การออกแบบและการพัฒนาหัววัดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตที่ใช้กระจกซิลิคอนโมลิบดีนัม

นางสาวกัลยา ธนาสินธ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชามาตรวิทยา
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2554
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย
The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository(CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

DESIGN AND DEVELOPMENT OF EUV DETECTOR

USING SILICON MOLYBDENUM MIRROR

Miss Kanlaya Thanasin

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Science Program in Metrological Science

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบและการพัฒนาหัววัดรังสีเอกซ์ทรีม อัลตราไวโอเลตที่ใช้กระจกซิลิคอนโมลิบดีนัม
โดย	นางสาวกัลยา ธนาสินธ์
ภาควิชา	มาตรวิทยา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัฐชาติ มงคลนาวิน

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยาพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

…………………………………………….. คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

…………………………………………… ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ต้นพงศ์ แก้วคงคา)

…………………………………………… อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รัฐชาติ มงคลนาวิน)

…………………………………………… กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ กิรณันต์ รัตนธรรมพันธ์)

…………………………………………… กรรมการ (ภายนอกมหาวิทยาลัย)
(รองศาสตราจารย์ ดร. อนันตสิน เตชะกำพุช)

กัลยา ธนาสินธ์: การออกแบบและการพัฒนาหัววัดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตที่ใช้กระจกซิลิคอนโมลิบดีนัม. (DESIGN AND DEVELOPMENT OF EUV DETECTOR USING SILICON MOLYBDENUM MIRROR) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ.ดร.รัฐชาติ มงคลนาวิน, 67 หน้า.

วิทยานิพนธ์อธิบายการพัฒนาอุปกรณ์เพื่อการตรวจวัดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลต (Extreme Ultraviolet,EUV) การสร้างหัววัดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตมุ่งเน้นการตอบสนองที่รวดเร็ว ที่เจาะจงความยาวคลื่น 13.5นาโนเมตร ซึ่งหัววัดรังสีนี้พัฒนาโดยใช้หลักปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric Effect) โลหะที่มีค่าฟังก์ชันงานที่เหมาะสมได้ถูกนำมาทดสอบเพื่อหาชนิดของโลหะที่มีการตอบสนองที่ดีที่สุด จากนั้นหัววัดรังสีได้ถูกนำไปสอบเทียบกับแสงเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตที่ให้พลังงานที่ช่วงความยาวคลื่น 13.5นาโนเมตร ที่สถานีการทดลองเทคนิคทางด้านการตรวจสอบพื้นผิวของวัสดุ (Photoemission Spectroscopy,PES) ณ ศูนย์วิจัยแสงซินโครตรอนแห่งชาติ เพื่อหาประสิทธิภาพการวัดของหัววัดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลต เพื่อเปรียบเทียบกับหัววัดรังสีชนิดโฟโตไดโอด SXUV HS5 Si/Zr ที่ได้มีการพัฒนามาแล้วและใช้อย่างแพร่หลาย โดยพบว่าหัววัดรังสีที่สร้างขึ้นจากโลหะเงินนั้นมีค่าฟังก์ชันงานที่ 4.73 อิเล็กตรอนโวลต์มีประสิทธิภาพสูงสุด และเมื่อนำมาสร้างเป็นหัววัดรังสีแล้วสามารถวัดได้ครอบคลุมรังสีที่ช่วง 13.5 นาโนเมตร ได้ดีเทียบเท่ากับหัววัดรังสีชนิดโฟโตไดโอด SXUV HS5 Si/Zr เพื่อให้หัววัดรังสีมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น สามารถนำหัววัดรังสีไปใช้ร่วมกับกระจกเคลือบฟิล์มบางซิลิคอนโมลิบดีนัม Si/Mo ได้ จากการทดสอบหาประสิทธิภาพของหัววัดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตที่ใช้โลหะเงิน พบว่า ที่ช่วงความยาวคลื่น12นาโนเมตร 13.5นาโนเมตร และ 15นาโนเมตร สามารถวัดประสิทธิภาพได้ 1.7% 2.47% และ 1.38% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับหัววัดรังสีชนิดโฟโตไดโอด SXUV HS5 Si/Zr พบว่าที่ 13.5นาโนเมตร หัววัดมีประสิทธิภาพ 3.74% ทำให้สรุปได้ว่าหัววัดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตนี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ทางด้านการพัฒนาอุตสาหกรรมสารกึ่งตัวนำ และด้านการวัดรังสีช่วงความยาวคลื่นในช่วง 5-50นาโนเมตร ได้ดีเทียบเท่ากับหัววัดรังสีแบบโซลิดเสตท (Solid State) ที่มีการใช้อย่างแพร่หลาย

สาขาวิชา......มาตรวิทยา...... ลายมือชื่อนิสิต..

ปีการศึกษา......2554............. ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก...............................

5172220023: MAJOR METROLOGICAL SCIENCE
KEYWORDS: PHOTOELECTRIC EFFECT/EXTREME ULTRAVIOLET/EUV DETECTOR.

KANLAYA THANASIN: DESIGN AND DEVELOPMENT OF EUV DETECTOR USING SILICON MOLYBDENUM MIRROR. ADVISOR: ASST.PROF. RATTACHAT MONGKOLNAVIN, Ph.D., 67 pp.

This thesis describes the development of Extreme Ultraviolet (EUV) radiation detector. The investigation prioritized on the performance of the detector especially its fast response to photon at wavelength of 13.5 nm thus the photoelectric effect principle is used to devise such a detector. Metals with suitable work function were investigated such that the metal with best response was identified. The detector performance was investigated at Siam Photon Laboratory Synchrotron Light Research Institute (Public Organization) where Photoemission Spectroscopy (PES) beam line can provide EUV radiation with known wavelength and intensity through angle-resolved photoemission spectroscopy. The efficiencies of the detector were measured in comparison to a commercialized diode detector SXUV HS5 Si/Zr which has a detectable window around 13.5 nm. It was found that silver (Ag) was the best material to make such a detector where the work function is 4.73 eV. When the detector was used to measure the radiation with wavelength of 13.5 nm, it was shown that the detector can perform as well as the SXUV HS5 Si/Zr. In order to increase the detection efficiency, the detector can be used in cooperation with silicon molybdenum mirror (Si/Mo) for better wavelength selectivity. The efficiencies of the detector used silver metal detecting photons of 12 nm,13.5 nm and 15 nm were 1.7%, 2.47% and 1.38% respectively. In comparison with SXUV HS5 Si/Zr, the efficiency at 13.5 nm was 3.74%. It can be concluded that the proposed EUV detector has a potential to be further used in semiconductor industry development as well as measurement of EUV radiation (5-50 nm) in other applications that are comparable with other widely used solid state radiation detectors.

Field of Study: Metrological Science Student's Signature: ....

Academic Year: 2011 Advisor's Signature: ....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ได้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัฐชาติ มงคลนาวิน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้กรุณาให้ความรู้คำแนะนำและตรวจแก้ข้อเขียนวิทยานิพนธ์นี้ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณท่านคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ต้นพงศ์ แก้วคงคา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ กิรณนันต์ รัตนธรรมพันธ์ อาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และรองศาสตราจารย์ ดร.อนันตสิน เตชะกำพุช ผู้ทรงคุณวุฒิจากภายนอก

ข้าพขอขอบพระคุณแหล่งเงินทุนสนับสนุนวิทยานิพนธ์จากทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์สำหรับนิสิตจากบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

นอกจากนี้ข้าพเจ้าใคร่ขอขอบพระคุณ Professor Dr. C.S. Wong อาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัย มาลายา ประเทศมาเลเซียที่กรุณาให้คำปรึกษาบางประการแก่ผู้วิจัย อาจารย์ ชนะ ผิวล่อง ที่ช่วยให้คำปรึกษาทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ และ Dr.Hideki Nakajima หัวหน้าสถานีทดลอง (PES) ดร.รัชฎาภรณ์ ทรัพย์เรืองเนตร นาย สุรเชรษฐ์ รัตนสุพร นักวิจัยจากศูนย์วิจัยแสงซินโครตรอนแห่งชาติ ที่กรุณาให้คำแนะนำปรึกษาทางด้านฟิสิกส์และอิเล็กทรอนิกส์ ทั้งยังช่วยออกแบบการทดลองทางด้านหัววัดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลต ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ท้ายสุดนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอพคุณบิดา มารดา พี่ชาย และพี่สาว ที่สนับสนุนทุกๆด้านแก่ข้าพเจ้าเสมอมา และขอขอบพระคุณพี่ๆ จากห้องปฏิบัติการพลาสมา และพี่ๆ ที่ห้องปฏิบัติการศูนย์วิจัยแสงซินโครตรอนแห่งชาติ ทุกคนที่คอยให้คำแนะนำและผู้ที่เกี่ยวข้องที่ได้ให้การช่วยเหลือในทุกๆ ด้าน

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..จ

กิตติกรรมประกาศ..ฉ

สารบัญ..ช

สารบัญตาราง..ญ

สารบัญภาพ..ฎ

บทที่ 1 บทนำ..1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย..2

1.3 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย..3

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..3

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..4

2.1 แนวคิดและทฤษฎี..4

2.1.1 มาตรวิทยา..4

2.1.2 การสอบเทียบ 5

2.2.3 ความไม่แน่นอนของการวัด..5

2.2 ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก..7

2.3 หัววัดรังสีชนิดโฟโตไดโอด SXUV HS5 Si/Zr..12

2.4 กระจกเคลือบฟิล์มบางซิลิคอนโมลิบดีนัม (Si/Mo)..12

บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย..14

3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง..14

3.2 ศูนย์วิจัยแสงซินโครตรอนแห่งชาติ ข้อมูลด้านเทคนิค 14

3.3 เทคนิคที่ใช้แสงซินโครตรอน..16

3.4 เครื่องมือในสถานีทดลองด้าน photoemission spectroscopy (PES)..18

หน้า

3.5 เครื่องมือในสถานีทดลองด้าน photoemission spectroscopy (PES)…………....19
3.6 ตัวอย่างงานวิจัยของสถานีทดลอง photoelectron emission spectroscopy
(PES)………………………………….. ……..………………………………19
3.7 วิธีการทดลอง…………………………………………………….……………………….20
3.8 ขั้นตอนการทดลอง……………………………………………………….………………22
3.8.1 วิธีการทดลอง การทดสอบประสิทธิภาพของโลหะทั้ง 4 ชนิด เงิน
ทองแดง เหล็กและอะลูมิเนียม………………...…………………….……......25
3.9 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของหัววัดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตกับ
หัววัดรังสีชนิดโฟโตไดโอด SXUV HS5 Si/Zr…………………..…...……….…27
3.9.1 แผนผังการทดสอบประสิทธิภาพของหัววัดรังสี……………………………..30

บทที่ 4 ผลการทดลอง……………………………………………………….……….……...31

4.1 การทดสอบประสิทธิภาพของโลหะเพื่อคัดเลือกโลหะที่มีความเหมาะสม
มากที่สุดที่สามารถตอบสนองรังสีในย่าน 13.5 นาโนเมตร……………….………34
4.2 การทดสอบหัววัดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตที่สร้างจากโลหะเงิน…………..…..38
4.3 การทดสอบหัววัดรังสีชนิดโฟโตไดโอด SXUV HS5 Si/Zr……………………….....42
4.4 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของหัววัดรังสี…………………………………......45

บทที่ 5 สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ…………………………………….……..47

5.1 สรุปผลการทดลอง……………………………………………………….……......47
5.2 อภิปรายผลการวิจัย………………………………………………………………47
5.3 ข้อเสนอแนะ…………………………………………………………………….…...48

หน้า

รายการอ้างอิง...50

ภาคผนวก...52

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์...67

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1.1 แสดงค่าฟังก์ชันงานของโลหะ…………………………………………………………..7
ตารางที่ 3.7.1 แสดงค่าฟังก์ชันงานของโลหะที่ใช้ในการทดลอง………………………………...25
ตารางที่ 4.1.1 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของหัววัดรังสีที่สร้างจากโลหะเงินที่
ช่วงความยาวคลื่น12 นาโนเมตร 13.5 นาโนเมตรและ 15 นาโนเมตร…………..38
ตารางที่ 4.5.1 แสดงค่าเปรียบเทียบประสิทธิภาพของหัววัดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวดอเลต
กับหัววัดรังสีชนิดโฟโตไดโอด SXUV HS5 Si/Zr …………………………………45

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่1.1 แสดงการทำงานหัววัดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลต……………………………………..2
ภาพที่ 2.2.1 ลักษณะอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองทางโฟโตอิเล็กทริก…………………………......8
ภาพที่ 2.2.2 กระแสโฟโตอิเล็กทริก……………………………………………………………..9
ภาพที่ 2.2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของแสงกับศักย์หยุดยั้ง…………………………...10
ภาพที่ 2.3.1 กราฟแสดงค่าการทำงานของหัววัดรังสีชนิดโฟโตไดโอด SXUV HS5 Si/Zr ………12
ภาพที่ 2.4.1 กระจกเคลือบฟิล์มบางซิลิคอนโมลิบดีนัม (Si/Mo)…………………………………13
ภาพที่ 2.4.2 กราฟแสดงช่วงการทำงานของกระจกซิลิคอนโมลิบดีนัม…………………………..13
ภาพที่ 3.3.1 โฟตอนฟลักซ์ที่ตำแหน่งตัวอย่าง……………………………………………………16
ภาพที่ 3.3.2 แสดงช่วงพลังงานของโฟตอน…………………………………………….………...17
ภาพที่ 3.3.3 แสดงระบบลำเลียงแสง (Undulator beamline) ของสถานีทดลอง
ซินโครตรอน………………………………………………………….…….…..…17
ภาพที่ 3.5.1 แสดง ระบบการทำงานของสถานีทดลองทางด้าน 3.6 ตัวอย่างงานวิจัย
ของสถานีทดลอง Photoelectron Emission Spectroscopy (PES)….……….....19
ภาพที่ 3.7.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง โวลต์กับกระแส ที่ค่าของกระแสคงที่เพิ่มขึ้น
แต่ความต่างศักย์หยุดยั้งเท่าเดิม………………………………………………...21
ภาพที่ 3.7.2 กราฟที่แสงความถี่เดียวกัน แต่ความเข้มแสงมากขึ้น จะได้กระแสคงที่เพิ่มขึ้น
แต่ความต่างศักย์หยุดยั้งเท่าเดิมแสดงว่าอิเล็กตรอนไม่ได้มีพลังงานจลน์เพิ่มขึ้น....21
ภาพที่ 3.7.3 กราฟแสดงถ้าให้แสงความถี่ต่างกัน ที่มีความเข้มเท่ากันจะได้ว่ายิ่งความถี่สูงขึ้น
ได้ค่าความต่างศักย์หยุดยั้งมากที่สุดแสดงว่าพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนขึ้นกับ
ความถี่ของ………………………………………………………………….….22
ภาพที่ 3.8.1 การออกแบบและการสร้างการทดสอบประสิทธิภาพของโลหะทั้ง 4 ชนิด…………23
ภาพที่ 3.8.2 การทดสอบประสิทธิภาพของโลหะโดยใช้หลักการโฟโตอิเล็กทริก………….……..23
ภาพที่ 3.8.3 แสดงการสร้างการทดสอบประสิทธิภาพของโลหะทั้ง 4 ชนิด…………….……..…24
ภาพที่ 3.8.4 แสดงการสร้างหัววัดรังสีโดยใช้โลหะทั้ง 4 ชนิดในการทดสอบประสิทธิภาพ
ของโลหะ……………………………...………………………………………….24
ภาพที่ 3.8.5 แสดงภาพหัววัดรังสีที่สร้างจากโลหะเงิน……………………………………..……….25
ภาพที่ 3.8.6 แสดงภาพหัววัดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตที่ใช้ทดสอบประสิทธิภาพ….….……26

หน้า

ภาพที่ 3.8.7 แสดงภาพหัววัดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตที่สร้างจากโลหะเงิน…………….…….26
ภาพที่ 3.9.1 ผังการทำงานของหัววัดรังสีชนิดโฟโตไดโอด SXUV HS5 Si/Zr…………………….…..27
ภาพที่ 3.9.2 แสดงหัววัดรังสีชนิดโฟโตไดโอด SXUV HS5 Si/Zr……………………………........28
ภาพที่ 3.9.3 แสดงฐานของหัววัดรังสีชนิดโฟโตไดโอด SXUV HS5 Si/Zr………………………..28
ภาพที่ 3.9.4 แสดงการทดสอบประสิทธิภาพของหัววัดรังสีชนิดโฟโตไดโอด SXUV HS5 Si/Zr กับระบบลำเลียงแสง……………………………………………………………..29
ภาพที่ 3.9.5 แสดงหลักการทดสอบประสิทธิภาพของหัววัดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลต กับหัววัดรังสีชนิดโฟโตไดโอด SXUV HS5 Si/Zr………………………..……....30
ภาพที่ 4.1 แสดงภาพของหลักการคำนวณจำนวนของโฟตอนที่ออกมาจากระบบของ ศูนย์วิจัยแสงซินโครตรอน…………………………………………..……….....31
ภาพที่ 4.1.1 การทดสอบประสิทธิภาพของโลหะโดยใช้หลักการโฟโตอิเล็กทริก………………..34
ภาพที่ 4.1.2 กราฟแสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพของโลหะโดยใช้ปรากฏการณ์ โฟโตอิเล็กทริกในช่วงความยาวคลื่น 13.5 นาโนเมตร…………………………......35
ภาพที่ 4.1.3 กราฟแสดงผลการทดสอบหัววัดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตที่ใช้โลหะเงิน……...36
ภาพที่ 4.1.4 กราฟแสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพของหัววัดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลต...36
ภาพที่ 4.2.1 กราฟแสดงการทดสอบประสิทธิภาพของหัววัดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตที่ สร้างจากโลหะเงินในช่วงของพลังงานที่ต่างกัน…….………………….…………38
ภาพที่ 4.2.2 กราฟแสดงการทดสอบประสิทธิภาพของหัววัดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตที่ สร้างจากโลหะเงินในช่วงของพลังงานที่ต่างกันในช่วงของรังสี ยูวี (UV) และรังสีอียูวี (EUV)……………………………………………………………..…39
ภาพที่ 4.2.3 กราฟแสดงการทดสอบประสิทธิภาพของหัววัดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตที่ สร้างจากโลหะเงินในช่วงของพลังงานที่12 นาโนเมตร 13.5 นาโนเมตร และที่ 15 นาโนเมตร………………………………………………………………..........40
ภาพที่ 4.2.4 กราฟแสดงการทดสอบประสิทธิภาพของหัววัดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตทั้ง 4 ชนิดเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพที่ต่างกันในการตอบสนองต่อแสงในช่วง ของพลังงานที่ 13.5 นาโนเมตร …………………………………………….…41
ภาพที่ 4.3.1 กราฟแสดงผลการทดสอบของหัววัดรังสีชนิดโฟโตไดโอด SXUV HS5 Si/Zr ทดสอบกับความยาวคลื่นครอบคลุมช่วงพลังงานที่ 13.5 นาโนเมตร……………..43

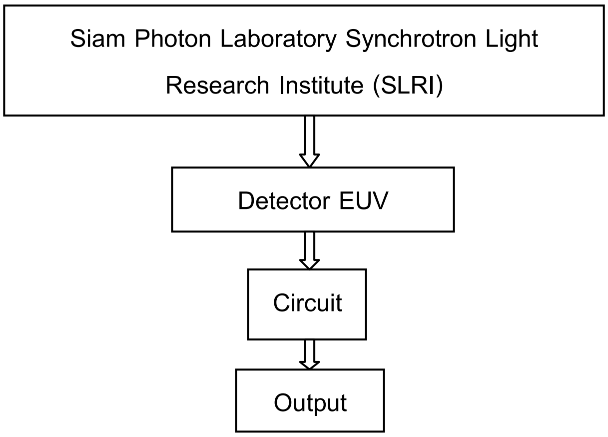
หน้า

ภาพที่ 4.3.2 กราฟแสดงผลการทดสอบของหัววัดรังสีชนิดโฟโตไดโอด SXUV HS5 Si/Zr ที่ใช้ร่วมกับกระจกเคลือบฟิล์มบางซิลิคอนโมลิบดีนัมทดสอบกับความยาวคลื่นครอบคลุมช่วงพลังงานที่ 13.5 นาโนเมตร...44

บทที่ 1
บทนำ

1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

รังสีเป็นสิ่งที่ไม่สามารถตรวจวัดได้ด้วยร่างกายมนุษย์เอง ดังนั้นในการตรวจวัดรังสีจึงจำเป็นจะต้องอาศัยเครื่องมือทางด้านวิทยาศาสตร์คือ หัววัดรังสีก็มีหลายประเภทแบ่งตามชนิดของรังสีที่จะทำการวัดสำหรับรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตนั้นเป็นรังสีที่ครอบคลุมความยาวคลื่น 5 ถึง 50 นาโนเมตร (nanometer: nm) [1] ซึ่งสั้นกว่าความยาวคลื่นแสงที่มองเห็นถึง 10 ถึง100 เท่า ด้วยสมบัติข้อนี้จึงทำให้สามารถเห็นหรือสร้างภาพของวัสดุที่มีขนาดเล็กกว่าใช้แสง ดังนั้นจึงนำสมบัติข้อนี้ไปใช้ในการประยุกต์ในด้านจุลทรรศน์และลิโทกราฟฟีในอุตสาหกรรมสารกึ่งตัวนำเนื่องจากสามารถสร้างลายเส้นวงจรบนแผ่นเวเฟอร์ให้มีขนาดเล็กทำให้มีจำนวนเส้นวงจรมากขึ้นโดยใช้พื้นที่เท่าเดิม เนื่องจากเส้นวงจรมีขนาดที่เล็กลงเมื่อเปรียบเทียบกับช่วงความยาวคลื่นนี้กับที่ใช้ในปัจจุบัน โดยผลนี้ทำให้ขนาดของอุปกรณ์มีขนาดเล็กลงกว่าเดิม ปัจจุบันได้มีการค้นคว้าสร้างแหล่งกำเนิดรังสีดังกล่าวและทำการวัดรังสีโดยใช้อุปกรณ์ตรวจจับต่างๆ ซึ่งรังสีนี้จำเป็นต้องใช้หัววัดที่มีประสิทธิภาพในช่วงพลังงานรังสีโดยเฉพาะซึ่งในประเทศนั้นยังมีน้อยจำเป็นต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ซึ่งหัววัดรังสีที่ผลิตจากต่างประเทศมีราคาแพงมาก ซึ่งในปัจจุบันประเทศไทยได้รับผลกระทบทางเศรษฐกิจทำให้การจัดหาอุปกรณ์ทางด้านนี้เป็นไปได้ยาก ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้ให้ความสนใจพัฒนาการสร้างหัววัดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตให้มีความไวมากขึ้น มีการตอบสนองที่รวดเร็วในการวัดที่เจาะจงความยาวคลื่น 13.5นาโนเมตร โดยหัววัดรังสีนี้พัฒนาขึ้นโดยใช้หลักการสร้างหัววัดรังสีที่อาศัยปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก(photoelectric effect) ของโลหะที่มีค่าฟังก์ชันงาน (work function) ที่เหมาะสมจากนั้นนำไปสอบเทียบกับแสงเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตที่ศูนย์วิจัยแสงซินโครตรอนแห่งชาติ เพื่อหาประสิทธิภาพการวัดของหัววัดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตเทียบกับหัววัดรังสีชนิดโฟโตไดโอด SXUV HS5 Si/Zr ดังแสดงในภาพที่1.1 วิทยานิพนธ์นี้ได้สร้างหัววัดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตขึ้นโดยใช้วัสดุและอุปกรณ์ที่หาได้ง่ายโดยให้มีประสิทธิภาพทัดเทียมกับหัววัดรังสีที่ผลิตจำหน่ายในเชิงพาณิชย์และเพื่อใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาไปสู่หัววัดรังสีแบบอื่นๆ ต่อไป



ภาพที่1.1 แสดงการทำงานหัววัดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลต

2. แนวคิดและเหตุผล

การสร้างหัววัดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตได้อาศัยปรากฏการณ์ของโฟโตอิเล็กทริก เพื่อให้หัววัดรังสีสามารถวัดได้ที่ช่วงความยาวคลื่น13.5นาโนเมตร ซึ่งปรากฏการโฟโตอิเล็กทริก คือ ปรากฏการณ์ที่อิเล็กตรอนในอะตอมของสสารถูกปลดปล่อยออกมาเมื่อสสารดูดซับรังสีต่างๆ เช่น คลื่นรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลต รังสีเอกซ์ อิเล็กตรอนที่หลุดออกมาเรียกว่า โฟโตอิเล็กตรอน(photoelectron) ปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นเมื่อมีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่สูงกว่าค่าความถี่ขีดเริ่มของโลหะที่ใช้ในการทดลอง มาตกกระทบบนผิววัสดุดังกล่าว โดยที่พลังงานของโฟตอนถูกดูดกลืนและทำให้อิเล็กตรอนถูกปลดปล่อยออกมาซึ่งสังเกตได้จากกระแสไฟฟ้าที่วัดได้ในวงจร หากรังสีที่ตกกระทบมีความถี่ต่ำกว่าค่าความถี่ขีดเริ่มของโลหะจะไม่ทำให้เกิดโฟโตอิเล็กตรอนไม่ว่าความเข้มของคลื่นแสงจะมีค่ามากก็ตาม เพราะพลังงานที่อิเล็กตรอนได้รับไม่มากพอที่จะทำให้ชนะพลังงานยึดเหนี่ยวอิเล็กตรอนของผิวโลหะซึ่งเรียกว่า ฟังก์ชันงาน ดังนั้นในการเลือกชนิดของโลหะจึงต้องพิจารณาจากฟังก์ชันงานของโลหะแต่ละชนิดที่สามารถตอบสนองในช่วงความยาวคลื่นที่ 13.5นาโนเมตร ได้ดีที่สุดซึ่งในการทำการทดลองนี้เลือกใช้โลหะบริสุทธิ์ทั้งหมด 4 ชนิดคือ อะลูมิเนียม(Al) เหล็ก(Fe) ทองแดง(Cu) และเงิน(Ag) ที่มีค่าฟังก์ชันงานที่เหมาะสมในการตอบสนองช่วง 13.5นาโนเมตร ได้ดีที่สุดซึ่งหัววัดรังสีที่สร้างขึ้นยังสามารถนำหัววัดรังสีที่สร้างนี้ไปประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์ทางด้านอุตสาหกรรมสารกึ่งตัวนำและด้านการวัดรังสีต่างๆ ได้หลากหลายยิ่งขึ้น

3. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

3.1 ออกแบบและสร้างหัววัดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลต (Extreme Ultraviolet)

3.2 เพื่อสอบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของหัววัดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลต

3.3 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของหัววัดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตกับหัววัดรังสีชนิดโฟโตไดโอด SXUV HS5 Si/Zr

4. ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

4.1 ศึกษาทฤษฎีของรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตที่ช่วงความยาวคลื่น 13.5นาโนเมตร

4.2 ศึกษาการออกแบบสร้างหัววัดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตโดยใช้ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก

4.3 ออกแบบและสร้างหัววัดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตแล้วนำหัววัดรังสีไปทดสอบและสอบเทียบประสิทธิภาพที่ ศูนย์วิจัยแสงซินโครตรอน (จังหวัดนครราชสีมา)

4.4 วิเคราะห์ค่าที่ได้จากการสอบเทียบ

4.5 ทดสอบหัววัดรังสีชนิดโฟโตไดโอด SXUV HS5 Si/Zr ที่เคยมีการพัฒนาขึ้นมาแล้ว

4.6 วิเคราะห์ค่าที่ได้จากการทดสอบหัววัดรังสีชนิดโฟโตไดโอด SXUV HS5 Si/Zr เพื่อทำการเปรียบเทียบกับหัววัดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตที่สร้างขึ้น

4.7 เสนอแนวทางปรับปรุงแก้ไขในการพัฒนาหัววัดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลต

4.8 สรุปผลการทดสอบประสิทธิภาพของหัววัดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตที่สร้างขึ้น

5. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

5.1 ได้องค์ความรู้และวิธีการใหม่ในการสร้างหัววัดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลต

5.2 ได้หัววัดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตที่มีประสิทธิภาพในการตรวจวัดรังสีที่ครอบคลุมช่วงความยาวคลื่นใกล้เคียงกับความยาวคลื่น 13.5นาโนเมตร

5.3 สามารถนำหัววัดรังสีดังกล่าวตรวจจับรังสีนี้จากแหล่งกำเนิดต่างๆ เช่นเครื่องพลาสมาโฟกัสที่อยู่ในห้องปฏิบัติการและนำไปใช้ในอุตสาหกรรมสารกึ่งตัวนำได้

คำจำกัดความในงานวิจัย: Photoelectric effect, Extreme Ultraviolet, EUV Detector.

