

การปลูกและตรวจสอบสมบัติเฉพาะของฟิล์มบางวานาเดียม(IV)ออกไซด์ที่เตรียม
ด้วยเทคนิคระเหยสารด้วยลำเลเซอร์แบบพัลส์สำหรับการประยุกต์
ใช้งานเป็นอุปกรณ์สวิตช์ความร้อน

GROWTH AND CHARACTERIZATIONS OF VANADIUM (IV) OXIDE THIN
FILMS VIA PULSED LASER DEPOSITION FOR
THERMAL SWITCHING DEVICE APPLICATION



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี

วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2562

KMITL-2019-NT-M-001-006

การปลูกและตรวจสอบสมบัติเฉพาะของฟิล์มบางวานาเดียม(IV)ออกไซด์ที่เตรียม
ด้วยเทคนิคระเหยสารด้วยลำเลเซอร์แบบพัลส์สำหรับการประยุกต์
ใช้งานเป็นอุปกรณ์สวิตช์ความร้อน

GROWTH AND CHARACTERIZATIONS OF VANADIUM (IV) OXIDE THIN
FILMS VIA PULSED LASER DEPOSITION FOR
THERMAL SWITCHING DEVICE APPLICATION



สุกฤตยะ เจษฎาลักษณ์
SUKITTYA JESSADALUK

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2562

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
KMITL-2019-NT-M-001-006
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

GROWTH AND CHARACTERIZATIONS OF VANADIUM (IV) OXIDE THIN
FILMS VIA PULSED LASER DEPOSITION FOR
THERMAL SWITCHING DEVICE APPLICATION



SUKITTYA JESSADALUK

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE IN NANOSCIENCE AND NANOTECHNOLOGY
COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ 2019 เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือเผยแพร่ข้อมูลใดๆของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
KMITL-2019-NT-M-001-006



COPYRIGHT 2019

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การปลูกและตรวจสอบสมบัติเฉพาะของฟิล์มบาง
วานาเดียม(IV)ออกไซด์ที่เตรียมด้วยเทคนิคระเหยสารด้วย
ลำเลเซอร์แบบหึ่งสำหรับการประยุกต์ใช้งานเป็นอุปกรณ์
สวิตซ์ความร้อน

ชื่อนักศึกษา

นายสุกฤตยะ เจษฎาลักษณ์

รหัสประจำตัว

59607002

ปริญญา

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต

สาขาวิชา

นาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี

พ.ศ.

2561

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ศาสตราจารย์ ดร.จิตติ หนูแก้ว

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ดร.สากร ระหงษ์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ดร.อรรรณพ คล้าชื่น

บทคัดย่อ

เทอร์มอลสวิตซ์เป็นอุปกรณ์ที่ได้รับการใช้งานอย่างแพร่หลาย โดยทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมการไหลของกระแสไฟฟ้าเมื่ออุณหภูมิที่ตรวจวัดเกินอุณหภูมิวิกฤต ทว่าไปนั้นอุปกรณ์เทอร์มอลสวิตซ์มักใช้การขยายตัวเชิงความร้อนของวัสดุเป็นกลไกในการควบคุมซึ่งมีข้อเสียคือมีการตอบสนองที่ช้า ใช้เวลานานในการคืนตัว และไม่สามารถลดขนาดให้มีขนาดเล็กได้ ปัจจุบันจึงได้มีงานวิจัยใหม่ ๆ เสนออุปกรณ์เทอร์มอลสวิตซ์แบบโซลิดสเตตโดยการประยุกต์ใช้ปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงโลหะ - ฉนวนของวัสดุวานาเดียมไดออกไซด์เพื่อใช้แก้ปัญหาดังกล่าว

อย่างไรก็ตามการเตรียมฟิล์มบางวานาเดียมไดออกไซด์ที่แสดงปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงโลหะ - ฉนวน นั้นมีความยากและท้าทายในการเตรียมเนื่องจากวานาเดียมมีเลขออกซิเดชันหลายค่าและวานาเดียมไดออกไซด์มีหลากหลายอัญรูปมีเพียงแค่เฟสโมนอคลินิกเท่านั้นที่สามารถแสดงปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงโลหะ - ฉนวนได้ ในการเตรียมฟิล์มบางวานาเดียมไดออกไซด์สามารถเตรียมได้หลากหลายเทคนิค แต่หนึ่งในเทคนิคที่น่าสนใจที่สุดคือเทคนิคระเหยสารด้วยลำเลเซอร์แบบหึ่งเนื่องจากสามารถทำงานได้ในช่วงความดันที่กว้างส่งผลให้สามารถควบคุมอัตราส่วนระหว่างวานาเดียมและออกซิเจนของฟิล์มที่เกิดขึ้นได้ง่าย มากไปกว่านี้ฟิล์มบางวานาเดียมไดออกไซด์ที่เตรียมบนวัสดุอื่นที่ความไม่เข้ากันของโครงสร้างผลึกจะทำให้ปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงโลหะ - ฉนวนมีแอมพลิจูดที่ต่ำส่งผลให้เทอร์มอลสวิตซ์มีประสิทธิภาพต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือใช้เพื่อการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม หากมีข้อผิดพลาดประการใด ขออภัยและขอให้งานวิจัยของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาพารามิเตอร์ภายในระบบของระเหยสารด้วยลำเลเซอร์แบบหัวง สองพารามิเตอร์ที่น่าสนใจในการศึกษาเพื่อเตรียมฟิล์มวานาเดียมไดออกไซด์คืออุณหภูมิของฐานรองรับและความดันของออกซิเจนขณะเคลือบเนื่องจากส่งผลกระทบต่อปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นบนวัสดุฐานรองรับภายในระบบระเหยสารด้วยลำเลเซอร์แบบหัวง จากผลการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิฐานรองรับ 500 องศาเซลเซียส และความดันของออกซิเจน 10^{-3} มิลลิบาร์ ฟิล์มบางที่ได้เป็นสารวานาเดียมไดออกไซด์ เฟสโมโนคลินิก ที่แสดงปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงโลหะ - ฉนวน ซึ่งมีการลดลงของความต้านทานประมาณ 1,000 เท่า ที่อุณหภูมิวิกฤต 57 องศาเซลเซียสโดยอิทธิพลของอุณหภูมิของฐานรองรับจะส่งผลต่อพลังงานในการก่อตัวของผลึก รวมถึงอัตราส่วนของวานาเดียมและออกซิเจน เฟสของฟิล์มบางจะเกิดการเปลี่ยนแปลงจากวานาเดียมเพนทออกไซด์เป็นเฟสผสมที่มีสถานะออกซิเดชันต่ำกว่ามากไปกว่านี้ อิทธิพลของความดันของออกซิเจนขณะเคลือบนั้นส่งผลโดยตรงต่ออัตราส่วนของวานาเดียมและออกซิเจน ทำให้พบเฟสบริสุทธิ์ของวานาเดียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างโมโนคลินิก กลไกการเปลี่ยนแปลงโลหะ - ฉนวนของวานาเดียมไดออกไซด์นั้นเกิดจากการเปลี่ยนแปลงระนาบผลึกของวานาเดียมไดออกไซด์จากโมโนคลินิกเฟสเป็นรูไทล์เฟส เป็นผลให้ระดับชั้นพลังงานระหว่างดี - ออบิทัลของวานาเดียมอะตอมเกิดการซ้อนทับกับพันธะไพของออกซิเจนอะตอม หลังจากทำการหาเงื่อนไขที่สามารถแสดงปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงโลหะ - ฉนวนได้แล้วจึงนำฟิล์มบางที่ได้ประยุกต์ใช้งานเป็นอุปกรณ์เทอร์มอลสวิตช์ซึ่งอาศัยการชดเชยพลังงานผ่านทางปรากฏการณ์จูลฮีทติ้ง โดยการให้สนามไฟฟ้าเพื่อควบคุมอุณหภูมิวิกฤตพบว่าเมื่อให้สนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเกิน 90 กิโลโวลต์ต่อเมตร ที่อุณหภูมิการวัด 50 องศาเซลเซียส กระแสไฟฟ้าจะเพิ่มอย่างทันทีทันใด จากการใช้ปรากฏการณ์จูลฮีทติ้งสามารถลดอุณหภูมิวิกฤตจาก 60 องศาเซลเซียสเป็น 48 องศาเซลเซียสได้

คำสำคัญ : เทอร์มอลสวิตช์แบบโซลิดสเตต การเปลี่ยนแปลงโลหะ-ฉนวน วานาเดียมไดออกไซด์ ระบบระเหยสารด้วยลำเลเซอร์แบบหัวง ปรากฏการณ์จูลฮีทติ้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Growth and Characterizations of Vanadium (IV) oxide Thin films via Pulsed Laser Deposition for Thermal Switching Device Application
Student Name	Mr. Sukittaya Jessadaluk
Student ID	59607002
Degree	Master of Science
Program	Nanoscience and Nanotechnology
Year	2018
Thesis Advisor	Professor Dr. Jiti Nukeaw
Thesis Co-advisor	Dr. Sakon Rahong
Thesis Co-advisor	Dr. Annop Klamchuen

Abstract

The thesis relates to the development of a solid-state thermal switching device. The contents are separated into two sections. In the first section, the Metal-Insulator transition phenomenon (MIT) was demonstrated the potential to apply as a solid-state thermal switching device. Among MIT materials, Vanadium dioxide (VO_2) material was selected for use as a thermal switch due to the change of electrical conductivity as high as 4-5 orders of magnitude at a transition temperature of $T_c = 68^\circ\text{C}$. However, a pure phase of VO_2 thin film is still challenging to obtain because of their variety of oxidation states and polymorphism of VO_2 . Hence, the control of formation energy and the ratio between vanadium and oxygen is an important parameter to consider. Pulsed laser deposition (PLD) is a candidate technique to control the formation energy and ratio between vanadium and oxygen parameters by using substrate temperature (T_s) and oxygen pressure (P_{O_2}), respectively. According to the results, at the substrate temperature $T_s = 500^\circ\text{C}$, we could obtain B-phase VO_2 thin film. After reducing P_{O_2} to 10^{-3} mbar, the XRD result display M-phase VO_2 that show the magnitude of MIT of

เอกสารนี้เป็น almost three orders at the transition temperature of $T_c = 57^\circ\text{C}$. นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม For the second section, T_c of a solid-state thermal switching device was regulated by an external electric field that utilized the compensation energy through Joule

heating effect. We could observe the abrupt reversible change of the electrical resistivity approximately three orders of magnitude at the $T_c = 60\text{ }^\circ\text{C}$ of VO_2 thin film on SiO_2/Si substrate. The external electric field induced MIT was successfully controlled T_c of the thermal switch between $60\text{-}48\text{ }^\circ\text{C}$ as a linear relationship. Own strategy can control T_c of thermal switch by an external electric field

Keywords: Solid-state thermal switching, Vanadium dioxide, Metal-Insulator transition, Pulsed laser deposition, Joule heating effect



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดีจากคุณบารมีและความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ศาสตราจารย์ ดร.จิติ หนูแก้ว และอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร.สากุล ระหงษ์ และดร.อรรณพ คล้าชื่นซึ่ง ได้ให้ความรู้ในด้านต่าง ๆ คำแนะนำ ความช่วยเหลือ รวมถึงช่วยแก้ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษาที่ทำให้ลูกศิษย์เป็นคนที่เข้มแข็งมากขึ้น ขอขอบคุณสำหรับโอกาสต่าง ๆ ที่ให้ตลอดมา

ขอขอบคุณสมาชิกในแลป Quantum and Optocal semiconductor Research Laboratory (QOS Lab) ที่ช่วยเหลือกันตลอดมาโดยเฉพาะอย่างยิ่ง ดร. นวพันธ์ ขยันกิจ ที่สอนทั้งศาสตร์และศิลป์ในการใช้ชีวิตและการทำงาน

ขอบคุณเพื่อน ๆ พี่ ๆ และน้อง ๆ ทั้งในวิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง และภายนอกที่ให้การสนับสนุนกันเรื่อย

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณครอบครัวที่เข้าใจและยอมรับการตัดสินใจเสมอมา คุณประโยชน์ของ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขออุทิศแด่ครูบาอาจารย์และผู้มีพระคุณทุกท่าน

นายสุกฤตยะ เจษฎาลักษณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	III
กิตติกรรมประกาศ.....	V
สารบัญ.....	VI
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	5
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	6
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
บทที่ 2.....	7
2.1 อุปกรณ์เทอร์โมลสวิตช์.....	7
2.2 ปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงโลหะ-ฉนวน.....	8
2.3 วานาเดียมออกไซด์.....	8
2.4 วานาเดียมไดออกไซด์ (VO ₂).....	10
2.5 ระบบระเหยสารด้วยลำเลเซอร์แบบห้วง.....	14
2.6 การเตรียมฟิล์มบาง VO ₂ ด้วยระบบระเหยสารด้วยลำเลเซอร์แบบห้วง.....	17
บทที่ 3.....	20
3.1 แผนงานการดำเนินงานงานวิจัย.....	20
3.2 ระบบระเหยสารด้วยลำเลเซอร์แบบห้วง.....	21
3.2 การปลูกฟิล์มบางวานาเดียมออกไซด์ด้วยระบบระเหยสารด้วยลำเลเซอร์แบบห้วง.....	26
3.3 การตรวจสอบสมบัติของฟิล์มบาง.....	29
3.4 การประยุกต์ใช้งานฟิล์มบางวานาเดียมไดออกไซด์เป็นอุปกรณ์เทอร์โมลสวิตช์.....	31
และการควบคุมอุณหภูมิวิกฤตของเทอร์โมลสวิตช์ด้วยสนามไฟฟ้า	
บทที่ 4.....	34
4.1 ผลกระทบของอุณหภูมิวัสดุฐานรองรับแตกต่างกันต่อ.....	35
การปลูกฟิล์มบางวานาเดียมออกไซด์การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า	
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งนี้.....	
4.2 ผลกระทบของความดันของก๊าซออกซิเจนขณะปลูกที่.....	41
แตกต่างกันต่อการปลูกฟิล์มบางวานาเดียมออกไซด์	

4.3 การตรวจสอบปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงโลหะ – ฉนวน.....	48
ของฟิล์มบางวานาเดียมออกไซด์	
4.4 การประยุกต์ใช้งานฟิล์มบางวานาเดียมออกไซด์เป็นเทอร์โมลสวิตช์.....	52
4.5 การควบคุมอุณหภูมิวิกฤตของเทอร์โมลสวิตช์.....	54
ด้วยสนามไฟฟ้าภายนอกของอุปกรณ์เทอร์โมลสวิตช์	
บทที่ 5.....	58
บรรณานุกรม.....	59



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 แสดงวิธีการต่าง ๆ ในการลดอุณหภูมิวิกฤตของ VO_2	5
ตารางที่ 2.1 แสดงเฟสชนิดต่าง ๆ ของวานาเดียมออกไซด์ สถานะออกซิเดชัน.....	9
และอุณหภูมิวิกฤติของปรากฏการณ์เปลี่ยนแปลงโลหะ-ฉนวน	
ตารางที่ 3.1 ข้อมูลจำเพาะของเลเซอร์แบบหัว.....	23
ตารางที่ 3.2 แสดงเงื่อนไขในการปลูกฟิล์มบางวานาเดียมออกไซด์ที่.....	28
อุณหภูมิวัสดุฐานรองรับแตกต่างกัน	
ตารางที่ 3.3 แสดงเงื่อนไขในการปลูกฟิล์มบางวานาเดียมออกไซด์ที่.....	28
ความดันขณะปลูกของก๊าซออกซิเจนแตกต่างกัน	
ตารางที่ 3.4 เงื่อนไขในการตรวจสอบปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงโลหะ-ฉนวน.....	31
ตารางที่ 3.5 เงื่อนไขในการตรวจสอบปรากฏการณ์.....	32
การเปลี่ยนแปลงโลหะ-ฉนวนของอุปกรณ์	
ตารางที่ 4.1 แสดงระนาบผลึกของ V_2O_5 กับพลังงานพื้นผิว.....	36
ตารางที่ 4.2 แสดงอัตราส่วนระหว่างวานาเดียมกับออกซิเจนของวานาเดียมออกไซด์.....	36
เฟสต่าง ๆ พลังงานในการก่อตัว และฐานข้อมูลของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ใช้เปรียบเทียบ	
ตารางที่ 4.2 แสดงตำแหน่งของพลังงานยึดเหนี่ยวของระดับชั้นพลังงาน.....	47
$V2p_{3/2}$ และ $O1s$ ที่ความดันขณะเคลือบแตกต่างกัน และผลต่างของพลังงานยึดเหนี่ยว	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1.1 กลไกการทำงานของเทอร์มอลสวิตช์โดยใช้การขยายตัวของแผ่นโลหะสองชนิด.....	1
รูปที่ 1.2 แสดงการเปลี่ยนแปลงความต้านทานระหว่างกาเกิด.....	2
ปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงโลหะ-ฉนวนเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิของวัสดุจนเกินอุณหภูมิวิกฤต	
รูปที่ 1.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของออกไซด์ของโลหะ.....	2
กับอุณหภูมิจุดเปลี่ยน T_c	
รูปที่ 1.4 แสดงโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกันของ.....	3
VO_2 เฟส B เฟสโมโนคลินิก(M) และรูไทล์(R)	
รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างของเทอร์มอลสวิตช์ชนิดก้ำข.....	7
รูปที่ 2.2 แสดงแผนภูมิของเฟสของวานาเดียมที่ขึ้นกับสัดส่วนของออกซิเจนจาก 1 ถึง 2.5.....	8
รูปที่ 2.3 (ก)โครงสร้างของรูไทล์ VO_2 และ(ข)โมโนคลินิก VO_2	10
รูปที่ 2.4 (ก)แผนภาพแสดงโครงสร้างแถบพลังงานของ VO_2 ที่สถานะโลหะ.....	11
และ(ข) สถานะฉนวน	
รูปที่ 2.5 แสดงการบิดของแลตทิซที่เป็นระเบียบของผลึกใน 1 มิติ.....	12
รูปที่ 2.6 กลไกการเกิดช่องว่างแถบพลังงานในโมเดลของ Mott.....	14
รูปที่ 2.7 โครงสร้างของระบบประเหยสารด้วยลำเลเซอร์แบบห้วง.....	14
รูปที่ 2.8 ลักษณะของพลาสมาพลูมเมื่อเป่าสารเคลือบถูกยิงด้วยเลเซอร์.....	15
รูปที่ 2.9 แสดงลักษณะปรากฏการณ์ที่สามารถเกิดขึ้นได้บนวัสดุฐานรองรับ.....	18
หลักจากที่เกิดพลาสมาพลูม	
รูปที่ 2.10 แสดงการจัดเรียงหัวเข็มที่ใช้วัดด้วยการวัดค่าความต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 จุด.....	19
ซึ่งเข็มจะเรียงเป็นแนวเส้นตรงและมีระยะห่างเท่ากัน	
รูปที่ 3.1 แสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยในส่วนแรกการพัฒนา.....	20
อุปกรณ์เทอร์มอลสวิตช์เชิงวัสดุ	
รูปที่ 3.2 แสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยการพัฒนาอุปกรณ์เทอร์มอลสวิตช์เชิงการวัด.....	21
รูปที่ 3.3 ส่วนประกอบต่าง ๆ ของระบบประเหยสารด้วยลำเลเซอร์แบบห้วง.....	21
รูปที่ 3.4 (ก)แสดงรูปถ่ายภายในห้องเคลือบสุญญากาศซึ่ง.....	22
ประกอบไปด้วยส่วนประกอบหลักคือ (ข)ตัวยัดวัสดุฐานรองรับ และ(ค)ตัวยัดเป่าสารเคลือบ	
รูปที่ 3.5 (ก)แสดงแผนผังของระบบสุญญากาศตำแหน่งของปั้ม.....	23
และวาล์วต่าง ๆ รวมถึงห้องเคลือบสุญญากาศและ(ข)แสดงตำแหน่งปั้มทั้ง 3 ตัวของระบบสุญญากาศ	
รูปที่ 3.6 แสดงตัวเครื่องของระบบเลเซอร์แบบห้วงของ.....	24

บริษัท LightMachinery รุ่น IPEX-766	
รูปที่ 3.7 แสดงระบบกระจกและเลนส์ที่ใช้เพื่อปรับระยะจากช่อง(mask).....	25
ถึงเลนส์โดยประกอบไปด้วยกระจก 7 ชั้นและเลนส์ 1 ชั้น	
รูปที่ 3.8 แสดงหน้าต่างของโปรแกรมควบคุมระบบโดย.....	26
จะมีแถบให้เลือกในการป้อนค่าที่ต้องการอยู่บริเวณด้านบน	
รูปที่ 3.9 แผนภาพลำดับขั้นตอนการทำความสะอาดวัสดุฐานรองรับ.....	27
รูปที่ 3.10 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FE-SEM) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้.....	29
รูปที่ 3.11 (ก)แสดงรูปร่างภายนอกของเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์.....	30
และ(ข)ลักษณะภายในเครื่อง XRD	
รูปที่ 3.12 แสดงการวัดปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงโลหะ-ฉนวน.....	31
รูปที่ 3.13 (ก)แสดงลักษณะของลวดลายข้อไฟฟ้าและการออกแบบชิ้นงาน.....	32
(ข)แสดงระบบการวัดอุปกรณ์เทอร์มอลสวิตช์ที่ขึ้นกับความร้อน	
รูปที่ 3.14 แสดงลักษณะของข้อไฟฟ้าในการประยุกต์ใช้งานจริงของอุปกรณ์เทอร์มอลสวิตช์.....	33
รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะการวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์.....	35
ในโหมด $\theta-2\theta$ และโหมด 2θ ซึ่งจะเห็นได้ว่าโหมด จะให้ข้อมูลเฉพาะที่ตั้งฉากกับวัสดุฐานรองรับ	
เท่านั้น	
รูปที่ 4.2 (ก)รูปแบบการเลี้ยวรังสีเอกซ์ในโหมดสแกน $\theta-2\theta$	37
และ(ข)โหมดสแกน 2θ ของฟิล์มบางวานาเดียมออกไซด์ที่เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิวัสดุฐานรองรับ	
รูปที่ 4.3 รามานสเปกตรัมของฟิล์มบางที่เตรียมในอุณหภูมิห้องบนแผ่นควอตซ์.....	38
รูปที่ 4.4 แสดงรูปถ่ายลักษณะพื้นผิวของฟิล์มวานาเดียมออกไซด์จาก.....	39
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่อุณหภูมิวัสดุฐานรองรับแตกต่างกัน ณ.ความดันของ	
ออกซิเจน 5×10^{-2} มิลลิบาร์	
รูปที่ 4.5 (ก)รูปแบบการเลี้ยวรังสีเอกซ์ในโหมดสแกน $\theta-2\theta$	42
และ(ข)ในโหมดสแกน 2θ ของฟิล์มบางวานาเดียมออกไซด์ที่เปลี่ยนแปลงความดันของออกซิเจนที่	
อุณหภูมิฐานรองรับ 500 องศาเซลเซียส	
รูปที่ 4.6 แสดงรูปถ่ายลักษณะพื้นผิวของฟิล์มวานาเดียมออกไซด์.....	43
จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่ความดันของออกซิเจน แตกต่างกัน ณ. อุณหภูมิวัสดุ	
ฐานรองรับ 500 องศาเซลเซียส	
รูปที่ 4.7 แสดงรามานสเปกตรัมของฟิล์มบางวานาเดียมออกไซด์ที่เตรียม.....	44
ด้วยความดันออกซิเจนที่แตกต่างกัน	
รูปที่ 4.8 แสดงสเปกตรัม XPS ของพลังงานยึดเหนี่ยวที่ระดับชั้น.....	46
พลังงาน $V2p_{3/2}$ ของวานาเดียมอะตอม และระดับชั้นพลังงาน $O1s$ ของออกซิเจนอะตอม ที่ความดัน	
ของออกซิเจนแตกต่างกัน	

รูปที่ 4.9	แผนผังความสัมพันธ์ระหว่างเฟสของฟิล์มวานาเดียมออกไซด์ที่ขึ้นกับอุณหภูมิของวัสดุฐานรองรับและความดันของออกซิเจนขณะเคลือบ	48
รูปที่ 4.10	(ก)กราฟแสดงสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานกับอุณหภูมิที่ให้ ขณะตรวจสอบของฟิล์มวานาเดียมออกไซด์เฟสต่างๆ และ(ข)อนุพันธ์ลำดับที่ 1 ของความต้านทานเทียบอุณหภูมิเพื่อคำนวณหาอุณหภูมิวิกฤต การเปลี่ยนแปลงของความต้านทานและความกว้างของฮิสเตอรีซิส	49
รูปที่ 4.11	(ก)แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง $VO_2(M)$ ที่อุณหภูมิของการวัดต่าง ๆ และ(ข)ตำแหน่งพีคการเลี้ยวเบนที่คำนวณจากการ fitting แบบ gauss	51
รูปที่ 4.12	(ก)กราฟแสดงสัมพันธ์ระหว่างสภาพความต้านทานกับอุณหภูมิที่ให้ขณะตรวจสอบ และ (ข)อนุพันธ์ลำดับที่ 1 ของสภาพความต้านทานเทียบกับอุณหภูมิที่ให้	53
รูปที่ 4.13	กราฟแสดงสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้าของอุปกรณ์เทอร์มอลสวิตช์และอุณหภูมิที่ให้เทียบกับเวลา	54
รูปที่ 4.14	(ก)กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและ สนามไฟฟ้าที่ไบอัสให้แก่อุปกรณ์ที่อุณหภูมิแตกต่างกันและ(ข)อุณหภูมิวิกฤตของอุปกรณ์กับสนามไฟฟ้าภายนอก	55
รูปที่ 4.15	(ก)กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและ อุณหภูมิของอุปกรณ์ที่ความต่างศักย์ต่าง ๆ (ข)กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิวิกฤตของอุปกรณ์กับความต่างศักย์ที่จ่ายให้แก่อุปกรณ์	57

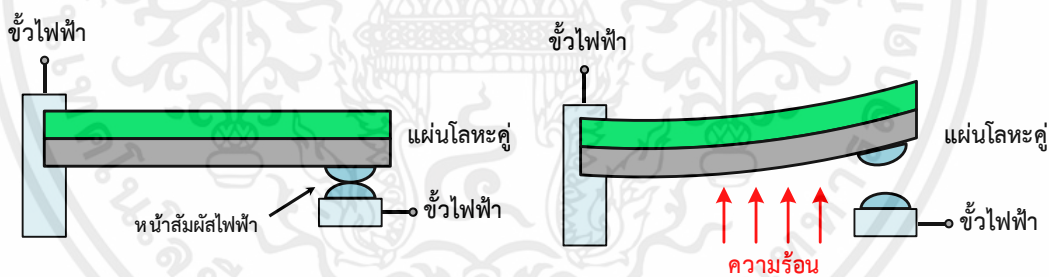
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

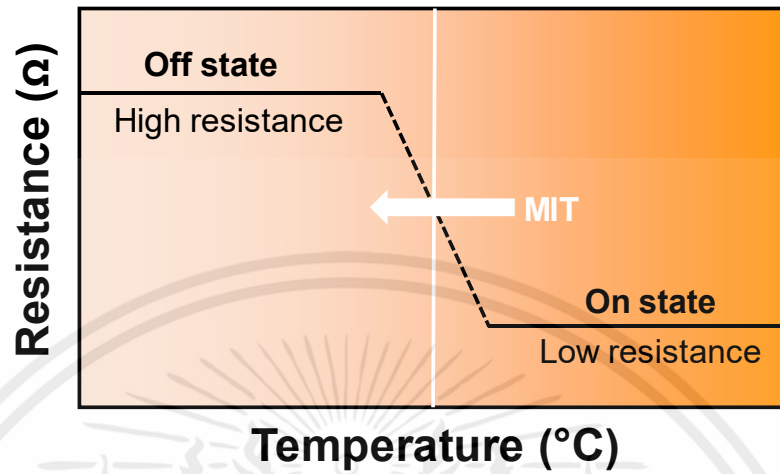
เทอร์โมลสวิตช์เป็นอุปกรณ์รับรู้เชิงความร้อน (Thermal sensor) ชนิดหนึ่งโดยทำหน้าที่ควบคุมการไหลของกระแสไฟฟ้าเมื่ออุณหภูมิที่ตรวจวัดเกินอุณหภูมิวิกฤต (Critical temperature; T_c) เทอร์โมลสวิตช์ถูกใช้งานอย่างแพร่หลาย ไม่ว่าจะเป็น อุปกรณ์ป้องกันความร้อนเกิน อุปกรณ์ป้องกันวงจรไฟฟ้า เครื่องตรวจจับเปลวเพลิง อุปกรณ์ควบคุมระบบหล่อเย็น อุปกรณ์ตรวจวัดการไหลของอากาศ เป็นต้น โดยทั่วไปแล้วอุปกรณ์เทอร์โมลสวิตช์มักใช้การขยายตัวเชิงความร้อนของวัสดุเป็นกลไกในการตรวจวัดเช่นการขยายตัวของอะลูมิเนียมเมื่อก๊าซได้รับความร้อน หรือการขยายตัวของแผ่นโลหะสองชนิด (Bimetallic strip) ที่สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนไม่เท่ากันส่งผลให้หน้าสัมผัสไฟฟ้าแยกออกจากกันแสดงดังรูปที่ 1.1 เป็นต้น จากที่กล่าวมาข้างต้นนั้นเป็นเทอร์โมลสวิตช์แบบเชิงกลซึ่งอาศัยการขยับตัวของชิ้นส่วนภายใน อย่างไรก็ตามการขยายตัวเชิงความร้อนเช่นนี้ก็ยังมีข้อเสียคือความเร็วในการตอบสนองมีค่าต่ำ ต้องใช้เวลาในการคืนตัวสูง การขยายตัวของวัสดุนั้นไม่เป็นเชิงเส้น และไม่สามารถลดขนาดให้มีขนาดเล็กลงได้



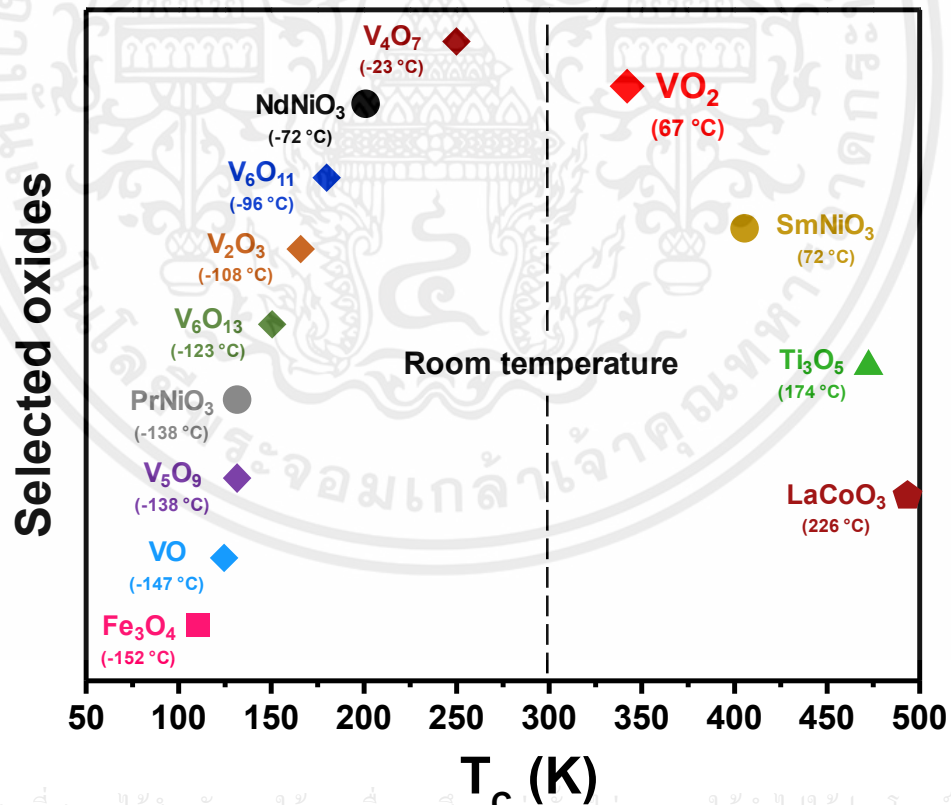
รูปที่ 1.1 กลไกการทำงานของเทอร์โมลสวิตช์โดยใช้การขยายตัวของแผ่นโลหะสองชนิด

