาต่างๆ



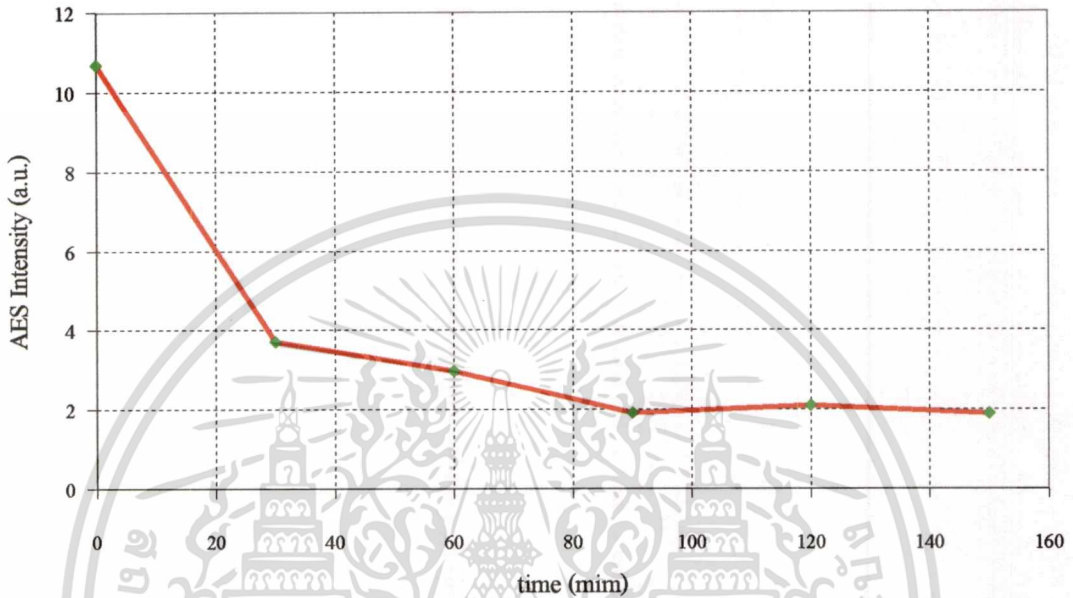
รูปที่ 4.60 ขนาดของสัญญาณ ไอเจของซิลิกอนเมื่อสปีดเตอร์เป็นเวลาต่างๆ



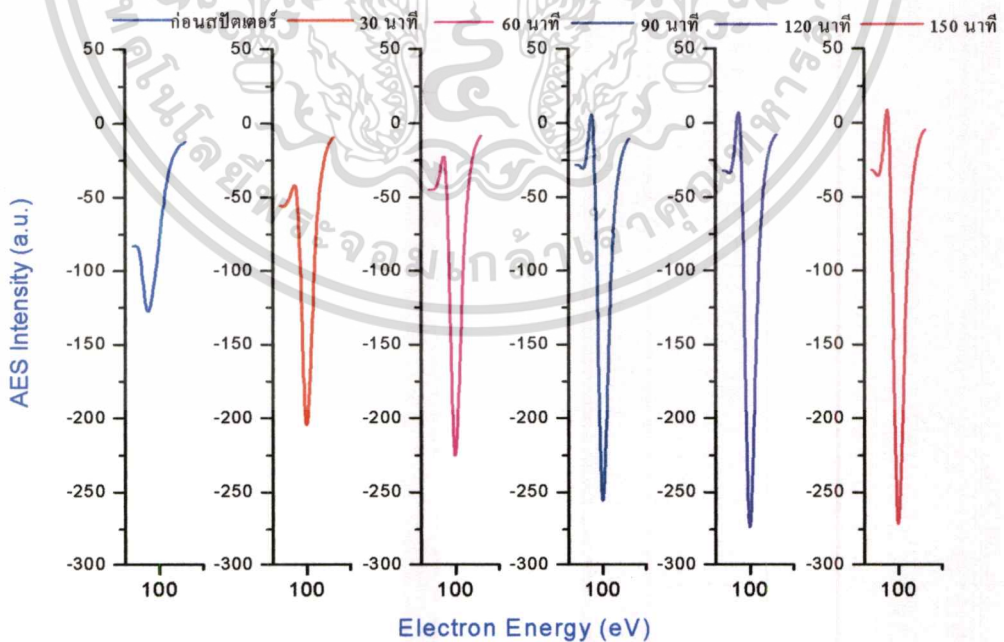
รูปที่ 4.61 ขนาดของสัญญาณ ไอเจของคาร์บอนเมื่อสปีดเตอร์เป็นเวลาต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.61 จะเห็นว่าสัญญาณไอเจของคาร์บอนลดลงอย่างรวดเร็วในเวลา 30 นาทีแรกจากนั้นขนาดสัญญาณมีค่าคงที่ จากรูปที่ 4.62 จะเห็นว่าสัญญาณไอเจของออกซิเจนลดลงอย่างรวดเร็วในเวลา 30 นาทีแรกจากนั้นขนาดสัญญาณมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องและคงที่เมื่อใช้เวลาในการสปีดเตอร์รวม 150 นาที