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แนวคิดและทฤษฎี

ปัจจุบันนี้การพัฒนาทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีที่ก้าวหน้าอย่างรวดเร็วซึ่งทางด้านวิทยาศาสตร์จะต้องอาศัยความรู้ทางด้านการวัดอย่างถูกต้องแม่นยำเข้ามาเป็นตัวสนับสนุนงานเพื่อให้มีการคาดการณ์อธิบายในหลักการต่างๆอย่างถูกต้องเป็นจริง ซึ่งการวัดอย่างเป็นวิชาการที่กล่าวนี้คือ มาตรวิทยา(metrology)ที่ว่าด้วยเรื่องแห่งการวัดจะเป็นการศึกษาเรื่องปริมาณต่างๆ และเทคนิคขอการวัด การสนับสนุนการพัฒนาทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนั้นจะประกอบด้วย 3 กิจกรรมหลัก การกำหนดค่าของหน่วยวัด(definition) การทำผลให้เป็นจริง(realization) การสอบกลับได้(traceability) ซึ่งในการที่เราจะพัฒนาเครื่องมือวัดจะต้องคำนวณให้ได้ค่าที่ถูกต้อง(accuracy) แม่นยำ(precision) ความไวสูง(sensitivity) ความละเอียด(resolution) และมีเสถียรภาพ(stability) ดีในสภาวะแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลง ใช้งานง่าย และทำงานได้แบบอัตโนมัติ ซึ่งเป็นองค์ประกอบพื้นฐานที่จะต้องคำนึงถึงในการพัฒนาทางด้านการวัดหลักของการวัดจะต้องมีความถูกต้องและเที่ยงตรง(accurate and precision) มีห้องปฏิบัติการสอบเทียบ(calibration laboratory) ซึ่งการสอบเทียบ(calibration) นั้นหมายถึง การหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่บอกโดยเครื่องวัด หรือระบบการวัด หรือค่าที่แสดงโดยเครื่องวัดที่เป็นวัสดุกับค่าสมนัยที่รู้ของปริมาณที่วัดภายใต้ภาวะที่บอกไว้ ผลของการสอบเทียบทำให้สามารถประมาณค่าผิดพลาดของเครื่องวัด ระบบการวัดหรือเครื่องวัดที่เป็นวัสดุ หรือการกำหนดค่า ทำเครื่องหมายบนสเกล ณ ที่ใดที่หนึ่ง [2] ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

2.1.1 มาตรวิทยา

มาตรวิทยา คือ วิชาที่กล่าวถึงเรื่องของการวัดไม่ว่าจะเป็นด้านใดก็ตาม เป็นการวัดที่รวมเอาทั้งทฤษฎีและทุกอย่างของการปฏิบัติมาประยุกต์ใช้ เพื่อให้สามารถวัดได้อย่างถูกต้องตามความต้องการ และสามารถรายงานค่าของผลการวัดได้ โดยการรายงานนั้นได้รวมเอาการประเมินความไม่แน่นอนของการวัดไว้ด้วย ซึ่งได้รวมถึงการกำหนดหน่วยของการวัด โดยทำให้เป็นจริงขึ้นจากนิยามด้วยวิธีทางวิทยาศาสตร์ เช่น การทำหน่วยเมตรใช้ปรากฏการณ์ของแสงที่เคลื่อนที่ในสุญญากาศ นอกจากนี้ยังรวมถึงการจัดให้มีระบบความสามารถสอบกลับได้ของการวัด

(traceability) โดยการสอบเทียบ(calibration) และการทำเอกสารที่แสดงค่าที่ได้จากการวัดพร้อมกับความไม่แน่นอน(uncertainty) ของการวัดอีกด้วย [3]

2.1.2 การสอบเทียบ

การสอบเทียบ คือ การดำเนินการเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่บอกโดยเครื่องมือวัดหรือค่าที่แสดงโดยเครื่องวัดที่เป็นวัสดุกับค่าสมนัยที่รู้ของปริมาณที่วัดภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดไว้ (set of operations that establish, under specified conditions, the relationship between voles of quantities indicated measuring instrument or measuring system, or value represented by a material measure or a reference material, and the corresponding values realized by standards : VIM 6.11) การสอบเทียบ คือ การตัดสินและการทำเอกสารแสดงความบ่ายเบนของค่าที่บอกของเครื่องมือวัดหรือค่าที่ระบุของวัสดุวัดจากค่าจริงที่ยอมรับร่วมกันคือ ค่าจริงที่มีความไม่แน่นอนของการวัดที่เหมาะสมกับการใช้งานซึ่งในที่นี้คือค่ามาตรฐานที่สามารถสอบกลับได้สู่มาตรฐานแห่งชาติหรือมาตรฐานระหว่างประเทศ [3]

2.1.3 ความไม่แน่นอนของการวัด

ความไม่แน่นอนของการวัด คือ สิ่งที่บอกได้ถึงคุณภาพของผลการวัดว่ามีความน่าเชื่อถือเพียงใด การรายงานความไม่แน่นอนของการวัดจะต้องรายงานพร้อมกับผลของการวัดเสมอเพื่อที่จะเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการวัดกับข้อกำหนดเฉพาะหรือมาตรฐานหรือเกณฑ์การยอมรับสำหรับสิ่งที่ถูกวัด(measurand) เป็นที่ยอมรับกันว่าการวัดทุกครั้งมีค่าความคลาดเคลื่อน(error) เกิดขึ้นเสมอ ก็เป็นผลมาจากผลของการวัดมีความแตกต่างไปจากค่าจริงของสิ่งที่วัด (true value) และความไม่แน่นอนของการวัดส่วนหนึ่งได้มาจากการกระจายค่าของผลการวัดนั้นๆ เมื่อทำการวัดหลายๆ ครั้ง มีแนวคิดต่างๆ ที่ใช้แสดงความน่าเชื่อถือได้ของผลการวัดอย่างไรก็ตามก็มีความยากลำบากในการใช้วิธีประเมินความน่าเชื่อถือได้ ในปี ค.ศ.1990 องค์การมาตรฐานระหว่างประเทศ(International Standardization Organization,ISO) ร่วมกับสำนักงานชั่ง ตวง วัดระหว่างประเทศ(BIPM) ได้แนะนำให้ใช้ความไม่แน่นอนของการวัดเป็นมาตรการในการบอกความน่าเชื่อถือของผลการวัดและได้เสนอแนวทางในการประเมินความไม่แน่นอนของการวัดคือGuide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM) ซึ่งมีแนวคิดดังนี้

ปริมาณที่ถูกวัด Y เป็นผลที่ได้จากการวัดจะขึ้นอยู่กับปริมาณอินพุทที่เกี่ยวข้องในกระบวนการวัด $X_1, X_2, X_3, ..., X_n$

$Y = f(X_1, X_2, X_3, ..., X_n)$

ทางปฏิบัติไม่สามารถทราบค่าที่แท้จริงของปริมาณอินพุทนั้นได้ปริมาณอินพุทที่เกี่ยวข้องกับขั้นตอนการวัดจะมีความไม่แน่นอนได้มาด้วยเสมอ ดังนั้นผลของการวัด Y จึงเป็นเพียงค่าประมาณ y พร้อมกับความไม่แน่นอนของการวัดที่เกิดจากปริมาณอินพุทนั้นด้วย

ในการรายงานผล ปริมาณที่ถูกวัดจะอยู่ในรูป $Y = y \pm U$ โดยความไม่แน่นอน U ได้มาจากการประเมินองค์ประกอบทั้งหมดของความไม่แน่นอนในแบบที่เป็น Type A และ Type B การประเมิน Type A เป็นผลมาจากการประเมินทางสถิติที่อยู่ในของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และการประเมิน Type B จะใช้วิธีอื่นที่ไม่ใช่การประเมินทางสถิติ ซึ่งอยู่ในแบบของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้จากใบรับรองของการสอบเทียบ หรือข้อกำหนดเฉพาะของเครื่องมือ เป็นต้น [4]

หลักการในการสอบเทียบ คือ กระบวนการตรวจสอบความถูกต้องของอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดซึ่งรวมทั้งเครื่องมือวัด โดยการเปรียบเทียบกับค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือวัดกับค่าจริงของเครื่องที่ถูกวัดจึงสำคัญสำหรับการนำหลักการวัดทางมาตรวิทยามาใช้ในวิทยานิพนธ์นี้

วิทยานิพนธ์นี้ได้สร้างหัววัดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตโดยใช้ ปรากฏการณ์ของโฟโตอิเล็กทริก(photoelectric effect) เพื่อให้ระบบของการวัดของหัววัดรังสีวัดได้ที่ความยาวคลื่น 13.5 นาโนเมตร ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก คือ ปรากฏการณ์ที่อิเล็กตรอนในอะตอมของสสารถูกปลดปล่อยออกมาเมื่อสสารดูดซับรังสีต่างๆ เช่น คลื่นรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลต รังสีเอกซ์ อิเล็กตรอนที่หลุดออกมา เรียกว่า โฟโตอิเล็กตรอน(photoelectron) ปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นเมื่อมีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่สูงกว่าค่าความถี่ขีดเริ่มของโลหะ วัสดุที่ใช้ในการทดลอง มาตกกระทบบนผิววัสดุดังกล่าว โดยที่พลังงานของโฟตอนถูกดูดกลืนและทำให้อิเล็กตรอนถูกปลดปล่อยออกมาซึ่งสังเกตได้จากกระแสไฟฟ้าที่วัดได้ในวงจร หากรังสีที่ตกกระทบมีความถี่ต่ำกว่าค่าความถี่ขีดเริ่มของโลหะ ไม่ทำให้เกิดโฟโตอิเล็กตรอนได้ ไม่ว่าความเข้มของคลื่นแสงจะมีค่ามากเท่าใดก็ตาม เพราะพลังงานที่อิเล็กตรอนได้รับไม่มากพอที่จะทำให้ชนะพลังงานยึดเหนี่ยวอิเล็กตรอนของผิวโลหะซึ่งเรียกว่า ฟังก์ชันงาน(work function) ดังนั้นในการเลือกชนิดของโลหะจึงต้องพิจารณาจาก ฟังก์ชันงานของโลหะแต่ละชนิด[5]

ต่อจากนั้นกลับขั้วไฟฟ้าและเพิ่มความต่างศักย์จนกระทั่งกระแสไฟฟ้าเป็นศูนย์ ทำให้อิเล็กตรอนที่มีความเร็วมากที่สุดหรือพลังงานจลน์สูงสุดหยุดนิ่งเรียกความต่างศักย์นี้ว่า ศักย์หยุดยั้ง(stopping potential) แทนด้วย V_s ดังนั้นหาพลังงานจลน์สูงสุดของโฟโตอิเล็กตรอน ได้

$$E_{K\max} = eV_s = \frac{1}{2}mv_{\max}^2 \quad (2\text{-}1)$$

โดยที่ $E_{K\max}$ แทน พลังงานจลน์สูงสุดของอิเล็กตรอน มีหน่วยเป็นจูล (J)

e แทน ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ 1.6 x 10^{-19} คูลอมบ์ (C)

V_s แทน ความต่างศักย์หยุดยั้ง มีหน่วยเป็นโวลต์ (V)

m แทน มวลของอิเล็กตรอนมีค่า 9.1x10^{-31} kg

$v_{\max}$ แทน ความเร็วสูงสุดของอิเล็กตรอน (m/s)

ตารางที่ 2.1.1 แสดงค่าฟังก์ชันงานของโลหะ [5]

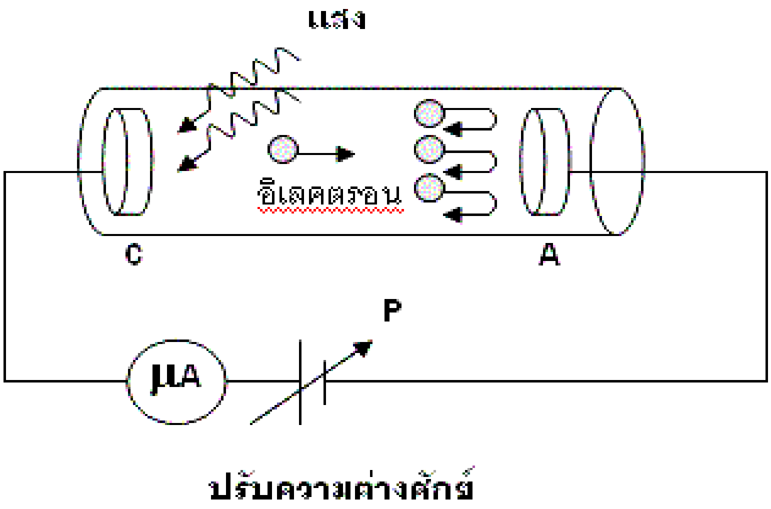
ชนิดโลหะ	**ฟังก์ชันงาน** (eV)
โซเดียม (Na)	2.46
อะลูมิเนียม (Al)	4.08
ทองแดง (Cu)	4.70
สังกะสี (Zn)	4.31
เงิน (Ag)	4.73
แพลทินัม (Pt)	6.35
ตะกั่ว (Pb)	4.14
เหล็ก(Fe)	4.50

2.2 ปรากฏการโฟโตอิเล็กทริก

ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกพบเมื่อปี พ.ศ. 2430 โดยเฮิร์ทซ์(Heinrich Hertz) นักวิทยาศาตร์ชาวเยอรมัน ในระหว่างที่ทำการทดลองเกี่ยวกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า มีนักวิทยาศาสตร์อีกหลายท่านได้ดำเนินการค้นคว้าต่อมา และพบว่าเมื่อฉายแสงความถี่เดียว เช่นรังสีเหนือม่วงให้ตกกระทบผิวโลหะ จะมีอิเล็กตรอนหลุดออกจากผิวโลหะได้ ถ้าใช้แสงความถี่เดียวที่มีความถี่ต่ำลงมาเรื่อยๆ จะพบว่ามีค่าความถี่ขีดเริ่ม(threshold frequency) ค่าหนึ่งซึ่งถ้าความถี่ต่ำกว่านี้แล้วอิเล็กตรอนจะไม่หลุดจากผิวโลหะ ปรากฏการณ์ที่แสงช่วยให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากโลหะได้เรียกว่า ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก(photoelectric effect) และเรียกอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาว่าโฟโตอิเล็กตรอน(photoelectrons)

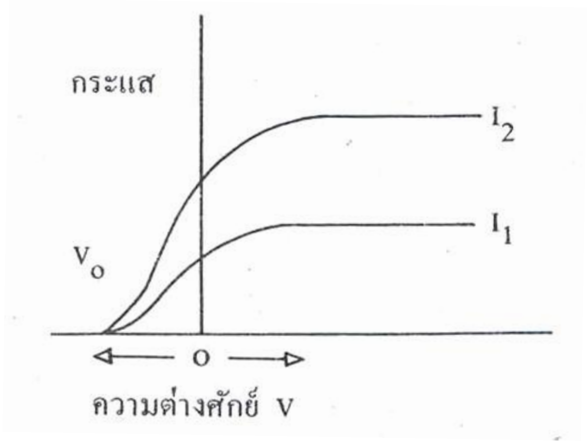
การศึกษาปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกทำได้ด้วยการใช้อุปกรณ์ดังรูปที่ 2.2.1 ในรูปของการทดลองในระบบสุญญากาศ ประกอบด้วยขั้วโลหะ A เป็นขั้วบวกและขั้วโลหะ C เป็นขั้วลบให้ใช้แบบแผ่นโลหะที่มีลักษณะโค้งเพื่อรับแสงส่วนขั้ว A ทำหน้าที่รับอิเล็กตรอน ต่อขั้วที่สองเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้าซึ่งสามารถปรับความต่างศักย์ได้ และต่อแอมป์มิเตอร์เพื่อใช้วัดกระแสของอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาในขั้นตอนของการทดลอง

จากการทดลองหลักปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก เมื่อยังไม่ฉายแสงกระทบแผ่นโลหะ C กระแสในวงจรจะเป็นศูนย์เมื่อฉายแสงความถี่เดียวที่มีความเข้ม I_1 ไปยังขั้ว C จะมีอิเล็กตรอนหลุดออกมาโฟโตอิเล็กตรอนบางตัวจะหลุดไปถึงขั้ว A ได้จะเกิดกระแสในวงจร ทดลองปรับค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วหลอดเป็นค่าต่างๆกัน จะได้กระแสดังรูป 2.2.2



ภาพที่ 2.2.1 ลักษณะอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองทางโฟโตอิเล็กทริก [6]

จากภาพที่ 2.2.1 จะสังเกตเห็นว่าที่ความต่างศักย์ต่ำๆ กระแสจะมีค่าไม่มากนัก เนื่องจากโฟโตอิเล็กตรอนบางตัวจะไปไม่ถึงขั้ว A แต่เมื่อเพิ่มความต่างศักย์ให้สูงค่าพอที่จะเอาชนะค่าฟังก์ชันงานของแผ่นโลหะนั้นก็จะสามารถทำให้เกิดโฟโตอิเล็กตรอนทุกตัวจะไปถึงขั้ว A ได้หมด ค่าของกระแสจะเพิ่มขึ้นและคงที่ [6]



ภาพที่ 2.2.2 กระแสโฟโตอิเล็กทริก [7]

จากภาพที่ 2.2.2 ที่ค่าความต่างศักย์ที่ทำให้กระแสนั้นเป็นศูนย์เรียกว่า ศักย์หยุดยั้ง (stopping potential) ณ ที่ความต่างศักย์ค่านี้แม้โฟโตอิเล็กตรอนตัวที่มีพลังงานจลน์สูงที่สุด $(E_k)_{\max}$ ก็ไม่สามารถหลุดออกมาได้ดังนั้นเราสามารถหาพลังงานจลน์สูงที่สุดของโฟโตอิเล็กตรอนได้จากสมการดังนี้

$$E_k = \frac{1}{2}mv_{\max}^2 = eV_0 \tag{2-2}$$

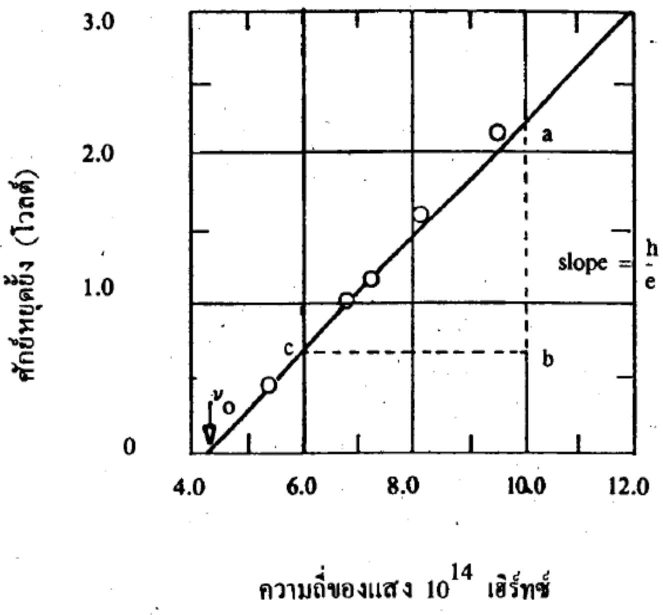
โดยที่ e เป็นประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน $= 1.6\times10^{-19}$ คูลอมบ์

V_0 เป็นศักย์หยุดยั้ง

เมื่อเพิ่มความเข้มของแสงแต่ใช้ความถี่เดิมจะเห็นว่าเมื่อความเข้มของแสงเพิ่มขึ้น กระแสก็เพิ่มขึ้นตามไปด้วย ดูจากกราฟเส้น I_2 แต่ความต่างศักย์ที่ทำให้กระแสเป็นศูนย์ยังคงเท่ากับ V_0 ตามเดิมแสดงว่า ความเข้มของแสงไม่ได้ช่วยให้พลังงานจลน์ของโฟโตอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้น เพียงแต่ไปเพิ่มจำนวนของโฟโตอิเล็กตรอนที่หลุดต่อวินาทีเท่านั้น การทดลองให้แสงที่ความถี่ต่างๆ ไปที่ยังโลหะ C แล้ววาดกราฟระหว่างความต่างศักย์หยุดยั้งกับความถี่ v ของแสงจะได้ดังภาพที่ 2.2.3 จะเห็นว่ามีความถี่ต่ำสุด (v_0) ซึ่งถ้าความถี่ของแสงต่ำกว่านี้ก็จะไม่มีโฟโตอิเล็กตรอนหลุดออกมาเลย ซึ่งความถี่ต่ำสุดนี้ก็คือความถี่ขีดเริ่ม แต่เมื่อมีการเปลี่ยนชนิดของโลหะค่าของความถี่ขีดเริ่มก็จะเปลี่ยนไป และเมื่อฉายแสงความถี่สูงไปยังโลหะ โฟโตอิเล็กตรอนที่หลุดจะมีพลังงานจลน์สูงขึ้นตามไปด้วย [7]

จากการทดลองสามารถสรุปปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก ได้ดังนี้

1. พลังงานจลน์ของโฟโตอิเล็กตรอนจะไม่ขึ้นกับความเข้มของแสงแต่จะขึ้นกับความถี่แสงโดยเป็นปฏิภาคโดยตรงกับความถี่แสง และถ้าแสงมีความถี่ต่ำกว่าความถี่ขีดเริ่ม จะไม่มีโฟโตอิเล็กตรอนเกิดขึ้น
2. ถ้าแสงมีความถี่สูงกว่าความถี่ขีดเริ่ม จำนวนอิเล็กตรอนที่หลุดจะเป็นปฏิภาคตรงกับความเข้มของแสง



ภาพที่ 2.2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของแสงกับศักย์หยุดยั้ง [7]

ปี พ.ศ. 2448 ไอน์สไตน์(Albert Einstein)เสนอทฤษฎีโฟตอนของแสงอธิบายปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกสำเร็จ ซึ่งใช้แนวความคิดด้านการแผ่รังสีเป็นควอนตัมที่แพลงค์ใช้อธิบายการแผ่รังสีจากวัตถุดำร้อน ไอน์สไตน์ กล่าวไว้ว่าแสงประกอบด้วยกลุ่มก้อนของพลังงานเรียกว่า โฟตอน (photon) โฟตอนของแสงความถี่ v จะมีพลังงานเท่ากับ hv เมื่อ h คือค่าคงที่ของแพลงค์แสงจึงมีลักษณะเป็นอนุภาคที่ประกอบด้วยพลังงานก้อนเล็กๆ เมื่อตกกระทบโลหะพลังงานของ hv ของโฟตอนก็จะถ่ายไปให้กับอิเล็กตรอนในโลหะตัวต่อตัว และในการที่อิเล็กตรอนจะหลุดจากอะตอมของผิวโลหะ จะต้องจ่ายพลังงานให้กับอะตอมเท่ากับค่าฟังก์ชันงาน(work

function) ซึ่งเป็นพลังงานยึดเหนี่ยวอิเล็กตรอนไว้กับอะตอมนั้น ส่วนพลังงานที่เหลือจะปรากฏเป็นพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอน เขียนเป็นสมการได้ว่า

$$hv = W + (E_k)_{\max} \tag{2-3}$$

เมื่อ $(E_k)_{\max}$ คือ พลังงานจลน์สูงสุดของโฟโตอิเล็กตรอน

W เป็นค่าฟังก์ชันงานของโลหะ มีค่าต่างกันแล้วแต่ชนิดของโลหะ

สมการที่ 2 คือ สมการโฟโตอิเล็กทริกของไอน์สไตน์ (Einstein's photoelectric equation) สมการของไอน์สไตน์ เมื่อแสงมีความถี่สูงโฟตอนจะมีพลังงานสูงเมื่อฉายไปบนโลหะ โฟโตอิเล็กตรอนที่หลุดก็จะมีพลังงานจลน์สูงและถ้าความถี่ของแสงที่ฉายต่ำลงพลังงานจลน์ของโฟโตอิเล็กตรอนก็จะน้อยลงตามลำดับ และเมื่อความถี่แสงเท่ากับ v_0 อิเล็กตรอนจะมีพลังงานจลน์เป็นศูนย์

