

การศึกษาการทำความสะอาดพื้นผิวสารกึ่งตัวนำ
ด้วยพลาสมาที่กำเนิดจากคลื่นวิทยุ

THE STUDY OF CLEANLINESS OF SEMICONDUCTOR-
SURFACE CLEANED BY RADIOFREQUENCY PLASMA



ธนิสรา น้อยนอนเมือง
ประพัสนันท์ แก้วอุดม

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ปีการศึกษา 2561
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE STUDY OF CLEANLINESS OF SEMICONDUCTOR-
SURFACE CLEANED BY RADIOFREQUENCY PLASMA



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (APPLIED PHYSICS)
DEPARTMENT OF PHYSICS, FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ **ACADEMIC YEAR 2018** อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การศึกษาการทำความสะอาดพื้นผิวสารกึ่งตัวนำด้วยพลาสมา
ที่กำเนิดจากคลื่นวิทยุ
The Study of Cleanliness of Semiconductor-Surface
Cleaned by Radiofrequency Plasma

ชื่อนักศึกษา นางสาวธนิสรา น้อยนอนเมือง รหัสนักศึกษา 58051075
นางสาวประไพสนันท์ แก้วอุดม รหัสนักศึกษา 58051094

ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)


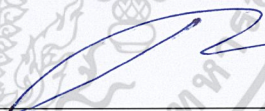

ภาควิชา ฟิสิกส์

ปีการศึกษา 2561

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.วราวุฒิ เถาลัดดา

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผศ.ดร.ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ประจำปีการศึกษา 2561

| | |
|--|--|
| คณะกรรมการสอบ | ลายมือชื่อ |
| ดร.เมตยา กิติวรรณ ประธานกรรมการ |  |
| ดร.ภาณุพล โขสนกระโทก กรรมการ |  |
| รศ.ดร.วราวุฒิ เถาลัดดา กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา |  |
| ผศ.ดร.ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม | ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี |

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องขอแจ้งเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | |
|----------------------|---|
| หัวข้อโครงการพิเศษ | การศึกษาการทำความสะอาดพื้นผิวสารกึ่งตัวนำด้วยพลาสมา ที่กำเนิดจากคลื่นวิทยุ |
| ชื่อนักศึกษา | นางสาวธนิสรา น้อยนอนเมือง รหัสนักศึกษา 58051075 นางสาวประพัสนันท์ แก้วอุดม รหัสนักศึกษา 58051094 |
| ปริญญา | วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์) |
| ภาควิชา | ฟิสิกส์ |
| คณะ | วิทยาศาสตร์ |
| มหาวิทยาลัย | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) |
| ปีการศึกษา | 2561 |
| อาจารย์ที่ปรึกษา | รศ.ดร.วราวุฒิ เถลัดดา |
| อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม | ผศ.ดร.ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี |

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษฉบับนี้ได้นำเสนอ การศึกษาการจัดการคาร์บอนและออกซิเจนที่อยู่บนพื้นผิวของแผ่นซิลิกอน เมื่อทำความสะอาดพื้นผิวด้วยแหล่งกำเนิดพลาสมาอาร์กอน-ไฮโดรเจนที่กระตุ้นด้วยคลื่นความถี่วิทยุ พร้อมทั้งทำการประเมินความสะอาดของพื้นผิวด้วยเทคนิคโอเจอีเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี และสเปกโทรสโกปีของการเปล่งแสงของพลาสมาที่นำมาใช้เพื่อแสดงลักษณะของพลาสมาอาร์กอน-ไฮโดรเจน ซึ่งบอกถึงประสิทธิภาพในการประเมินกระบวนการทำความสะอาดโดยการเปรียบเทียบก่อนและหลังการทำความสะอาด เปรียบเทียบสัญญาณโอเจอีเล็กตรอนของซิลิกอน (92 อิเล็กตรอนโวลต์), คาร์บอน (272 อิเล็กตรอนโวลต์) และออกซิเจน (508 อิเล็กตรอนโวลต์) สัญญาณโอเจอีเล็กตรอนของซิลิกอนที่สูงขึ้นร่วมกับสัญญาณโอเจอีเล็กตรอนของคาร์บอนและออกซิเจนที่ลดลงแสดงถึงประสิทธิภาพในการกำจัดสิ่งปนเปื้อน ในการทำความสะอาดด้วยพลาสมาอาร์กอน และพลาสมาอาร์กอน-ไฮโดรเจน เมื่อทำความสะอาดด้วยพลาสมาเพียง 5 นาที โดยไม่มีการให้ความร้อนกับพื้นผิวของแผ่นซิลิกอนสามารถกำจัดคาร์บอนออกไปได้ แต่ไม่สามารถกำจัดออกไซด์ออกไปได้ ประสิทธิภาพของพลาสมาอาร์กอนสำหรับการกำจัดออกไซด์บนพื้นผิวนั้นทำได้ โดยการให้ความร้อนภายนอกกับพื้นผิวและเพิ่มก๊าซไฮโดรเจนลงในพลาสมาอาร์กอน ให้แผ่นซิลิกอนอยู่ในพลาสมาอาร์กอน-ไฮโดรเจนด้วยกำลังของคลื่นวิทยุ 400 วัตต์ ใช้ก๊าซอาร์กอนและไฮโดรเจนในการจุดพลาสมาโดยมีอัตราการไหลของก๊าซ 20 และ 10 sccm ตามลำดับ พื้นผิวจะได้รับความร้อนภายนอกจากฮีทเตอร์อินฟราเรดที่อุณหภูมิ 530 องศาเซลเซียส หลังจากสัมผัสกับพลาสมาเป็นเวลา 60 นาที แล้วสัญญาณโอเจอีเล็กตรอนของซิลิกอนที่ปรากฏนั้นแสดงให้เห็นว่าขนาดของสัญญาณลดลงไป 18% ของสัญญาณเริ่มต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่สำคัญ : พัลลัสมีคลื่นวิทยุ สเปกโทรสโกปีของการเปล่งแสง โอเจอีเล็กตรอนสเปกโทรสโกปีอาร์กอนนำไปใช้

| | | |
|----------------------|--|---------------------|
| Title | The Study of Cleanliness of Semiconductor-Surface Cleaned by Radiofrequency Plasma | |
| Students | Miss Tanisara Noinonmueng | Student ID 58051075 |
| | Miss Prapatsanan Kaewudom | Student ID 58051094 |
| Degree | Bachelor of Science (Applied Physics) | |
| Department | Physics | |
| Faculty | Science | |
| University | King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL) | |
| Academic Year | 2018 | |
| Advisor | Assoc. Prof. Dr. Warawoot Thowladda | |
| Co-advisor | Asst. Prof. Dr. S.Tipawan Khlayboonme | |

Abstract

The propose of this special is the study removal of carbon and native oxide presenting on silicon-wafer surfaces. The surfaces were cleaned in radio frequency excited Ar-H₂ plasma and characterized by Auger electron spectroscopy (AES). Optical emission spectroscopy was also used to characterize the Ar-H₂ plasma. The efficiency of the plasma cleaning process was evaluated by comparing the initial and final AES signal of comparing the initial and final Auger electron signals of silicon (92 eV), carbon (272 eV) and oxygen (508 eV). The higher silicon signal with the lower carbon and oxygen signals indicated the efficiency of contaminant removal. In only Ar and Ar-H₂ plasmas, exposure to the plasma for only 5 minutes without heating to the silicon surface completely removed the carbon but did not the native oxide. The effectiveness of the Ar plasma for the removal of surface native oxide was achieved by applying external heat to the surface and adding H₂ gas into the Ar plasma. The silicon wafer was immersed in the Ar-H₂ plasma that was sustained by a RF power of 400 W and ignited with Ar and H₂ gas flow rates of 20 and 10 sccm, respectively. The surface was also heated by an external infrared heater at a temperature of 530 °C. After exposure to the plasma for 60 minutes, the AES signal of silicon was presented and that of silicon was reduced to only 18% of the initial signal

Keyword : Radio Frequency Plasma, Optical Emission Spectroscopy, Auger Electron Spectroscopy

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเล่มนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้ดี เนื่องจากได้รับความเมตตากรุณาเป็นอย่างยิ่ง จากรศ. ดร. วราวุฒิ เถาลัดดา ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ ผู้ให้คำปรึกษาและแนะนำแนวทางในการดำเนินโครงการพิเศษ ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ ผศ. ดร. ศ. ทิพวรรณ คล้ายบุญมี อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษร่วมผู้ช่วยแนะนำให้คำปรึกษา และเสนอแนวทางการแก้ไขปัญหา

ขอขอบคุณอาจารย์ เพื่อน ๆ พี่ ๆ น้อง ๆ ในภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ส่งเสริม ให้ประสบการณ์และความรู้ต่าง ๆ แก่พวกเราในระหว่างที่ศึกษาอยู่ในมหาวิทยาลัย ขอขอบคุณที่ให้คำแนะนำและให้กำลังใจเสมอมา

ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัว รวมทั้งบุคคลที่ไม่ได้กล่าวถึงที่เป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนในทุก ๆ เรื่องทำให้โครงการพิเศษเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณทุกท่าน ที่ถ่ายทอดความรู้ ความสามารถต่าง ๆ และให้กำลังใจ จึงทำให้โครงการพิเศษของพวกเราสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงและขอภัยไว้ ณ โอกาสนี้

ธนิสรา น้อยนอนเมือง
ประพิสนันท์ แก้วอุดม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

| | หน้า |
|--|----------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | ก |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | ข |
| กิตติกรรมประกาศ..... | ค |
| สารบัญ..... | ง |
| สารบัญรูป..... | ช |
| คำย่อ/สัญลักษณ์..... | ฉ |
| บทที่ 1 บทนำ..... | 1 |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ..... | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์..... | 1 |
| 1.3 ขอบเขตการวิจัย..... | 2 |
| 1.4 ขั้นตอนของการวิจัยและวิธีการดำเนินการ..... | 2 |
| 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... | 2 |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 3 |
| 2.1 ฟิสิกส์ของพลาสมา..... | 3 |
| 2.1.1 ความหนาแน่นของพลาสมา..... | 3 |
| 2.1.2 กระบวนการเกิดอนุภาคที่มีประจุ..... | 4 |
| 2.1.2.1 การแตกตัวเป็นไอออนโดยการชน..... | 4 |
| 2.1.2.2 การแตกตัวเป็นไอออนโดยแสง..... | 6 |
| 2.2 การกำเนิดของพลาสมา..... | 7 |
| 2.2.1 การกระตุ้นการเกิดพลาสมาด้วยคลื่นความถี่..... | 7 |
| 2.3 การทำความสะอาดพื้นผิวของสารกึ่งตัวนำ..... | 8 |
| 2.3.1 สารปนเปื้อน..... | 8 |
| 2.3.2 การทำความสะอาดพื้นผิวด้วยการล้างทางเคมี..... | 9 |
| 2.3.3 การทำความสะอาดพื้นผิวด้วยลำไอออน..... | 10 |
| 2.3.4 การทำความสะอาดพื้นผิวด้วยพลาสมาความดันต่ำ..... | 10 |
| 2.4 โอเจอิเล็กทรอนิกส์ทรานสเปกโทรสโกปี..... | 12 |
| 2.4.1 กระบวนการเกิดโอเจอิเล็กทรอนิกส์ทรอน..... | 13 |
| 2.4.2 ผลของลำอิเล็กทรอนิกส์ทรอนต่อพื้นผิว..... | 14 |

เอกสารนี้เป็นเอกสาร 2.4.3 ปริมาตรในการวิเคราะห์โอเจอิเล็กทรอนิกส์ทรอนฉบับนี้ ไม่อนุญาตให้แก้ไขใช้ประโยชน์ด้าน 15 หน้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ 2.4.4 พลังงานของโอเจอิเล็กทรอนิกส์ทรอนและตัวเลขถึงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีเลขหน้า 16 หน้า

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|--|-----------|
| 2.4.5 ประโยชน์ของโอเจอเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี..... | 17 |
| 2.4.6 ข้อจำกัดของโอเจอเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี..... | 18 |
| 2.5 สเปกโทรสโกปีของการเปล่งแสง..... | 18 |
| บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย..... | 21 |
| 3.1 ระบบสุญญากาศ..... | 21 |
| 3.1.1 ระบบปั๊มสุญญากาศ..... | 21 |
| 3.1.2 แคมเบอร์สุญญากาศ..... | 23 |
| 3.2 ระบบทำความสะอาดพื้นผิวด้วยพลาสมาชนิดกระตุ้นด้วยคลื่นความถี่วิทยุ..... | 24 |
| 3.3 ขั้นตอนการทำความสะอาดแผ่นซิลิกอน..... | 24 |
| 3.4 ระบบวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโอเจอเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี..... | 25 |
| 3.5 สเปกโทรสโกปีของการเปล่งแสง..... | 27 |
| บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล..... | 29 |
| 4.1 การศึกษาผลของการทำความสะอาดด้วย Ar Plasma..... | 31 |
| 4.1.1 ผลของเวลาที่ใช้ในการทำความสะอาด..... | 31 |
| 4.1.2 ผลของกำลังคลื่นวิทยุที่ใช้ในการทำความสะอาด..... | 33 |
| 4.2 การทำความสะอาดด้วย Ar และ H ₂ Plasma..... | 36 |
| 4.3 การทำความสะอาดพื้นผิวด้วย Ar และ H ₂ Plasma ร่วมกับการให้ความร้อน..... | 38 |
| 4.3.1 ผลของอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจน..... | 38 |
| 4.3.2 ผลของระยะเวลาในการทำความสะอาดโดยให้ก๊าซอาร์กอนปล่อยทิ้งไว้ในระบบหลังทำความสะอาดแผ่นซิลิกอน..... | 41 |
| 4.3.3 ผลของระยะเวลาในการทำความสะอาดโดยให้ก๊าซไฮโดรเจนปล่อยทิ้งไว้ในระบบหลังทำความสะอาดแผ่นซิลิกอน..... | 43 |
| 4.3.4 ผลของการทำความสะอาดโดยการเปลี่ยนอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน..... | 46 |
| 4.3.5 การศึกษาผลของการให้อัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจน เมื่อใช้เวลาในการทำความสะอาด 60 นาที..... | 48 |
| 4.3.6 ผลของเวลาในการให้ความร้อนกับแผ่นซิลิกอน..... | 51 |
| บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ..... | 54 |
| 5.1 สรุปผลการศึกษา..... | 54 |

เอกสารนี้เป็นเอกสาร 5.1.1 การศึกษาสเปกโทรสโกปีของการเปล่งแสงนี้ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้าน 54 รค่า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|--|------|
| 5.1.2 การศึกษาการทำความสะอาดพื้นผิวแผ่นซิลิกอนด้วยวิธีพลาสมาที่กระตุ้นด้วยคลื่นความถี่วิทยุ..... | 54 |
| 5.1.2.1 ผลของการทำความสะอาดด้วย Ar Plasma..... | 55 |
| 5.1.2.2 ผลการทำความสะอาดด้วย Ar และ H ₂ Plasma..... | 55 |
| 5.1.2.3 ผลการทำความสะอาดด้วย Ar และ H ₂ Plasma และการให้ความร้อนแก่ชิ้นงาน..... | 55 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ..... | 55 |
| เอกสารอ้างอิง..... | 56 |
| ภาคผนวก..... | 57 |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 2.1 การชนของอิเล็กตรอนและอะตอม โดยที่ A คือ อะตอมที่เป็นกลาง, A+ คือ อะตอมที่ถูกทำให้แตกตัวเป็นไอออนบวก และ A* คือ อะตอมที่สถานะถูกกระตุ้น..... | 6 |
| 2.2 โครงสร้างของระบบทำความสะอาดพื้นผิวด้วยพลาสมา..... | 11 |
| 2.3 Surface and Plasma Interactions..... | 12 |
| 2.4 สเปกตรัมของอิเล็กตรอนที่หลุดออกจากพื้นผิวของของแข็ง เมื่อถูกยิงด้วยอิเล็กตรอนพลังงาน 2 keV..... | 13 |
| 2.5 กระบวนการเกิดโอเจอิเล็กตรอนเปรียบเทียบกับกระบวนการเกิดรังสีเอ็กซ์..... | 14 |
| 2.6 ปริมาตรในการวิเคราะห์โอเจอิเล็กตรอน..... | 16 |
| 2.7 การทรานซิชันหลักของโอเจอิเล็กตรอน..... | 17 |
| 2.8 กระบวนการเปล่งแสงของอะตอม..... | 19 |
| 3.1 ระบบทำความสะอาดพื้นผิวด้วยพลาสมาชนิดกระตุ้นด้วยคลื่นความถี่วิทยุ..... | 24 |
| 3.2 แผนภาพแสดงการวิเคราะห์พื้นผิวของแผ่นซิลิกอนที่ทำความสะอาดด้วยพลาสมาด้วยเทคนิคโอเจอิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี..... | 26 |
| 3.3 ระบบสเปกโทรสโกปีของการเปล่งแสง..... | 27 |
| 3.4 สเปกตรัมของพลาสมาที่เกิดจากการทำความสะอาด..... | 28 |
| 4.1 สัญญาณโอเจอิของแผ่นซิลิกอนแสดงให้เห็นสัญญาณโอเจอิเล็กตรอนของซิลิกอนคาร์บอนและออกซิเจน..... | 30 |
| 4.2 สัญญาณโอเจอิเล็กตรอนของแผ่นซิลิกอนก่อนทำความสะอาด..... | 30 |
| 4.3 สเปกตรัมของพลาสมาที่เกิดจากการทำความสะอาดด้วยเวลา 30, 60 และ 90 นาที โดยใช้กำลังของคลื่นวิทยุ 150 วัตต์..... | 31 |
| 4.4 แนวโน้มการเปล่งแสงของอนุภาคต่างๆในพลาสมา เมื่อใช้เวลาดำเนินการทำความสะอาดเป็น 30, 60 และ 90 นาที และกำลังของคลื่นวิทยุเป็น 150 วัตต์..... | 32 |
| 4.5 สัญญาณโอเจอิเล็กตรอนจากแผ่นซิลิกอนที่ทำความสะอาดด้วยเวลา 30, 60 และ 90 นาที โดยใช้กำลังของคลื่นวิทยุ 150 วัตต์..... | 32 |
| 4.6 แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณโอเจอิเล็กตรอนของออกซิเจน เมื่อใช้เวลาดำเนินการทำความสะอาดเป็น 30, 60 และ 90 นาที และกำลังของคลื่นวิทยุเป็น 150 วัตต์..... | 33 |
| 4.7 สเปกตรัมของพลาสมาที่เกิดจากการทำความสะอาดด้วยกำลังของคลื่นวิทยุ 100, 150 และ 200 วัตต์..... | 34 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 4.8 แนวโน้มการเปล่งแสงของอนุภาคต่างๆในพลาสติก เมื่อใช้กำลังของคลื่นวิทยุในการทำความสะอาดเป็น 100, 150 และ 200 วัตต์..... | 34 |
| 4.9 สัญญาณโอเจอิเล็กตรอนจากแผ่นซิลิกอนหลังทำความสะอาด โดยใช้กำลังของคลื่นวิทยุ 100, 150 และ 200 วัตต์..... | 35 |
| 4.10 แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณโอเจอิเล็กตรอนของออกซิเจน เมื่อใช้กำลังของคลื่นวิทยุในการทำความสะอาดเป็น 100, 150 และ 200 วัตต์..... | 35 |
| 4.11 สเปกตรัมของพลาสติกที่เกิดจากการทำความสะอาดสะอาด โดยให้อัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนเป็น 0, 3, และ 10 sccm ใช้เวลาในการทำความสะอาด 30 นาที โดยให้ก๊าซอาร์กอนปล่อยทิ้งไว้ในระบบหลังทำความสะอาดแผ่นซิลิกอน..... | 36 |
| 4.12 แนวโน้มการเปล่งแสงของอนุภาคต่าง ๆ ในพลาสติก เมื่อเปลี่ยนอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนเป็น 0, 3, และ 10 sccm โดยให้ก๊าซอาร์กอนปล่อยทิ้งไว้ในระบบหลังทำความสะอาดแผ่นซิลิกอน..... | 37 |
| 4.13 สัญญาณโอเจอิเล็กตรอนจากแผ่นซิลิกอนหลังทำความสะอาด ใช้เวลาในการทำความสะอาด 30 นาที โดยการเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนเป็น 3 และ 10 sccm เทียบกับเมื่อไม่มีอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจน..... | 37 |
| 4.14 แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณโอเจอิเล็กตรอนของออกซิเจน เมื่อใช้เวลาทำความสะอาด 30 นาที โดยการเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนเป็น 3 และ 10 sccm เทียบกับเมื่อไม่มีอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจน..... | 38 |
| 4.15 สเปกตรัมของพลาสติกที่เกิดจากการทำความสะอาดสะอาด โดยให้อัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนเป็น 1, 3, 5, 7, และ 10 sccm ใช้เวลาในการทำความสะอาด 30 นาที โดยให้ก๊าซอาร์กอนปล่อยทิ้งไว้ในระบบหลังทำความสะอาดแผ่นซิลิกอน..... | 39 |
| 4.16 แนวโน้มการเปล่งแสงของอนุภาคต่าง ๆ ในพลาสติก เมื่อเปลี่ยนอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนเป็น 1, 3, 5, 7 และ 10 sccm โดยให้ก๊าซอาร์กอนปล่อยทิ้งไว้ในระบบหลังทำความสะอาดแผ่นซิลิกอน..... | 39 |
| 4.17 สัญญาณโอเจอิเล็กตรอนจากแผ่นซิลิกอนหลังทำความสะอาด โดยให้อัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนเป็น 1, 3, 5, 7, และ 10 sccm ใช้เวลาในการทำความสะอาด 30 นาที โดยให้ก๊าซอาร์กอนปล่อยทิ้งไว้ในระบบหลังทำความสะอาดแผ่นซิลิกอน..... | 40 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 4.18 แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณโอเจอิเล็กทรอนิกส์ของออกซิเจน เมื่อเปลี่ยนอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนเป็น 1, 3, 5, 7 และ 10 sccm โดยให้ก๊าซอาร์กอนปล่อยทิ้งไว้ในระบบหลังทำความสะอาดแผ่นซิลิกอน..... | 40 |
| 4.19 สเปกตรัมของพลาสมาที่เกิดจากการทำความสะอาด เมื่อใช้เวลา 5, 30 และ 60 นาที โดยใช้กำลังของคลื่นวิทยุ 350 วัตต์ โดยให้ก๊าซอาร์กอนปล่อยทิ้งไว้ในระบบหลังทำความสะอาดแผ่นซิลิกอน..... | 41 |
| 4.20 แนวโน้มการเปล่งแสงของอนุภาคต่าง ๆ ในพลาสมา เมื่อใช้เวลาทำความสะอาดเป็น 5, 30 และ 60 นาที และกำลังของคลื่นวิทยุเป็น 350 วัตต์ โดยให้ก๊าซอาร์กอนปล่อยทิ้งไว้ในระบบหลังทำความสะอาดแผ่นซิลิกอน..... | 42 |
| 4.21 สัญญาณโอเจอิเล็กทรอนิกส์จากแผ่นซิลิกอนหลังทำความสะอาด เมื่อใช้เวลา 5, 30 และ 60 นาที โดยใช้กำลังของคลื่นวิทยุ 350 วัตต์ โดยให้ก๊าซอาร์กอนปล่อยทิ้งไว้ในระบบหลังทำความสะอาดแผ่นซิลิกอน..... | 42 |
| 4.22 แนวโน้มการเปล่งแสงของอนุภาคต่างๆในพลาสมา เมื่อใช้เวลาทำความสะอาดเป็น 5, 30 และ 60 นาที และกำลังของคลื่นวิทยุเป็น 350 วัตต์ โดยให้ก๊าซอาร์กอนปล่อยทิ้งไว้ในระบบหลังทำความสะอาดแผ่นซิลิกอน..... | 43 |
| 4.23 สเปกตรัมของพลาสมาที่เกิดจากการทำความสะอาด เมื่อใช้เวลา 5, 30 และ 60 นาที ใช้กำลังของคลื่นวิทยุ 350 วัตต์ โดยให้ก๊าซไฮโดรเจนปล่อยทิ้งไว้ในระบบหลังทำความสะอาดแผ่นซิลิกอนหลังทำความสะอาดแผ่นซิลิกอน..... | 44 |
| 4.24 แนวโน้มการเปล่งแสงของอนุภาคต่างๆในพลาสมา เมื่อใช้เวลาทำความสะอาดเป็น 5, 30 และ 60 นาที กำลังของคลื่นวิทยุเป็น 350 วัตต์ โดยให้ก๊าซไฮโดรเจนปล่อยทิ้งไว้ในระบบหลังทำความสะอาดแผ่นซิลิกอน..... | 44 |
| 4.25 สัญญาณโอเจอิเล็กทรอนิกส์จากแผ่นซิลิกอนหลังทำความสะอาดเมื่อใช้เวลา 5, 30 และ 60 นาที ใช้กำลังของคลื่นวิทยุ 350 วัตต์ โดยให้ก๊าซไฮโดรเจนปล่อยทิ้งไว้ในระบบหลังทำความสะอาดแผ่นซิลิกอน..... | 45 |
| 4.26 แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณโอเจอิเล็กทรอนิกส์ของออกซิเจน เมื่อใช้เวลาทำความสะอาดเป็น 5, 30 และ 60 นาที กำลังของคลื่นวิทยุเป็น 350 วัตต์ โดยให้ก๊าซไฮโดรเจนปล่อยทิ้งไว้ในระบบหลังทำความสะอาดแผ่นซิลิกอน..... | 45 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 4.27 สเปกตรัมของพลาสมาที่เกิดจากการทำความสะอาดสะอาด สะอาด โดยการใช้อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนเป็น 1, 10 และ 20 sccm ใช้เวลาในการทำความสะอาด 30 นาที โดยให้ก๊าซไฮโดรเจนปล่อยทิ้งไว้ในระบบหลังทำความสะอาดแผ่นซิลิกอน..... | 46 |
| 4.28 แนวโน้มการเปล่งแสงของอนุภาคต่างๆในพลาสมา โดยการใช้อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนเป็น 1, 10 และ 20 sccm โดยให้ก๊าซไฮโดรเจนปล่อยทิ้งไว้ในระบบหลังทำความสะอาดแผ่นซิลิกอน..... | 47 |
| 4.29 สัญญาณโอเจิล็กตรอนจากแผ่นซิลิกอนหลังทำความสะอาด โดยการใช้อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนเป็น 1, 10 และ 20 sccm ใช้เวลาในการทำความสะอาด 30 นาที โดยให้ก๊าซไฮโดรเจนปล่อยทิ้งไว้ในระบบหลังทำความสะอาดแผ่นซิลิกอน..... | 47 |
| 4.30 แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณโอเจิล็กตรอนของออกซิเจน โดยการใช้อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนเป็น 1, 10 และ 20sccm โดยให้ก๊าซไฮโดรเจนปล่อยทิ้งไว้ในระบบหลังทำความสะอาดแผ่นซิลิกอน..... | 48 |
| 4.31 สเปกตรัมของพลาสมาที่เกิดจากการทำความสะอาดสะอาด เมื่อเปลี่ยนอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนเป็น 3, 5 และ 7 sccm ใช้เวลาในการทำความสะอาด 60 นาที โดยให้ก๊าซไฮโดรเจนปล่อยทิ้งไว้ในระบบหลังทำความสะอาดแผ่นซิลิกอน..... | 49 |
| 4.32 แนวโน้มการเปล่งแสงของอนุภาคต่างๆในพลาสมา เมื่อเปลี่ยนอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนเป็น 3, 5 และ 7 sccm โดยให้ก๊าซไฮโดรเจนปล่อยทิ้งไว้ในระบบหลังทำความสะอาดแผ่นซิลิกอน..... | 49 |
| 4.33 สัญญาณโอเจิล็กตรอนจากแผ่นซิลิกอนหลังทำความสะอาด เมื่อเปลี่ยนอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนเป็น 3, 5 และ 7 sccm ใช้เวลาในการทำความสะอาด 60 นาที โดยให้ก๊าซไฮโดรเจนปล่อยทิ้งไว้ในระบบหลังทำความสะอาดแผ่นซิลิกอน..... | 50 |
| 4.34 แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณโอเจิล็กตรอนของออกซิเจน เมื่อเปลี่ยนอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนเป็น 3, 5 และ 7 sccm โดยให้ก๊าซไฮโดรเจนปล่อยทิ้งไว้ในระบบหลังทำความสะอาดแผ่นซิลิกอน..... | 50 |
| 4.35 สเปกตรัมของพลาสมาที่เกิดจากการทำความสะอาด เมื่อเวลาในการให้ความร้อนกับแผ่นซิลิกอนเป็น 15, 30 และ 45 นาที เทียบกับแผ่นที่ไม่ให้ความร้อน..... | 51 |
| 4.36 แนวโน้มการเปล่งแสงของอนุภาคต่างๆในพลาสมา เมื่อเวลาในการให้ความร้อนกับแผ่นซิลิกอน 15, 30 และ 45 นาที เทียบกับแผ่นที่ไม่ให้ความร้อน..... | 52 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 4.37 สัญญาณโอเจอีเล็กตรอนจากแผ่นซิลิกอนหลังทำความสะอาด เมื่อเวลาในการให้ความร้อน กับแผ่นซิลิกอน 15, 30 และ 45 นาที เทียบกับแผ่นที่ไม่ให้ความร้อน..... | 52 |
| 4.38 แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณโอเจอีเล็กตรอนของออกซิเจน เมื่อเวลาในการให้ ความร้อนกับแผ่นซิลิกอน 15, 30 และ 45 นาที เทียบกับแผ่นที่ไม่ให้ความร้อน..... | 53 |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อ/สัญลักษณ์