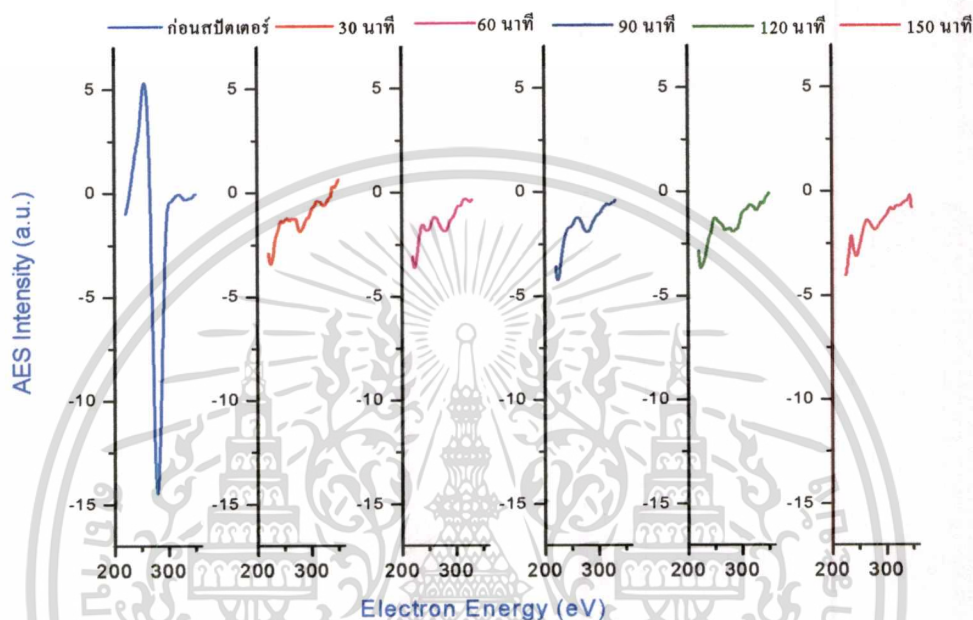
รูปที่ 4.62 ขนาดของสัญญาณ ไอเจของออกซิเจนเมื่อสปีดเตอร์เป็นเวลาต่างๆ



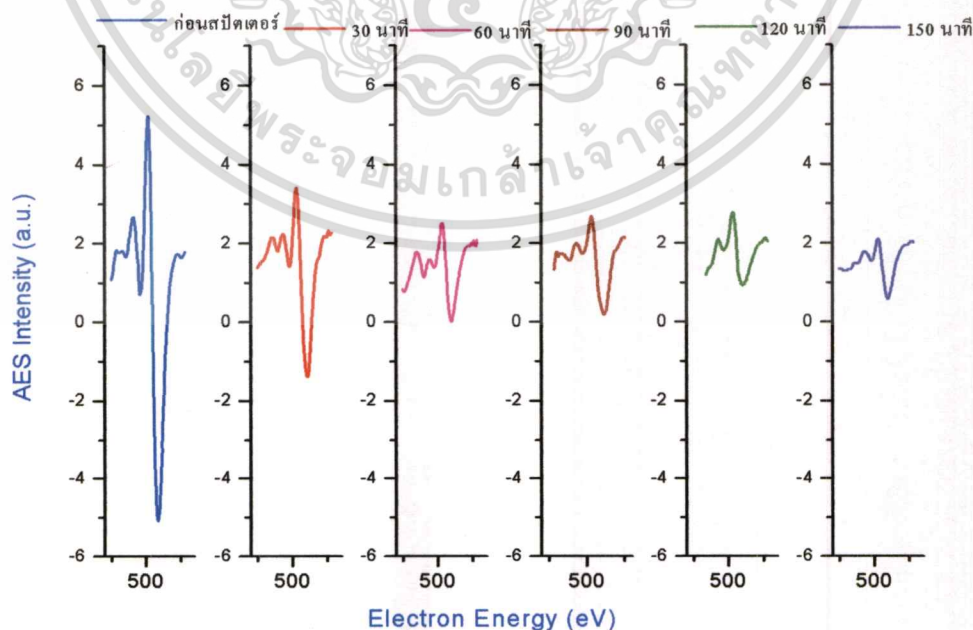
รูปที่ 4.63 สเปกตรัมสัญญาณ ไอเจของซิลิกอนเมื่อสปีดเตอร์เป็นเวลาต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.63 เป็นสเปกตรัมสัญญาณ ไอเจของซิลิกอนเมื่อสปีดเตอร์เป็นเวลาต่างๆ จากรูปจะเห็นว่าสัญญาณ ไอเจของซิลิกอนมีขนาดใหญ่ขึ้นมากเมื่อสปีดเตอร์เป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นขนาดสัญญาณเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและคงที่เมื่อสปีดเตอร์รวม 150 นาที รูปที่ 4.64 และรูปที่ 4.65 เป็นสัญญาณ ไอเจของคาร์บอนและออกซิเจนตามลำดับซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนว่าขนาดสัญญาณ ไอเจของคาร์บอนและออกซิเจนลดลงจนเหลือน้อยมากเมื่อเทียบกับก่อนสปีดเตอร์