แนวทางในการพัฒนาอุปกรณ์เทอร์โมลสวิตช์เพื่อแก้ปัญหาข้างต้นนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แนวทางคือ หนึ่งการพัฒนาเชิงวัสดุหรือการหาหลักการอื่นใดที่สามารถเปลี่ยนแปลงสมบัติทางไฟฟ้าเมื่อได้รับความร้อน ปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงโลหะ-ฉนวน (Metal-Insulator transition) เป็นหนึ่งในปรากฏการณ์ที่น่าสนใจในการประยุกต์ใช้งานเป็นอุปกรณ์เทอร์โมลสวิตช์เนื่องจากสามารถตอบสนองต่อความร้อนโดยเปลี่ยนแปลงความต้านทานของวัสดุจากฉนวนเป็นโลหะเมื่อถูกกระตุ้นจากความร้อนจนเกินอุณหภูมิวิกฤต [1] ดังแสดงในรูปที่ 1.2 ค่าความต้านทานมีค่าสูงในช่วงอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤตหรือสถานะปิด หลังจากที่จะเพิ่มความร้อนจนเกินค่าอุณหภูมิวิกฤตค่าความ

ต้านทานจะมีค่าลดลงหรือสถานะเปิด จากแนวคิดนี้ทำให้ปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงโลหะ-ฉนวนสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นเทอร์โมลสวิตช์ได้



รูปที่ 1.2 แสดงการเปลี่ยนแปลงความต้านทานระหว่างการเกิดปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงโลหะ-ฉนวนเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิของวัสดุจนเกินอุณหภูมิวิกฤต



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

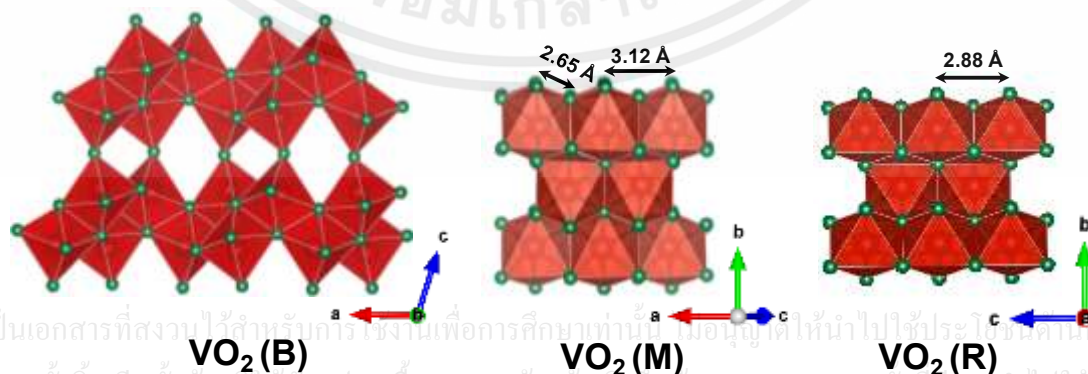
รูปที่ 1.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของออกไซด์ของโลหะกับอุณหภูมิจุดเปลี่ยน T_c

วัสดุที่สามารถแสดงปรากฏการณ์เปลี่ยนแปลงโลหะ-ฉนวน ได้นั้นมีหลากหลายชนิดไม่ว่าจะเป็นไทเทเนียมเซสควิออกไซด์ (Ti_2O_3) ไนโอเบียมนิเกิลไตรออกไซด์ ($NdNiO_3$) เพอร์ซีโอดีเมียมเกิลไตรออกไซด์ ($PrNiO_3$) ทานัมโคบอลต์ไตรออกไซด์ ($LaCoO_3$) แมกนีไทต์ (Fe_3O_4) และวานาเดียมออกไซด์ (Vanadium oxide) เป็นต้น [2] ดังแสดงในรูปที่ 1.3 จากวัสดุที่กล่าวมาข้างต้นวัสดุตระกูลวานาเดียมออกไซด์เป็นวัสดุที่น่าสนใจศึกษามากที่สุดเนื่องจากมีอุณหภูมิวิกฤตหลากหลายค่าขึ้นอยู่กับเฟสที่ได้ เมื่อพิจารณาอุณหภูมิวิกฤตของวัสดุในตระกูลวานาเดียมออกไซด์ที่กล่าวมาข้างต้น วานาเดียมไดออกไซด์ (Vanadium dioxide; VO_2) เป็นวัสดุที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานเป็นเทอร์มอลสวิตช์ เนื่องจากมีข้อดีคือ 1. อุณหภูมิวิกฤตใกล้เคียงกับอุณหภูมิห้อง ($68\text{ }^\circ\text{C}$)

2. สามารถเกิดปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงโลหะ-ฉนวน แบบย้อนกลับได้ 3. ความแตกต่างของการเปลี่ยนแปลงสรีรภาพความต้านทานสูงถึง 1,000 หรือ 10,000 เท่า 4. ความกว้างของฮิสเตอร์เรซิสมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับวัสดุอื่น

5. สามารถนำไฟฟ้าเมื่ออยู่ในสถานะโลหะแต่ไม่นำความร้อนเหมือนกับโลหะออกไซด์ [2, 3] โดยปรากฏการณ์เปลี่ยนแปลงโลหะ-ฉนวนของ VO_2 ที่สามารถแสดงข้อดีได้ข้างต้นนั้นจะขึ้นอยู่กับสองพารามิเตอร์หลักคือความบริสุทธิ์ของเฟส VO_2 (Phase Purity) ที่เตรียมได้และความเป็นผลึก (Crystallinity) ของ VO_2 [4]

จากข้อดีของ VO_2 ที่กล่าวไปข้างต้น ทำให้ VO_2 เหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้งานเป็นเทอร์มอลสวิตช์ จากปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงโลหะ-ฉนวน อย่างไรก็ตาม VO_2 ที่มีความบริสุทธิ์สูงและมีความเป็นผลึกสูงไม่สามารถเตรียมได้ง่ายโดยเฉพาะในรูปของฟิล์มบางเนื่องจากสถานะออกซิเดชันของวานาเดียมมีหลากหลายค่า (Multiple oxidation states) ทำให้เกิดเฟสได้มากถึง 12 เฟส นอกจากนี้ VO_2 ยังมีหลากหลายอัญรูป (Polymorphisms) ส่งผลให้ยากยิ่งต่อการปลูกฟิล์ม VO_2 ที่มีความบริสุทธิ์และมีความเป็นระเบียบสูง รูปที่ 1.4 แสดงลักษณะโครงสร้างของ VO_2 ที่มีสถานะย่อยของโครงสร้างผลึกแตกต่างกันซึ่งส่งผลต่อการสมบัติของการนำไฟฟ้าที่แตกต่างกันด้วยโดยมีเพียง VO_2 เฟสโมโนคลินิก (Monoclinic) เท่านั้น ที่สามารถแสดงปรากฏการณ์เปลี่ยนแปลงโลหะ-ฉนวนได้



รูปที่ 1.4 แสดงโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกันของ VO_2 เฟส B เฟสโมโนคลินิก (M) และรูไทล์ (R) [5]

วิธีที่ใช้ในการเตรียม VO_2 นั้นมีหลากหลายวิธี หนึ่งในวิธีทางเคมีเช่นกระบวนการโซลเจล (Sol-Gel process) ไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal) การตกเคลือบด้วยไอเคมี (Chemical vapor deposition) [6-8] โดยวิธีทางเคมีมักจะได้เฟสของวานาเดียมออกไซด์ที่มีความเสถียรที่สุดทางเทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamically stable state) คือ วานาเดียมเพนทออกไซด์ (Vanadium pentoxide; V_2O_5) ซึ่งมีเลขออกซิเดชันเป็น 5+ หรือได้เฟสผสมของวานาเดียมออกไซด์กับ VO_2 ซึ่งต้องการกระบวนการอบอ่อน (Annealing process) ในบรรยากาศที่ถูกควบคุมเช่นในสุญญากาศที่ความดันประมาณ 10^{-3} มิลลิบาร์ บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน (Nitrogen ambient) หรือบรรยากาศก๊าซอาร์กอน (Argon ambient) เป็นต้น [9] เพื่อเปลี่ยนเฟสผสมที่ได้ให้เป็นโมนอกลิติกเฟสวานาเดียมไดออกไซด์ (Monoclinic-Vanadium dioxide; $\text{VO}_2(\text{M})$) สองวิธีที่ทางฟิสิกส์ เช่น ระบบระเหยสารด้วยความร้อน (Thermal evaporator) ระบบแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง (Magnetron Sputtering) และระบบระเหยสารด้วยลำเลเซอร์แบบพัลส์ (Pulsed laser deposition: PLD) [10-12] วิธีการระเหยสารด้วยความร้อน และระบบแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริงนั้นไม่สามารถควบคุมอัตราส่วนระหว่างอะตอมของวานาเดียม (Vanadium) และออกซิเจน (Oxygen) ได้อย่างง่าย ทำให้ได้เฟสผสมของวานาเดียมออกไซด์อื่น ๆ กับ VO_2 เช่นเดียวกับวิธีทางเคมี จากวิธีเตรียม VO_2 ข้างต้นระบบ PLD มีความน่าสนใจในการเตรียม VO_2 มากกว่าวิธีการอื่นเนื่องจากสามารถทำงานในช่วงความดันที่กว้างมากตั้งแต่ 1 มิลลิบาร์ถึง 10^{-6} มิลลิบาร์ และสามารถรักษาสัดส่วนทางเคมี (Stoichiometry) ที่ถูกระเหยขึ้นไปสู่วัสดุฐานรองรับได้เปิดโอกาสในการควบคุมพลังงานในการฟอร์มตัวของ VO_2 และสัดส่วนวานาเดียมและออกซิเจนภายในระบบขณะเคลือบได้อย่างแม่นยำเพื่อให้ได้ฟิล์ม $\text{VO}_2(\text{M})$ ซึ่งแสดงปรากฏการณ์เปลี่ยนแปลงโลหะ-ฉนวนที่เหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้งานเป็นอุปกรณ์เทอร์มอลสวิตช์

แนวทางที่สองคือการพัฒนาด้านเทคนิคการตรวจวัดเพื่อให้สามารถปรับเปลี่ยนอุณหภูมิวิกฤตของเทอร์มอลสวิตช์ได้เนื่องมาจากเทอร์มอลสวิตช์ถูกใช้งานอย่างแพร่หลายในหลากหลายวัตถุประสงค์ส่งผลให้อุณหภูมิวิกฤตที่ต้องการก็แตกต่างกันไป โดยการลดอุณหภูมิวิกฤตของ VO_2 สามารถทำได้สองวิธีการ หนึ่งในทำการดัดแปลงวัสดุเช่น การเจือสาร (Doping) ต่าง ๆ ลงไปในโครงสร้างผลึกของ VO_2 ส่งผลให้อุณหภูมิวิกฤตลดลงต่ำกว่าอุณหภูมิห้องได้ หรือการใช้ความเครียด (Strain) ระหว่างวัสดุฐานรองรับและชั้นฟิล์มก็สามารถทำให้อุณหภูมิวิกฤตของ VO_2 ลดลงได้เช่นเดียวกัน ดังแสดงในตารางที่ 1.1 [13] อย่างไรก็ตามการใช้วิธีการข้างต้นยังคงได้อุณหภูมิวิกฤตเพียงค่าเดียวต่อหนึ่งเงื่อนไขการเตรียมและไม่สามารถทำให้อุณหภูมิวิกฤตมีค่าต่อเนื่องได้ แนวทางที่สองคือการใช้พารามิเตอร์ภายนอกเช่น ความดัน คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และสนามไฟฟ้าเหนี่ยวนำปรากฏการณ์เปลี่ยนแปลงโลหะ-ฉนวน ทั้งความดันและสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถลดอุณหภูมิวิกฤตของ VO_2 ได้อย่างต่อเนื่อง แต่กระนั้นเองการใช้งานพารามิเตอร์ทั้งสองก็ต้องการอุปกรณ์ที่มีความซับซ้อนซึ่งส่งผลให้

การประยุกต์ใช้งานในภาคสนามถูกจำกัด ดังนั้นการใช้สนามไฟฟ้าภายนอกจึงเป็นแนวทางที่น่าสนใจที่สุดเพื่อลดอุณหภูมิวิกฤตของ VO_2 ในอุปกรณ์เทอร์มอลสวิตช์

ตารางที่ 1.1 แสดงวิธีการต่าง ๆ ในการลดอุณหภูมิวิกฤตของ VO_2 [12-15]

วิธีการ	T_c ต่ำสุด ($^{\circ}C$)	การเปลี่ยนแปลงค่า ความต้านทาน (Ω)	ความกว้างของของ ฮิสเตอร์เรซิส ($^{\circ}C$)
การเจือสาร	ต่ำกว่า 25	10^3 - 10^4	8
การใช้ความเครียด	ต่ำกว่า 25	10^4	3
ความดัน	~ 27	10^3	-
คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	40	10^2	5

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้ทำการพัฒนาอุปกรณ์เทอร์มอลสวิตช์แบบโซลิตสเททโดยการประยุกต์ใช้ปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงโลหะ - ฉนวนของวัสดุ VO_2 ซึ่งถูกเตรียมด้วยระบบ PLD จากการศึกษาอุณหภูมิวัสดุฐานรองรับที่ให้ขณะเคลือบ และความดันของออกซิเจนที่ใช้เคลือบ หลังจากทำการหาเงื่อนไขที่ในการเตรียม VO_2 ที่สามารถแสดงปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงโลหะ - ฉนวนได้แล้วจึงนำฟิล์มบางที่ได้ประยุกต์ใช้งานเป็นอุปกรณ์เทอร์มอลสวิตช์ และควบคุมอุณหภูมิวิกฤตของเทอร์มอลสวิตช์โดยการใช้สนามไฟฟ้าภายนอก

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาและเข้าใจกระบวนการเตรียมฟิล์มบางวานาเดียมออกไซด์ด้วยระบบระเหยสารด้วยลำเลเซอร์แบบห้วง
- 2) เพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิของวัสดุฐานรองรับและความดันของออกซิเจนขณะเคลือบภายในระบบระเหยสารด้วยลำเลเซอร์แบบห้วงในการปลูกฟิล์มบางวานาเดียมออกไซด์
- 3) สามารถเตรียมฟิล์มบางวานาเดียมไดออกไซด์ด้วยระบบระเหยสารด้วยลำเลเซอร์แบบห้วงได้
- 4) เพื่อทดลองนำฟิล์มบางที่ได้ไปประยุกต์ใช้งานเป็นอุปกรณ์สวิตช์ความร้อน
- 5) สามารถควบคุมอุณหภูมิวิกฤตอุปกรณ์สวิตช์ความร้อนได้

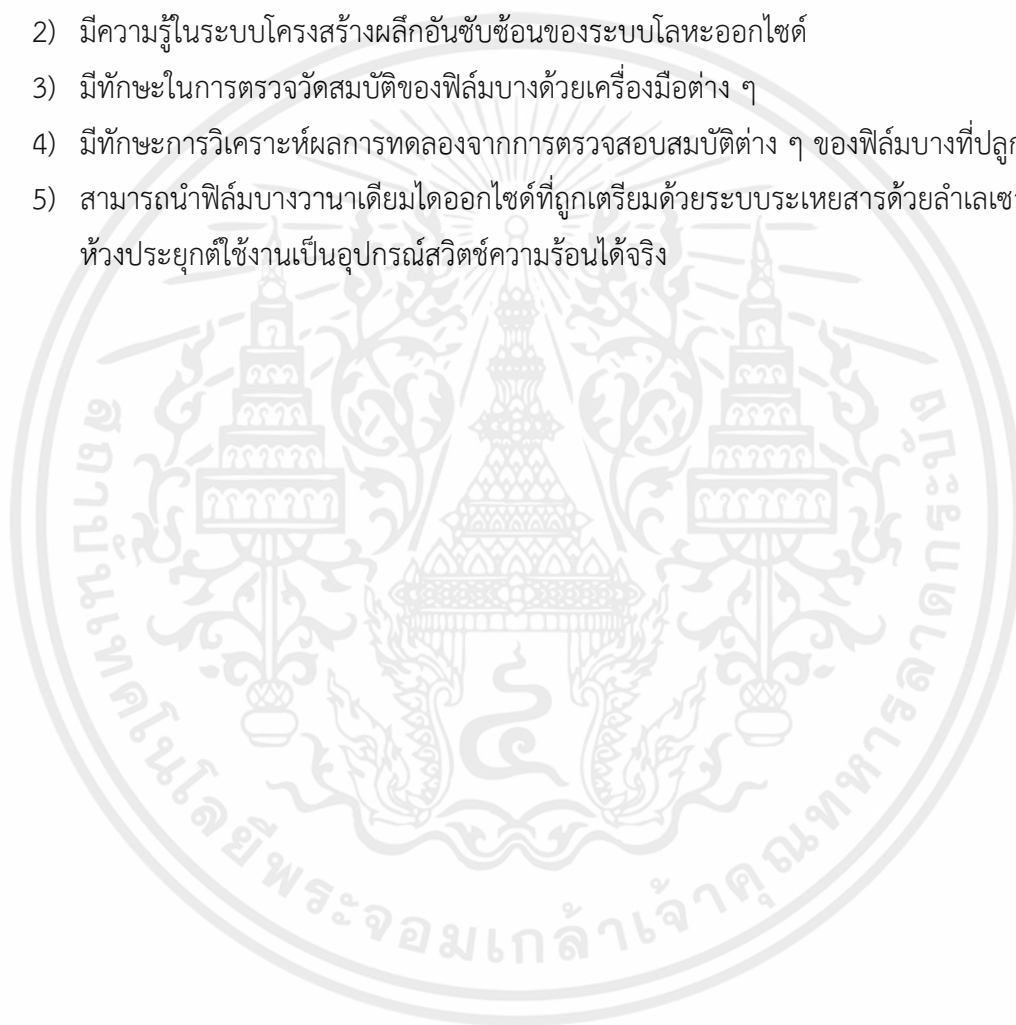
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้จะศึกษาการปลูกฟิล์มบางวานาเดียมออกไซด์ด้วยระบบระเหยสารด้วยลำเลเซอร์แบบห้วง ขั้นแรกจะทำการศึกษาเงื่อนไขในการปลูกฟิล์มบางวานาเดียมออกไซด์ด้วยอุณหภูมิของวัสดุฐานรองรับและความดันของออกซิเจนขณะเคลือบเพื่อให้ได้วานาเดียมไดออกไซด์ ที่มีปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงโลหะ-ฉนวนที่ดีที่สุดด้วยการศึกษาสมบัติความเป็นผลึก ลักษณะสัญญาณ พันธะทาง

เคมี และปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงโลหะ-ฉนวน เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขในการปลูกฟิล์มบางวานาเดียมออกไซด์ต่อการเกิด VO_2 จากนั้นจึงนำฟิล์มบางที่ได้ไปประยุกต์ใช้งานเป็นอุปกรณ์สวิตช์ความร้อนและควบคุมอุณหภูมิวิกฤตของอุปกรณ์สวิตช์ความร้อน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) มีความรู้ และสามารถปลูกฟิล์มบางวานาเดียมออกไซด์และสารชนิดอื่น ๆ ด้วยระบบระเหยสารด้วยลำเลเซอร์แบบห้วงได้อย่างชำนาญ
- 2) มีความรู้ในระบบโครงสร้างผลึกอันซับซ้อนของระบบโลหะออกไซด์
- 3) มีทักษะในการตรวจวัดสมบัติของฟิล์มบางด้วยเครื่องมือต่าง ๆ
- 4) มีทักษะการวิเคราะห์ผลการทดลองจากการตรวจสอบสมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มบางที่ปลูกได้
- 5) สามารถนำฟิล์มบางวานาเดียมไดออกไซด์ที่ปลูกเตรียมด้วยระบบระเหยสารด้วยลำเลเซอร์แบบห้วงประยุกต์ใช้งานเป็นอุปกรณ์สวิตช์ความร้อนได้จริง



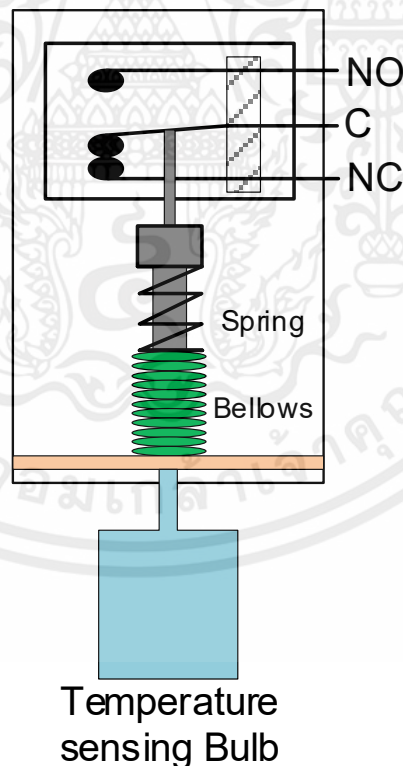
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 อุปกรณ์เทอร์มอลสวิตช์

เทอร์มอลสวิตช์ (Thermal switch) คืออุปกรณ์ที่ควบคุมการเปิด-ปิดการไหลของกระแสไฟฟ้า เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิเกินค่าอุณหภูมิวิกฤต (Critical temperature: T_c) เทอร์มอลสวิตช์ถูกใช้งานอย่างแพร่หลายในหลากหลายวัตถุประสงค์ไม่ว่าจะเป็น อุปกรณ์ป้องกันความร้อนเกิน อุปกรณ์ป้องกันวงจรไฟฟ้า เครื่องตรวจจับเปลวเพลิง อุปกรณ์ควบคุมระบบหล่อเย็น อุปกรณ์ตรวจวัดการไหลของอากาศ เป็นต้น กลไกในการทำงานของอุปกรณ์เทอร์มอลสวิตช์ในปัจจุบันที่ใช้อย่างแพร่หลายมักใช้การขยายตัวเชิงความร้อนของวัสดุเป็นกลไกในการตรวจวัดเช่นการขยายตัวของก๊าซเมื่อได้รับความร้อนและดันไดอะแฟรมหรือขดลวดกลวงแสดงดังรูปที่ 2.1 หรือการขยายตัวของแผ่นโลหะสองชนิด (Bimetallic strip) ที่สัมพันธ์กับการขยายตัวเชิงความร้อนไม่เท่ากันส่งผลให้หน้าสัมผัสไฟฟ้าแยกออกจากกัน



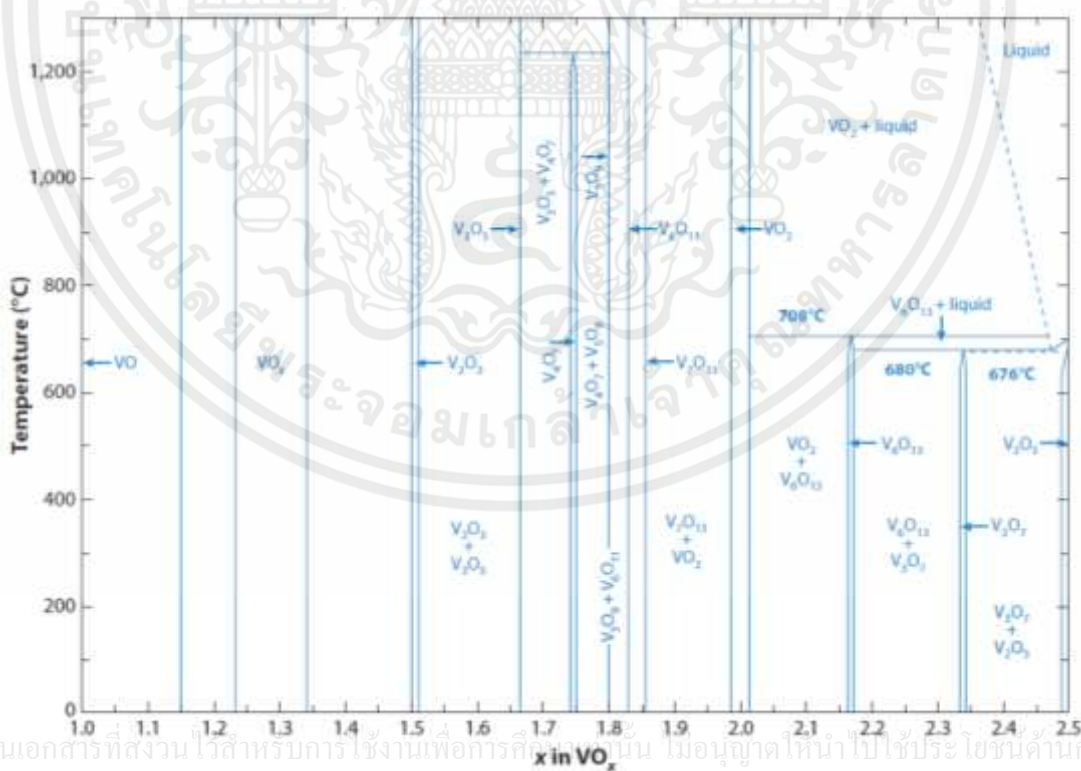
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างของเทอร์มอลสวิตช์ชนิดก๊าซไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงโลหะ-ฉนวน

ปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงโลหะ-ฉนวน (Metal-Insulator transition) เป็นปรากฏการณ์ที่ตอบสนองต่อความร้อนโดยเปลี่ยนแปลงความต้านทานของวัสดุจากฉนวนเป็นโลหะเมื่ออุณหภูมิเกิน T_c ปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงโลหะ-ฉนวนในวัสดุโลหะออกไซด์เป็นหนึ่งในหัวข้อที่น่าสนใจอย่างยาวนานในทางวิทยาศาสตร์สาขาวัสดุสารควบแน่น (Condensed matter materials sciences) เนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยภายในโครงสร้างของอะตอมหรือผลึกของวัสดุ นั้นส่งผลอย่างมหาศาลต่อสมบัติในเชิงมหภาคเช่นสมบัติทางไฟฟ้า สมบัติทางแสง สมบัติทางแม่เหล็ก เป็นต้น ปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงโลหะ-ฉนวนของถูกค้นพบในโลหะออกไซด์ (Transition metal oxides) หลากหลายชนิดดังแสดงในรูปที่ 1.3

2.3 วานาเดียมออกไซด์

วานาเดียมเป็นโลหะทรานซิชันที่มีจุดหลอมเหลว 1,910 องศาเซลเซียส เมื่อทำพันธะกับออกซิเจนสามารถเกิดสถานะออกซิเดชันได้ 4 สถานะคือ 2+ 3+ 4+ และ 5+ ส่งผลให้เกิดเฟสระหว่าง V และ O ได้หลากหลายเฟส โดยจุดหลอมเหลว สมบัติทางแสง ทางไฟฟ้า และทางแม่เหล็กของวานาเดียมออกไซด์ก็จะแตกต่างกันไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด รูปที่ 2.2 แสดงแผนภูมิของเฟสของวานาเดียมที่ขึ้นกับสัดส่วนของออกซิเจนจาก 1 ถึง 2.5 [2]

แผนภูมิของเฟส (Phase Diagram) ของวานาเดียมออกไซด์ดังแสดงในรูปที่ 2.2 จากแผนภูมิของเฟส จะเห็นได้ว่าสารประกอบวานาเดียมออกไซด์ที่มีเลขออกซิเดชันสูงจะมีจุดหลอมเหลวที่ต่ำเช่น V_2O_5 ที่มีจุดหลอมเหลวประมาณ 676 องศาเซลเซียส หรือ V_6O_{13} ที่มีจุดหลอมเหลวประมาณ 708 องศาเซลเซียส

นอกจากนี้สารประกอบของวานาเดียมออกไซด์ยังสามารถจำแนกได้จากสูตรทั่วไป ได้แก่ซีรีย์ของ Magnéli ซึ่งมีสูตรคือ V_nO_{2n-1} ($n>1$) และซีรีย์ Wadsley ซึ่งมีสูตรคือ V_nO_{2n+1} ($n>1$) โดยทั้งสองซีรีย์ จะเริ่มจาก $n=1$ เหมือนกัน สำหรับเฟสสุดท้ายของซีรีย์ Magnéli คือ V_2O_3 ($n=2$) และ VO_2 ($n=\infty$) และซีรีย์ของ Wadsley คือ V_2O_5 ($n=2$) และ VO_2 ($n=\infty$) อุณหภูมิวิกฤตของปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงโลหะ-ฉนวนของวานาเดียมออกไซด์เฟสต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 2.1 จะเห็นได้ว่า VO_2 นั้นมีสถานะออกซิเดชันอยู่กึ่งกลางระหว่างซีรีย์ของ Magnéli และ Wadsley

ตารางที่ 2.1 แสดงเฟสชนิดต่าง ๆ ของวานาเดียมออกไซด์ สถานะออกซิเดชัน และอุณหภูมิวิกฤตของปรากฏการณ์เปลี่ยนแปลงโลหะ-ฉนวน[16]

วัสดุ	สถานะออกซิเดชัน ของวานาเดียม	อุณหภูมิวิกฤต ($^{\circ}C$)	ซีรีย์
VO	2+	โลหะ	Magnéli
V_2O_3	3+	-105.15	Magnéli
V_3O_5	3+ และ 4+	156.85	Magnéli
V_4O_7	3+ และ 4+	-23.15	Magnéli
V_5O_9	3+ และ 4+	-138.15	Magnéli
V_6O_{11}	3+ และ 4+	-103.15	Magnéli
V_7O_{13}	3+ และ 4+	โลหะ	Magnéli
V_8O_{15}	3+ และ 4+	-203.15	Magnéli
VO_2	4+	66.85	Magnéli Wadsley
V_6O_{13}	4+ และ 5+	-128.15	Wadsley
V_3O_7	4+ และ 5+	ฉนวน	Wadsley
V_2O_5	5+	ฉนวน	Wadsley

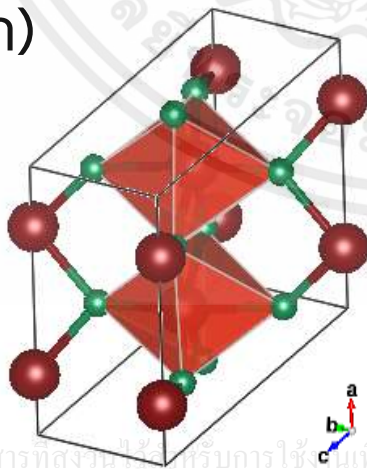
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 วานาเดียมไดออกไซด์ (VO₂)