ดังนั้น $$hv_0 = W \tag{2-4}$$

แสดงว่าอิเล็กตรอนมีพลังงานพอดีทำให้อิเล็กตรอนหลุดจากผิวโลหะเท่านั้น แต่ไม่มีพลังงานจลน์และถ้าฉายแสงความถี่ต่ำกว่า v_0 พลังงานโฟตอนของแสงจะมีค่าน้อยกว่า W แสงจึงมีพลังงานไม่พอที่จะทำให้อิเล็กตรอนหลุดจากผิวโลหะ ไม่ว่าจะมีความเข้มมาก ก็ตามถ้าแสงที่มีความถี่สูงกว่าความถี่ขีดเริ่มมีความเข้มมากขึ้น จะเกิดโฟโตอิเล็กตรอนจำนวนมากขึ้นโดยที่โฟตอนแต่ละตัวสามารถถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอนหนึ่งตัว มิลิแกน (R.A. Milikan) นักฟิสิกส์ชาวอเมริกันได้ทดลองพิสูจน์สมการโฟโตอิเล็กทริกของไอน์สไตน์ในปี พ.ศ. 2457 และหาค่า h ได้จากการทดลองเป็นครั้งแรก

แทนค่า $eV_0 = (E_k)_{\max}$ ลงในสมการโฟโตอิเล็กทริก จะได้

$$eV_0 = hv - W \tag{2-5}$$

หรือ $$V_0 = \frac{hv}{e} - \frac{w}{e} \tag{2-6}$$

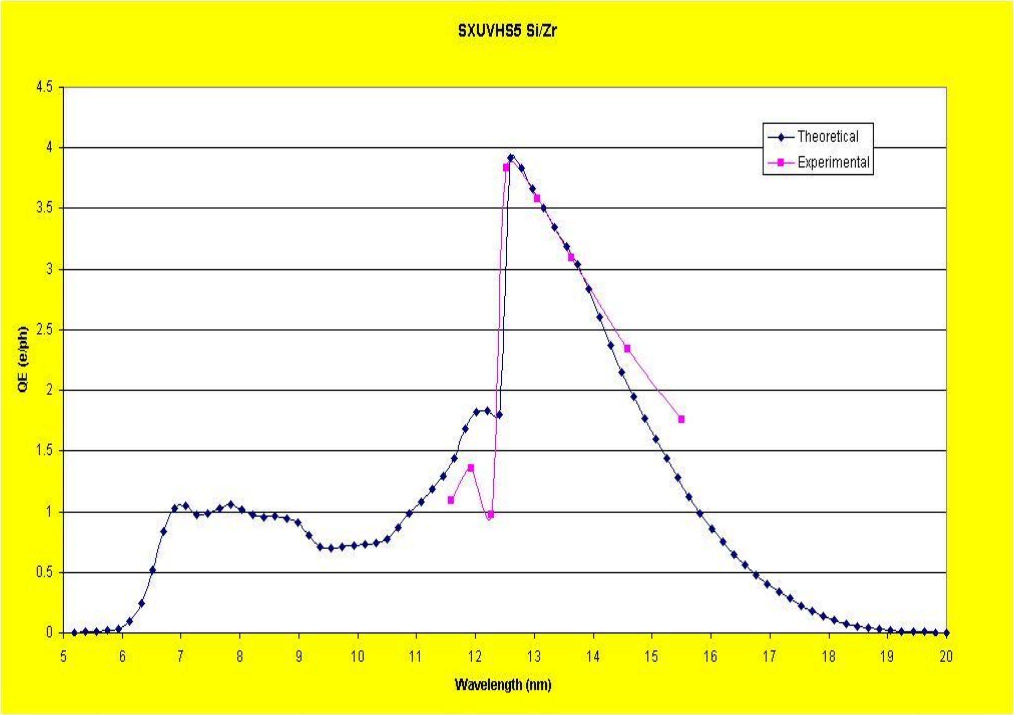
แสดงว่า กราฟที่เขียนระหว่าง V_0 กับ e จะเป็นกราฟเส้นตรงโดยมีความชัน(slope) เป็นค่าของ $\frac{h}{e}$ ดูจากภาพที่ 4

มิลิแกนได้ค่า $\frac{h}{e} = 3.9 \times 10^{-15}$ โวลต์วินาที

เมื่อแทนค่า e ได้ $h = 6.2 \times 10^{-34}$ จูลวินาที

2.3 หัววัดรังชนิดโฟโตไดโอด SXUV HS5 Si/Zr

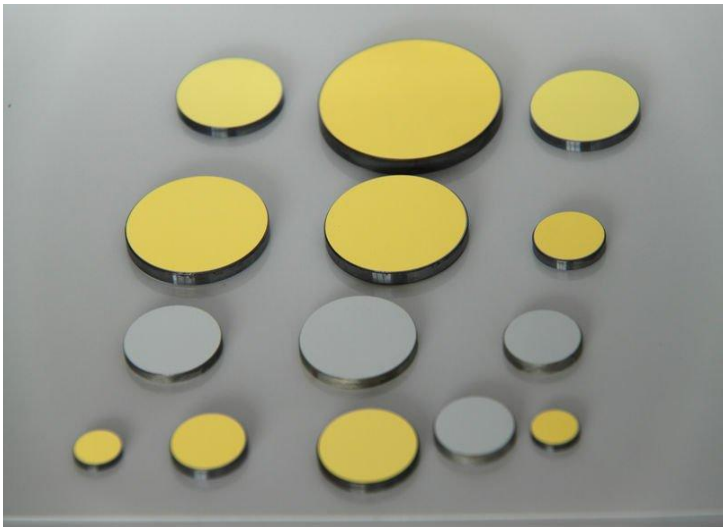
หัววัดรังสีชนิดโฟโตไดโอด SXUV HS5 Si/Zr เป็นหัววัดรังสีที่เคยมีการพัฒนามาแล้วในการพัฒนาประสิทธิภาพเพื่อให้มีความสามารถที่ใช้ตอบสนองเฉพาะช่วงความยาวคลื่น 11นาโนเมตร ถึง 18นาโนเมตร ที่งานวิทยานิพนธ์นี้ได้นำมาใช้ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับหัววัดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตที่มีช่วงการทำงานที่สามารถตรวจจับรังสีที่มีความยาวคลื่นในช่วง 13.5นาโนเมตร



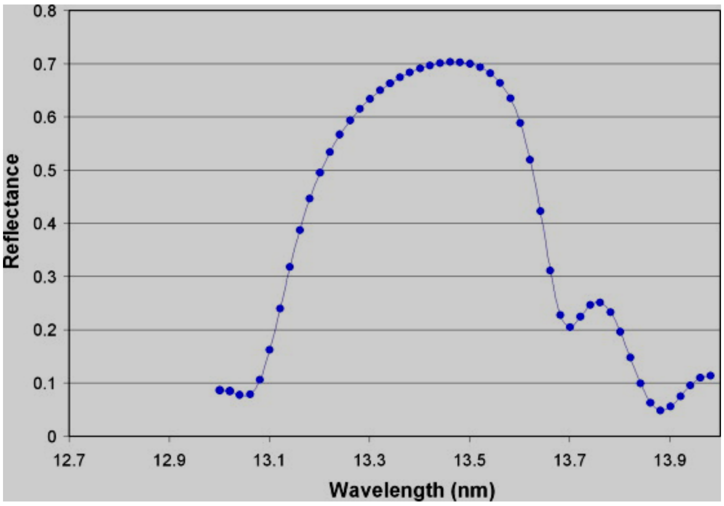
ภาพที่ 2.3.1 กราฟแสดงค่าการทำงานของหัววัดรังสีชนิดโฟโตไดโอด SXUV HS5 Si/Zr. [8]

2.4 กระจกเคลือบฟิล์มบางซิลิคอนโมลิบดีนัม (Si/Mo)

กระจกซิลิคอนโมลิบดีนัมที่มีการผลิตที่ใช้ทางด้านสะท้อนแสงชนิดต่างๆ นี้เราสามารถนำมาใช้เป็นตัวกรองแสงให้สะท้อนเฉพาะช่วงของพลังงานแสงที่ต้องการมาใช้เท่านั้น ซึ่งด้วยคุณสมบัติของกระจกซิลิคอนโมลิบดีนัม ชนิดนี้วิทยานิพนธ์นี้ต้องการที่จะนำมาใช้เป็นตัวคัดกรองช่วงความยาวคลื่นแสงที่ 13.5นาโนเมตร เท่านั้นเพื่อใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพในการตอบสนองของหัววัดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตที่สร้างขึ้นให้ดีที่สุด



ภาพที่ 2.4.1 กระจกเคลือบฟิล์มบางซิลิคอนโมลิบดีนัม (Si/Mo) [9]



ภาพที่ 2.4.2 กราฟแสดงช่วงการทำงานของกระจกซิลิคอนโมลิบดีนัม [9]

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 หัววัดรังสีที่สร้างจากโลหะบริสุทธิ์ อะลูมิเนียม เงิน เหล็ก และทองแดง (pure material Al, Ag, Fe, Cu.)

3.1.2 ท่อสแตนเลส (stainless chamber)

3.1.3 ระบบสุญญากาศ (vacuum system)

3.1.4 ปั้มสุญญากาศสูง (high vacuum pump)

3.1.5 แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า (power supply)

3.1.6 เครื่องวัดกระแสไฟฟ้า พิคโคแอมป์มิเตอร์ (picco-ameter)

3.1.7 ศูนย์วิจัยแสงซินโครตรอน สถานีทดลอง BL3.2.a (PES)

3.1.8 อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ

3.1.9 หัววัดรังสีชนิดโฟโตไดโอด SXUV HS5 Si/Zr

3.2 ศูนย์วิจัยแสงซินโครตรอนแห่งชาติ ข้อมูลด้านเทคนิค

แสงซินโครตรอน คือ อนุภาคของประจุเคลื่อนที่ด้วยความเร่งจะทำให้มีการปลดปล่อยพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาในรูปของรังสีแสงซึ่งรังสีนี้มีคุณสมบัติหลายอย่างทำให้กลายเป็นอุปกรณ์สำคัญที่สามารถนำไปใช้งานวิจัยทางวิทยาศาสตร์อย่างกว้างขวางคุณสมบัติทั้งหมดนี้คือ

3.2.1 มีสเปกตรัมต่อเนื่อง(continuous spectrum) แสงซินโครตรอนถูกปล่อยออกมาในย่านพลังงานต่อเนื่องตั้งแต่ย่านอินฟราเรด(infrared) จนถึงเอกซ์เรย์(x-rays) และโดยการให้อนุภาคเคลื่อนที่ผ่านสนามแม่เหล็กจากอุปกรณ์ที่รียกว่า อันดูเลเตอร์(undulator) สเปกตรัมของแสงซินโครตรอนที่ได้จะมีลักษณะที่ประกอบด้วยชุดแถบแสงที่มีย่าน

พลังงานแคบๆ ซึ่งเมื่อเปลี่ยนค่าสนามแม่เหล็กพลังงานของแถบแสงซินโครตรอนจะเปลี่ยนอย่างต่อเนื่อง

3.2.2 มีความเข้มสูงมาก(high intensity) แสงซินโครตรอนเป็นแสงที่มีความเข้มสูงโดยเฉพาะแสงจาก อันดูเลเตอร์ ซึ่งมีความเข้มสูงกว่าแสงจากแม่เหล็กเลี้ยวเบน(bending magnet) ระดับหมื่นเท่า

3.2.3 มีความคมสูง(high collimated) แสงซินโครตรอนถูกส่งออกมาเป็นลำเล็กๆ ในแนวสัมผัสกับทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค ซึ่งขนาดลำแสงเล็กประกอบกับมีความเข้มสูงทำให้แสงซินโครตรอนมีคุณสมบัติเชิงปริมาณ(brilliance) สูงมาก

3.2.4 มีลักษณะเป็นพัลส์(pulse) แสงซินโครตรอนถูกปลดปล่อยออกมาในลักษณะเป็นพัลส์สั้นๆ น้อยกว่าหนึ่งในล้านวินาที ดังนั้นแสงนี้ถูกใช้ในการทดลองที่ระบบการตรวจวัดมีความละเอียดในการวัดช่วงเวลาต่ำ(low time resolution) ความเข้มแสงจึงมีลักษณะคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

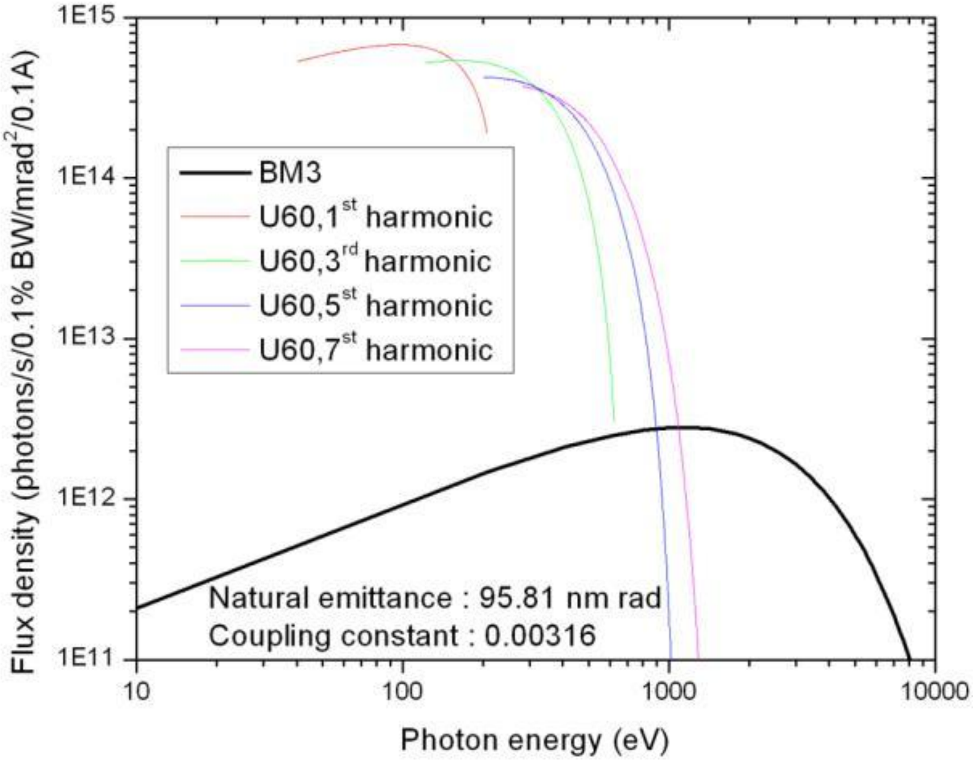
3.2.5 เป็นแสงที่มีคุณสมบัติเชิงปริมาณ(brilliance) ของสเปกตรัมแสงซินโครตรอนนั้นสามารถรู้ค่าได้แน่นอนโดยการคำนวณทางทฤษฎี แสงซินโครตรอนจึงสามารถนำไปใช้ในการทดลองโดยมีค่าความเข้มที่มาตรฐานตลอดย่านพลังงานที่ได้

3.2.6 เป็นแสงที่โพลาไรซ์(polarized light) แสงซินโครตรอนจากแม่เหล็กเลี้ยวเบน(bending magnet) เป็นแสงโพลาไรซ์แบบระนาบที่มีทิศทางของสนามไฟฟ้าขนานกับระนาบของแนวการเคลื่อนที่ของอนุภาค

3.2.7 เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่มีความปนเปื้อนต่ำ(clean environment) เนื่องจากแหล่งกำเนิดแสงซินโครตรอนทำงานในระบบที่เกือบเป็นสุญญากาศ(ความดันประมาณ 10^{-10} Torr) ทำให้แสงที่ได้มีการปนเปื้อนจากรังสีอื่นๆ ที่ไม่ต้องการน้อยมาก [10]

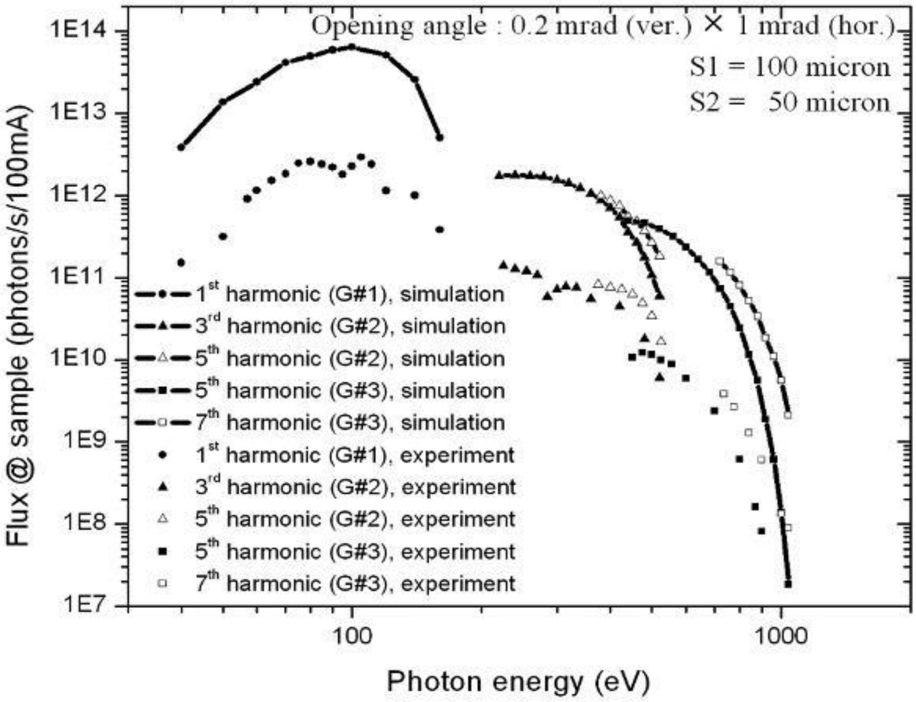
3.3 เทคนิคที่ใช้แสงซินโครตรอน

ในการทำการทดลองในวิทยานิพนธ์นี้คือเทคนิคทางด้าน photoemission spectroscopy (PES) เพื่อการประยุกต์ใช้งานศึกษาการทดสอบประสิทธิภาพของวัสดุ ซึ่งในระบบการลำเลียงแสงของสถานีนี้สามารถใช้งานได้หลากหลายด้านเนื่องจากมีคุณสมบัติที่ครอบคลุมงานด้านวัสดุศาสตร์โครงสร้างของวัสดุทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ด้วย ซึ่งจะมีช่วงการให้พลังงานที่มีความเข้มสูงมากจะแสดงในรูปของฟลักซ์ ดังแสดงในภาพที่ 3.3.1



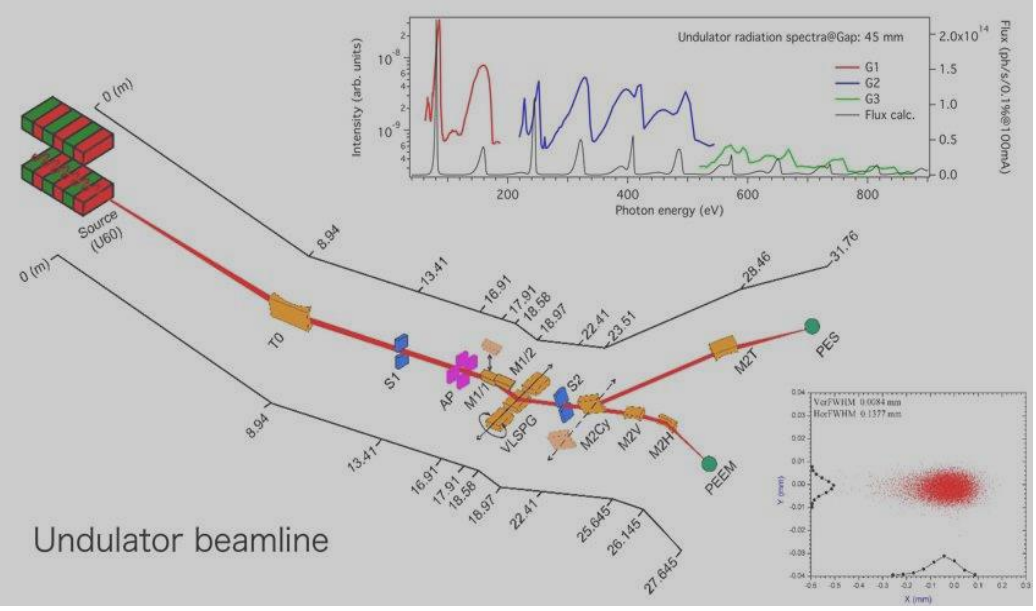
ภาพที่ 3.3.1 โฟตอนฟลักซ์ที่ตำแหน่งตัวอย่าง [10]

ผลการทดลองของจำนวนโฟตอนฟลักซ์ที่ตำแหน่งตัวอย่าง1.0×10^{10} โฟตอนต่อวินาทีต่อ100 มิลิแอมป์ ซึ่งเป็นวิธีการทดสอบค่าของกระแสของจำนวนโฟตอนนั้นที่สถานีการทดลองที่สามารถปล่อยแสงออกมา ณ ช่วงของค่าพลังงานที่กำหนดซึ่งต้องอยู่ในรูปแบบและเป็นมาตรฐานของระบบลำเลียงที่กำหนดไว้



ภาพที่ 3.3.2 แสดงช่วงพลังงานของโฟตอน [10]

ผลการทดสอบของช่วงพลังงานโฟตอนที่สถานีการทดลองสามารถให้พลังงานได้ตั้งแต่ช่วง 40 อิเล็กตรอนโวลต์ (eV) ถึง160 อิเล็กตรอนโวลต์ และตั้งแต่ช่วง 220 อิเล็กตรอนโวลต์ ถึง 1040 อิเล็กตรอนโวลต์ ดังแสดงในภาพที่ 3.3.2



ภาพที่ 3.3.3 แสดงระบบลำเลียงแสง(Undulator beamline) ของสถานีทดลองซินโครตรอน [10]

3.4 เครื่องมือในสถานีทดลองด้าน photoemission spectroscopy (PES)

3.4.1 สถานีทดลองด้าน photoemission spectroscopy (PES) ประกอบไปด้วยถังสุญญากาศสำหรับการวิเคราะห์โฟโตอิเล็กตรอนการเตรียมตัวอย่างระบบส่งต่อตัวอย่างการปลูกฟิล์มบาง(MBE) และการวัดความเป็นแม่เหล็ก(SMOKE)

3.4.2 ถังสุญญากาศสำหรับการวิเคราะห์โฟโตอิเล็กตรอน นั้นมีเครื่องมือวิเคราะห์พลังงานของอิเล็กตรอนแบบ angle-resolved (Thermo VG Scientific, ARUPS10) และ angle-integral(Thermo VG Scientific, Alpha110) อีกทั้งยังมีปืนยิงอิเล็กตรอนพลังงาน 5 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ใช้สำหรับเทคนิค AES และพลังงาน 1 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ สำหรับเทคนิค LEED

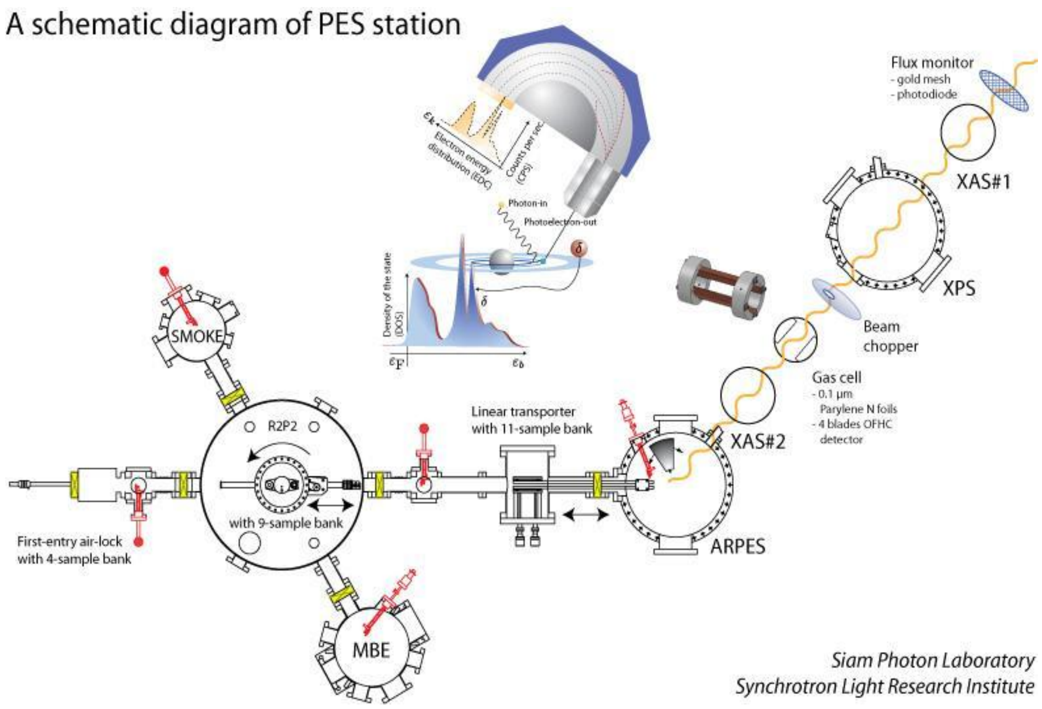
3.4.3 ถังสุญญากาศสำหรับการเตรียมตัวอย่าง อยู่ด้านบนของถังสุญญากาศสำหรับการวิเคราะห์โฟโตอิเล็กตรอนซึ่งสามารถทำการสปัตเตอร์ด้วยไอออนอาร์กอนด้วยปืนยิงไอออนที่มีพลังงาน 3 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ และสามารถให้ความร้อนกับตัวอย่างด้วย electron-bombardment heater โดยมีอุณหภูมิสูงสุดที่ 1400 เคลวิน ในการเปลี่ยนตำแหน่งของตัวอย่างใช้ temperature-controlled manipulator ของOMNIAX โดยสามารถควบคุมอุณหภูมิได้ต่ำสุดที่120 เคลวิน โดยใช้ไนโตรเจนเหลว