รูปที่ 4.64 สเปกตรัมสัญญาณ ไอเจของคาร์บอนเมื่อสปีดเตอร์เป็นเวลาต่างๆ



รูปที่ 4.65 สเปกตรัมสัญญาณ ไอเจของออกซิเจนเมื่อสปีดเตอร์เป็นเวลาต่างๆ

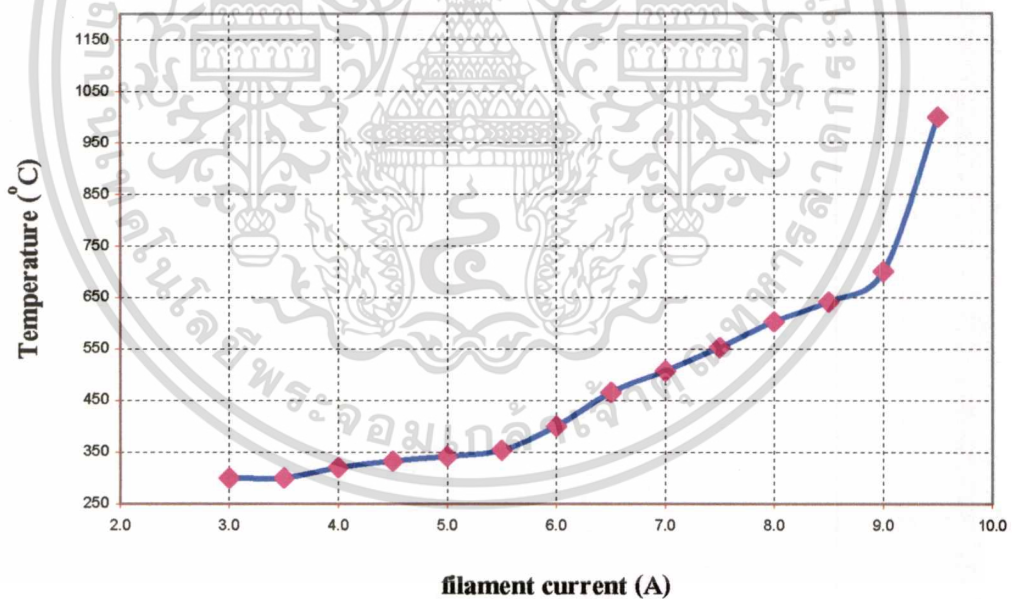
เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนสำหรับใช้เฉพาะภายในห้องปฏิบัติการเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์ที่จะนำเอกสารนี้ไปใช้ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การศึกษาโครงผลึกของพื้นผิวด้วยเทคนิค LEED

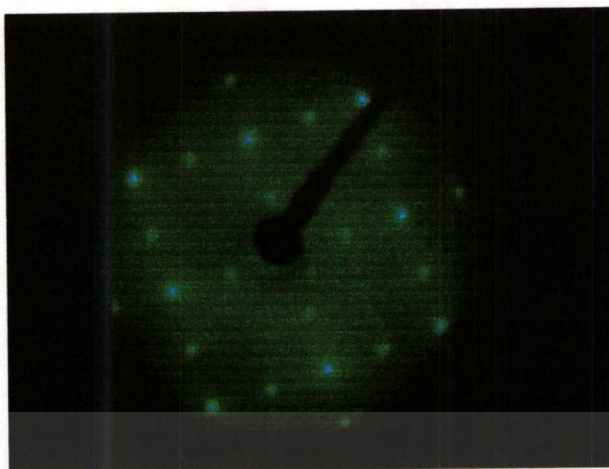
ก่อนทำการศึกษาโครงผลึกของพื้นผิวจะต้องทำการอบ (annealing) สารตัวอย่าง ด้วยวิธีการดังนี้