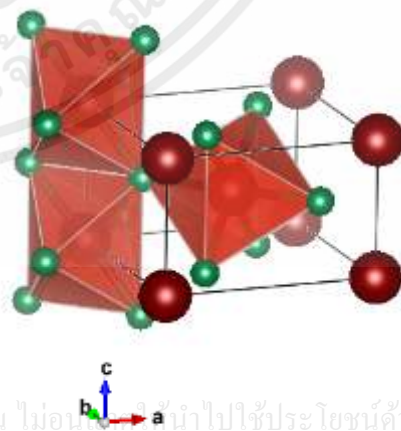
วานาเดียม(IV)ออกไซด์ (Vanadium(IV) oxide) หรือวานาเดียมไดออกไซด์ (Vanadium dioxide: VO₂) เป็นโลหะออกไซด์ของวานาเดียมซึ่งแสดงปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงโลหะ-ฉนวน ที่ T_c เท่ากับ 68 องศาเซลเซียสในวัสดุแบบก้อน (Bulk materials) VO₂ เป็นสารประกอบตระกูลวานาเดียมออกไซด์ที่เสถียรที่สุดที่สามารถแสดงปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงโลหะ-ฉนวนได้ เมื่ออุณหภูมิของ VO₂ เกินค่า T_c โครงสร้างผลึกจะเกิดการเปลี่ยนแปลงจากโมนอคลินิก (Monoclinic) เป็นเตตราโกนอล (Tetragonal) สถานะโลหะ (Metal state) ของ VO₂ นั้นมีโครงสร้างแบบเตตราโกนอลซึ่งมีอะตอมอยู่ที่กึ่งกลางของโครงสร้างผลึก (Body centered tetragonal) หรือเรียกว่ารูไทล์ (Rutile) ที่อยู่ในกลุ่มปริภูมิ (Space group) แบบ P42/mnm ค่าคงที่ผลึก (Lattice parameters) ของ VO₂ ที่อยู่ในสถานะโลหะนี้มีค่า a_R = b_R = 4.5546 อังสตรอม และ c_R = 2.8528 อังสตรอม ไอออน V⁴⁺ จะอยู่บริเวณกึ่งกลางทรงแปดหน้า (Octahedra) ของไอออน O²⁻ และทรงแปดหน้าที่อยู่ตรงกึ่งกลางและมุมจะหมุนต่างกันอยู่ 90 องศารอบแกน c_R โครงสร้างผลึกของรูไทล์ VO₂ แสดงในรูปที่ 2.3 (ก)

สถานะฉนวน (Insulating state) ของ VO₂ มีโครงสร้างผลึกแบบโมนอคลินิกที่อยู่ในกรุปปริภูมิ P21/c และมีค่าคงที่ผลึก a_M = 5.7529 อังสตรอม b_M = 4.5378 อังสตรอม c_M = 5.3825 อังสตรอม และมุมระหว่างแกน a_M กับแกน c_M (β) เท่ากับ 122.6 องศา[17] แสดงดังรูปที่ 2.3 (ข) การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างในปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงโลหะ-ฉนวนของ VO₂ นั้นเกิดจากการบิด (Distortion) ของโครงสร้างผลึก ในสถานะฉนวนมีระยะห่างระหว่าง V-V มีสองค่าคือ 2.62 และ 3.16 อังสตรอม แต่เมื่ออุณหภูมิค่า T_c จะทำให้เกิดการขยับของ V ไอออนส่งผลให้ระยะห่างระหว่าง V-V เป็น 2.85 อังสตรอมซึ่งค่าคงที่ผลึก a_M=2c_R

(ก)



(ข)



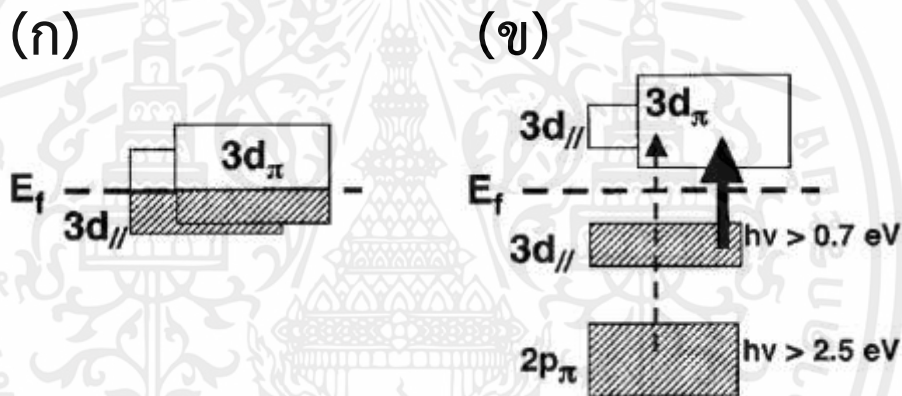
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ข้อมูลนี้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสาร

VO₂ (R)VO₂ (M)

รูปที่ 2.3 (ก)โครงสร้างของรูไทล์ VO₂ และ(ข)โมนอคลินิก VO₂ [16]

VO_2 มีแถบช่องว่างพลังงาน (Energy band gap) อยู่ที่ 0.6-0.7 อิเล็กตรอนโวลต์ โครงสร้างแถบพลังงาน (Electronic band structure) ของ VO_2 สามารถอธิบายได้จากการจัดเรียงอิเล็กตรอนวาเลนซ์อะตอมในระบบ $3d^3s^2$ ออบิทัล โดยมีอิเล็กตรอน 4 ตัวในแถบวาเลนซ์ (Valence band) และทิ้งอิเล็กตรอน 1 ตัวไว้ในแถบนำไฟฟ้า (Conduction band) ที่สถานะโลหะของ VO_2 แถบพลังงาน $3d$ นั้นมีตำแหน่งใกล้เคียงกับระดับพลังงานเฟอร์มิ (Fermi energy level) ประกอบกับแถบพลังงาน $d_{||}$ ที่จัดเรียงตามแกน c_r ซ้อนทับกับแถบพลังงาน $3d_{\pi}$ ไฮบริไดเซชัน (Hybridized) ของ O^{2-} อะตอมในชั้นพี-ออบิทัล (p orbitals) แสดงดังรูปที่ 2.4 (ก) ในสถานะฉนวนของ VO_2 แถบพลังงานจะเกิดการแยกออกโดยการบิดโครงสร้างของผลึก (Distortion) ของ Peierls โมเดล และสหสัมพันธ์ของอิเล็กตรอน (Electronic correlations) ของ Mott โมเดล ในขณะที่แถบพลังงาน $3d_{\pi}$ ถูกยกขึ้นเหนือระดับพลังงานเฟอร์มิจากการบิดไปของพันธะระหว่าง V-O [18] แสดงดังรูปที่ 2.4 (ข)

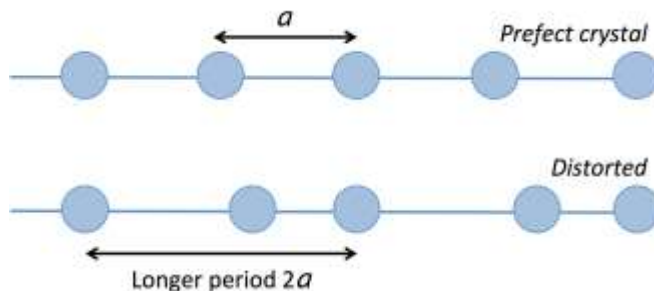


รูปที่ 2.4 (ก) แผนภาพแสดงโครงสร้างแถบพลังงานของ VO_2 ที่สถานะโลหะ และ(ข) สถานะฉนวน [18]

2.4.1 กลไกการเกิดปรากฏการณ์โลหะ-ฉนวนใน VO_2

โมเดลของ Peierls

Rudolf Peierls ได้ใช้โมเดล non-interacting electron ในศึกษาและอธิบายการเกิดปรากฏการณ์โลหะ-ฉนวนเพื่อที่จะเข้าใจจุดเริ่มต้นของแถบพลังงานในสารกึ่งตัวนำ ในปี ค.ศ.1930 งานวิจัยของ Peierls ได้อธิบายว่าระยะห่างระหว่างสายโซ่ใน 1 มิติของไอออนที่มีหนึ่งอิเล็กตรอนนั้นไม่เสถียร [19] ดังนั้นจึงทำให้เกิดการจัดเรียงตัวใหม่ของไอออนเกิดการบิดของแลตทิซ (Lattice distortion) ซึ่งมีความเสถียรมากกว่าในเชิงพลังงาน การบิดของแลตทิซส่งผลต่อการเกิดแถบพลังงานขึ้นซึ่งคล้ายกับการจัดเรียงของอิเล็กตรอนที่อยู่ในสถานะพื้น (Ground state) ดังนั้นโมเดลของ Peierls ควรพบในกรณีที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมต่ำ ๆ



รูปที่ 2.5 แสดงการบิดของแลตทิซที่เป็นระเบียบของผลึกใน 1 มิติ

รูปที่ 2.5 แสดงการขยับของไอออนที่ใกล้กับไอออนรอบข้างซึ่งจะถูกใช้เป็นไอเดียริ่มสำหรับคำนวณอิเล็กตรอนสายโซ่ใน 1 มิติ เพื่อที่จะเข้าใจการเปลี่ยนแปลงของโลหะไปเป็นสารกึ่งตัวนำหรือการเกิดปรากฏการณ์โลหะ-ฉนวนนั้น โมเดลอย่างง่ายของตัวนำ 1 มิติแสดงในสมการที่ 2.1

$$H = H^0 + V = \frac{p^2}{2m} + V(x) \quad (2.1)$$

เมื่อ H^0 คือ non-interacting electrons ในสายโซ่ 1 มิติ V คือ periodic potential โดยที่ $V(x+a) = V(x)$ จากการประยุกต์ใช้ทฤษฎีการรบกวน (Perturbation Theory) ที่ $|k| = \frac{\pi}{a}$ จะเกิดแถบพลังงานเกิดขึ้นซึ่งหมายถึงระดับพลังงานต่ำสุดจาก $-\frac{\pi}{a}$ ถึง $\frac{\pi}{a}$ สำหรับอะตอมที่อิเล็กตรอนหนึ่งตัวในวงวนอกสุด (Monovalent atoms) อิเล็กตรอนสามารถเติมเต็มได้เพียงครึ่งหนึ่งของแถบพลังงานซึ่งทำให้ระบบผลึกมีสถานะเป็นโลหะ ในกรณีที่เกิดการบิดไปของผลึกจะเกิดคาบ (Period) ใหม่ขึ้นเป็น $2a$ แทนที่ a ดังแสดงในรูปที่ 2.5 เกิดแถบพลังงานใหม่ที่ $|k| = \frac{\pi}{2a}$ อิเล็กตรอนสามารถเติมเต็มได้ทุกสถานะซึ่งทำให้ระบบผลึกมีสถานะเป็นสารกึ่งตัวนำหรือฉนวน อย่างไรก็ตาม โมเดลของ Peierls ยังไม่สามารถอธิบายพฤติกรรมของ VO_2 ได้อย่างสมบูรณ์

โมเดลของ Mott

Nevill Francis Mott ได้อธิบายการเปลี่ยนแปลง (Transition) แบบไม่ปกติของสารกึ่งตัวนำจาก สหสัมพันธ์ของอิเล็กตรอน (Electronic correlations) ซึ่งมีจุดกำเนิดมาจากตำแหน่งของอิเล็กตรอนที่แน่นอน (Electron localization) และอิทธิพลของแรงผลึกเนื่องจากประจุไฟฟ้า (Coulomb repulsion) เมื่อพิจารณาถึงแลตทิซที่มีอิเล็กตรอนเดี่ยวในออบิตัลแต่ละข้างโดยไม่คำนึงถึงปฏิสัมพันธ์ระหว่างอิเล็กตรอนด้วยตัวเอง (Electron-electron interaction) อิเล็กตรอนจะอาศัยอยู่ (Occupy) เต็มแถบพลังงานทั้งสองข้าง แต่อิเล็กตรอนที่อยู่ในแนวเดียวกันของแลตทิซจะเกิดแรงผลึกเนื่องจากประจุไฟฟ้าอย่างแรงซึ่งทำให้เกิดการแยกของแถบพลังงานใหม่เกิดขึ้นเป็นสองแถบคือแบบสร้างพันธะ (Bonding) ซึ่งมีพลังงานต่ำ และแบบทำลายพันธะ (Antibonding) ซึ่งมีพลังงานสูง [20]

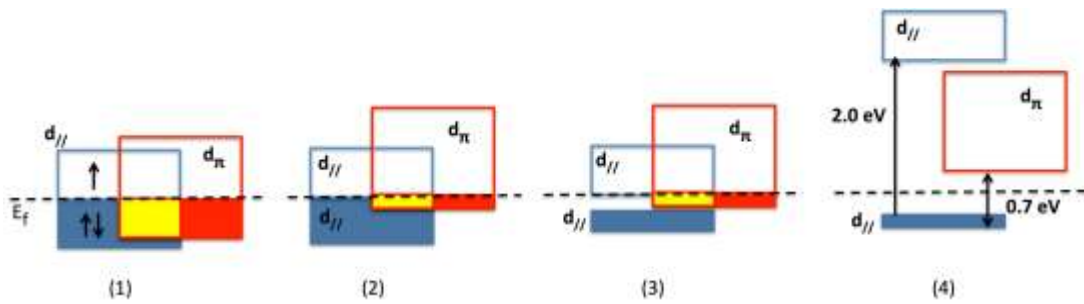
จากแฮมิลโทเนียนในสมการที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าต้องการเทอมของปฏิสัมพันธ์ระหว่างอิเล็กตรอนด้วยกันเองเพื่อหาค่าศักย์ของแลตทิซ $V(x)$ เพื่อเข้าใจการเกิดในการเกิดแถบพลังงาน จากอดีตจนถึงปัจจุบันได้มีการศึกษาเชิงทฤษฎีอย่างมากมายโดยหนึ่งในทฤษฎีที่เป็นที่รู้จักมากที่สุดคือ Local-density approximation [20] Mott ได้สรุปไว้ว่าการเกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการแยกของแถบพลังงานจะเกิดขึ้นอย่างทันทีทันใด เมื่อพิจารณาอะตอมที่คล้ายไฮโดรเจน (Hydrogen-like atoms) มีการจัดเรียงอย่างเป็นระเบียบซึ่งมีค่าคงที่แลตทิซคือ a การเปลี่ยนแปลงของแถบพลังงานจะเกิดขึ้นได้เมื่อ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระ (Free electron density: n) และรัศมีของบอร์ (Bohr radius) เป็นไปตามสมการที่ 2.2

$$n^{\frac{1}{3}} a_H \approx 0.2 \quad (2.2)$$

กลไกการเกิดปรากฏการณ์โลหะ-ฉนวนของ VO_2 ตาม โมเดลของ Mott แสดงดังรูปที่ 2.6 โดยลำดับการเกิดปรากฏการณ์เป็นดังนี้

- (1) จากสหสัมพันธ์ของอิเล็กตรอนแถบพลังงาน $d_{||}$ ถูกแบ่งเป็นสองแถบคือแบบสร้างพันธะ (ด้านล่าง) และแบบทำลายพันธะ (ด้านบน)
- (2) แถบพลังงาน d_{π} เลื่อนขึ้นไปยังพลังงานที่สูงขึ้นจากการเปลี่ยนของออกซิเจนโดยรอบส่งผลให้การบดบังของอิเล็กตรอนใน $d_{||}$ (Screening effect) จากใน d_{π} มีค่าลดลง
- (3) การลดลงของการบดบังของอิเล็กตรอนส่งผลให้ช่องระหว่างแถบพลังงาน $d_{||}$ แบบสร้างพันธะ (ด้านล่าง) และแบบทำลายพันธะมีค่าเพิ่มขึ้น
- (4) แถบพลังงาน d_{π} ถูกยกขึ้นอย่างสมบูรณ์จากการล่มสลายของ (Deformation) ออกตะฮีดรอลของออกซิเจน (Octahedral oxygen) แถบพลังงาน $d_{||}$ แบบสร้างพันธะเลื่อนลงต่ำกว่าระดับพลังงานเฟอร์มิส่งผลให้เกิดแถบช่องว่างพลังงานของ VO_2 ประมาณ 0.7 อิเล็กตรอนโวลต์ ระหว่างแถบพลังงาน $d_{||}$ แบบสร้างพันธะและแถบพลังงาน d_{π} ตำแหน่งของอิเล็กตรอนที่แน่นอนในแลตทิซของคู่พันธะระหว่าง V-V ช่วยให้เกิดแรงผลักเนื่องจากประจุไฟฟ้ามากขึ้นทำให้แถบพลังงาน $d_{||}$ แบบสร้างทำลายพันธะยกสูงเหนือแถบพลังงาน $d_{||}$ แบบสร้างพันธะประมาณ 2.0 อิเล็กตรอนโวลต์ ดังนั้นการการล่มสลายของออกตะฮีดรอลของออกซิเจนส่งผลให้เกิดการปิดไปของคู่พันธะระหว่างอะตอมของ V-V ซึ่งการอธิบายปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงโลหะ-ฉนวนควรอธิบายด้วยโมเดลของ Mott และ Peierls

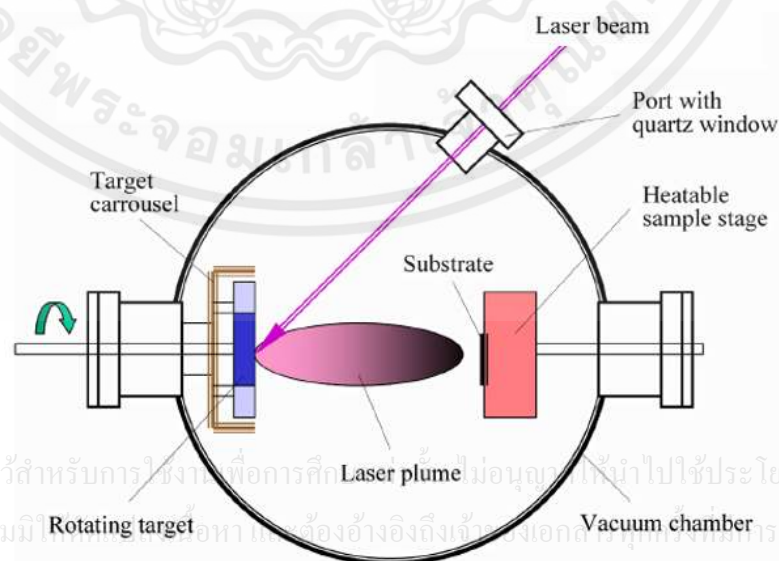
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 กลไกการเกิดช่องว่างแถบพลังงานในโมเดลของ Mott

2.5 ระบบระเหยสารด้วยลำเลเซอร์แบบห้วง

ระบบระเหยสารด้วยลำเลเซอร์แบบห้วง (Pulsed laser deposition: PLD) เป็นวิธีการตกเคลือบด้วยวิธีทางฟิสิกส์ (Physical vapor deposition) โดยการยิงเลเซอร์พลังงานสูงเป็นช่วงสู่เป้าสารเคลือบแสดงในรูปที่ 2.7 สารเคลือบจะหลุดออกจากผิวหน้าของเป้าสารเคลือบโดยขึ้นอยู่กับสมบัติการดูดกลืนแสง (Absorption) ของเป้าสารเคลือบ การหลุดออกของสารเคลือบจะเกิดขึ้นเมื่อพลังงานเลเซอร์ต่อพื้นที่ (Fluency) มีค่าเกิดพลังงานเลเซอร์ต่อพื้นที่เริ่มต้น (Threshold fluency) สารเคลือบที่หลุดออกจะวิ่งเข้าชนกับก๊าซที่อยู่ในห้องเคลือบสุญญากาศด้วยพลังงานสูง สารเคลือบบางส่วนเกิดการไอออไนซ์ (Partially ionized) เป็นพลาสมา (Plasma) ซึ่งจะเห็นได้จากแสงที่เปล่งออกมาจากพลาสมาพุ่ม (Plasma plume) ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ค่าพลังงานเลเซอร์ต่อพื้นที่เริ่มต้นที่ต้องการทำให้เกิดพลาสมานั้นขึ้นอยู่กับสมบัติการดูดกลืนแสงของเป้าสารเคลือบ ความยาวคลื่นของเลเซอร์ที่ต้องใช้ และช่วงเวลาในการยิงเลเซอร์ โดยทั่วไปสำหรับเอ็กไซเมอร์เลเซอร์ (Excimer Laser) หรือเลเซอร์แบบก๊าซนั้นจะใช้ช่วงเวลาในการยิงเลเซอร์ประมาณ 15 นาโนวินาที หลังจากเป้าสารเคลือบถูกยิงด้วยเลเซอร์ สารเคลือบเหล่านี้จะวิ่งไปก่อดังที่ฐานรองรับซึ่งอยู่ตรงข้ามกับเป้าสารเคลือบ ก่อดังเป็นฟิล์ม หรือโครงสร้างนาโน (Nanostructure) [21]



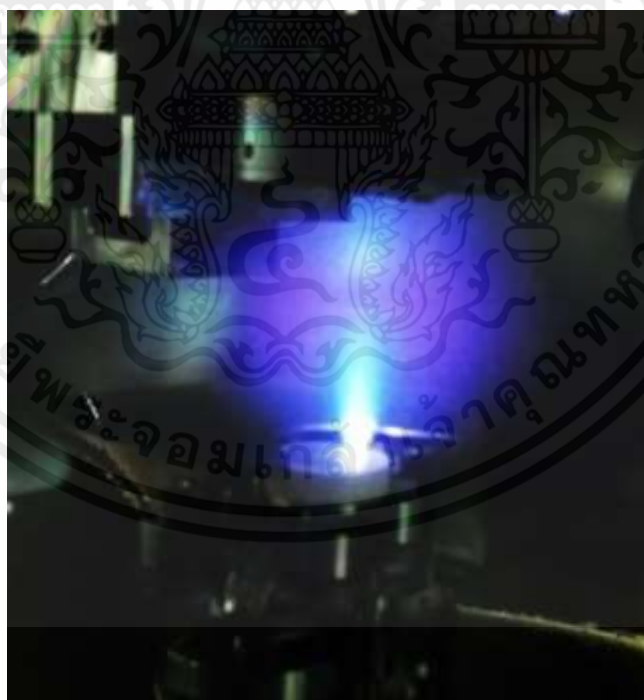
รูปที่ 2.7 โครงสร้างของระบบระเหยสารด้วยลำเลเซอร์แบบห้วง [21]

ข้อดีของเทคนิค PLD ในการปลูกฟิล์มบาง

1. สามารถระเหยวัสดุได้เกือบทุกชนิดไม่ว่าจะเป็นวัสดุเนื้อเดียว หรือวัสดุผสมจากความยืดหยุ่นในการเลือกใช้ความยาวคลื่นของเลเซอร์และพลังงานเลเซอร์ต่อพื้นที่
2. ระบบเลเซอร์อยู่นอกกระบวนสุญญากาศซึ่งง่ายต่อการออกแบบ และการใช้งาน
3. สามารถเลือกอัตราการเคลือบได้อย่างอิสระและแม่นยำ
4. สามารถรักษาสัดส่วนทางเคมี (Stoichiometry) จากเป้าสารเคลือบได้
5. สามารถควบคุมพลังงานจลน์ของสารเคลือบได้ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อสมบัติของฟิล์มและลักษณะของฟิล์มที่เกิดขึ้น (Growth modes)

ข้อเสียของเทคนิค PLD ในการปลูกฟิล์มบาง

1. พลังงานจลน์ของสารเคลือบที่มากเกินไปสามารถทำให้เคลือบซ้ำ (Re-sputtering) ส่งผลให้เกิดตำหนิ (defects) บนผิวของวัสดุฐานรองรับ และฟิล์มบางได้
2. พลังงานของเลเซอร์ที่มีการกระจายแบบไม่สม่ำเสมอจะส่งผลให้ฟิล์มบางที่เตรียมมิได้สมบัติและความหนาไม่สม่ำเสมอ
3. ธาตุที่มีมวลเบาเช่น ออกซิเจน หรือลิเทียมมีความเร็วต่างจากธาตุหนักมากทำให้ปริมาณธาตุที่อยู่ภายในฟิล์มบางไม่สามารถรักษาสัดส่วนทางเคมีได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สรุปที่ 2.8 ลักษณะของพลาสมาพลูมเมื่อเป้าสารเคลือบถูกยิงด้วยเลเซอร์
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.1 การขยายตัวของพลาสมาพลูม

การขยายตัวของพลาสมาพลูมในระบบสุญญากาศ

การขยายตัวของพลาสมาพลูมในระบบสุญญากาศ (Plume Expansion in Vacuum) จะเริ่มจากพิจารณาจากการขยายตัวในพลาสมาพลูมเป็นระบบแบบอะเดียแบติก (Adiabatic) กล่าวคือไม่มีการถ่ายเทมวลและพลังงานเข้าออกในระบบพลาสมาพลูมจนเรียกได้ว่าไม่เกิดการชนกันระหว่างสารเคลือบในพลาสมาพลูม (Collision free) จากโมเดลของ Anisimov ลักษณะของพลาสมาพลูมมีลักษณะเป็นทรงรี [22] จากการยิงเลเซอร์ด้วยช่วงเวลาน้อยมาก ๆ ในระดับนาโนวินาทีทำให้อัตราการกระเหยมีค่าสูงถึง 0.1 ไมโครโมลต่อวินาที อนุภาคความหนาแน่นสูงจะเกิดบนผิวของเป้าสารเคลือบ จากนั้นจะเกิดการกระเจิง (Scattering) หลายครั้งระหว่างสปีชีส์ของพลาสมาพลูมเป็นผลเกิดขึ้นของ Knudsen [23] โดยชั้นของ Knudsen หาได้จากการประยุกต์การกระจายตัวของแมกซ์เวลล์-โบลต์ซมันน์ (Maxwell-Boltzmann distribution) ตามสมการที่ 2.3

$$f(v) = A \left(\frac{m}{2\pi k} \right)^{3/2} v^n \exp\left(-\frac{m(v-u)^2}{2kT} \right) dv \quad (2.3)$$

เมื่อ m คือมวลของอนุภาค k คือค่าคงที่ของโบลต์ซมันน์ v คืออัตราเร็วตามแนวการขยายตัว u คืออัตราเร็วของลำพลาสมา T คือความเร็วของลำพลาสมา และ n เป็นจำนวนเต็ม

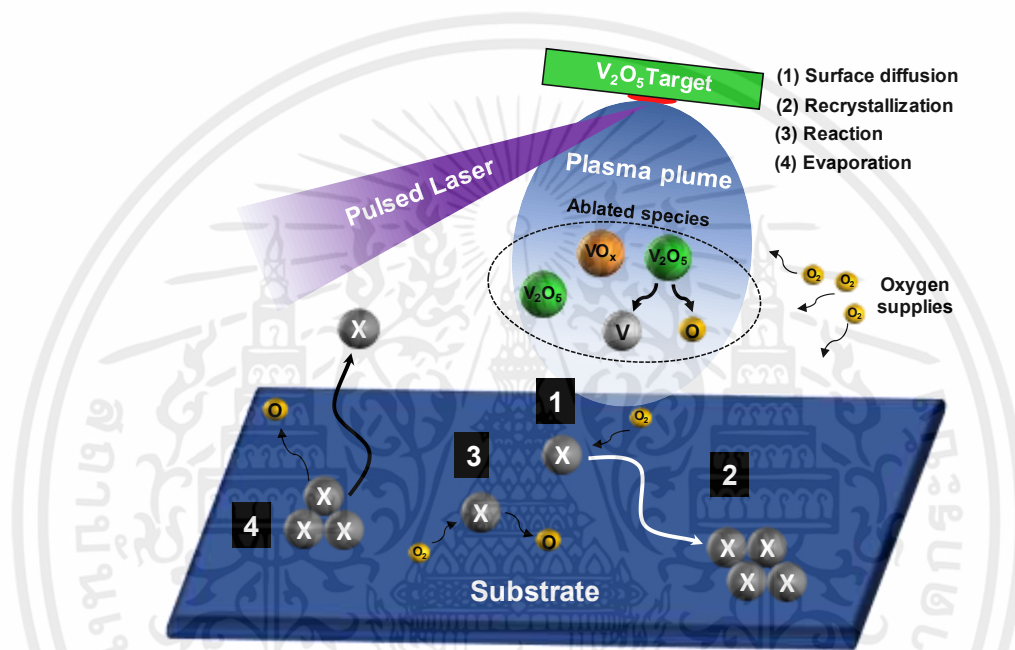
การขยายตัวของพลาสมาพลูมในก๊าซพื้นหลัง

การขยายตัวของพลาสมาพลูมในก๊าซพื้นหลัง (Plume Expansion into a Background Gas) ก๊าซพื้นหลังหรือก๊าซที่ใส่เพิ่มเติมเข้าไปในระบบจะทำหน้าที่ลดพลังงานจลน์ของสปีชีส์ต่าง ๆ ในพลาสมาพลูมและเพิ่มการทำปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างสารเคลือบและโมเลกุลของก๊าซเช่น ออกซิเจนและไนโตรเจน พลศาสตร์ของพลาสมาพลูมมีผลโดยตรงจากชนิดของก๊าซและความดันของก๊าซที่ความดันของก๊าซต่ำ (<1 พาสคัล) ลักษณะของพลาสมาพลูมจะคล้ายกับในระบบสุญญากาศ ในช่วงความดันของก๊าซ 10–100 พาสคัล ความดันของของก๊าซจะส่งผลโดยตรงต่อการเกิดพลาสมาพลูมขณะพลาสมาพลูมกำลังขยายตัวจะดันก๊าซออกไปจากหน้าเป้าส่งผลให้ค่าระยะอิสระเฉลี่ย (Mean free path) ของพลาสมาพลูมลดลงจะเกิดคลื่นกระแทก (shock wave) เพื่อทำให้เกิดสมดุลของความดัน จากโมเดลของ Zeldovich และ Raizer มวลโดยรวมของพลาสมาพลูมสามารถหาได้จากสมการที่ 2.4 [24]

$$M_p \approx \frac{2}{3} \pi R_{SKW}^3 \rho_g \quad (2.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
เมื่อ ρ_g คือความหนาแน่นของก๊าซ R_{SKW} คือระยะห่างระหว่างทรงกลมของคลื่นกระแทกเริ่มต้น

เมื่อพิจารณาในมุมมองของสารตั้งต้นหรือเป้าสารเคลือบจะเห็นได้ว่า V_2O_5 มีจุดหลอมเหลวที่ต่ำกว่า วานาเดียมค่อนข้างมากซึ่งง่ายต่อการระเหิดและสามารถเปลี่ยนแปลงเฟสได้ง่าย นอกจากนี้ V_2O_5 นั้นมีสถานะออกซิเดชันที่แน่นอนคือ 5+ ซึ่งเป็นสถานะออกซิเดชันที่เสถียรที่สุดของวานาเดียม ทำให้สารเคลือบที่ออกจากเป้ามีปริมาณวานาเดียมอะตอมและออกซิเจนอะตอมใกล้เคียงกันเสมอ ต่างจากโลหะวานาเดียมที่สามารถเกิดสารประกอบบนผิวได้ง่ายทั้งในกรณีของการออกซิไดซ์จากบรรยากาศและเกิดจากความร้อนสะสมขณะเคลือบ จากข้อดีทั้งหมดที่กล่าวไปข้างต้น ทำให้ V_2O_5 เหมาะสมเป็นเป้าสารเคลือบในการเตรียมฟิล์มบาง VO_2



รูปที่ 2.9 แสดงลักษณะปรากฏการณ์ที่สามารถเกิดขึ้นได้บนวัสดุฐานรองรับหลักจากที่เกิดพลาสมาพลูม

2.7 เทคนิคการวัดค่าความต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 จุด

การวัดค่าความต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 จุด (four-point probe) เป็นวิธีการมาตรฐานในการวัดค่าความต้านทานของวัสดุสารกึ่งตัวนำ โดย เข็มวัดคู่หนึ่งใช้จ่ายกระแสให้กับชิ้นงานทดสอบ ส่วนเข็มวัดอีกคู่จะใช้วัดแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากชิ้นงาน ทดสอบ ด้วยลักษณะเช่นนี้สามารถตัดผลกระทบจากความต้านทานของสายไฟที่ใช้วัด และแรงดันไฟฟ้า ตกคร่อมจุดวัด จึงทำให้ค่าความต้านทานที่คำนวณได้ มีความถูกต้องมากขึ้นดังรูปที่ 2.10 สมการที่ใช้ในคำนวณหาค่าความต้านทานเชิงแผ่นและสภาพความต้านทานแสดงในสมการที่ 2.6 และ 2.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา $R_s = \frac{\pi}{\ln 2} \left(\frac{V}{I} \right)$ เจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไป (2.6)

$$\rho = R_s t \quad (2.7)$$

- โดยที่ R_s คือความต้านทานเชิงแผ่นมีหน่วยเป็นโอห์มต่อตารางเมตร
 V คือความต่างศักย์ที่วัดได้มีหน่วยเป็นโวลต์
 I คือกระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้กับชิ้นงานมีหน่วยเป็นแอมแปร์
 t คือความหนาของฟิล์มที่ทำการวัดมีหน่วยเป็นเซนติเมตร
 ρ คือสภาพความต้านทานมีหน่วยเป็นโอห์มเซนติเมตร