3.4.4 ถังสุญญากาศสำหรับปลูกฟิล์มบางประกอบไปด้วย effusion cell และ e-beam evaporatorในการเปลี่ยนตำแหน่งของตัวอย่างใช้ temperature-controlled manipulator โดยสามารถควบคุมอุณหภูมิได้สูงสุดที่ 1400 เคลวิน และ RHEED optics ที่ใช้พลังงานอิเล็กตรอน 15 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์

3.4.5 ถังสุญญากาศสำหรับการวัดความเป็นแม่เหล็กประกอบไปด้วย ฮีเลียม-นีออน เลเซอร์ โพลาไรเซอร์ โดยสามารถปรับค่าสนามแม่เหล็กได้สูงสุดที่ 1600 เกาส์ ในการเปลี่ยนตำแหน่งของตัวอย่างใช้ temperature-controlled manipulator ของ OMNIAX โดยสามารถควบคุมอุณหภูมิได้ต่ำสุดที่ 120 เคลวิน โดยใช้ไนโตรเจนเหลว [10]

3.5 **เครื่องมือในสถานีทดลองด้าน photoemission spectroscopy** (PES)

สถานีทดลองด้าน PES ประกอบไปด้วย เครื่องมือวิเคราะห์พลังงานของอิเล็กตรอนแบบ angle-integral (Thermo VG Scientific,CLAM2) และสามารถทำการสปัตเตอร์ด้วยไอออนอาร์กอนด้วยปืนยิงไอออนที่มีพลังงาน 3 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ [11]



ภาพที่ 3.5.1 แสดงระบบการทำงานของสถานีทดลองทางด้าน Photoelectron Emission Spectroscopy (PES)[11]

3.6 **ตัวอย่างงานวิจัยของสถานีทดลอง Photoelectron Emission Spectroscopy** (PES)

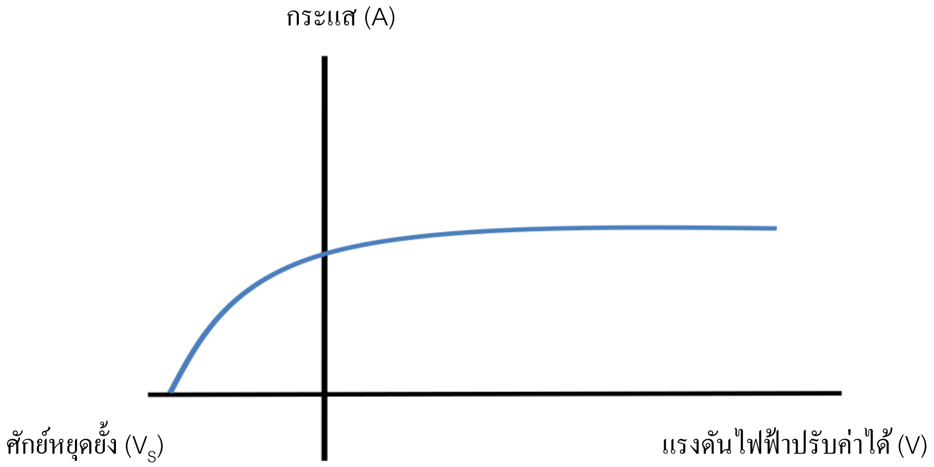
นวัตกรรมหรือเทคโนโลยีสมัยใหม่ล้วนเกิดขึ้นจากการสำรวจและค้นพบทางวิทยาศาสตร์ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สมัยใหม่ได้พยายามพัฒนามาจากสารกึ่งตัวนำที่เป็นผลึกเดี่ยวที่สมบูรณ์มีความเป็นผลึกสูงเพื่อง่ายต่อการควบคุมพฤติกรรมของอิเล็กตรอนในระดับอะตอม อีกทั้งอุปกรณ์เพื่อใช้เป็นหัวอ่านและเซนเซอร์ที่มีความหนาแน่นความเป็นแม่เหล็กสูง ที่ได้พัฒนามาจากฟิล์มบางหลายชั้นที่เกิดจากวัสดุที่เป็นแม่เหล็กและไม่เป็นแม่เหล็ก ในการก้าวข้ามข้อจำกัดของอุปกรณ์เหล่านี้ เทคนิค PES คือกุญแจสำคัญในการค้นหาและทำความเข้าใจพฤติกรรมของอิเล็กตรอนในสสารทั้งในมิติของพลังงานและโมเมนตัม [11]

3.7 วิธีการทดลอง

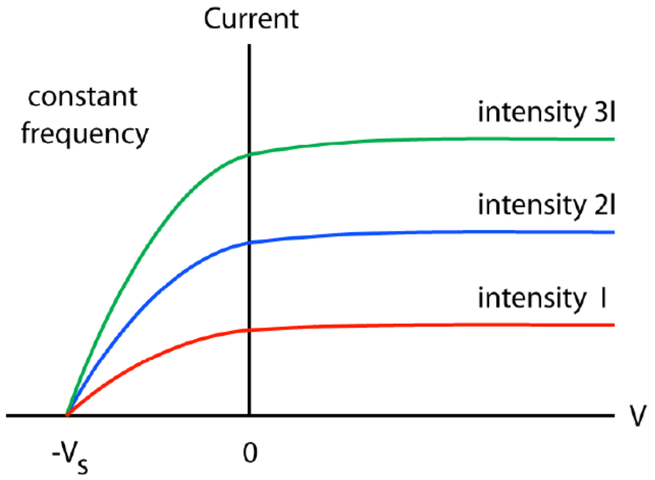
วิทยานิพนธ์นี้ได้สร้างหัววัดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตโดยใช้ ปรากฏการณ์ โฟโตอิเล็กทริก (photoelectric effect) เพื่อให้ระบบของการวัดของหัววัดรังสี วัดได้ที่ความยาวคลื่น 13.5 นาโนเมตร ซึ่งปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก คือ ปรากฏการณ์ที่อิเล็กตรอนในอะตอมของสสารถูกปลดปล่อยออกมาเมื่อได้รับรังสีต่างๆ เช่นคลื่นรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลต รังสีเอกซ์ อิเล็กตรอนที่หลุดออกมา เรียกว่า โฟโตอิเล็กตรอน (photoelectron) ปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นเมื่อมีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่สูงกว่าค่าความถี่ขีดเริ่มของโลหะ วัสดุที่ใช้ในการทดลอง มาตกกระทบบนผิววัสดุดังกล่าว โดยที่พลังงานของโฟตอนถูกดูดกลืนและทำให้อิเล็กตรอนถูกปลดปล่อยออกมาซึ่งสังเกตได้จากมีอิเล็กตรอนเริ่มหลุดออกมาก็จะทำให้มีกระไฟฟ้าเกิดขึ้น หากรังสีที่ตกกระทบมีความถี่ต่ำกว่าค่าความถี่ขีดเริ่มของโลหะ จะไม่ทำให้เกิดโฟโตอิเล็กตรอนได้ ไม่ว่าความเข้มของคลื่นแสงจะมีค่าสูงมาก ต้องการพลังงานที่มากพอที่จะทำให้ชนะพลังงานยึดเหนี่ยวอิเล็กตรอนของผิวโลหะซึ่งเรียกว่า ฟังก์ชันงาน (work function) ซึ่งในการเลือกชนิดของโลหะจึงต้องพิจารณาจากค่าของฟังก์ชันงานของโลหะเป็นหลักที่สำคัญมาก

ตารางที่ 3.7.1 แสดงค่าฟังก์ชันงานของโลหะที่ใช้ในการทดลอง

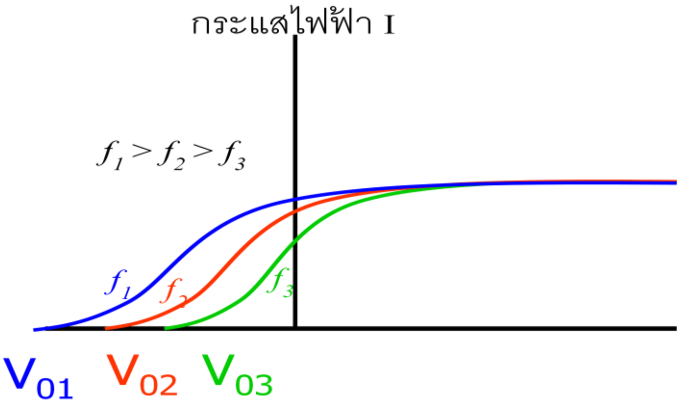
ชนิดโลหะ	**ฟังก์ชันงาน** (eV)
อะลูมิเนียม (Al)	4.08
เหล็ก(Fe)	4.50
ทองแดง (Cu)	4.70
เงิน (Ag)	4.73



ภาพที่ 3.7.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง โวลต์ กับ กระแสคงที่เพิ่มขึ้น แต่ความต่างศักย์หยุดยั้งเท่าเดิม [12]



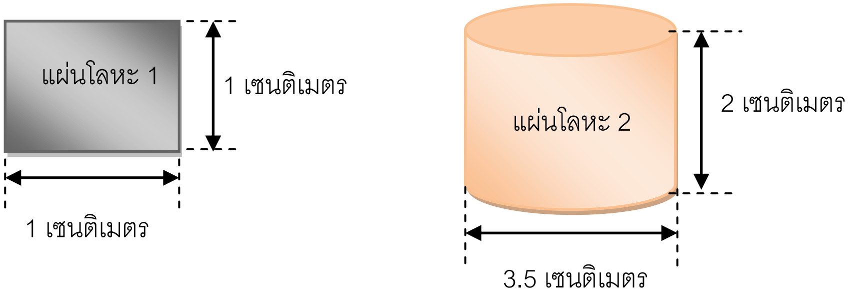
ภาพที่ 3.7.2 กราฟที่แสงความถี่เดียวกัน แต่ความเข้มแสงมากขึ้นจะได้กระแสคงที่เพิ่มขึ้น แต่ความต่างศักย์หยุดยั้งเท่าเดิม แสดงว่าอิเล็กตรอนไม่ได้มีพลังงานจลน์เพิ่มขึ้น [12]



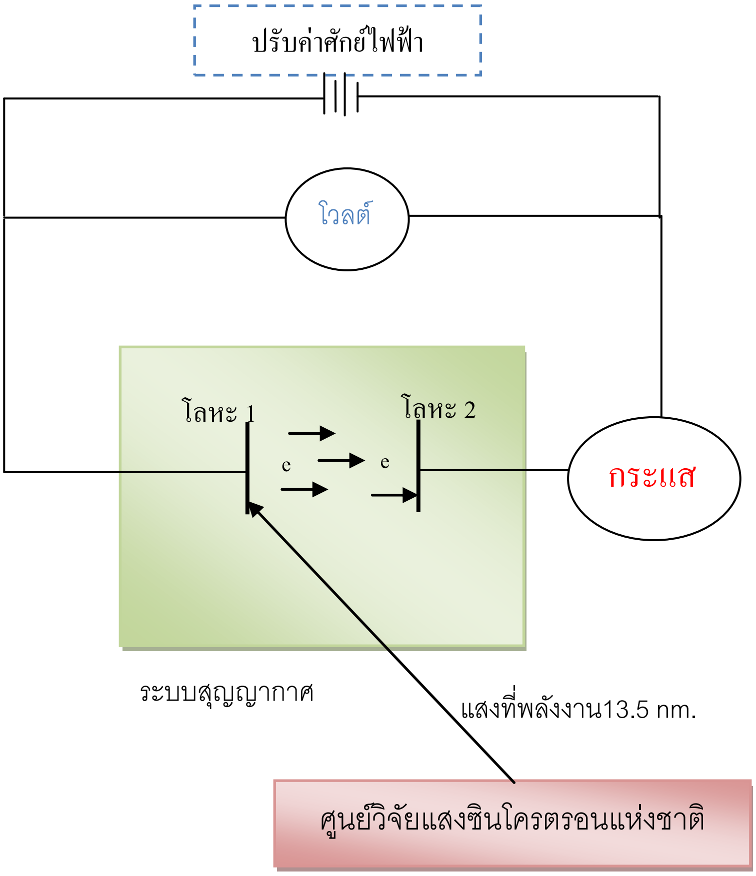
ภาพที่ 3.7.3 กราฟแสดงถ้าให้แสงความถี่ต่างกัน ที่มีความเข้มเท่ากันจะได้ว่ายิ่งความถี่สูงขึ้นได้ค่าความต่างศักย์หยุดยั้งมากที่สุดแสดงว่าพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนขึ้นกับความถี่ของแสง [12]

3.8 ขั้นตอนการทดลอง

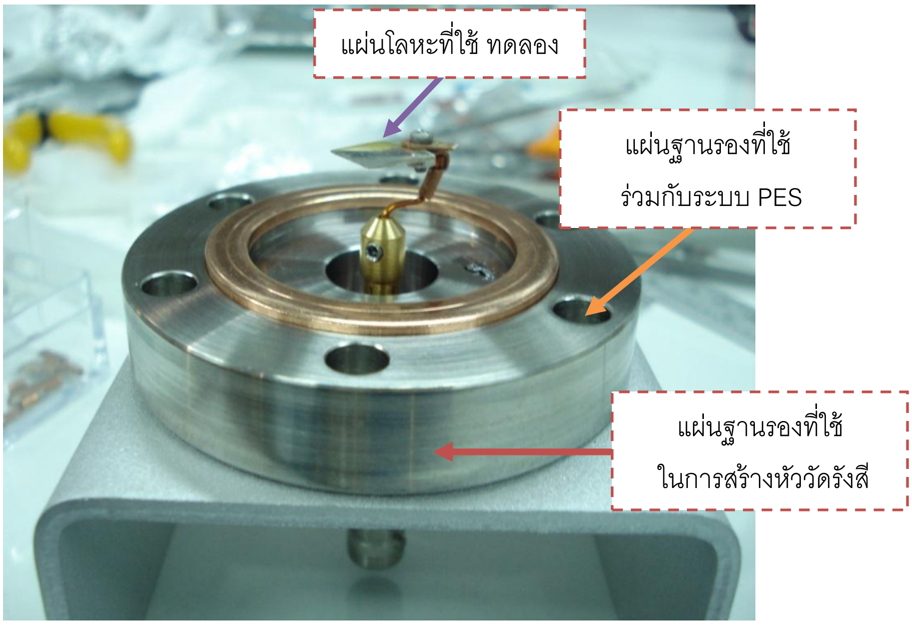
ในการทดลองนี้จะใช้โลหะ 4 ชนิดคือ เงิน ทองแดง เหล็กและอะลูมิเนียม ที่มีค่าฟังก์ชันงานเหมาะสมกับการสะท้อนรังสี่ในย่าน 13.5นาโนเมตร ซึ่งในการทดลองจะต้องใช้โลหะบริสุทธิ์ (pure metal) ให้มีขนาดกว้าง 1เซนติเมตร ยาว 1 เซนติเมตร จากนั้นนำไปขัดผิวหน้าของโลหะให้มีความเรียบมากที่สุด และทำความสะอาดก่อนนำเข้าท่อสแตนเลสจากนั้นต่อเข้ากับระบบจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่สามารถปรับระดับได้ 0โวลต์ ถึง 35โวลต์ และต่อค่าการวัดกระแสให้อ่านโดย พิคโคแอมป์มิเตอร์ (picco-ameter) และทำการสูบอากาศออก ซึ่งต้องทำการเช็ครอยรั่วของอากาศ จากนั้นทำการยิงแสงที่พลังงานที่ 12นาโนเมตร 13.5นาโนเมตร และที่ 15นาโนเมตร จากห้องปฏิบัติการศูนย์วิจัยแสงซินโครตรอนซึ่งในขั้นตอนนี้หัวหน้าปฏิบัติการจะทำการควบคุมตลอดเวลาขณะทำการทดลองขั้นตอนในการทดลองทั้ง 4 ชนิด ดังภาพที่ 3.8.2 ต่อไปนี้



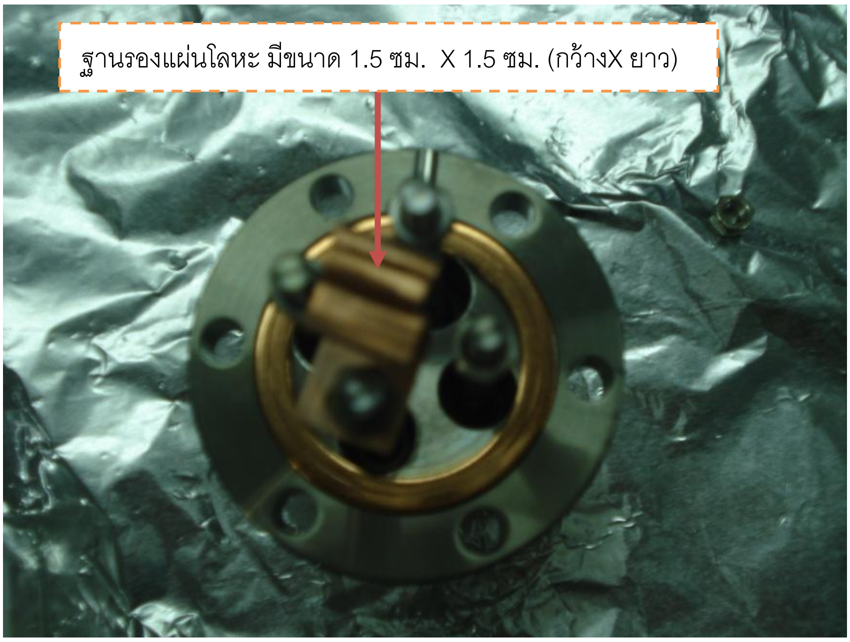
ภาพที่ 3.8.1 การออกแบบและการสร้างการทดสอบประสิทธิภาพของโลหะทั้ง 4 ชนิด



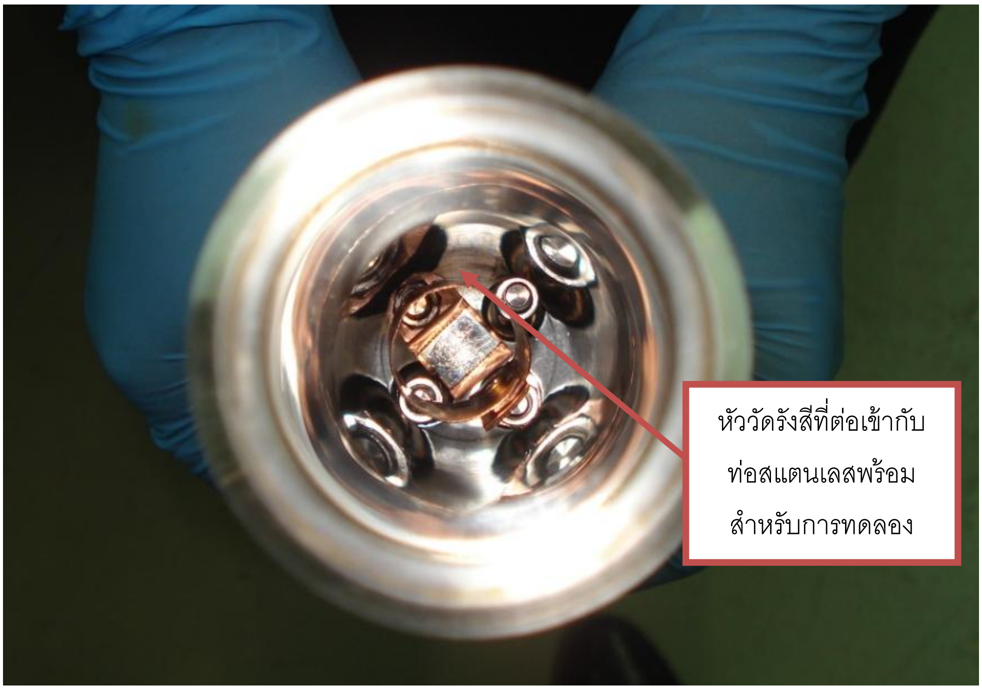
ภาพที่ 3.8.2 การทดสอบประสิทธิภาพของโลหะโดยใช้หลักการโฟโตอิเล็กทริก



ภาพที่ 3.8.3 แสดงการสร้างการทดสอบประสิทธิภาพของโลหะทั้ง 4 ชนิด



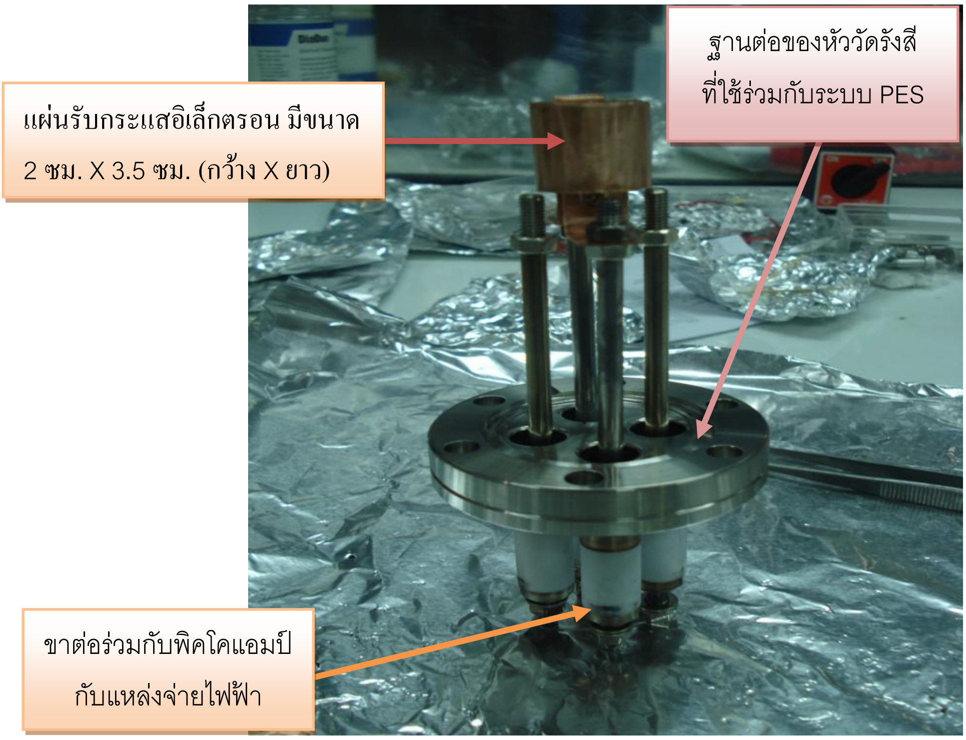
ภาพที่ 3.8.4 แสดงการสร้างหัววัดรังสีโดยใช้โลหะทั้ง 4 ชนิดในการทดสอบประสิทธิภาพของโลหะ



ภาพที่ 3.8.5 แสดงภาพหัววัดรังสีที่สร้างจากโลหะเงิน

3.8.1 วิธีการทดลองการทดสอบประสิทธิภาพของโลหะทั้ง 4 ชนิด เงิน ทองแดง เหล็ก และอะลูมิเนียม

การทดสอบประสิทธิภาพของโลหะโดยการต่อวงจรดังภาพที่ 3.3.1ใช้โลหะ เงิน อะลูมิเนียม เหล็กและทองแดง ที่มีค่าฟังก์ชันงานที่เหมาะสมกับช่วงความยาวคลื่นที่ 13.5นาโนเมตร และใช้ท่อระบบสุญญากาศ ใช้แหล่งจ่ายไฟเพื่อปรับแรงดันไฟฟ้าที่ 0โวลต์ถึง 35 โวลต์ จากนั้นใช้แสงจากศูนย์วิจัยแสงซินโครตรอนเป็นแหล่งกำเนิดแสงที่ช่วงความยามคลื่น 13.5 นาโนเมตร 12นาโนเมตร 15นาโนเมตร และใช้พิคโคแอมป์มิเตอร์ (piccoameter) เป็นตัวจับสัญญาณของกระแสอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจากแผ่นโลหะทั้ง4 ชนิด

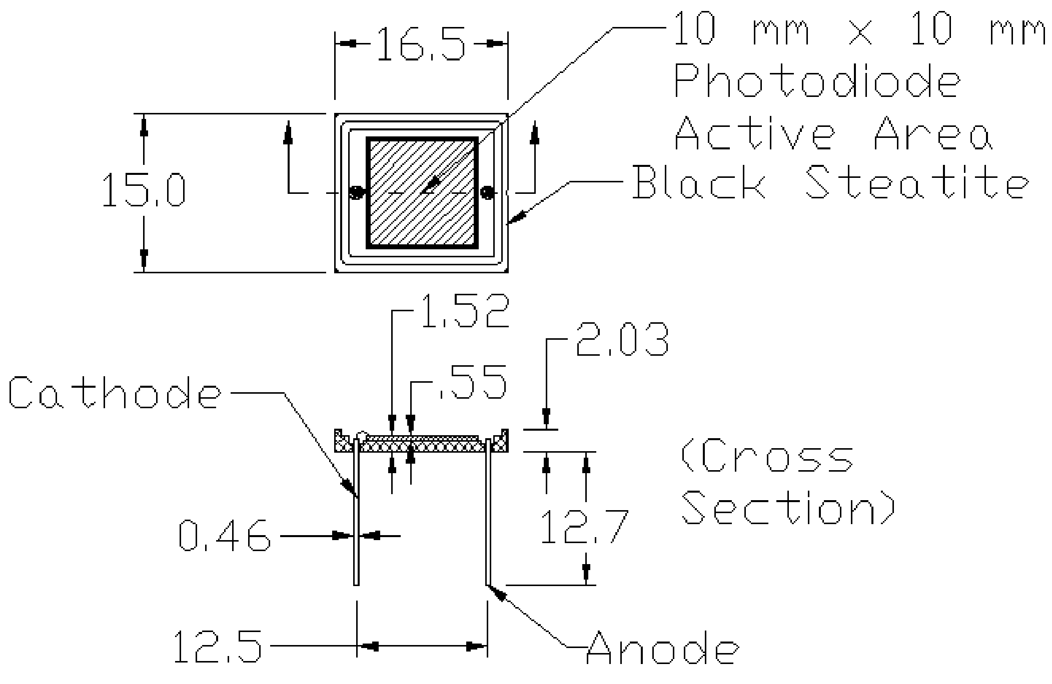


ภาพที่ 3.8.6 แสดงภาพหัววัดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตที่ใช้ทดสอบประสิทธิภาพ