- 4.4.1 ปรับค่ากระแสให้กับเส้นลวดความร้อน(สำหรับการอบสารตัวอย่าง) ที่ 3.0 แอมป์ พร้อมกับการป้อนศักย์ไฟฟ้ากระแสตรงที่เป็นบวกเมื่อเทียบกับเส้นลวดความร้อน ให้สารตัวอย่างขนาด 230 โวลต์
- 4.4.2 ปรับค่ากระแสของเส้นลวดความร้อนที่ละ 0.5 แอมป์ อย่างช้าๆ (ความดันในแชมเบอร์สูญญากาศหลักซึ่งจะต้องเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก)
- 4.4.3 วัดอุณหภูมิของสารตัวอย่างด้วยกล้องวัดอุณหภูมิด้วยแสงอินฟราเรด
- 4.4.4 เมื่อเพิ่มกระแสของเส้นลวดความร้อนเป็น 9.0 – 9.5 แอมป์ อุณหภูมิสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ถึง 1000°C ทิ้งไว้ประมาณ 2 นาที จึงลดกระแสที่ป้อนลง

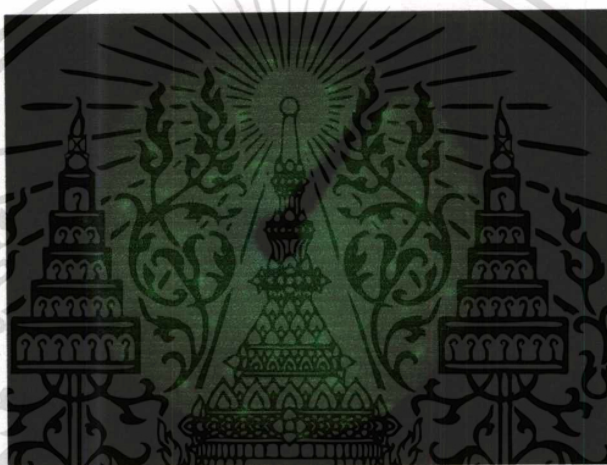
ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและอุณหภูมิของสารตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 4.66



รูปที่ 4.66 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสของเส้นลวดความร้อนและอุณหภูมิของสารตัวอย่าง



60 eV



100 eV

รูปที่ 4.67 LEED pattern Si(100)

LEED pattern ของพื้นผิวซิลิกอนที่ระนาบ (100) เมื่อทำการวัดที่พลังงานอิเล็กตรอน 60 และ 100 อิเล็กตรอนโวลต์ แสดงให้เห็นโครงสร้างผลึกที่ชัดเจน แสดงว่าการทำความสะอาดโดยการสปีดเตอร์นี้ สามารถกำจัดสารปนเปื้อนออกจากพื้นผิวได้อย่างน่าพอใจ โครงสร้างผลึกของพื้นผิวที่วัดได้แสดงโครงสร้าง (2 x 2) เกิดจากการผสมระหว่างโครงสร้าง (1 x 2) และ (2 x 1) reconstruction ของพื้นผิวซิลิกอน

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

บทนี้เป็นสรุปผลการศึกษาความสะอาดของพื้นผิวซิลิกอนโดยอาศัยเทคนิคโอเจอิเล็กทรอนิกส์เปล่งโทรสโกปี พร้อมทั้งข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษาและตรวจสอบความสะอาดพื้นผิวของแผ่นซิลิกอน (silicon wafer) ด้วยเทคนิคโอเจอิเล็กทรอนิกส์เปล่งโทรสโกปี โดยพิจารณาทั้งก่อนและหลังผ่านกระบวนการทำความสะอาดด้วย 2 วิธีการ ได้แก่ วิธีการทางเคมีและวิธีการสปีดเตอร์ด้วยลำไอออนพลังงานสูง เพื่อกำจัดคราบไขมันและชั้นออกไซด์ ความสะอาดของพื้นผิวจะถูกวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโอเจอิเล็กทรอนิกส์เปล่งโทรสโกปี โดยใช้ตัวบ่งชี้ถึงความสะอาดคือ ขนาดสัญญาณโอเจของซิลิกอน(พลังงาน 92 อิเล็กตรอนโวลต์) คาร์บอน(พลังงาน 272 อิเล็กตรอนโวลต์) และออกซิเจน(พลังงาน 508 อิเล็กตรอนโวลต์) ซึ่งเมื่อสัญญาณโอเจของซิลิกอนมีขนาดใหญ่ขึ้น ในขณะที่สัญญาณโอเจของคาร์บอนและออกซิเจนมีขนาดเล็กลงจะแสดงว่าพื้นผิวมีความสะอาดมากขึ้น สำหรับกระบวนการทางเคมีใช้วิธีการล้างด้วยกระบวนการ RCA ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนการล้างกำจัดคราบไขมันและขั้นตอนการล้างกำจัดชั้นออกไซด์ซึ่งได้นำทั้ง 2 ขั้นตอนนี้มาศึกษาผลของการเปลี่ยนเงื่อนไขต่างๆจนได้เงื่อนไขที่ดีและเหมาะสมที่สุด สำหรับการสปีดเตอร์ได้ศึกษาความสะอาดตามเวลาในการสปีดเตอร์ด้วยลำไอออนพลังงาน 2 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์