รูปที่ 2.10 แสดงการจัดเรียงหัวเข็มที่ใช้วัดด้วยการวัดค่าความต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 จุด ซึ่งเข็มจะเรียงเป็นแนวเส้นตรงและมีระยะห่างเท่ากัน

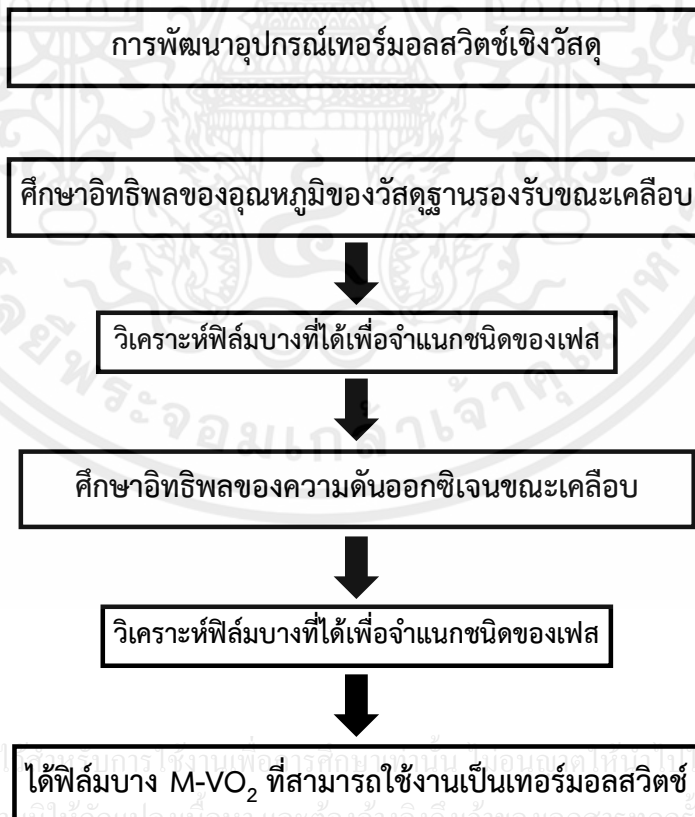
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

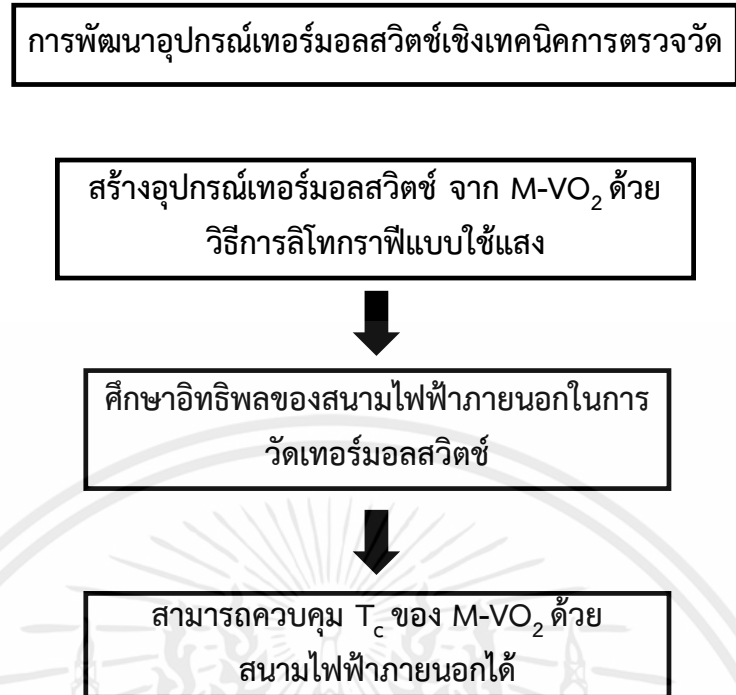
ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.1 แผนงานการดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการเตรียมฟิล์มวานาเดียมออกไซด์ (Vanadium oxide) ด้วยระบบระเหยสารด้วยลำเลเซอร์แบบพัลส์ (Pulsed Laser Deposition: PLD) และทำการตรวจสอบสมบัติต่างๆของฟิล์มบาง เพื่อให้ได้ฟิล์มบางวานาเดียมไดออกไซด์เฟสโมโนคลินิก (Monoclinic Vanadium dioxide: $VO_2(M)$) สำหรับใช้เป็นอุปกรณ์เทอร์มอลสวิตช์ (Thermal switch) ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยในงานวิจัยนี้จะถูกแบ่งออกเป็นสองแนวทางการศึกษาคือหนึ่งการพัฒนาอุปกรณ์เทอร์มอลสวิตช์เชิงวัสดุแสดงดังรูปที่ 3.1 โดยจะทำการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิของวัสดุฐานรองรับขณะเคลือบและอิทธิพลของความดันออกซิเจนขณะเคลือบเพื่อให้ได้ฟิล์มบาง $VO_2(M)$ ที่สามารถแสดงปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงโลหะ-ฉนวน สองการพัฒนาอุปกรณ์เทอร์มอลสวิตช์เชิงการวัดแสดงดังรูปที่ 3.2 โดยจะทำการสร้างเทอร์มอลสวิตช์จากฟิล์มบาง $VO_2(M)$ ที่เตรียมได้และศึกษาอิทธิพลของสนามไฟฟ้าภายนอกที่ป้อนให้แก่เทอร์มอลสวิตช์เพื่อควบคุม T_c ของเทอร์มอลสวิตช์



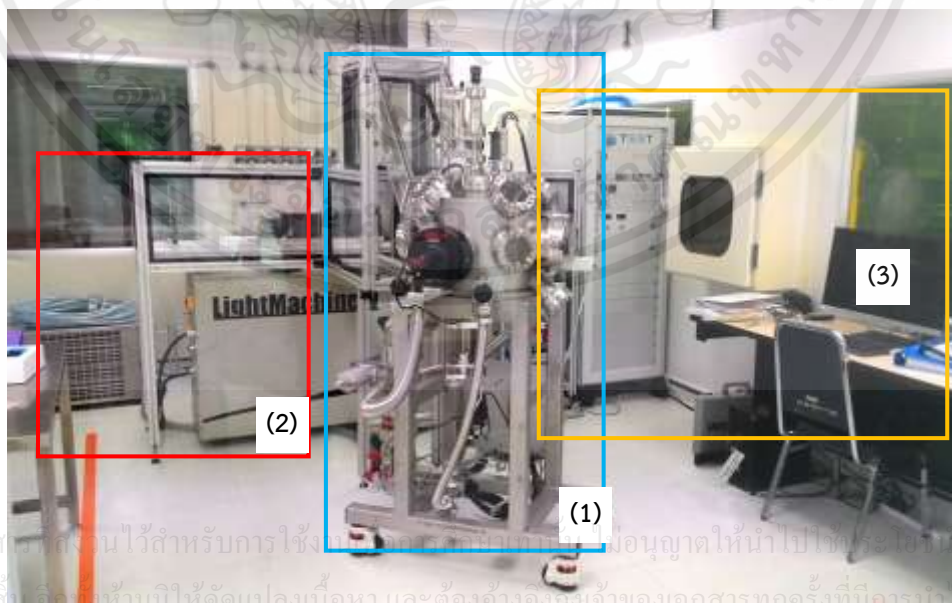
รูปที่ 3.1 แสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยในส่วนแรกการพัฒนาอุปกรณ์เทอร์มอลสวิตช์เชิงวัสดุ



รูปที่ 3.2 แสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยการพัฒนาอุปกรณ์เทอร์มอลสวิตซ์เชิงการวัด

3.2 ระบบระเหยสารด้วยลำเลเซอร์แบบหัววง

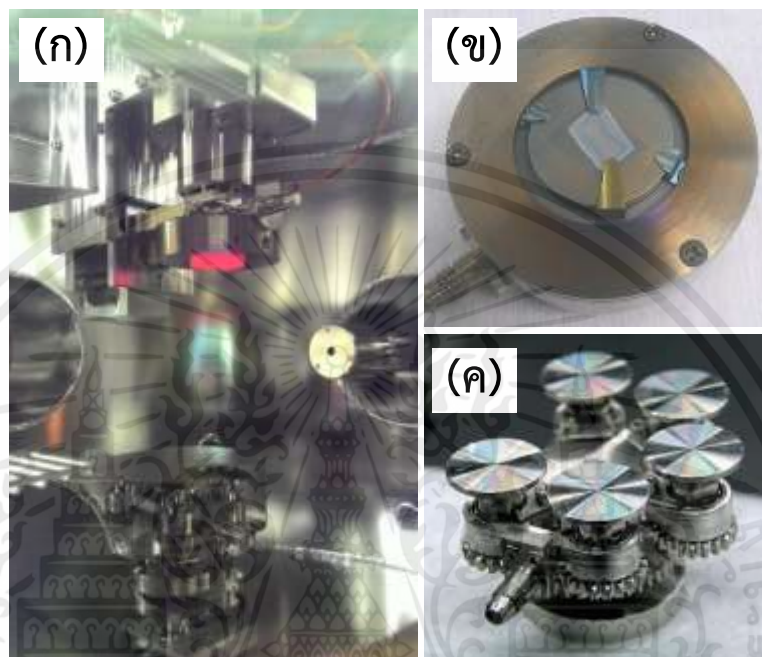
ระบบ PLD ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นของบริษัท Twente Solid State Technology ประเทศเนเธอร์แลนด์ ภายในระบบ PLD ประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลักแสดงในรูปที่ 3.3 1.ห้องเคลือบสุญญากาศและระบบปั๊ม 2.ระบบ Pulsed laser และระบบเลนส์ 3.ระบบคอมพิวเตอร์ควบคุม



รูปที่ 3.3 ส่วนประกอบต่าง ๆ ของระบบระเหยสารด้วยลำเลเซอร์แบบหัววง

3.1.1 ห้องเคลือบสุญญากาศ และระบบปั๊ม

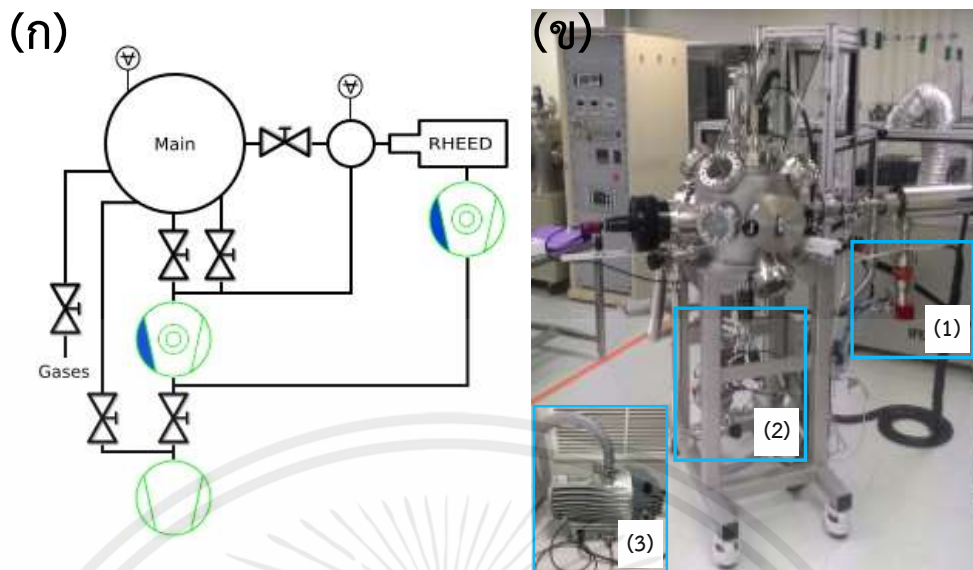
ห้องเคลือบสุญญากาศที่ใช้ในงานนี้แสดงดังรูปที่ 3.4 ภายในประกอบไปด้วยตัวยึดวัสดุฐานรองรับ (Sample holder) ซึ่งสามารถให้ความร้อนแก่วัสดุฐานรองรับได้ถึง 950 องศาเซลเซียส ในสภาวะสุญญากาศสูงและตัวยึดเป้าสารเคลือบสามารถใส่สารเคลือบพร้อมกันได้ถึง 5 เป้า



รูปที่ 3.4 (ก) แสดงรูปถ่ายภายในห้องเคลือบสุญญากาศซึ่งประกอบไปด้วยส่วนประกอบหลักคือ (ข)ตัวยึดวัสดุฐานรองรับ และ (ค) ตัวยึดเป้าสารเคลือบ

สำหรับแผนผังของระบบสุญญากาศแสดงในรูปที่ 3.5 (ก) ภายในระบบจะประกอบไปด้วยปั๊ม 3 ตัว 2 ชนิดแสดงดังรูปที่ 3.5 (ข) หมายเลขที่ 1 และ 2 เป็นปั๊มโมเลกุลแบบเทอร์โบ (Turbomolecular pump) และหมายเลข 3 เป็นปั๊มสุญญากาศเชิงกล (Dry pump) ที่ใช้ในการดูดอากาศออกห้องเคลือบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 (ก)แสดงแผนผังของระบบสุญญากาศ ตำแหน่งของปั๊มและวาล์วต่าง ๆ รวมถึงห้องเคลือบสุญญากาศ และ(ข)แสดงตำแหน่งปั๊มทั้ง 3 ตัวของระบบสุญญากาศ

3.1.2 ระบบเลเซอร์แบบห้วงพลังงานสูงและระบบเลนส์

ระบบเลเซอร์แบบห้วงของบริษัท LightMachinery รุ่น IPEX-766 แสดงในรูปที่ 3.6 ภายในบรรจุก๊าซคริปทอนฟลูออไรด์ (KrF) ความดันสูงเพื่อใช้เป็นตัวกลางในการเกิดแสงเลเซอร์ โดยให้แสงเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 248 นาโนเมตร และพลังงานเลเซอร์สูงสุดที่ 700 มิลลิจูล ข้อมูลจำเพาะของระบบเลเซอร์แสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลจำเพาะของเลเซอร์แบบห้วง

ข้อมูลจำเพาะของเลเซอร์ IPEX-766	
ความยาวคลื่น	248 นาโนเมตร
พลังงานสูงสุดที่ความถี่การยิงเลเซอร์ต่ำ	700 มิลลิจูล
พลังงานสูงสุดที่ความถี่การยิงเลเซอร์สูง	600 มิลลิจูล
ความถี่การยิงเลเซอร์	50 เฮิรตซ์
ช่วงเวลาในการยิงเลเซอร์	12-20 นาโนวินาที
ขนาดพื้นที่ของเลเซอร์ (กว้าง×ยาว)	12×28 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 แสดงตัวเครื่องของระบบเลเซอร์แบบห้วงของบริษัท LightMachinery รุ่น IPEX-766

ระบบกระจกสะท้อนและเลนส์ของระบบเลเซอร์โดยจะประกอบไปด้วยกระจก 7 ชิ้นและเลนส์ 1 ตัว ดังรูป 3.7 โดยจะมีช่อง (mask) ทำหน้าเป็นตัวเลือกแสงเลเซอร์ส่วนที่มีการกระจายตัวของพลังงาน ขนาดสม่ำเสมอและเป็นตัวกำหนดขนาดเริ่มต้นหรือขนาดวัตถุเพื่อใช้คำนวณหาขนาดจุดเลเซอร์บน เป้าสารเคลือบ (Laser spot: A) ตามสมการที่ 3.1 และกำลังขยาย (M) หาได้จากสมการที่ 3.2

$$A = \frac{A'}{M^2 \times \cos(\theta)} \quad (3.1)$$

$$M = \frac{s'}{s} \quad (3.2)$$

ในระบบ PLD ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ใช้เลนส์ที่มีความยาวโฟกัสอยู่ที่ 425 มิลลิเมตร จึงสามารถคำนวณ ระยะจากเลนส์ถึงเป้าสารเคลือบ (s') ได้จากสมการที่ 3.3 ข้อสำคัญเลนส์จะต้องอยู่ในตำแหน่งโฟกัส ซึ่งหาได้จากการทดลองยิงเลเซอร์ลงบนกระดาษความร้อนและหาตำแหน่งที่จุดเลเซอร์คมชัดมากที่สุด ขนาดจุดเลเซอร์ที่คำนวณได้จะต้องใกล้เคียงกับขนาดจุดบนกระดาษความร้อน

$$s' = \frac{1}{\frac{1}{f} - \frac{1}{s}} \quad (3.3)$$

ทำให้สามารถคำนวณพลังงานเลเซอร์ต่อพื้นที่ (Fluency: F) ได้ตามสมการที่ 3.4 โดยพลังงาน เลเซอร์ (E) วัดจากเครื่องวัดพลังงานเลเซอร์

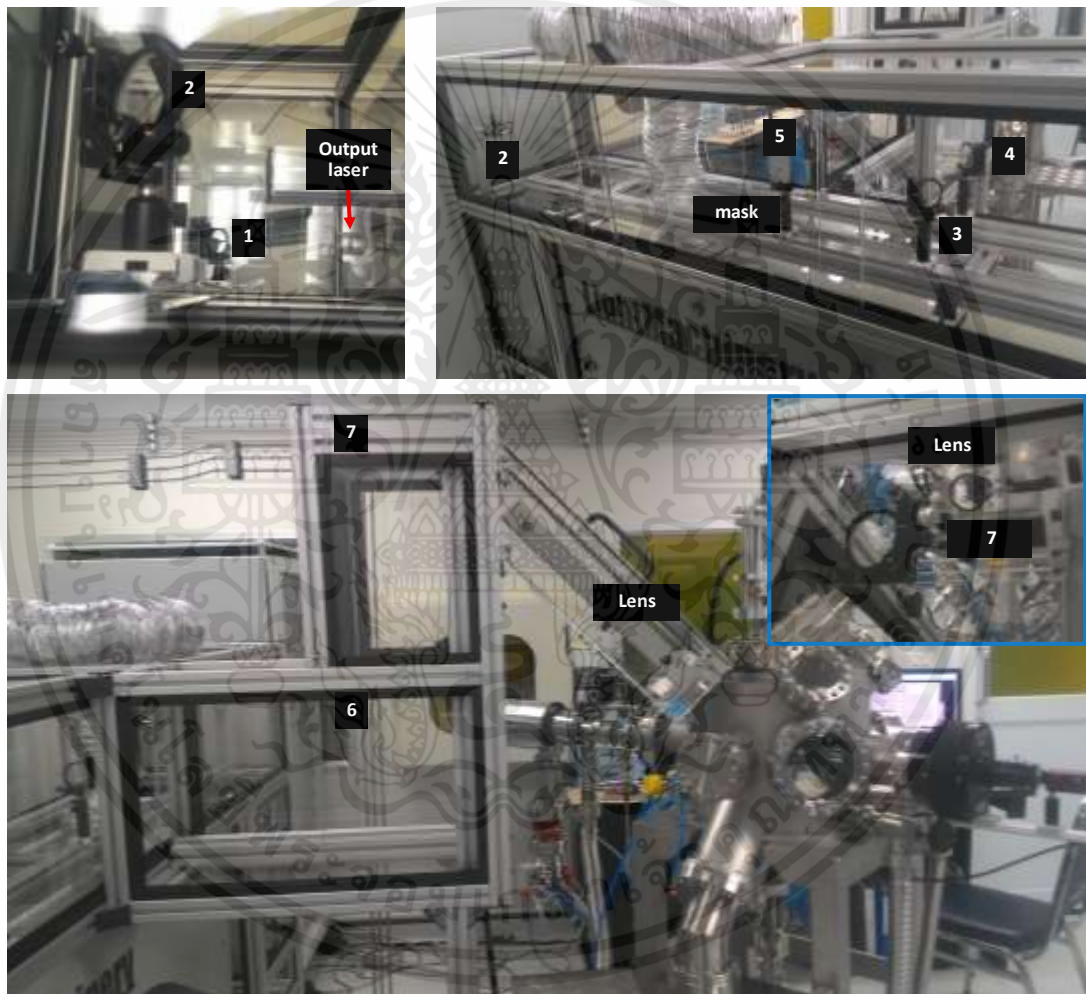
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ $F = \frac{E}{A}$ เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า (3.4)

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดให้ A คือ ขนาดจุดเลเซอร์บนเป้าสารเคลือบ

A' คือ พื้นที่ของช่อง (mask)

- M คือ กำลังขยาย
- s' คือ ระยะจากช่อง(mask)ถึงเลนส์
- s คือ ระยะจากเลนส์ถึงเป้าสารเคลือบ
- θ คือ มุมตกกระทบเทียบกับผิวเป้าสารเคลือบ
- f คือ ความยาวโฟกัสของเลนส์
- E คือ พลังงานของเลเซอร์
- F คือ พลังงานต่อพื้นที่บนผิวเป้าสารเคลือบ

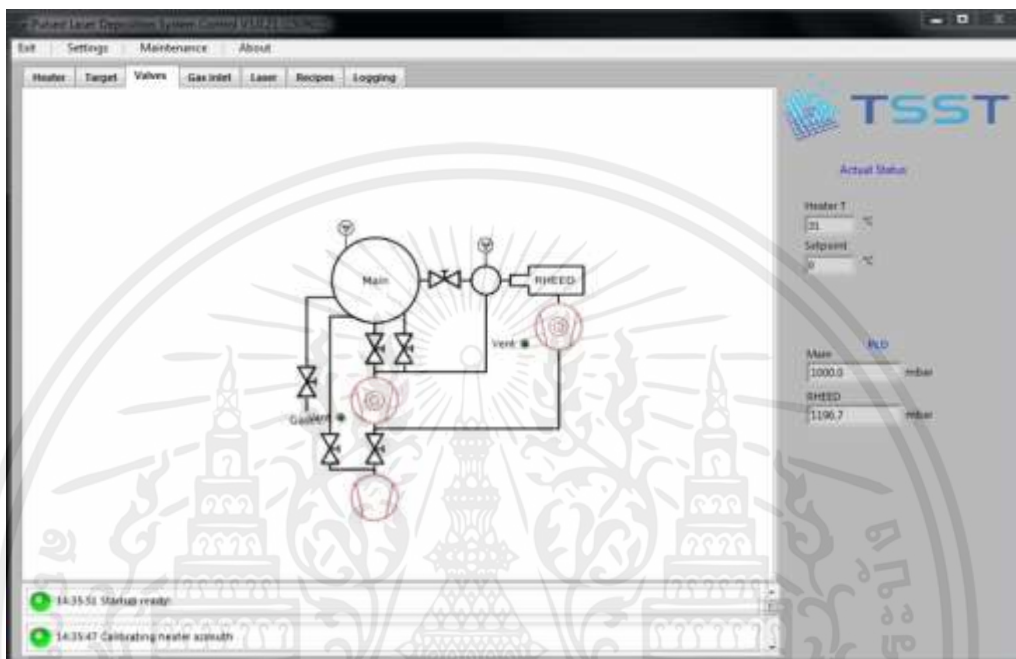


รูปที่ 3.7 แสดงระบบกระจกและเลนส์ที่ใช้เพื่อปรับระยะจากช่อง(mask)ถึงเลนส์โดยประกอบไปด้วยกระจก 7 ชั้นและเลนส์ 1 ชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 ระบบคอมพิวเตอร์ควบคุมหลัก

ระบบคอมพิวเตอร์ควบคุมหลักเป็นระบบสำหรับป้อนคำสั่งให้แก่อุปกรณ์ทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้นของระบบ PLD ลักษณะของโปรแกรมควบคุมแสดงในรูปที่ 3.8 ซึ่งจะมีหน้าต่างของระบบที่ต้องการควบคุมรวมถึงปุ่มและคำสั่งที่ต้องการป้อน

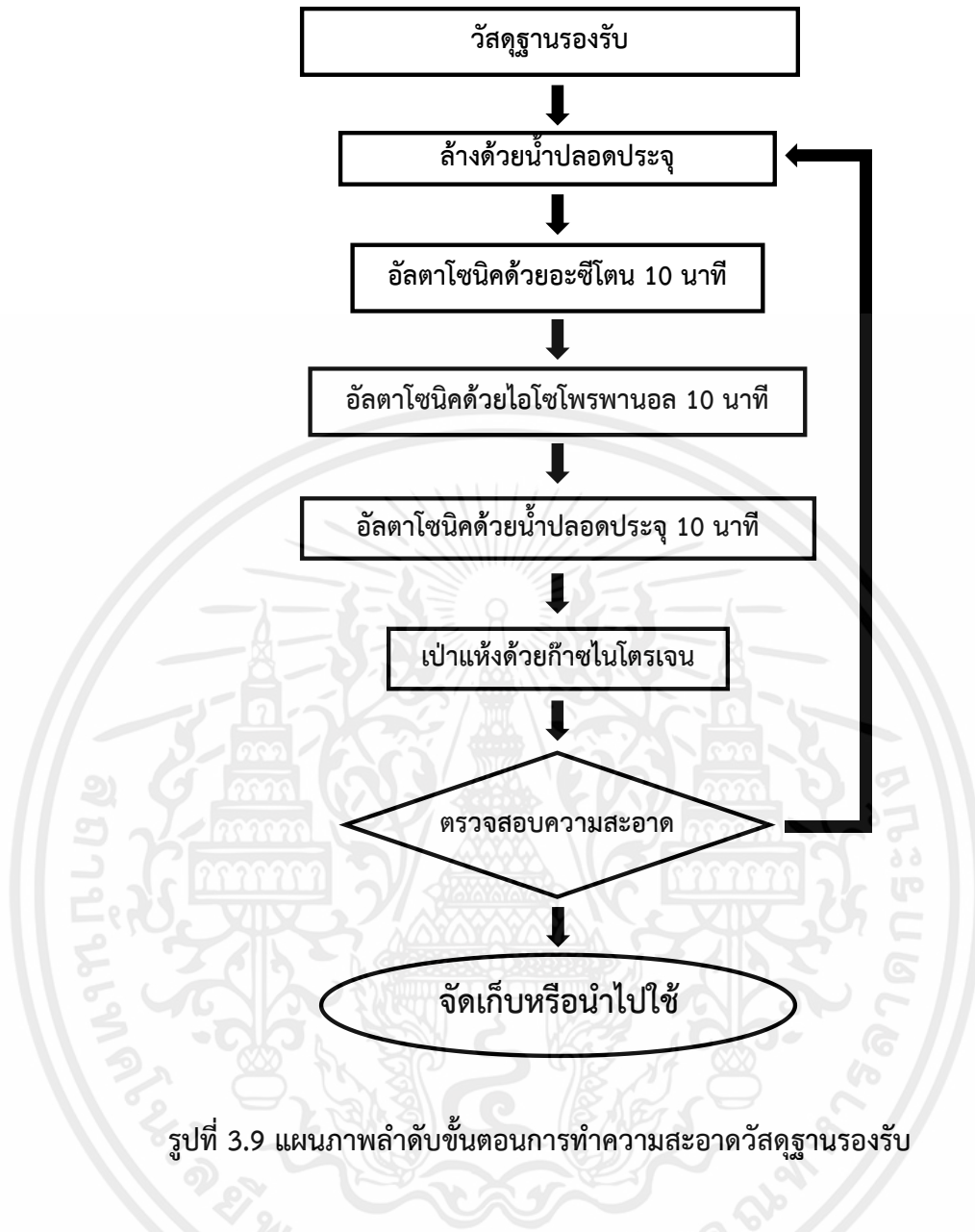


รูปที่ 3.8 แสดงหน้าต่างของโปรแกรมควบคุมระบบโดยจะมีแถบให้เลือกในการป้อนค่าที่ต้องการอยู่บริเวณด้านบน

3.2 การปลูกฟิล์มบางวานาเดียมออกไซด์ด้วยระบบระเหยสารด้วยลำเลเซอร์แบบแห้ง

3.2.1 การทำความสะอาดวัสดุฐานรองรับ

ในการทดลองนี้เราใช้วัสดุฐานรองรับเป็นแผ่นควอทซ์และแผ่นเวเฟอร์ SiO_2/Si ซึ่งมีความหนาของออกไซด์ 1 ไมโครเมตร ก่อนการปลูกฟิล์มบางจะต้องทำความสะอาดผิวของวัสดุฐานรองรับก่อนเพื่อไม่ให้มีสิ่งเจือปน จำพวก ฝุ่นละออง คราบไขมัน รวมถึงสารเคมีอื่น ๆ ที่สามารถเข้ารบกวนระบบการปลูกฟิล์มโดยขั้นตอนการทำความสะอาดวัสดุฐานรองรับแสดงดังรูปที่ 3.9 ขั้นตอนแรกนำวัสดุฐานรองรับล้างด้วยน้ำปilotประจุ แล้วอัลตราโซนิกด้วยอะซิโตน ($\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$) ไอโซโพรพานอล ($\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$) และน้ำปilotประจุ ตามลำดับขั้นตอนละ 10 นาที จากนั้นจึงทำให้แห้งด้วยการเป่าก๊าซไนโตรเจน



รูปที่ 3.9 แผนภาพลำดับขั้นตอนการทำความสะอาดวัสดุฐานรองรับ

3.2.2 การปลูกฟิล์มบางวานาเดียมออกไซด์

ในงานวิจัยนี้ต้องการที่จะปลูกฟิล์มบางวานาเดียมไดออกไซด์ด้วยเงื่อนไขต่าง ๆ เพื่อให้ได้เงื่อนไขที่ดีที่สุดในการเกิดเฟส $VO_2(M)$ ซึ่งตัวแปรสำคัญที่ก่อให้เกิด $VO_2(M)$ ไม่ว่าจะเป็นพลังงานเลเซอร์ต่อพื้นที่ ระยะห่างระหว่างเป้าสารเคลือบกับฐานรองรับ อุณหภูมิวัสดุฐานรองรับ และความดันของก๊าซออกซิเจนขณะเคลือบล้วนแต่ส่งผลโดยตรงต่อการเกิด VO_2 โดยในงานวิจัยนี้จะศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิวัสดุฐานรองรับ และความดันของก๊าซออกซิเจนขณะปลูกซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการฟอร์มตัวของผลึก VO_2 และอัตราส่วนระหว่าง V:O ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศึกษาเงื่อนไขของอุณหภูมิวัสดุฐานรองรับ

ในเงื่อนไขนี้จะทำการกำหนดตัวแปรอื่น ๆ ให้มีค่าคงที่ดังตารางที่ 3.2 โดยจะเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิวัสดุฐานรองรับจากอุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส) ไปจนถึง 600 องศาเซลเซียส และนำฟิล์มที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคต่าง ๆ เพื่อหาค่าพลังงานต่อพื้นที่ที่เหมาะสมต่อการก่อตัวของ VO₂

ตารางที่ 3.2 แสดงเงื่อนไขในการปลูกฟิล์มบางวานาเดียมออกไซด์ที่อุณหภูมิวัสดุฐานรองรับแตกต่างกัน

ตัวแปร	เงื่อนไข
ชนิดเป่าสารเคลือบ (ขนาด 1 นิ้ว)	V ₂ O ₅ 99.9%
วัสดุฐานรองรับ	แผ่นควอทซ์และแผ่นเวเฟอร์ SiO ₂ /Si
ความดันก่อนปลูก	7×10 ⁻⁷ มิลลิบาร์
ความดันขณะปลูก	5×10 ⁻² มิลลิบาร์
อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน	5 sccm
พลังงานเลเซอร์ต่อพื้นที่	1.5 จูล/ตารางเซนติเมตร
อุณหภูมิวัสดุฐานรองรับ	30 - 600 องศาเซลเซียส

ศึกษาเงื่อนไขของความดันของก๊าซออกซิเจนขณะปลูก

ศึกษาความดันของก๊าซออกซิเจนขณะปลูก โดยทำการกำหนดตัวแปรอื่น ๆ ให้มีค่าคงที่ดังตารางที่ 3.3 โดยความดันของก๊าซออกซิเจนขณะปลูกจาก 10⁻³ ถึง 10⁻¹ มิลลิบาร์ และนำฟิล์มที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคต่าง ๆ