| คำย่อ/สัญลักษณ์ | คำอธิบาย |
|-----------------|---------------------------------------|
| sccm | standard cubic centimeters per minute |
| A.U. | Arbitrary unit |
| nm | นาโนเมตร |
| H ₂ | ก๊าซไฮโดรเจน |
| O ₂ | ก๊าซออกซิเจน |
| Ar | อาร์กอน |
| CH | ไฮโดรคาร์บอน |
| OH | ไฮดรอกไซด์ |
| C | คาร์บอน |
| Si | ซิลิกอน |
| SiO | ซิลิกอนออกไซด์ |
| eV | อิเล็กตรอนโวลต์ |
| W | วัตต์ |
| °C | องศาเซลเซียส |
| MHz | เมกะเฮิร์ตซ์ |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ถือได้ว่าเป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่มีบทบาทสำคัญต่อเศรษฐกิจไทย จากโครงสร้างการลงทุนของประเทศไทย ยังคงพบว่ากลุ่มผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นการผลิตชิ้นส่วนฮาร์ดดิสก์ แผงวงจรไฟฟ้า และเซมิคอนดักเตอร์ ซึ่งมีแนวโน้มที่สูงขึ้น และจากการประเมินพบว่าจุดแข็งที่สำคัญของอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ของไทยในปัจจุบันคือ เป็นฐานการผลิตเพื่อการส่งออก หนึ่งในนั้นคือ ฐานการผลิตวงจรรวม รวมทั้งวงจรรวมขนาดเล็ก (Micro Electro Mechanical Systems ; MEMS) ซึ่งเทคโนโลยีวงจรรวมขนาดเล็ก เป็นวงจรรวมขนาดเล็กระดับไมโครที่นำเอาระบบเซ็นเซอร์เข้ามาเป็นส่วนประกอบ ปัจจุบันได้มีการนำเอาวงจรรวมขนาดเล็ก เข้ามาใช้ในชีวิตประจำวัน อาทิเช่น เซ็นเซอร์วัดความดันในทางการแพทย์ อุปกรณ์วัดอัตราเร่งในถุงลมนิรภัย เซ็นเซอร์วัดแรงดันยาง (Tire Pressure Monitor system) นอกจากนี้ในปัจจุบันเป็นที่ตระหนักและยอมรับกันโดยทั่วไปว่าเทคโนโลยีนาโน (Nanotechnology) ส่งผลให้วัสดุหรืออุปกรณ์ต่าง ๆ ที่มีหน้าที่ มีความซับซ้อนในการทำงานและมีคุณสมบัติที่พิเศษขึ้น ทั้งทางด้านกายภาพ เคมี และชีวภาพ ทำให้มีประโยชน์ต่อผู้ใช้และเพิ่มมูลค่าทางเศรษฐกิจได้ จึงได้เกิดจากเทคโนโลยีทางด้านอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ (Semi-Conductor) ที่ยังคงมีพื้นฐานมาจากซิลิคอนให้มีสเกลระดับนาโน (Silicon Nanoelectronics Technology) เช่น Nanometer-scale transistor นอกจากนี้ยังพบอีกว่าในกระบวนการผลิตบรรจุภัณฑ์ไอซี ซึ่งจำเป็นต้องมีกระบวนการที่ทำให้พลาสติกเคลือบยึดติดกับแผงวงจรรวม อีกทั้งการเชื่อมลวดจะต้องมีการยึดติดที่ดี แต่โดยธรรมชาติแล้วด้วยสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ของพลาสติกรวมทั้งพื้นผิวไม่สะอาดจะมีค่าพลังงานพื้นผิวต่ำเป็นสาเหตุให้ไม่สามารถยึดติดได้ดี การแก้ปัญหานี้โดยใช้กระบวนการปรับสภาพและทำความสะอาดพื้นผิวด้วยพลาสมา

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาการทำความสะอาดพื้นผิวด้วยแหล่งกำเนิดพลาสมาที่กระตุ้นด้วยคลื่นความถี่วิทยุ พร้อมทั้งทำการประเมินความสะอาดของพื้นผิวด้วยเทคนิคโอเจอิเล็กทรอนิกส์สเปกโทรสโกปี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตการวิจัย

- 1) ศึกษาผลการทำความสะอาดพื้นผิวด้วยแหล่งกำเนิดพลาสมาชนิดกระตุ้นด้วยคลื่นความถี่วิทยุ
- 2) ศึกษาสเปกโทรสโกปีของการเปล่งแสงของพลาสมา (OES-optical electron spectroscopy)
- 3) ประเมินประสิทธิภาพการทำงานของระบบทำความสะอาดพื้นผิวด้วยพลาสมา
- 4) ศึกษาและประเมินความสะอาดของพื้นผิวสารกึ่งตัวนำด้วยเทคนิคไอเจือเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี (Auger Electron Spectroscopy)

1.4 ขั้นตอนของการวิจัยและวิธีการดำเนินการ

- 1) ศึกษาทฤษฎีและหลักการทั่วไปของแหล่งกำเนิดพลาสมา การตรวจวัดสมบัติของพลาสมาด้วยเทคนิคการวัดสเปกโทรสโกปีของการเปล่งแสงของพลาสมาและการประเมินความสะอาดพื้นผิวด้วยเทคนิคไอเจือเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี รวมทั้งทฤษฎีและหลักการเกี่ยวกับระบบสุญญากาศ
- 2) ศึกษาผลการทำความสะอาดพื้นผิวด้วยแหล่งกำเนิดพลาสมาที่ถูกกระตุ้นด้วยคลื่นความถี่วิทยุ
- 3) ศึกษาและทดสอบระบบการวิเคราะห์พารามิเตอร์ของพลาสมาด้วยสเปกโทรสโกปีของการเปล่งแสงของพลาสมา
- 4) ทดสอบระบบทำความสะอาดพื้นผิวของด้วยพลาสมา โดยทดลองทำความสะอาดแผ่นซิลิกอน พร้อมทั้งปรับปรุงแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นกับระบบทำความสะอาดพื้นผิวด้วยพลาสมา
- 5) ศึกษาและประเมินความสะอาดของพื้นผิวด้วยเทคนิคไอเจือเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี
- 6) สรุปและเสนอแนวทางในการพัฒนาต่อไปในอนาคต

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ได้เรียนรู้ระบบทำความสะอาดพื้นผิวที่เป็นมิตรกับสภาพแวดล้อม
 - 2) สามารถพัฒนาแหล่งกำเนิดพลาสมาชนิดกระตุ้นด้วยคลื่นความถี่วิทยุด้วยวัสดุที่สามารถหาได้ภายในประเทศ
 - 3) สามารถพัฒนาระบบทำความสะอาดพื้นผิวสารกึ่งตัวนำด้วยพลาสมาชนิดกระตุ้นด้วยคลื่นความถี่วิทยุให้มีประสิทธิภาพที่ดี
 - 4) มีทักษะความรู้และความเข้าใจในระบบการวัดและวิเคราะห์พารามิเตอร์ของพลาสมาด้วยเทคนิคการวัดสเปกโทรสโกปีของการเปล่งแสงของพลาสมา
 - 5) มีทักษะความรู้และความเข้าใจในงานวิเคราะห์พื้นผิวด้วยเทคนิคไอเจือเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี
- เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่สามารถเผยแพร่หรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากทางมหาวิทยาลัยได้

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎี

สำหรับในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการและทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในงานวิจัย การศึกษาการทำความสะอาดพื้นผิว โดยเน้นการทำความสะอาดบนพื้นผิวซิลิกอน และประเมินความสะอาดด้วยเทคนิคโอเจอีเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี โดยหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ฟิสิกส์ของพลาสมา การกำเนิดพลาสมาด้วยการกระตุ้นการเกิดพลาสมาด้วยคลื่นความถี่ การทำความสะอาดพื้นผิวของสารกึ่งตัวนำ การวิเคราะห์พื้นผิวด้วยเทคนิคโอเจอีเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี และเทคนิคการวิเคราะห์ด้วย optical emission spectroscopy

2.1 ฟิสิกส์ของพลาสมา

พลาสมาเป็นสภาวะที่อะตอมบางตัวที่อยู่ในสถานะก๊าซเกิดการแตกตัวเป็นไอออน เนื่องจากการสูญเสียอิเล็กตรอนของอะตอมที่เป็นกลาง จึงทำให้พลาสมามีประจุสุทธิเป็นศูนย์ พลาสมาประกอบไปด้วยอิเล็กตรอน ประจุบวก กลุ่มของประจุบวก อะตอมที่มีสถานะเป็นกลางทางไฟฟ้า โมเลกุลและส่วนประกอบของโมเลกุล สำหรับพลาสมาความหนาแน่นต่ำจะมีอัตราหรือเปอร์เซ็นต์ในการแตกตัวเป็นไอออน (degree of ionization) ต่ำ เพื่อรักษาสภาพการเกิดพลาสมาให้คงอยู่ กระบวนการแตกตัวเป็นไอออน (ionization) และกระบวนการรวมตัว (recombination) จะต้องมีความสมดุลกัน ดังนั้นจึงต้องอาศัยแหล่งพลังงานจากภายนอกมาช่วยกระตุ้นทำให้เกิดพลาสมาขึ้น ในทางปฏิบัติจะใช้สนามไฟฟ้าเป็นแหล่งกำเนิดพลังงานซึ่งสามารถทำให้อนุภาคที่มีประจุเท่านั้นเกิดการเคลื่อนที่ได้ โดยสมบัติของพลาสมาที่ส่งผลต่อกระบวนการในการทำความสะอาด ได้แก่ ความหนาแน่นของพลาสมา

2.1.1 ความหนาแน่นของพลาสมา [1,2]

พลาสมามีส่วนประกอบที่เป็นไอออน อิเล็กตรอน และอะตอมที่ยังไม่ถูกทำให้แตกตัวเป็นไอออน (อนุภาคที่เป็นกลางทางไฟฟ้า) รวมกันอยู่ โดยที่พลาสมาจะมีความหนาแน่นขององค์ประกอบต่าง ๆ แตกต่างกัน ถ้าพลาสมามีความหนาแน่นของอิเล็กตรอน (Plasma electron density) ความหนาแน่นของไอออน (Plasma ion density) และความหนาแน่นของอนุภาคที่เป็นกลาง (Neutral particle density) ความหนาแน่นของอนุภาคทั้งสามนี้จะเป็นตัวบ่งชี้ถึงเปอร์เซ็นต์การแตกตัวเป็นไอออน โดยเปอร์เซ็นต์การแตกตัวเป็นไอออน เท่ากับ

$$\frac{n_i}{(n_i + n_n)} \times 100 \quad \% \quad (2.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ (n_i, n_n) ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าเปอร์เซ็นต์การแตกตัวเป็นไอออนมีค่ามากกว่า 10 % ถือว่าก๊าซนั้นถูกทำให้แตกตัวเป็นไอออนในปริมาณที่มาก ดังนั้นในการพิจารณาพฤติกรรมของตัวกลางต้องพิจารณาผลของพลาสมาเป็นหลัก แต่ถ้าเปอร์เซ็นต์การแตกตัวเป็นไอออนมีค่าน้อยกว่า 1 % จะต้องพิจารณาผลของแรงปฏิกิริยาอันเนื่องจากอนุภาคที่เป็นกลางทางไฟฟ้าด้วย

2.1.2 กระบวนการเกิดอนุภาคที่มีประจุ

พลาสมาเกิดขึ้นได้โดยการทำให้อะตอมที่เป็นกลางเกิดการแตกตัวซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การแตกตัวเป็นไอออนโดยแสง (Photo ionization) และ การชนด้วยอิเล็กตรอน (Electron impact) เป็นต้น เมื่ออะตอมหรือโมเลกุลของก๊าซได้รับพลังงานเพียงพอ อิเล็กตรอนจะหลุดออกจากอะตอม ขบวนการนี้เรียกว่า การแตกตัวเป็นไอออน (Ionization) ถ้าอัตราการเกิดของอิเล็กตรอนอิสระเท่ากับหรือมากกว่าอัตราการสูญเสีย แสดงว่ามีพลาสมาเกิดขึ้น พลังงานน้อยที่สุดที่ทำให้อิเล็กตรอนตัวนอกสุดหลุดออกจากอะตอม เรียกว่า พลังงานการแตกตัวเป็นไอออน (Ionization energy) ในกรณีที่ของแข็งได้รับพลังงานแล้วอิเล็กตรอนหลุดออกจากผิวของของแข็งจะเรียกขบวนการนี้ว่า การปลดปล่อยอิเล็กตรอน (Electron emission) และพลังงานที่น้อยที่สุดที่ทำให้อิเล็กตรอนหลุดได้ เรียกว่า ฟังก์ชันงาน (Work function) การแตกตัวเป็นไอออนและการปลดปล่อยอิเล็กตรอนเป็นปรากฏการณ์ที่สำคัญในการสร้างพลาสมา ปรากฏการณ์ทั้งสองสามารถแบ่งตามขบวนการเกิดได้ มีดังนี้ [2]

2.1.2.1 การแตกตัวเป็นไอออนโดยการชน

เมื่ออิเล็กตรอน ไอออน หรือ อะตอมที่เป็นกลางวิ่งเข้าชนอะตอมใด ๆ ด้วยความเร็วค่าหนึ่ง จะมีการแลกเปลี่ยนพลังงานซึ่งกันและกัน ถ้าหลังการชนอะตอมที่ถูกชนไม่อยู่ในสถานะถูกกระตุ้น (Excitation) หรือไม่ถูกทำให้แตกตัวเป็นไอออน การชนในลักษณะนี้จะเป็นการชนแบบยืดหยุ่น (Elastic collision) และในทางกลับกันถ้าอะตอมของก๊าซที่ถูกชนอยู่ในสถานะที่ถูกกระตุ้นหรือทำให้แตกตัวเป็นไอออน การชนในลักษณะนี้ก็จะเป็นการชนแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic collision)

ในกรณีที่อนุภาคที่เข้าชนเป็นอิเล็กตรอน ถ้าการชนเป็นผลให้อะตอมที่ถูกชนเกิดการแตกตัวเป็นไอออน ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การแตกตัวเป็นไอออนแบบการชนด้วยอิเล็กตรอน ซึ่งในกรณีนี้อิเล็กตรอนต้องมีพลังงานจลน์มากกว่าหรือเท่ากับพลังงานการแตกตัวเป็นไอออนของอะตอมนั้นคือ

$$\frac{1}{2}mv^2 \geq W_i \quad (2.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ m คือ มวลของอิเล็กตรอน

v คือ ความเร็วของอิเล็กตรอน

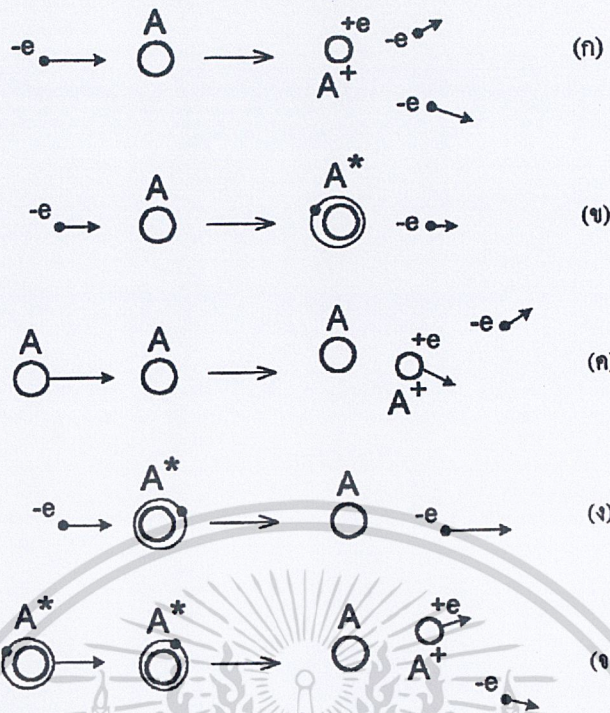
W_i คือ พลังงานการแตกตัวเป็นไอออนของอะตอม

หลังการชนอิเล็กตรอนที่เข้าชนจะมีพลังงานจลน์ลดลง อิเล็กตรอนที่หลุดออกจากอะตอมจะมีพลังงานจลน์ค่าหนึ่ง ดังรูปที่ 2.1 (ก) ในกรณีการชนแบบนี้พลังงานจลน์ของอะตอมที่ถูกทำให้แตกตัวเป็นไอออนจะไม่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากอะตอมมีมวลมากเมื่อเทียบกับมวลของอิเล็กตรอนในบางกรณีอะตอมที่ถูกชนจะไม่ถูกทำให้แตกตัวเป็นไอออนเพียงแต่อยู่ในสถานะถูกกระตุ้นเท่านั้น ดังในรูปที่ 2.1 (ข) ถ้าก่อนที่อะตอมนี้จะกลับเข้าสู่สถานะพื้น (Ground state) มีอิเล็กตรอนอีกตัวหนึ่งเข้าชนอาจเป็นผลให้อะตอมนั้นถูกทำให้แตกตัวเป็นไอออนได้ การแตกตัวเป็นไอออนแบบนี้เรียกว่า การแตกตัวเป็นไอออนแบบขั้น (Step ionization) กรณีนี้เป็นไปได้ถ้าอิเล็กตรอนที่เข้าชนมีความหนาแน่นสูงและสถานะถูกกระตุ้นของอะตอมเป็นสถานะกึ่งเสถียร (Metastable excited state) ซึ่งมีช่วงชีวิต (Life time) ยาวกว่าสถานะถูกกระตุ้นปกติ

การแตกตัวเป็นไอออนอาจเกิดจากการชนด้วยอะตอมที่เป็นกลางก็ได้ ถ้าอะตอมที่เข้าชนมีพลังงานจลน์มากพอ หลังการชนจะมีการเปลี่ยนแปลงพลังงานและโมเมนตัม ทำให้อะตอมที่ถูกทำให้แตกตัวเป็นไอออนและอิเล็กตรอนที่หลุดออกมามีพลังงานจลน์ค่าหนึ่ง ในขณะที่อะตอมที่เข้าชนจะมีพลังงานจลน์เป็นศูนย์ ดังในรูปที่ 2.1 (ค)

ถ้าอะตอมที่ถูกชนอยู่ในสถานะถูกกระตุ้นอยู่ก่อนแล้ว กรณีอะตอมหลังถูกชนในรูปที่ 2.1 (ข) หลังจากการชนอะตอมที่ถูกชนจะเป็นกลางและอิเล็กตรอนเข้าชนจะมีพลังงานจลน์สูงขึ้น ดังในรูปที่ 2.1 (ง) แต่ถ้าอะตอมที่ถูกชนอยู่ในสถานะที่ถูกกระตุ้นอยู่ก่อนแล้วนั้น ถูกชนด้วยอะตอมที่อยู่ในสถานะถูกกระตุ้นเช่นกัน หลังจากการชนอะตอมที่เข้าชนจะถ่ายเทพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ให้แก่อะตอมที่ถูกชนทำให้อะตอมที่เข้าชนเป็นกลาง ในขณะที่อะตอมที่ถูกชนจะถูกทำให้แตกตัว ดังในรูปที่ 2.1 (จ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 การชนของอิเล็กตรอนและอะตอม โดยที่ A คือ อะตอมที่เป็นกลาง, A⁺ คือ อะตอมที่ถูกทำให้แตกตัวเป็นไอออนบวก และ A* คือ อะตอมที่สถานะถูกกระตุ้น

2.1.2.2 การแตกตัวเป็นไอออนโดยแสง (Photo-ionization)

เมื่ออะตอมดูดกลืนโฟตอนจะส่งผลให้อิเล็กตรอนมีการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานจากระดับต่ำกว่าไปยังระดับพลังงานที่สูงกว่าและอะตอมนี้จะอยู่ในสถานะที่ถูกกระตุ้น ในทางกลับกันถ้าอิเล็กตรอนในอะตอมที่ถูกกระตุ้นเปลี่ยนระดับพลังงานจากระดับที่สูงกว่ามายังระดับพลังงานที่ต่ำกว่าจะปลดปล่อยโฟตอนออกมา กระบวนการดังกล่าวสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$h\nu + A \rightleftharpoons A^* \tag{2.3}$$

เมื่อ A คือ อะตอมที่เป็นกลาง

A* คือ อะตอมที่ถูกกระตุ้น

h คือ ค่าคงตัวของพลังค์ มีค่าเท่ากับ 6.63×10^{-34} จูล

v คือ ความถี่ของแสง

ถ้าโฟตอนมีพลังงานมากพอ และถูกดูดกลืนโดยอะตอมที่เป็นกลาง อะตอมนั้นก็จะอยู่ในสถานะถูกกระตุ้น หรือเกิดการแตกตัวเป็นไอออนได้ ถ้า

$$h\nu \geq W \tag{2.4}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ W คือ ระดับพลังงานที่ทำให้เกิดการกระตุ้นหรือเกิดการแตกตัวเป็นไอออนซึ่งสามารถเขียนได้ว่า

$$\lambda \leq \frac{ch}{W_e} \quad \text{สำหรับการกระตุ้น} \quad (2.5)$$

$$\text{และ } \lambda \leq \frac{ch}{W_i} \quad \text{สำหรับการแตกตัวเป็นไอออน} \quad (2.6)$$

เมื่อ W_e คือ พลังงานการกระตุ้นของอะตอม

W_i คือ พลังงานการแตกตัวเป็นไอออนของอะตอม

h คือ ค่าคงที่ของพลังค์

c คือ ความเร็วแสง มีค่าเท่ากับ $2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$

λ คือ ความยาวคลื่นของโฟตอนที่ตกกระทบ

ในกรณีที่พลังงานของโฟตอนมีค่ามากกว่าพลังงานที่ต้องใช้ในการแตกตัวเป็นไอออน พลังงานส่วนเกินของโฟตอนนี้จะเปลี่ยนเป็นพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอน ซึ่งอิเล็กตรอนที่หลุดออกจากอะตอมด้วยวิธีการนี้เรียกว่า โฟโตอิเล็กตรอน (Photoelectron)

2.2 การกำเนิดของพลาสมา (Plasma Generation)

2.2.1 การกระตุ้นการเกิดพลาสมาด้วยคลื่นความถี่

สำหรับพลาสมาที่เกิดจากการกระตุ้นด้วยคลื่นความถี่ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 2 ความถี่ที่นิยมใช้ได้แก่ ความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ 2.45 GHz กับ คลื่นความถี่วิทยุ 13.56 MHz ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้ในโครงการพิเศษเล่มนี้ โดยแหล่งกำเนิดพลังงานเป็น Radio Frequency (RF) ซึ่ง RF source ที่ใช้กันโดยทั่วไป จะกำเนิดความถี่ 13.56 MHz และ field strength 10 V/cm โดยถ้ามี electron เคลื่อนที่อยู่ภายใต้ อิทธิพลของสนามไฟฟ้าดังกล่าวในช่วงเวลา $T/4$ อิเล็กตรอนนั้นจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว $2.1 \times 10^8 \text{ cm. sec}^{-1}$ แอมพลิจูด 2.42 cm ซึ่งจะทำให้อิเล็กตรอนนั้นดูดกลืนพลังงานจากแหล่งกำเนิด $\sim 11.3 \text{ eV}$ เท่านั้น ซึ่งไม่เพียงพอต่อการทำให้อะตอมก๊าซอาร์กอน (IE 15.7 eV) เกิดการแตกตัวเป็นไอออนได้ โดยการแตกตัวของไอออนด้วย RF source เกิดขึ้นเนื่องจากอิเล็กตรอนนั้นสามารถสะสมพลังงานได้เนื่องจาก RF source เป็น AC source โดยเมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้า ถ้าในจังหวะที่สนามไฟฟ้าเกิดการเปลี่ยนทิศพอดีกับการที่ electron ชนกับอะตอมแบบยืดหยุ่นจะทำให้ อิเล็กตรอนนั้นเคลื่อนย้อนกลับในทิศทางเดิมและเป็นทิศทางสวนกับสนามไฟฟ้าเช่นเดิม จึงทำให้ อิเล็กตรอนมีพลังงานเพิ่มขึ้นอีก และเมื่ออิเล็กตรอนมีพลังงานมากพอหรือมากกว่า ionization

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

energy ของอะตอม ถ้าอิเล็กตรอนเคลื่อนที่เข้าชนกับอะตอมและเป็นการชนแบบไม่ยืดหยุ่นจะทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออน โดยช่วงความดันที่เหมาะสมนั้นอยู่ในช่วง $10^{-3} - 1$ mbar

จากที่กล่าวมา เห็นได้ว่า กลไกการเกิดพลาสมานั้นก็จะเกิดจากการชนของอิเล็กตรอนที่ถูกเร่ง และทำให้อะตอมเกิดการแตกตัวเป็นไอออนเช่นเดียวกันกับแบบแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงโดยอาศัยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งการที่จะรักษาระดับการเกิดพลาสมาให้เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องต่อไปนั้นจะต้องพิจารณาถึงอนุภาคที่มีประจุ และกลไกการสูญเสียพลังงานที่เกิดขึ้นภายในพลาสมานั้นด้วย ดังนั้นการอธิบายและศึกษาสมบัติของแหล่งกำเนิดพลาสมาด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจึงจำเป็นต้องศึกษาถึงกระบวนการที่เกี่ยวข้องซึ่งได้แก่ การเกิดอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และการถ่ายโอนพลังงานระหว่างอิเล็กตรอนกับอะตอมของแก๊ส

2.3 การทำความสะอาดพื้นผิวของสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor Surface Cleaning)

ในทางอุตสาหกรรมการผลิตอุปกรณ์หรือสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ กระบวนการทำความสะอาดแผ่นเวเฟอร์ของสารกึ่งตัวนำถือว่าเป็นกระบวนการสำคัญ โดยมีจุดประสงค์หลัก คือ เพื่อเป็นการกำจัดสิ่งปนเปื้อนออกไปโดยปราศจากการทำลายผิวหน้าของแผ่นเวเฟอร์นั้น วิธีการทำความสะอาดสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท หลัก ๆ คือ การทำความสะอาดแบบเปียก (Wet cleaning) ซึ่งเป็นกระบวนการทางเคมี เช่น RCA cleaning, Ohmi cleaning, IMEC cleaning, SC1, SC2 เป็นต้น และการทำความสะอาดแบบแห้ง (Dry cleaning) เช่น การทำความสะอาดพื้นผิวด้วยลำไอออน การทำความสะอาดพื้นผิวด้วยพลาสมา โดยการเลือกใช้วิธีการทำความสะอาดให้เหมาะสมขึ้นกับชนิดของสิ่งปนเปื้อนที่ต้องการกำจัดและต้องการความสะอาดมากน้อยเพียงใด

2.3.1 สารปนเปื้อน (Contaminants)

สารปนเปื้อนบนพื้นผิวสารกึ่งตัวนำที่มีผลถึงความล้มเหลวในการผลิตสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภท ได้แก่

1) ฝุ่นผง (particles)

ฝุ่นผงที่ตกค้างอยู่บนพื้นผิว จะรบกวนกระบวนการสร้างชั้นของสารไวแสงและกระบวนการปลูกฟิล์ม อนุภาคของฝุ่นอาจทำให้เกิดจากลัดวงจรหรือเปิดวงจรของตัวนำได้

2) โลหะ (metal)

โลหะตกค้างบนพื้นผิวจะลดช่วงชีวิตของพาหะข้างน้อยในสารกึ่งตัวนำ ลดศักยภาพเบรกดาวน และทำให้เกิดการรั่วที่รอยต่อ โลหะปนเปื้อนอาจมาจากเครื่องยิงฝังไอออน (ion implanter) และจากเครื่องกัดผิวด้วยพลาสมา (plasma etching equipment)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) สารอินทรีย์

สารอินทรีย์ทำให้ความเป็นฉนวนของชั้นออกไซด์ลดลงและทำให้เกิดจุดบกพร่องบนฟิล์มที่ปลูกได้ สารอินทรีย์ปนเปื้อนซึ่งได้แก่ สารประเภทไฮโดรคาร์บอน อาจมาจากอากาศและก๊าซที่ปล่อยจากพลาสติกที่ใช้เป็นหีบห่อขณะขนส่ง เป็นต้น

4) ออกไซด์โดยธรรมชาติ (native oxide)

ออกไซด์ที่เกิดขึ้นโดยธรรมชาติบนสารกึ่งตัวนำจะมีคุณภาพต่ำ ทำให้เกรดของสิ่งประดิษฐ์มีคุณภาพต่ำลง ออกไซด์จะเกิดขึ้นบนพื้นผิวสารกึ่งตัวนำอย่างรวดเร็วถ้าไม่มีการป้องกันที่ถูกต้อง

2.3.2 การทำความสะอาดพื้นผิวด้วยการล้างทางเคมี (Chemical Cleaning)

กระบวนการทำความสะอาดแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์ทางเคมีอย่างมีระบบถูกพัฒนาขึ้นใช้ที่บริษัท RCA (Radio Corporation of America) ตั้งแต่ปี 1965 และเรียกกระบวนการทำความสะอาดนี้ว่ากระบวนการ RCA เป็นกระบวนการทำความสะอาดที่ใช้กันมากที่สุดในเชิงอุตสาหกรรม จะใช้ทำความสะอาดแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์ก่อนกระบวนการผลิต กระบวนการ RCA แบบดั้งเดิมมีขั้นตอนด้วยกันทั้งหมด 4 ขั้นตอน ประกอบด้วย Standard Clean 1 (SC1) ล้างด้วยน้ำปลอดประจุ Standard Clean 2 (SC2) และล้างด้วยน้ำปลอดประจุพร้อมอบให้แห้ง โดยขั้นตอน SC1 เป็นการกำจัดฝุ่นผงและสารอินทรีย์ตกค้าง SC1 ทำความสะอาดพื้นผิวโดยการสร้างฟิล์มของไฮดรอกไซด์ (hydrous oxide film) ซึ่งทำให้เกิดความขรุขระขึ้นบนพื้นผิวเป็นผลให้พื้นผิวเปลี่ยนจากแบบไม่ดูดซึมน้ำเป็นแบบดูดซึมน้ำได้ ส่วนขั้นตอน SC2 จะเป็นการกำจัดสิ่งปนเปื้อนที่เป็นโลหะตกค้าง ในปัจจุบันมีการเพิ่มขั้นตอนการกำจัดออกไซด์ ด้วยสารละลาย กรดไฮโดรฟลูออริก (HF) 49% และน้ำ (H₂O) ในอัตราส่วน 1:50 ที่อุณหภูมิห้อง เป็น เวลา 10 วินาที ซึ่งการกัดด้วยกรดไฮโดรฟลูออริกนั้น จะทิ้งคาร์บอนไว้บนพื้นผิว

ประสิทธิภาพของการทำความสะอาดด้วยการล้างทางเคมีขึ้นอยู่กับปัจจัย 2 ประการ คือ ชนิดของผิวหน้าที่จะทำความสะอาด และชนิดของสิ่งสกปรกที่อยู่บนผิวหน้านั้น ก่อนเริ่มกระบวนการสร้างสิ่งประดิษฐ์ลงบนผิวหน้าของแผ่นเวเฟอร์ ผิวหน้าของแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์อาจจะเป็นผิวหน้าของซิลิกอนที่ถูกปกคลุมสารปนเปื้อนประเภทสารอินทรีย์ หรืออาจถูกปกคลุมด้วยชั้นของออกไซด์ ส่วนแผ่นเวเฟอร์ที่ผ่านขบวนการผลิตแล้วพื้นผิวจะมีชั้นบาง ๆ ของโลหะปกคลุมอยู่ ซึ่งทำให้วิธีการทำความสะอาดของแผ่นเวเฟอร์ในกรณีทั้งสองจะมีความแตกต่างกัน ซึ่งพื้นผิวของวัสดุที่ต้องการทำความสะอาดด้วยการล้างทางเคมี แบ่งได้เป็น 2 ลักษณะ คือแบบเปียกน้ำได้ (hydrophobic) และแบบไม่เปียกน้ำ (hydrophilic) ซึ่งเมื่อพื้นผิวทั้งสองสัมผัสกับน้ำมัมสัมผัสมีค่ามากกว่า 90 องศา แต่ถ้ามุมสัมผัสของโมเลกุลน้ำมีค่าน้อยกว่า 90 องศา จัดว่าเป็นผิวหน้าแบบเปียกน้ำได้ โดยผิวหน้าแบบเปียกน้ำได้ อย่างเช่น ผิวหน้าของ ซิลิกอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็น ผิวหน้าที่สามารถทำให้เปียกน้ำได้ จึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำมาใช้เพื่อประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถความสะอาดได้ง่ายด้วยสารละลาย อนุภาคของสิ่งปนเปื้อนบนผิวหน้าแบบนี้จะสามารถหลุดออกมาได้และถูกกำจัดออกไปพร้อมกับสารละลาย สำหรับผิวหน้าของซิลิกอน จัดเป็นแบบไม่เปียกน้ำ ซึ่งผิวหน้าในลักษณะนี้จะทำความสะอาดได้ยากกว่า อนุภาคของสิ่งปนเปื้อนบนผิวหน้าในลักษณะนี้ จะไม่หลุดออกมากับโมเลกุลน้ำ

2.3.3 การทำความสะอาดพื้นผิวด้วยลำไอออน (Ion Sputtering Cleaning)

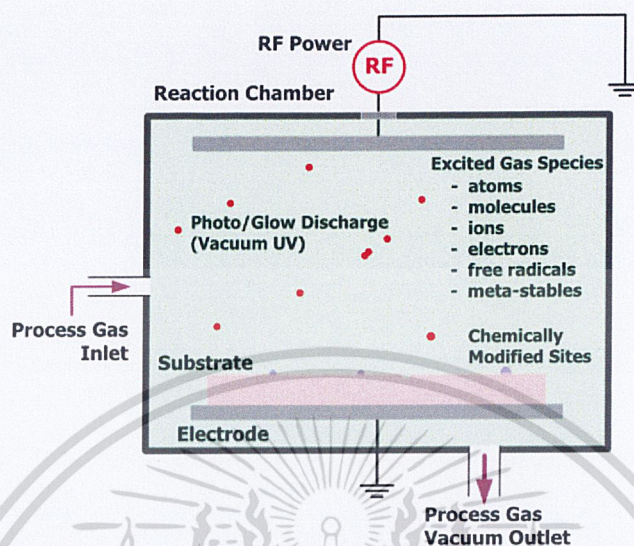
เมื่อลำไอออนพลังงานสูงตกกระทบพื้นผิวของวัสดุ จะทำให้อะตอมที่ผิวหน้าของวัสดุหลุดออกโดยมีการแลกเปลี่ยนพลังงาน และโมเมนตัมระหว่างอนุภาคที่วิ่งเข้าชนกับอะตอมที่ผิววัสดุ เรียกกระบวนการนี้ว่า การสเปตเตอริง กระบวนการนี้อนุภาคที่วิ่งเข้าชนอาจเป็นกลางทางไฟฟ้าหรือมีประจุก็ได้ เมื่อลำไอออนพลังงานสูงตกกระทบพื้นผิวของวัสดุ จะทำให้อะตอมของวัสดุเกิดการเคลื่อนตัวได้ถ้าไอออนมีการถ่ายเทพลังงานให้กับอะตอมมากกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวและอะตอมหรือโมเลกุลที่พื้นผิวจะหลุดออกถ้าได้รับพลังงานจากไอออนมากกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของพื้นผิว อะตอมที่เคลื่อนตัวอยู่ภายใต้พื้นผิวหลังจากถูกชนด้วยไอออน จะชนกับอะตอมอื่น ๆ อย่างต่อเนื่องจนมีอะตอมตามส่วนเคลื่อนที่มาถึงผิววัสดุและหลุดออกจากพื้นผิวในที่สุด

การชนที่ทำให้เกิดการสเปตเตอริงของอะตอมสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ลักษณะ คือการชนแบบครั้งเดียว (single knock-on) การชนแบบต่อเนื่อง (linear cascade) และการชนแบบการแทง (spike) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ในการชนแบบครั้งเดียว ไอออนมีพลังงานพอที่จะถ่ายเทให้กับอะตอมทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอะตอมได้แต่ทั้งไอออนและอะตอมไม่มีพลังงานมากพอที่จะถ่ายเทให้กับอะตอมอื่นได้อีก อะตอมที่เคลื่อนที่นี้ถ้าอยู่ใกล้พื้นผิวมากพอก็สามารถเกิดการสเปตเตอริงได้ ในการชนแบบต่อเนื่องนั้น อะตอมที่ถูกชนและไอออนยังมีพลังงานมากพอที่จะชนและถ่ายเทพลังงานให้อะตอมอื่นได้อย่างต่อเนื่อง แต่มีอะตอมที่กำลังเคลื่อนที่ไม่มากนัก ในขณะที่การชนแบบการแทงจะมีอะตอมที่กำลังเคลื่อนที่จำนวนมาก เมื่อไอออนมีพลังงานต่ำกว่า 1 keV การชนส่วนมากจะเป็นแบบการชนแบบครั้งเดียว เมื่อพลังงานสูงขึ้น การชนส่วนมากจะเป็นแบบต่อเนื่อง ยกเว้นถ้าไอออนเป็นชนิดไอออนหนัก (heavy ion) จะมีการถ่ายเทพลังงานในการชนอย่างรวดเร็ว ซึ่งเป็นการชนแบบการแทง เมื่อไอออนมีพลังงานเพิ่มขึ้นจากพลังงานขีดเริ่มที่ทำให้เกิดการสเปตเตอริงจนเกิดการชนแบบต่อเนื่องแล้ว ยืดของการสเปตเตอริงจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพลังงานของไอออน

2.3.4 การทำความสะอาดพื้นผิวด้วยพลาสมาความดันต่ำ (Low-pressure plasma cleaning)

การกำจัดสารปนเปื้อนบนพื้นผิวด้วยพลาสมาความดันต่ำนั้น ทำได้โดยการป้อนก๊าซเข้าสู่ระบบสุญญากาศแล้วป้อนพลังงานให้กับอะตอมของก๊าซ ตัวอย่างเช่น การทำให้เกิดพลาสมาด้วยคลื่นความถี่วิทยุที่มีโครงสร้างแบบควบประจุที่มีการวางขั้วไฟฟ้าไว้ข้างในซึ่งมีโครงสร้างของระบบเป็นดังรูปที่ 2.2 หลังจากที่ทำกาป้อนก๊าซพร้อมทั้งป้อนแหล่งกำเนิดพลังงานเพื่อทำให้เกิดการแตกตัวของ

อะตอมก๊าซ พื้นผิวจะถูกทำความสะอาดได้จากทั้งกระบวนการทางฟิสิกส์ และกระบวนการทางเคมีของ พลาสมาขึ้นอยู่กับชนิดของก๊าซ และการยึดติดของสารปนเปื้อนบนพื้นผิวนั้น

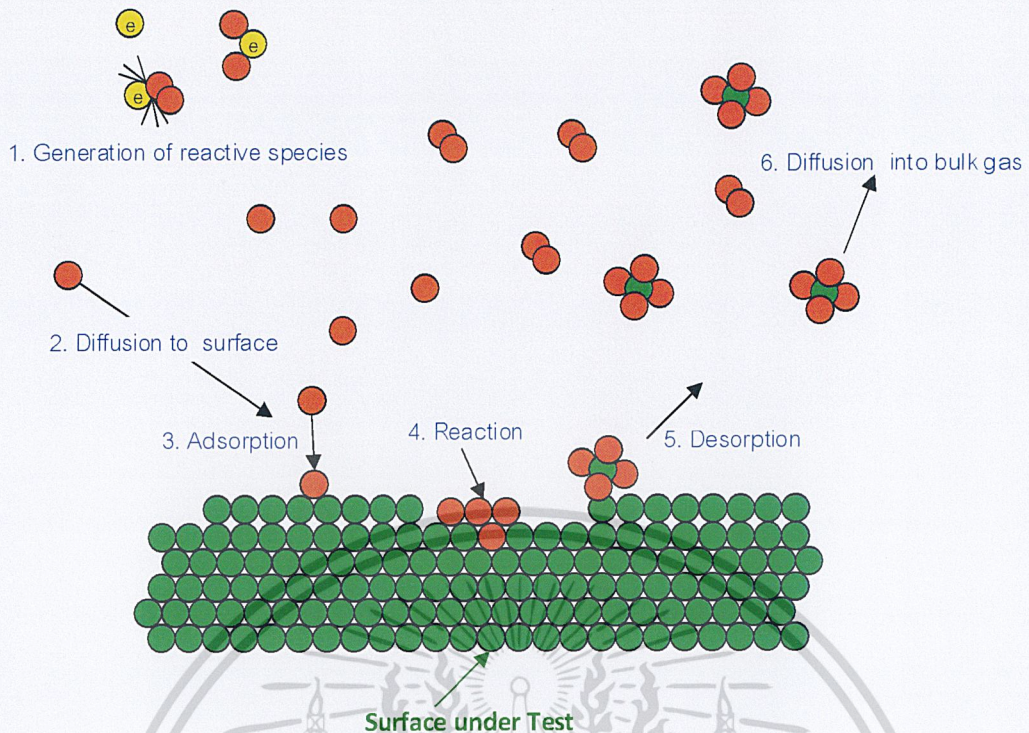


รูปที่ 2.2 โครงสร้างของระบบทำความสะอาดพื้นผิวด้วยพลาสมา

การใช้พลาสมาซึ่งอาจเป็นพลาสมาของก๊าซผสมระหว่างก๊าซอาร์กอนและออกซิเจน หรือ อาร์กอนกับไฮโดรเจน พลาสมาของอาร์กอนจะกำจัดสารปนเปื้อนด้วยกระบวนการสปัตเตอริง ในขณะที่ออกซิเจนในรูปของอนุมูลอิสระจะทำปฏิกิริยาเคมีกับสารปนเปื้อน เช่น คาร์บอนจาก สารประกอบไฮโดรคาร์บอน เกิดเป็นสารประกอบในรูปของก๊าซ เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ หลุดออกจากพื้นผิวและถูกดูดออกจากระบบด้วยปั๊มสุญญากาศ ดังรูปที่ 2.3 ส่วนออกไซด์สามารถกำจัดได้โดยใช้พลาสมาของก๊าซผสมระหว่างก๊าซอาร์กอนและไฮโดรเจน โดยอนุมูลอิสระของไฮโดรเจนจะทำปฏิกิริยากับออกไซด์ ทำให้ออกซิเจนหลุดออกจากพื้นผิวในรูปของไอน้ำ โดยเมื่อ Electron, Ion และ Radical ที่เกิดขึ้นในพลาสมา วิ่งเข้าชนกับพื้นผิวสารตัวอย่างจะทำให้เกิดปรากฏการณ์พื้นฐาน 3 ลักษณะด้วยกัน คือ

- Ion : ทำให้เกิด Sputtering บนพื้นผิว → Plasma Cleaning by Sputtering
- Electron : ทำให้เกิด Heating บนพื้นผิว → Plasma Cleaning by Heating
- Radical : ทำให้เกิด Etching บนพื้นผิว → Plasma Cleaning by Etching

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 Surface and Plasma Interactions

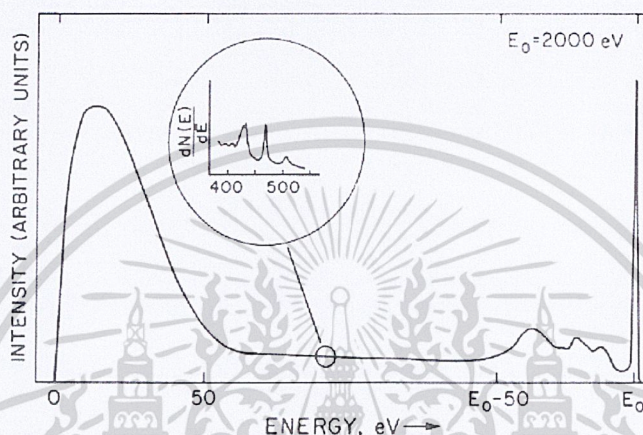
เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดในการทำมาสะอาดพื้นผิวด้วย plasma processing จะเลือกทำให้เกิด sputtering ควบคู่กับ etching การทำความสะอาดพื้นผิวโดย sputtering effect เพียงอย่างเดียว ซึ่งจะต้องเร่งให้ ไอออนวิ่งเข้าชน surface ด้วยพลังงานที่สูงจนส่งผลให้เกิดการทำลายสภาพพื้นผิวมากเกินไป

2.4 โอลิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี (Auger Electron Spectroscopy)

โอลิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี เป็นเทคนิคที่สามารถบอกชนิดของธาตุที่เป็นองค์ประกอบบนพื้นผิวได้โดยการวัดพลังงานของโอลิเล็กตรอน สเปกตรัมที่วัดได้จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณความเข้มกับพลังงานจลน์ของโอลิเล็กตรอน ตัวอย่างสเปกตรัมของโอลิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจากพื้นผิวของทองแดงเมื่อถูกยิงด้วยลำโอลิเล็กตรอนพลังงาน 2 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ แสดงดังรูปที่ 2.4 สัญญาณที่เป็นยอดแหลมทางด้านขวามือมาจากโอลิเล็กตรอนที่กระเจิงแบบยืดหยุ่น (ไม่สูญเสียพลังงาน) ส่วนรูปร่างของสเปกตรัมทางด้านพลังงานต่ำเป็นผลรวมของโอลิเล็กตรอนปฐมภูมิที่สูญเสียพลังงานไปบางส่วนเนื่องจากการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น โอลิเล็กตรอนทุติยภูมิรวมถึงโอลิเล็กตรอนด้วย โดยทั่วไปสเปกตรัมของโอลิเล็กตรอนจะมีขนาดเล็ก ซ่อนอยู่บนแบล็คกราวด์ขนาดใหญ่ของโอลิเล็กตรอนทุติยภูมิ [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทั่วไปสัญญาณไอเจ็ล็กตรอนจะเล็กมากเมื่อเทียบกับแบล็กกราวด์ แต่เนื่องจากสัญญาณของแบล็กกราวด์ซึ่งเป็นสัญญาณจากอิล็กตรอนทุติยภูมิ จะมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก ดังนั้นเทคนิคที่นิยมใช้เพื่อให้สามารถสังเกตสัญญาณไอเจ็ล็กตรอนได้ง่ายขึ้น คือการหาอนุพันธ์อันดับที่ 1 ของสัญญาณไฟฟ้าที่วัดได้ จะได้ฟังก์ชัน $dN(E)/dE$ ซึ่งจะทำให้เพิ่มส่วนของสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงซึ่งได้แก่ สัญญาณไอเจ็ล็กตรอนได้ชัดเจนขึ้นดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 สเปกตรัมของอิล็กตรอนที่หลุดออกจากพื้นผิวของของแข็ง เมื่อถูกยิงด้วยอิล็กตรอนพลังงาน 2 k eV [4]

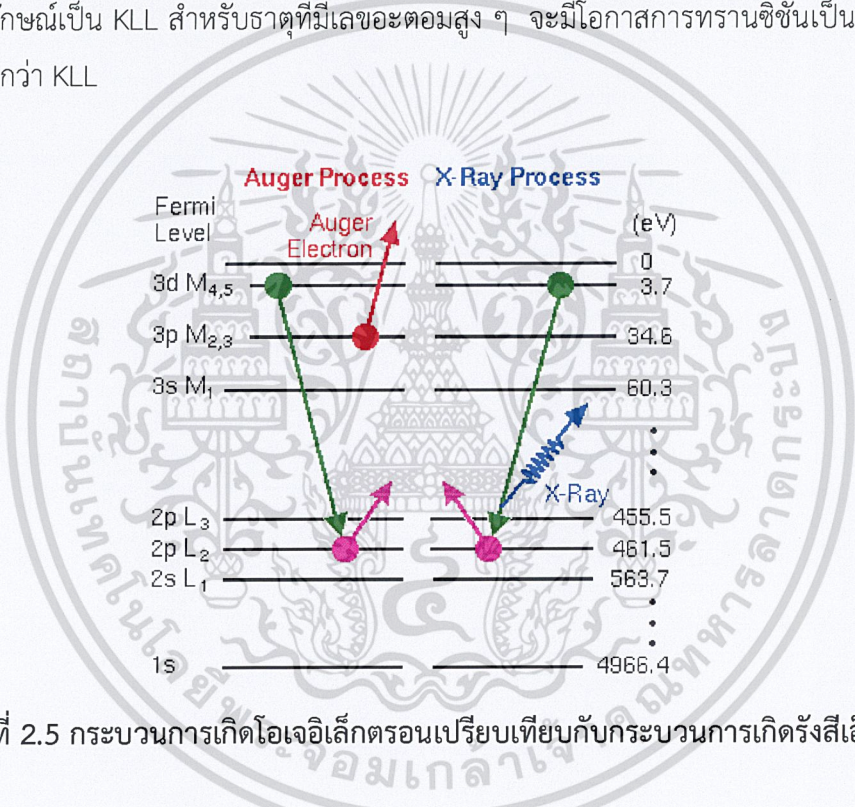
ปัจจุบันไอเจ็ล็กตรอนสเปกโทรสโกปีเป็นเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของพื้นผิวฟิล์มบางและรอยต่อมากที่สุด เนื่องจากเป็นเทคนิคที่มีความไวต่อการวิเคราะห์พื้นผิวสูง (Surface sensitive) การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคไอเจ็ล็กตรอนสเปกโทรสโกปีจะได้ข้อมูลที่มีความลึกระหว่าง 0.5 ถึง 15 nm สามารถวิเคราะห์ธาตุได้ทุกชนิดยกเว้นเพียงไฮโดรเจนและฮีเลียมเท่านั้น มีความไว (sensitivity) ระดับ 100 ppm (0.01%)

2.4.1 กระบวนการเกิดไอเจ็ล็กตรอน

กระบวนการพื้นฐานโดยทั่วไป เริ่มจากการกระตุ้นอะตอมด้วยแสงหรือลำอิล็กตรอนพลังงานสูงเพียงพอที่ทำให้เกิดการไอออไนซ์ (Ionization) อิล็กตรอนชั้นในจะหลุดออกไป ทำให้เกิดเป็นสถานะที่ว่าง อะตอมจะปรับตัวคืนจากสภาวะกระตุ้น โดยอิล็กตรอนจากชั้นพลังงานที่สูงกว่า (อิล็กตรอนวงนอก) เข้ามาแทนสถานะที่ว่างนั้น และทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่เป็นไปได้ 2 ประการ คือ (1) เกิดการปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของโฟตอนที่มีพลังงานอยู่ในย่านรังสีเอ็กซ์ (X-ray fluorescence) ปรากฏการณ์แผ่รังสีเอ็กซ์นี้มีความน่าจะเป็นที่จะเกิดกับธาตุที่มีเลขอะตอมสูงมากกว่า และ (2) พลังงานที่ปลดปล่อยออกมาในรูปของโฟตอนถูกดูดกลืนโดยอิล็กตรอนตัวที่สาม ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งอิเล็กตรอนตัวที่สามารถรับพลังงานนี้แล้วหลุดออกไป เรียกอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยออกจากอะตอมในครั้งนี้อาจเรียกว่า ไอเจ็อิเล็กตรอน โดยปรากฏการณ์ปลดปล่อยไอเจ็อิเล็กตรอนมีความน่าจะเป็นที่จะเกิดกับธาตุที่มีเลขอะตอมต่ำมากกว่า ($Z < 15$ จะเกิดกระบวนการปลดปล่อยไอเจ็อิเล็กตรอนเกือบทั้งหมด) นอกจากเลขอะตอมแล้ว พลังงานของอิเล็กตรอนปฐมภูมิหรือโฟตอนก็มีผลต่อการเกิดปรากฏการณ์ปลดปล่อยไอเจ็อิเล็กตรอนเช่นกัน โดยอิเล็กตรอนปฐมภูมิหรือโฟตอนที่ มีพลังงานน้อยกว่า 2 keV จะมีโอกาสทำให้เกิดการปลดปล่อยไอเจ็อิเล็กตรอนมากกว่า 95%

สำหรับธาตุที่มีเลขอะตอมต่ำ ๆ โอกาสของการทรานซิชัน (Transitions) เมื่อถูกยิงด้วยอิเล็กตรอนปฐมภูมิ จะเกิดขึ้นเริ่มแรกที่อิเล็กตรอนในระดับชั้นเค (K-level) อิเล็กตรอนในระดับชั้นแอล (L-level) จะลงมาแทนสถานะที่ว่างนั้น แล้วอิเล็กตรอนในชั้นแอล อีกตัวหนึ่งจะหลุดออกไป ใช้สัญลักษณ์เป็น KLL สำหรับธาตุที่มีเลขอะตอมสูง ๆ จะมีโอกาสการทรานซิชันเป็น LMM และ MNN มากกว่า KLL



รูปที่ 2.5 กระบวนการเกิดไอเจ็อิเล็กตรอนเปรียบเทียบกับกระบวนการเกิดรังสีเอ็กซ์

กระบวนการเกิดไอเจ็อิเล็กตรอนดังแสดงในรูปที่ 2.5 เป็นการทรานซิชันตามเส้นทาง LMM เปรียบเทียบกับการเกิดรังสีเอ็กซ์ ในสารตัวอย่างที่เป็นไทเทเนียม ซึ่งพลังงานของไอเจ็อิเล็กตรอน คือ 423.2 eV ($E_{Auger} = E_{L2} - E_{M4} - E_{M2}$) และพลังงานของรังสีเอ็กซ์ คือ 457.8 eV ($E_{XV} = E_{L2} - E_{M4}$)

2.4.2 ผลของลำอิเล็กตรอนต่อพื้นผิว

เมื่อลำอิเล็กตรอนพุ่งชนพื้นผิวของสารตัวอย่างทำให้เกิดการกระเจิงแบบยืดหยุ่นและแบบไม่ยืดหยุ่น การกระเจิงแบบยืดหยุ่นจะเกิดขึ้นเมื่อลำอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูง (1 ถึง 30 keV) ตกกระทบบนพื้นผิวของสารตัวอย่าง อิเล็กตรอนเหล่านี้จะสูญเสียพลังงานเพียงเล็กน้อยให้กับอะตอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการแจ้งขึ้นเพื่อการค้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของสารตัวอย่างที่ตกกระทบ อิเล็กตรอนส่วนใหญ่จะกระเจิงกลับ (Back scattering) จากผิวของสารตัวอย่าง

การกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่นมีกลไกการเกิดหลายแบบ ลักษณะการกระเจิงชนิดนี้ อิเล็กตรอนปฐมภูมิจะถ่ายโอนพลังงานจนให้กับอะตอมของสารตัวอย่าง ทำให้เกิดอันตรกิริยากับอะตอมของสารตัวอย่างได้หลายรูปแบบ เช่น

- 1) การกระตุ้นให้เกิดพลาสมอน (Plasmon excitation) มีโอกาสเกิดขึ้นสูง เมื่ออิเล็กตรอนอิสระระหว่างไอออนิกคอร์ ดูดกลืนพลังงานเอาไว้ การกระตุ้นให้เกิดพลาสมอน จะมีการถ่ายโอนพลังงาน ประมาณ 15 eV สู่อิเล็กตรอนตัวอย่าง
- 2) อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electrons) เกิดจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิถ่ายโอนพลังงานให้แก่อะตอมของสารตัวอย่างเมื่ออิเล็กตรอนในสารตัวอย่างได้รับพลังงานสูงกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอะตอม อิเล็กตรอนก็จะหลุดออกจากอะตอมกลายเป็นอิเล็กตรอนทุติยภูมิ โอกาสการเกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมียิ่งขึ้นอยู่กับ ความลึกที่อิเล็กตรอนปฐมภูมิสามารถเคลื่อนที่ผ่านลงไป ในเนื้อสารตัวอย่าง ถ้าความลึกของอิเล็กตรอนปฐมภูมิมัก โอกาสในการเกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิก็มีน้อยลง
- 3) รังสีเอกซ์ต่อเนื่อง (Continuous x-ray) เกิดจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิทำอันตรกิริยากับอะตอมที่บริเวณสนามคูลอมป์ใกล้เคียง เกิดการเปลี่ยนทิศทางและสูญเสียพลังงานอย่างรวดเร็ว จึงคายพลังงานออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งมีพลังงานตั้งแต่ค่าสูงสุดของพลังงานอิเล็กตรอนปฐมภูมิ ก่อนทำอันตรกิริยาถึงค่าพลังงานของอิเล็กตรอนปฐมภูมิหลังทำอันตรกิริยา
- 4) โฟนอน (Phonon) เกิดขึ้นเมื่อมีการกระตุ้นให้เกิดการสั่นของแลตทิซ ซึ่งมีการถ่ายโอนพลังงานของอิเล็กตรอนปฐมภูมิส่วนหนึ่งให้กับสารตัวอย่าง เกิดเป็นความร้อน
- 5) โอเจิเล็กตรอน และรังสีเอกซ์เฉพาะธาตุ (Auger electron and characteristic x-ray) เกิดจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิทำอันตรกิริยากับอะตอมบริเวณชั้นวงโคจรของอิเล็กตรอนในอะตอม ถ้าอิเล็กตรอนได้รับพลังงานสูงกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวก็จะหลุดออกจากวงโคจร ทำให้มีที่ว่างเกิดขึ้น อิเล็กตรอนในชั้นถัดไปก็จะเข้ามาแทนที่แต่ เนื่องจากอิเล็กตรอนในชั้นนอกมีพลังงานมากกว่าจึงต้องลดระดับพลังงานโดยการคายพลังงานให้กลับอิเล็กตรอนอีกตัวหนึ่งซึ่งก็คือโอเจิเล็กตรอน หรือคายพลังงานออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (รังสีเอกซ์)

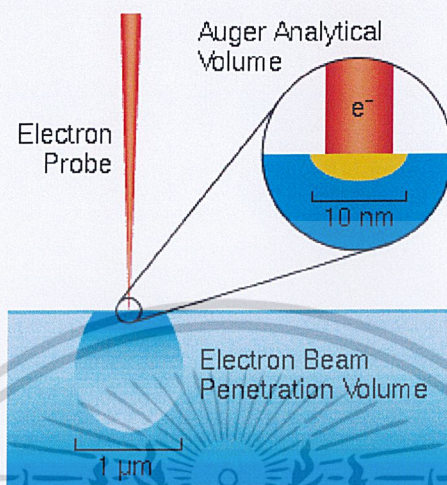
2.4.3 ปริมาตรในการวิเคราะห์โอเจิเล็กตรอน (Auger analytical Volumes)

เมื่อลำอิเล็กตรอนตกกระทบพื้นผิวด้วยปริมาตรขนาดเล็ก ประมาณ 1 ลูกบาศก์ไมโครเมตร

(1×10^{-12} ซีซี) ด้วยปริมาตรขนาดนี้จะมีโอกาสเกิดการแผ่รังสีเอกซ์มากที่สุด โอเจิเล็กตรอนจะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
เกิดขึ้นจากปริมาตรที่เล็กกว่านี้มาก ซึ่งมีค่าประมาณ 3×10^{-19} ซีซี ปริมาตรในการวิเคราะห์ที่สัญญาณ
ไม่วากรณ์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรังสีเอกซ์เพิ่มขึ้นตามพลังงานของลำอิเล็กตรอน และลดลงตามชนิดของสารตัวอย่าง (เมื่อชนิดของธาตุในสารตัวอย่างมีเลขอะตอมสูงขึ้น)



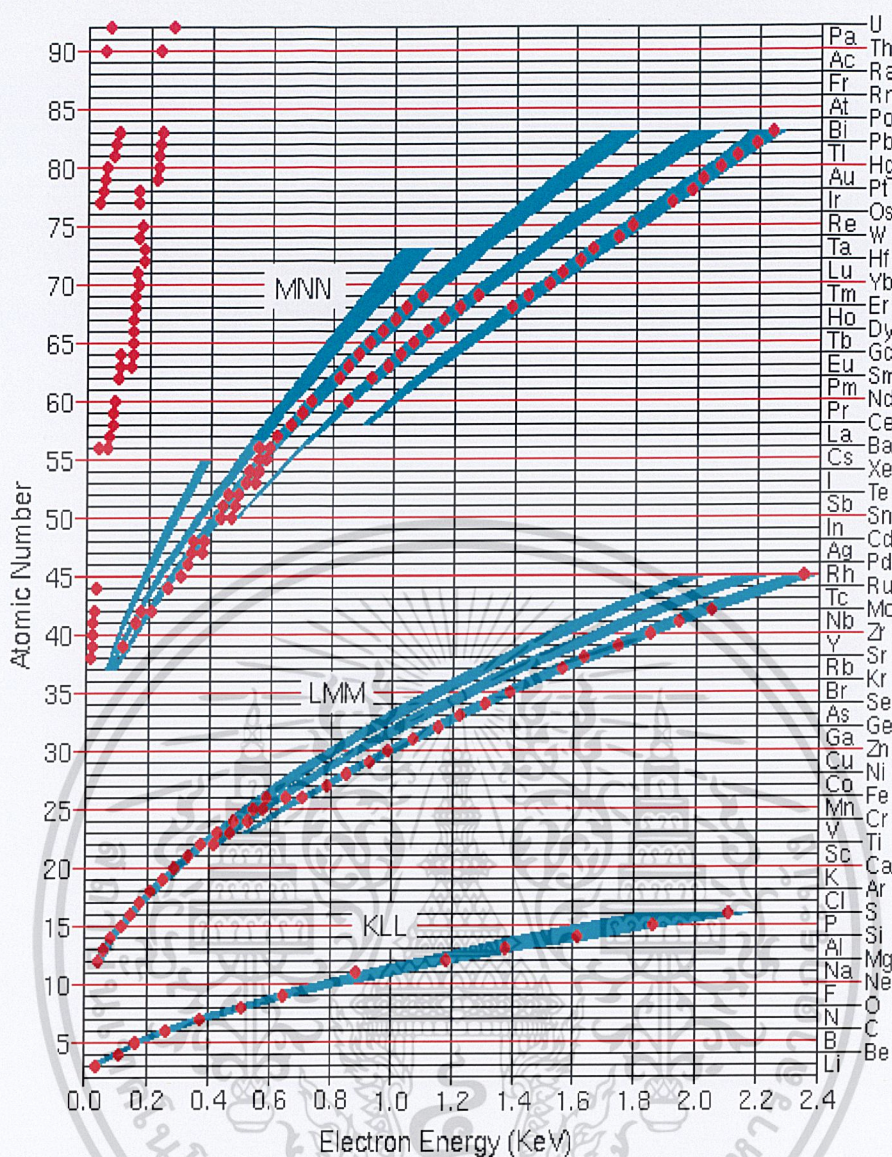
รูปที่ 2.6 ปริมาตรในการวิเคราะห์ไอเจอีเล็กตรอน

ส่วนปริมาตรในการวิเคราะห์ไอเจอีเล็กตรอนขึ้นกับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของลำอิเล็กตรอน ปฐมภูมิ และการหลบหนีเชิงลึก (Escape depth) ของไอเจอีเล็กตรอน ระยะอิสระก่อนชนเฉลี่ย (Mean free paths) ของอิเล็กตรอนขึ้นอยู่กับพลังงานของอิเล็กตรอน และชนิดของสารตัวอย่าง ระยะก่อนชนเฉลี่ยต่ำที่สุดมีค่าประมาณ 0.5 nm เมื่ออิเล็กตรอนมีพลังงานประมาณ 80 eV

2.4.4 พลังงานของไอเจอีเล็กตรอน

การวิเคราะห์เชิงคุณภาพด้วยไอเจอีเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี เป็นการบอกชนิดของธาตุที่สอดคล้องกับตำแหน่งของพีกสัญญาณในสเปกตรัม รูปที่ 2.7 แสดงการทรานซิชันของไอเจอีเล็กตรอน พลังงานของไอเจอีเล็กตรอนแบ่งเป็นชั้นในตารางอย่างกว้าง ๆ สำหรับธาตุในตารางธาตุ เริ่มจาก Li ซึ่งแสดงพลังงานในการทรานซิชันแบบ KLL LMM และ MNN รวมถึงการทรานซิชันในระดับสูง สำหรับธาตุที่อยู่เหนือซีเซียมขึ้นไป จุดสีแดงแสดงพีกที่มีลักษณะเฉพาะและเด่นชัดที่สุด ส่วนแถบสีเขียวแสดงโครงสร้างแบบหยาบ ๆ ของพีกสัญญาณที่มีความเข้มข้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 การทรานซิชันหลักของโอเจอิเล็กทรอนิกส์

2.4.5 ประโยชน์ของโอเจอิเล็กทรอนิกส์สเปกโทรสโกปี

โอเจอิเล็กทรอนิกส์สเปกโทรสโกปีเป็นเทคนิคที่ให้ข้อมูลเป็นธาตุองค์ประกอบบนพื้นผิวของวัสดุเช่น ฟิล์มบาง และชั้นรอยต่อ ชนิดของสารตัวอย่างเป็นได้ทั้ง วัสดุสารกึ่งตัวนำดิบ (Raw semiconductor) และวัสดุอิเล็กทรอนิกส์ที่เสร็จสมบูรณ์แล้ว วัสดุทั้งหลายเหล่านี้ประกอบด้วยชั้นบาง ๆ ตัวอย่างเช่น โอเจอิเล็กทรอนิกส์สเปกโทรสโกปี สามารถแยกแยะระหว่าง Si และ SiO₂ บนแผ่นซิลิกอนที่หนา 10 นาโนเมตรได้ เนื่องจากปริมาณในการวิเคราะห์โอเจอิเล็กทรอนิกส์มีค่าต่ำ ประมาณ 3×10^{-19} ซีซี จึงสามารถวิเคราะห์เฉพาะส่วนเล็ก ๆ ของวัสดุอิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างเสร็จสมบูรณ์แล้ว

หรือสมบูรณ์เป็นบางส่วนได้ และการวิเคราะห์ปริมาณขนาดเล็กระดับไมโครเมตรเพื่อแยกแยะ และบอกชนิดของธาตุบนพื้นผิววัสดุที่เป็นเนื้อเดียว (Homogeneous) ก็สามารถวัดได้ เช่น การตรวจสอบไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พื้นผิวที่แตกร้าวและมีปัญหา ซึ่งอาจจะพบธาตุแปลกปลอมอยู่บนขอบของเกรน (Grain boundaries) เป็นต้น

2.4.6 ข้อจำกัดของไอเจอิเล็กทรอนิกส์สเปกโทรสโกปี

ถึงแม้ไอเจอิเล็กทรอนิกส์สเปกโทรสโกปี จะมีประโยชน์และใช้กันอย่างกว้างขวาง แต่ไอเจอิเล็กทรอนิกส์สเปกโทรสโกปีก็มีข้อจำกัด นั่นคือ ไม่สามารถตรวจวัดไฮโดรเจน และฮีเลียม ไม่สามารถวิเคราะห์เชิงลึกโดยที่ไม่ทำลายพื้นผิวได้ ต้องการสารตัวอย่างที่มีขนาดเล็กซึ่งต้องเข้าสภาวะที่เป็นสุญญากาศสูงได้ดี สารตัวอย่างที่ไม่นำไฟฟ้าอาจทำให้เกิดการสะสมประจุ ในระหว่างการยิงด้วยลำอิเล็กตรอนทำให้วิเคราะห์ได้ยาก การวิเคราะห์เชิงปริมาณของไอเจอิเล็กทรอนิกส์สเปกโทรสโกปี ขึ้นอยู่กับเครื่องมือ สถานะทางเคมีและปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับสารตัวอย่าง

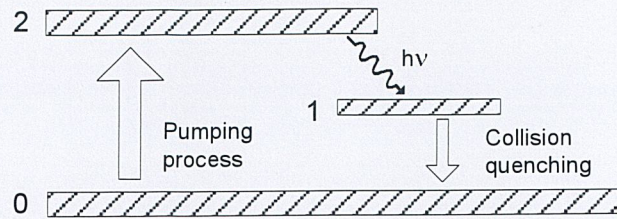
2.5 สเปกโทรสโกปีของการเปล่งแสง (Optical Emission Spectroscopy: OES)

พลาสมาไม่ว่าจะกำเนิดขึ้นโดยวิธีใดจะมีการเปล่งแสงที่ความยาวคลื่นบางช่วงที่เป็นค่าเฉพาะตัวเสมอ พลาสมาที่ใช้ในกระบวนการทำความสะอาดสามารถเกิดขึ้นได้จากทั้งอะตอมที่ใช้ในการทำความสะอาด (Etchants) และอะตอมที่เกิดจากผลของการทำความสะอาด (Etch products) ดังนั้นการตรวจวัดสมบัติของพลาสมาที่ใช้ในกระบวนการทำความสะอาดรวมทั้งอัตราการเกิดปฏิกิริยาพลาสมาเคมีระหว่างพลาสมาและพื้นผิวของสารตัวอย่างสามารถทำได้โดยการศึกษาสเปกตรัมของพลาสมา เทคนิคนี้เรียกว่า สเปกโทรสโกปีของการเปล่งแสง

การศึกษสมบัติของพลาสมาโดยการวัดสเปกตรัมของพลาสมาเป็นเทคนิคที่ไม่มีการรบกวนพลาสมา (Non-intrusive) และไม่มีอิทธิพลต่อตัวอย่างที่ศึกษา สามารถวัดได้ตลอดเวลาของกระบวนการทำความสะอาด โดยการวัดสเปกตรัมการเปล่งแสงของพลาสมาสามารถบอกค่าพารามิเตอร์หลาย ๆ อย่างเช่น อุณหภูมิของอิเล็กตรอน อุณหภูมิของก๊าซ ความหนาแน่นของพลาสมา หรือความเข้มข้นของก๊าซที่แตกตัว การตรวจวัดความหนาแน่นของอนุภาคที่จำเป็นต่อกระบวนการในพลาสมา โดยการวัดความเข้มแสงที่ความยาวคลื่นเฉพาะตัวของอนุภาคที่เป็นผลของปฏิกิริยาพลาสมาเคมีจะทำให้ได้ข้อมูลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาและจุดสิ้นสุดของปฏิกิริยาด้วย

การวัดสเปกตรัมของการเปล่งแสงทำงานโดยอาศัยหลักการเปล่งแสงของอะตอมหรือโมเลกุล ซึ่งในตอนแรกนั้นอยู่ที่ชั้น 0 และถูกกระตุ้นเนื่องจากการชนกันระหว่างอิเล็กตรอน อะตอมหรือโมเลกุลของก๊าซที่ชั้น 0 ทำให้เกิดการเปลี่ยนระดับชั้นไปยังชั้น 2 และภายหลังจากอะตอมยังมีการปล่อยโฟตอนออกมาและไปยังชั้น 1 ซึ่งการเปล่งแสงนั้นสัมพันธ์โดยตรงกับฟลักซ์ของโฟตอนที่เปลี่ยนแปลงจากชั้น 2 ไปยังชั้น 1 และยังเกี่ยวข้องกับอัตราการชนของอิเล็กตรอนกับอะตอมหรือโมเลกุลอีกด้วย นอกจากการกระตุ้นที่เกิดจากอิเล็กตรอนแล้ว ยังมีการปลดปล่อยโฟตอนจาก

เอกสระดับชั้นพลังงานที่สูงกว่าประกอบอีกด้วย ดังโดยแอมแกรมในรูปที่ 2.8 อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 กระบวนการเปล่งแสงของอะตอม

โดยความเข้มแสงที่ปลดปล่อยออกมา I_{21} นั้นขึ้นอยู่กับอัตราการกระตุ้นและยังจะแปรผันโดยตรงกับจำนวนอะตอมที่ถูกกระตุ้น N_2 โดย

$$I_{21} = (\eta\Omega/4\pi)A_{21}N_2A_d h\nu \quad (2.7)$$

| | | | |
|-------|----------|-----|--|
| เมื่อ | η | คือ | ประสิทธิภาพของระบบวัด |
| | A_d | คือ | พื้นที่ของตัวตรวจวัดแสง |
| | Ω | คือ | มุมตันที่รองรับช่องรับแสง |
| | A_{21} | คือ | ความน่าจะเป็นในการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนจากสถานะ 2 ไปยังสถานะ 1 |

ยกตัวอย่างพลาสมาของก๊าซอาร์กอนที่มีหลายระดับของชั้นพลังงานย่อย การที่อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นไปในระดับชั้นพลังที่แตกต่างกัน ซึ่งส่งผลต่อสปีนและสภาพชั่วของอิเล็กตรอนในแต่ละระดับชั้นพลังงานย่อยไม่เหมือนกัน และเมื่อมีการปลดปล่อยแสงออก แสงนั้นจะมีความเข้มแสงที่แตกต่างกันเช่น สเปกตรัมตำแหน่งความยาวคลื่น 726.5 นาโนเมตรที่มาจากชั้น $4d_2$ ($J=1$) ที่ความยาวคลื่น 735.3 นาโนเมตรจากชั้น $4d_4$ ($J=3$) และที่ 737.2 นาโนเมตรจากชั้น $4d_4'$ ($J=4$) โดยที่ความเข้มแสงของแต่ละความยาวคลื่นนั้นมีความเข้มที่ไม่เท่ากัน ความเข้มแสงที่เปล่งออกมานั้นขึ้นอยู่กับอัตราการกระตุ้นที่ทำให้การเปลี่ยนระดับชั้น รวมทั้งส่วนที่เกิดจากการสลายตัวย่อย ๆ อีกด้วย และการที่อาร์กอนนั้นมีหลายระดับของชั้นพลังงานย่อย ทำให้มีการเปล่งแสงออกมาหลายช่วง อัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet : UV) แสงในย่านตามองเห็น (Visible light) ไปจนถึงเกือบถึงย่านอินฟราเรด (near Infrared) นอกจากก๊าซอาร์กอนแล้วยังมีก๊าซไฮโดรเจนที่ใช้ในการทำควมสะอาดอีกด้วย แสงที่วัดได้จากไฮโดรเจนพลาสมาจะมีจำนวนของสเปกตรัมไม่มากเท่าของอาร์กอน เนื่องจากอิเล็กตรอนและระดับชั้นพลังงานที่น้อยกว่ามาก

สำหรับพลาสมาของออกซิเจนเส้นสเปกตรัมที่สว่างที่สุดปรากฏที่ความยาวคลื่น 777.2 nm เกิดจากการเปลี่ยนสถานะจากระดับพลังงาน $3p$ ไปยังระดับพลังงาน $3s$ เมื่อนุคลิอิสระของออกซิเจนนี้เกิดปฏิกิริยาเคมีกับคาร์บอนบนพื้นผิวของสารตัวอย่างจะเกิดเป็นสารประกอบคาร์บอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอนีโอกไซด์ในรูปของอนุภาคลิเธียมและจะเปล่งแสงออกมาที่ความยาวคลื่น 519.8 nm ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนระดับพลังงาน

เมื่อพิจารณาอะตอมในพลาสมาที่ถูกกระตุ้นเข้าสู่ระดับชั้นกระตุ้น(i) ด้วยการชนกันระหว่างอะตอมและอิเล็กตรอน ต่อมาอะตอมเหล่านั้นสลายตัวแล้วตกกลับลงมาชั้นที่ต่ำกว่า(j) พลังค์ของโฟตอนของการเปลี่ยนระดับชั้น $i \rightarrow j$ (Φ_{ij}) มีดังสมการ

$$\Phi_{ij} = n_0 n_e \int_0^\infty \sigma_{ij}(E) f(E) \left(\frac{2E}{m_e} \right)^{1/2} dE \quad (2.8)$$

| | | | |
|-------|------------------|-----|---|
| เมื่อ | Φ_{ij} | คือ | พลังค์ของโฟตอน |
| | n_0 | คือ | จำนวนของอะตอมที่สถานะพื้น |
| | n_e | คือ | จำนวนของอิเล็กตรอน |
| | $\sigma_{ij}(E)$ | คือ | ฟังก์ชันของพลังงาน(E) ของอิเล็กตรอนของการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานจาก $i \rightarrow j$ |
| | $f(E)$ | คือ | ฟังก์ชันการกระจายของพลังงานของอิเล็กตรอน |
| | m_e | คือ | มวลอิเล็กตรอน |

ซึ่งฟังก์ชันของพลังงาน(E) ของอิเล็กตรอนของการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานจาก $i \rightarrow j$ สามารถหาได้จากสมการ

$$\sigma_{ij}(E) = \frac{A_{ij}}{\sum_{i < l} A_{il}} \sigma_i(E) \quad (2.9)$$

| | | | |
|-------|------------|-----|---|
| เมื่อ | A_{ij} | คือ | อัตราการเปล่งแสงที่เกิดจากชั้น $i \rightarrow j$ |
| | A_{il} | คือ | อัตราการเปล่งแสงที่เกิดจากชั้น $i \rightarrow l$ |
| | σ_i | คือ | ฟังก์ชันของพลังงาน(E) ของอิเล็กตรอนของระดับชั้นพลังงานจาก i |

นอกจากพลังค์ของโฟตอนที่เกิดจากการกระตุ้นที่สถานะพื้นแล้ว ยังมีพลังค์ที่จากชั้นอื่นรวมอยู่ อีกด้วย (ชั้นกึ่งเสถียร (metastable state) หรือจากระดับชั้นของไอออน) ซึ่งพลังค์ของโฟตอนเหล่านี้ได้มาจากการแผ่กระจายในหลายทิศทางของแต่ละอะตอมในพลาสมา โดยปริมาณประภาที่ทั่วไบนั้นจะขึ้นกับตำแหน่งเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงเชิงพื้นที่ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน และฟังก์ชันการกระจายของพลังงานของอิเล็กตรอน ความเข้มของการเปล่งแสงที่สังเกตเห็นเป็นการรวมกันของพลังค์ของโฟตอนในช่วงที่สามารถมองเห็นได้โดยมุมตันที่รองรับช่องรับแสง ดังนั้นการศึกษาและวิเคราะห์สเปกตรัมการเปล่งแสงของพลาสมา จึงเป็นอีกเครื่องมือที่บ่งบอกได้ถึงความสะดวกของพื้นผิวในเบื้องต้น

ซึ่งผลที่จะได้จากการวิเคราะห์สเปกตรัมของพลาสมาที่เปล่งออกมาว่าเป็นสเปกตรัมของอะตอมของธาตุใด เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า หรือระดับชั้นพลังงานใด เพื่อดูว่าอะตอมของธาตุที่มีอยู่บนพื้นผิวมีการถูกกำจัดออกไปหรือไม่

ไม่ว่ากรณีใดๆ ฟังก์ชัน อีกทั้งยังมีเหตุเปลี่ยนแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

วิธีและขั้นตอนในการดำเนินงานโครงการพิเศษเพื่อทำการพัฒนาระบบการทำความสะอาดพื้นผิวของแผ่นซิลิกอนด้วยพลาสมาคลื่นความถี่วิทยุนั้นจะเริ่มจากการออกแบบและสร้างแหล่งกำเนิดพลาสมา ทดสอบการทำงาน หลังจากที่ได้ระบบพร้อมใช้งานจึงเริ่มขั้นตอนการนำแผ่นซิลิกอนมาทำความสะอาด พื้นผิวของแผ่นซิลิกอนที่ผ่านกระบวนการทำความสะอาดด้วยพลาสมาจะถูกตรวจวัดและวิเคราะห์ความสะอาดบนพื้นผิวด้วยเทคนิคโอเจอีเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงขั้นตอนและวิธีในการทำความสะอาดผิวหน้าของแผ่นซิลิกอนด้วยการสปัตเตอริงด้วยลำไอออนพลังงานสูง โดยนำเทคนิคโอเจอีเล็กตรอนสเปกโทรสโกปีมาใช้ในการวิเคราะห์ระดับความสะอาดผิวหน้าของแผ่นซิลิกอนที่ได้ผ่านกระบวนการทำความสะอาดในลักษณะต่าง ๆ กัน ซึ่งจำเป็นต้องทำภายใต้สภาวะความเป็นสุญญากาศ ดังนั้นในขั้นต้นของการดำเนินงานวิจัยจึงเป็นการติดตั้งเครื่องมือและอุปกรณ์ต่าง ๆ เข้ากับระบบสุญญากาศ โดยเครื่องมือที่มีความสำคัญต่องานวิจัยนี้ที่ต้องทำการติดตั้งเข้ากับระบบสุญญากาศ ได้แก่ ระบบวิเคราะห์พื้นผิวด้วยเทคนิคโอเจอีเล็กตรอนสเปกโทรสโกปีและแหล่งกำเนิดลำไอออนสำหรับสปัตเตอริง หลังจากนั้นเป็นการเตรียมระบบสุญญากาศให้ได้ระดับความดันเหมาะสมต่อการดำเนินงาน โดยระบบสุญญากาศที่ใช้งานวิจัยนี้จะต้องมีสภาวะความเป็นสุญญากาศสูง พร้อมทั้งต้องทำการศึกษาถึงวิธีการใช้งานเครื่องมือ และวิธีการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการวัด ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

3.1 ระบบสุญญากาศ

3.1.1 ระบบปั๊มสุญญากาศ

ทำหน้าที่ดูดอากาศออกจากระบบ จะต้องเลือกขนาดของปั๊มให้มีขนาดเหมาะสม มีความเร็วปั๊มสูงพอที่จะสามารถรักษาความดันให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานได้ ระบบปั๊มสำหรับงานวิจัยนี้ประกอบด้วยปั๊ม 2 ตัว ได้แก่ ปั๊มโรตารี และปั๊มเทอร์โบโมเลกุลาร์

ปั๊มเทอร์โบโมเลกุลาร์สำหรับงานวิจัยนี้เลือกใช้รุ่น Turbovac 361 ของบริษัท Leybold หน้าแปลนของปากปั๊มมีขนาด 8 นิ้วทำความดันได้ต่ำสุดถึง 1×10^{-10} มิลลิบาร์ มีความเร็วปั๊ม 400 ลิตรต่อวินาที สำหรับก๊าซไนโตรเจน ซึ่งเป็นอัตราเร็วของการปั๊มที่ปากของปั๊ม ในการใช้งานจะมีช่องคอเชื่อมระหว่างตัวปั๊มกับแชมเบอร์สุญญากาศเป็นผลให้ความเร็วปั๊มที่แท้จริงที่เรียกว่า ความเร็วปั๊มยังผล (effective pumping speed) ของระบบมีค่าลดลง ซึ่งสามารถคำนวณได้โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

สำหรับงานวิจัยนี้ ท่อต่อระหว่างแชมเบอร์กับปากปั๊มเทอร์โบโมเลกุลาร์มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 146 mm มีความยาว 100 mm จากการคำนวณจะได้ว่าท่อมีค่าความนำ = $12.1 \times D^3 / L = 12.1(14.6^3)/10 = 3766$ ลิตรต่อวินาที

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

$$S_e = 360 \text{ 1/s}$$

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} หาได้จากกราฟคุณลักษณะของปั๊ม (Pump characteristic curve) โดยทั่วไปที่ความดัน 10^{-2} มิลลิบาร์ ความเร็วปั๊มจะมีค่า = 200 1/s ดังนั้น $Q_{max} = (200 \text{ 1/s})(10^{-2} \text{ mbar}) = 2.0 \text{ mbar.1/s}$ สำหรับ CBP เป็นสมบัติของปั๊มเทอร์โบโมเลกุลาร์ที่ต่ออยู่ในกรณีของปั๊มรุ่น Turbovac 361 มีค่า $CBP = 5 \times 10^{-1}$ มิลลิบาร์ ดังนั้น

$$\begin{aligned} S_{rot} &\geq \frac{Q_{max}}{CBP} \\ &\geq \frac{2.0 \text{ mbar.1/s}}{0.5 \text{ mbar}} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน ≥ 4 1/s เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\geq \frac{(4 \text{ 1/s})(3600 \text{ s/hr})}{(1000 \text{ 1/m}^3)}$$

$$\geq 14.4 \text{ m}^3/\text{hr}$$

ดังนั้น จึงเลือกใช้ปั๊มโรตารีรุ่น Trivac D16B ของบริษัท Leybold ซึ่งมีความเร็วปั๊ม 22 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ทำความดันได้ต่ำสุดถึง 1×10^{-4} มิลลิบาร์

3.1.2 แคมเบอร์สุญญากาศ

แคมเบอร์สุญญากาศเป็นบริเวณที่ใช้สำหรับติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการทดลอง จะต้องออกแบบให้มีปริมาตรเหมาะสมกับระบบปั๊มสุญญากาศ และมีรูปร่างเหมาะสมสำหรับที่จะติดตั้งอุปกรณ์ทั้งหมดที่มี รวมถึงอุปกรณ์ที่อาจจะมีในอนาคตด้วย โดยในงานวิจัยนี้แคมเบอร์สุญญากาศทำจากโลหะสแตนเลส มีลักษณะเป็นทรงกระบอกในแนวตั้งมีพอร์ทสำหรับการติดตั้งอุปกรณ์ต่าง ๆ โดยทุก ๆ พอร์ท จะต้องมียุ่หน้าแปลนเป็นเขี้ยวโลหะขบกันบนปะเก็นทองแดง (CF Flange) ในงานวิจัยนี้แคมเบอร์สุญญากาศจะมีอยู่ด้วยกัน 2 แคมเบอร์ คือ แคมเบอร์สำหรับติดตั้งเครื่องมือวิเคราะห์ ซึ่งต้องเป็นสุญญากาศระดับสูงยิ่ง ซึ่งจะเรียกว่า แคมเบอร์หลัก และแคมเบอร์สำหรับรอการขึ้นงานตัวอย่างเข้าสู่แคมเบอร์หลัก ซึ่งจะเรียกว่า แคมเบอร์รอง

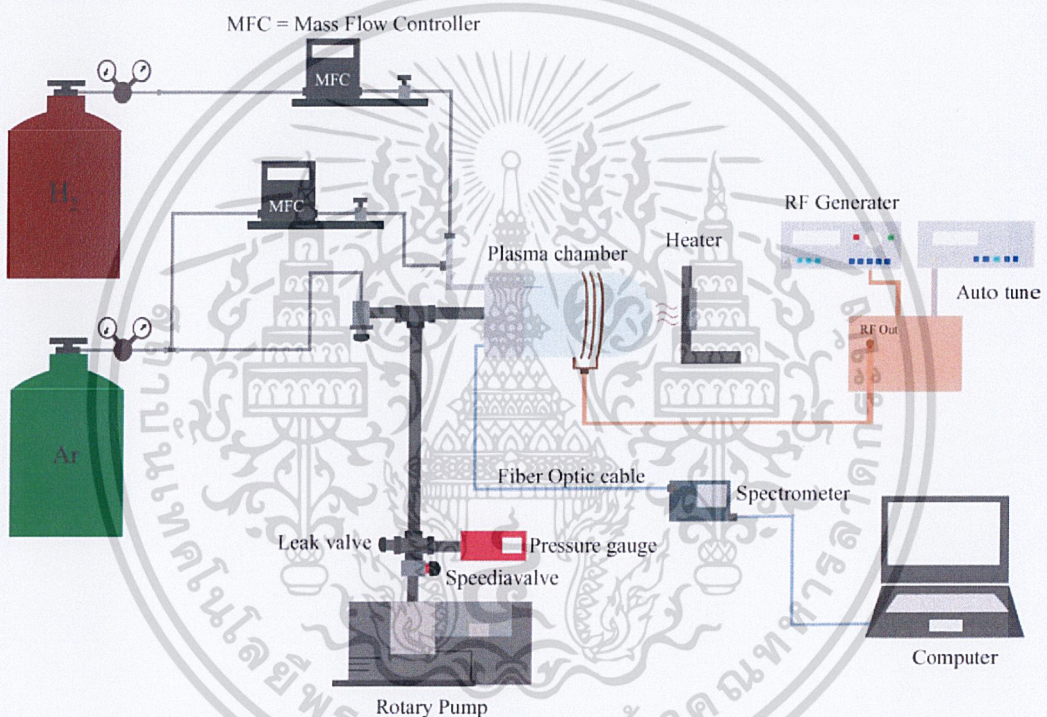
การใช้งานระบบสุญญากาศที่ถูกวิธีจะทำให้ระบบทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและต่อเนื่อง การใช้งานผิดวิธีหรือขาดการบำรุงรักษาอาจทำให้ระบบไม่สามารถทำความดันสุดท้ายให้ได้เท่าที่ต้องการและอาจมีคราบน้ำมันเคลือบที่ผนังแคมเบอร์ และอุปกรณ์ที่ติดตั้งอยู่ภายในได้ การใช้งานระบบสุญญากาศที่ถูกต้องมีดังนี้

1. การปล่อยก๊าซเข้าระบบ (venting) เพื่อกลับสู่ความดันบรรยากาศ จะต้องใช้ก๊าซไนโตรเจนแห้งแทนอากาศ เพื่อป้องกันไอน้ำเข้าสู่ระบบ ในกรณีที่ต้องเปิดแคมเบอร์พยายามให้ระบบสัมผัสกับอากาศในเวลาสั้นที่สุดเท่าที่จะทำได้ และถ้าไม่ใช้งานจะต้องให้ระบบอยู่ในสภาวะสุญญากาศโดยการปิดวาล์วทุกตัว ถ้าต้องการปล่อยก๊าซเข้า (venting) จะต้องปล่อยก๊าซเข้าทางด้านทางเข้า (inlet side) เสมอ
2. ต้องมีการตรวจเช็คระบบรักษาความปลอดภัยของระบบอย่างสม่ำเสมอ
3. ในกรณีไฟฟ้าขัดข้องจะต้องปิดวาล์วทุกตัว
4. ถ้าระบบใช้ปั๊มโรตารีทำหน้าที่เป็นปั๊มส่วนหน้าจะต้องเปลี่ยนปั๊มเป็นสุญญากาศระดับสูง (high vacuum) ให้เร็วพอเพื่อให้แน่ใจว่าจะไม่เกิดไอน้ำมันย้อนกลับ (back streaming) โดยมีหลักว่า ไอน้ำมันย้อนกลับจะไม่เกิดถ้าผลคูณของความดันในหน่วย torr กับเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อระหว่างปั๊มโรตารีกับปั๊มสุญญากาศระดับสูงในหน่วยเซนติเมตร มีค่าน้อยกว่า 0.3 เช่นถ้าท่อมีขนาด 3 เซนติเมตร จะเริ่มเปิดปั๊มสุญญากาศระดับสูง เมื่อความดันในท่อไม่ต่ำกว่า 0.1 torr

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 ระบบทำความสะอาดพื้นผิวด้วยพลาสมาชนิดกระตุ้นด้วยคลื่นความถี่วิทยุ

ระบบทำความสะอาดพื้นผิวด้วยพลาสมาชนิดกระตุ้นด้วยคลื่นความถี่วิทยุที่ใช้ในโครงการพิเศษแสดงดังรูปที่ 3.1 แคมเบอร์สุญญากาศ จะถูกทำให้เป็นสุญญากาศโดยด้วยระบบทำสุญญากาศ ซึ่งสามารถทำความสะอาดได้ต่ำถึงประมาณ 3.0×10^{-3} mbar ประกอบไปด้วย ปัมโรตารี ชุดเกจวัดความดัน และมีท่อนำก๊าซเข้าสู่ระบบ พร้อมระบบควบคุมอัตราการไหลของก๊าซเพื่อใช้ในการกำเนิดพลาสมา โดยมีขดลวดเหนี่ยวนำที่พันอยู่ภายนอกแคมเบอร์ โดยต่อเข้ากับแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุ และช่องสำหรับติดตั้งอุปกรณ์ตรวจสอบสเปกตรัมของการเปล่งแสงของพลาสมา โดยแผ่นซิลิกอนที่ถูทำความสะอาดจะถูกติดตั้งอยู่ภายในของแคมเบอร์บริเวณขดลวด



รูปที่ 3.1 ระบบทำความสะอาดพื้นผิวด้วยพลาสมาชนิดกระตุ้นด้วยคลื่นความถี่วิทยุ

3.3 ขั้นตอนการทำความสะอาดแผ่นซิลิกอน

ในการทำความสะอาดด้วยกระบวนการพลาสมา มีขั้นตอนดังนี้

1) นำแผ่นซิลิกอนที่ได้เลือกขนาดของชิ้นงานตามความเหมาะสมที่จะใช้ในการทดลอง เพื่อใช้เป็นชิ้นสารตัวอย่าง

2) นำชิ้นงานตัวอย่างที่ได้ไปใส่ไว้ที่ฐานรองของชิ้นงานตัวอย่างที่ติดตั้งอยู่ภายในระบบ

แคมเบอร์สุญญากาศ

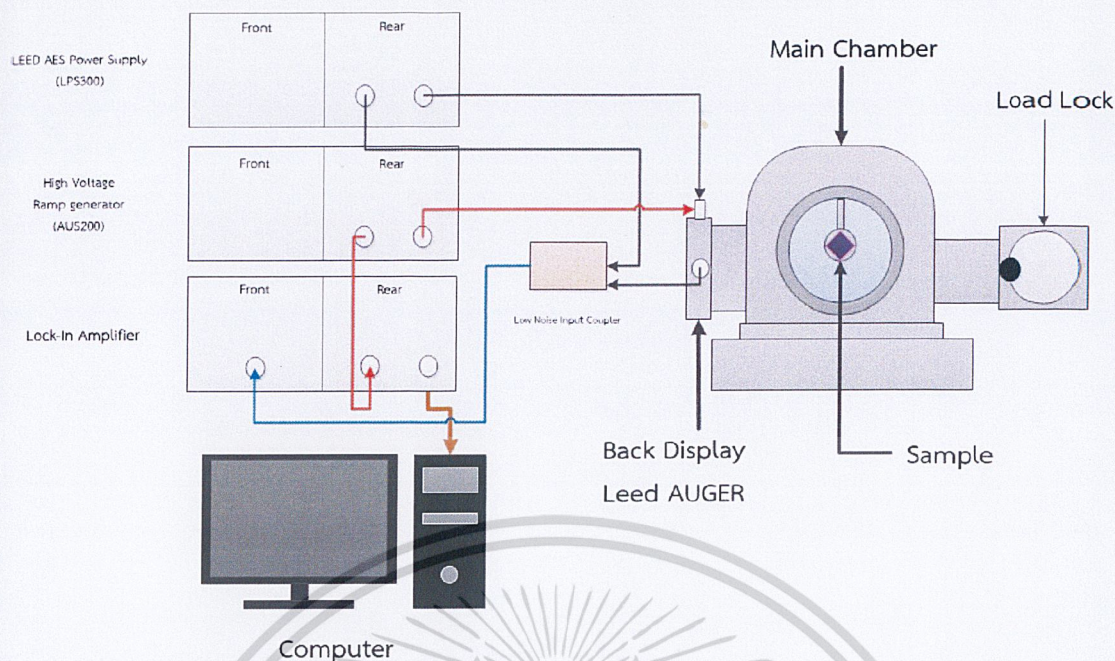
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3) ทำการลดความดันในระบบสุญญากาศจนถึงระดับ 10^{-3} มิลลิบาร์ เพื่อให้ระบบสุญญากาศสะอาด
- 4) ใส่ก๊าซอาร์กอนและไฮโดรเจนให้แก่ห้องพลาสมาจนได้ระดับความดันภายในห้องพลาสมาที่ต้องการ
- 5) ให้ความร้อนแก่อิออนโดยใช้ฮีทเตอร์ตามเวลาที่ต้องการ
- 6) ทำการจุดพลาสมาโดยการเปิดแหล่งกำเนิดคลื่นวิทยุ หมุนกำลังของคลื่นวิทยุจนจุดพลาสมาติด ปรับจนได้ระดับกำลังที่ต้องการ
- 7) ให้ชิ้นตัวอย่างอยู่ในห้องพลาสมาตามเวลาที่ต้องการในการทำความสะอาด
- 8) หลังจากนั้นลดกำลังของแหล่งกำเนิดคลื่นวิทยุลง และปิดแหล่งกำเนิดของคลื่นวิทยุที่ใช้ในการกระตุ้นให้เกิดพลาสมา ปิดวาล์วควบคุมการไหลของก๊าซอาร์กอน ปิดฮีทเตอร์ และปิดระบบทำความดัน
- 9) นำชิ้นตัวอย่างออกจากห้องพลาสมา แล้วนำเข้าสู่ระบบวิเคราะห์พื้นผิวด้วยเทคนิคโอเจอิเล็กทรอนิกส์สเปกโทรสโกปี

3.4 ระบบวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโอเจอิเล็กทรอนิกส์สเปกโทรสโกปี

เครื่องมือที่มีความสำคัญต่อโครงการพิเศษนี้ได้แก่ ระบบวิเคราะห์พื้นผิวด้วยเทคนิคโอเจอิเล็กทรอนิกส์สเปกโทรสโกปีซึ่งถูกติดตั้งอยู่กับระบบสุญญากาศที่มีสภาวะความเป็นสุญญากาศสูงยิ่ง (Ultra-high vacuum) โดยระบบสุญญากาศประกอบด้วยแชมเบอร์สุญญากาศ 2 แชมเบอร์ คือ ส่วนที่เป็นแชมเบอร์หลัก ซึ่งมีสภาวะความเป็นสุญญากาศสูงยิ่ง โดยโอเจอิเล็กทรอนิกส์สเปกโทรสโตมิเตอร์จะถูกติดตั้งอยู่กับแชมเบอร์หลัก และส่วนที่เป็น Load lock chamber ซึ่งมีสภาวะความเป็นสุญญากาศสูง (High vacuum) โดยชิ้นงานตัวอย่างที่ถูกทำความสะอาดแล้วจะถูกติดตั้งเข้าไปใน Load lock chamber ก่อนที่จะถูกส่งเข้าสู่แชมเบอร์หลักดังรูปที่ 3.2 [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 แผนภาพแสดงการวิเคราะห์พื้นผิวของแผ่นซิลิกอนที่ทำความสะอาดด้วยพลาสมาด้วยเทคนิคโอเจอีเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี

สัญญาณของโอเจอีเล็กตรอนจากโอเจอีเล็กตรอนสเปกโทรสโกปีเป็นสัญญาณที่มีขนาดเล็กซึ่งจะถูกวิเคราะห์โดยการมอดูเลตสัญญาณรูปไซน์เข้าที่เครื่องวิเคราะห์พลังงานอิเล็กตรอน (electron energy analyzer) และใช้เครื่องขยายล็อก-อิน (lock-in amplifier) วัดขนาดของสัญญาณจากเครื่องวิเคราะห์พลังงานอิเล็กตรอนที่เป็นฮาร์โมนิคที่ 2 ของสัญญาณจะได้ $dN(E)/dE$ จากนั้นเชื่อมต่อข้อมูลเข้าคอมพิวเตอร์เพื่อแสดงผลจะได้สเปกตรัมของอนุพันธ์อันดับที่ 1 ของข้อมูลที่ต้องการ

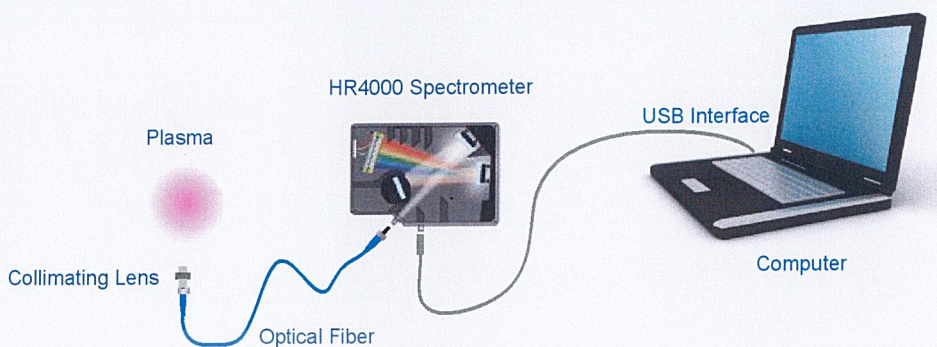
รายละเอียดของส่วนของระบบการวิเคราะห์ มีดังนี้
โอเจอีเล็กตรอนสเปกโทรมิเตอร์

โอเจอีเล็กตรอนสเปกโทรมิเตอร์ ประกอบด้วยส่วนสำคัญดังนี้

- 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 Couplerbox) รุ่น AUS 30
- เครื่องขยายล็อก-อิน (Lock in Amplifier)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 สเปกโทรสโกปีของการเปล่งแสง (Optical Emission Spectroscopy: OES)

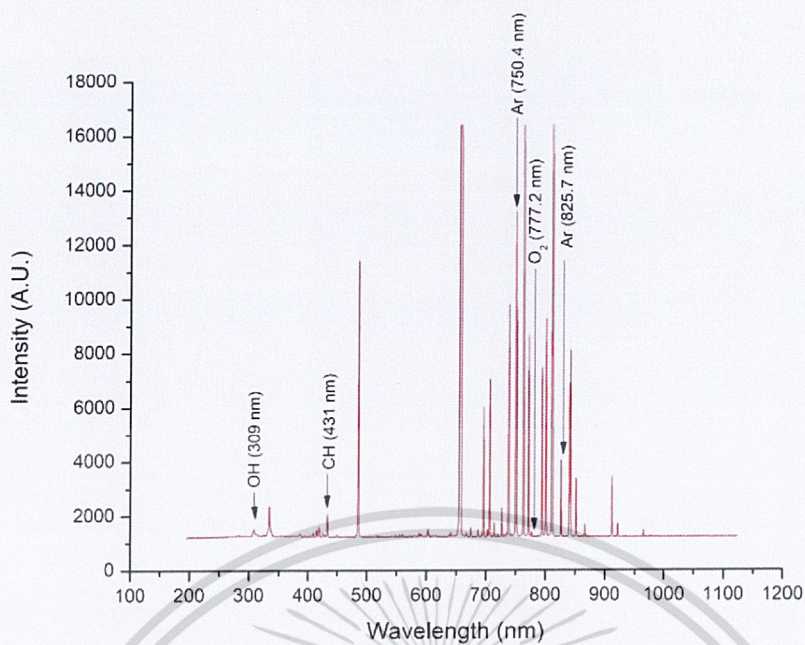


รูปที่ 3.3 ระบบสเปกโทรสโกปีของการเปล่งแสง

ระบบการวัดสมบัติของพลาสมาที่ใช้ในงานวิจัยประกอบด้วยสเปกโตรมิเตอร์ที่ทำหน้าที่วัดสเปกตรัมของการเปล่งแสงจากพลาสมา สเปกโตรมิเตอร์ที่ใช้เป็น รุ่น HR4000 ของบริษัท Ocean Optics Inc. มีเกรตติงขนาด 1200 เส้นต่อมิลลิเมตร มีช่องรับแสงขนาด 5 ไมโครเมตร สามารถวัดสเปกตรัมรับแสงได้ในย่าน 200-1100 นาโนเมตร ที่ความละเอียด (resolution) 0.120 นาโนเมตร มีตัวตรวจวัดแสงเป็น linear CCD array ขนาด 3648 พิกเซล รับแสงเข้าผ่านทางใยแก้วนำแสงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 ไมโครเมตร เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ผ่านทาง USB port มีลักษณะดังรูปที่ 3.3

จากระบบสเปกโทรสโกปีของการเปล่งแสงจะได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและความเข้มแสง แสดงดังรูปที่ 3.4 สามารถวิเคราะห์ห่ออะตอมหรือโมเลกุลที่เกิดจากการทำความเข้าใจสเปกตรัมได้ว่าเป็นอะตอมหรือโมเลกุลชนิดใด จากการดูค่าความยาวคลื่นของสเปกตรัมต่าง ๆ ดังตารางที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 สเปกตรัมของพลาสมาที่เกิดจากการทำความสะอาด

ตารางที่ 3.1 แสดงค่าความยาวคลื่น

| Excited Species | Wavelength (nm) |
|-----------------|-----------------|
| OH | 309 |
| CH | 431 |
| O ₂ | 777.2 |
| Ar | 750.4, 825.7 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

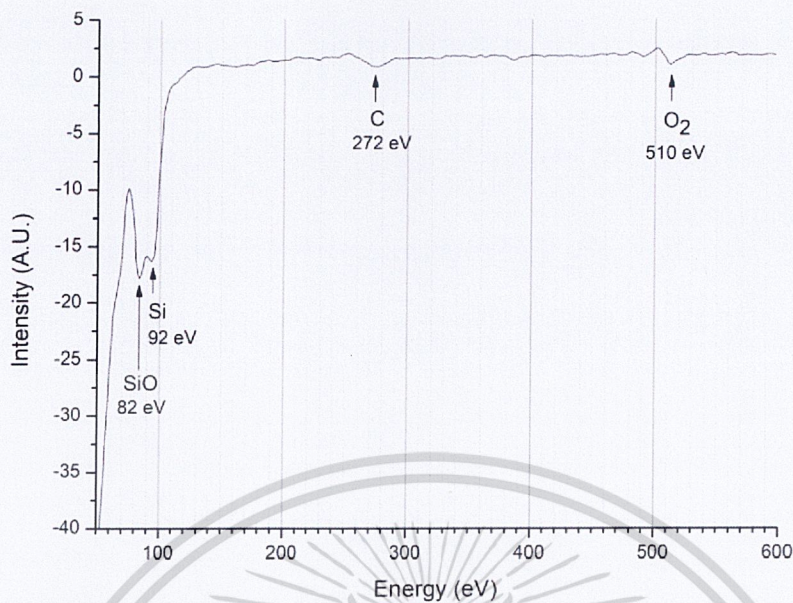
ผลการวิจัยและอภิปรายผล

บทนี้เกี่ยวข้องกับผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลทำความสะอาดพื้นผิวแผ่นซิลิกอนด้วยแหล่งกำเนิดพลาสมาที่กระตุ้นด้วยคลื่นความถี่วิทยุ ด้วยเทคนิคโอเจอิเล็กทรอนิกส์สเปกโทรสโกปี โดยพิจารณาสัญญาณโอเจอิเล็กทรอนิกส์ก่อนและหลังผ่านกระบวนการทำความสะอาด ผลของการทดลองเริ่มจากผลของการทำความสะอาดพื้นผิวด้วยแหล่งกำเนิดพลาสมาที่กระตุ้นด้วยคลื่นความถี่วิทยุ สเปกโทรสโกปีของการเปล่งแสงของพลาสมา ผลของการเปลี่ยนแปลงเวลา กำลังของคลื่นวิทยุ อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนและไฮโดรเจนที่ใช้กระตุ้นให้เกิดพลาสมา และการให้ความร้อน ทั้งนี้เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบความสะอาดจากการวัดสัญญาณโอเจอิเล็กทรอนิกส์ของซิลิกอน คาร์บอน และออกซิเจนเทียบกันในแต่ละกรณี

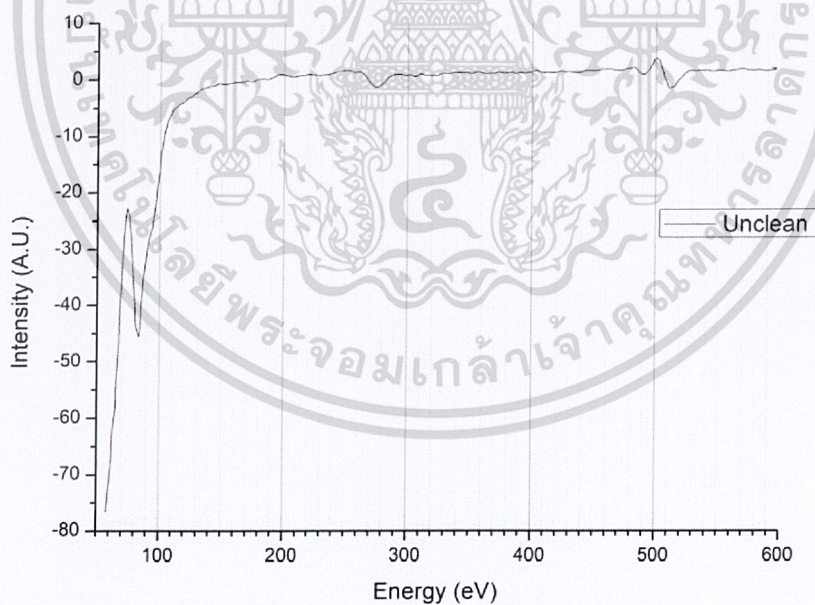
จุดประสงค์ของการทำความสะอาดพื้นผิวซิลิกอนโดยทั่วไปคือ การขจัดสิ่งปนเปื้อนที่อยู่บนแผ่นซิลิกอน ทั้งนี้เพื่อเป็นการเตรียมความสะอาดให้แก่พื้นผิวก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิต (ในส่วนของอุตสาหกรรมด้านสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ) ในขั้นตอนต่อไป ในโครงการพิเศษนี้ เนื่องจากการศึกษาการทำความสะอาดของแผ่นซิลิกอนจะพิจารณาความสะอาดโดยวัดสัญญาณโอเจของซิลิกอน คาร์บอน และออกซิเจนเปรียบเทียบกัน นั่นคือเมื่อสัญญาณโอเจของคาร์บอนและออกซิเจนมีขนาดเล็กลงแสดงว่าพื้นผิวมีความสะอาดมากขึ้น ก่อนถึงขั้นตอนการทำความสะอาดจะต้องทำการตรวจสอบพื้นผิวของชิ้นตัวอย่างด้วยเทคนิคโอเจอิเล็กทรอนิกส์สเปกโทรสโกปี เพื่อบันทึกขนาดของสัญญาณโอเจอิเล็กทรอนิกส์ของซิลิกอน คาร์บอน และออกซิเจนไว้เป็นค่าอ้างอิง ผลการวัดสัญญาณโอเจในช่วงพลังงานตั้งแต่ 0 ถึง 600 อิเล็กตรอนโวลต์ แสดงดังรูปที่ 4.1 และสัญญาณโอเจอิเล็กทรอนิกส์ของแผ่นซิลิกอนก่อนทำความสะอาดแสดงดังรูปที่ 4.2

การทำความสะอาดด้วยวิธีพลาสมาที่กระตุ้นด้วยคลื่นความถี่วิทยุ สำหรับโครงการพิเศษนี้ เลือกใช้ก๊าซอาร์กอนและไฮโดรเจนในการสร้างพลาสมาชนิดกระตุ้นด้วยคลื่นความถี่วิทยุ ในการวัดสัญญาณโอเจอิเล็กทรอนิกส์ของซิลิกอน คาร์บอน และออกซิเจนของชิ้นตัวอย่างแต่ละชิ้น ซึ่งองค์ประกอบในการทำความสะอาดที่ได้ศึกษาประกอบด้วยเวลาในการทำความสะอาด กำลังของคลื่นวิทยุและปริมาณอัตราการไหลของก๊าซ ซึ่งแบ่งหัวข้อในการศึกษาดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 สัญญาณโอเจของแผ่นซิลิกอนแสดงให้เห็นสัญญาณโอเจอิเล็กตรอนของซิลิกอน คาร์บอน และออกซิเจน



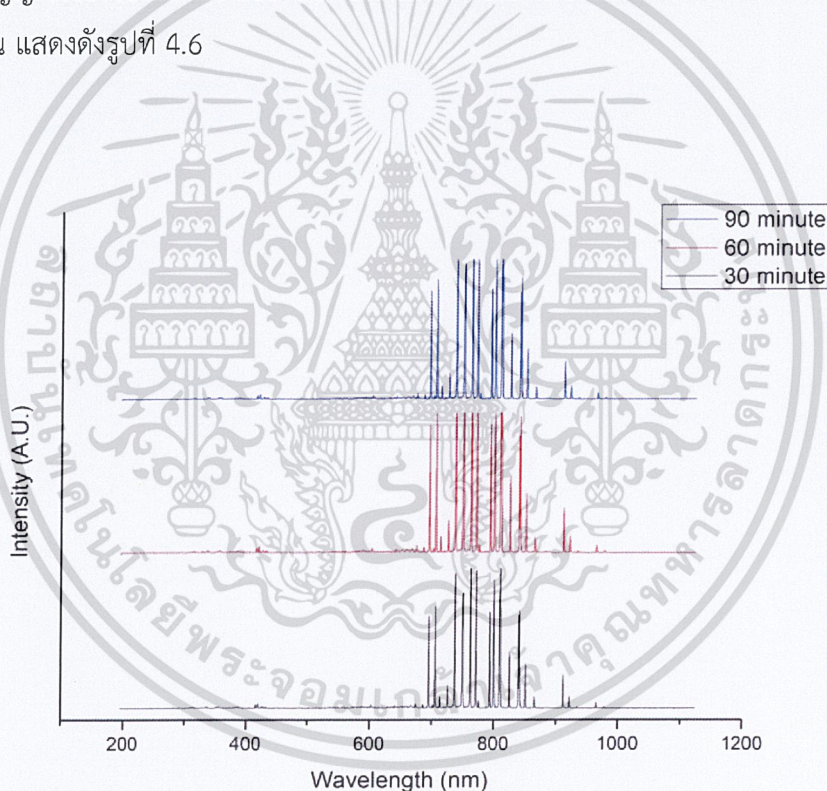
รูปที่ 4.2 สัญญาณโอเจอิเล็กตรอนของแผ่นซิลิกอนก่อนทำความสะอาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1 การศึกษาผลของการทำความสะอาดด้วย Ar Plasma

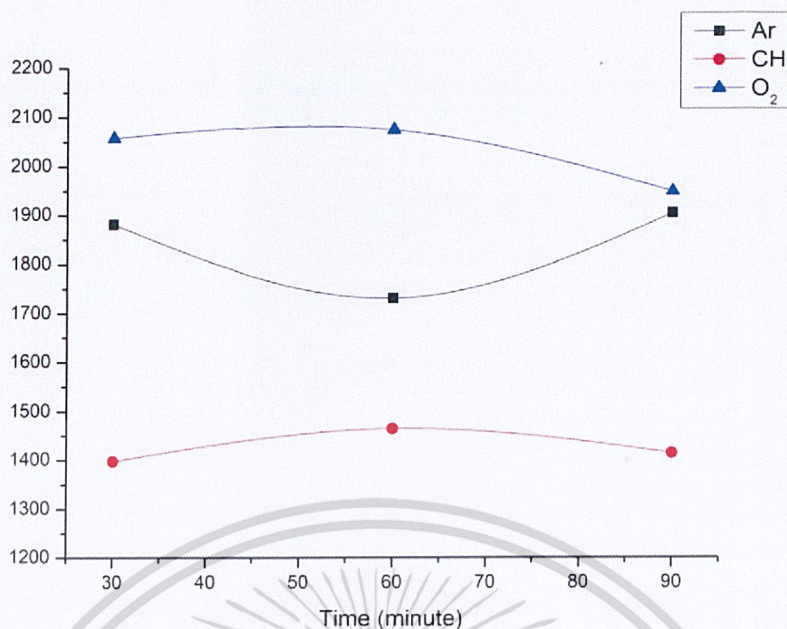
4.1.1 ผลของเวลาที่ใช้ในการทำความสะอาด

การศึกษาผลของเวลาในการทำความสะอาดโดยการใช้อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน 20 sccm ในการทำการทดลองได้ใช้แผ่นซิลิกอนจำนวน 3 ชิ้น ทำความสะอาดด้วยวิธีพลาสมาที่กระตุ้นด้วยคลื่นความถี่วิทยุ โดยใช้กำลังของคลื่นวิทยุ 150 วัตต์ ใช้เวลาทำความสะอาดเป็น 30, 60 และ 90 นาที โดยวัดสเปกตรัมการเปล่งแสงของพลาสมา แสดงดังรูปที่ 4.3 และแนวโน้มการเปล่งแสงของอนุภาคต่าง ๆ ในพลาสมา แสดงดังรูปที่ 4.4 จากนั้นทำการวัดสัญญาณโอเจอิเล็กตรอนของแผ่นซิลิกอนที่เวลาต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 4.5 เมื่อเทียบกับสัญญาณโอเจอิเล็กตรอนของแผ่นซิลิกอนก่อนทำความสะอาด แสดงดังรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าสัญญาณโอเจอิเล็กตรอนของคาร์บอนลดลง ส่วนสัญญาณโอเจอิเล็กตรอนของออกซิเจนไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเวลาที่ใช้ในการทำความสะอาดเพิ่มขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.6

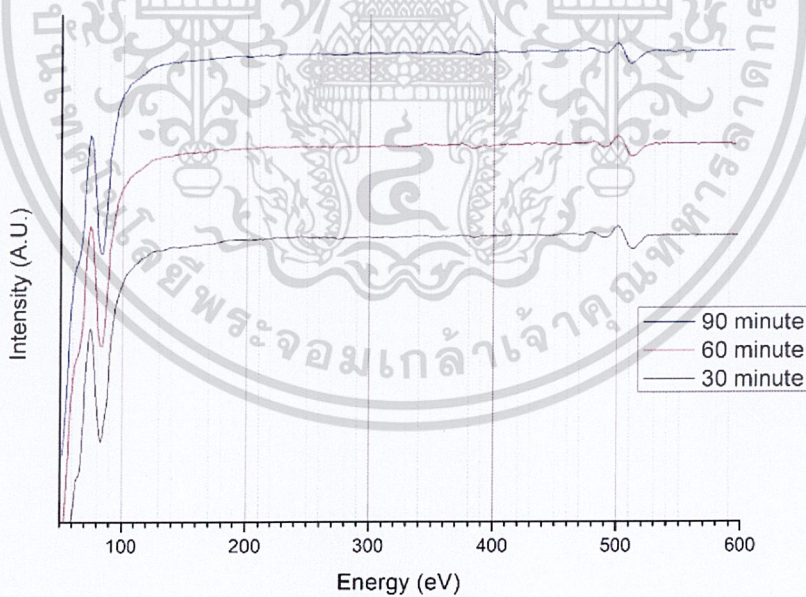


รูปที่ 4.3 สเปกตรัมของพลาสมาที่เกิดจากการทำความสะอาดด้วยเวลา 30, 60 และ 90 นาที โดยใช้กำลังของคลื่นวิทยุ 150 วัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

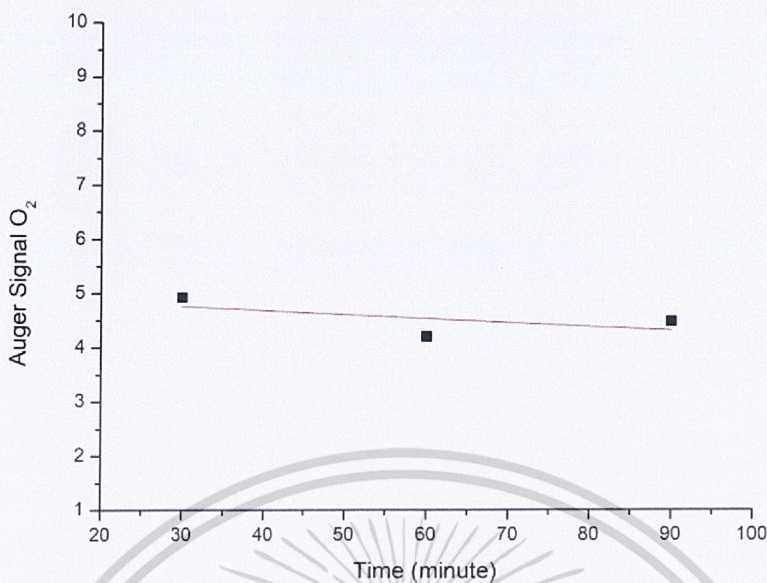


รูปที่ 4.4 แนวโน้มการเปล่งแสงของอนุภาคต่างๆในพลาสมา เมื่อใช้เวลาทำความสะอาดเป็น 30, 60 และ 90 นาที และกำลังของคลื่นวิทยุเป็น 150 วัตต์



รูปที่ 4.5 สัญญาณไอเจ็ล็กตรอนจากแผ่นซิลิกอนที่ทำความสะอาดด้วยเวลา 30, 60 และ 90 นาที โดยใช้กำลังของคลื่นวิทยุ 150 วัตต์

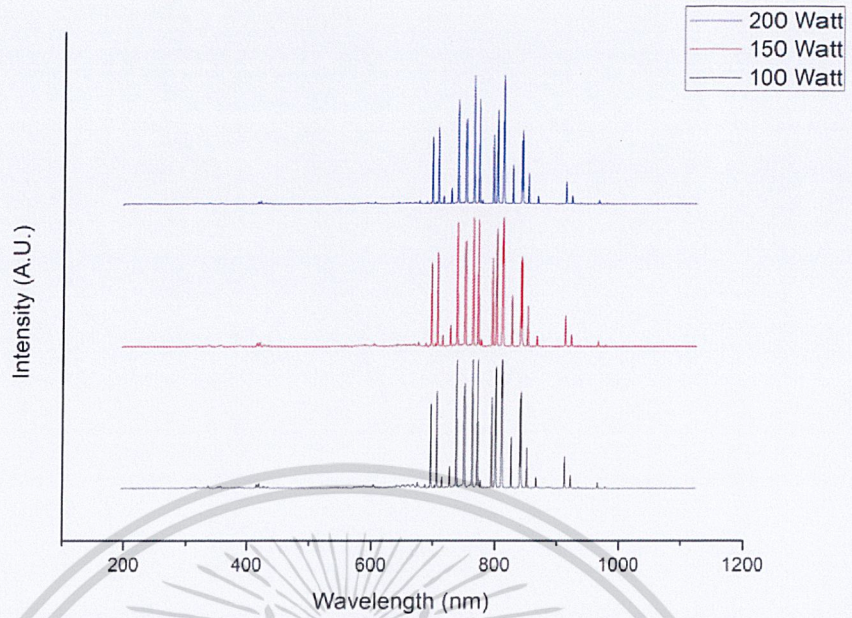
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



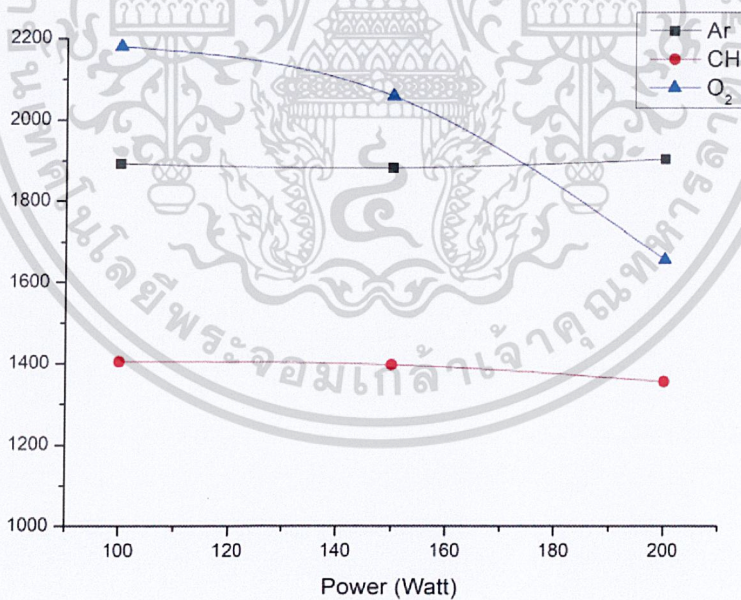
รูปที่ 4.6 แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณไอเจอีเล็กตรอนของออกซิเจน เมื่อใช้เวลาทำความสะอาดเป็น 30, 60 และ 90 นาที และกำลังของคลื่นวิทยุเป็น 150 วัตต์

4.1.2 ผลของกำลังคลื่นวิทยุที่ใช้ในการทำความสะอาด

การศึกษาผลของกำลังคลื่นวิทยุ โดยการใช้อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน 20 sccm ทำความสะอาดด้วยคลื่นวิทยุกำลัง 100, 150 และ 200 วัตต์ โดยใช้เวลา 30 นาที ในการทำความสะอาด โดยวัดสเปกตรัมการเปล่งแสงของพลาสมา แสดงดังรูปที่ 4.7 และแนวโน้มการเปล่งแสงของอนุภาคต่าง ๆ ในพลาสมา แสดงดังรูปที่ 4.8 ทำการวัดสัญญาณไอเจอีเล็กตรอน แสดงดังรูปที่ 4.9 เมื่อเทียบกับสัญญาณไอเจอีเล็กตรอนของแผ่นซิลิกอนก่อนทำความสะอาด แสดงดังรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าสัญญาณไอเจอีเล็กตรอนของคาร์บอนลดลง ส่วนสัญญาณไอเจอีเล็กตรอนของออกซิเจนไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเวลาที่ใช้การทำความสะอาดเพิ่มขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.10

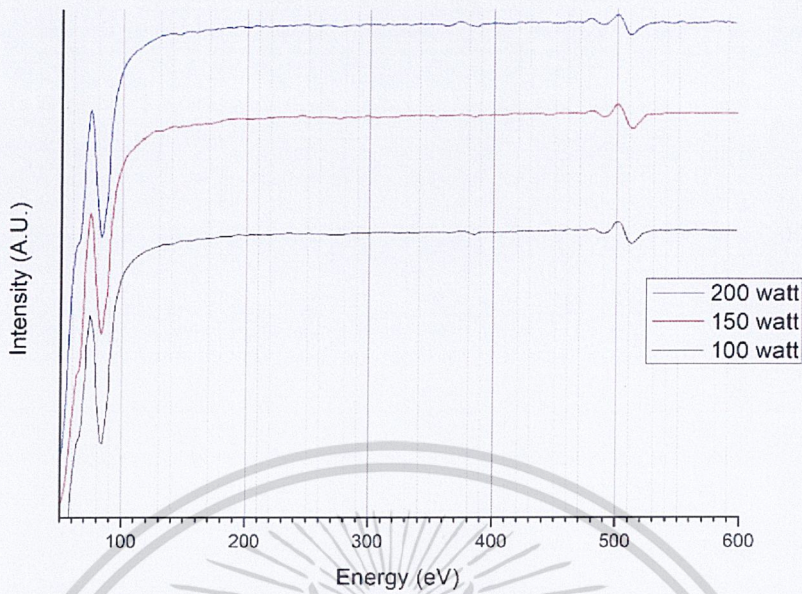


รูปที่ 4.7 สเปกตรัมของพลาสมาที่เกิดจากการทำความสะอาดด้วยกำลังของคลื่นวิทยุ 100, 150 และ 200 วัตต์

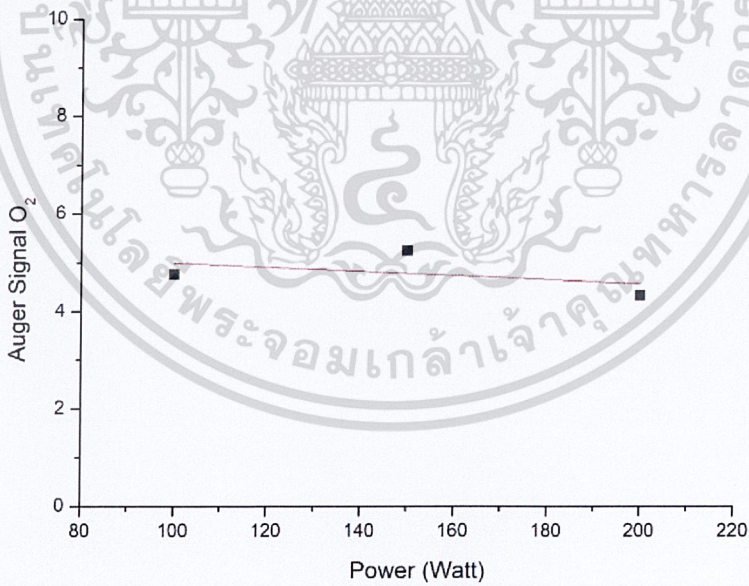


รูปที่ 4.8 แนวโน้มการเปล่งแสงของอนุภาคต่างๆในพลาสมา เมื่อใช้กำลังของคลื่นวิทยุในการทำความสะอาดเป็น 100, 150 และ 200 วัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 สัญญาณไอเจ็ล็กตรอนจากแผ่นซิลิกอนหลังทำความสะอาด โดยใช้กำลังของคลื่นวิทยุ 100, 150 และ 200 วัตต์

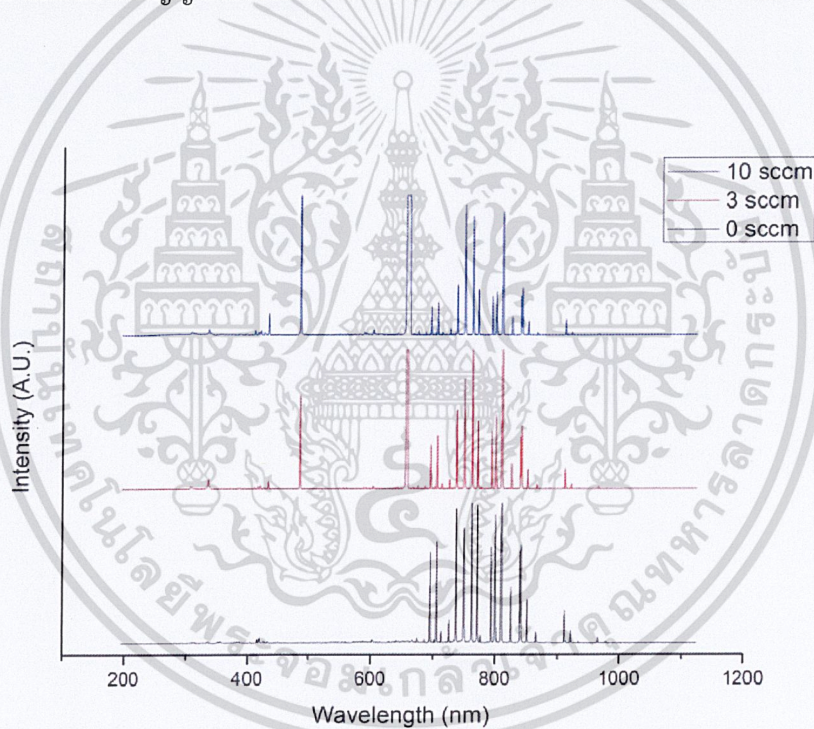


รูปที่ 4.10 แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณไอเจ็ล็กตรอนของออกซิเจน เมื่อใช้กำลังของคลื่นวิทยุในการทำความสะอาดเป็น 100, 150 และ 200 วัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

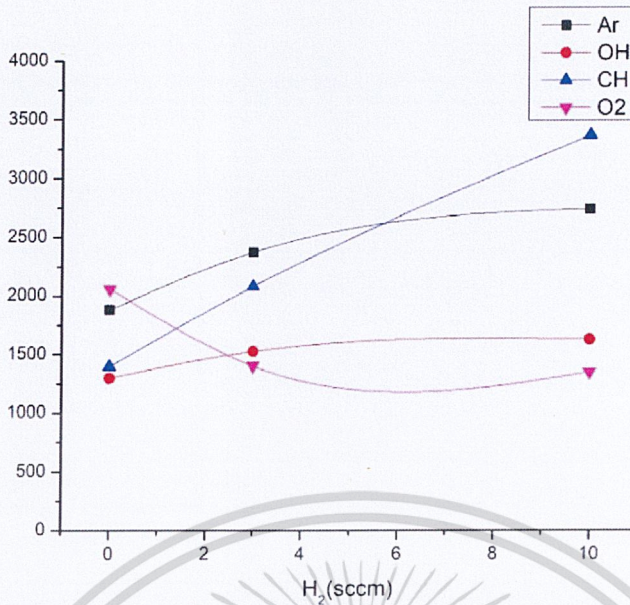
4.2 การทำความสะอาดด้วย Ar และ H₂ Plasma

การศึกษารูปแบบของการทำความสะอาดด้วยการให้อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน และก๊าซไฮโดรเจน โดยการทำความสะอาดด้วยก๊าซอาร์กอน 20 sccm และเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนเป็น 3 และ 10 sccm ซึ่งเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนทำให้มีผลถึงกำลังของคลื่นวิทยุที่ใช้เป็น 250 และ 400 วัตต์ ตามลำดับ ใช้เวลาในการทำความสะอาด 30 นาที โดยให้ก๊าซอาร์กอนปล่อยทิ้งไว้ในระบบหลังทำความสะอาดแผ่นซิลิกอน โดยวัดสเปกตรัมการเปล่งแสงของพลาสมา แสดงดังรูปที่ 4.11 และแนวโน้มการเปล่งแสงของอนุภาคต่าง ๆ ในพลาสมา แสดงดังรูปที่ 4.12 ทำการวัดสัญญาณโอเจอีเล็กตรอนที่อัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 4.13 เมื่อเทียบกับสัญญาณโอเจอีเล็กตรอนของแผ่นซิลิกอนก่อนทำความสะอาด แสดงดังรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่า เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนมากขึ้น ทำให้สัญญาณโอเจอีเล็กตรอนของซิลิกอนมีขนาดที่มากขึ้น และขนาดสัญญาณโอเจอีเล็กตรอนของออกซิเจนมีขนาดที่น้อยลง แสดงดังรูปที่ 4.14

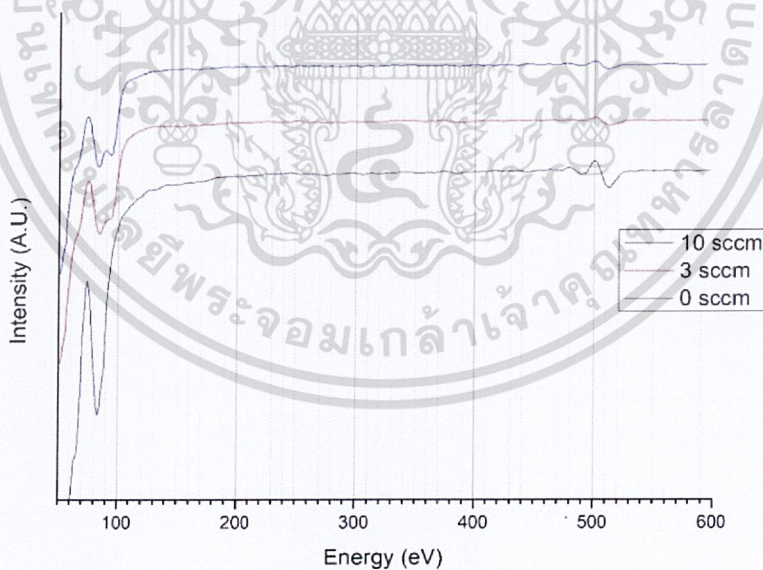


รูปที่ 4.11 สเปกตรัมของพลาสมาที่เกิดจากการทำความสะอาด โดยให้อัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนเป็น 0, 3, และ 10 sccm ใช้เวลาในการทำความสะอาด 30 นาที โดยให้ก๊าซอาร์กอนปล่อยทิ้งไว้ในระบบหลังทำความสะอาดแผ่นซิลิกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

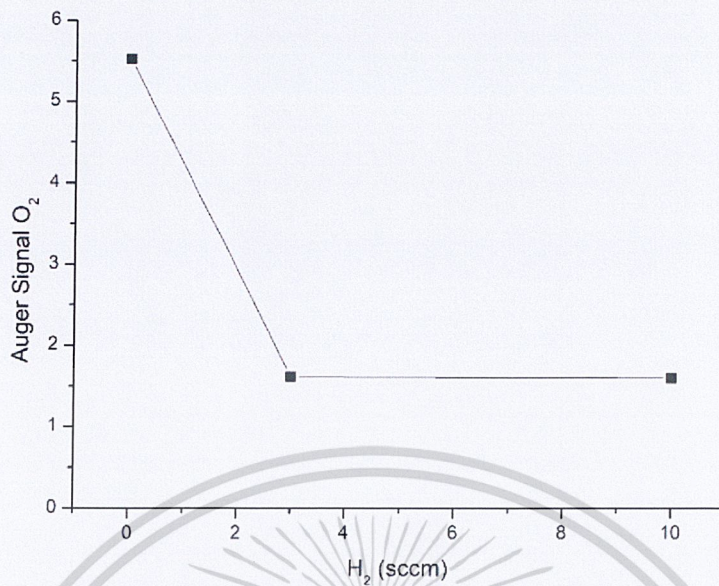


รูปที่ 4.12 แนวโน้มการเปล่งแสงของอนุภาคต่าง ๆ ในพลาสมา เมื่อเปลี่ยนอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนเป็น 0, 3, และ 10 sccm โดยให้ก๊าซอาร์กอนปล่อยทิ้งไว้ในระบบหลังทำความสะอาดแผ่นซิลิกอน



รูปที่ 4.13 สัญญาณไอเจ็ล็กตรอนจากแผ่นซิลิกอนหลังทำความสะอาด ใช้เวลาในการทำความสะอาด 30 นาที โดยการเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนเป็น 3 และ 10 sccm เทียบกับเมื่อไม่มีอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



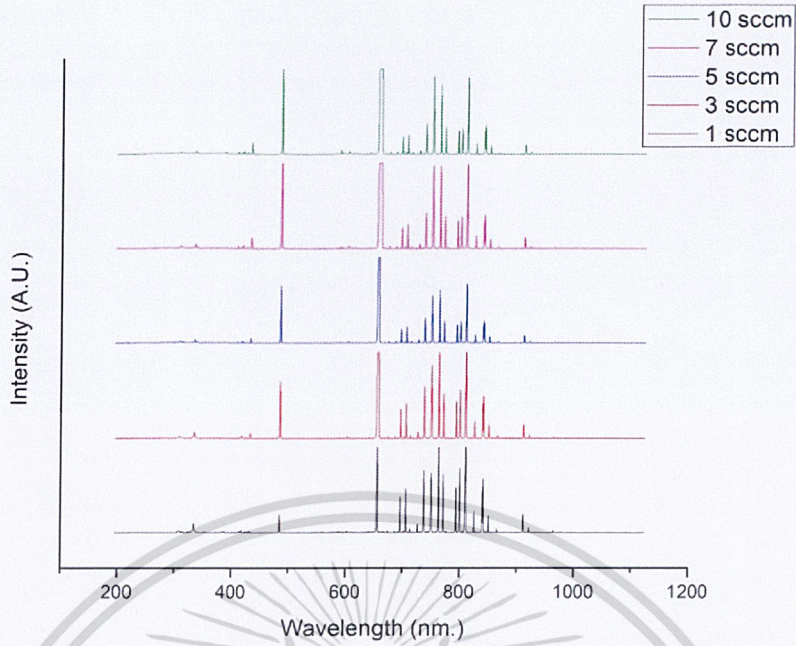
รูปที่ 4.14 แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณไอเจอีเล็กตรอนของออกซิเจน เมื่อใช้เวลาทำความสะอาด 30 นาที โดยการเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนเป็น 3 และ 10 sccm เทียบกับเมื่อไม่มีอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจน

4.3 การทำความสะอาดพื้นผิวด้วย Ar และ H₂ Plasma ร่วมกับการให้ความร้อน

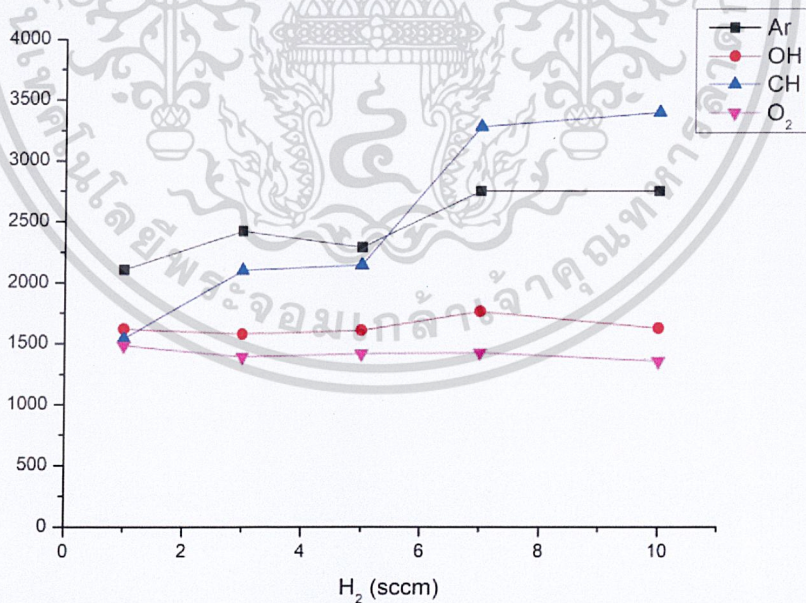
4.3.1 ผลของอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจน

การศึกษาผลของกำลังคลื่นวิทยุ โดยการใช้อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนและก๊าซไฮโดรเจน โดยการทำทำความสะอาดด้วยก๊าซอาร์กอน 20 sccm และเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนเป็น 1, 3, 5, 7 และ 10 sccm ซึ่งเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนทำให้มีผลถึงกำลังของคลื่นวิทยุที่ใช้เป็น 150, 250, 300, 350, และ 400 วัตต์ ตามลำดับ ใช้เวลาในการทำความสะอาด 30 นาที โดยให้ก๊าซอาร์กอนปล่อยทิ้งไว้ในระบบหลังทำความสะอาดแผ่นซิลิกอน วัสดุเปกตรัมการเปล่งแสงของพลาสมา แสดงดังรูปที่ 4.15 และแนวโน้มการเปล่งแสงของอนุภาคต่าง ๆ ในพลาสมา แสดงดังรูปที่ 4.16 ทำการวัดสัญญาณไอเจอีเล็กตรอนที่อัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 4.17 เมื่อเทียบกับสัญญาณไอเจอีเล็กตรอนของแผ่นซิลิกอนก่อนทำความสะอาด แสดงดังรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่า เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนมากขึ้น ทำให้สัญญาณไอเจอีเล็กตรอนของซิลิกอนมีขนาดที่มากขึ้น และขนาดสัญญาณไอเจอีเล็กตรอนของออกซิเจนมีขนาดที่น้อยลง แสดงดังรูปที่ 4.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

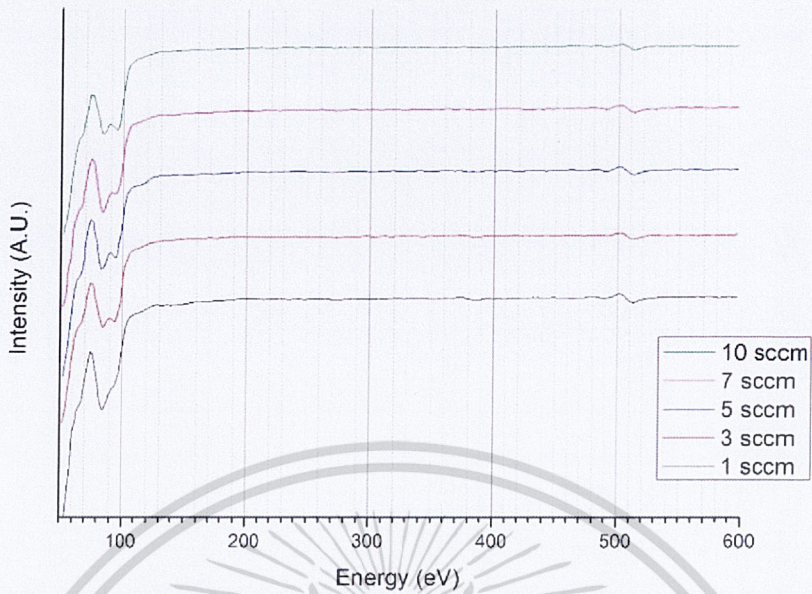


รูปที่ 4.15 สเปกตรัมของพลาสมาที่เกิดจากการทำความสะอาดสะอาด โดยให้อัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนเป็น 1, 3, 5, 7, และ 10 sccm ใช้เวลาในการทำความสะอาด 30 นาที โดยให้ก๊าซอาร์กอนปล่อยทิ้งไว้ในระบบหลังทำความสะอาดแผ่นซิลิกอน

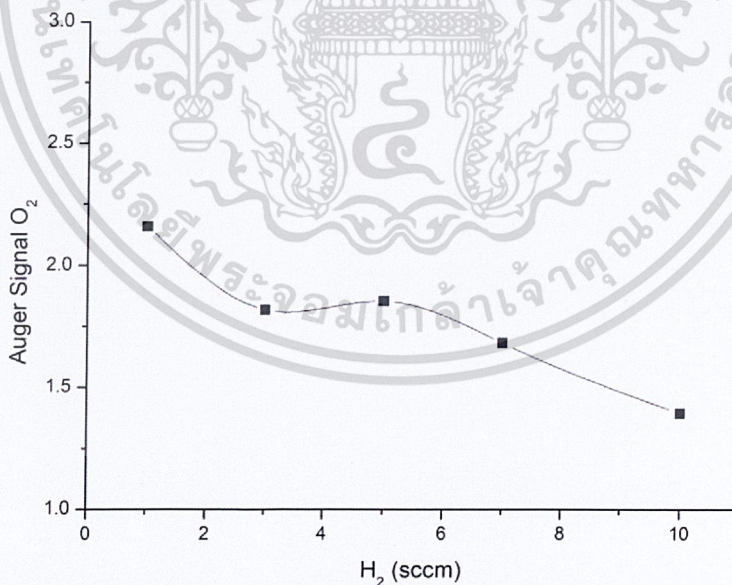


รูปที่ 4.16 แนวโน้มการเปล่งแสงของอนุภาคต่าง ๆ ในพลาสมา เมื่อเปลี่ยนอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนเป็น 1, 3, 5, 7 และ 10 sccm โดยให้ก๊าซอาร์กอนปล่อยทิ้งไว้ในระบบหลังทำความสะอาดแผ่นซิลิกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 สัญญาณโอเจอิเล็กทรอนิกส์จากแผ่นซิลิกอนหลังทำความสะอาด โดยให้อัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนเป็น 1, 3, 5, 7, และ 10 sccm ใช้เวลาในการทำความสะอาด 30 นาที โดยให้ก๊าซอาร์กอนปล่อยทิ้งไว้ในระบบหลังทำความสะอาดแผ่นซิลิกอน

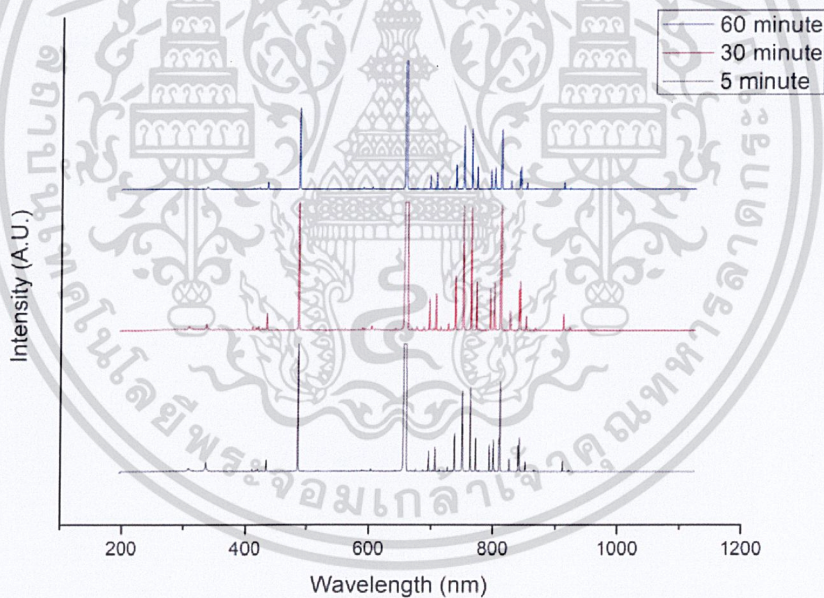


รูปที่ 4.18 แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณโอเจอิเล็กทรอนิกส์ของออกซิเจน เมื่อเปลี่ยนอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนเป็น 1, 3, 5, 7 และ 10 sccm โดยให้ก๊าซอาร์กอนปล่อยทิ้งไว้ในระบบหลังทำความสะอาดแผ่นซิลิกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

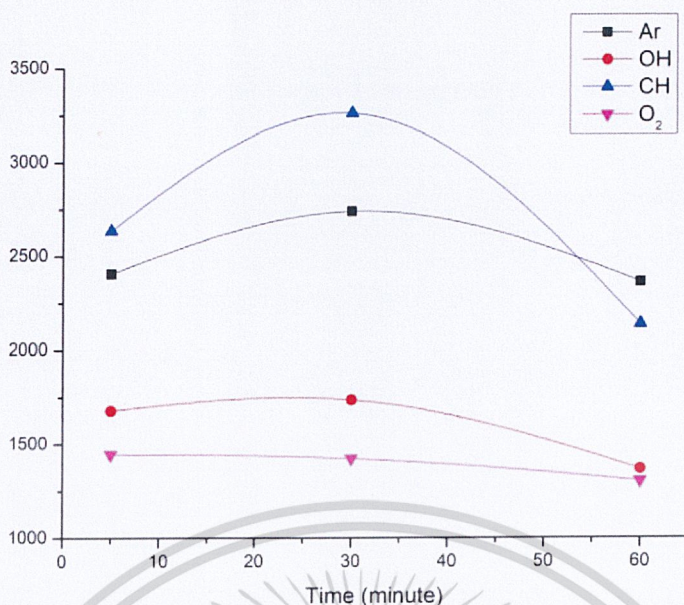
4.3.2 ผลของระยะเวลาในการทำความสะอาดโดยให้ก๊าซอาร์กอนปล่อยทิ้งไว้ในระบบ หลังทำความสะอาดแผ่นซิลิกอน

การศึกษาผลของเวลาในการทำความสะอาดโดยการใช้อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน 20 sccm และ ก๊าซไฮโดรเจน 7 sccm โดยให้ก๊าซอาร์กอนปล่อยทิ้งไว้ในระบบหลังทำความสะอาดแผ่นซิลิกอน ในการทำการทดลองได้ใช้แผ่นซิลิกอนจำนวน 3 ชิ้น ทำความสะอาดด้วยวิธีพลาสมาที่กระตุ้นด้วยคลื่นความถี่วิทยุ โดยใช้กำลังของคลื่นวิทยุเป็น 350 วัตต์ ใช้เวลาทำความสะอาด 5, 30 และ 60 นาที โดยวัดสเปกตรัมการเปล่งแสงของพลาสมา แสดงดังรูปที่ 4.19 และแนวโน้มการเปล่งแสงของอนุภาคต่าง ๆ ในพลาสมา แสดงดังรูปที่ 4.20 จากนั้นทำการวัดสัญญาณโอเจอิเล็กทรอนิกส์ของซิลิกอนที่เวลาต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 4.21 เมื่อเทียบกับสัญญาณโอเจอิเล็กทรอนิกส์ก่อนทำความสะอาด แสดงดังรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าเมื่อให้อัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนเพิ่มเข้าไปในระบบ ทำให้เห็นสัญญาณโอเจอิเล็กทรอนิกส์ของซิลิกอนเพิ่มขึ้น และสัญญาณโอเจอิเล็กทรอนิกส์ของออกซิเจนมีค่าลดลงเมื่อใช้เวลาในการทำความสะอาดมากขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.22

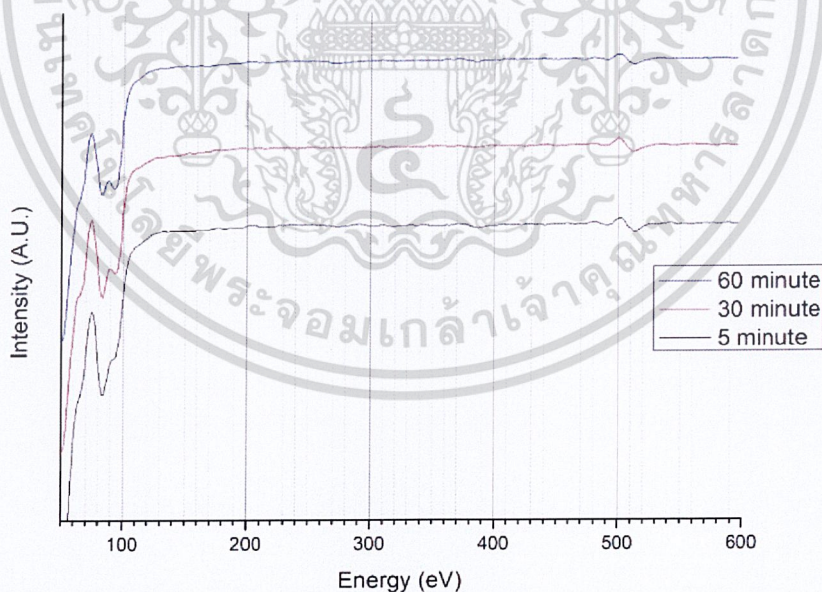


รูปที่ 4.19 สเปกตรัมของพลาสมาที่เกิดจากการทำความสะอาด เมื่อใช้เวลา 5, 30 และ 60 นาที โดยใช้กำลังของคลื่นวิทยุ 350 วัตต์ โดยให้ก๊าซอาร์กอนปล่อยทิ้งไว้ในระบบหลังทำความสะอาดแผ่นซิลิกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

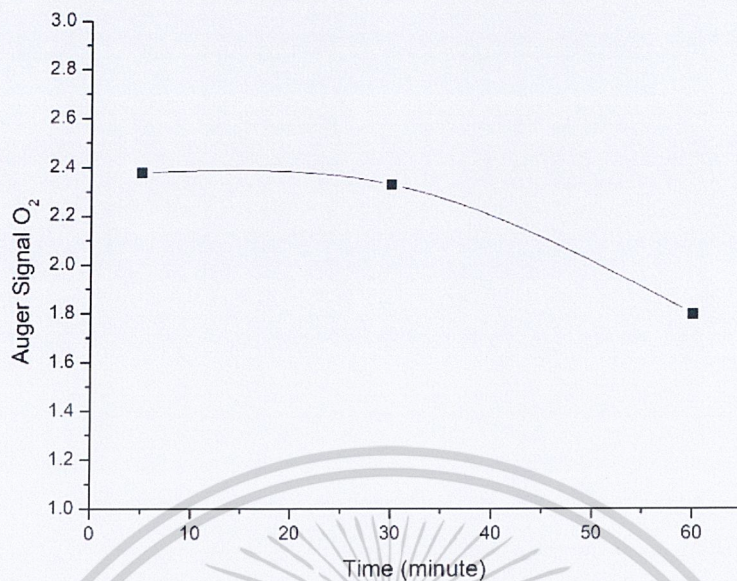


รูปที่ 4.20 แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของอนุภาคต่าง ๆ ในพลาสมา เมื่อใช้เวลาทำความสะอาดเป็น 5, 30 และ 60 นาที และกำลังของคลื่นวิทยุเป็น 350 วัตต์ โดยให้ก๊าซอาร์กอนปล่อยทิ้งไว้ในระบบหลังทำความสะอาดแผ่นซิลิกอน



รูปที่ 4.21 สัญญาณโอเจิล็กตรอนจากแผ่นซิลิกอนหลังทำความสะอาด เมื่อใช้เวลา 5, 30 และ 60 นาที โดยใช้กำลังของคลื่นวิทยุ 350 วัตต์ โดยให้ก๊าซอาร์กอนปล่อยทิ้งไว้ในระบบหลังทำความสะอาดแผ่นซิลิกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

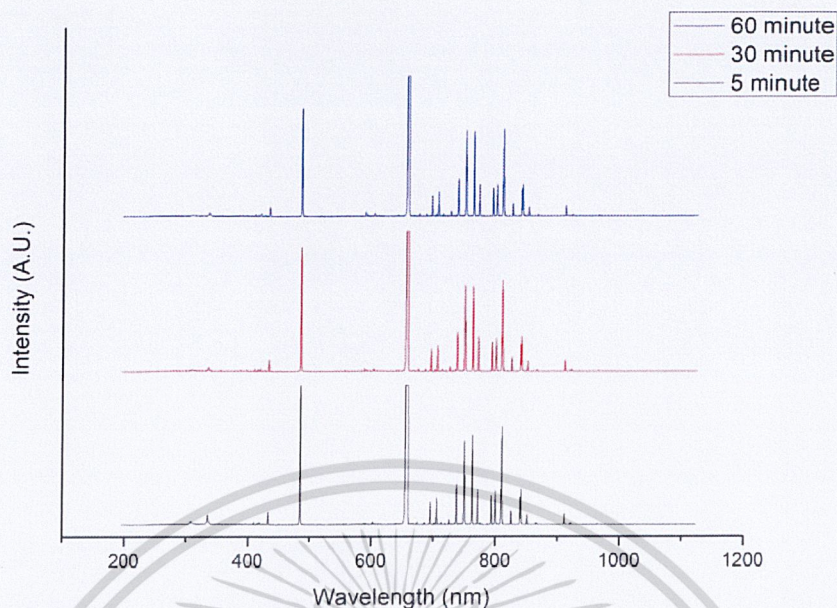


รูปที่ 4.22 แนวโน้มการเปล่งแสงของอนุภาคต่าง ๆ ในพลาสติกมา เมื่อใช้เวลาทำความสะอาดเป็น 5, 30 และ 60 นาที และกำลังของคลื่นวิทยุเป็น 350 วัตต์ โดยให้ก๊าซอาร์กอนปล่อยทิ้งไว้ในระบบหลังทำความสะอาดแผ่นซิลิกอน

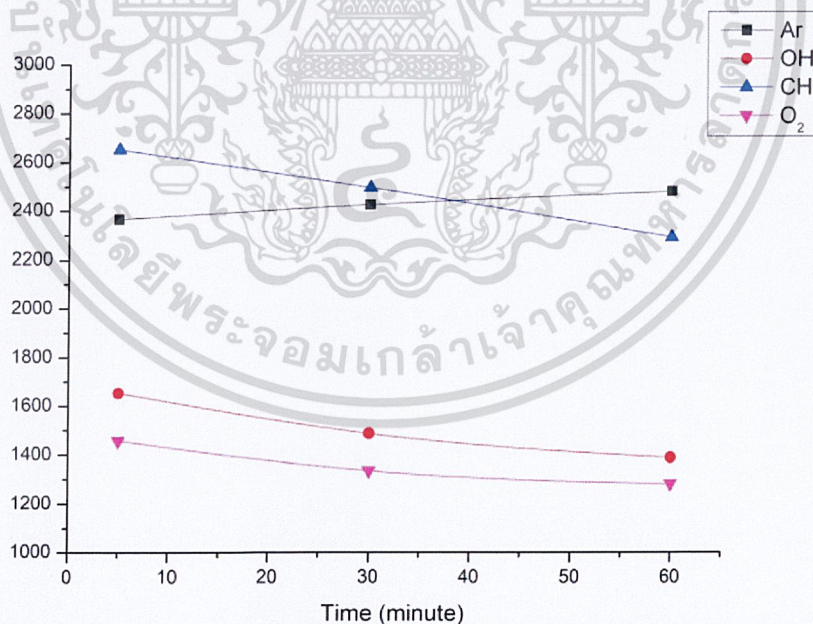
4.3.3 ผลของระยะเวลาในการทำความสะอาดโดยให้ก๊าซไฮโดรเจนปล่อยทิ้งไว้ในระบบหลังทำความสะอาดแผ่นซิลิกอน

การศึกษาผลของเวลาในการทำความสะอาดโดยการใช้อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน 20 sccm และก๊าซไฮโดรเจน 7 sccm โดยให้ก๊าซไฮโดรเจนปล่อยทิ้งไว้ในระบบหลังทำความสะอาดแผ่นซิลิกอน ในการทำการทดลองได้ใช้แผ่นซิลิกอนจำนวน 3 ชิ้น ทำความสะอาดด้วยวิธีพลาสติกที่กระตุ้นด้วยคลื่นความถี่วิทยุ โดยใช้กำลังของคลื่นวิทยุ 350 วัตต์ ใช้เวลาทำความสะอาด 5, 30 และ 60 นาที วัดสเปกตรัมการเปล่งแสงของพลาสติกมา แสดงดังรูปที่ 4.23 และแนวโน้มการเปล่งแสงของอนุภาคต่าง ๆ ในพลาสติกมา แสดงดังรูปที่ 4.24 จากนั้นทำการวัดสัญญาณโอเจของซิลิกอนที่เวลาต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 4.25 เมื่อเทียบกับสัญญาณโอเจอิเล็กทรอนิกส์ก่อนทำความสะอาด แสดงดังรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าเมื่อให้อัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนเพิ่มเข้าไปในระบบ ทำให้เห็นสัญญาณโอเจอิเล็กทรอนิกส์ของซิลิกอนเพิ่มขึ้น และสัญญาณโอเจอิเล็กทรอนิกส์ของออกซิเจนมีค่าลดลงเมื่อใช้เวลาในการทำความสะอาดมากขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

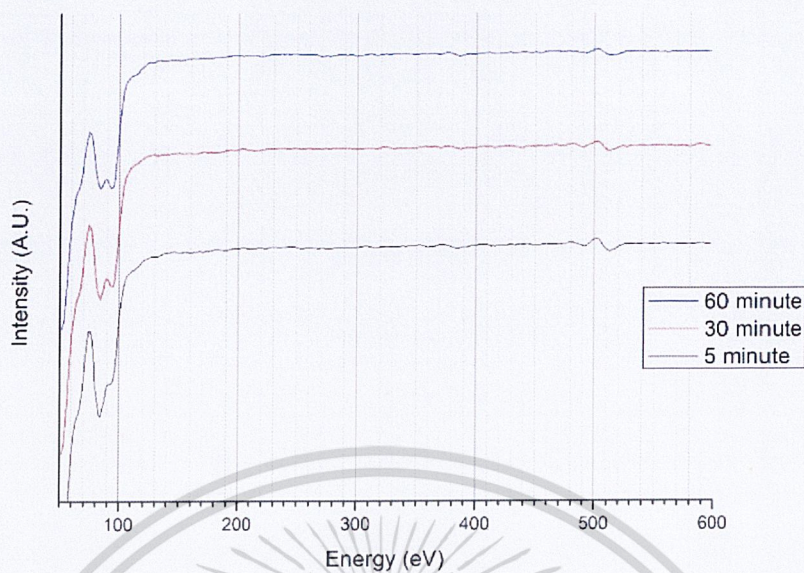


รูปที่ 4.23 สเปกตรัมของพลาสมาที่เกิดจากการทำความสะอาด เมื่อใช้เวลา 5, 30 และ 60 นาที ใช้กำลังของคลื่นวิทยุ 350 วัตต์ โดยให้ก๊าซไฮโดรเจนปล่อยทิ้งไว้ในระบบหลังทำความสะอาดแผ่นซิลิกอน

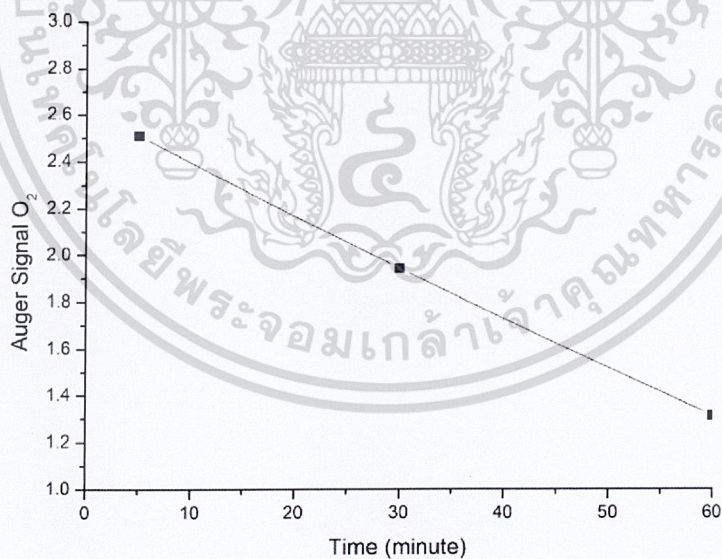


รูปที่ 4.24 แนวโน้มการเปล่งแสงของอนุภาคต่าง ๆ ในพลาสมา เมื่อใช้เวลาทำความสะอาด 5, 30 และ 60 นาที กำลังของคลื่นวิทยุเป็น 350 วัตต์ โดยให้ก๊าซไฮโดรเจนปล่อยทิ้งไว้ในระบบหลังทำความสะอาดแผ่นซิลิกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.25 สัญญาณโอเจอิเล็กทรอนิกส์จากแผ่นซิลิกอนหลังทำความสะอาด เมื่อใช้เวลา 5, 30 และ 60 นาที ใช้กำลังของคลื่นวิทยุ 350 วัตต์ โดยให้ก๊าซไฮโดรเจนปล่อยทิ้งไว้ในระบบหลังทำความสะอาดแผ่นซิลิกอน

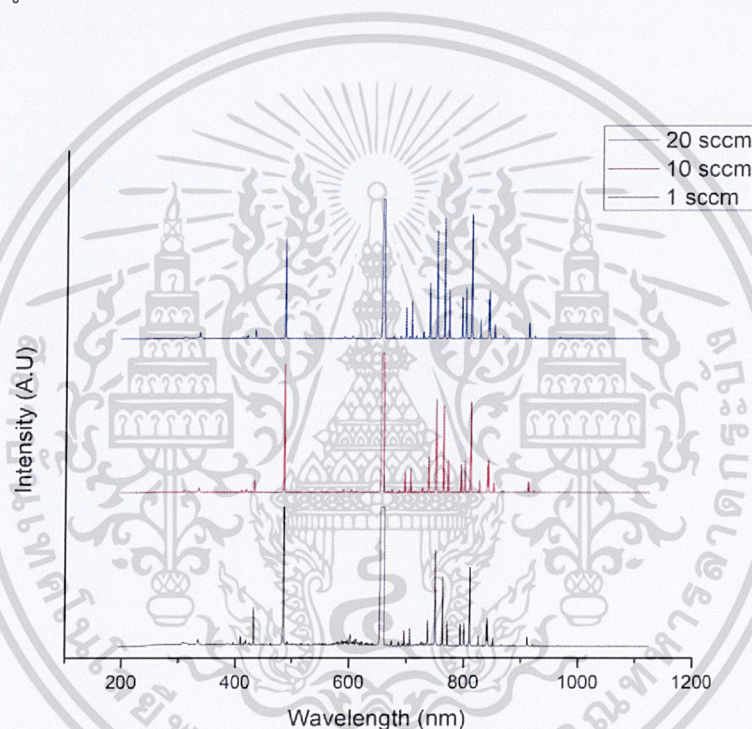


รูปที่ 4.26 แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณโอเจอิเล็กทรอนิกส์ของออกซิเจน เมื่อใช้เวลาทำความสะอาด 5, 30 และ 60 นาที กำลังของคลื่นวิทยุเป็น 350 วัตต์ โดยให้ก๊าซไฮโดรเจนปล่อยทิ้งไว้ในระบบหลังทำความสะอาดแผ่นซิลิกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

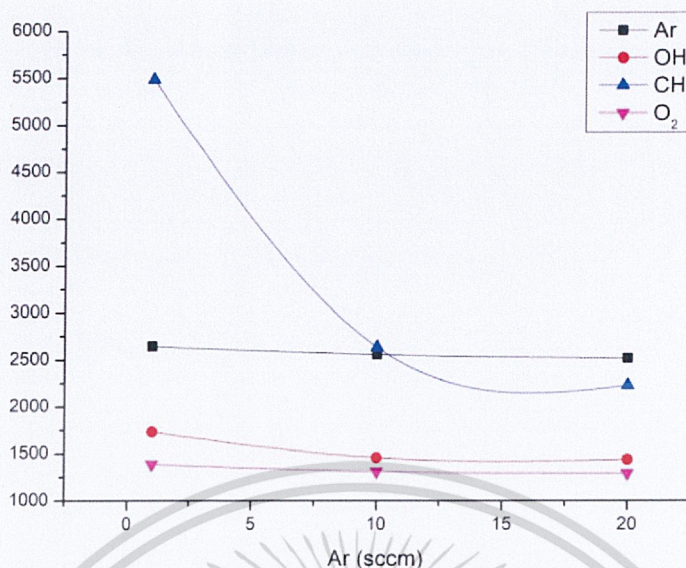
4.3.4 ผลของการทำความสะอาดโดยการเปลี่ยนอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน

โดยใช้อัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจน 5 sccm และอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน 1, 10 และ 20 sccm ใช้เวลาในการทำความสะอาด 30 นาที โดยให้ก๊าซไฮโดรเจนปล่อยทิ้งไว้ในระบบหลังทำความสะอาดแผ่นซิลิกอน วัดสเปกตรัมการเปล่งแสงของพลาสมา แสดงดังรูปที่ 4.27 และแนวโน้มการเปล่งแสงของอนุภาคต่าง ๆ ในพลาสมา แสดงดังรูปที่ 4.28 ทำการวัดสัญญาณโอเจอิเล็กทรอนิกส์ แสดงดังรูปที่ 4.29 เมื่อเทียบกับสัญญาณโอเจอิเล็กทรอนิกส์ของแผ่นซิลิกอนก่อนทำความสะอาด แสดงดังรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่า เมื่อเปลี่ยนอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนให้มากขึ้น ทำให้สัญญาณโอเจอิเล็กทรอนิกส์ของซิลิกอนมีขนาดที่มากขึ้น และขนาดสัญญาณโอเจอิเล็กทรอนิกส์ของออกซิเจนมีขนาดที่น้อยลง แสดงดังรูปที่ 4.30

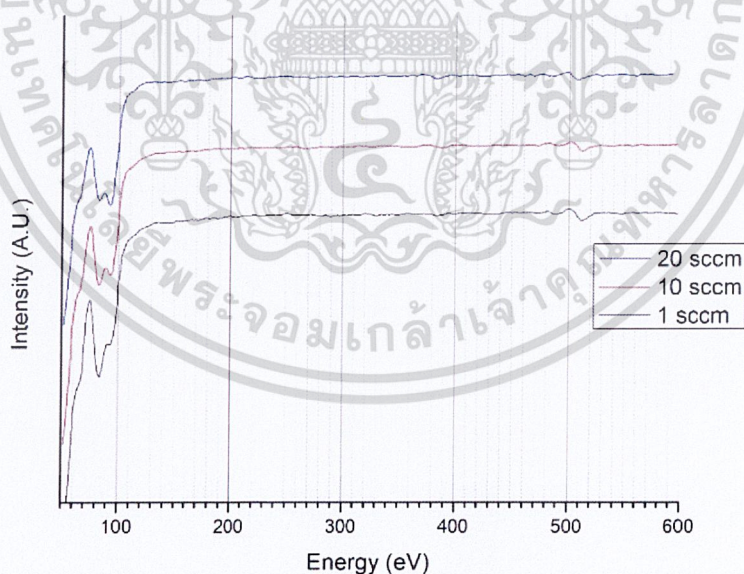


รูปที่ 4.27 สเปกตรัมของพลาสมาที่เกิดจากการทำความสะอาดสะอาด โดยการใช้อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนเป็น 1, 10 และ 20 sccm ใช้เวลาในการทำความสะอาด 30 นาที โดยให้ก๊าซไฮโดรเจนปล่อยทิ้งไว้ในระบบหลังทำความสะอาดแผ่นซิลิกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

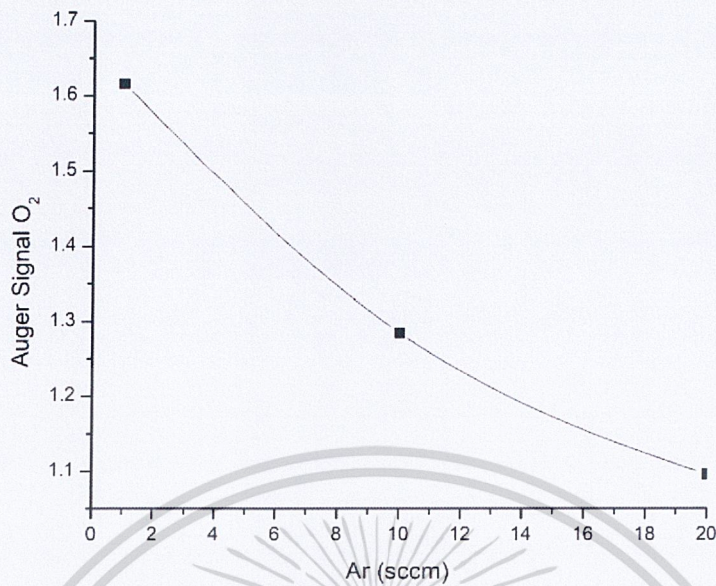


รูปที่ 4.28 แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของอนุภาคต่าง ๆ ในพลาสมา ใช้อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนเป็น 1, 10 และ 20 sccm โดยให้ก๊าซไฮโดรเจนปล่อยทิ้งไว้ในระบบหลังทำความสะอาดแผ่นซิลิกอน



รูปที่ 4.29 สัญญาณไอเจ็ล็กตรอนจากแผ่นซิลิกอนหลังทำความสะอาด ใช้อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนเป็น 1, 10 และ 20 sccm ใช้เวลาในการทำความสะอาด 30 นาที โดยให้ก๊าซไฮโดรเจนปล่อยทิ้งไว้ในระบบหลังทำความสะอาดแผ่นซิลิกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

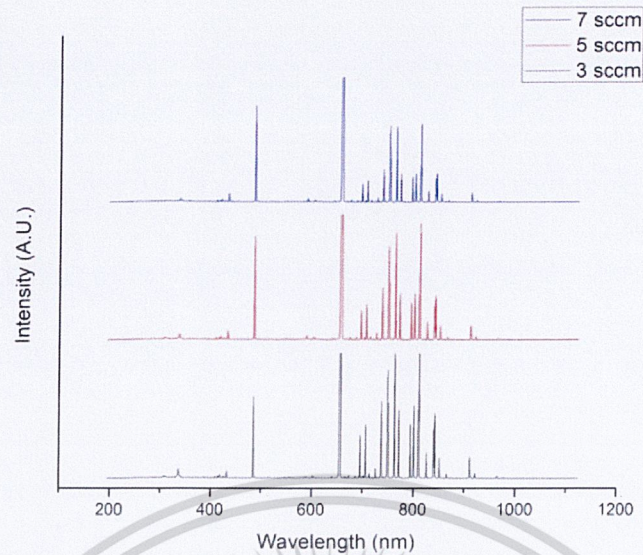


รูปที่ 4.30 แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณไอเจ็ล็กตรอนของออกซิเจน โดยการใช้อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนเป็น 1, 10 และ 20 sccm โดยให้ก๊าซไฮโดรเจนปล่อยทิ้งไว้ในระบบหลังทำความสะอาดแผ่นซิลิกอน

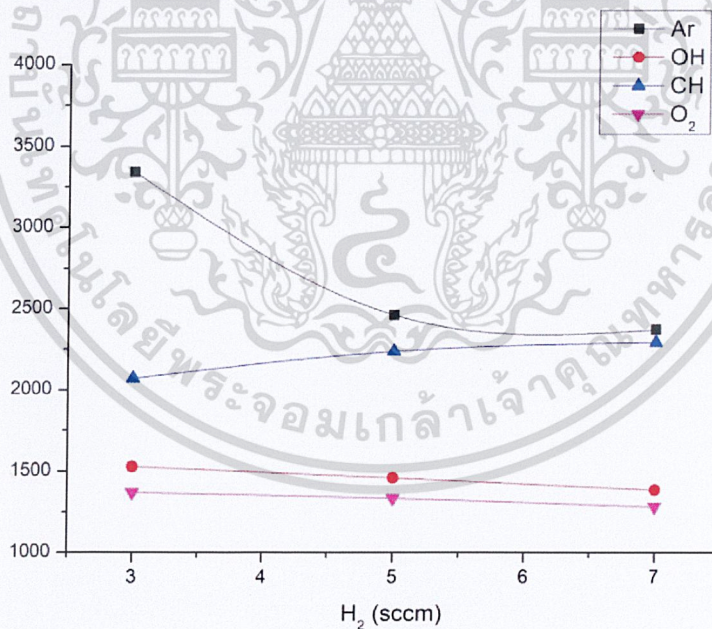
4.3.5 การศึกษาผลของการให้อัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจน เมื่อใช้เวลาในการทำความสะอาด 60 นาที

การศึกษาผลของกำลังคลื่นวิทยุ โดยการใช้อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนและก๊าซไฮโดรเจน โดยการทำทำความสะอาดด้วยก๊าซอาร์กอน 20 sccm และเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนเป็น 3, 5 และ 7 sccm ซึ่งเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนทำให้มีผลถึงกำลังของคลื่นวิทยุที่ใช้เป็น 250, 300 และ 350 วัตต์ ตามลำดับ ใช้เวลาในการทำความสะอาด 60 นาที โดยให้ก๊าซไฮโดรเจนปล่อยทิ้งไว้ในระบบหลังทำความสะอาดแผ่นซิลิกอน วัดสเปกตรัมการเปล่งแสงของพลาสมา แสดงดังรูปที่ 4.31 และแนวโน้มการเปล่งแสงของอนุภาคต่าง ๆ ในพลาสมา แสดงดังรูปที่ 4.32 ทำการวัดสัญญาณไอเจ็ล็กตรอน แสดงดังรูปที่ 4.33 เมื่อเทียบกับสัญญาณไอเจ็ล็กตรอนของแผ่นซิลิกอนก่อนทำความสะอาด แสดงดังรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่า เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนมากขึ้น ทำให้สัญญาณไอเจ็ล็กตรอนของซิลิกอนมีขนาดที่มากขึ้น และขนาดสัญญาณไอเจ็ล็กตรอนของออกซิเจนมีขนาดที่น้อยลง แสดงดังรูปที่ 4.34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

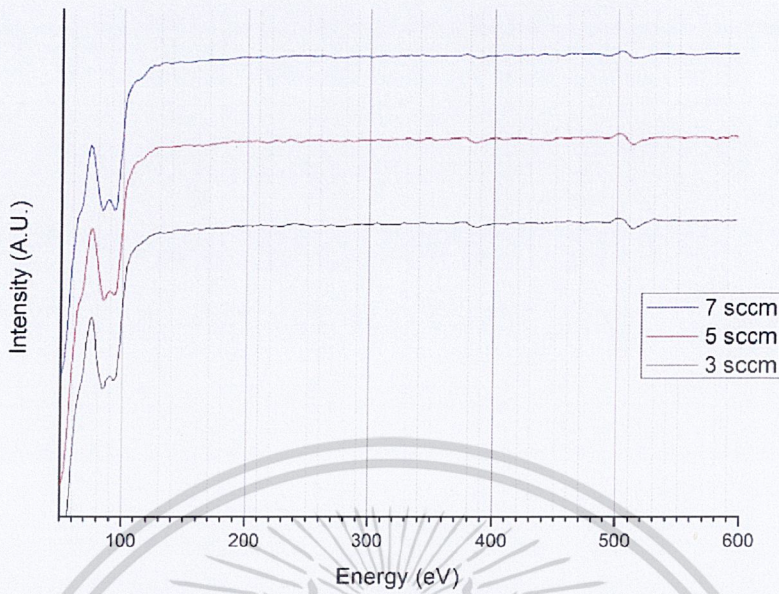


รูปที่ 4.31 สเปกตรัมของพลาสมาที่เกิดจากการทำความสะอาด เมื่อเปลี่ยนอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนเป็น 3, 5 และ 7 sccm ใช้เวลาในการทำความสะอาด 60 นาที โดยให้ก๊าซไฮโดรเจนปล่อยทิ้งไว้ในระบบหลังทำความสะอาดแผ่นซิลิกอน

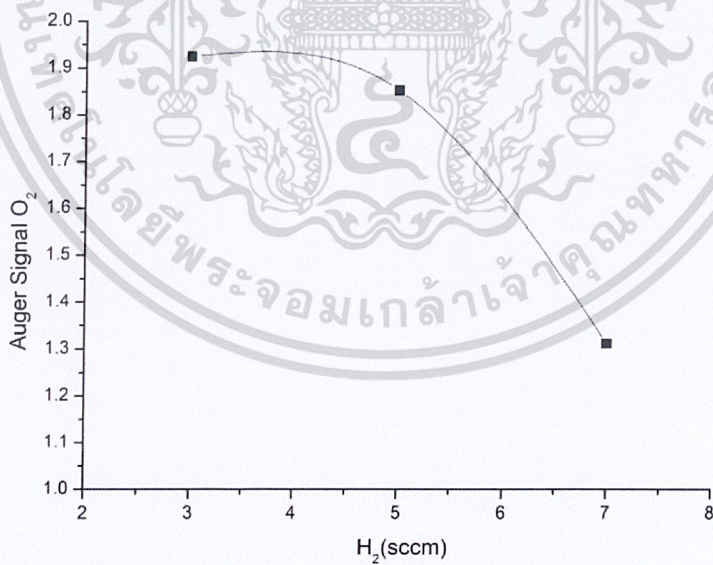


รูปที่ 4.32 แนวโน้มการเปล่งแสงของอนุภาคต่าง ๆ ในพลาสมา เมื่อเปลี่ยนอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนเป็น 3, 5 และ 7 sccm โดยให้ก๊าซไฮโดรเจนปล่อยทิ้งไว้ในระบบหลังทำความสะอาดแผ่นซิลิกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.33 สัญญาณไอเจือเล็กตรอนจากแผ่นซิลิกอนหลังทำความสะอาด เมื่อเปลี่ยนอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนเป็น 3, 5 และ 7 sccm ใช้เวลาในการทำความสะอาด 60 นาที โดยให้ก๊าซไฮโดรเจนปล่อยทิ้งไว้ในระบบหลังทำความสะอาดแผ่นซิลิกอน

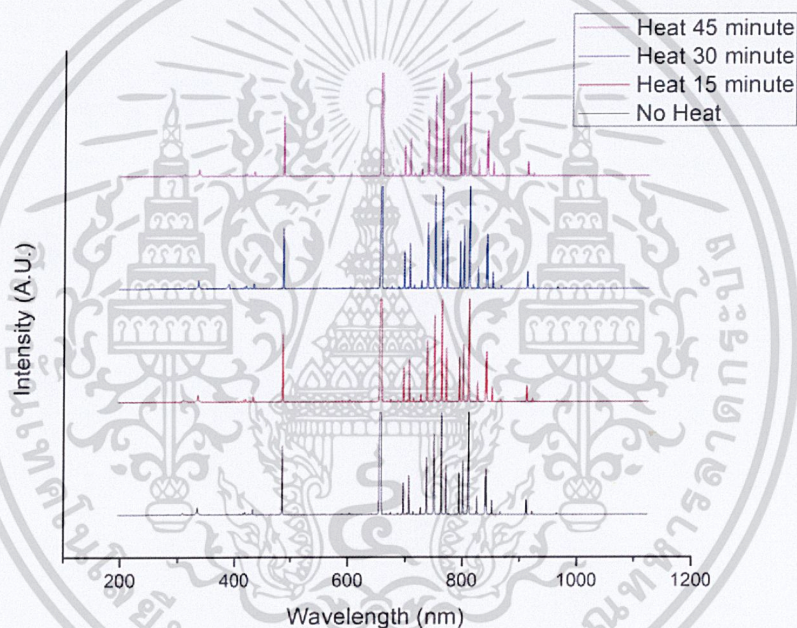


รูปที่ 4.34 แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณไอเจือเล็กตรอนของออกซิเจน เมื่อเปลี่ยนอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนเป็น 3, 5 และ 7 sccm โดยให้ก๊าซไฮโดรเจนปล่อยทิ้งไว้ในระบบหลังทำความสะอาดแผ่นซิลิกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

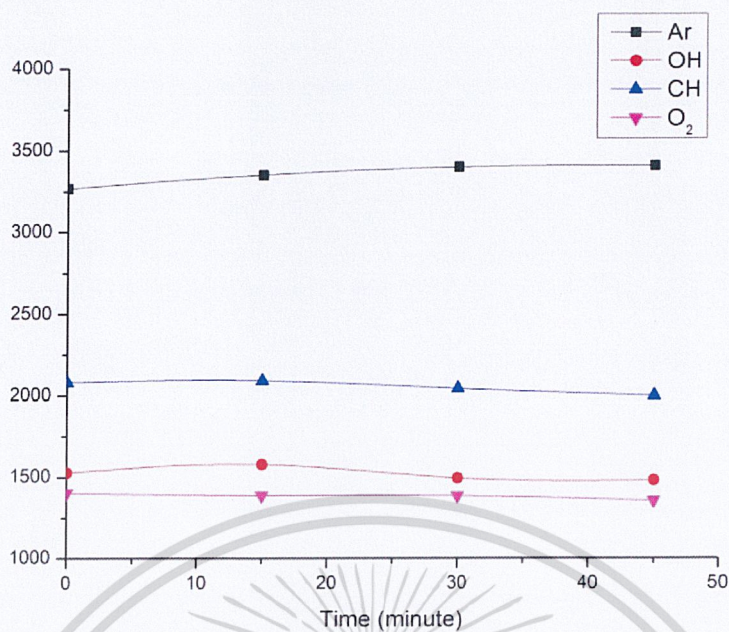
4.3.6 ผลของเวลาในการให้ความร้อนกับแผ่นซิลิกอน

การศึกษาผลของเวลาในการให้ความร้อนกับแผ่นซิลิกอนที่เวลา 15, 30 และ 45 นาที เทียบกับแผ่นซิลิกอนที่ไม่ให้ความร้อน ทดลองโดยการทำความสะอาดด้วยการใช้อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน 20 sccm และก๊าซไฮโดรเจน 3 sccm ใช้เวลาในการทำความสะอาด 30 นาที โดยวัดสเปกตรัมการเปล่งแสงของพลาสมา แสดงดังรูปที่ 4.35 และแนวโน้มการเปล่งแสงของอนุภาคต่าง ๆ ในพลาสมา แสดงดังรูปที่ 4.36 ทำการวัดสัญญาณโอเจอิเล็กตรอน แสดงดังรูปที่ 4.37 เมื่อเทียบกับสัญญาณโอเจอิเล็กตรอนของแผ่นซิลิกอนก่อนทำความสะอาด แสดงดังรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าเมื่อเวลาการให้ความร้อนกับแผ่นซิลิกอนที่นานขึ้นจะทำให้ขนาดสัญญาณโอเจอิเล็กตรอนของซิลิกอนมีขนาดที่ใหญ่ขึ้น ส่วนขนาดสัญญาณโอเจอิเล็กตรอนของออกซิเจนมีขนาดลดลง แสดงดังรูปที่ 4.38

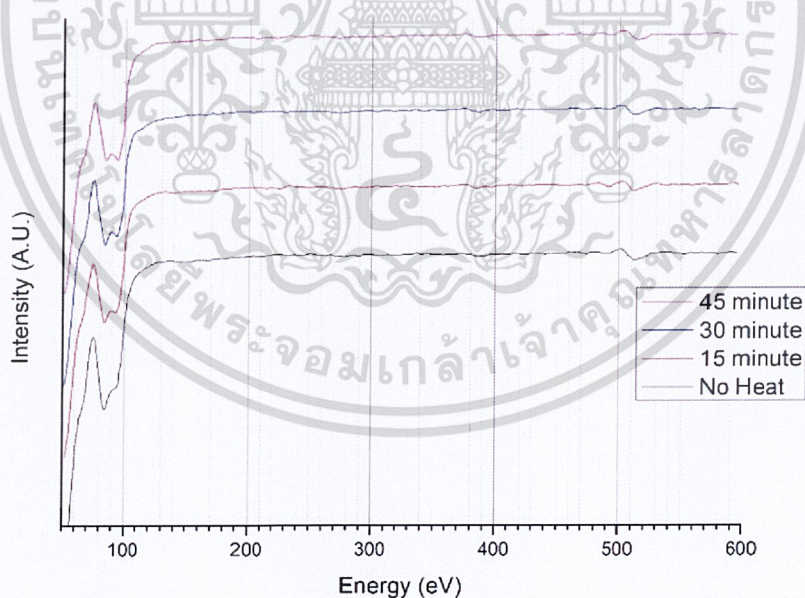


รูปที่ 4.35 สเปกตรัมของพลาสมาที่เกิดจากการทำความสะอาด เมื่อเวลาในการให้ความร้อนกับแผ่นซิลิกอนเป็น 15, 30 และ 45 นาที เทียบกับแผ่นที่ไม่ให้ความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

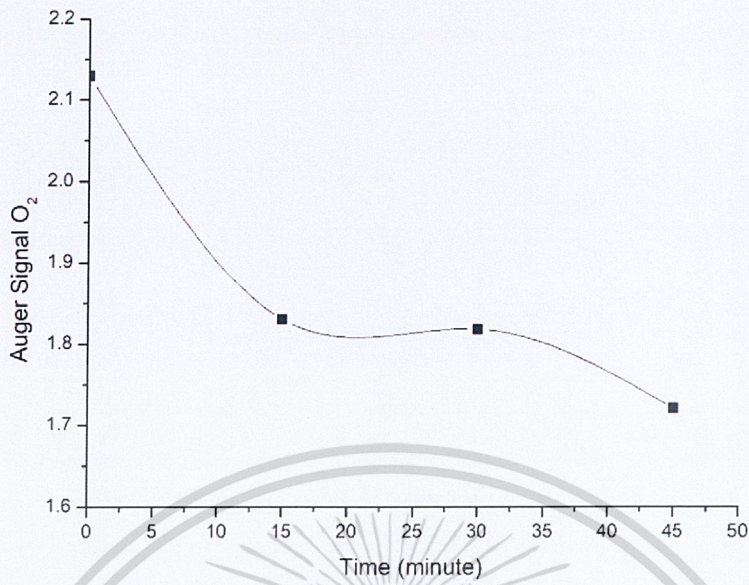


รูปที่ 4.36 แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของอนุภาคต่าง ๆ ในพลาสมา เมื่อเวลาในการให้ความร้อนกับแผ่นซิลิกอน 15, 30 และ 45 นาที เทียบกับแผ่นที่ไม่ให้ความร้อน



รูปที่ 4.37 สัญญาณโอเจอีเล็กตรอนจากแผ่นซิลิกอนหลังทำความสะอาด เมื่อเวลาในการให้ความร้อนกับแผ่นซิลิกอน 15, 30 และ 45 นาที เทียบกับแผ่นที่ไม่ให้ความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.38 แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณไอเจอีเล็กตรอนของออกซิเจน เมื่อเวลาในการให้ความร้อนกับแผ่นซิลิกอน 15, 30 และ 45 นาที เทียบกับแผ่นที่ไม่ให้ความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

บทนี้เป็นการสรุปผลการศึกษาของการทำความสะอาดพื้นผิวด้วยแหล่งกำเนิดพลาสมาที่กระตุ้นด้วยคลื่นความถี่วิทยุ พร้อมทั้งทำการประเมินความสะอาดพื้นผิวด้วยเทคนิคโอเจอิเล็กทรอนิกส์สเปกโทรสโกปี พร้อมทั้งข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

การศึกษากำหนดทำความสะอาดพื้นผิวของแผ่นซิลิกอน (Silicon wafer) ด้วยแหล่งกำเนิดพลาสมาที่กระตุ้นด้วยคลื่นความถี่วิทยุ ความสะอาดของพื้นผิวจะถูกระบุด้วยเทคนิคโอเจอิเล็กทรอนิกส์สเปกโทรสโกปี โดยใช้ตัวบ่งชี้ความสะอาดคือ ขนาดสัญญาณโอเจอิเล็กทรอนิกส์ของซิลิกอน (พลังงาน 92 อิเล็กตรอนโวลต์) คาร์บอน (พลังงาน 272 อิเล็กตรอนโวลต์) และออกซิเจน (พลังงาน 508 อิเล็กตรอนโวลต์) ซึ่งเมื่อสัญญาณโอเจอิเล็กทรอนิกส์ของซิลิกอนมีขนาดใหญ่ขึ้น ในขณะที่ขนาดสัญญาณโอเจอิเล็กทรอนิกส์ของคาร์บอนและออกซิเจนมีขนาดเล็กลง แสดงว่าพื้นผิวมีความสะอาดมากขึ้น

5.1.1 การศึกษาสเปกโทรสโกปีของการเปล่งแสง (Optical Emission Spectroscopy: OES)

ผลการทดลองที่ได้ในการศึกษาเกี่ยวกับสเปกโทรสโกปีของการเปล่งแสงนี้สามารถสรุปได้ว่า ความเข้มของแสงเส้นสเปกตรัมของออกซิเจนที่วัดได้นี้ สามารถบ่งบอกถึงความหนาแน่นของพลาสมาได้ นั่นคือ ถ้าความเข้มแสงของเส้นสเปกตรัมของออกซิเจนมีค่ามาก ค่าความหนาแน่นของพลาสมา ก็จะมีค่ามาก และถ้าความเข้มแสงของสเปกตรัมของออกซิเจนมีค่าน้อย ค่าความหนาแน่นของพลาสมา ก็จะมีค่าน้อยด้วยเช่นกัน

5.1.2 การศึกษาการทำความสะอาดพื้นผิวแผ่นซิลิกอนด้วยวิธีพลาสมาที่กระตุ้นด้วยคลื่นความถี่วิทยุ

พารามิเตอร์ที่สำคัญในการทำความสะอาดด้วยวิธีพลาสมาที่กระตุ้นด้วยคลื่นความถี่วิทยุที่ได้ศึกษา ประกอบด้วยผลการทำความสะอาดด้วย Ar Plasma ผลการทำความสะอาดด้วย Ar และ H₂ Plasma และผลของการทำความสะอาดด้วย Ar และ H₂ Plasma ร่วมกับการให้ความร้อนกับชิ้นงาน ซึ่งผลการทดลองที่ได้สามารถสรุปผลได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.2.1 ผลของการทำความสะอาดด้วย Ar Plasma

การทำความสะอาดด้วย Ar Plasma เมื่อเพิ่มเวลาและกำลังคลื่นวิทยุในการทำความสะอาดให้มากขึ้น สามารถขจัดคาร์บอนออกจากพื้นผิวของแผ่นซิลิกอนออกได้ แต่ไม่สามารถขจัดออกซิเจนออกได้

5.1.2.2 ผลการทำความสะอาดด้วย Ar และ H₂ Plasma

การทำความสะอาดด้วย Ar และ H₂ Plasma สามารถขจัดคาร์บอนออกจากพื้นผิวได้ และสามารถลดปริมาณออกซิเจนลง เมื่อเทียบกับการทำความสะอาดด้วย Ar Plasma

5.1.2.3 ผลการทำความสะอาดด้วย Ar และ H₂ Plasma และการให้ความร้อนแก่ชิ้นงาน

การเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนและไฮโดรเจน สามารถขจัดคาร์บอนออกจากพื้นผิวได้ และสามารถลดปริมาณออกซิเจนลงได้ เมื่อเพิ่มเวลาในการทำความสะอาด โดยการให้ก๊าซอาร์กอนหรือไฮโดรเจนทิ้งไว้หลังจากการทำความสะอาด เวลาที่มากขึ้นสามารถลดปริมาณออกซิเจนลงได้ และเมื่อเวลาที่ใช้ในการให้ความร้อนกับชิ้นงานมากขึ้น ทำให้สามารถลดปริมาณออกซิเจนลงได้

จากเงื่อนไขในการทำความสะอาดทั้งหมด สามารถสรุปเงื่อนไขที่ดีที่สุดในการทำความสะอาดได้ คือ เงื่อนไขในการทำความสะอาดด้วย Ar และ H₂ Plasma ร่วมกับการให้ความร้อนกับชิ้นงาน

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการทำความสะอาดพื้นผิวจะต้องให้ความสำคัญต่อความสะอาดเป็นอย่างแรก เนื่องจากความสามารถแม้กระทั่งฝุ่นเพียงเล็กน้อยก็อาจจะส่งผลต่อการทดลองได้ ดังนั้นภาชนะ อุปกรณ์ และเครื่องมือต่าง ๆ จะต้องดูแลรักษาความสะอาดเป็นอย่างดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] Davis,L.E.,MacDona;d,N.C.,Palmberg,P.W.Ricach,G.E.& Weber,R.E. **Handbook of Auger Electron Spectroscopy**. Minesota: Physical Electronic division of Perkins Elmer Corp., 1997
- [2] I. G. Brown. **The Physics and Technology of Ion Source**. New York: John wily & son, Inc. 1989
- [3] Nasser E. **Fundamentals of Gaseous Ionization and Plasma Electronics**. The United of America: Jonh Wiley & Sons, Inc. 1997
- [4] เตี่ยว อภัยราช. “การพัฒนาาระบบทำความสะอาดสารกึ่งตัวนำด้วยพลาสมาชนิดกระตุ้นด้วยคลื่นไมโครเวฟ.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2551.
- [5] ณัฐรดา โยธาคำ. “การศึกษาการทำความสะอาดของพื้นผิวซิลิกอนด้วยเทคนิคโอเจอิเล็กทรอนิกส์สเปกโทรสโกปี.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2549.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้