5.1.1 การล้างกำจัดคราบไขมัน

ขั้นตอนการล้างกำจัดคราบไขมันเป็นขั้นตอนหนึ่งในกระบวนการ RCA ซึ่งล้างด้วยสารละลาย $\text{NH}_4\text{OH} : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O}$ อัตราส่วน 1 : 1:5 ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที จากการศึกษาผลของเวลาในการล้างและการเปลี่ยนอัตราส่วนของสารเคมีพบว่า เมื่อเพิ่มหรือลดอัตราส่วนของ $\text{NH}_4\text{OH} : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O}$ เป็น 2:2:5 และ 1:1:10 ให้ผลของการล้างกำจัดคราบไขมันได้ใกล้เคียงกับการล้างด้วยอัตราส่วน 1:1:5 เนื่องจากสัญญาณโอเจของคาร์บอนที่วัดได้หลังผ่านขั้นตอนการล้างแล้วมีค่าใกล้เคียงกันในทั้ง 3 อัตราส่วน ซึ่งสัญญาณโอเจของคาร์บอนลดลงเหลือประมาณ 21.5 % และมีค่าคงที่ที่เวลา 10 นาที สัญญาณโอเจของซิลิกอนมีค่าสูงขึ้นจากก่อนล้างแต่

เอกสารนี้จะสังเกตเห็นว่าสัญญาณโอเจของซิลิกอนที่วัดจากสารตัวอย่างที่ล้างโดยใช้เวลานาน 15 นาที ได้ผลไม่
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่อยแน่นอน อาจเป็นผลเนื่องจากพื้นผิวเกิดความเสียหาย เช่น เกิดความขรุขระหรือมีรูพรุน เมื่อใช้เวลาในการล้างนานเกินไป และในขั้นตอนการล้างกำจัดคราบไขมันนี้ยังสามารถกำจัดอะตอมของธาตุออกซิเจนได้เป็นบางส่วนเนื่องจากสัญญาณ ไอเจของออกซิเจนมีขนาดลดลงเล็กน้อยทุกเงื่อนไขในขั้นตอนการล้างกำจัดคราบไขมันเมื่อเทียบกับก่อนล้าง เป็นไปได้ว่าออกซิเจนที่วัดได้โดยโอเจสเปกโทรมิเตอร์ บางส่วนเป็นออกไซด์ของคาร์บอน เมื่อคาร์บอนถูกกำจัดไปออกซิเจนส่วนนี้จึงถูกกำจัดไปด้วย สำหรับการล้างแผ่นซิลิกอนด้วยกระบวนการปรีนยา ซึ่งเป็นวิธีการล้างกำจัดคราบไขมันอีกวิธีหนึ่งพบว่าวิธีการนี้สามารถใช้ล้างกำจัดคาร์บอนได้ดีเนื่องจากสัญญาณ ไอเจของคาร์บอนที่วัดได้หลังผ่านขั้นตอนการล้างลดลงเหลือประมาณ 20 % แต่กระบวนการนี้ไม่มีผลต่อการล้างสารปนเปื้อนที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบเนื่องจากสัญญาณ ไอเจของออกซิเจนยังคงมีขนาดไม่ต่างจากก่อนล้าง จึงสรุปได้ว่าอัตราส่วนของสารเคมีที่ใช้เมื่อเพิ่มหรือลดอัตราส่วนของ $\text{NH}_4\text{OH} : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O}$ เป็น 2:2:5 และ 1:1:10 ให้ผลในการล้างกำจัดคราบไขมัน ไม่ต่างจากอัตราส่วน 1:1:5 และเวลาที่เหมาะสมในการล้างควรจะเป็น 10 นาที