ตารางที่ 3.3 แสดงเงื่อนไขในการปลูกฟิล์มบางวานาเดียมออกไซด์ที่ความดันขณะปลูกของก๊าซออกซิเจนแตกต่างกัน

ตัวแปร	เงื่อนไข
ชนิดเป่าสารเคลือบ (ขนาด 1 นิ้ว)	V ₂ O ₅ 99.9%
วัสดุฐานรองรับ	แผ่นควอทซ์และแผ่นเวเฟอร์ SiO ₂ /Si
ความดันก่อนปลูก	7×10 ⁻⁷ มิลลิบาร์
อุณหภูมิวัสดุฐานรองรับ	500 องศาเซลเซียส
พลังงานเลเซอร์ต่อพื้นที่	1.5 จูล/ตารางเซนติเมตร
อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน	0.5 sccm
ความดันขณะปลูก	1×10 ⁻⁶ - 1×10 ⁻¹ มิลลิบาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ศึกษาเท่านั้น ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้ง อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน

3.3 การตรวจสอบสมบัติของฟิล์มบาง

3.3.1 ตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Field emission electron microscope: FE-SEM) ถูกใช้เพื่อตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาและความหนาของฟิล์มที่เตรียมได้ โดยอาศัยการสแกนของลำอิเล็กตรอนและตรวจวัดอิเล็กตรอนลำดับสองที่หลุดออกมาจากพื้นผิว (Secondary electron) ด้วยตัวตรวจวัดและสร้างเป็นภาพ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดในรูปที่ 3.10 ที่ใช้ในการตรวจสอบเป็นของบริษัท HITACHI รุ่น SU-8030

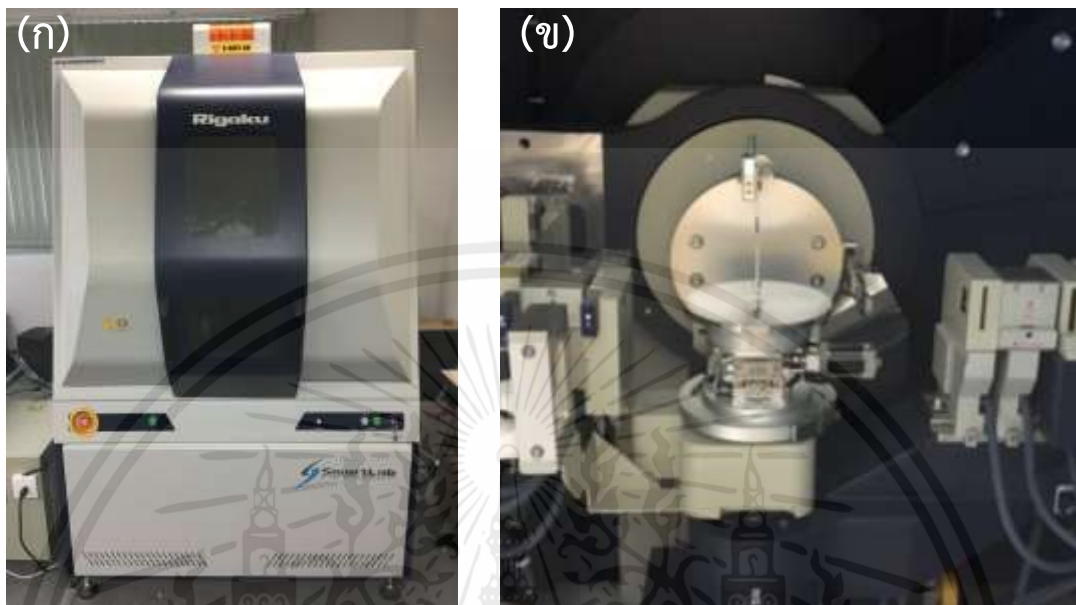


รูปที่ 3.10 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FE-SEM) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

3.3.2 ตรวจสอบความเป็นผลึกด้วยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

การตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction) อาศัยหลักการของการเลี้ยวเบนที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์ กราฟที่ได้จากการตรวจสอบจะเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอกซ์และมุมของการเลี้ยวเบน เมื่อชิ้นงานมีความเป็นผลึกขนาดใหญ่เพียงพอจะเกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ปรากฏที่คี่ขึ้นในกราฟ ธาตุและสารประกอบแต่ละชนิดซึ่งมีระนาบที่ต่างกันจะมีลักษณะรูปแบบการเลี้ยวเบนเฉพาะตัวจึงทำให้สามารถแยกแยะธาตุและสารประกอบจากข้อมูลอ้างอิงได้ ในการตรวจสอบสมบัติทางโครงสร้างผลึกโดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จะใช้เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffractometer: XRD) รุ่น

Smartlab ของบริษัท Rigaku แสดงดังรูปที่ 3.11 โดยใช้แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ชนิด Cu K-alpha ที่ความยาวคลื่น 1.54 อังสตรอม

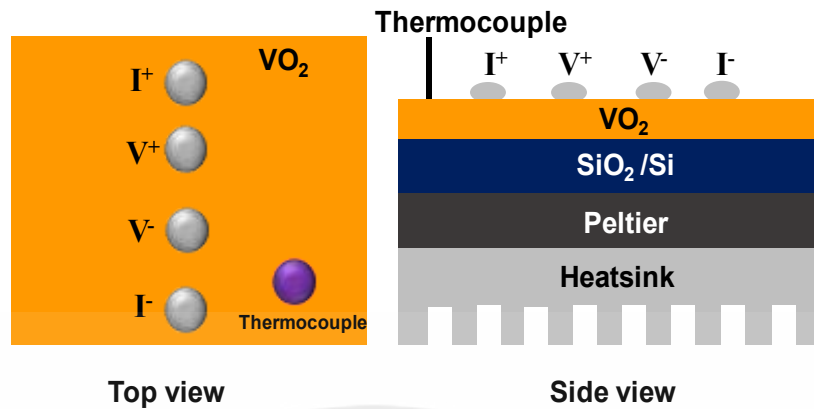


รูปที่ 3.11 (ก) แสดงรูปร่างภายนอกของเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (ข) ลักษณะภายในเครื่อง XRD

3.3.3 การตรวจสอบปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงโลหะ-ฉนวน

ฟิล์มบางที่เตรียมได้จะถูกตรวจสอบปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงโลหะ-ฉนวน (Metal insulator transition) ด้วยการวัดสภาพความต้านทาน (Resistivity) ที่ขึ้นกับอุณหภูมิ อุปกรณ์ในการทดลองแสดงในรูปที่ 3.12 โดยจะทำการต่อขั้วไฟฟ้าด้วยกาวเงิน (Silver paste) ลักษณะเป็นเส้นตรงและตรวจวัดอุณหภูมิด้วยเทอร์โมคัปเปิลชนิด K (Thermocouple type-K) ที่วางอยู่ผิวของชิ้นงาน ภายในระบบการวัดจะใช้แผ่นเพลทีเยร์ (Peltier plate) สำหรับให้ความร้อนขณะวัด ในการวัดสภาพความต้านทานของชิ้นงานจะใช้วิธีเข็มวัด 4 จุด (4 point probe) ซึ่งทำการจ่ายกระแสไฟให้แก่ขั้วไฟฟ้าคู่นอกและวัดความต่างศักย์ที่ขั้วไฟฟ้าคู่ในพร้อมทั้งควบคุมอุณหภูมิของระบบขณะวัด โดยใช้แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า Keithley 6221 และโวลต์มิเตอร์ Keithley 2182A เงื่อนไขในการตรวจสอบปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงโลหะ-ฉนวน แสดงในตารางที่ 3.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 แสดงการวัดปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงโลหะ-ฉนวน

ตารางที่ 3.4 เงื่อนไขในการตรวจสอบสมบัติปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงโลหะ-ฉนวน

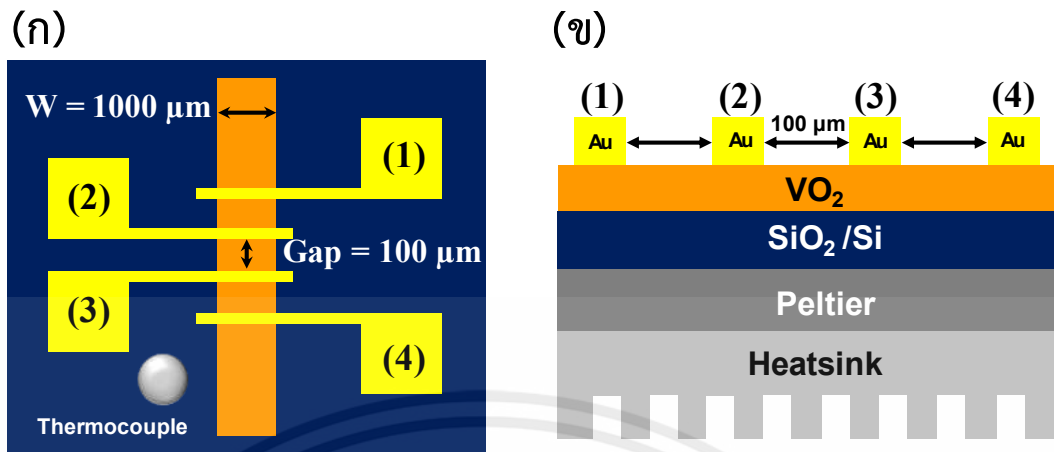
ตัวแปร	เงื่อนไข
ช่วงอุณหภูมิการวัด ($^{\circ}\text{C}$)	5-120 องศาเซลเซียส
อัตราการเพิ่มและลดอุณหภูมิ	10 องศาเซลเซียสต่อนาที
อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม	25 องศาเซลเซียส
กระแสไฟฟ้าที่จ่าย	1 ไมโครแอมป์

3.4 การประยุกต์ใช้งานฟิล์มบางวานาเดียมไดออกไซด์เป็นอุปกรณ์เทอร์มอลสวิตช์ และการควบคุมอุณหภูมิวิกฤตของเทอร์มอลสวิตช์ด้วยสนามไฟฟ้า

3.4.1 การประยุกต์ใช้งานฟิล์มบางวานาเดียมไดออกไซด์เป็นอุปกรณ์เทอร์มอลสวิตช์

ในการประยุกต์ใช้งานฟิล์มบาง $\text{VO}_2(\text{M})$ เป็นอุปกรณ์เทอร์มอลสวิตช์ ฟิล์มบางจะถูกทำให้เป็นลวดลายแบบเส้นด้วยเทคนิคการถ่ายทอดลวดลายด้วยแสง (Photolithography) และการกัดด้วยสารละลาย (Wet-etching method) สารไวแสงชนิดบวก PFI-38 ของบริษัท Sumitomo-chemical ถูกเคลือบลงบนฟิล์มบาง $\text{VO}_2(\text{M})$ ด้วยเครื่องเคลือบผิวแบบปั่นเวียง (Spin coater) หน้ากาก (Shadow Mask) ที่มีความกว้างของช่อง (Channel) 1,000 ไมโครเมตร จะถูกวางลงบนชิ้นงานและฉายด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet : UV) ของปรอท ด้วยพลังงาน 150 มิลลิจูล จากนั้นนำชิ้นงานล้างด้วยน้ำยาล้างลาย (Developer) ในการกัดด้วยสารละลายกรดไนตริก (Nitric

acid) ความเข้มข้น 1 โมลาร์ เป็นเวลา 2 นาที และล้างด้วยอะซิโตนจึงได้ฟิล์มบางที่มีลวดลายที่ต้องการ ไม่ว่าจะพิมพ์ด้วยวิธีใดก็ตาม ก็ทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 (ก)แสดงลักษณะของลวดลายขั้วไฟฟ้าและการออกแบบชิ้นงาน (ข)แสดงระบบการวัดอุปกรณ์เทอร์โมลสวิตช์ที่ขึ้นกับความร้อน

สำหรับลวดลายของฟิล์มทองที่ถูกใช้เป็นขั้วไฟฟ้าแสดงในรูปที่ 3.13 (ก) โดยมีระยะระหว่างขั้ว 100 ไมโครเมตร ฟิล์มทองที่ถูกใช้เป็นขั้วไฟฟ้ามีความหนา 250 นาโนเมตร ซึ่งเคลือบด้วยวิธีการสปัตเตอร์ริง (DC Sputtering) การทดสอบสมบัติปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงโลหะ-ฉนวนและการตอบสนองของอุปกรณ์เทอร์โมลสวิตช์จะใช้ระบบในรูปที่ 3.13(ข) สำหรับเงื่อนไขในการทดสอบจะใช้เงื่อนไขเช่นเดียวกับหัวข้อที่ 3.3.3 โดยใช้แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า Keithley 6221 จ่ายขั้วไฟฟ้าที่ 1 และ 4 และวัดศักย์ไฟฟ้าที่ขั้ว 2 และ 3 ด้วยโวลต์มิเตอร์ Keithley 2182A

3.4.2 การควบคุมอุณหภูมิวิกฤตของเทอร์โมลสวิตช์ด้วยสนามไฟฟ้าภายนอก

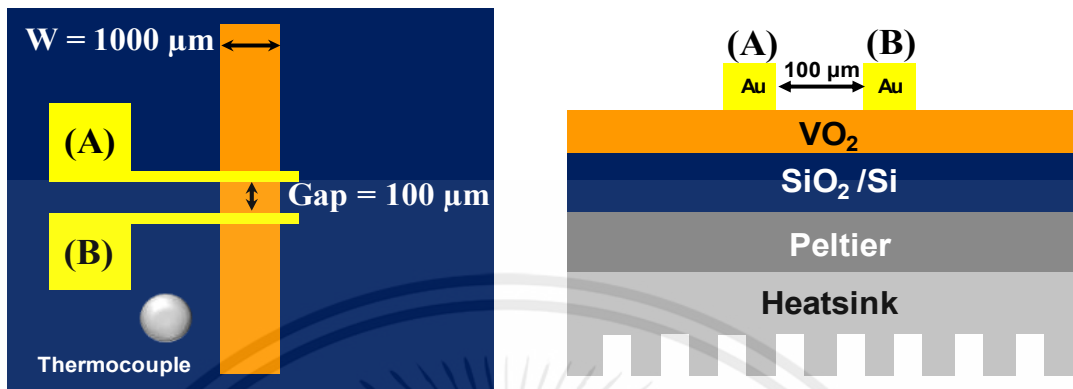
ในการศึกษาการควบคุมอุณหภูมิวิกฤตของเทอร์โมลสวิตช์ด้วยสนามไฟฟ้าภายนอกจะทำการจ่ายศักย์ไฟฟ้าที่ขั้ว 1 และ 4 และตรวจวัดกระแสไฟฟ้าผ่านขั้วที่ 2 และ 3 ในรูปที่ 3.13 (ก) และให้ความร้อนขณะทำการวัดโดยใช้เครื่อง LCR มิเตอร์ E4980A ของบริษัท Agilent ในโหมด I-V ซึ่งให้ศักย์ไฟฟ้าตั้งแต่ 0.1-40 โวลต์ โดยเงื่อนไขการตรวจวัดแสดงดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 เงื่อนไขในการตรวจสอบสมบัติปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงโลหะ-ฉนวนของอุปกรณ์เทอร์โมลสวิตช์

ตัวแปร	เงื่อนไข
ช่วงอุณหภูมิการวัด (°C)	5-120 องศาเซลเซียส
อัตราการเพิ่มและลดอุณหภูมิ	10 องศาเซลเซียสต่อนาที
อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม	25 องศาเซลเซียส
ศักย์ไฟฟ้าที่ให้	0.1-40 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าพระยา โดยอนุญาตให้ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกสิ่งนี้ไปและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารนี้ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ยังทำการทดสอบการใช้งานจริงของอุปกรณ์เทอร์มอลสวิตช์โดยทำการลดชั่วไฟฟ้าให้เหลือเพียงสองขั้วดังแสดงในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 แสดงลักษณะของชั่วไฟฟ้าในการประยุกต์ใช้งานจริงของอุปกรณ์เทอร์มอลสวิตช์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

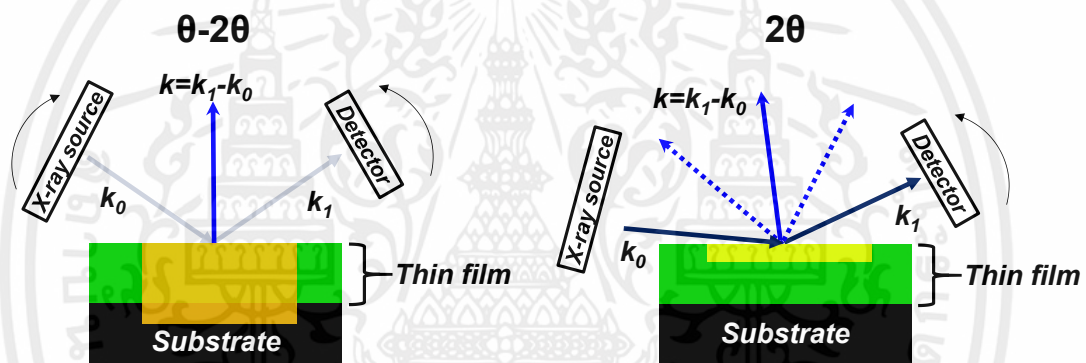
เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงการตรวจสอบ การจำแนกเฟสและการวิเคราะห์สมบัติของฟิล์มบางวานาเดียมออกไซด์ (Vanadium oxide) เพื่อให้ได้ฟิล์มบางวานาเดียมไดออกไซด์เฟสโมโนคลินิก (Monoclinic Vanadium dioxide; $\text{VO}_2(\text{M})$) ที่สามารถแสดงปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงโลหะ - ฉนวนจากระบบประเหยสารด้วยลำเลเซอร์แบบพัลส์ (Pulsed Laser Deposition; PLD) เพื่อประยุกต์ใช้งานเป็นอุปกรณ์เทอร์โมลสวิตช์

ในหัวข้อที่ 4.1 ถึง 4.3 จะเป็นการศึกษาการเตรียมฟิล์มบาง $\text{VO}_2(\text{M})$ ที่สามารถแสดงปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงโลหะ - ฉนวนได้ จากเทคนิค PLD โดยใช้สารวานาเดียมเพนออกไซด์ (Vanadium pentoxide; V_2O_5) เป็นเป้าสารเคลื่อน (Target) ในการเตรียมฟิล์ม $\text{VO}_2(\text{M})$ ที่มีความบริสุทธิ์สูง (Single phase crystal) มีความท้าทายในการเตรียม อยู่ 2 ประการคือ (1) ธาตุวานาเดียมมีเลขออกซิเดชันหลายค่า (Multi oxidation) ทำให้เกิดการก่อตัวของเฟสของวานาเดียมออกไซด์หลากหลายเฟส ซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างอะตอมของวานาเดียมและออกซิเจน (V:O) และ (2) วานาเดียมไดออกไซด์ (Vanadium dioxide; VO_2) มีหลากหลายอัญรูป (Polymorphism) กล่าวคือมีอัตราส่วนของอะตอม V:O เท่ากันแต่มีโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกันเช่น $\text{VO}_2(\text{A})$, $\text{VO}_2(\text{B})$ และ $\text{VO}_2(\text{M})$ เป็นต้น ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าควบคุม forming energy ของระบบ จากเหตุผลทั้ง 2 ประการทำให้การเตรียม $\text{VO}_2(\text{M})$ ที่มีความบริสุทธิ์สูงโดยเฉพาะในรูปแบบของฟิล์มเป็นไปได้ยากลำบาก ในงานนี้มีจึงทำการศึกษาตัวแปรภายในระบบ PLD ที่ส่งผลต่ออัตราส่วนของอะตอม V:O และ forming energy คืออุณหภูมิวัสดุฐานรองรับและความดันของก๊าซออกซิเจนขณะเคลือบบนเวเฟอร์ SiO_2/Si wafer และแผ่นควอตซ์ (Fused quartz) ส่วนหัวข้อที่ 4.4 และ 4.5 จะเป็นผลการทดลองของการประยุกต์ใช้งานฟิล์มบาง $\text{VO}_2(\text{M})$ ที่เตรียมได้เป็นอุปกรณ์เทอร์โมลสวิตช์ การตอบสนองต่อความร้อนและการชดเชยพลังงานเพื่อควบคุมอุณหภูมิวิกฤตของอุปกรณ์เทอร์โมลสวิตช์ผ่านทางสนามไฟฟ้าภายนอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1 ผลกระทบของอุณหภูมิวัสดุฐานรองรับที่แตกต่างกันต่อการปลูกฟิล์มบาง วานาเดียมออกไซด์

อุณหภูมิวัสดุฐานรองรับเป็นตัวแปรที่ควรพิจารณาเป็นอันดับแรกในการเตรียมวัสดุที่ต้องการ ความเป็นผลึกสูง ในการทดลองนี้จะทำการหาอุณหภูมิวัสดุฐานรองรับที่เหมาะสมต่อการก่อตัวของฟิล์มบาง VO_2 ตั้งแต่อุณหภูมิห้อง (ไม่ให้ความร้อน) จนถึง 600 องศาเซลเซียสที่ความดันของก๊าซออกซิเจน 5×10^{-2} มิลลิบาร์ ฟิล์มบางที่เตรียมได้จะถูกตรวจสอบเฟสและความเป็นผลึกด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ใน 2 โหมด (1) โหมด $\theta-2\theta$ ซึ่งบ่งบอกถึงการจัดเรียงตัวของระนาบผลึกในทิศทางตั้งฉากกับฐานรองรับเท่านั้น และ (2) โหมด 2θ ซึ่งบ่งบอกถึงการจัดเรียงตัวของระนาบผลึกในทุกทิศทางในช่วงความหนาที่จำกัดจากพื้นผิวซึ่งมาจากการกำหนดมุมตกกระทบไว้ที่ค่าต่ำประมาณ 0.3 องศา แสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะการวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ในโหมด $\theta-2\theta$ และโหมด 2θ ซึ่งจะเห็นได้ว่าโหมด $\theta-2\theta$ จะให้ข้อมูลเฉพาะที่ตั้งฉากกับฐานรองรับเท่านั้น

เมื่อพิจารณาอุณหภูมิวัสดุฐานรองรับที่เพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิห้องไปถึง 600 องศาเซลเซียส รูปที่ 4.2 (ก) และ(ข) ฟิล์มบางที่อุณหภูมิห้องมีโครงสร้างผลึกแบบอสัณฐาน (amorphous) กล่าวคือไม่มีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เกิดขึ้นแตเมื่อนำมาวิเคราะห์ด้วยสเปกตรัมของรามานจะพบพีคที่เลขคลื่น 149 และ 283 ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของ V_2O_5 ทำให้สามารถสรุปได้ว่าพลังงานของอะตอมสารเคลือบมีพลังงานไม่เพียงพอในการก่อเกิดผลึก แต่เมื่อให้พลังงานต่อระบบมากขึ้นเป็น 200 องศาเซลเซียส จะเกิดผลึกของ V_2O_5 ขึ้นที่ระนาบ (010) ที่มีมุมประมาณ 20.21 องศา เมื่ออุณหภูมิวัสดุฐานรองรับสูงขึ้นถึง 300 และ 400 องศาเซลเซียส เกิดระนาบผลึกใหม่ของ V_2O_5 ที่ระนาบผลึก (200) (110) (400) และ (020) ที่มีมุม 15.39 องศา 21.74 องศา 31.07 องศา และ 41.30 องศาตามลำดับโดยเห็นได้อย่างชัดเจนจากการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ในโหมด 2θ รูปที่ 4.2 (ข) เมื่อเทียบระนาบที่เกิดขึ้นของ V_2O_5 กับตารางที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าสอดคล้องกับพลังงานพื้นผิว (Surface energy) ที่อุณหภูมิวัสดุฐานรองรับ 200 องศาเซลเซียสจะเกิดระนาบ (010) ขึ้นก่อนเนื่องจากพลังงานพื้นผิวต่ำสุด หลังจากนั้นเมื่อ

อุณหภูมิวัสดุฐานรองรับสูงขึ้นจะส่งผลให้ระบบมีพลังงานมากพอในการเกิดระนาบอื่น ๆ ของ V_2O_5 เมื่ออุณหภูมิวัสดุฐานรองรับสูงถึง 500 องศาเซลเซียส เกิดเฟสผสมของ V_2O_5 ไตรวานาเดียมเฮปตะออกไซด์ (Trivanadium heptaoxide; V_3O_7) และ $VO_2(B)$ ซึ่งเป็นอัญรูปหนึ่งของ VO_2 ที่เกิดขึ้นในสิ่งแวดล้อมที่มีปริมาณออกซิเจนในระบบมาก [26]

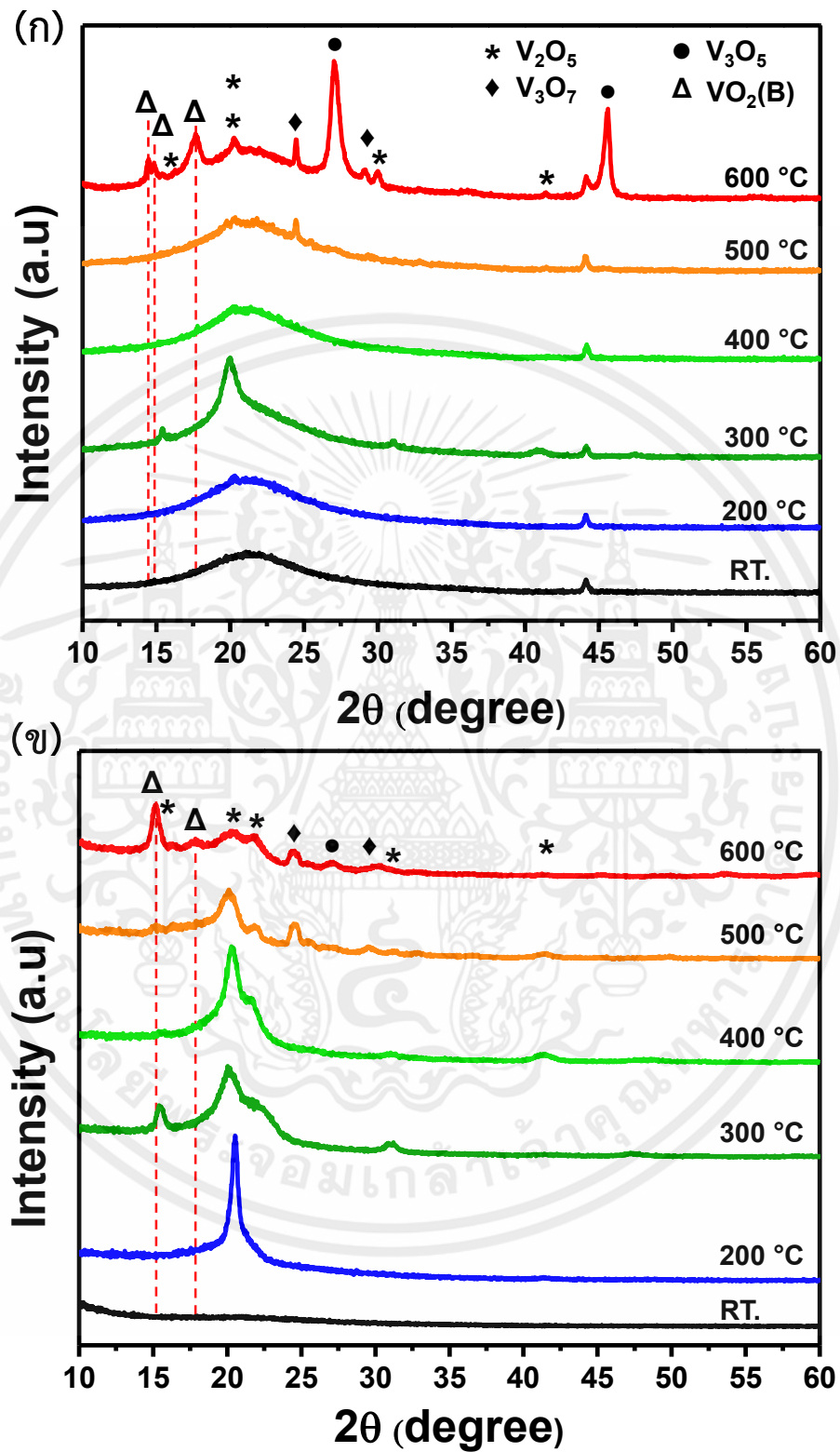
ตารางที่ 4.1 แสดงระนาบผลึกของ V_2O_5 กับพลังงานพื้นผิว [27]

ระนาบ	พลังงานพื้นผิว (จูล/ตารางเมตร)
(010)	0.7
(200)	1.5
(110)	1.6
(400)	1.8
(211)	2.2

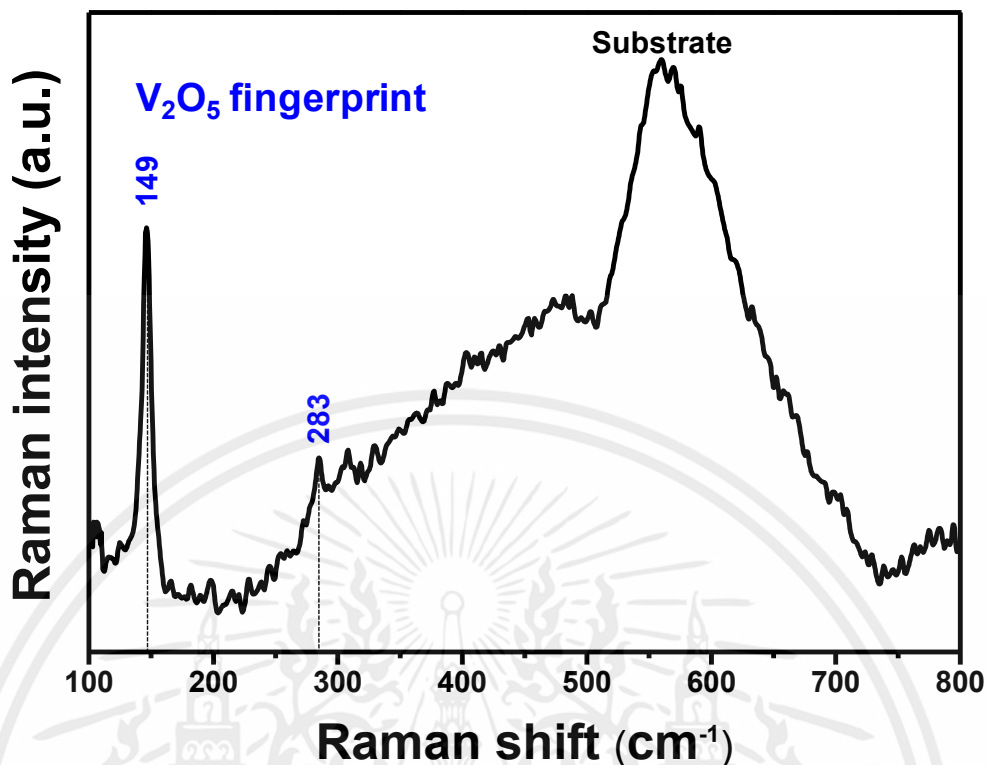
ตารางที่ 4.2 แสดงอัตราส่วนระหว่างวานาเดียมกับออกซิเจนของวานาเดียมออกไซด์เฟสต่าง ๆ พลังงานในการก่อตัว และฐานข้อมูลของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ใช้เปรียบเทียบ[28]

V_xO_y	VO_x	กลุ่มปริภูมิ	พลังงานในการก่อตัว (อิเล็กตรอนโวลต์ต่ออะตอม)	เลขที่ฐานข้อมูลของ การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์
V_2O_5	$VO_{2.50}$	Pmnm	-2.3034	01-072-0598
V_3O_7	$VO_{2.33}$	C2/c	-2.3727	01-071-0454
$VO_2(B)$	$VO_{2.00}$	C2/m	-2.4655	01-001-2002
$VO_2(M)$	$VO_{2.00}$	P42/mnm	-2.4856	01-081-2392
V_3O_5	$VO_{1.67}$	P2/c	-2.5219	00-030-1424