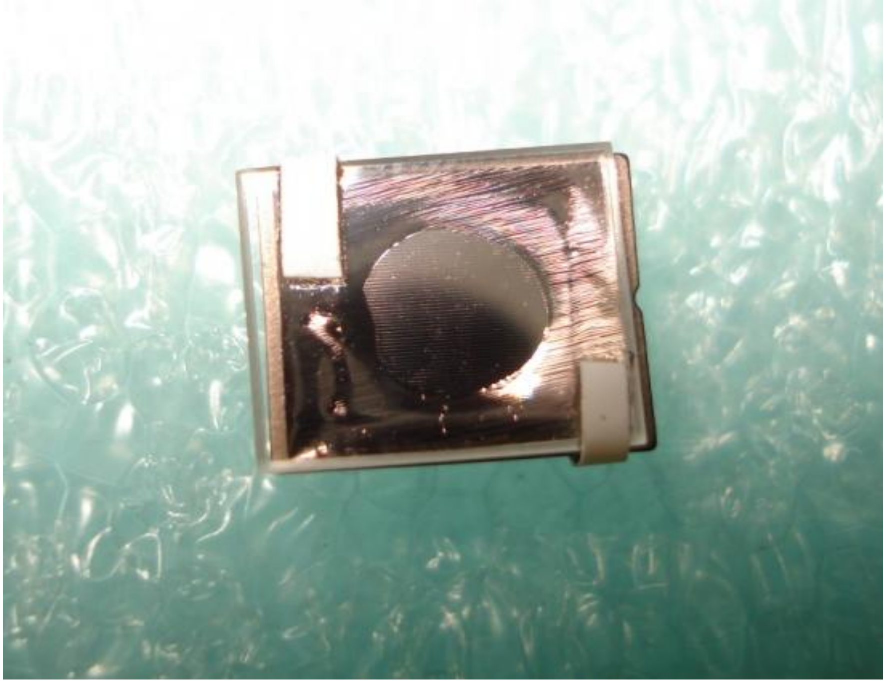
ภาพที่ 3.8.7 แสดงภาพหัววัดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตที่สร้างจากโลหะเงิน

3.9 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของหัววัดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตกับหัววัดรังสีชนิดโฟโตไดโอด SXUV HS5 Si/Zr

เพื่อใช้หาประสิทธิภาพการวัดของหัววัดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตจึงได้นำหัววัดรังสีชนิดโฟโตไดโอด SXUV HS5 Si/Zr ที่เคยมีงานวิจัยในด้านการวัดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตนี้มาทำการทดสอบประสิทธิภาพกับแสงที่ใช้ในการทดลองเหมือนกับหัววัดรังสีเอกซทรีมอัลตราไวโอเลต จากนั้นนำผลการทดสอบมาเปรียบเทียบคุณสมบัติทางด้านการทำงานว่าหัววัดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตที่สร้างขึ้นกับหัววัดรังสีชนิดโฟโตไดโอด SXUV HS5 Si/Zr จะเห็นถึงความแตกต่าง ซึ่งการเปรียบเทียบนี้สามารถนำช่วงการทำงานที่สามารถตรวจจับรังสีที่มีความยาวคลื่นในช่วง 13.5นาโนเมตร มาเปรียบเทียบกันดังภาพที่ 3.5.2 นี้



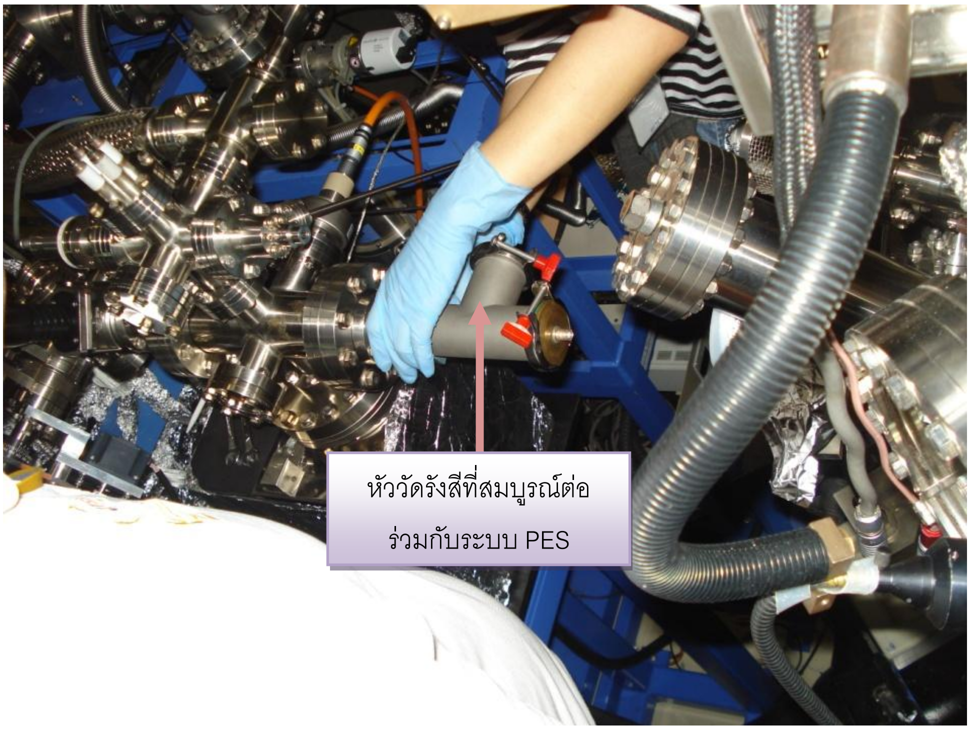
ภาพที่ 3.9.1 ผังการทำงานของหัววัดรังสีชนิดโฟโตไดโอด SXUV HS5 Si/Zr. [13]



ภาพที่ 3.9.2 แสดงหัววัดรังสีชนิดโฟโตไดโอด SXUV HS5 Si/Zr. [13]

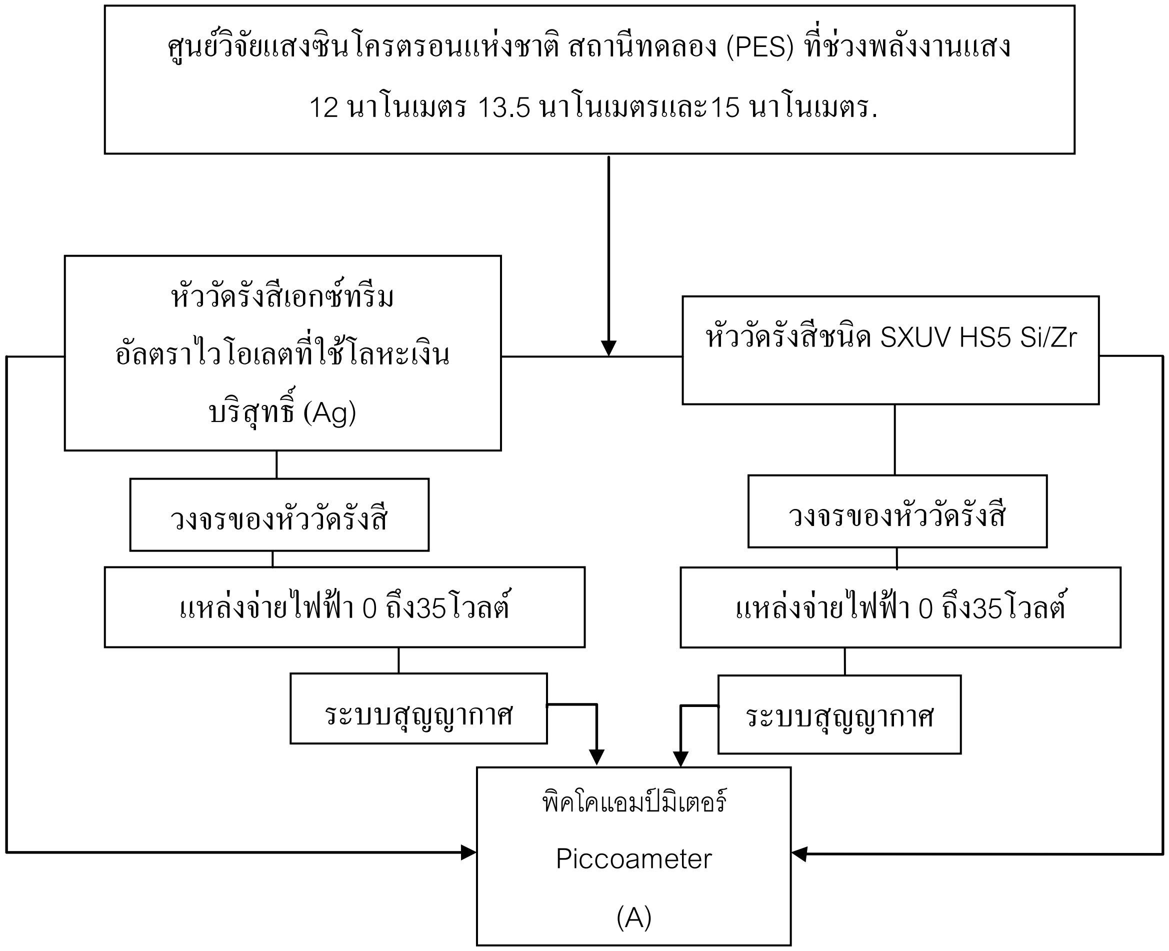
ภาพที่ 3.9.3 แสดงฐานของหัววัดรังสีชนิดโฟโตไดโอด SXUV HS5 Si/Zr. [13]

การทดสอบประสิทธิภาพของหัววัดรังสีที่สร้างขึ้นนำมาเปรียบเทียบกับหัววัดรังสีที่มีการพัฒนามาแล้วโดยนำมาสอบเทียบกับแสงซินโครตรอนดังแสดงในภาพที่ 3.9.2



ภาพที่ 3.9.4 แสดงการทดสอบประสิทธิภาพของหัววัดรังสี SXUV HS5 Si/Zr
ต่อเข้ากับระบบลำเลียงแสง

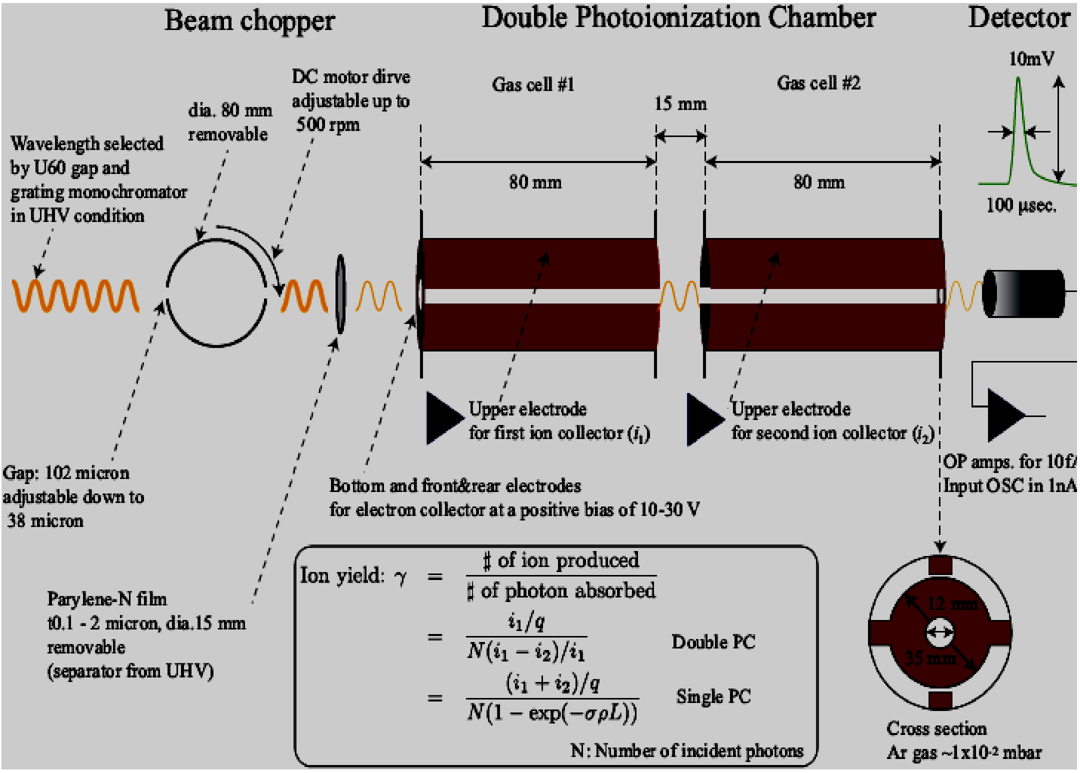
3.9.1 แผนผังการทดสอบประสิทธิภาพของหัววัดรังสี



ภาพที่ 3.9.5 แสดงหลักการทดสอบประสิทธิภาพของหัววัดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลต
กับหัววัดรังสีชนิดโฟโตไดโอด SXUV HS5 Si/Zr.

บทที่ 4
ผลการทดลอง

การทดสอบประสิทธิภาพของหัววัดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตที่สร้างขึ้นนั้นจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ การทดสอบประสิทธิภาพของโลหะเพื่อเลือกใช้โลหะที่มีความเหมาะสมมากที่สุดที่จะนำไปสร้างหัววัดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตโดยการทดสอบโลหะที่บริสุทธิ์ทั้ง 4 ชนิด คือ ทองแดง(Cu) เงิน(Ag) อะลูมิเนียม(Al) และเหล็ก(Fe) โดยใช้หลักของปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกในการทดสอบประสิทธิภาพโดยใช้แสงจากศูนย์วิจัยแสงซินโครตรอนเป็นแหล่งกำเนิดแสงในการทดลอง และการทดสอบหัววัดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตที่สร้างขึ้นแล้วทำการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับหัววัดรังสีชนิดโฟโตไดโอด SXUV HS5 Si/Zr ที่ใช้ทดสอบกับรังสีช่วงความยาวคลื่นครอบคลุม 13.5นาโนเมตร และใช้ร่วมกับกระซิลิคอนโมลิบดีนัม



ภาพที่ 4.1 แสดงภาพของหลักการคำนวณจำนวนของโฟตอนที่ออกมาจากระบบของศูนย์วิจัยแสงซินโครตรอน [14]

คุณสมบัติของแสงจากทางระบบของสถานีทดลอง PES สำหรับการให้แสงสำหรับผู้ใช้แสง

- ให้พลังงานช่วงพลังงานโฟตอน: 40 – 160, 220 – 1040 อิเล็กตรอนโวลต์
- แหล่งกำเนิดแสง: A planer hallback-type undulator (Danfysik)
- สนามแม่เหล็ก: 0.5467 เทสลา ที่ระยะห่างระหว่างขั้วแม่เหล็ก 26.5 มิลลิเมตร
- จำนวนคาบ: 41
- คาบอันดูเลเตอร์: 60 มิลลิเมตร
- ความยาวของอันดูเลเตอร์: 2.460 เมตร
- ขนาดของลำแสง 0.3 มิลลิเมตร (สูง) x 0.1 มิลลิเมตร (กว้าง) ที่ตำแหน่ง ARPES
- ชนิดของโมโนโครเมเตอร์: เกรตติ้งแบบแปรเปลี่ยนระยะห่างระหว่างร่อง
- ขนาดของตัวอย่าง: < 8 มิลลิเมตร x 8 มิลิเมตร x 1 มิลลิเมตร (กว้าง xยาว xสูง) สำหรับ PES
- สภาพแวดล้อมสำหรับตัวอย่าง:ความดันต่ำมาก (10^{-10} mbar)
- ผิวหน้าของวัสดุที่ใช้ทดลองสัมผัสกับแสงโดยตรง (>1% near-surface layers)
- ความละเอียดค่าของพลังงานมีความต่อเนื่อง (> 0.1 eV)
- สามารถกำหนดช่วงของพลังงานที่ต้องการใช้ได้ตามที่ PES สามารถให้ได้
- กำหนดระยะเวลาของการใช้แสงนั้นขึ้นกับทางระบบศูนย์วิจัยแสงซินโครตรอน
- การประยุกต์ใช้งาน: ศึกษาโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์บริเวณพื้นผิว

สมการที่ใช้คำนวณจำนวนของโฟตอนที่ออกมาจากระบบของศูนย์วิจัยแสงซินโครตรอน (Double photoionizatioin gas cell) ได้จากการคำณวนค่าของการทดลองในขณะทำการทดลองในแต่ละครั้งเนื่องจากการให้แสงแต่ละครั้งนั้นระบบของการทำงานจะเปลี่ยนไป ณ เวลานั้นด้วย

$$Ionyield : \gamma = \frac{ionproduced}{photonabsorbed} \quad (4\text{-}1)$$

คือ แก๊สเซลล์คู่

$$= \frac{i_1/q}{N_0(i_1 - i_2)/i_1} \quad (4\text{-}2)$$

คือ แก๊สเซลล์เดี่ยว

$$= \frac{(i_1 + i_2)/q}{N_0(1 - \exp(-\sigma\rho L))} \quad (4\text{-}3)$$

$$N_0 = \frac{N_{ion}}{\gamma \times R_{ab}} = \frac{i_1/q}{\gamma \times (i_1 - i_2)/i_1} \quad (4\text{-}4)$$

โดย

σ คือ การดูดซึมของแก๊สเซลล์

ρ คือ ความหนาแน่นของแก๊ส

L คือ ความยาวของแก๊สเซลล์

$\sigma\rho L$ คือ การส่งผ่านแก๊สเซลล์

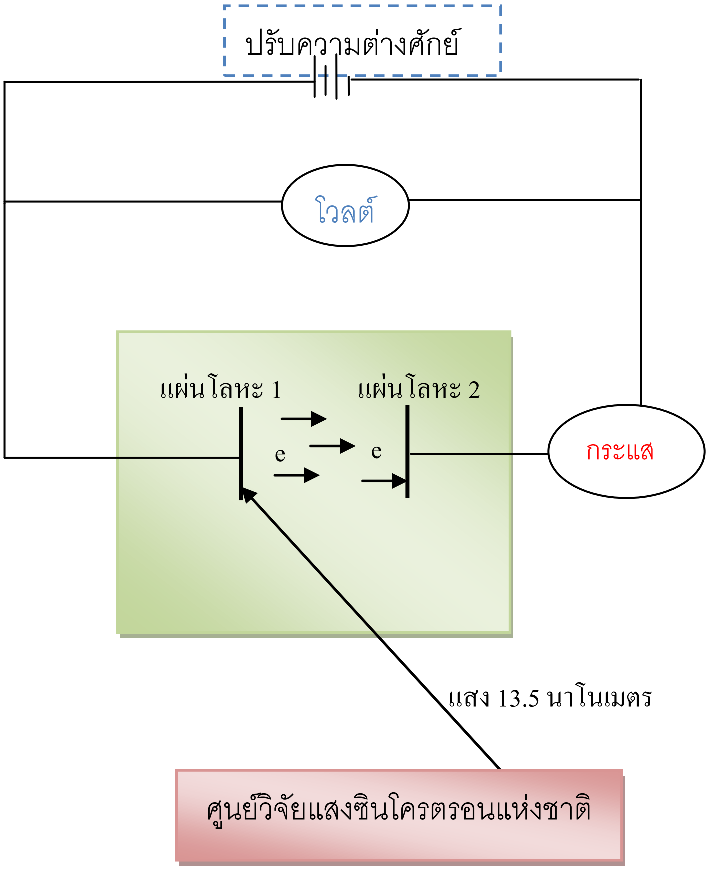
N คือจำนวนโฟตอนในระบบลำเลียงแสง

จากสมการ (4-1) คำนวณหาจำนวนโฟตอนก่อนชนกับแผ่นโลหะทั้ง 4 ชนิดที่ช่วงความยาวคลื่น 13.5นาโนเมตรค่าที่ได้นี้มาการคำนวณจากผลการทดลองของโลหะแต่ละชนิดแต่มีช่วงการทดลองเดียวกันระบบของการตั้งค่าในการทดลองเหมือนกันทั้ง 4 ชนิดจะได้โลหะเงิน (Ag) มีจำนวนเท่ากับ 1.96×10^9 โฟตอนต่อวินาที โลหะเหล็กมีจำนวนเท่ากับ (Fe) 2.65×10^9 โฟตอนต่อวินาที โลหะทองแดง (Cu) มีจำนวนเท่ากับ 2.87×10^9 โฟตอนต่อวินาที โลหะอะลูมิเนียม (Al) มีจำนวนเท่ากับ 2.24×10^9 โฟตอนต่อวินาที

การทดสอบประสิทธิภาพของโลหะทั้ง 4 ชนิดนี้เป็นการที่นำโลหะมาทดสอบที่มีการสร้างรูปแบบการทดสอบเดียวกันกำหนดค่าการทดลองเหมือนกันแล้วนำผลการทอสอบที่ได้มาเปรียบเทียบค่าที่สามารถตอบสนองที่แสงในช่วงของพลังงานอียูวี (EUV) ในช่วงครอบคลุมช่วง

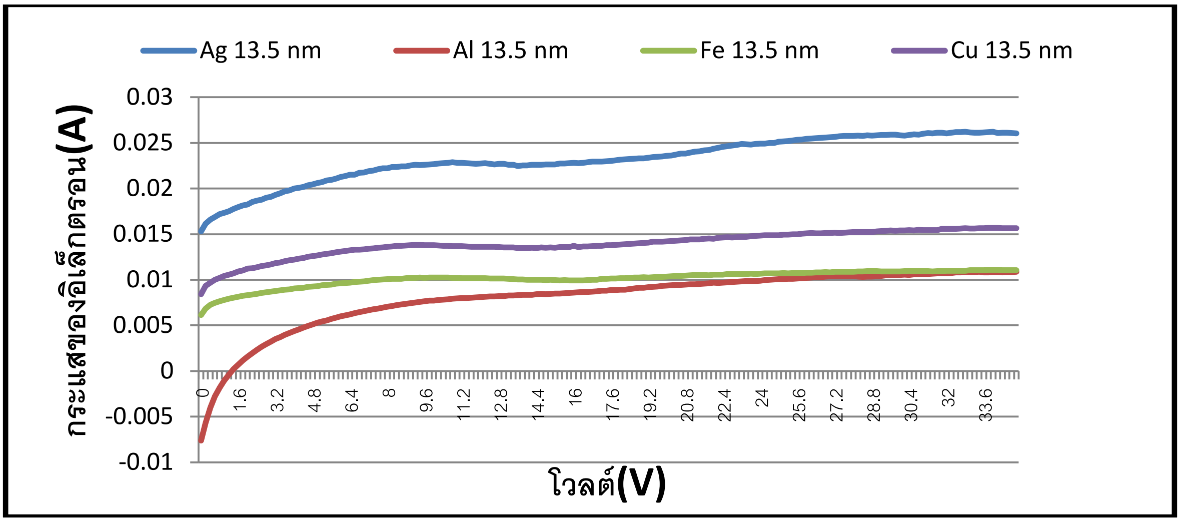
13.5นาโนเมตรเพื่อใช้เป็นตัวคัดเลือกโลหะบริสุทธิ์ที่จะนำมาสร้างเป็นหัววัดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลต ให้มีประสิทธิภาพสูงที่สุด

4.1 การทดสอบประสิทธิภาพของโลหะเพื่อคัดเลือกโลหะที่มีความเหมาะสมมากที่สุดที่สามารถตอบสนองรังสีในย่าน 13.5นาโนเมตร



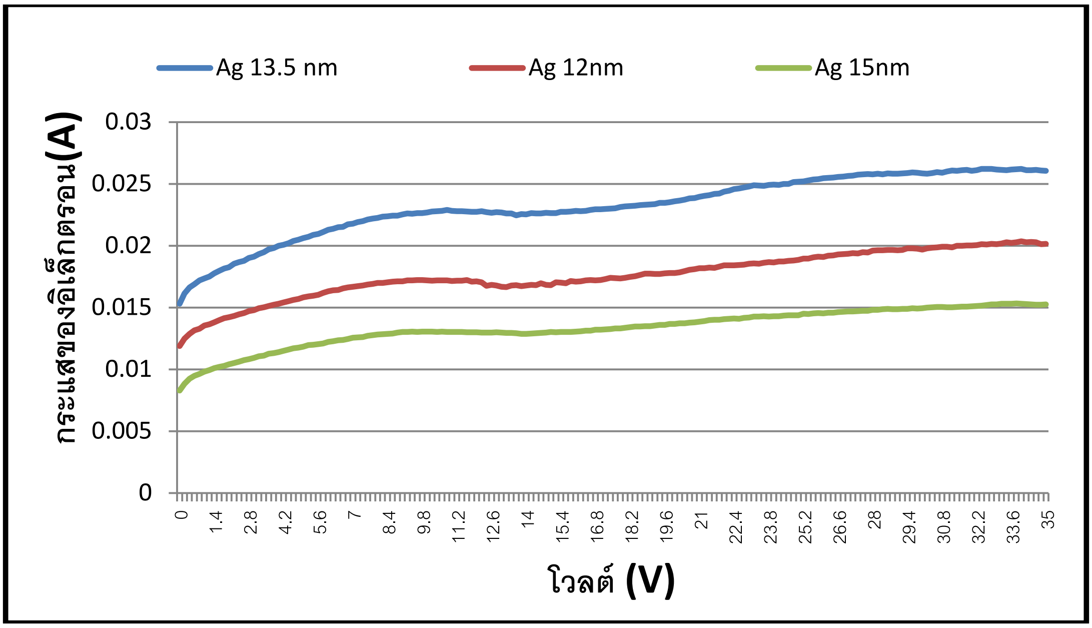
ภาพที่ 4.1.1 การทดสอบประสิทธิภาพของโลหะโดยใช้หลักการโฟโตอิเล็กทริก