5.1.2 การล้างกำจัดชั้นออกไซด์

ขั้นตอนการล้างกำจัดชั้นออกไซด์โดยการศึกษาผลของการเปลี่ยนอัตราส่วนของสารละลาย $\text{HF}:\text{H}_2\text{O}$ เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของ $\text{HF}:\text{H}_2\text{O}$ สูงขึ้นหรือเปอร์เซ็นต์ของ HF สูงขึ้น พบว่าทำให้สามารถล้างกำจัดชั้นออกไซด์ได้มากขึ้น เนื่องจากสัญญาณ ไอเจของออกซิเจนที่วัด ได้มีค่าลดลงและลดลงจนเหลือน้อยที่สุดในการล้างด้วย $\text{HF}:\text{H}_2\text{O}$ อัตราส่วน 1 :10 ซึ่งเหลือเพียง 11.84 % เมื่อเทียบกับก่อนล้าง และยังทำให้ขนาดสัญญาณ ไอเจของซิลิกอนสูงขึ้นมากที่สุดด้วยอัตราส่วนนี้เมื่อเทียบกับอัตราส่วน 1:30 และ 1:50 แต่จากผลการทดลองกลับพบว่าเมื่อใช้ขั้นตอนการล้างกำจัดชั้นออกไซด์กลับมีผลทำให้ขนาดสัญญาณ ไอเจของคาร์บอนสูงขึ้น เป็นไปได้ว่าลักษณะของสิ่งปนเปื้อนบนพื้นผิวมีลักษณะเป็นชั้น ในลักษณะที่มีชั้นของออกไซด์บางส่วนอยู่เหนือชั้นของคาร์บอน ทำให้วัดสัญญาณ ไอเจของคาร์บอนได้ต่ำในตอนแรก เมื่อชั้นออกไซด์ถูกกำจัดออกไปโดยการล้างด้วย HF จึงสามารถวัดสัญญาณ ไอเจของคาร์บอนได้สูงขึ้น หากไม่พิจารณาสัญญาณ ไอเจของคาร์บอนเนื่องจากเป็นขั้นตอนการล้างกำจัดชั้นออกไซด์ จึงสรุปได้ว่าอัตราส่วนของสารละลาย $\text{HF}:\text{H}_2\text{O}$ ในการล้างกำจัดชั้นออกไซด์ที่เหมาะสมคือ 1:10

5.1.3 การล้างด้วยกระบวนการ RCA เปรียบเทียบกับเงื่อนไขที่ดีที่สุด

ในงานวิจัยได้ใช้กระบวนการ RCA เป็นกระบวนการ การทำความสะอาดทางเคมีของแผ่นซิลิกอน ซึ่งประกอบด้วย 3 ขั้นตอนได้แก่ขั้นตอนการล้างกำจัดคราบไขมัน การล้างกำจัดชั้นออกไซด์ และการล้างกำจัดอะตอมของโลหะ จากการทดลองเมื่อล้างแผ่นซิลิกอนด้วยกระบวนการ

RCA มาตรฐานพบว่าสามารถกำจัดคาร์บอนและออกซิเจนได้ โดยการวัดขนาดสัญญาณ ไอเจของคาร์บอนและออกซิเจนลดลงเหลือ 19.31% และ 67.13 % ตามลำดับ และเมื่อล้างแผ่นซิลิกอนด้วยกระบวนการ RCA ที่ปรับเปลี่ยนใหม่ตามผลการทดลองที่ผ่านมา โดยในขั้นตอนการล้างคราบไขมันใช้สารละลาย $\text{NH}_4\text{OH} : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O}$ อัตราส่วน 1 : 1:5 ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที ขั้นตอนการล้างกำจัดชั้นออกไซด์ล้างด้วยสารละลาย $\text{HF}:\text{H}_2\text{O}$ อัตราส่วน 1 : 10 ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 15 วินาที ส่วนขั้นตอนอื่นๆยังคงไว้ตามเดิม พบว่าสัญญาณ ไอเจของคาร์บอนและออกซิเจนลดลงเหลือ 18.32 % และ 47.22 % ตามลำดับ ซึ่งให้ผลการล้างที่ดีกว่าการล้างด้วยกระบวนการ RCA ตามปกติ

5.1.4 การทำความสะอาดด้วยกระบวนการสปัตเตอร์

การสปัตเตอร์ทำความสะอาดพื้นผิวของสารตัวอย่างที่มุม 45 องศา(จากเส้นตั้งฉากพื้นผิว) ทั้ง 2 ด้าน ทั้งซ้ายและขวา ด้านละ 15 นาทีรวมเวลาในการสปัตเตอร์เป็นครั้งละ 30 นาที พบว่าสัญญาณ ไอเจของซิลิกอนสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในเวลา 30 นาทีแรก สัญญาณ ไอเจของคาร์บอนและออกซิเจนมีขนาดเล็กลง หลังจากนั้นได้เพิ่มเวลาในการสปัตเตอร์ขึ้นอีก ครั้งละ 30 นาทีจนสัญญาณ ไอเจของซิลิกอนเริ่มคงที่ เมื่อสิ้นสุดกระบวนการสปัตเตอร์พบว่าสัญญาณ ไอเจของซิลิกอนมีขนาดเพิ่มขึ้นถึง 7 เท่า สัญญาณ ไอเจของคาร์บอนและออกซิเจนลดลงเหลือ 3.61 % และ 17.70 % ตามลำดับ