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 4.2 (ก)รูปแบบการเลี้ยวรังสีเอกซ์ในโหมดสแกน $\theta-2\theta$ และ(ข)โหมดสแกน 2θ ของฟิล์ม
ไม่ว่ากรณีใดก็ตามสงวนลิขสิทธิ์ไว้และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งหากมีการนำไปใช้
บางวามานาเดียมออกไซด์ที่เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิวัสดุฐานรองรับ



รูปที่ 4.3 รามานสเปกตรัมของฟิล์มบางที่เตรียมในอุณหภูมิห้องบนแผ่นควอทซ์

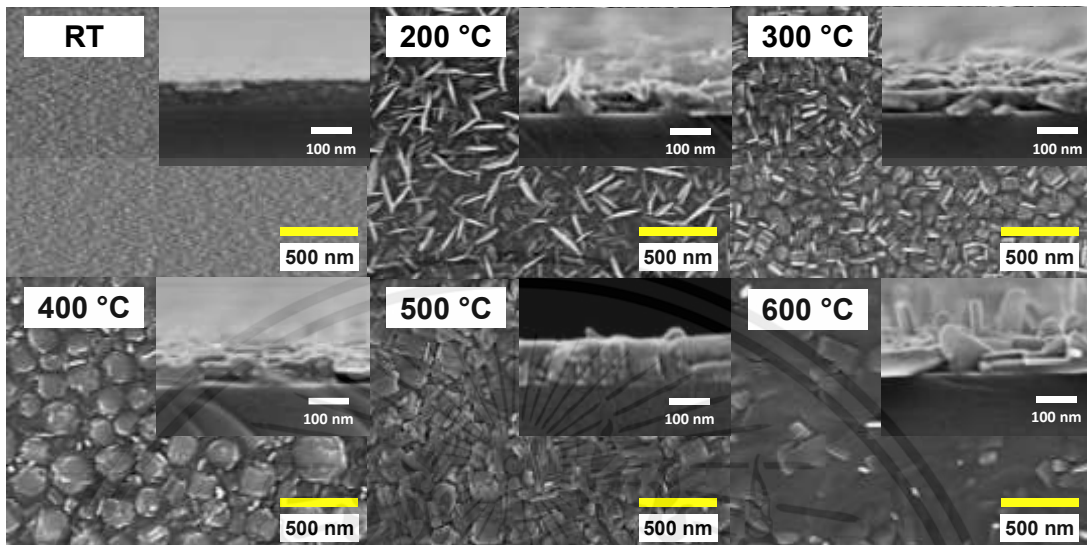
หลังจากเพิ่มอุณหภูมิวัสดุฐานรองรับจนถึง 600 องศาเซลเซียส พบเฟสใหม่คือไตรวานาเดียมเพนทอกไซด์ (Trivanadium pentoxide; V_3O_5) ซึ่งมีความเข้มของพีคสูงสุดในโหมด $\theta-2\theta$ รูปที่ 4.2 (ก) ที่อุณหภูมิของวัสดุฐานรองรับ 600 องศาเซลเซียส จะมีเฟส V_3O_5 เป็นเฟสหลัก กล่าวคือภายในเนื้อฟิล์มบางประกอบไปด้วยผลึกของเฟส V_3O_5 เป็นส่วนมาก แต่ที่ผิวของฟิล์มมี $VO_2(B)$ เป็นเฟสหลักซึ่งเห็นได้จากความเข้มของพีคในโหมด 2θ รูปที่ 4.2 (ข) เมื่อพิจารณาพลังงานในการก่อตัว (Forming energy) ในตารางที่ 4.2 การเพิ่มอุณหภูมิของวัสดุฐานรองรับจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสจากเฟสที่มีพลังงานในการก่อตัวน้อยเป็นเฟสที่มีพลังงานในการก่อตัวมาก

สัญญาณวิทยาของฟิล์มบางวานาเดียมออกไซด์แสดงดังรูปที่ 4.4 สำหรับฟิล์มวานาเดียมออกไซด์ที่เตรียมที่อุณหภูมิห้องมีลักษณะของขนาดเกรน (Surface grain) ที่เล็กซึ่งเป็นลักษณะพื้นผิวของของแข็งอสัณฐาน เมื่ออุณหภูมิของวัสดุฐานรองรับเพิ่มขึ้นพื้นผิวของฟิล์มบางจะมีลักษณะแบบ granular structure และมีขนาดเพิ่มตามอุณหภูมิของวัสดุฐานรองรับ จนกระทั่งอุณหภูมิของวัสดุฐานรองรับถึง 500 องศาเซลเซียส ซึ่งเกิดเฟสผสมของผลึก V_2O_5 V_3O_7 และ $VO_2(B)$ ในฟิล์มบาง ลักษณะพื้นผิวจะมีลักษณะแบบแท่งยาวและมีการรวมตัวกันเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิของวัสดุฐานรองรับสูงถึง 600 องศาเซลเซียส ซึ่งสอดคล้องกับงานของ C.V. Ramana ที่ทำการศึกษาการปลูกฟิล์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม ฟิล์มบางวานาเดียมออกไซด์ที่อุณหภูมิของวัสดุฐานรองรับ 30-500 องศาเซลเซียส จากระบบ PLD เมื่อ

อุณหภูมิของวัสดุฐานรองรับสูงขึ้นจนถึง 500 องศาเซลเซียส จะทำให้พื้นผิวมีลักษณะขนาดเกรนที่ใหญ่ขึ้นจนมีลักษณะคล้ายแท่งยาว [29]



รูปที่ 4.4 แสดงรูปถ่ายลักษณะพื้นผิวของฟิล์มวานาเดียมออกไซด์จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่อุณหภูมิวัสดุฐานรองรับแตกต่างกัน ณ. ความดันของออกซิเจน 5×10^{-2} มิลลิบาร์

การเพิ่มอุณหภูมิของวัสดุฐานรองรับเป็นการเพิ่มพลังงานความร้อนให้แก่อะตอมหรือสารเคลือบ (Adatom) ที่วิ่งเข้าสู่ฐานรองรับส่งผลให้เกิดการตกผลึกซ้ำ (Recrystallization) ของสารเคลือบเกิดเป็นผลึกของ V_2O_5 ซึ่งจะเห็นได้จากผลการทดลองข้างต้น เมื่ออุณหภูมิของวัสดุฐานรองรับเพิ่มสูงขึ้นถึง 300 และ 400 องศาเซลเซียส ความร้อนที่เกิดขึ้นมากพอจะส่งผลให้ฟิล์มบางเกิดระนาบผลึกอื่น ๆ เพิ่มเติม จนกระทั่งอุณหภูมิของวัสดุฐานรองรับสูงขึ้นถึง 500 องศาเซลเซียส และ 600 องศาเซลเซียส จะเกิดปฏิกิริยา (Reaction) ของสารเคลือบมีการหลุดออกของออกซิเจนส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนทางเคมี (Composition stoichiometry) เกิดเฟสผสมที่มีสถานะออกซิเดชันน้อยกว่า V_2O_5 กล่าวคือมีการหายไปหรือหลุดออกของออกซิเจนขณะทำการเคลือบ เนื่องจากจุดหลอมเหลวของ V_2O_5 มีค่าต่ำ

เมื่อพิจารณารูปถ่ายที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางที่เตรียมได้นั้นการเพิ่มอุณหภูมิของวัสดุฐานรองรับยังส่งผลต่อสัณฐานวิทยาของฟิล์มบางซึ่งสังเกตได้จากรูปที่ 4.3 อุณหภูมิของวัสดุฐานรองรับ 200 องศาเซลเซียส ฟิล์มจะมีลักษณะเป็นก้อนเกรนและลักษณะแผ่น (Plate) ปนกันอยู่บนพื้นผิว แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของวัสดุฐานรองรับเพิ่มขึ้น (300-400 องศาเซลเซียส) ลักษณะเป็นก้อนเกรนจะมีขนาดใหญ่ขึ้นและลักษณะแผ่นของฟิล์มบางจะลดลงอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งมาจากการเพิ่มขึ้นของสภาพการเคลื่อนที่ได้ (Surface mobility) ของอะตอมหรือสารเคลือบ (Adatom) บนพื้นผิว อย่างไรก็ตามเมื่ออุณหภูมิของวัสดุฐานรองรับเพิ่มจนถึง 600 องศาเซลเซียส จะเกิด

โครงสร้างคล้ายแท่งเกิดขึ้นบนผิวซึ่งคาดว่ามาจากการระเหยออก (Evaporation) ของ V_2O_5 ที่มีความดันไอ (Vapor Pressures) ต่ำประมาณ 609 องศาเซลเซียสที่ความดัน 10^{-2} มิลลิบาร์ จากการเพิ่มอุณหภูมิของวัสดุฐานรองรับจะส่งผลให้เกิดการแข่งขันของกลไกทั้ง 4 ในรูปที่ 2.9 โดยในช่วงแรกการแพร่บนพื้นผิว (Surface diffusion) จะมีอิทธิพลมากที่สุดจนกระทั่งอุณหภูมิถึง 500 องศาเซลเซียส การเกิดปฏิกิริยา (Reaction) จะมีผลมากที่สุดแทน อย่างไรก็ตามจากตารางที่ 2.1 V_3O_5 มีเลขออกซิเดชันอยู่ระหว่าง 3+ และ 4+ แต่ VO_2 มีเลขออกซิเดชันอยู่ที่ 4+ กล่าวคือที่อุณหภูมิของฐานรองรับ 600 องศาเซลเซียสฟิล์มบางมีเฟสที่มีสถานะออกซิเดชันต่ำกว่า VO_2 ที่ต้องการจึงทำการศึกษาความดันของออกซิเจนขณะเคลือบเพื่อควบคุมปริมาณของออกซิเจนที่กระทำปฏิกิริยากับอะตอมสารเคลือบ

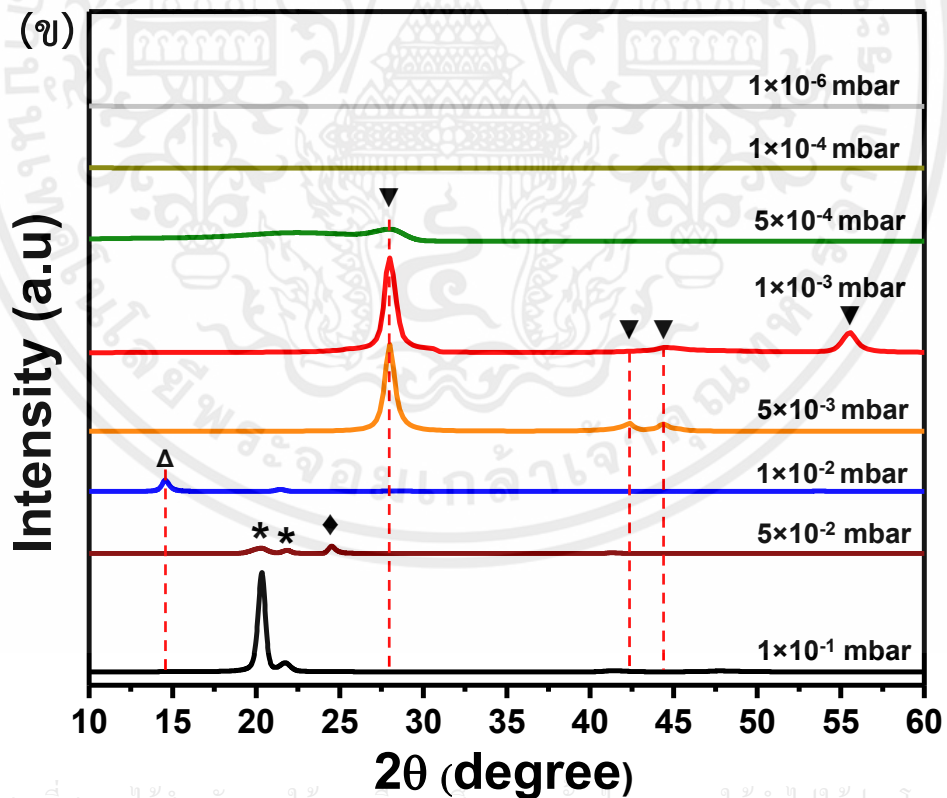
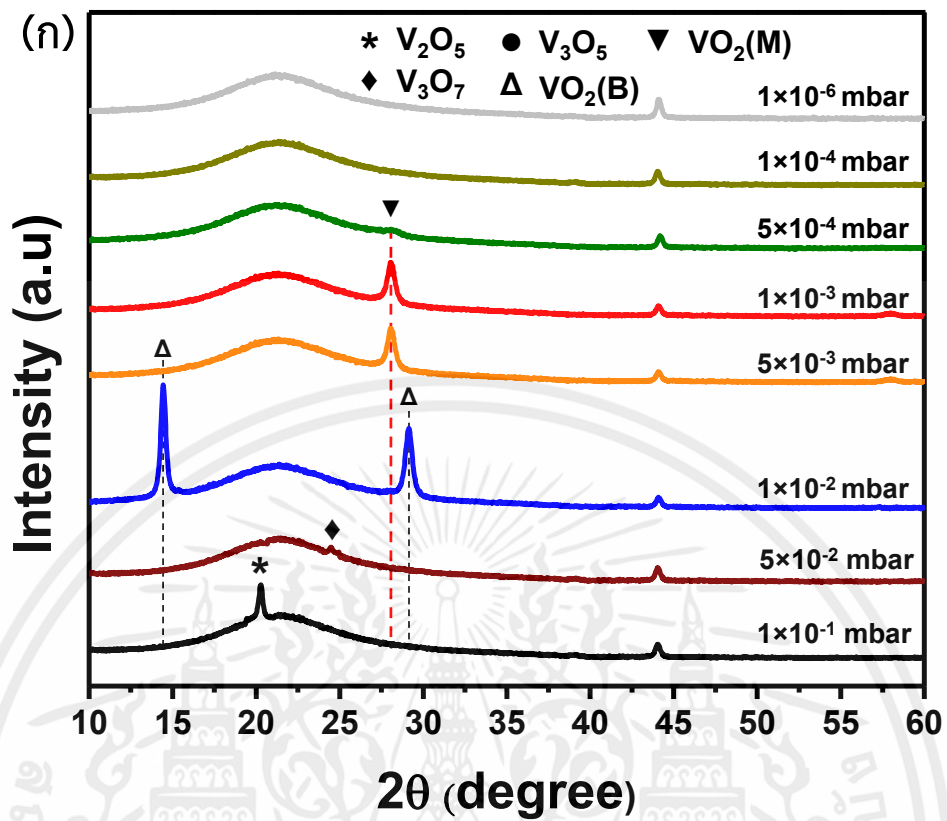


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลกระทบของความดันของก๊าซออกซิเจนขณะปลูกที่แตกต่างกันต่อการปลูกฟิล์มบางวานาเดียมออกไซด์

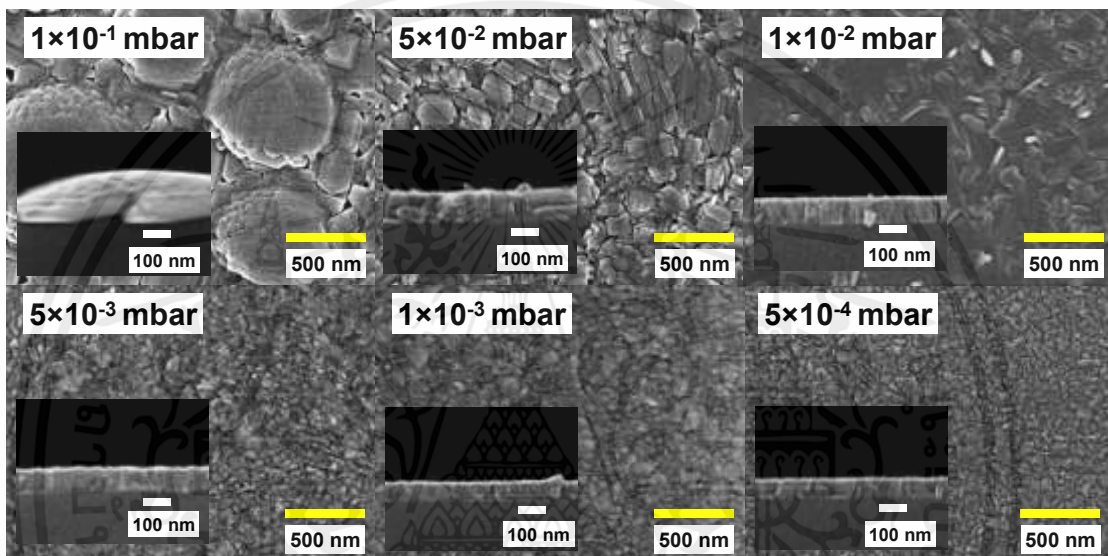
ความดันของก๊าซออกซิเจนขณะปลูกเป็นตัวแปรที่สำคัญอีกตัวหนึ่งในการควบคุมปริมาณออกซิเจนของฟิล์มที่ได้ ในการทดลองนี้จะทำการลดความดันของก๊าซออกซิเจนขณะปลูกจาก 1×10^{-1} มิลลิบาร์ ถึง 1×10^{-6} มิลลิบาร์ โดยให้อุณหภูมิแก๊วมาตรฐานรองรับที่ 500 องศาเซลเซียส เนื่องมาจากฟิล์มบางที่ได้ในหัวข้อที่ 4.1 มีปริมาณเฟสวานาเดียมออกไซด์ที่มีสถานะออกซิเดชันสูงกว่า 4+ อยู่มาก ประกอบกับ $VO_2(B)$ ที่พบเป็นเฟสกึ่งเสถียร (Metastable state) ของ VO_2 ในระบบที่มีปริมาณออกซิเจนขณะเตรียมเป็นปริมาณมาก จึงทำการลดปริมาณออกซิเจนขณะเคลือบในการทดลองนี้ เมื่อนำฟิล์มบางที่เตรียมด้วยความดันของออกซิเจนต่าง ๆ มาตรวจสอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์แสดงดังรูปที่ 4.5 ที่ความดันของก๊าซออกซิเจนขณะปลูกมีค่า 1×10^{-1} มิลลิบาร์ ฟิล์มบางแสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของ V_2O_5 ระนาบ (010) ที่มุม 20.21 องศา และระนาบ (110) ที่มุม 21.74 องศา และเมื่อความดันของก๊าซออกซิเจนขณะปลูกลดลง ความเข้มของพีคที่ระนาบ (010) และ (110) ของ V_2O_5 มีค่าลดลงและหายไปที่ความดันของก๊าซออกซิเจนขณะปลูก 1×10^{-2} มิลลิบาร์ จากนั้นปรากฏรูปแบบการเลี้ยวเบนใหม่ของเฟส V_3O_5 ที่มุม 24.5 องศาซึ่งสอดคล้องกับระนาบ (111) และเฟส $VO_2(B)$ ที่มุม 14.38 องศา และ 29.01 องศา ตรงกับระนาบ (001) และ (002) ตามลำดับ เมื่อความดันของก๊าซออกซิเจนขณะปลูกลดลงไปจนถึง 5×10^{-3} มิลลิบาร์ เกิดพีคการเลี้ยวเบนใหม่ที่มุม 28.10 องศา และ 57.94 องศา ซึ่งตรงกับระนาบ (011) และ (022) ของ $VO_2(M)$ ที่มีโครงสร้างผลึกแบบโมนอกลิติก นอกจากนี้ยังพบพีคเล็กที่มุม 39.78 องศา และ 44.81 องศา ซึ่งตรงกับระนาบ (002) และ (021) อีกด้วย หลังจากลดความดันของออกซิเจนจนถึง 1×10^{-3} มิลลิบาร์ จากข้อมูลของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในโหมด 2θ ซึ่งบ่งบอกถึงการจัดเรียงตัวของระนาบผลึกในทุกทิศทางในช่วงความหนาที่จำกัดจากพื้นผิวแสดงให้เห็นว่าที่ความดันระหว่าง 1×10^{-3} ถึง 5×10^{-3} พบเพียงผลึกของ $VO_2(M)$ เพียงเฟสเดียวเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 4.5 (ก)รูปแบบการเลี้ยวรังสีเอกซ์ในโหมดสแกน $\theta-2\theta$ และ(ข) 2θ ของฟิล์มบางวา
ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม ผู้ใช้ต้องรับผิดชอบต่อการใช้งาน และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสาร ระบุครั้งที่มีการนำไปใช้
นาเดียมออกไซด์ที่เปลี่ยนแปลงความดันของออกซิเจนที่อุณหภูมิฐานรองรับ 500 องศาเซลเซียส

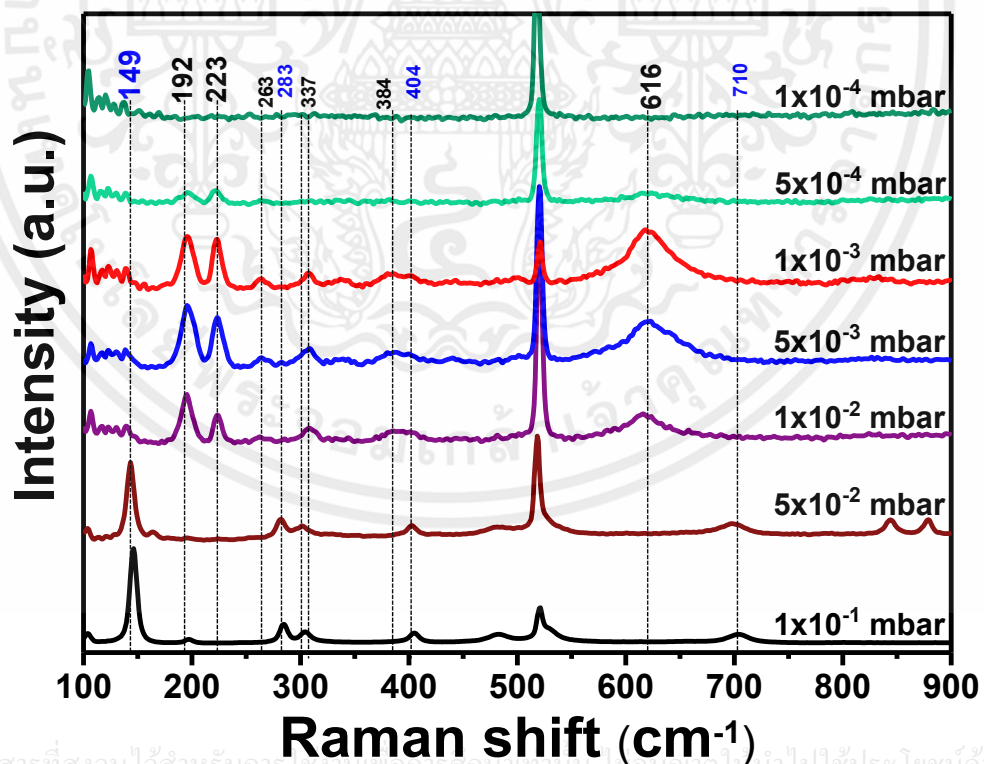
รูปที่ 4.6 แสดงลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางวานาเดียมออกไซด์ที่ความดันของออกซิเจนค่าต่าง ๆ ที่ความดันของออกซิเจนขณะเคลือบมีค่าสูงพื้นผิวมีลักษณะแบบ granular structure ขนาดของเกรนมีขนาดใหญ่เมื่อความดันลดลงขนาดของเกรนมีขนาดลดลงอย่างชัดเจน ซึ่งสอดคล้องกับงานของ L.L. Fan ของที่ทำการศึกษาความดันของออกซิเจนในการเตรียมฟิล์มบาง VO_2 บนผลึกเดี่ยวอลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminum oxide; Al_2O_3) ในช่วงความดันออกซิเจนที่มีค่าสูงจะพบฟิล์มบาง $\text{VO}_2(\text{B})$ และมีขนาดเกรนที่ใหญ่ ในขณะที่ความดันของออกซิเจนมีค่าต่ำ ลงจะพบฟิล์มบางในเฟส $\text{VO}_2(\text{M})$ และมีขนาดเกรนที่เล็ก [26]



รูปที่ 4.6 แสดงรูปถ่ายลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางวานาเดียมออกไซด์จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่ความดันของออกซิเจน แตกต่างกัน ณ. อุณหภูมิวัสดุฐานรองรับ 500 องศาเซลเซียส

การลดความดันของออกซิเจนขณะเคลือบส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเฟสที่เกิดขึ้นอันเนื่องมาจากปริมาณของออกซิเจนที่คงอยู่ในระบบลดน้อยลงเป็นผลให้การเข้าทำปฏิกิริยาของออกซิเจนมีค่าต่ำลง หรืออัตราส่วนอะตอมของ V:O มีค่าเพิ่มขึ้น จาก V_2O_5 ที่มีเลขออกซิเดชัน 5+ เปลี่ยนแปลงเป็นเฟสผสมของสารที่มีเลขออกซิเดชันระหว่าง 5+ กับ 4+ จนกระทั่งเป็นเฟสเดี่ยวของ $\text{VO}_2(\text{M})$ ที่มีเลขออกซิเดชันเป็น 4+ นอกจากนี้ในมุมมองทางพลศาสตร์การลดลงของความดันออกซิเจนขณะเคลือบยังส่งผลต่อสัณฐานวิทยาของฟิล์มที่ได้ ที่ความดันของออกซิเจนสูง (10^{-1} มิลลิบาร์) อะตอมของสารเคลือบที่ถูกระเหิดขึ้นขึ้นมาจากเป้าจะชนกับก๊าซปริมาณมากทำให้พลังงานต่ออะตอม (Energy per atom) ของสารเคลือบลดลง และความสูงของพลาสมาพอลุ่มจะมีค่าต่ำ ส่งผลให้สภาพการเคลื่อนที่ได้ของอะตอมหรือสารเคลือบบนผิวของฟิล์มมีค่าต่ำ ขนาดเกรนของผลึกจึงมีขนาดใหญ่ แต่เมื่อลดความดันของออกซิเจนลงขนาดเกรนบนผิวจะมีค่าลดลงซึ่งเป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ได้ของอะตอมที่สูงขึ้นของอะตอม อย่างไรก็ตามความหนาของฟิล์มบางมีค่าลดลงเมื่อ

ความดันของออกซิเจนลดลงซึ่งมีความเป็นไปได้อยู่ 3 กรณี (1) การเปลี่ยนแปลงระบบผลึกที่ปริมาตรของหน่วยเซลล์ (Unit Cell) มีค่าต่ำลง โดย V_2O_5 มีปริมาตรของหน่วยเซลล์อยู่ที่ 200.531 \AA^3 $VO_2(B)$ มีปริมาตรของหน่วยเซลล์อยู่ที่ 144.169 \AA^3 และ $VO_2(M)$ ปริมาตรของหน่วยเซลล์อยู่ที่ 61.942 \AA^3 [30-32] อย่างไรก็ตามสำหรับคำอธิบายนี้สามารถอธิบายการลดลงของความหนาฟิล์มบางได้เพียงแค่ช่วงแรกที่มีการเปลี่ยนแปลงเฟสอย่างชัดเจนเท่านั้น (2) กระบวนการ Re-sputtering เมื่ออะตอมสารเคลือบซึ่งมีพลังงานจลน์สูงมากพอจะสามารถชนสารเคลือบที่อยู่บนผิวและหลุดออกจากฐานรองรับได้ โดยการเกิดกระบวนการนี้จะส่งผลให้ผิวหน้าของฟิล์มบางลักษณะที่แตกต่างไปคือมีรอยการถูกกัดออก (Etching) หรือโครงสร้างของฟิล์มมีการแพ็คตัวกันมากขึ้น [33] ซึ่งจากรูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดไม่พบร่องรอยของการถูกกัดออก และการแพ็คตัวของฟิล์มบางเพิ่มขึ้น (3) การระเหยออกของสารเคลือบ (Evaporation) เนื่องจากสารเคลือบ V_2O_5 มีความดันไอต่ำ ดังที่ได้กล่าวในหัวข้อที่ 4.1 ส่งผลให้อะตอมของสารเคลือบที่วิ่งเข้าสู่ผิววัสดุฐานรองรับถูกระเหยออก ฟิล์มบางที่สังเกตเห็นจึงเป็นการแข่งขันระหว่างสารเคลือบที่วิ่งเข้าสู่ผิววัสดุฐานรองรับและการระเหยออกของสารเคลือบ ดังนั้นการลดลงของความหนาของฟิล์มบางในช่วงความดันออกซิเจนสูง (1×10^{-1} มิลลิบาร์) กรณีที่ (1) จะมีอิทธิพลมากที่สุด หลังจากนั้นเมื่อความดันลดลงกรณี (3) จะมีอิทธิพลมากที่สุด



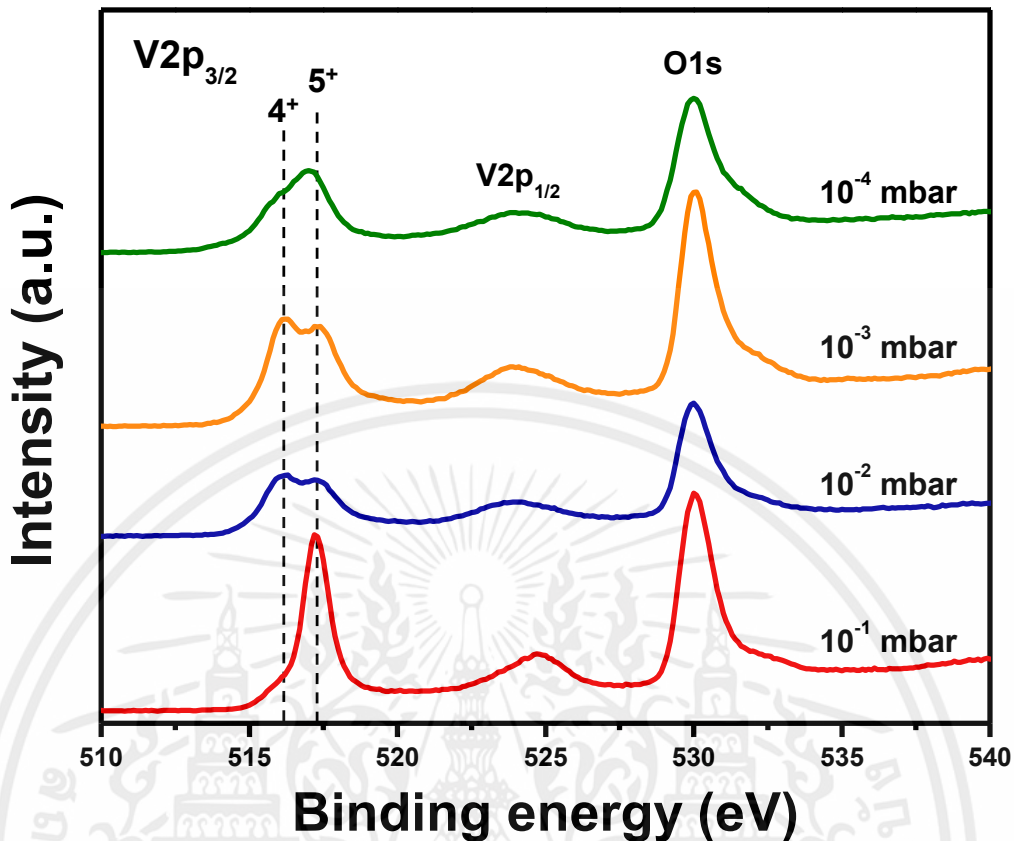
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 4.7 แสดงรามานสเปกตรัมของฟิล์มบางวานาเดียมออกไซด์ที่เตรียมด้วยความดันออกซิเจน
ไม่ว่ากรณีใด ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุผลเป็นสิ่งที่ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารในทุกกรณีที่เป็น
ที่แตกต่างกัน