จากภาพที่ 4.1.1 เป็นหลักการทดสอบประสิทธิภาพของโลหะทั้ง 4 ชนิด อะลูมิเนียม เงิน เหล็กและทองแดง โดยใช้หลักการโฟโตอิเล็กทริก ใช้แสงจากศูนย์วิจัยแสงซินโครตรอนเป็นแหล่งกำเนิดแสงในช่วงความยาวคลื่น 13.5นาโนเมตร ซึ่งภายในระบบของการทดลองนั้นจะต้องควบคุมให้เป็นระบบสุญญากาศและทุกอย่างต้องตั้งค่าให้การทดลองเหมือนกันทุกครั้งทั้งโลหะ จึงจะสามารถนำมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพได้ซึ่งจะได้ผลการทดสอบดังต่อไปนี้



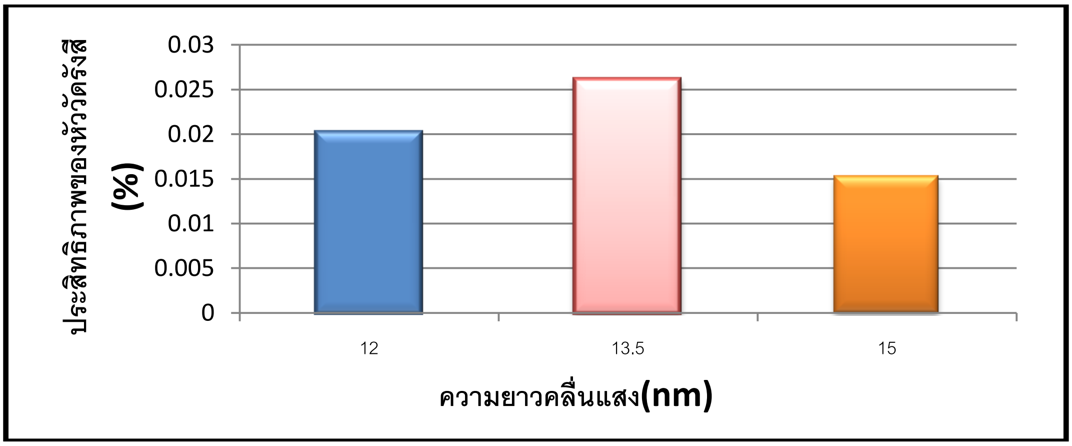
ภาพที่ 4.1.2 กราฟแสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพของโลหะโดยใช้ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก ในช่วงความยาวคลื่น 13.5นาโนเมตร

ผลการทดสอบประสิทธิภาพของโลหะทั้ง 4 ชนิดนั้นโลหะเงิน(Ag) มีการตอบสนองในช่วงความยาวคลื่นที่ 13.5นาโนเมตร ดีที่สุดคือเมื่อยิงแสงที่ความยามคลื่น 91.84อิเล็กตรอนโวลต์ (13.5นาโนเมตร) มายังโลหะเงินทำให้จำนวนของอิเล็กตรอนหลุดออกมามากที่สุด จากภาพที่ 4.1.3 จำนวนของโฟตอนก่อนชนโลหะเงินเป็นจำนวนของโฟตอนต่อวินาที ($photon/\sec$) ที่ได้จากการคำนวณจากสมการที่ (4-1) จะได้ช่วงพลังงานของความยาวคลื่นแสงดังนี้ ที่ช่วงความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน ในการทดลองที่เหมือนกันทั้งระบบที่ $12nm = 3.03\times10^{9}$ โฟตอนต่อวินาที ที่ $13.5nm = 1.96\times10^{9}$ โฟตอนต่อวินาทีและที่ $15nm = 3.54\times10^{9}$ โฟตอนต่อวินาที



ภาพที่ 4.1.3 กราฟแสดงผลการทดสอบหัววัดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตที่ใช้โลหะเงิน

เมื่อนำหัววัดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตมาทดสอบกับแสงที่ 13.5นาโนเมตร จะได้กราฟที่แสดงค่าระหว่างค่าของจำนวนอิเล็กตรอนที่หัววัดรังสีวัดได้เทียบกับแรงดันไฟฟ้าที่ 0โวลต์ถึง 35 โวลต์ จะเห็นว่าในช่วงความยาวคลื่นที่ 13.5นาโนเมตร นั้นทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมามากที่สุด แสดงว่าหัววัดรังสีที่ใช้โลหะเงินนี้ สามารถตอบสนองรังสีนี้ได้ดีในช่วงนี้มากที่สุดจากภาพที่ 4.1.3



ภาพที่ 4.1.4 กราฟแสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพของหัววัดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลต

แสดงผลการเปรียบเทียบของโลหะเงินที่สามารถตอบสนองของรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตที่ช่วงความยาวคลื่นที่ต่างกัน 3 ช่วงเพื่ออธิบายการทดสอบประสิทธิภาพของโลหะเงินที่ช่วงความยาวคลื่นที่ 13.5นาโนเมตร นั้นโลหะเงินนั้นสามารถตอบสนองได้ดีที่สุดซึ่งเป็นช่วงความยาวคลื่นที่เราต้องการวัดดังนั้นจึงเป็นการเน้นว่าสามารถนำโลหะเงินนั้นมาสร้างหัววัดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลต ซึ่งเปรียบเทียบโดยหาค่าประสิทธิภาพ(efficiency) ของหัววัดรังสีที่ใช้โลหะเงินได้จากสมการที่(4-5) ที่ให้แรงดันไฟฟ้า 35โวลต์ ที่ช่วงความยาวคลื่น 12นาโนเมตร 13.5นาโนเมตรและ 15นาโนเมตร ได้ว่าที่ช่วงความยาวคลื่นที่ 13.5นาโนเมตร ได้ค่าสูงที่ 2.6 เปอร์เซ็นต์จากความยาวช่วงอื่นๆ ประสิทธิภาพจะลดลงเล็กน้อยที่ 2เปอร์เซ็นต์ ที่ความยาวคลื่น 12นาโนเมตร และต่ำสุดที่ 1.5เปอร์เซ็นต์ ที่ความยาวคลื่น 15นาโนเมตร ดังแสดงจากภาพที่ 4.1.4

$$efficiency = \left[\frac{number - of - electron(I_p)}{number - of - photons(n_e)} \right] \times 100 \qquad (4\text{-}5)$$

ประสิทธิภาพของโลหะเงินที่ช่วงความยาวคลื่น 12นาโนเมตรโดยเลือกที่ค่าของกระแสอิเล็กตรอนสูงที่สุดที่จ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ 35 โวลต์

$$efficiency = \left[\frac{6.11 \times 10^7}{3.03 \times 10^9} \right] \times 100$$

$$efficiency = 2.014\%$$

ประสิทธิภาพของโลหะเงินที่ช่วงความยาวคลื่น 13.5นาโนเมตรโดยเลือกที่ค่าของกระแสอิเล็กตรอนสูงที่สุดที่จ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ 35 โวลต์

$$efficiency = \left[\frac{5.11 \times 10^7}{1.96 \times 10^9} \right] \times 100$$

$$efficiency = 2.607\%$$

ประสิทธิภาพของโลหะเงินที่ช่วงความยาวคลื่น 15นาโนเมตรโดยเลือกที่ค่าของกระแสอิเล็กตรอนสูงที่สุดที่จ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ 35 โวลต์

$$efficiency = \left[\frac{5.40 \times 10^7}{3.54 \times 10^9} \right] \times 100$$

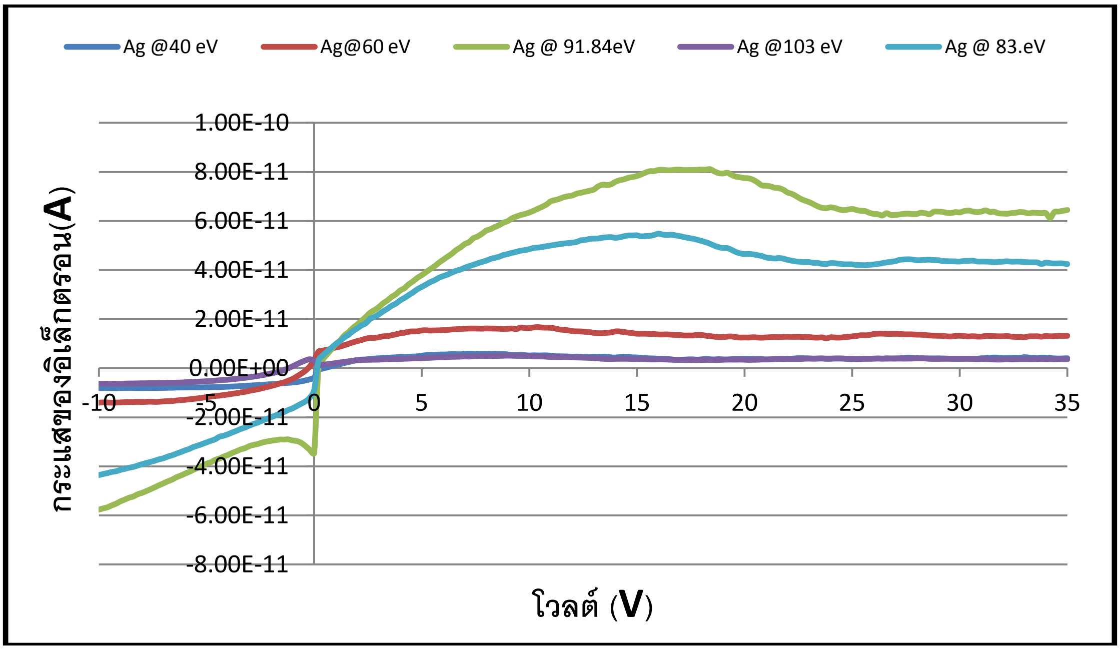
$$efficiency = 1.525\%$$

ตารางที่ 4.1.1 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของหัววัดรังสีที่สร้างจากโลหะเงินที่ช่วงความยาวคลื่น 12นาโนเมตร 13.5นาโนเมตรและที่ 15นาโนเมตร

ความยาวคลื่น(nm)	**ครั้งที่1**	**ครั้งที่2**	**ครั้งที่3**	**เฉลี่ย**
13.5 nm	2.67%	2.78%	2.05%	2.479%
12 nm	2.014%	1.98%	1.15%	1.714%
15nm	1.525%	1.28%	1.35%	1.385%

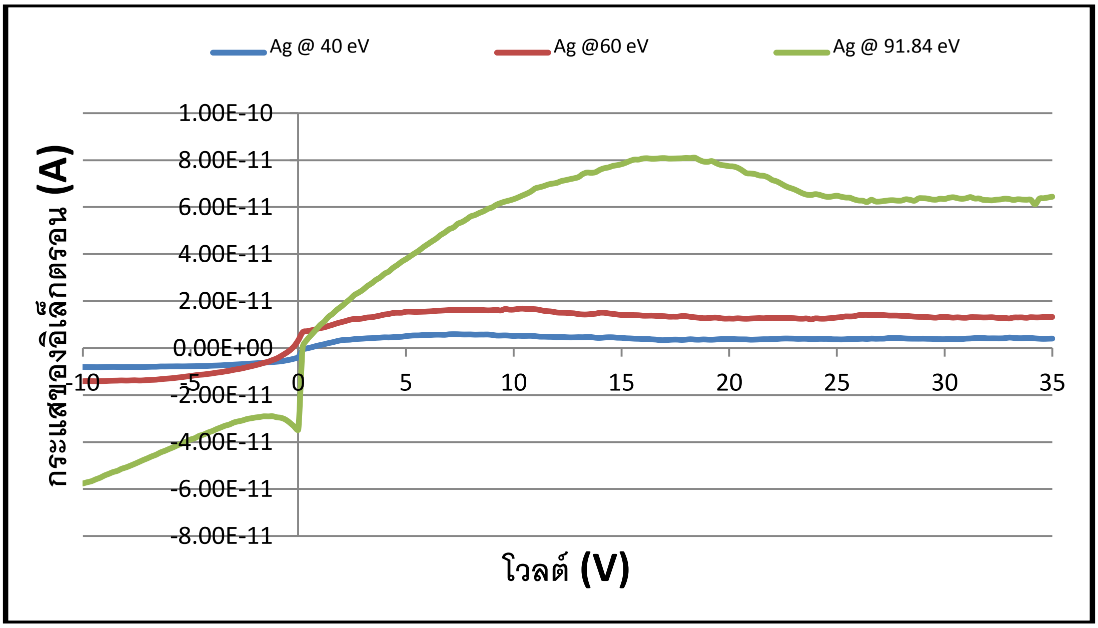
4.2 การทดสอบหัววัดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตที่สร้างจากโลหะเงิน

ผลการเปรียบเทียบการตอบสนองของหัววัดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตที่สร้างจากโลหะเงินที่ทำการทดสอบในช่วงพลังงานที่ครอบคลุม 13.5นาโนเมตร สามารถแสดงถึงการตอบสนองได้อย่างสูงสุดที่ช่วงพลังงานที่ 13.5นาโนเมตร หัววัดรังสีที่สร้างจากโลหะชนิดนี้สามารถตอบสนองได้ดีที่สุดดังแสดงในกราฟที่ 4.2.1



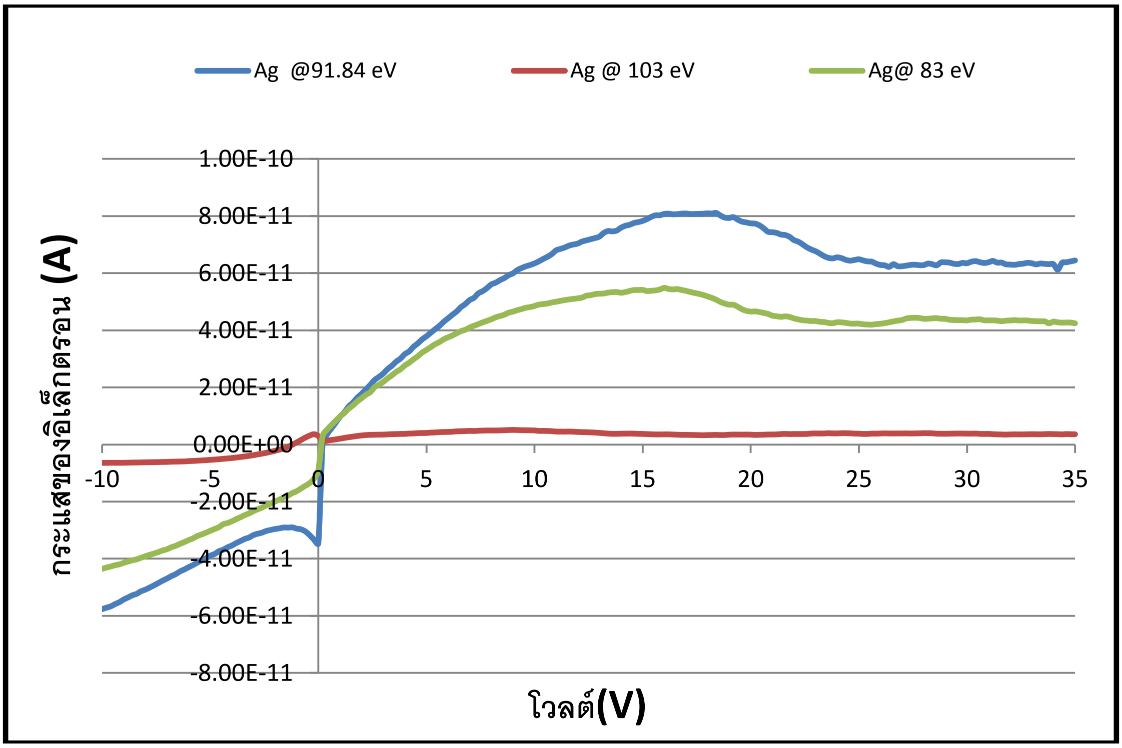
ภาพที่ 4.2.1 กราฟแสดงการทดสอบประสิทธิภาพของหัววัดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตที่สร้างจากโลหะเงินในช่วงของพลังงานที่ต่างกัน

จากกราฟแสดงผลการเปรียบเทียบของหัววัดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตที่สร้างขึ้นจากโลหะเงินโดยใช้แสงตั้งแต่ช่วงพลังงานของรังสียูวีไปจนถึงรังสีอียูวีที่ 40อิเล็กตรอนโวลต์ 60 อิเล็กตรอนโวลต์ 83อิเล็กตรอนโวลต์ 91.84อิเล็กตรอนโวลต์ และ 103อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งจากกราฟจะเห็นว่าจะมีการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ -10โวลต์ จนถึง 35โวลต์ ซึ่งในการเพิ่มค่าของแรงดันไฟฟ้านี้เพื่อที่จะสามารถทำให้เห็นการทำงานของหัววัดรังสีในช่วงตั้งแต่ยังไม่มีแรงดันไฟฟ้าจนถึงการจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้น จะทำให้การทำงานของหัววัดรังสีที่ยังไม่มีค่าแรงดันไฟฟ้า ยังทำให้หัววัดรังสีนั้นสามารถที่จะวัดค่าของอิเล็กตรอนที่หลุดอออกมาได้เหมือนกันแต่จำนวนของอิเล็กตรอนที่หัววัดรังสีนั้นวัดค่าได้นั้นอาจจะมีจำนวนที่น้อยกว่าที่เราเพิ่มค่าแรงดันไฟฟ้าถ้าดูจากกราฟ สาเหตุที่เป็นเช่นนั้นเนื่องจากแสงจากระบบของศูนย์วิจัยแสงซินโครตรอนนั้นมีพลังงานที่สูงมากกว่าค่า ฟังก์ชันงานของโลหะเงินจึงสามรถเอาชนะค่าฟังก์ชันงานของโลหะเงินได้จึงทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาตลอดเวลาอยู่แล้วโดยไม่ต้องเพิ่มค่าแรงดันไฟฟ้าให้กับโลหะเงินของหัววัดรังสี



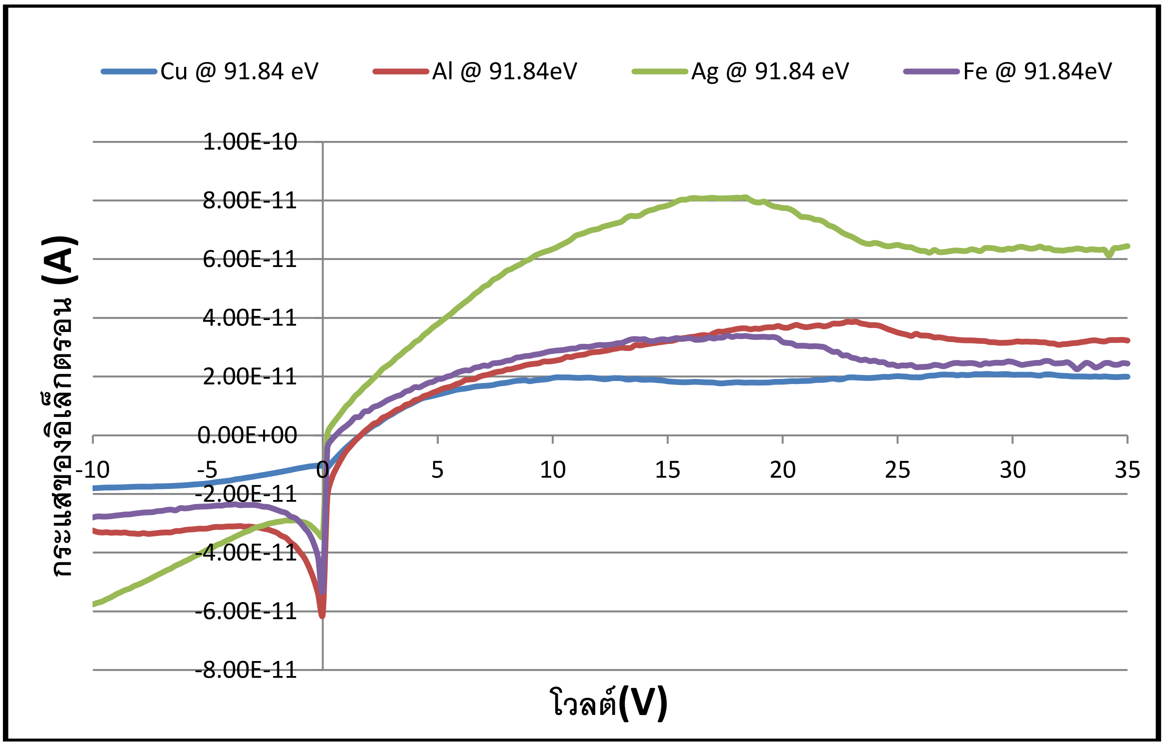
ภาพที่ 4.2.2 กราฟแสดงการทดสอบประสิทธิภาพของหัววัดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตที่สร้างจากโลหะเงินในช่วงของพลังงานที่ต่างกันในช่วงของรังสี ยูวี(UV) และรังสี อียูวี(EUV)

จากภาพที่ 4.2.2 จะเป็นการแสดงผลการทดสอบหัววัดรังสีที่ใช้รังสียูวีที่ 40อิเล็กตรอนโวลต์ 60อิเล็กตรอนโวลต์ และอียูวีที่ 91.84อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งจะเป็นการแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของหัววัดรังสีที่สร้างขึ้นว่าเพราะเหตุใดจึงได้เลือกโลหะเงิน เพื่อจะนำมาสร้างเป็นหัววัดรังสีเพื่อใช้วัดในช่วงพลังงานที่ 13.5นาโนเมตร ก็เพราะโลหะเงินนั้นสามารถตอบสนองในช่วงพลังงานของแสงยูวีได้เหมือนกันแต่ที่แสง อียูวี ในช่วงพลังงานของแสงและตำแหน่งของการวางหัววัดรังสีการเพิ่มค่าแรงดันไฟฟ้านั้นด้วยองค์ประกอบเหล่านี้ จึงทำให้สามารถตอบสนองได้ดีที่สุดที่ 13.5นาโนเมตร นี้ซึ่งเป็นสิ่งที่สำคัญมาในการทดสอบประสิทธิภาพในครั้งนี้เพราะเนื่องจากเราได้กำหนดการทดลองให้เหมือนกันทุกอย่างแต่เปลี่ยนเฉพาะช่วงของพลังงานแสงที่ใช้ทดลองเท่านั้นซึ่งในการกำหนดช่วงพลังงานของแสงนั้นมีความแม่นยำสูงเพราะทางระบบของศูนย์วิจัยแสงนั้นเขาควบคุมในการกำหนดช่วงพลังงานนั้นด้วยระบบคอมพิวเตอร์และมีผู้เชี่ยวชาญทางด้านนี้ตลอดการทำทดลอง



ภาพที่ 4.2.3 กราฟแสดงการทดสอบประสิทธิภาพของหัววัดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตที่สร้างจากโลหะเงินในช่วงของพลังงานที่ 12 นาโนเมตร 13.5 นาโนเมตรและที่ 15 นาโนเมตร

การเปรียบเทียบหัววัดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตที่ช่วงพลังงานที่ครอบคลุม 13.5นาโนเมตร ซึ่งจะเห็นว่าเริ่มต้นจากการ จ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ค่าน้อยๆ ไปจนถึงค่ามากขึ้นจะทำให้หัววัดรังสีสามารถตอบสนองได้ดีขึ้นเรื่อยๆ จนถึงค่าๆ หนึ่งจะเห็นว่ากราฟจะถึงสภาวะคงตัวแล้วนั้นก็แสดงให้เห็นว่าจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ค่าประมาณ 10โวลต์ ถึง 20โวลต์ สามารถทำให้หัววัดรังสีสามารถตอบสนองที่ช่วงพลังงาน 13.5นาโนเมตร ได้ดีที่สุดพอแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจะทำให้กระแสของอิเล็กตรอนนั้นอยู่ในสภาวะที่คงที่ในช่วง 25โวลต์ ถึง 35โวลต์ ซึ่งแสดงในภาพที่ 4.2.3



ภาพที่ 4.2.4 กราฟแสดงการทดสอบประสิทธิภาพของหัววัดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลต ทั้ง 4 ชนิดเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพที่ต่างกันในการตอบสนองต่อแสงในช่วงของพลังงาน ที่13.5นาโนเมตร

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการหัววัดรังสีทั้ง 4 ชนิดที่สามารถตอบสนองแสงในช่วงพลังงาน 13.5นาโนเมตร ตั้งแต่เริ่มปรับแรงดันไฟฟ้า -10โวลต์ ถึง 35โวลต์ จะทำให้เห็นถึงข้อแตกต่างของการตอบสนองของช่วงพลังทั้งที่มีการเพิ่มกระแสลบและบวกรวมถึงการที่ไม่มีการจ่ายกระแสให้กับหัววัดรังสีซึ่งในการจ่ายแรงดันไฟฟ้าเป็นลบให้กับหัววัดรังสีนั้นจะทำให้ความสามารถในการตอบสนองนั้นทำให้มีค่าของกระแสเป็นค่าลบ(-) ค่อยเพิ่มขึ้นตามระดับของการปรับ

แรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นและช่วงของการที่เพิ่มแรงดันไฟฟ้า0โวลต์ เนื่องจากไม่มีการจ่ายแรงดันไฟฟ้าทำให้อิเล็กตรอนในระบบถูกดึงกลับทำให้กระแสของอิเล็กตรอนนั้นลดลงอย่างรวดเร็วแต่ด้วยความเข้มของแสงจากศูนย์วิจัยแสงซินโครตรอนที่สามารถเอาชนะค่าฟังก์ชันงานของโลหะทั้งหมดได้อยู่แล้วจึงทำให้มีกระแสของอิเล็กตรอนออกมาอยู่แล้วจากนั้นเมื่อมีการจ่ายแรงดันไฟฟ้าเป็นค่าบวก(+) จะทำให้กระแสของอิเล็กตรอนนั้นเพิ่มมากขึ้นตามลำดับจนถึงขีดสุดจะถึงจุดสมดุลของกระแสอิเล็กตรอนที่หัววัดรังสีสามารถวัดได้ซึ่งจากการเปรียบของหัววัดรังสีที่สร้างจากโลหะเงินนั้นสามารถตอบสนองได้สูงที่สุดจากโลหะทั้ง 4 ชนิด ซึ่งแสดงจากภาพที่ 4.2.4