ซึ่งทำให้ทราบว่า การทำความสะอาดโดยการสปัตเตอร์นั้นสามารถทำให้พื้นผิวของแผ่นซิลิกอนมีความสะอาดมากขึ้น สูงมากเมื่อเทียบกับการทำความสะอาดทางเคมี และผลจาก LEED pattern ก็สามารถยืนยันความสะอาดของพื้นผิว ได้อีกวิธีหนึ่งด้วย

5.2 ข้อเสนอแนะ

การศึกษาและวิเคราะห์ความสะอาดของพื้นผิวจะต้องให้ความสำคัญต่อความสะอาดเป็นอันดับแรก เนื่องจากความสกปรกแม้กระทั่งฝุ่นเพียงเล็กน้อยก็อาจจะส่งผลกระทบต่อทดลองได้ ดังนั้นภาชนะ อุปกรณ์ และเครื่องมือต่างๆจะต้องดูแลรักษาความสะอาดอยู่เสมอ

จากผลการล้างแผ่นซิลิกอนด้วยขั้นตอนการล้างกำจัดชั้นออกไซด์จะเห็นว่าขั้นตอนนี้สามารถกำจัดชั้นออกไซด์ได้เป็นอย่างดีเนื่องจากสัญญาณ ไอเจของออกซิเจนที่ลดลงจนเหลืออยู่น้อยมากเมื่อผ่านกระบวนการล้าง แต่กลับมีผลทำให้สัญญาณ ไอเจของคาร์บอนเพิ่มขึ้น ดังนั้นหากไม่ต้องการให้คาร์บอนสูงขึ้นเนื่องจากการล้างในขั้นตอนนี้จึงไม่ควรนำขั้นตอนการล้างกำจัดชั้นออกไซด์มาใช้เป็นขั้นตอนการล้างในลำดับสุดท้าย แต่ถ้านำแผ่นซิลิกอนไปล้างด้วยกระบวนการ

อันดับต่อไปอีกก็จะมีผลทำให้เกิดออกไซด์เพิ่มขึ้นได้เนื่องจากการที่ซิลิกอนทำปฏิกิริยากับน้ำเกิดเป็นชั้นออกไซด์ ดังนั้นจึงขึ้นอยู่กับการใช้งานแผ่นซิลิกอนว่าต้องการกำจัดสาร(ธาตุ)ชนิดออกไซด์ไปหรือสารชนิดใดมีผลเสียต่อการใช้งานมากที่สุด

สำหรับการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโอเจอิเล็กทรอนิกส์รอนเปกโทรโกปี เป็นที่นิยมใช้ในงานวิเคราะห์พื้นผิวโดยทั่วไปเนื่องจากสามารถบอกชนิดของธาตุที่เป็นองค์ประกอบบนพื้นผิวได้โดยตรง แต่ก็ไม่สามารถระบุได้ว่าธาตุเหล่านั้นอยู่ในรูปของสารประกอบชนิดใดหรือไม่ ทั้งยังไม่สามารถตรวจวัดธาตุไฮโดรเจนและฮีเลียมได้ และมีความไวที่ค่อนข้างต่ำมากเมื่อเทียบกับเทคนิค SIMS ซึ่งจะให้ข้อมูลอยู่ในรูปของสารประกอบ ถึงอย่างไรก็ตามเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์พื้นผิวแต่ละเทคนิคก็ไม่สามารถบอกข้อมูลจากพื้นผิวได้ครบถ้วน ดังนั้นหากต้องการทราบข้อมูลหลายด้านจะต้องอาศัยการวิเคราะห์จากหลายๆเทคนิคประกอบกัน



บรรณานุกรม

- [1] Bishop, H.E., Chornik, B., Le Gressus, C. & Le Moel, A., **Surf. Interface Anal.**, **6**, 116, 1984.
- [2] Bruce Hinds. “**CMMED Wet Cleaning Bench Operating Procedure.**” [Online].
Available: <http://www.engr.uky.edu/~cense/Policies/CMMEDpdf/WetBench.pdf>. 2002.
- [3] Chang, in Kane and Larrabee, (Eds.), **Characterization of Solid Surfaces**. New York, Plenum press, 1974.
- [4] Davis, L.E., MacDonald, N.C., Palmberg, P. W., Ricach, G.E. & Weber, R.E., **Handbook of Auger Electron Spectroscopy**. Minnesota: Physical Electronic division of Perkins Elmer Corp., 1976.
- [5] I.L. Singer, T. Le. Mogne, C. Donnet and J. M. Martin. “In situ analysis of the tribochemical formed by SiC sliding against Mo in partial pressures of SiO₂, O₂ and H₂S gases.”, **J. Vac. Sci. Technl. A**, Vol.14, no.1, Jan/Feb. 1996. pp. 38-45.
- [6] John C. Vickerman, **Surface Analysis -The Principal Techniques**. New York: John Wiley & Sons, 1997.
- [7] J. M. Walls, (eds.), **Methods of Surface Analysis Techniques and Applications**. New York: Cambridge University press, 1989.
- [8] Kenneth A. Jackson and Wolfgang Schroter (eds.), **Handbook of Semiconductor Technology**. Weinheim: Wiley-VCH, 2000.
- [9] Leonard C. Feldman and James W. Mayer, **Fundamentals of Surface and Thin Film Analysis**. New York: North-Holland, 1986.
- [10] MacDonald's Group. University of California, Santa Barbara. “**Piranha Clean.**” [Online]. Available: <http://www.engineering.ucsb.edu/~memsucsb/Facilities/mems%20fab/PIRANHA%20CLEAN.pdf>. 2006.
- [11] Mark Bachman. “**Cleaning Procedure for Silicon Wafer.**” [Online].
Available: <http://www.ampel.ubc.ca/nanofab/sop/wafer-cleaning.pdf>. 2002.
- [12] Mark Bachman. “**RCA-1 Silicon Wafer Cleaning.**” [Online].
Available: <http://www.ampel.ubc.ca/nanofab/sop/rca-clean-1.pdf>. 1999.
- [13] Marsbed H. Hablanian, **High-Vacuum Technology -A practical Guide**. New York: Marcel Dekker, 1990.

- [14] M.Chemla, S. Durand-Vidal, S. Zanna, S. Petitdidier and D. Levy. "Silicon surface wet cleaning and chemical oxide growth by a novel treatment in aqueous chlorine solutions.", *Electrochimica Acta.*, Vol. 49, 2004. pp. 3545-3553.
- [15] Mitsushi Itano, Frederick W, Kern, Jr. Masayuki Miyashita and Tadahihiro Ohmi. "Particle Removal from Silicon Wafer Surface in Wet Cleaning Process." *IEEE. Trans. Semicond. Manufact.*, Vol.6, No.3, August, 1993. pp.258-267.
- [16] R. Behrisch, (eds.), *Sputtering by particle Bombardment I*. Berlin: Springer Verlag, 1983.
- [17] R.P. Donovan (eds.), *Particle control for semiconductor manufacturing*. New York : Marcel Dekker, 1990.
- [18] School of Electrical and Computer Engineering at the Georgia Institute of technology "RCA Clean." [Online]. Available : <http://www.ece.gatech.edu/research/labs/vc/processes/rcaClean.html>. 2006.
- [19] Seah, M.P. & Dench, W.A., *Surf. Interface Anal.* 1, 2. 1979.
- [20] Stanley S. Seelig. "The Chemical Aspects of Cleaning." [Online]. Available: <http://www.p2pays.org/ref/02/01679.htm>. 1995.
- [21] The UK's National Measurement Laboratory. "Sputtering Yields for Neon, Argon and Xenon Ions." [Online]. Available : http://www.npl.co.uk/nanoanalysis/sputtering_yields.html. 2006.
- [22] U.Starke, W.Y.Lee, C. Coletti, S.E.Saddow, R.P.Devaty and W.J.Choyke. "SiC Pore Surfaces: Surface Studies of 4H-SiC (1102) and 4H-SiC (1102).", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 88, 2006. pp. 031915.
- [23] Werner Kern, (eds.) *Handbook of Semiconductor Wafer Cleaning Technology: Science, Technology, and Applications*, USA: Noyes Publications, 1993.
- [24] Yoshio Nishi, Robert Doering (eds.) and Tim Wooldrige (ass. Eds.), *Handbook of semiconductor manufacturing technology*. New York : Marcel Dekker, 2000.

ประวัติผู้เขียน

นางสาวณัฐรดา โยธาคำ เกิดเมื่อวันที่ 23 เดือน กันยายน พ.ศ.2524 ที่ อำเภอเมือง จังหวัด มุกดาหาร จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนมุกดาหาร จากนั้นเข้าศึกษา ระดับอุดมศึกษาและสำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (ประสานมิตร) เมื่อปีการศึกษา 2544 ปัจจุบันกำลังศึกษาใน ระดับบัณฑิตศึกษา ณ ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้