อย่างไรก็ตามข้อมูลที่ใช้ในการแยกแยะเฟสของ VO_2 นั้นมาจากเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ซึ่งมีข้อจำกัดคือไม่ตรวจสอบผลึกที่มีขนาดเล็ก (Nanocrystal) หรือสารประกอบอื่นที่ไม่ฟอร์มตัวเป็นผลึก ซึ่งอาจจะแทรกอยู่ภายในเนื้อฟิล์มและส่งผลต่อปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงโลหะ - ฉนวน ดังนั้นจึงทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิครามานสเปกโทรสโกปี (Raman Spectroscopy) และเทคนิคเอ็กซ์เรย์โฟโตอิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี (X-ray Photoelectron spectroscopy : XPS)

จากรูปที่ 4.7 แสดงสเปกตรัมของรามานของฟิล์มบางวานาเดียมออกไซด์ที่เตรียมด้วยความดันออกซิเจนที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถแยกข้อมูลเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกที่ช่วงความดันของออกซิเจนสูง (1×10^{-1} และ 5×10^{-2} มิลลิบาร์) จะพบพีคที่เลขคลื่น 149, 283, 404 and 710 cm^{-1} ซึ่งเป็นลักษณะจำเพาะของ V_2O_5 ที่มีโครงสร้างผลึกแบบออร์โธโรมบิก (Orthorhombic) กล่าวคือปริมาณสารส่วนใหญ่ประกอบไปด้วย V_2O_5 ซึ่งสอดคล้องกับผลการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ข้างต้น ส่วนที่สองในช่วงความดันของออกซิเจนต่ำ พบพีคที่เลขคลื่น 192, 223, 263, 337, 384 and 616 cm^{-1} ซึ่งเป็นลักษณะจำเพาะของ VO_2 จะสังเกตได้ว่าที่ความดันของออกซิเจน 1×10^{-2} มิลลิบาร์ และ 1×10^{-3} มิลลิบาร์ มีโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกันแต่มีพีคของรามานที่เหมือนกัน นอกจากนี้ที่ความดันของออกซิเจน 1×10^{-3} มิลลิบาร์ ไม่พบพีคการสั่นของสารอื่นอยู่

หลังจากนำฟิล์มบางมาตรวจสอบด้วยเทคนิค XPS ในช่วงระดับชั้นพลังงาน $\text{V}2\text{p}_{3/2}$ และ $\text{O}1\text{s}$ ดังแสดงรูปที่ 4.8 ในการตรวจสอบแยกแยะเฟส VO_2 ออกจากเฟสชนิดอื่น จะใช้การวิเคราะห์ด้วยวิธีการของ Silversmit ซึ่งจะทำการหาค่าผลต่างของพลังงานยึดเหนี่ยวระหว่างตำแหน่งของระดับชั้นพลังงาน $\text{O}1\text{s}$ และตำแหน่งของระดับชั้นพลังงาน $\text{V}2\text{p}_{3/2}$ ที่คาดว่าเป็นตำแหน่งของ V^{4+} และเทียบกับค่ามาตรฐานประมาณ 14.2 eV [34] เนื่องจากวานาเดียมเป็นโลหะทรานซิชันที่มีเลขออกซิเดชันหลายค่าส่งผลให้ตำแหน่งของพลังงานยึดเหนี่ยวได้รับผลกระทบจากหลายปัจจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 แสดงสเปกตรัม XPS ของพลังงานยึดเหนี่ยวที่ระดับชั้นพลังงาน $V2p_{3/2}$ ของวานาเดียมอะตอม และระดับชั้นพลังงาน $O1s$ ของออกซิเจนอะตอม ที่ความดันของออกซิเจนแตกต่างกัน

เมื่อนำสเปกตรัมมาทำ Curve fitting เพื่อหาตำแหน่งพลังงานยึดเหนี่ยวของพีคย่อยดังแสดงในตารางที่ 4.2 เมื่อพิจารณาความดันของออกซิเจนขณะเคลือบที่ลดลงค่าผลต่างของพลังงานยึดเหนี่ยวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 12.7 eV เป็น 14.1 eV จนกระทั่งที่ความดันของออกซิเจนขณะเคลือบ 10^{-4} มิลลิบาร์ ผลต่างของพลังงานยึดเหนี่ยวมีค่าลดลงเป็น 13.9 eV เมื่อเทียบกับค่ามาตรฐานของ Silversmit จะสังเกตเห็นได้ว่าที่เงื่อนไขความดันของออกซิเจนขณะเคลือบ 10^{-3} มิลลิบาร์มีค่าผลต่างของพลังงานยึดเหนี่ยวใกล้เคียงกับค่ามาตรฐานมากที่สุดคือ 14.1 eV ซึ่งฟิล์มบางเป็นมีเฟส VO_2 เพียงอย่างเดียว

จากผลการทดลองของรามานสเปกตรัมและสเปกตรัม XPS สามารถสรุปได้ว่าฟิล์มบางที่เตรียมได้ที่ความดันของออกซิเจนขณะเคลือบ 10^{-3} มิลลิบาร์เป็นเฟสเดียวของ VO_2 ซึ่งฟิล์มบางที่เตรียมได้นี้จะถูกนำไปตรวจสอบปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงโลหะ - ฉนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

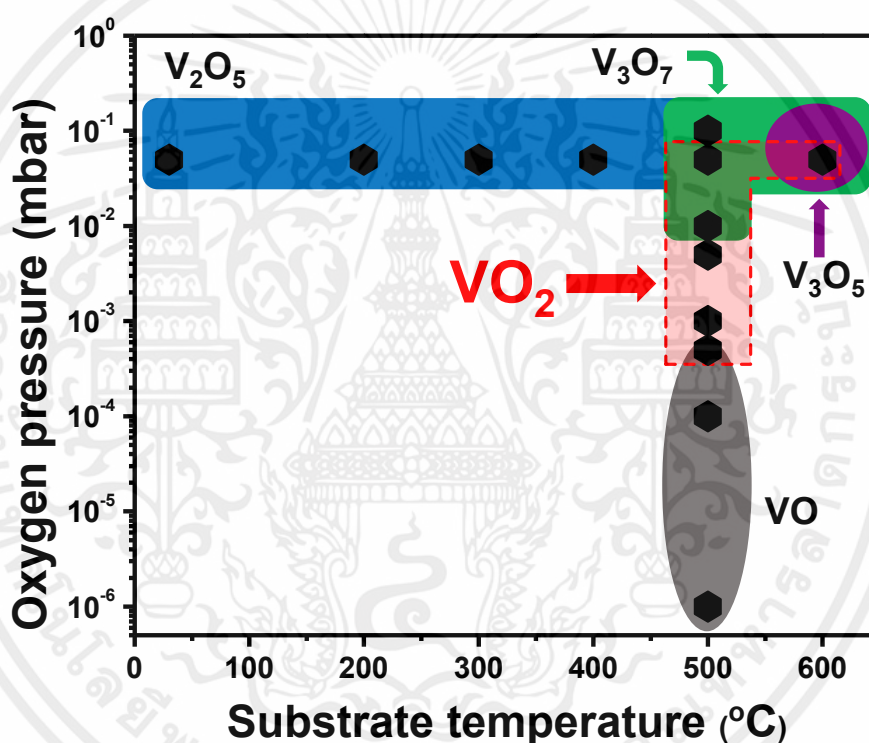
ตารางที่ 4.2 แสดงตำแหน่งของพลังงานยึดเหนี่ยวของระดับชั้นพลังงาน V2p_{3/2} และ O1s ที่ความดันขณะเคลือบแตกต่างกัน และผลต่างของพลังงานยึดเหนี่ยว

Sample	V2p _{3/2}		O1s		$\Delta BE(O1s-V2p_{3/2})$
	BE (eV)	FWHM (eV)	BE (eV)	FWHM (eV)	
10 ⁻¹	515.8	3.6	530	31.0	12.7
	517.3	32.3	530.7	19.3	
10 ⁻²	516.1	21.5	530.0	37.3	13.5
	517.4	13.4	530.9	17.3	
10 ⁻³	515.9	10.1	530.0	33.5	14.1
	517.2	26.0	531.1	17.8	
10 ⁻⁴	516.1	21.1	530.0	32.9	13.9
	517.5	15.8	531.1	19.5	
Silversmit	515.8	1.2	530.0	1.20	14.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การตรวจสอบปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงโลหะ - ฉนวนของฟิล์มบางวานาเดียมออกไซด์

จากผลการทดลองทั้งสองหัวข้อ 4.1 และ 4.2 สามารถสรุปเป็นแผนผังระหว่างอุณหภูมิของวัสดุฐานรองรับและความดันของออกซิเจนขณะเคลือบแสดงในรูปที่ 4.9 จากแผนผังเฟส VO_2 จะมีช่วงในการเกิดแคบ ๆ ในมุมมองของความดัน มากไปกว่านั้นจากแผนผังนี้สามารถเลือกเฟสที่ต้องการไปใช้งานได้ จากการควบคุมอุณหภูมิของวัสดุฐานรองรับและความดันของออกซิเจนขณะเคลือบทำให้สามารถเตรียมฟิล์มบาง $\text{VO}_2(\text{M})$ ที่เป็นเฟสเดียวและมีขนาดเกรนที่เล็ก จึงนำมาตรวจสอบสมบัติปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงโลหะ - ฉนวนโดยเงื่อนไขในการตรวจวัดแสดงในตารางที่ 3.4

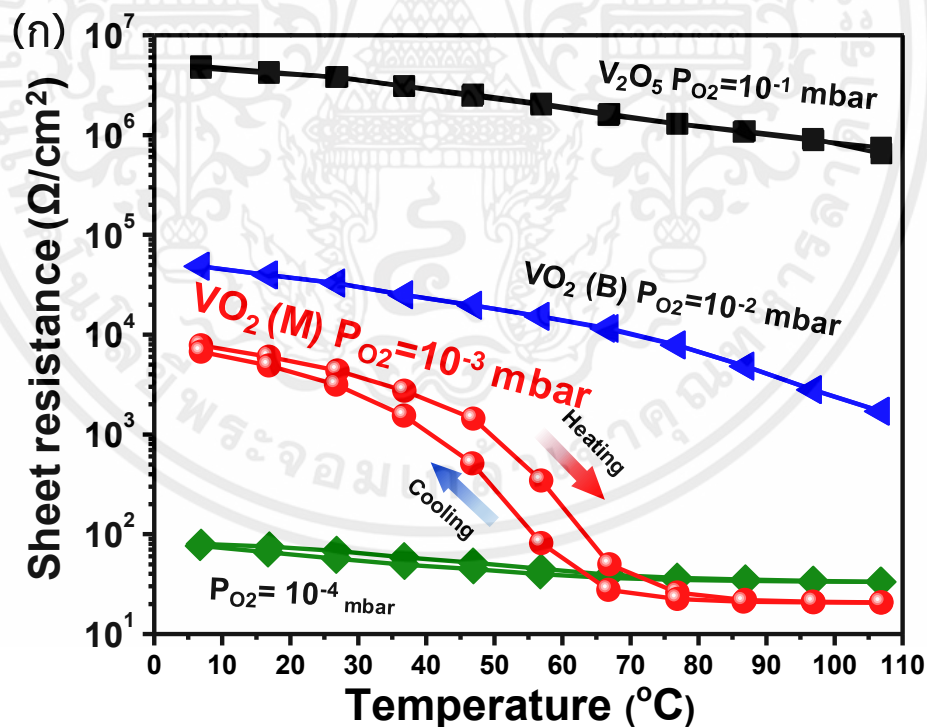


รูปที่ 4.9 แผนผังความสัมพันธ์ระหว่างเฟสของฟิล์มวานาเดียมออกไซด์ที่ขึ้นกับอุณหภูมิของวัสดุฐานรองรับและความดันของออกซิเจนขณะเคลือบ

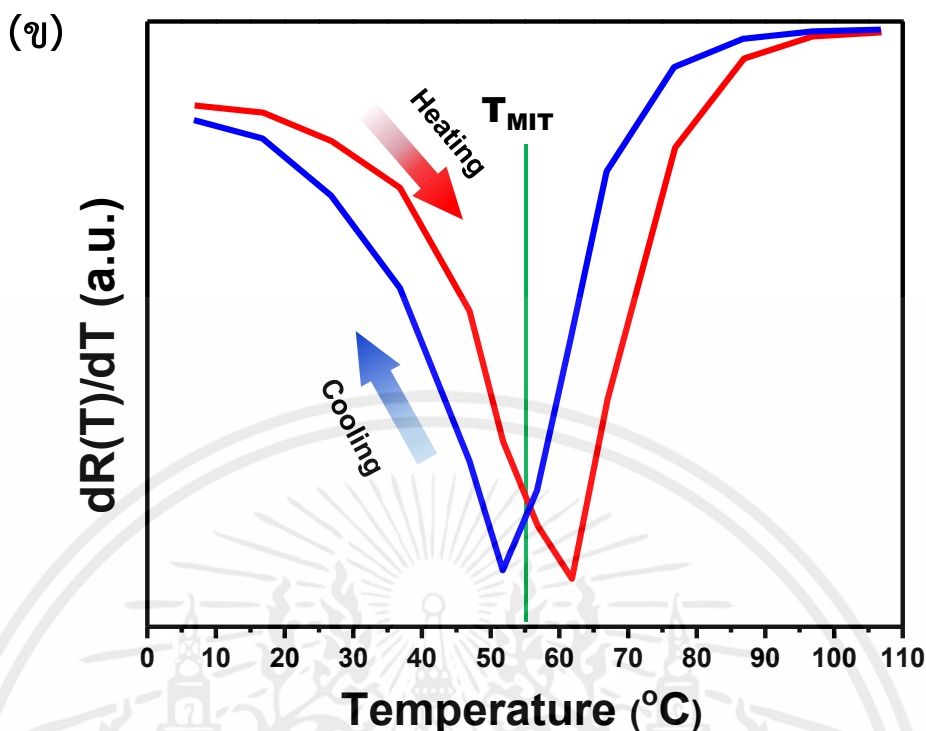
การตรวจสอบปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงโลหะ - ฉนวนของฟิล์มบางวานาเดียมออกไซด์จะทำการวัดค่าความต้านทานเชิงแผ่น (Sheet resistance) กับอุณหภูมิที่ให้ในขณะตรวจสอบรูปที่ 4.10 (ก) แสดงสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเชิงแผ่นกับอุณหภูมิที่ให้ขณะตรวจสอบของฟิล์มวานาเดียมออกไซด์เฟสต่าง ๆ จากกราฟจะเห็นได้ว่ามีเพียง $\text{VO}_2(\text{M})$ ที่มีการเปลี่ยนแปลงความต้านทานอย่างก้าวไม่ว่ากรณีนี้ชัดเจนและเกิดวงรอบฮิสเทอรีซิสซึ่งเตรียมมาจากเงื่อนไขที่อุณหภูมิของวัสดุฐานรองรับ 500 องศาเซลเซียส และความดันของออกซิเจน 1×10^{-3} มิลลิบาร์ เมื่อนำข้อมูลจากรูปที่ 4.10 (ก) มาคำนวณ

อนุพันธ์ลำดับที่ 1 ของความต้านทานเชิงแผ่นเทียบอุณหภูมิในการวัด สามารถคำนวณค่าอุณหภูมิวิกฤตเท่ากับ 56.85 องศาเซลเซียส แมกนิจูดของการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานได้ 920 เท่า และความกว้างของฮิสเทอรีซิสเท่ากับ 10.06 องศาเซลเซียส แสดงในรูปที่ 4.11(ข) เมื่อเปรียบเทียบกับงานของ B.N. Masina และคณะ [35] ที่ศึกษาและเตรียม $\text{VO}_2(\text{M})$ ลงบนกระจกมีค่าอุณหภูมิวิกฤตและความกว้างของฮิสเทอรีซิสมีค่าต่ำกว่า 4 องศาเซลเซียส และ 2 องศาเซลเซียสตามลำดับ แต่ค่าแมกนิจูดของการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานมีค่าใกล้เคียงกัน

ในส่วนของเฟสอื่นในรูปที่ 4.10 (ก) การลดลงของความต้านทานเกิดขึ้นเนื่องจากสมบัติของสารกึ่งตัวนำที่ขึ้นกับอุณหภูมิเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นความต้านทานจะลดลงแบบเชิงเส้น [36] ซึ่งจะแตกต่างจาก $\text{VO}_2(\text{M})$ ที่มีผลลดลงอย่างฉับพลัน (Abruptly change) และเกิดวงรอบฮิสเทอรีซิส เหตุผลที่ทำให้ $\text{VO}_2(\text{M})$ เกิดปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงโลหะ - ฉนวนนั้นมาจากสมมาตรของผลึกเกิดการเปลี่ยนแปลงจากโครงสร้างแบบโมนอคลินิก (Monoclinic) เป็นเตตระโกนอล (Tetragonal) อะตอมของวานาเดียมจากเดิมที่มีจัดเรียงอะตอมแบบ zigzag เมื่อถูกกระตุ้นด้วยความร้อนจะทำให้เปลี่ยนรูปแบบการจัดเรียงโครงสร้างอะตอมเป็นแบบเส้นตรง ส่งผลให้แถบพลังงานที่ $d_{||}$ ของวานาเดียมซ้อนทับกับแถบพลังงานของ d_{π} ของออกซิเจน สภาพความต้านทานจึงลดลงอย่างทันทีทันใด[29]



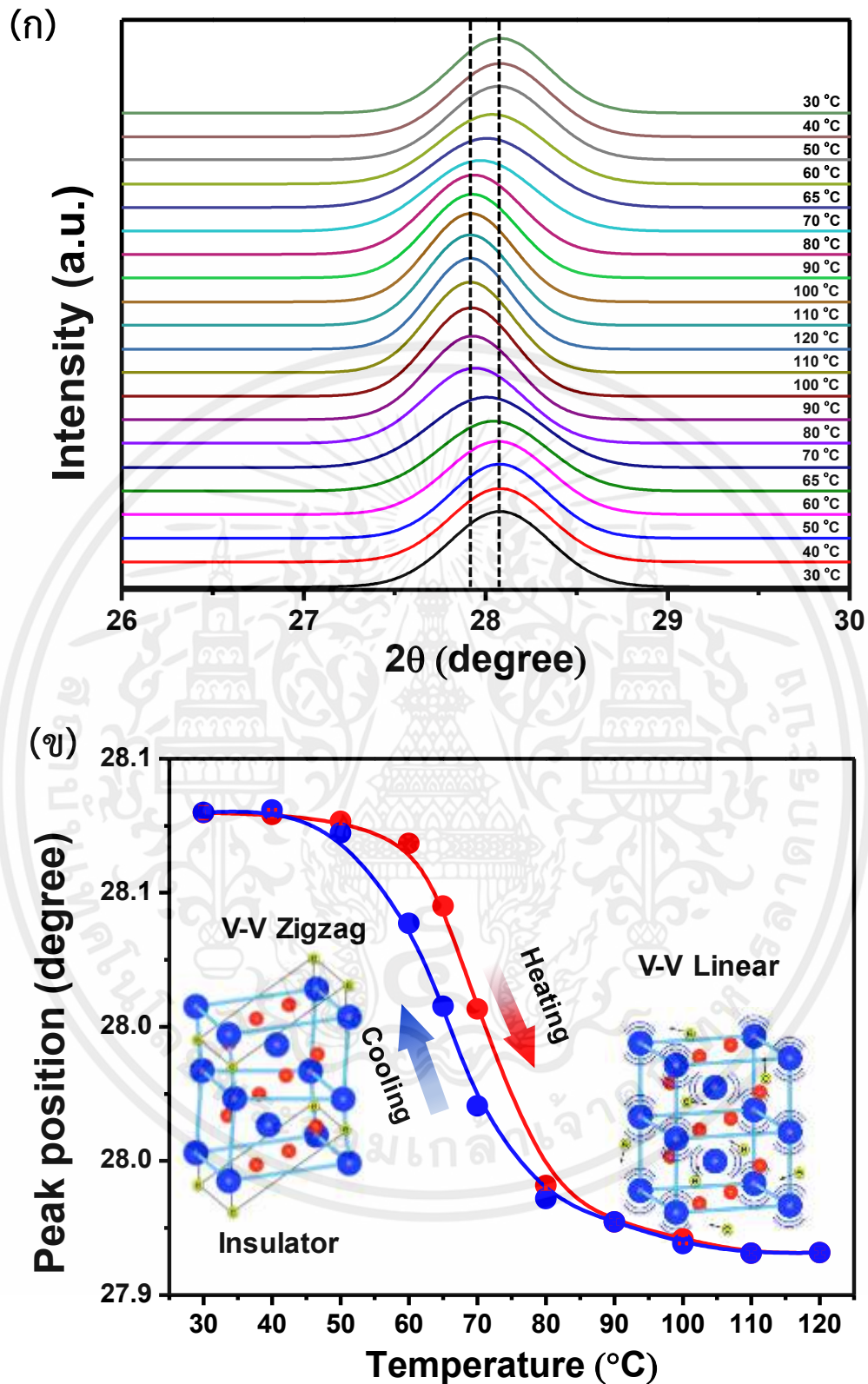
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 (ก)กราฟแสดงสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานกับอุณหภูมิที่ให้ขณะตรวจสอบของฟิล์มวานาเดียมออกไซด์เฟสต่างๆ และ(ข)อนุพันธ์ลำดับที่ 1 ของความต้านทานเทียบอุณหภูมิเพื่อคำนวณหาอุณหภูมิวิกฤต การเปลี่ยนแปลงของความต้านทานและความกว้างของฮิสเตอร์ซิส

จากคำอธิบายข้างต้นเมื่อมีการการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกในขณะที่เกิดปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงโลหะ-ฉนวน จึงทำการตรวจสอบสมมติฐานข้างต้นโดยทำการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์พร้อมทั้งให้อุณหภูมิขณะวัด (In-situ temperature XRD) รูปที่ 4.11 (ก) แสดงแสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง $\text{VO}_2(\text{M})$ ที่อุณหภูมิของการวัดต่าง ๆ เมื่ออุณหภูมิของการเพิ่มขึ้นตำแหน่งของพีคการเลี้ยวเบนมีเลื่อนจาก 28.0907° ซึ่งสอดคล้องกับระนาบ (011) ของ $\text{VO}_2(\text{M})$ ไปเป็นมุม 27.8708 องศา รูปที่ 4.11 (ข) เป็นการคำนวณตำแหน่งพีคการเลี้ยวเบนที่คำนวณจากการ fitting แบบ gaussian ซึ่งสามารถสังเกตเห็นการเลื่อนตำแหน่งของพีคการเลี้ยวเบนได้อย่างชัดเจนตั้งแต่ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส ซึ่งใกล้เคียงกับอุณหภูมิวิกฤตของสาร $\text{VO}_2(\text{M})$ แบบก้อน จากตำแหน่งพีคการเลี้ยวเบนสุดท้ายที่เกิดขึ้นจะสอดคล้องกับระนาบ (010) ของ $\text{VO}_2(\text{R})$ ที่มีโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนอลโดยสามารถสรุปได้ว่าฟิล์มบาง $\text{VO}_2(\text{M})$ ที่เตรียมได้นั้นมีการเปลี่ยนแปลงสมมาตรทางโครงสร้างผลึกซึ่งทำสมบัติทางไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงเมื่อกระตุ้นด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ขอสงวนสิทธิ์ในข้อมูลและเนื้อหาที่ปรากฏในเอกสารฉบับนี้ หากมีข้อผิดพลาดประการใด ขออภัยไว้ล่วงหน้า

รูปที่ 4.11 (ก)แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง $\text{VO}_2(\text{M})$ ที่อุณหภูมิของการวัดต่าง ๆ และ(ข)ตำแหน่งพีคการเลี้ยวเบนที่คำนวณจากการ fitting แบบ gauss

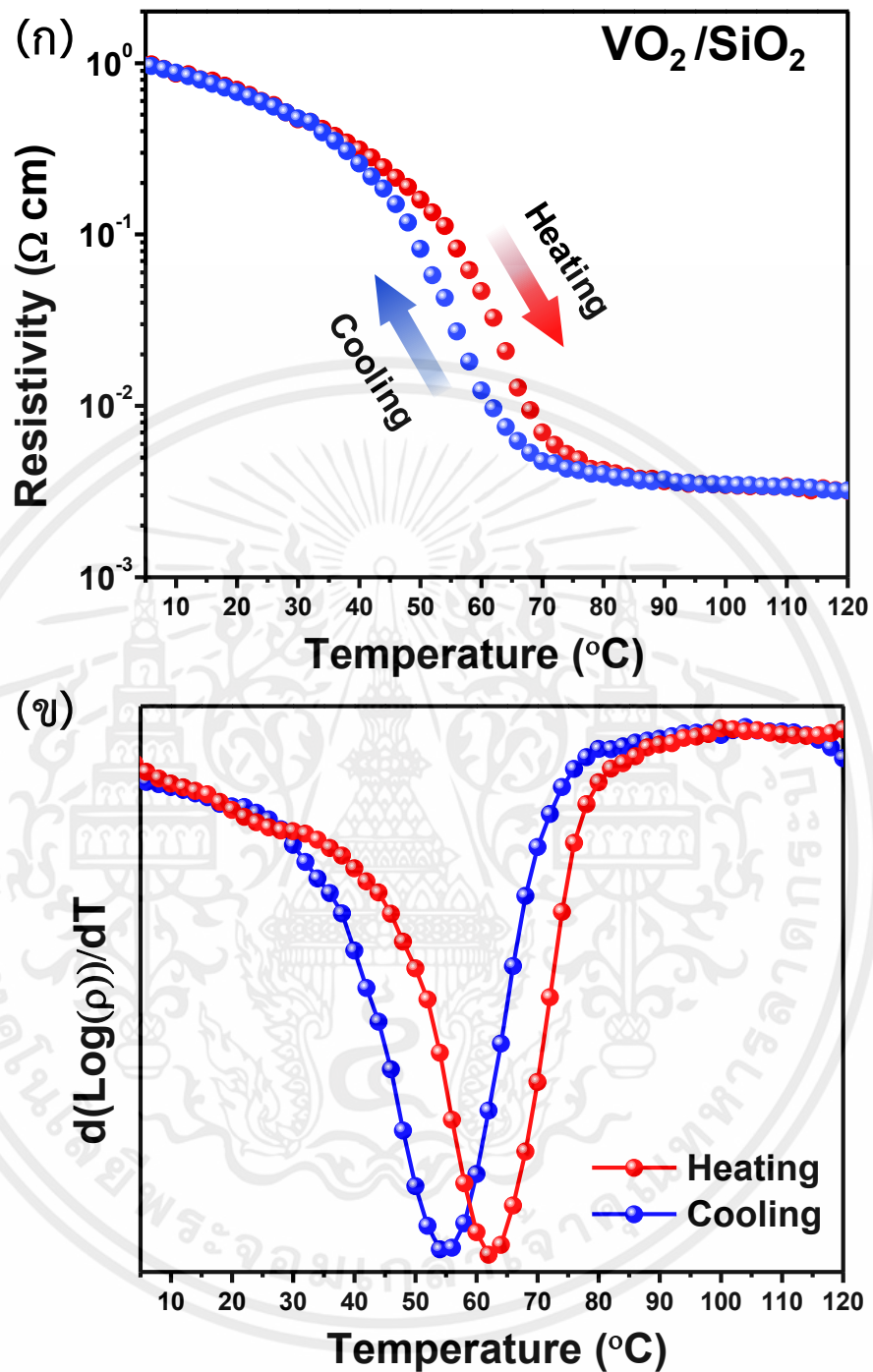
4.4 การประยุกต์ใช้งานฟิล์มบางวานาเดียมออกไซด์เป็นเทอร์มอลสวิตช์

จากหัวข้อที่ 4.3 ข้างต้นนั้นฟิล์มบาง $\text{VO}_2(\text{M})$ นั้นสามารถแสดงปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงโลหะ - ฉนวนได้เมื่อมีการให้ความร้อนแก่ฟิล์ม ในหัวข้อนี้จะนำฟิล์มที่ได้ประยุกต์ใช้งานเป็นเทอร์มอลสวิตช์โดยจะทำการกัดฟิล์มบาง $\text{VO}_2(\text{M})$ และเคลือบทองเพื่อใช้เป็นขั้วไฟฟ้าตามหัวข้อที่ 3.4

รูปที่ 4.12 (ก) แสดงปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงโลหะ - ฉนวนของอุปกรณ์เทอร์มอลสวิตช์ในช่วงอุณหภูมิ 5 – 120 องศาเซลเซียสจากผลการทดลองสามารถสังเกตเห็นได้ว่าเกิดวงรอบของฮิสเทอรีซิสเกิดขึ้นโดยมีค่าประมาณ 5 องศาเซลเซียส กล่าวคือเมื่อเพิ่มความร้อนให้แก่อุปกรณ์สภาพความต้านทานเกิดการเปลี่ยนแปลงมีค่าลดลงอย่างทันทีเมื่ออุณหภูมิที่ป้อนให้แก่อุปกรณ์เกิดค่าอุณหภูมิวิกฤต อย่างไรก็ตามเมื่อลดความร้อนที่ให้แก่อุปกรณ์สภาพความต้านทานมีค่าต่ำกว่าเดิมในตำแหน่งอุณหภูมิเดียวกันของการเพิ่มร้อนโดยเฉพาะในช่วงอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกับอุณหภูมิวิกฤตจากนั้นจึงนำข้อมูลการเปลี่ยนแปลงของสภาพความต้านทานที่ได้มาทำการคำนวณอนุพันธ์ลำดับที่ 1 เทียบกับอุณหภูมิเพื่อหาค่าอุณหภูมิวิกฤตของอุปกรณ์ซึ่งมีค่าประมาณ 60 องศาเซลเซียส และมีแอมพิจูดของการเปลี่ยนแปลงสภาพความต้านทานประมาณ 320 เท่า วงรอบของฮิสเทอรีซิสที่เกิดขึ้นของอุปกรณ์นั้นคาดว่าเป็นผลมาจากฟิล์มบาง $\text{VO}_2(\text{M})$ ที่เตรียมได้เป็นวัสดุพหุผลึก (Polycrystalline material) ซึ่งส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกในขณะเกิดปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงโลหะ - ฉนวนที่เกิดขึ้น ในแต่ละก้อนเกรนที่เกิดขึ้นเป็นไปในทิศทางที่แตกต่างกัน ทำให้ค่าการนำไฟฟ้าของอุปกรณ์ในช่วงการเพิ่มและลดอุณหภูมิแตกต่างกันซึ่งคล้ายกับงานของ G. J. Kovács ซึ่งทำการศึกษาการเตรียมฟิล์ม $\text{VO}_2(\text{M})$ ลงบนแผ่น Al_2O_3 และแผ่น Si [37]

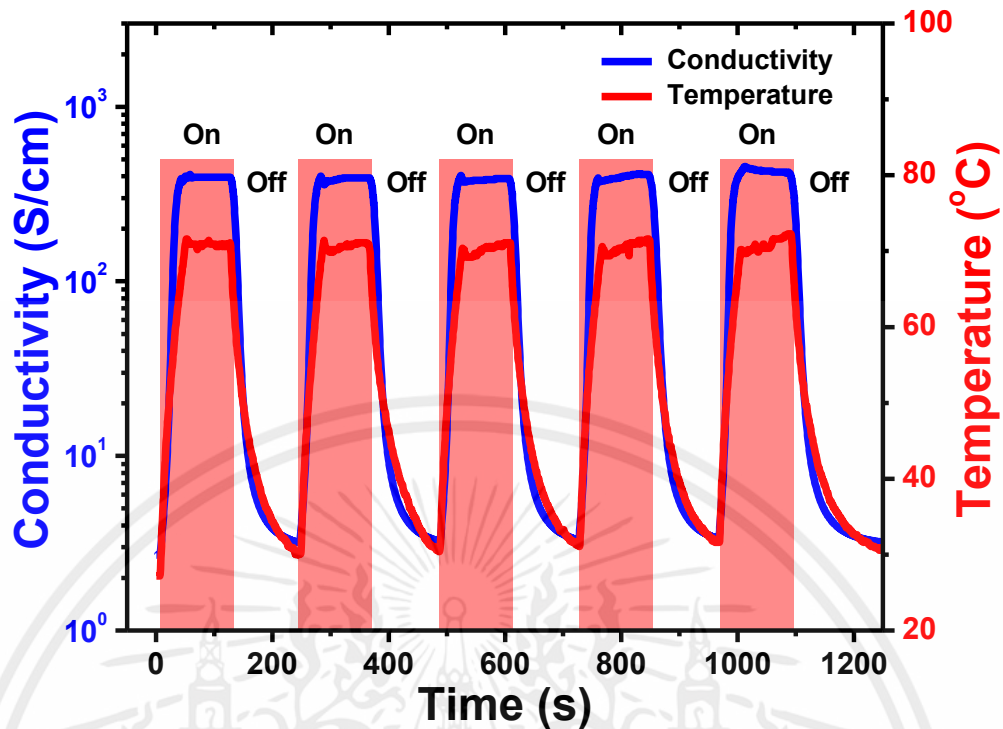
การตอบสนองต่ออุณหภูมิของอุปกรณ์เทอร์มอลสวิตช์ที่เตรียมได้นั้นจะถูกตรวจสอบโดยการให้ความร้อนแก่อุปกรณ์จากอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสเป็น 70 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อน 77 องศาเซลเซียสต่อวินาที เป็นเวลา 2 นาที และทำการตัดไฟของแผ่นแผ่นเพลเทียร์เป็นเวลา 2 นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.13 จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าเมื่อทำการให้ความร้อนแก่อุปกรณ์เทอร์มอลสวิตช์สภาพนำไฟฟ้าของอุปกรณ์เทอร์มอลสวิตช์เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิทันทีทันใดเช่นเดียวกับการตัดไฟของแผ่นแผ่นเพลเทียร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 (ก)กราฟแสดงสัมพันธ์ระหว่างสภาพความต้านทานกับอุณหภูมิที่ให้ขณะตรวจสอบ และ (ข)อนุพันธ์ลำดับที่ 1 ของสภาพความต้านทานเทียบกับอุณหภูมิที่ให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

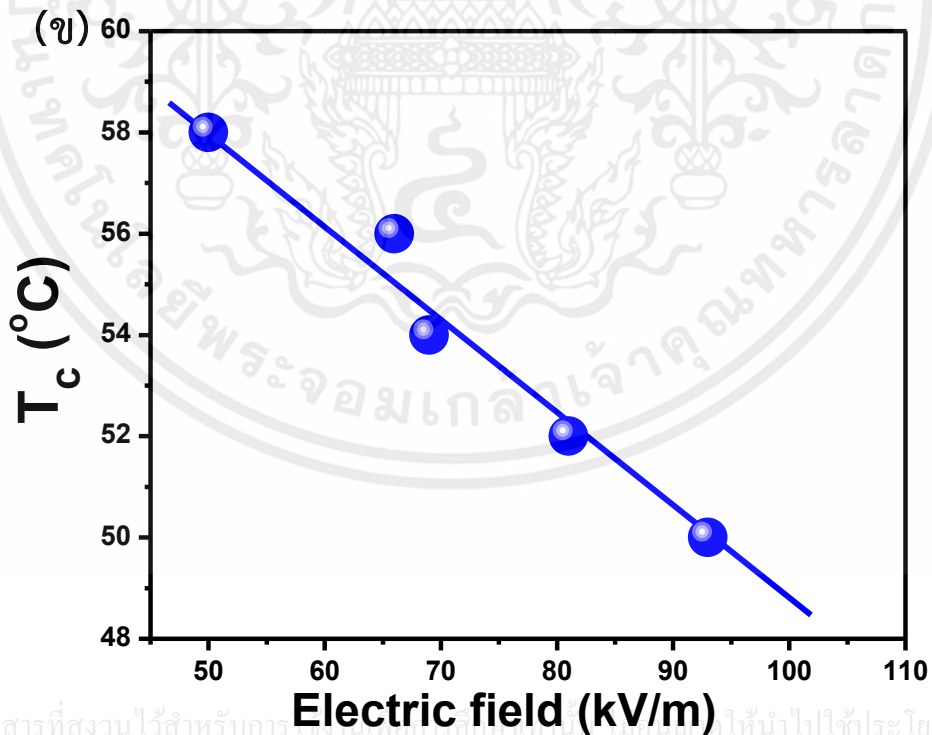
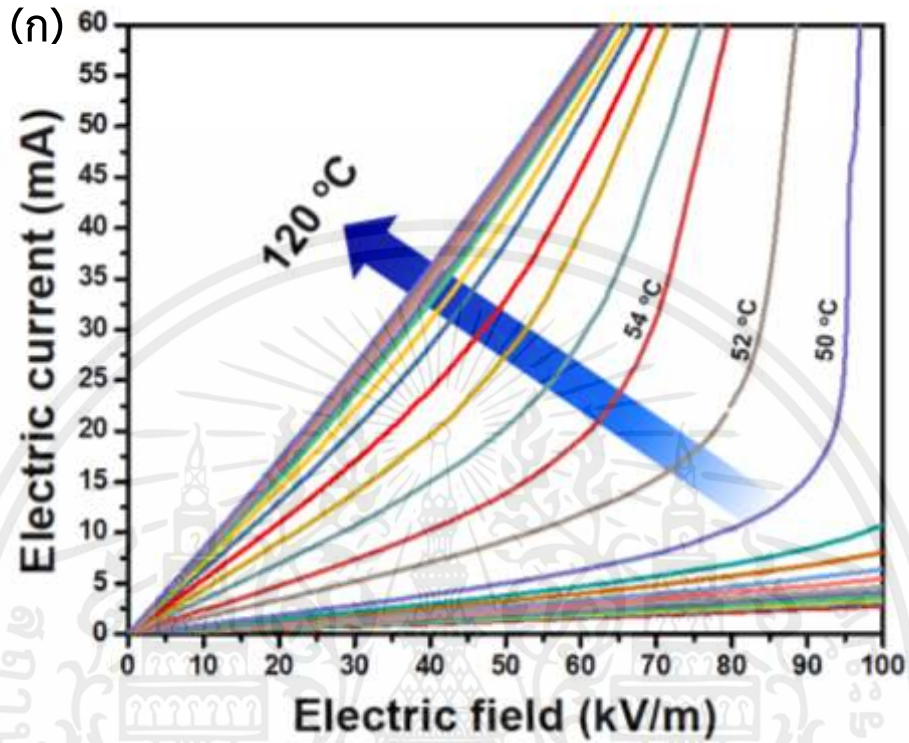


รูปที่ 4.13 กราฟแสดงสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้าของอุปกรณ์เทอร์มอสวิตช์และอุณหภูมิที่
ให้เทียบกับเวลา

4.5 การควบคุมอุณหภูมิวิกฤตของเทอร์มอสวิตช์ด้วยสนามไฟฟ้าภายนอก ของอุปกรณ์เทอร์มอสวิตช์

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการควบคุมอุณหภูมิวิกฤตของเทอร์มอสวิตช์ด้วยสนามไฟฟ้าภายนอกของอุปกรณ์เทอร์มอสวิตช์เพื่อใช้เป็นอุปกรณ์เทอร์มอสวิตช์จากฟิล์มบางวานาเดียมไดออกไซด์ขั้นแรกจะทำการตรวจสอบด้วยความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าหรือความต่างศักย์ที่จ่ายให้แก่อุปกรณ์ ที่อุณหภูมิแตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 4.14 (ก) จากกราฟสามารถแยกแยะลักษณะจำเพาะของกราฟระหว่างกระแสไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าได้ 3 แบบคือ 1) ก่อนเกิดปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงโลหะ - ฉนวนในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าค่าอุณหภูมิวิกฤต ตั้งแต่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ถึงประมาณ 35 องศาเซลเซียส 2) ช่วงเกิดปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงโลหะ - ฉนวนโดยมีศักย์ไฟฟ้าเข้าช่วยอยู่ในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 35 องศาเซลเซียสจนถึง 60 องศาเซลเซียส ซึ่งจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิของอุปกรณ์ยังไม่ถึงค่าอุณหภูมิวิกฤต แต่มีการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าที่อ่านได้ กล่าวคือมีการเปลี่ยนแปลงสภาพความต้านของตัวอุปกรณ์ทำให้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ในช่วงนี้ไม่เป็นไปตามกฎของโอห์ม 3) ช่วงเกิดปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงโลหะ - ฉนวนด้วยความร้อน คืออุณหภูมิของตัวอุปกรณ์เกินค่าอุณหภูมิวิกฤตทำให้

กราฟที่ได้กลับมาประพจน์ตามกฎของโอห์ม นอกจากนี้เมื่อนำข้อมูลที่ได้คำนวณหาอุณหภูมิวิกฤตเมื่อเพิ่มสนามไฟฟ้าจะทำให้ค่าอุณหภูมิวิกฤตลดลงจาก 60 องศาเซลเซียสถึง 50 องศาเซลเซียส แสดงในรูปที่ 4.14 (ข)



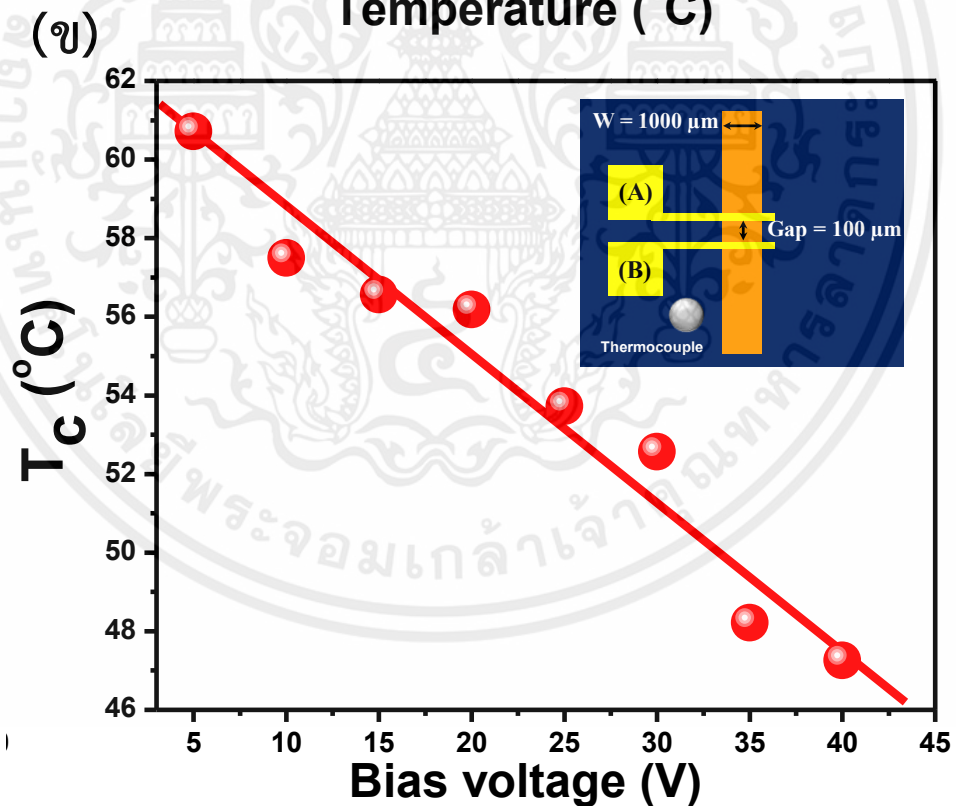
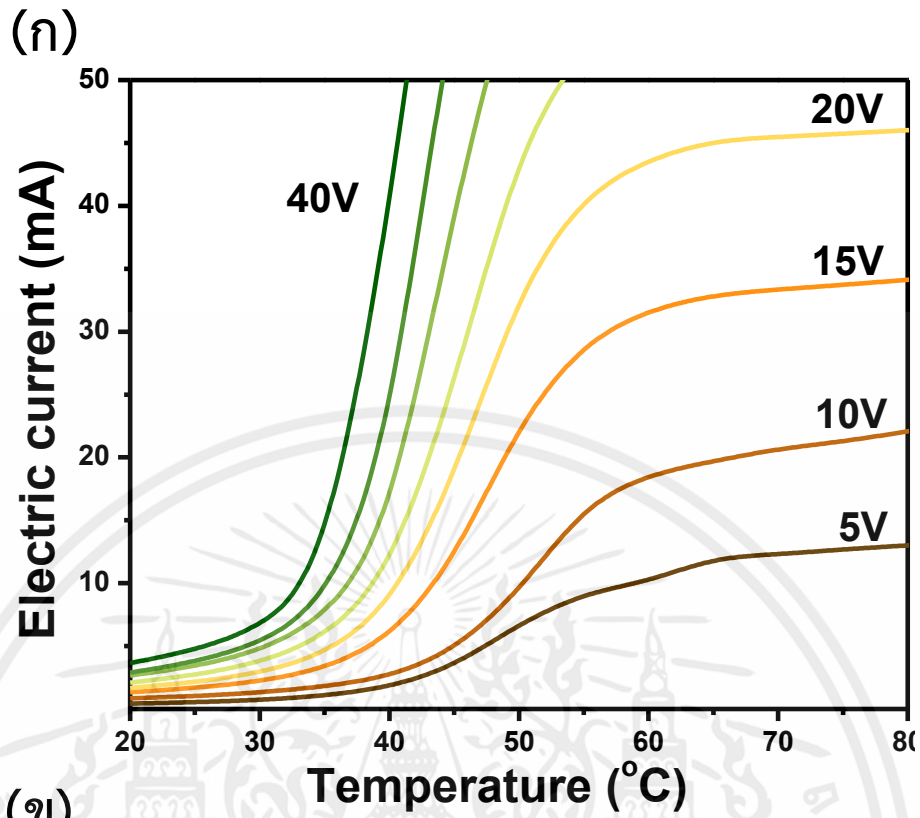
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานภายในเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
รูปที่ 4.14 (ก)กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าที่ไบอัสให้แก่อุปกรณ์ที่อุณหภูมิแตกต่างกันและ(ข)อุณหภูมิวิกฤตของอุปกรณ์กับสนามไฟฟ้าภายนอก

ในการประยุกต์ใช้งานจริงของอุปกรณ์เทอร์มอลสวิตช์นั้นอุปกรณ์จะถูกจ่ายความต่างศักย์และวัตต์ค่ากระแสไฟฟ้า ที่อุณหภูมิต่าง ๆ และตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นซึ่งมีความสะดวกมากกว่าดังแสดงในรูปที่ 4.15 (ก) เมื่อให้ความต่างศักย์ของอุปกรณ์สูงขึ้นค่าอุณหภูมิวิกฤตของอุปกรณ์นั้นมีค่าลดลงแบบเชิงเส้นแสดงในรูปที่ 4.15 (ข) จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าสามารถใช้สนามไฟฟ้าควบคุมอุณหภูมิวิกฤตของอุปกรณ์เทอร์มอลสวิตช์ได้

กลไกการควบคุมอุณหภูมิวิกฤตของอุปกรณ์เทอร์มอลสวิตช์นั้นสามารถอธิบายได้ 2 โมเดลคือ (1) การพังทลายของไดอิเล็กตริก (Dielectric breakdown) เมื่อให้สนามไฟฟ้าแก่วัสดุที่มีค่าไดอิเล็กตริก อย่างไรก็ตามสนามไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองมีค่าเพียง 100kV/m เมื่อเทียบกับงานของ Yoon และคณะสำหรับวัสดุ VO_2 นั้นจะต้องใช้สนามไฟฟ้าสูงถึง 50MV/m [38] โมเดลที่ (2) ความร้อนจากกระแสไฟฟ้า (Joule heating) ซึ่งเกิดจากความต่างศักย์ที่ให้จะต้องมีค่ามากกว่าพลังงานความร้อนที่สูญเสียให้แก่สภาพแวดล้อม [39]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 (ก)กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและอุณหภูมิของอุปกรณ์ที่ความต่างศักย์

ต่าง ๆ (ข)กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิวิกฤติของอุปกรณ์กับความต่างศักย์ที่จ่ายให้แก่
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และข้อมูลอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
อุปกรณ์

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

การควบคุมอุณหภูมิของวัสดุฐานรองรับและความดันของออกซิเจนขณะปลูกจากระบบประเหยสารด้วยลำเลเซอร์แบบท่วงนั้น สามารถเตรียมฟิล์มบางวานาเดียมออกไซด์เฟสต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็น V_2O_5 , $VO_2(B)$ และ $VO_2(M)$ เป็นต้น อุณหภูมิของวัสดุฐานรองรับส่งผลโดยตรงต่อการเกิดผลึกของฟิล์มรวมถึงการหลุดออกและการเข้าทำปฏิกิริยาของออกซิเจนในฟิล์ม ในส่วนความดันของออกซิเจนขณะเคลือบนั้นส่งผลโดยตรงต่อการเข้าทำปฏิกิริยาของออกซิเจนโดยตรง ทำให้สามารถพอร์มสารที่มีเลขออกซิเดชันต่ำกว่าเป่าสารเคลือบได้ โดยปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงโลหะ-ฉนวนของฟิล์มบาง $VO_2(M)$ ที่เตรียมได้นั้นมีอุณหภูมิวิกฤตที่ 56 องศาเซลเซียส และอัตราการเปลี่ยนแปลงสภาพความต้านทานประมาณ 900 เท่า

อุปกรณ์เทอร์มอลสวิตช์ที่ประยุกต์จากฟิล์มบางที่เตรียมแสดงการเปลี่ยนแปลงความต้านทานเมื่อให้ร้อนเช่นเดียวกับฟิล์มบาง แต่ปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงโลหะ-ฉนวนของอุปกรณ์เทอร์มอลสวิตช์มีค่าอุณหภูมิวิกฤตที่ 60 องศาเซลเซียส และอัตราการเปลี่ยนแปลงสภาพความต้านทานประมาณ 350 เท่า ในช่วงอุณหภูมิตรวจวัดที่เท่ากัน การตอบสนองของอุปกรณ์ต่อความร้อนที่ป้อนให้ นั้นอุปกรณ์สามารถตอบสนองได้อย่างทันทีทันใดด้วยอัตราการให้ความร้อน 77 องศาต่อนาที เมื่อทำการให้สนามไฟฟ้าภายนอกเพื่อควบคุมอุณหภูมิวิกฤตของอุปกรณ์เทอร์มอลสวิตช์สนามไฟฟ้าภายนอกสามารถลดอุณหภูมิวิกฤตจาก 60 องศาเซลเซียส เป็น 45 องศาเซลเซียสได้ โดยเป็นการลดลงแบบเชิงเส้น ซึ่งการลดลงของอุณหภูมิวิกฤตของอุปกรณ์เทอร์มอลสวิตช์นั้นมาจากปรากฏการณ์ Joule heating ที่สร้างความร้อนส่วนหนึ่งมาจากกระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

1. Yang, M., et al., *Resistance switching of epitaxial VO₂/Al₂O₃ heterostructure at room temperature induced by organic liquids*. AIP Advances, 2015. **5**(3): p. 037114.
2. Yang, Z., C. Ko, and S. Ramanathan, *Oxide Electronics Utilizing Ultrafast Metal-Insulator Transitions*. Annual Review of Materials Research, 2011. **41**(1): p. 337-367.
3. Sangwook Lee, K.H., Fan Yang, Jiawang Hong, Changyun Ko, Joonki Suh, Kai Liu, Kevin Wang, Jeffrey J. Urban, Xiang Zhang, Chris Dames, Sean A. Hartnoll, Olivier Delaire, Junqiao Wu, *Anomalous low electronic thermal conductivity in metallic vanadium dioxide*. Science, 2017. **355**: p. 371–374
4. Shibuya, K. and A. Sawa, *Optimization of conditions for growth of vanadium dioxide thin films on silicon by pulsed-laser deposition*. AIP Advances, 2015. **5**(10): p. 107118.
5. Ch. Leroux, G.N., G. Van Tendeloo, *From VO₂(B) to VO₂(R) Theoretical structures of VO₂ polymorphs and in situ electron microscopy*. PHYSICAL REVIEW B, 1998. **57**: p. 5111.
6. Fernando J. Quites, H.O.P., *Hydrothermal synthesis of nanocrystalline VO₂ from poly(diallyldimethylammonium) chloride and V₂O₅*. Materials Research Bulletin, 2010. **45**: p. 892–896.
7. Malarde, D., et al., *Optimized Atmospheric-Pressure Chemical Vapor Deposition Thermo-chromic VO₂ Thin Films for Intelligent Window Applications*. ACS Omega, 2017. **2**(3): p. 1040-1046.
8. Zhang, C., et al., *Preparation and properties of VO₂ thin films by a novel sol-gel process*. Journal of Sol-Gel Science and Technology, 2013. **69**(2): p. 320-324.
9. Xu, H.Y., et al., *Effects of annealing ambient on oxygen vacancies and phase transition temperature of VO₂ thin films*. RSC Advances, 2016. **6**(83): p. 79383-79388.
10. Cheng, C., et al., *Ultra-long, free-standing, single-crystalline vanadium dioxide micro/nanowires grown by simple thermal evaporation*. Applied Physics Letters, 2012. **100**(10): p. 103111.
11. Qiu, H., et al., *The tetragonal-like to rutile structural phase transition in epitaxial VO₂/TiO₂(001) thick films*. New Journal of Physics, 2015. **17**(11): p. 113016.
12. Shibuya, K., et al., *Fabrication and Raman scattering study of epitaxial VO₂ films on MgF₂(001) substrates*. Applied Physics Letters, 2013. **103**(2): p. 021604.
13. Soltani, M., et al., *Optical switching of vanadium dioxide thin films deposited by reactive pulsed laser deposition*. Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films, 2004. **22**(3): p. 859.
14. Hu, B., et al., *Self-heating and external strain coupling induced phase transition of VO(2) nanobeam as single domain switch*. Adv Mater, 2011. **23**(31): p. 3536-41.
15. Zhang, P., et al., *The electro-optic mechanism and infrared switching dynamic of the hybrid multilayer VO₂/Al:ZnO heterojunctions*. Sci Rep, 2017. **7**(1): p. 4425.
16. Schwingenschlögl, U. and V. Eyert, *The vanadium Magnéli phases V_nO_{2n-1}*. Annalen der Physik, 2004. **13**(9): p. 475-510.
17. Zylbersztein, A. and N.F. Mott, *Metal-insulator transition in vanadium dioxide*. Physical Review B, 1975. **11**(11): p. 4383-4395.

18. Cavalleri, A., et al., *Evidence for a structurally-driven insulator-to-metal transition in VO₂: A view from the ultrafast timescale*. Physical Review B, 2004. **70**(16): p. 161102.
19. Peierls, R., *More Surprises in Theoretical Physics*. PRINCETON SERIES IN PHYSICS. 1991, Princeton, NJ, USA: Princeton University Press Publication
20. Imada, M., A. Fujimori, and Y. Tokura, *Metal-insulator transitions*. Reviews of Modern Physics, 1998. **70**(4): p. 1039-1263.
21. Schneider C.W., L.T., *Laser Ablation and Thin Film Deposition*. Laser Processing of Materials. Springer Series in Materials Science, ed. S. P. Vol. 139. 2010, Berlin, Heidelberg: Springer.
22. Anisimov, S.I., B.S. Luk'yanchuk, and A. Luches, *An analytical model for three-dimensional laser plume expansion into vacuum in hydrodynamic regime*. Applied Surface Science, 1996. **96-98**: p. 24-32.
23. Willmott, P.R. and J.R. Huber, *Pulsed laser vaporization and deposition*. Reviews of Modern Physics, 2000. **72**(1): p. 315-328.
24. Amoroso, S., et al., *Characterization of laser-ablation plasmas*. Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics, 1999. **32**(14): p. R131-R172.
25. Canulescu, S., et al., *Mechanisms of the laser plume expansion during the ablation of LiMn₂O₄*. Journal of Applied Physics, 2009. **105**(6): p. 063107.
26. Fan, L.L., et al., *Growth and phase transition characteristics of pure M-phase VO₂ epitaxial film prepared by oxide molecular beam epitaxy*. Applied Physics Letters, 2013. **103**(13): p. 131914.
27. Sayle, D.C., et al., *Computer modelling of V₂O₅: surface structures, crystal morphology and ethene sorption*. Journal of Materials Chemistry, 1996. **6**(4): p. 653-660.
28. Goyal, V., et al., *Structural, Morphological, and Optical Transitions in Pulsed Laser deposited V₂O₅-TiO₂ Transition Metal Oxide Nanocomposite Thin Films*. Vol. 3. 2018. 90-95.
29. Fang, G.J., et al., *Synthesis and structural, electrochromic characterization of pulsed laser deposited vanadium oxide thin films*. Journal of Vacuum Science & Technology A, 2001. **19**(3): p. 887-892.
30. Persson, K., *Materials Data on V₂O₅ (SG:59) by Materials Project*. 2014: United States.
31. Persson, K., *Materials Data on VO₂ (SG:12) by Materials Project*. 2014: United States.
32. Persson, K., *Materials Data on VO₂ (SG:136) by Materials Projec*. 2014: United States.
33. Velicu, I.-L., et al., *Energy-enhanced deposition of copper thin films by bipolar high power impulse magnetron sputtering*. Surface and Coatings Technology, 2019. **359**: p. 97-107.
34. Silversmit, G., et al., *Determination of the V2p XPS binding energies for different vanadium oxidation states (V⁵⁺ to V⁰⁺)*. Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena, 2004. **135**(2): p. 167-175.
35. Masina, B.N., et al., *Phase-selective vanadium dioxide (VO₂) nanostructured thin films by pulsed laser deposition*. Journal of Applied Physics, 2015. **118**(16): p. 165308.
36. Lee, S., et al., *Epitaxial stabilization and phase instability of VO₂ polymorphs*. Scientific Reports, 2016. **6**: p. 19621.
37. Kovács, G.J., et al., *Effect of the substrate on the insulator-metal transition of vanadium dioxide films*. Journal of Applied Physics, 2011. **109**(6): p. 063708.

38. Yoon, J., et al., *Investigation of length-dependent characteristics of the voltage-induced metal insulator transition in VO₂ film devices*. Applied Physics Letters, 2014. **105**(8): p. 083503.
39. Mun, B.S., et al., *Role of joule heating effect and bulk-surface phases in voltage-driven metal-insulator transition in VO₂ crystal*. Applied Physics Letters, 2013. **103**(6): p. 061902.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ(ภาษาไทย) นายสุกฤตยะ เจษฎาลักษณ์
 ชื่อ(ภาษาอังกฤษ) Mr. Sukittaya Jessadaluk
 วัน เดือน ปีเกิด 26 ธันวาคม พ.ศ. 2535
 ที่อยู่ปัจจุบัน 210/6 หมู่.1 ต.หลักสาม อ.บ้านแพ้ว จ.สมุทรสาคร 74120
 โทรศัพท์ 082-4815446

ประวัติการศึกษา

มัธยมศึกษา โรงเรียนวัดธรรมจริยาภิรมย์ พ.ศ. 2553
 ปริญญาตรี คณะวิทยาศาสตร์ ภาควิชาฟิสิกส์ สาขาฟิสิกส์
 มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ พ.ศ. 2557
 ปริญญาโท วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง
 สาขานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี สถาบันเทคโนโลยี
 พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ. 2561

ผลงานทางวิชาการ

1. **S. Jessadaluk**, N. Khemasiri, P. Rattanawarinchai, S. Rahong, A. Rangkasikorn, N. Kayunkid, S. Wirunchit, A. Klamchuen and J. Nukeaw
 “A tunable thermal switching device based on Joule heating-induced metal–insulator transition in VO₂ thin films via an external electric field”, Japanese Journal of Applied Physics, Volume 58, 23 May 2019.
2. **S. Jessadaluk**, N. Khemasiri, S. Rahong, A. Rangkasikorn, N. Kayunkid, S. Wirunchit, M. Horprathum, C. Chananonwathron, A. Klamchuen and J. Nukeaw
 “Phase formation polycrystalline vanadium oxide via thermal annealing process under controlled nitrogen pressure”, Journal of Physics: Conference Series, Volume 901, September 2017
3. N. Khemasiri, N. Soyeux, P. Rattanawarinchai, **S. Jessadaluk**, A. Klamchuen, A. Rengkasikorn, S. Wirunchit, S. Rahong, N. Kayunkid and Jiti Nukeaw
 “Modification of a photoanode by means of localized surface plasmon resonance from Au nanoparticles decorated on ZnO nanorods for photoelectrochemical applications”, Japanese Journal of Applied Physics, Volume 58, 23 May 2019.
4. P. Rattanawarinchai, N. Khemasiri, N. Soyeux, **S. Jessadaluk**, A. Klamchuen, S. Wirunchit, A. Rangkasikorn, N. Kayunkid, D. Phromyothin, S. Rahong

- “Gold nanoparticles decorated zinc oxide nanorods as electrodes for a highly sensitive non-enzymatic electrochemical glucose detection” Japanese Journal of Applied Physics, Volume 58, 23 May 2019.
5. N. Tammarugwattana, **S. Jessadaluk**, N. Khemasiri, S. Rahong, A. Rangkasikorn, S. Wirunchit, N. Kayunkid and Jiti Nukeaw
“Study of optical and electrical properties of tin doped cobalt-phthalocyanine thin films prepared by thermal co-evaporation” AIP Conference Proceedings, 2010, September 2018
 6. P. Rattanawarinchai, N. Khemasiri, N. Soyeux, **S. Jessadaluk**, C. Chananonawathorn, M. Horprathum, A. Klamchuen, N. Kayunkid, S. Rahong, D. Phromyothin
“Growth Time Dependence on Photoelectrochemical Property of ZnO Nanorods Prepared by Hydrothermal Synthesis” Surface Review and Letters, Volume 25, 2018
 7. N. Khemasiri, **S. Jessadaluk**, N. Kayunkid, S. Rahong, A. Rangkasikorn, S. Wirunchit, A. Klamchuen and J. Nukeaw
“Control the crystal growth of Al-doped ZnO thin film prepared by pulsed laser deposition and the influences on its optical and electrical properties” Journal of Physics: Conference Series, Volume 901, September 2017

ผลงานที่ได้นำเสนอในงานประชุมวิชาการ

1. **S. Jessadaluk**, N. Khemasiri, P. Rattanawarinchai, S. Rahong, A. Rangkasikorn, N. Kayunkid, S. Wirunchit, A. Klamchuen and J. Nukeaw “External Electric Field Induced Metal Insulator Transition in VO₂ Thin Films for Critical Thermal Switching Devices” 31st International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2018), Japan
2. **S. Jessadaluk**, N. Khemasiri, S. Rahong, A. Rangkasikorn, N. Kayunkid, S. Wirunchit, A. Klamchuen and J. Nukeaw “External Electric Field Induced Metal Insulator Transition in VO₂ Thin Films for Thermal Switch Application” 2nd International Conference on Science and Technology of Emerging (STEMa 2018), Thailand
3. **S. Jessadaluk**, N. Khemasiri, S. Rahong, A. Rangkasikorn, N. Kayunkid, S. Wirunchit, A. Klamchuen and J. Nukeaw “Optimization of growth parameters for pure phase VO₂ thin films by pulsed laser deposition technique” 1st Materials Research

Society of Thailand International Conference (MRS Thailand International Conference), Thailand

4. **S. Jessadaluk**, N. Khemasiri, S. Rahong, A. Rangkasikorn, N. Kayunkid, S. Wirunchit, A. Klamchuen and J. Nukeaw “Optimization of conditions for vanadium dioxide thin film growth by pulsed-laser deposition” 3rd International Conference on Applied Physics and Material Applications (ICAPMA2017), 2017, Thailand
5. **S. Jessadaluk**, N. Khemasiri, S. Rahong, A. Rangkasikorn, N. Kayunkid, S. Wirunchit, M. Horprathum, C. Chananonnawathron, A. Klamchuen and J. Nukeaw “Phase formation polycrystalline vanadium oxide via thermal annealing process under controlled nitrogen pressure” 12th Annual Siam Physics Congress 2017 (SPC2017), 2017, Thailand

รางวัลที่ได้รับ

ORAL PRESENTATION AWARD, 2nd International Conference on Science and Technology of Emerging (STEMa 2018), Thailand



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้