4.3 **การทดสอบหัววัดรังสีโฟโตไดโอดชนิด** SXUV HS5 Si/Zr

ผลการทดสอบของหัววัดรังสีชนิดโฟโตไดโอด SXUV HS5 Si/Zr เป็นการทำการทดสอบหัววัดรังสีที่สร้างขึ้นโดยใช้โลหะเงินนั้นมาทดสอบประสิทธิภาพเทียบกับหัววัดรังสี่ที่สร้างขึ้นโดยหัววัดรังสีชนิดโฟโตไดโอด SXUV HS5 Si/Zr นั้นนำมาทดสอบกับแสงที่ช่วงพลังงานครอบคลุมความยาวคลื่น 13.5นาโนเมตร โดยใช้หลักการทดสอบประสิทธิภาพเหมือนกันกับการทดสอบหัววัดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตดังแสดงในภาพที่ 4.1.1 ซึ่งในการทดสอบนั้นจะกำหนดช่วงพลังงานที่ 80อิเล็กตรอนโวลต์ ถึง 110อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งจากการที่ทดลองนั้นถ้าเรา ปรับค่าแรงดันไฟฟ้าไปที่ 10โวลต์ จะเห็นว่าหัววัดรังสีชนิดโฟโตไดโอด SXUV HS5 Si/Zr นั้นสามารถตอบสนองได้ดีที่สุดในช่วงความยาวคลื่นที่ 13.5นาโนเมตร

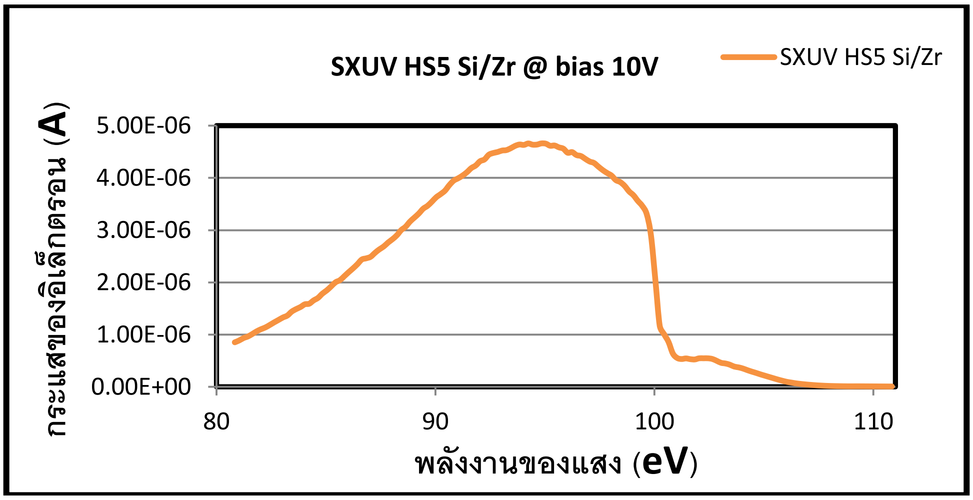
ผลการคำนวณหาค่าประสิทธิภาพของหัววัดรังสีชนิดโฟโตไดโอด SXUV HS5 Si/Zr ที่ช่วงความยาวคลื่น 13.5นาโนเมตร

จากสมการที่(4-5)

$$efficiency = \left[\frac{number - of - electron(I_p)}{number - of - photons(n_e)}\right] \times 100$$

จะได้ $$I_p = -2.54 \times 10^{-12} A$$

$$= 2.23\%$$



ภาพที่ 4.3.1 กราฟแสดงผลการทดสอบของหัววัดรังสีชนิดโฟโตไดโอด SXUV HS5 Si/Zr ทดสอบกับความยาวคลื่นครอบคลุมช่วงพลังงานที่ 13.5นาโนเมตร

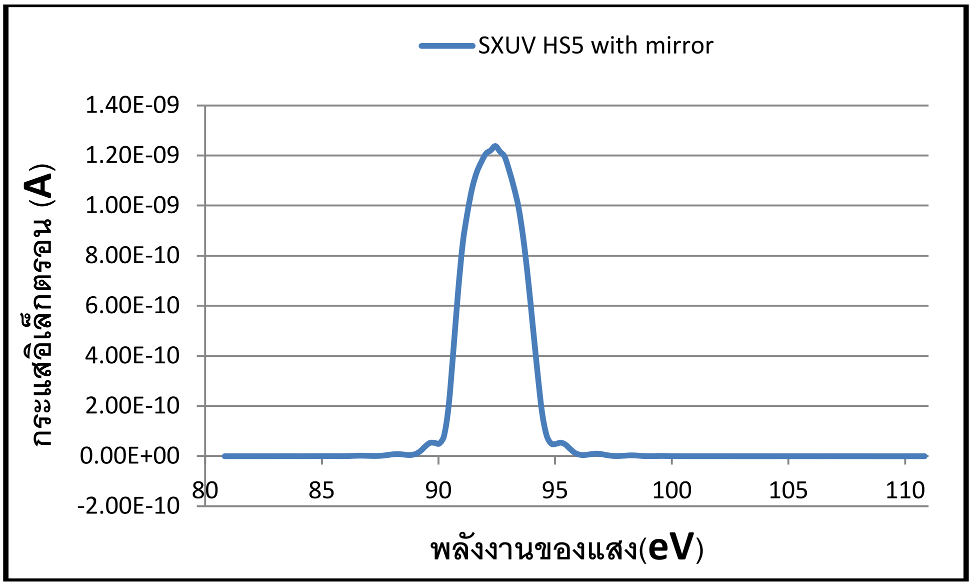
ผลการทดสอบของหัววัดรังสีชนิดโฟโตไดโอด SXUV HS5 Si/Zr เป็นการทำการทดสอบหัววัดรังสีที่สร้างขึ้นโดยใช้โลหะเงินนั้นมาทดสอบประสิทธิภาพเทียบกับหัววัดรังสี่ที่สร้างขึ้นโดยโฟโตไดโอด SXUV HS5 Si/Zr นั้นนำมาทดสอบกับแสงที่ช่วงพลังงานความยาวคลื่น 13.5นาโนเมตร โดยใช้หลักการทดสอบประสิทธิภาพเหมือนกันกับการทดสอบหัววัดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลต ดังแสดงในภาพที่ 4.3.1

ผลการการคำนวณหาค่าประสิทธิภาพของหัววัดรังสีชนิดโฟโตไดโอด SXUV HS5 Si/Zr ที่ใช้ร่วมกับกระจกซิลิคอนโมลิบดีนัม (Si/Mo) ที่ช่วงความยาวคลื่น 13.5 นาโนเมตรจะได้ค่าดังนี้ จากสมการที่(4-5)

จะได้

$$I_p = -4.24 \times 10^{-12} A$$

$$= 3.74\%$$



ภาพที่ 4.3.2 กราฟแสดงผลการทดสอบของหัววัดรังสีชนิดโฟโตไดโอด SXUV HS5 Si/Zr ที่ใช้ร่วมกับกระจกเคลือบฟิล์มบางซิลิคอนโมลิบดีนัม ทดสอบกับความยาวคลื่นครอบคลุมช่วงพลังงานที่ 13.5 นาโนเมตร

ผลการทดสอบของหัววัดรังสีชนิดโฟโตไดโอด SXUV HS5 Si/Zr ที่ใช้กระจกเคลือบฟิล์มบางซิลิคอนโมลิบดีนัมนั้นจะทำให้เห็นว่าหัววัดรังสีชนิดโฟโตไดโอด SXUV HS5 Si/Zr สามารถตอบสนองรังสีในช่วงความยาวคลื่นที่ 13.5นาโนเมตร เท่านั้นเนื่องมาจากตัวของกระจกซิลิคอนโมลิบดีนัมมีหน้าที่เป็นตัวสะท้อนรังสีให้สามารถผ่านได้เฉพาะที่ช่วงประมาณ 13.5นาโนเมตร เท่านั้นทำให้หัววัดรังสีชนิดโฟโตไดโอด SXUV HS5 Si/Zr ไม่สามารถตอบสนองในช่วงความยาวคลื่นอื่นได้ดังแสดงในภาพที่ 4.3.2 ซึ่งก็เป็นผลดีต่อการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับหัววัดรังสีให้สามารถตอบสนองได้ดีเฉพาะช่วงความยาวคลื่นที่ 13.5นาโนเมตร เท่านั้น

4.4 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของหัววัดรังสี

ตารางที่ 4.5.1 แสดงค่าเปรียบเทียบประสิทธิภาพของหัววัดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวดอเลตกับหัววัดรังสีชนิดโฟโตไดโอด SXUV HS5 Si/Zr

ความยาวคลื่น (nm)	**หัววัดรังสีโลหะเงิน** (Ag)	SXUV HS5 Si/Zr	SXUV HS5 Si/Zr **ร่วมกับ กระจก** Si/Mo
13.5nm	2.47%	2.23%	3.74%

การหาค่าเฉลี่ยมาตรฐานของหัววัดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตที่สร้างจากโลหะเงิน ที่ช่วงความยาวคลื่น 13.5นาโนเมตร

จากสมการ
$$X = \frac{\sum x}{N} \qquad (4\text{-}6)$$
$$\overline{X} = \frac{\sum x}{N} \qquad (4\text{-}7)$$

เมื่อ X คือค่าของข้อมูลแต่ละตัวของการทดลอง

$\overline{X}$ คือค่าเฉลี่ยของกลุ่มการทดลอง

N คือจำนวนข้อมูลทั้งหมดของการทดลอง [14]

จะได้
$$X = \frac{5.11 + 8.17 + 6.44}{3}$$
$$\overline{X} = 6.57$$

การหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

จากสมการ
$$SD = S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(x_1 - \overline{x})^2}{N}} \qquad (4\text{-}8)$$

เมื่อ S คือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลอง

X คือค่าของข้อมูลแต่ละตัวของการทดลอง

$\overline{X}$ คือค่าเฉลี่ยของกลุ่มการทดลอง

N คือจำนวนข้อมูลทั้งหมดของการทดลอง [14]

การคำณวณหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของหัววัดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตที่สร้างจากโลหะเงิน ที่ช่วงความยาวคลื่น 13.5นาโนเมตร

จากสมการที่ (4-8)
$$SD = S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(x_1 - \overline{x})^2}{N}}$$

จะได้
$$SD = S = \sqrt{\frac{(5.11-6.57)^2 + (8.17-6.57)^2 + (6.44-6.57)^2}{3}}$$

$$SD = 1.267$$

การหาค่าความไม่แน่นอนของการวัดของหัววัดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตที่สร้างจากโลหะเงิน ที่ช่วงความยาวคลื่น 13.5นาโนเมตร

จากสมการ
$$U_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^{3} U_i^2(y)} \qquad (4\text{-}9)$$

$$U_c(y) = \sqrt{U_1^2(y) + U_2^2(y) + U_3^2(y)} \qquad (4\text{-}10)$$

จะได้
$$U_c(y) = \sqrt{5.11^2 + 8.17^2 + 6.44^2}$$

$$U_c(y) = 11.59$$

บทที่ 5

สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองหัววัดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลต ที่พัฒนาขึ้นโดยใช้ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก ของโลหะเงิน ที่มีค่าฟังก์ชันงาน 4.73 อิเล็กตรอนโวลต์ เหมาะสมที่สุดกับความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตที่ 13.5นาโนเมตร ซึ่งจาการทดสอบประสิทธิภาพของหัววัดรังสีนี้โดยนำไปสอบเทียบกับศูนย์วิจัยแสงซินโครตรอนจากสถานีทดลองทางด้านPhotoemission Spectroscopy (PES) ซึ่งเป็นเทคนิคพื้นฐานที่ใช้ในการศึกษาด้านฟิสิกส์พื้นผิวของสสาร อุปกรณ์และเทคนิคการวิเคราะห์ที่จัดเตรียมไว้ภายในสถานีทดลองนี้มีความเหมาะสมในงานวิจัยทางด้านฟิสิกส์ และวัสดุศาสตร์ สามารถให้รังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตที่สามารถใช้ในการสอบเทียบและทดสอบประสิทธิภาพของการทำงานของหัววัดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตได้ ซึ่งระบบลำเลียงแสงนี้มีช่วงพลังงานตั้งแต่ 40 อิเล็กตรอนโวลต์ ถึง160 อิเล็กตรอนโวลต์ และ 220 อิเล็กตรอนโวลต์ถึง1040 อิเล็กตรอนโวลต์ ทำให้ได้แสงซินโครตรอนที่มีความเข้มสูงและครอบคลุมรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตที่ความยาวคลื่น 13.5นาโนเมตร ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดแสงเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตที่ดีที่สุดในปัจจุบันนี้

จากการทดสอบประสิทธิภาพของหัววัดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตที่สร้างขึ้นจากโลหะเงิน โดยใช้ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก ดังที่กล่าวมาแล้วนั้นหัววัดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตสามารถตอบสนองช่วงความยาวคลื่นที่ 13.5นาโนเมตร ได้ดีที่สุดเทียบเท่ากับหัววัดรังสีที่มีการพัฒนามาแล้ว

5.2 อภิปรายผลการวิจัย

เพื่อหาประสิทธิภาพการวัดของหัววัดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตที่สร้างขึ้นโดยใช้โลหะเงินบริสุทธิ์แล้วนำหัววัดรังสีชนิดโฟโตไดโอด SXUV HS5 Si/Zr ที่เคยมีงานวิจัยในด้านการวัดรังสีนี้มาเปรียบเทียบคุณสมบัติทางด้านการทำงานว่าหัววัดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตที่สร้างขึ้นมีประสิทธิภาพในการทำงานที่ต่างกันคือหัววัดรังสีชนิดโฟโตไดโอด SXUV HS5 Si/Zr ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวสามารถตรวจจับรังสีที่ครอบคลุมความยาวคลื่นที่13.5นาโนเมตร ซึ่งมีช่วงการทำงานที่ใกล้เคียงกับหัววัดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตที่สร้างขึ้นซึ่งสามารถตอบสนอเฉพาะรังสีในย่านความยาวคลื่น 13.5นาโนเมตร เท่านั้นและถ้ามีความต้องการที่จะต้องการวัดค่าที่มีค่าใกล้เคียงกับช่วงความยาวคลื่น 13.5นาโนเมตร นั้นสามารถใช้หัววัดชนิดนี้ทดสอบได้โดยใช้หัววัดที่สร้างจาก

โลหะทั้ง 4 ชนิดได้โดยเลือกจากค่าความเหมาะสมของโลหะแต่ละชนิดตามค่าฟังก์ชันงานที่เหมาะสมกับช่วงความยาวคลื่นที่ต้องการตามผลการทดลองที่ได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพที่กล่าวมาแล้วได้ ซึ่งจะสามารถนำหัววัดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตที่สร้างขึ้นนี้ไปใช้ตรวจวัดวัดกับแหล่งกำเนิดพลังงานในย่านพลังงานที่ 13.5นาโนเมตร ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าและยังช่วยประหยัดใช้จ่ายในการสร้างหัววัดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตด้วย

5.3 ข้อเสนอแนะ

จากการทดลองหัววัดรังสีที่สร้างจากโลหะเงินนั้นสามารถตอบสนองในช่วงรังสีที่เราต้องการวัดได้แต่ยังมีความต้องการที่จะให้สามารถวัดได้เฉพาะเจาะจงที่ 13.5นาโนเมตร ดังนั้นจึงแนะนำให้ใช้กระจกเคลือบฟิล์มบางซิลิคอนโมลิบดีนัม Si/Mo นั้นมีความสามารถในการคัดกรองรังสีให้สามารถสะท้อนเฉพาะรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตที่ความยาวคลื่น 13.5นาโนเมตร เท่านั้นจึงเป็นการเจาะจงช่วงพลังงานของรังสีที่ 13.5นาโนเมตร ให้สะท้อนมายังหัววัดรังสีที่สร้างขึ้นทำให้หัววัดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตมีความสามารถในการตอบสนองเฉพาะรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตที่ 13.5นาโนเมตร ได้ดีที่สุด

การทดสอบประสิทธิภาพของหัววัดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตที่สร้างจากโลหะเงินเทียบกับหัววัดรังสีชนิดโฟโตไดโอด SXUV HS5 Si/Zr สามารถเห็นถึงข้อแตกต่างระหว่างช่วงพลังงานที่หัววัดรังสีทั้งสองนี้มีความสามารถตอบสนองได้ครอบคลุมช่วงความยาวคลื่น 13.5นาโนเมตร ได้แต่หัววัดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตที่สร้างขึ้นโดยใช้โลหะเงินนี้มีช่วงการทำงานสามารถตอบสนองช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ ยูวี ไปจนถึง อียูวี ซึ่งก็จะมีช่วงการทำงานที่กว้างมากกว่าหัววัดรังสีชนิดโฟโตไดโอด SXUV HS5 Si/Zr ที่สามารถวัดเจาะจงเฉาะที่ความยาวคลื่น 13.5นาโนเมตร ได้ดี ซึ่งในหัววัดรังสีชนิดโฟโตไดโอด SXUV HS5 Si/Zr นั้นสามารถตอบสนองช่วงความยาวคลื่นครอบคลุม 13.5นาโนเมตร เหมือนกันแต่เนื่องด้วยคุณสมบัติของกระจกเคลือบฟิล์มบางซิลิคอนดมลิบดีนัมนั้นสามารถทำให้หัววัดรังสีชนิดนี้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นมากกว่าหัววัดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตที่ใช้โลหะเงินที่สร้างขึ้น ซึ่งมีขีดความสามารถวัดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตโดยใช้โลหะเงินนี้ก็สามารถที่จะตอบสนองรังสีย่านอียูวี(EUV) ที่13.5นาโนเมตร ได้เช่นเดียวกับหัววัดรังสีทั่วไปที่พัฒนามานั้น ซึ่งก็เป็นการชี้ให้เห็นถึงการพัฒนาหัววัดรังสีชนิดนี้สามารถที่จะพัฒนาให้ดีมากขึ้น

ในการทำวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพของโลหะทั้ง 4 ชนิดนั้นจำเป็นจะต้องเลือกโลหะที่มีความเหมาะสมและมีความบริสุทธิ์เพราะถ้าอุปกรณ์ต่างๆ ไม่สะอาดก็จะส่งผลต่อการวัดไม่มากก็น้อยอาจทำให้การทดลองไม่ได้ค่าที่แท้จริงจึงต้องมีความละเอียดในเรื่องนี้เป็นอย่างมากซึ่งในการทดลองนั้นจะต้องอยู่ในระบบสุญญากาศเท่านั้นซึ่งถ้าจะมีการพัฒนาหัววัดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตนี้ควรที่จะศึกษาแหล่งกำเนิดแสงที่จะใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพซึ่งคาดว่าในอนาคตแหล่งกำเนิดแสงนี้อาจจะมีเพิ่มขึ้นซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อผู้ทำวิจัยในอนาคตตัวอย่างเช่น สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติซึ่งคาดว่าหัววัดรังสีที่สร้างนั้นมีช่วงการทำงานที่สามารถวัดรังสีและสะท้อนรังสีได้ที่ความยาวคลื่นที่ประมาณ 13.5นาโนเมตรได้เทียบเท่าหัววัดรังสีชนิดอื่นที่เคยมีการพัฒนาขึ้นมาแล้ว ในวิทยานิพนธ์นี้หวังว่าหัววัดรังสีดังกล่าวสามารถนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ทางด้านงานวิจัยทางรังสีและด้านการวัดให้หลากหลายยิ่งขึ้น

รายการอ้างอิง

[1] B. M. LaFontaine et al.,The use of EUV lithography to produce demonstration devices. in Proc. SPIE,Emerging Lithographic Technologies XII,(2008).

[2] สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ.ความรู้ด้านมาตรวิทยาทางด้านการวัด (2009).

[3] มาตรวิทยา [ออนไลน์]. 2010.แหล่งที่มา: http://www.mst.or.th. [2011,February 23]

[4] ดร.อิศเรศ โกสีย์วัฒนา. การหาค่าความไม่แน่นอนของการวัด, วิจัยเภสัชเคมีภัณฑ์ Uncertainty of Measurement Course for Testing Laboratories. โดย Thai Industrial Standards Institute and United Kingdom Accreditation Service [UKAS].[ออนไลน์]. 2001. แหล่งที่มา: http://www.gpo.or.th, [2011, September 22]

[5] Quantum Physics.[Online]. 1997. Available from: http://www.rsu.ac.th. [2011, September 10]

[6] John W.Jewett,Jr.California. Modern Physics. State Polytechnic University Pomona,Raymond A.Serway.Emeritus,James Modison University.Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics, Seventh Edition.

[7] รองศาสตราจารย์ ดร.อนันตสิน เตชะกำพุช. ฟิสิกส์ 2 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, (2547).

[8] International Radiation Detector,[IRD]. SXUV HS5 Si/Zr, Detector.,(2009).

[9] Join the Alibaba.com Research Panel, Si/mo mirror, laser equipment components, optical mirror, mo mirror, laser mirror, mo reflector mirror. Alibaba.com Hong Kong Limited and licensors. All rights reserved. (1999-2010).

[10] Siam Photon. Synchrotron Light Research Institute ,(Public Organization), [Online].2552. Available from:http//www.slri.or.th. [2552,February 21]

[11] P. Songsiriritthigul, B. Kjornrattanawanich, A. Tong-on and H. Nakajima, Nucl. Instr. and Methods in Phys. Res. A 582,100 Proceedings of the14th National Conference on Synchrotron Radiation Research. [SLRI],(2007).

[12] Raymond A.Serway, James Madison ,John W.Jewett;Jr. Principles of physics A calculus-Based Text 3, University, California State polytechnic University-Pomon.

[13] SXUV HS5 Si/Zr Detector , Chiow San Wong.,Faculty of Science,University of Malaya,Kuala Lumpur,Malaysia,(2010).

[14] H. Rabus, V. Persch, G. Ulm, Synchrotron-Radiation Operated Cryogenic Electrical-Substitution Radiometer as High-Accuracy Primary Detector Standard in the Ultraviolet, Vacuum Ultraviolet and Soft X-ray Spectral Ranges, Opt. 36 (1997):5421-5440.

[15] การคำนวณหาค่าความไม่แน่นอนของการวัด[ออนไลน์].2552. แหล่งที่มา:http//www.tpa.or.th/xlsiam/. [2555,February 26]

ภาคผนวก

ภาคผนวก

ภาพที่ 1 โลหะเงินบริสุทธิ์

ภาพที่ 2 โลหะอะลูมิเนียมบริสุทธิ์

ภาพที่ 3 โลหะทองแดงบริสุทธิ์

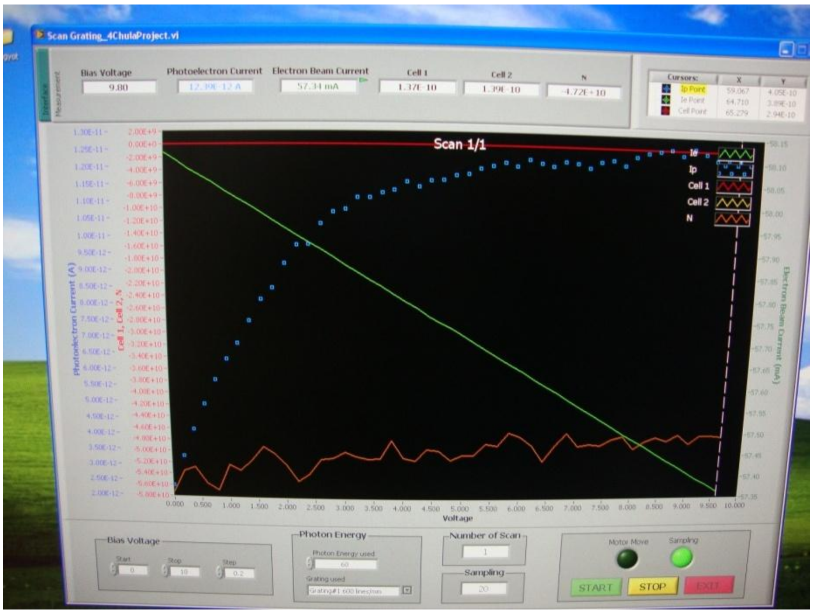
ภาพที่ 4 โลหะเหล็กบริสุทธิ์

ภาพที่ 5 พิคโคแอมป์มิเตอร์ (Picco-ammeter) ใช้ในการตรวจจับกระแสที่ใช้ในการทดลอง

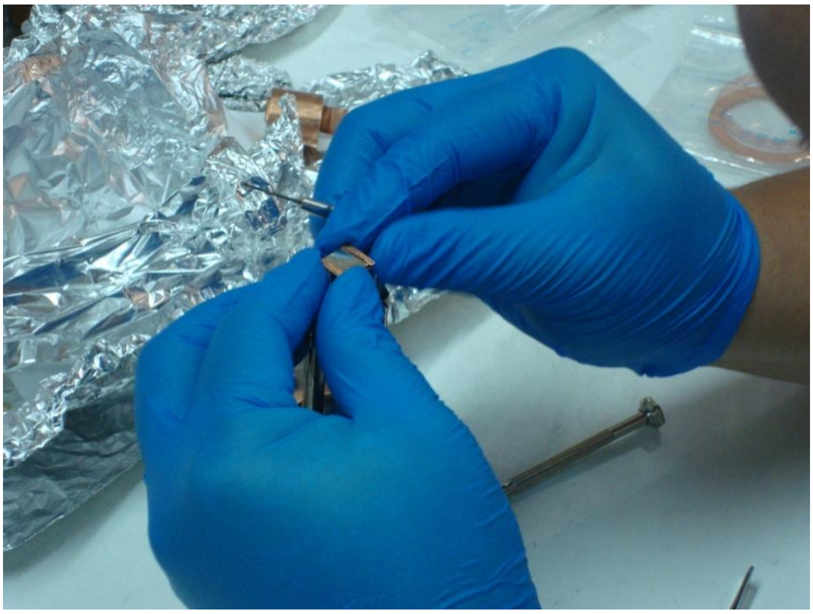
ภาพที่ 6 แหล่งจ่ายไฟฟ้า (Power supply) ใช้ในการเป็นแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง

ภาพที่ 7 แหล่งจ่ายไฟฟ้า (Power supply) ใช้ในการเป็นแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง

ภาพที่ 8 ระบบแสดงความดันบรรยากาศภายในระบบของการทดลอง

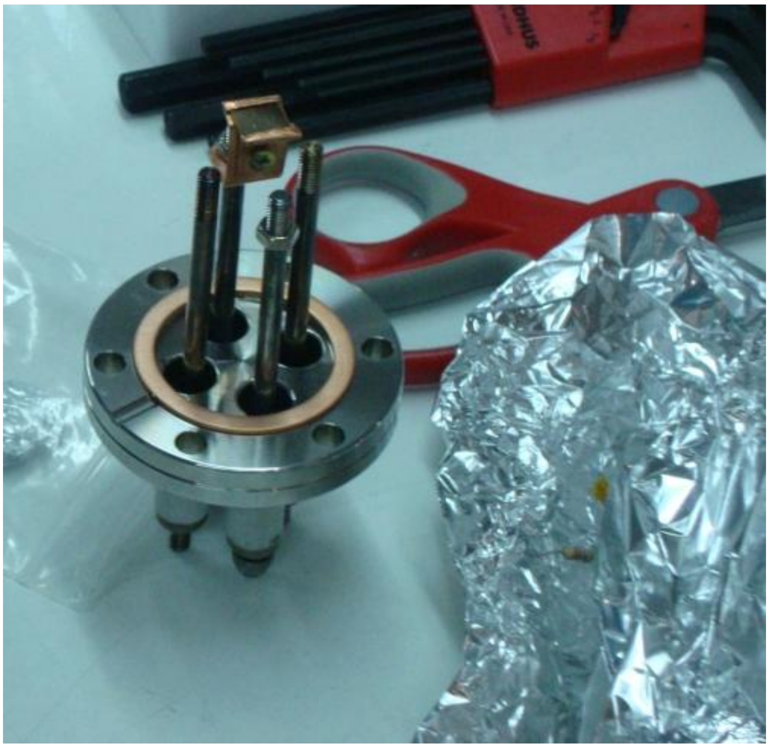


ภาพที่ 9 โปรแกรมในกำหนดค่าพลังงานของแสงที่ต้องใช้ในการทดลอง

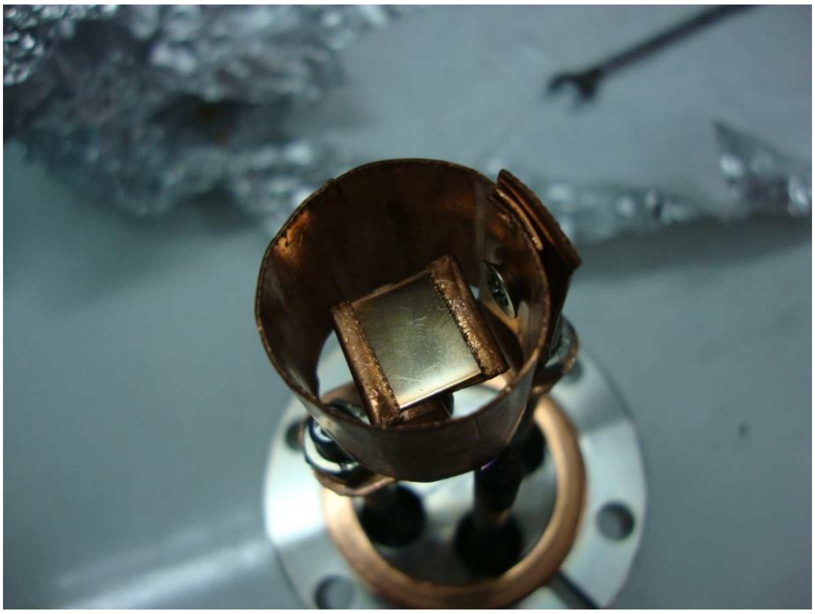


ภาพที่ 10 การสร้างหัววัดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตที่ใช้ในการทดลอง

ภาพที่ 11 การขัดผิวหน้าโลหะที่จะนำมาสร้างหัววัดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลต



ภาพที่ 12 การเตรียมหัววัดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตที่ต้องใช้ในการทดลอง



ภาพที่ 13 หัววัดรังสีเอกซ์ทรีมอัลตราไวโอเลตที่ต้องใช้ในการทดลอง

ตารางผลการทดสอบประสิทธิภาพของโลหะเงินและโลหะอะลูมิเนียมที่ช่วงพลังงานที่ 13.5 นาโนเมตรจากศูนย์วิจัยแสงซินโครตรอนแห่งชาติ

แรงดันไฟฟ้า(V)	ทดลองโลหะเงินที่ 13.5 nm			ทดสอบอะลูมิเนียม 13.5 nm.		
	กระแสอิเล็กตรอน (A)	จำนวนโฟตอน (n)	กระแสของอิเล็กตรอนที่วัดได้(A)	กระแสอิเล็กตรอน (A)	จำนวนโฟตอน (n)	กระแสของอิเล็กตรอนที่วัดได้ (A)
0	-4.80E-12	1.91E+09	-1.53E-02	2.73E-12	2.17E+09	0.007614576
1	-5.44E-12	1.91E+09	-1.73E-02	3.77E-13	1.83E+09	0.001053244
2	-5.72E-12	2.54E+09	-1.83E-02	-5.65E-13	1.87E+09	-0.001575954
3	-5.99E-12	1.84E+09	-1.91E-02	-1.15E-12	2.77E+09	-0.003215949
4	-6.27E-12	2.59E+09	-2.00E-02	-1.57E-12	2.27E+09	-0.004369679
5	-6.42E-12	1.97E+09	-2.05E-02	-1.89E-12	2.22E+09	-0.005278915
6	-6.67E-12	2.05E+09	-2.13E-02	-2.15E-12	2.35E+09	-0.006001356
7	-6.83E-12	2.71E+09	-2.18E-02	-2.35E-12	2.47E+09	-0.006569428
8	-6.97E-12	2.06E+09	-2.22E-02	-2.53E-12	2.18E+09	-0.007055017
9	-7.07E-12	1.83E+09	-2.25E-02	-2.66E-12	1.99E+09	-0.007434835

10	-7.11E-12	1.81E+09	-2.27E-02	-2.77E-12	2.26E+09	-0.007724975
11	-7.16E-12	1.92E+09	-2.28E-02	-2.86E-12	1.65E+09	-0.007976998
12	-7.13E-12	2.15E+09	-2.27E-02	-2.90E-12	3.21E+09	-0.008102687
13	-7.12E-12	2.49E+09	-2.27E-02	-2.94E-12	2.90E+09	-0.00821067
14	-7.07E-12	1.70E+09	-2.25E-02	-3.00E-12	3.24E+09	-0.008364294
15	-7.10E-12	2.04E+09	-2.26E-02	-3.03E-12	1.91E+09	-0.008458672
16	-7.15E-12	2.71E+09	-2.28E-02	-3.08E-12	2.16E+09	-0.00860389
17	-7.19E-12	1.87E+09	-2.29E-02	-3.13E-12	2.09E+09	-0.008744824
18	-7.27E-12	1.67E+09	-2.32E-02	-3.19E-12	1.93E+09	-0.008894531
19	-7.31E-12	2.06E+09	-2.33E-02	-3.27E-12	1.87E+09	-0.009136518
20	-7.40E-12	1.55E+09	-2.36E-02	-3.36E-12	3.69E+09	-0.009375259
21	-7.51E-12	2.14E+09	-2.40E-02	-3.40E-12	3.13E+09	-0.009493714
22	-7.64E-12	2.03E+09	-2.44E-02	-3.47E-12	1.81E+09	-0.009673474
23	-7.77E-12	1.73E+09	-2.48E-02	-3.50E-12	2.12E+09	-0.009776004
24	-7.82E-12	1.65E+09	-2.49E-02	-3.54E-12	1.61E+09	-0.009881476
25	-7.89E-12	1.97E+09	-2.52E-02	-3.61E-12	2.70E+09	-0.010082698
26	-7.98E-12	1.82E+09	-2.54E-02	-3.66E-12	2.23E+09	-0.010203002
27	-8.04E-12	2.00E+09	-2.56E-02	-3.72E-12	2.23E+09	-0.010373069
28	-8.08E-12	1.67E+09	-2.58E-02	-3.73E-12	2.56E+09	-0.010416443
29	-8.10E-12	1.74E+09	-2.58E-02	-3.72E-12	2.22E+09	-0.010374009
30	-8.10E-12	2.08E+09	-2.58E-02	-3.78E-12	1.68E+09	-0.010532991
31	-8.16E-12	2.92E+09	-2.60E-02	-3.81E-12	1.69E+09	-0.010626844
32	-8.17E-12	1.68E+09	-2.61E-02	-3.84E-12	2.10E+09	-0.010715619
33	-8.20E-12	2.43E+09	-2.61E-02	-3.88E-12	3.70E+09	-0.010824992
34	-8.22E-12	2.10E+09	-2.62E-02	-3.89E-12	2.16E+09	-0.01085748
35	-8.17E-12	1.86E+09	-2.61E-02	-3.90E-12	1.99E+09	-0.010889417

ตารางการทดสอบโลหะเหล็ก และโลหะทองแดงที่ช่างพลังงานแสงที่ 13.5 นาโนเมตรจากศูนย์วิจัยแสงซินโครตรอนแห่งชาติ

แรงดันไฟฟ้า (V)	ทดลองโลหะเหล็กที่ 13.5 นาโนเมตร			ทดสอบโลหะทองแดง 13.5 นาโนเมต		
	กระแสอิเล็กตรอน (A)	จำนวนโฟตอน (n)	กระแสของอิเล็กตรอนที่วัดได้(A)	กระแสอิเล็กตรอน(A)	จำนวนโฟตอน (n)	กระแสของอิเล็กตรอนที่วัดได้ (A)
0	-2.60E-12	2.65E+09	-0.006132866	-3.86E-12	2.48E+09	-0.008406043
1	-3.30E-12	2.24E+09	-0.007787309	-4.79E-12	2.51E+09	-0.010433517
2	-3.52E-12	2.16E+09	-0.008303776	-5.15E-12	2.52E+09	-0.011219395
3	-3.69E-12	2.19E+09	-0.008695104	-5.37E-12	2.56E+09	-0.011689747
4	-3.83E-12	2.15E+09	-0.009043052	-5.61E-12	2.09E+09	-0.012215259
5	-3.95E-12	2.82E+09	-0.009310028	-5.82E-12	3.29E+09	-0.0126823
6	-4.07E-12	2.69E+09	-0.009603	-6.02E-12	3.00E+09	-0.013101453
7	-4.17E-12	3.41E+09	-0.009825198	-6.12E-12	5.14E+09	-0.013316718
7.2	-4.19E-12	2.36E+09	-0.009885177	-6.15E-12	2.49E+09	-0.013390422
8	-4.27E-12	2.42E+09	-0.010062988	-6.26E-12	4.02E+09	-0.013623534
9	-4.33E-12	2.77E+09	-0.010217396	-6.34E-12	2.95E+09	-0.013801252
10	-4.34E-12	2.09E+09	-0.010245481	-6.33E-12	3.28E+09	-0.013784401
11	-4.33E-12	2.30E+09	-0.010203585	-6.29E-12	2.75E+09	-0.013691986
12	-4.31E-12	2.75E+09	-0.0101707	-6.25E-12	2.81E+09	-0.013612365
13	-4.30E-12	2.34E+09	-0.01013146	-6.23E-12	2.44E+09	-0.01355949
14	-4.25E-12	3.38E+09	-0.010014002	-6.20E-12	2.97E+09	-0.013491102
15	-4.23E-12	2.26E+09	-0.009986087	-6.21E-12	2.05E+09	-0.013530636
16	-4.20E-12	2.71E+09	-0.009913809	-6.30E-12	2.66E+09	-0.013727831
17	-4.25E-12	2.60E+09	-0.010015314	-6.29E-12	3.83E+09	-0.013708399
18	-4.31E-12	2.30E+09	-0.010160783	-6.37E-12	2.42E+09	-0.013863948
19	-4.36E-12	2.88E+09	-0.010271408	-6.45E-12	2.52E+09	-0.014036932
20	-4.38E-12	2.36E+09	-0.010339769	-6.52E-12	2.02E+09	-0.014196879
21	-4.45E-12	2.67E+09	-0.010499682	-6.63E-12	2.67E+09	-0.014430566

22	-4.48E-12	2.32E+09	-0.010555274	-6.66E-12	3.05E+09	-0.014508291
23	-4.51E-12	2.48E+09	-0.010645906	-6.74E-12	3.98E+09	-0.014674985
24	-4.52E-12	2.43E+09	-0.010663939	-6.81E-12	3.49E+09	-0.014828852
25	-4.55E-12	2.69E+09	-0.010720392	-6.86E-12	2.32E+09	-0.014946716
26	-4.57E-12	2.48E+09	-0.010766955	-6.93E-12	2.56E+09	-0.015099684
27	-4.58E-12	2.59E+09	-0.010813493	-6.95E-12	2.09E+09	-0.015128136
28	-4.62E-12	2.38E+09	-0.01088904	-6.99E-12	2.35E+09	-0.015217097
29	-4.64E-12	3.29E+09	-0.010937875	-7.02E-12	3.93E+09	-0.015296374
30	-4.63E-12	2.32E+09	-0.010924113	-7.07E-12	2.79E+09	-0.015397226
31	-4.65E-12	3.37E+09	-0.010961196	-7.09E-12	2.27E+09	-0.015444954
32	-4.65E-12	2.65E+09	-0.010965625	-7.16E-12	2.92E+09	-0.01558855
33	-4.68E-12	2.05E+09	-0.011036705	-7.17E-12	3.56E+09	-0.015607413
34	-4.70E-12	2.12E+09	-0.01109067	-7.20E-12	2.35E+09	-0.015686544
35	-4.69E-12	2.75E+09	-0.011049653	-7.18E-12	3.08E+09	-0.015639207

ความไม่แน่นอนของการวัด

ขั้นที่ 1.กำหนดค่าที่จะวัด (specify measured) ระบุให้ชัดเจนว่าต้องการวัดสิ่งใด

ขั้นที่ 2.แหล่งของการเกิดความไม่แน่นอน(identify uncertainty sources) ทำการหาแหล่งที่มาหรือขั้นตอนที่ทำให้เกิดค่าความไม่แน่นอน(uncertainty) ขึ้นมาให้ละเอียดครบถ้วนทุกอย่าง เช่น เครื่องมือที่ใช้วัด วิธีการหาตัวอย่าง นักวิเคราะห์ หรือสิ่งแวดล้อมที่อาจส่งผลกระทบต่อการวัดหรือการวิเคราะห์นั้นได้ในขั้นนี้ต้องพยายามเรียบเรียงปัจจัยต่างๆ ให้ได้มากที่สุดในการหา uncertainty source นั้นจะต้องอาศัยความรู้ที่จะประเมินหา parameter ต่างๆ ให้เป็นไปอย่างเหมาะสม

ขั้นที่ 3.ปัจจัยของค่าความไม่แน่นอน (quantify uncertainty compounds) ให้ประมาณค่าของค่าความไม่แน่นอนของแต่ละปัจจัยที่เรียงลำดับไว้ในขั้นตอน 2 ซึ่งในขั้นตอนนี้จะได้ว่าปัจจัยบางปัจจัยมีผลกระทบต่อการวัดค่อนข้างสูงได้ค่าที่ออกมาเป็นตัวเลขก็จะมีค่าสูง ส่วนบางปัจจัยที่อาจส่งผลกระทบน้อยมากดังนั้นจึงทำการตัดปัจจัยที่มีผลกระทบน้อยออกจากการคำนวณได้วิธีการประมาณค่าออกมาได้มีด้วยวิธีการดังต่อไปนี้

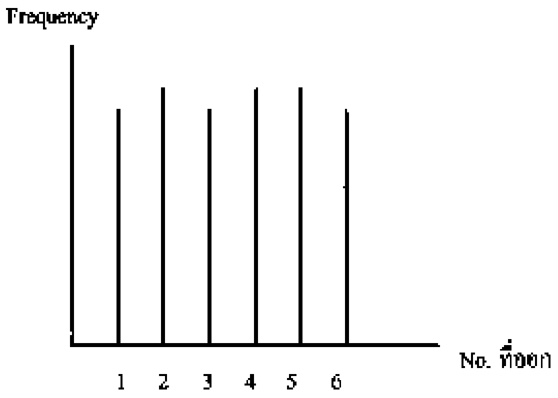
1. แหล่งข้อมูลของค่าความไม่แน่นอนนั้นจัดเป็น Type A หรือ Type B ซึ่ง

-Type A: เกิดจากการคำนวณค่าจากการทดลองซ้ำๆ (repeated observation) หรืออาจเรียกอีกอย่างว่าเป็นการทำทวนสอบหรือการทำซ้ำๆ (repeatability)

-Type B: เป็นการประเมินโดยวิธีอื่นๆ ที่ไม่ใช่การทำซ้ำ เช่น การใช้ข้อมูลจากการสอบเทียบครั้งก่อนการนำค่าความละเอียดของเครื่องมือมาใช้และปัจจัยทางธรรมชาติ (environment) ที่เกี่ยวข้องในการทดลอง

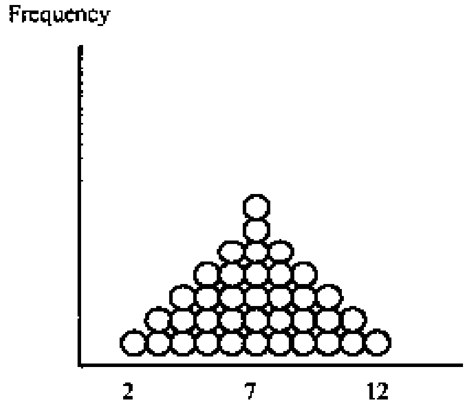
2. การกระจายตัวของค่าที่วัดจัดเป็น distribution เป็นแบบใดซึ่งในการกระจายตัวที่เป็นไปได้มีดังต่อไปนี้

-การกระจายแบบสี่เหลี่ยม (rectangular distribution) ตัวอย่างได้แก่การโยนลูกเต๋า 1 ลูก โอกาสที่จะออกหน้าแต่ละหน้ามีเท่าๆ กัน และเมื่อมีการโยนหลายๆ ครั้งแล้วนำมาเขียนกราฟจะได้ดังภาพที่13



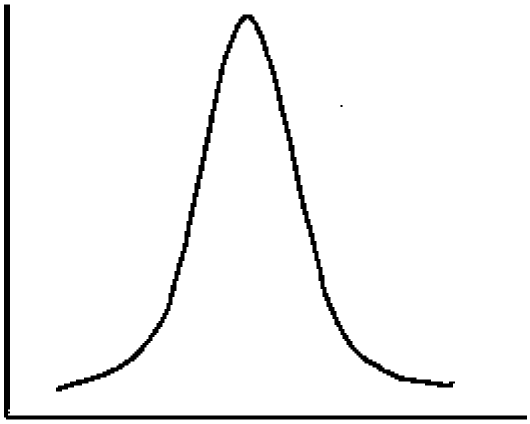
ภาพที่13 การกระจายตัวของค่าที่วัด [15]

-การกระจายแบบสามเหลี่ยม (Triangular distribution) ตัวอย่างได้แก่ การโยนลูกเต๋า 2 ลูก ซึ่งโอกาสที่แต้มที่จะเป็นไปได้จะอยู่ระหว่าง 2 ถึง 12



ภาพที่14 การกระจายคล้ายสามเหลี่ยม [15]

-การกระจายแบบปกติ(normal distribution) หรือการกระจายแบบเกาส์(gaussian distribution) เป็นการกระจายตัวแบบปกติจะวัดในข้อมูลที่มีขนาดใหญ่โดยที่ค่าส่วนใหญ่จะกระจายอยู่ในช่วงค่าเฉลี่ยค่อนข้างมาก ดังนั้นลักษณะเป็นรูประฆังคว่ำดังภาพที่ 15



ภาพที่15 การกระจายลักษณะคล้ายระฆังคว่ำ [15]

ในการประมาณการค่าความไม่แน่นอน (estimate uncertainty)ว่ามีวิธีการ ดังนี้

1.ถ้าแหล่งของความไม่แน่นอนนั้นได้มาจากใบรับรองการสอบเทียบหรือได้มาจากการทำซ้ำๆ ของการทดลองจะถือว่าการกระจายตัวนั้นเป็นแบบปกติ

2. สำหรับ Type B ถ้าไม่ระบุว่าเป็นการกระจายแบบใดให้ถือว่าเป็นแบบการกระจายแบบสี่เหลี่ยม (rectangular distribution)

ขั้นที่ 4.คำนวณค่าความไม่แน่นอนรวม (calculate combined uncertainty)

- Type A การที่รายงานค่าที่ได้จากการทำซ้ำจะรายงานเป็นค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation of mean) หรือ $S(q)$

$$S(\bar{q}) = \frac{s(q_j)}{\sqrt{n}} \tag{1}$$

โดยที่

$$S(q_j) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(q_j - \bar{q})^2}{n-1}} \tag{2}$$

$S(q)$ = standard deviation of mean

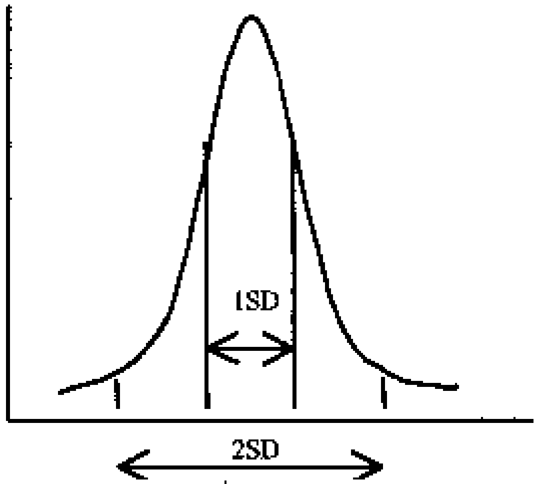
$S(q_j)$ = standard deviation of population estimated from sample

n = จำนวนครั้งที่ทำการทดลอง

q = ข้อมูลแต่ละชุด j = 1,2…n

q = ค่าเฉลี่ยของข้อมูล

-Type B นำค่าจากใบรับรองการสอบเทียบ (calibration certificate) มาใช้หรืออาจประมาณจากข้อมูล หรือประสบการณ์จากเครื่องมือ หรือการวิเคราะห์ เช่น ประมาณค่าความละเอียดของเครื่องชั่ง ทำการแปลงค่าที่ประมาณของ แต่ละปัจจัยให้อยู่ในช่วง $1SD$ (one standard deviation) ซึ่งโดยปกติ $1SD$ พื้นที่ใต้กราฟจะอยู่ในช่วง 68 %, $\pm$ $2SD$ พื้นที่ใต้กราฟจะอยู่ในช่วง 95 %



ภาพที่16 การหาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) [15]

ในการแปลงค่าให้นำค่าปัจจัยที่เกี่ยวข้องไปหารค่าที่ทำการประมาณค่าของแต่ละปัจจัย ค่าที่ได้ใช้สัญลักษณ์ $U(x_i)$โดยยึดหลักปัจจัยที่เกี่ยวข้องกรณีที่แหล่งข้อมูลเป็นการแจกแจงแบบปกติ Type A เท่ากับ 1 จากสอบเทียบเท่ากับ 2 กรณีที่แหล่งข้อมูลเป็นการแจกแจงแบบสี่เหลี่ยมเท่ากับ 3 กรณีที่แหล่งข้อมูลเป็นการแจกแจงแบบสามเหลี่ยมเท่ากับ 6 ทำการรวมค่าความไม่แน่นอนของแต่ละปัจจัยให้เป็นค่าเดียวโดยใช้สมการ ดังนี้

$$U_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} C_i^2 U^2(x_1)} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} U_i^2(y)} \quad (3)$$

ให้

$U_c(y)$= combined uncertainty

C_i = sensitivity coefficient ซึ่งมักได้มาจากการทดลอง แต่โดยทั่วไปใช้ค่า = 1

$U(_i)$= ค่า individual uncertainty จาก ขั้นที่ 2

$U_i(y)$= individual uncertainty ที่คูณกับ sensitivity coefficient ซึ่ง = $C_i U(x_i)$ ในที่นี้ C_i = 1

การขยายขอบเขตค่าความไม่แน่นอนของการวัดที่ทำการรวมเป็นค่าเดียวให้อยู่ในช่วงที่กว้างขึ้นคือให้มีระดับความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซนต์ (%) นั่นคือต้องคูณด้วย8ค่า coverage factor (k) ด้วย "2" ซึ่งค่า k = 2 จะใช้ในกรณีที่เป็นทดสอบห้องปฏิบัติการโดยทั่วๆ ไปในกรณีที่ต้องการระดับความเชื่อมั่นที่ 99.9 % จะใช้ค่า k = 3 expanded uncertainty $= k\, U_c(y)$ (แหล่งที่มา:http//www.tpa.or.th/xlsiam/) [15]

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชื่อ-สกุล	นางสาวกัลยา ธนาสินธ์
วัน เดือน ปี และสถานที่เกิด	30 กันยายน พ.ศ.2528 จังหวัดอุบลราชธานี
วุฒิการศึกษา	
ระดับมัธยมศึกษา	โรงเรียนนารีนุกูล พ.ศ.2547
ระดับปริญญาตรี	วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ มาหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา พ.ศ. 2551
ปัจจุบัน	ศึกษาระดับปริญญามหาบัญฑิต สาขามาตรวิทยา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย