รหัสโครงการ FF1-105-64-12-09(03)

รายงานการวิจัย

การพัฒนาและเสริมแกร่งการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแสงซินโครตรอนและการศึกษาเชิงปฏิบัติของระบบสารควบแน่นที่อุณหภูมิต่ำ

(Development and Reinforcement of Synchrotron Radiation Techniques and Experimental Study of Condensed Matters at Low Temperature)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2564

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

รหัสโครงการ FF1-105-64-12-09(03)

รายงานการวิจัย

การพัฒนาและเสริมแกร่งการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแสงซินโครตรอนและการศึกษาเชิงปฏิบัติของระบบสารควบแน่นที่อุณหภูมิต่ำ

(Development and Reinforcement of Synchrotron Radiation Techniques and Experimental Study of Condensed Matters at Low Temperature)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

รองศาสตราจารย์ ดร.วรวัฒน์ มีวาสนา

สาขาวิชาฟิสิกส์ สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผู้ร่วมวิจัย

ศาสตราจารย์ ดร. สันติ แม้นศิริ

รองศาสตราจารย์ ดร. พนมศักดิ์ มีมนต์

รองศาสตราจารย์ ดร. ประยูร ส่งสิริฤทธิกุล

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิทวัส แสนรังค์

ดร. ธนชาติ เอกนภากุล

ดร. สรวิศ แสงทวีสิน

Dr. Hideki Nakajima

ดร. ชนรรค์ เอื้อรักสกุล

ดร. พินิจ กิจขุนทด

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2564

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

กันยายน 2565

สารบัญ

หน้า

บทที่ 1 บทนำ 4
ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย 4
วัตถุประสงค์ของการวิจัย 5
ขอบเขตของการวิจัย 5
ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย 5
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 7
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย 13
วิธีการดำเนินงาน 13
บทที่ 4 ผลการวิจัย 16
ผลงานวิจัยของโครงการย่อยที่ 4 16
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ 30

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 1
บทนำ

ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย

อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในปัจจุบันส่วนใหญ่สร้างจากสารกึ่งตัวนำแบบดั้งเดิมโดยเฉพาะจากซิลิกอน สารกึ่งตัวนำตามชื่อนั้นคือมีสมบัติที่เปลี่ยนไปมาได้ระหว่างสภาพฉนวนไฟฟ้าและนำไฟฟ้าซึ่งนำมาพัฒนาเป็นทรานซิสเตอร์ที่ควบคุมการเปิดปิดของการนำไฟฟ้าและกลายเป็นเลข 0 และ 1 ในโลกดิจิตอล อย่างไรก็ตามการพัฒนาของชิปคอมพิวเตอร์ในปัจจุบันดูเหมือนว่าจะเข้ามาถึงจุดสิ้นสุดแล้วด้วยข้อจำกัดทางขนาดอะตอมที่ทำให้ความเร็วของการคำนวณไม่สามารถเพิ่มมากขึ้นอีกต่อไป ปัจจุบันเราจึงพยายามหาทางต่างๆเพื่อเอาชนะข้อจำกัดนี้ วิธีการแก้ปัญหานี้อาจต้องหาวัสดุใหม่ที่มีความสามารถสูงกว่าสารกึ่งตัวนำแบบดั้งเดิม ในโครงการนี้คณะวิจัยมีความสนใจวัสดุในสองกลุ่มได้แก่ โลหะออกไซด์และโลหะแชลโคจิไนด์

สำหรับสารโลหะออกไซด์และโลหะแชลโคจิไนด์นั้น คณะวิจัยสนใจในส่วนโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ที่ในแบบสองมิติ สำหรับสารโลหะออกไซด์ความสนใจนั้นมาจากการค้นพบว่าสารประกอบสตรอนเทียมไททาเนต ($SrTiO_3$) ซึ่งมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Static dielectric constant) ที่สูงนั้นถ้าถูกมาสร้างผิวสัมผัสของสารนี้กับโลหะออกไซด์ $LaAlO_3$ จะเกิดชั้นอิเล็กตรอนสองมิติที่มีสมบัติเฉพาะตัวทางไฟฟ้าที่มีค่าความคล่องตัวของอิเล็กตรอน (Electron mobility) ที่สูงเหมาะแก่การมาใช้ออกแบบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบใหม่ๆ ซึ่งชั้นอิเล็กตรอนสองมิตินี้นอกจากจะมีสมบัติของสารกึ่งนำไฟฟ้าแล้วยังมีสมบัติอื่นๆมากมาย เช่น การนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบสองมิติ สมบัติเชิงแม่เหล็ก และ มีค่าสัมประสิทธิ์เทอร์โมอิเล็กตริกที่สูง เป็นต้น ในลักษณะที่คล้ายกันสารโลหะแชลโคจิไนด์ (เช่น MoS_2 และ WSe_2) ก็มีโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์เชิงสองมิติโดยเฉพาะเมื่อสารมีความบางมากๆ นอกจากจะมีสมบัติของสารกึ่งนำไฟฟ้าและแสดงประสิทธิภาพที่สูงเมื่อนำมาใช้ในตัวทรานซิสเตอร์แล้ว สารโลหะแชลโคจิไนด์ยังมีสมบัติในเชิงแสงและฟิสิกส์ของสปินที่โดดเด่นซึ่งอาจจะนำมาใช้ออกแบบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีความสามารถหลากหลายและแตกต่างจากที่มีในปัจจุบันได้

สำหรับวัสดุคาร์บอน ความน่าสนใจเริ่มมาจากงานวิจัยที่ออกมามากมายเกี่ยวกับสารกราฟีน (graphene) ซึ่งถูกค้นพบโดย Geim และ Novoselov ซึ่งได้รางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ในปี ค.ศ. 2010 กราฟีนถูกก็ถูกค้นพบว่ามีสมบัติเชิงไฟฟ้าที่โดดเด่นมากมาย เช่น ค่าความคล่องตัวของอิเล็กตรอนที่สูงมหาศาล สภาพควอนตัมฮอลล์ที่อุณหภูมิห้อง เป็นต้น อย่างไรก็ตามงานวิจัยของกราฟีนก็มีออกมามากมายและมีการแข่งขันสูงในปัจจุบันเช่นกัน คณะวิจัยจึงเบนความสนใจและคิดว่าน่าจะยังมีสารประกอบคาร์บอนแบบอื่น ๆ ที่น่าสนใจมากเช่นกันที่ยังคอยการค้นพบ คณะวิจัยจึงมาสนใจสารในกลุ่มที่เรียกว่า สารประกอบไดมอนดอยด์ (diamondoid) หรือ สารประกอบที่มีโครงสร้างอะตอมของคาร์บอนในระดับนาโน สารประกอบเหล่านี้น่าสนใจตรงที่น่าจะมีสมบัติต่าง ๆ คล้ายกับเพชร แต่มีราคาที่ถูกมากเหมาะแก่การพัฒนามาใช้ในเชิงอุตสาหกรรม

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

2.1 พัฒนาระบบการวัดโครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ (แหล่งกำเนิดแสง VUV laser) ที่สามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิต่ำ (~20 K) เพื่อศึกษาสมบัติเชิงควอนตัมของวัสดุสารควบแน่นชนิดใหม่ โดยเฉพาะสารประกอบกลุ่มโลหะทรานซิชั่นแชลโคเจไนด์ (เช่น MoS2, MoSe2, WSe2 เป็นต้น) และออกไซด์ (เช่น KTaO3 และ BiFeO3 เป็นต้น)

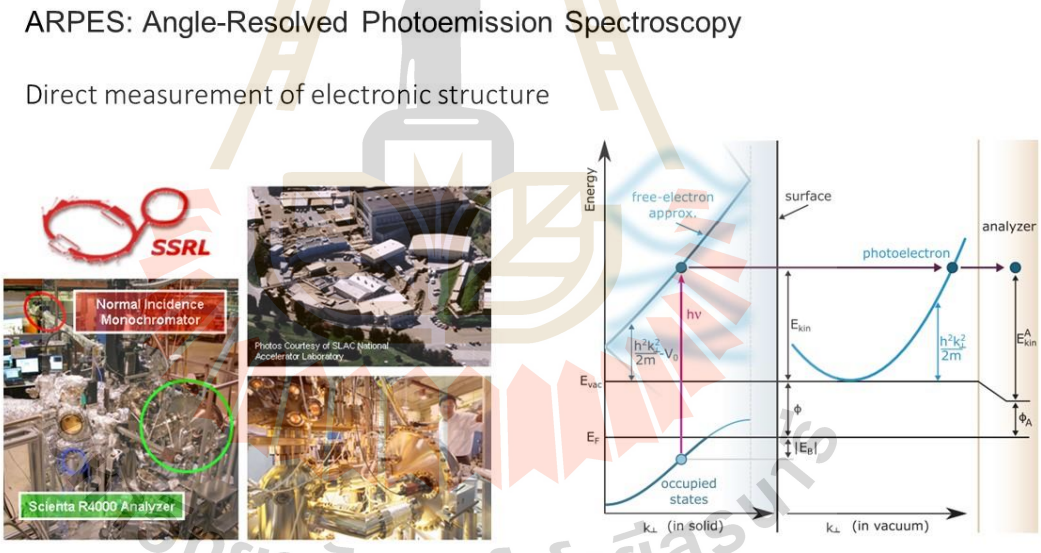
2.2 ค้นหาสถานะทางควอนตัมทั้งแบบใหม่ และ/หรือที่มีเอกลักษณ์จากโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ข้างต้นรวมถึงศึกษาสมบัติแม่เหล็กไฟฟ้า

2.3 ประยุกต์ใช้ความรู้ที่ได้ข้างต้นในการประดิษฐ์อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต้นแบบอย่างง่ายที่แสดงถึงความสามารถที่แตกต่างจากที่มีอยู่แล้วในปัจจุบัน

ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยทำอยู่ในกลุ่มของ สารประกอบโลหะทรานซิชั่นแชลโคเจไนด์ ออกไซด์ และสารประกอบคาร์บอน

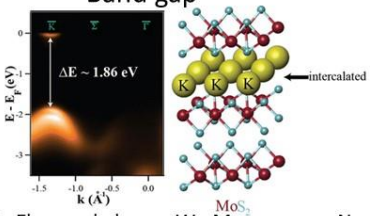
ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย



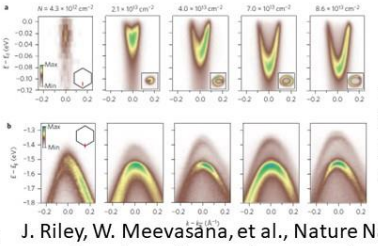
การออกแบบหน่วยวิจัยระบบปฏิบัติการแหล่งกำเนิดและลำเลียงแสงยูวีสำหรับใช้วัดโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ด้วยเทคนิคโฟโตอิมิชชั่นจำนวน 1 ห้อง เน้นที่การเชื่อมต่อแหล่งกำเนิดแสงยูวี (VUV light source) ที่พลังงาน 21.2182 eV ที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่มีความเข้มสูง สำหรับการวัดของ photoemissionspectroscopy (VUV Monochromator (Scienta VUV5K), chamber, vacuumpump, Gas control, and high precision stage) ซึ่งจะมีประโยชน์สูงกว่าที่จะช่วยวัดโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ของสารได้หลากหลายชนิดมากกว่าเพื่อสร้างผลงานตีพิมพ์ที่คุณภาพ

ตัวอย่างผลงานวิจัยโดยใช้เทคนิค ARPES

Band gap



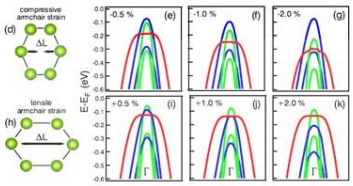
T. Ekanapakul, ..., W. Meevasana, Nano Letters **14**, 1312-1316 (2014)



NEC
&
unique
spin state

J. Riley, W. Meevasana, et al., Nature Nano. 10, 1043-1047 (2015); J. Riley, et al., Nature Phys. 10, 835 (2014)

Orbital



T. Eknapakul, I. Fongkeaw, ..., W. Meevasana, PRB(R) 2018

Topological states

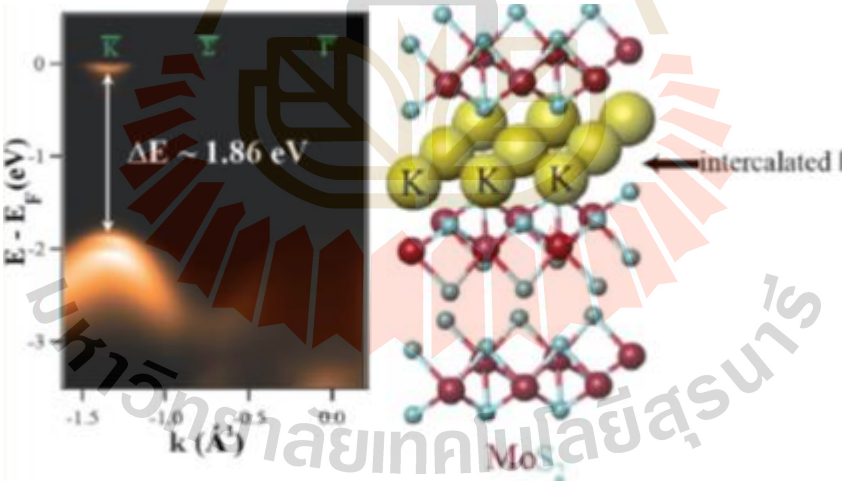
M.S. Bahramy, ..., T. Eknapakul, W. Meevasana and P.D.C King, Nature Materials 17, 21-28 (2018)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

โลหะชาลโคจีไนด์

โลหะชาลโคจีไนด์ (Transition-metal dichalcogenide, TMD) หรือที่เรียกว่า วัสดุต่อจากกราฟีน (materials beyond graphene)[1] ได้รับความสนใจมากเนื่องจากคุณสมบัติที่หลากหลายซึ่งมีศักยภาพสูงในการใช้ใน optoelectronics[2], valleytronics [3,4] และ spintronics [5] โดยหนึ่งตัวอย่างที่โดดเด่นของโลหะชาลโคจีไนด์ ได้แก่ MoS2 ซึ่งได้รับการศึกษามากที่สุดและมีการค้นพบสมบัติหลายอย่าง เช่น การเปลี่ยนแปลงของการมี indirect band gap ในรูปแบบก้อนสารมาเป็น direct band gap ในรูปแบบหนึ่งชั้นอะตอม [2, 6] และ โพลาไรซ์ของ valley ที่ควบคุมได้ [4, 7] เป็นต้น และเมื่อเร็วๆนี้คณะวิจัยของเราก็ได้ศึกษาโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ของ MoS2 ด้วยเทคนิคแสงซินโครตรอนที่เรียกว่า เทคนิคโฟโตอิมิชชันแบบแยกแยะเชิงมุม (Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy, ARPES) [8] และได้พบว่าโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ของ MoS2 สามารถเปลี่ยนจากแบบก้อนสารมาคล้ายกับแบบชั้นอะตอมเดี่ยวโดยการระเหยธาตุโพแทสเซียมลงไปที่พื้นผิวของสารตัวอย่างซึ่งทำให้เกิดการแทรกตัวของอะตอมโพแทสเซียมเข้าไปในชั้นผิวแล้วทำให้ใช้ชั้นอะตอมด้านบนแยกตัวออกห่างขึ้น แล้วมีผลกระทบต่อ band gap ที่มีค่าประมาณ 1.86 eV (รูปที่ 1) ใกล้เคียงกับการศึกษาในเอกสารอ้างอิงที่ [2] และมีค่า spin-orbit coupling ใกล้เคียงกับการคำนวณในเอกสารอ้างอิงที่ [9]

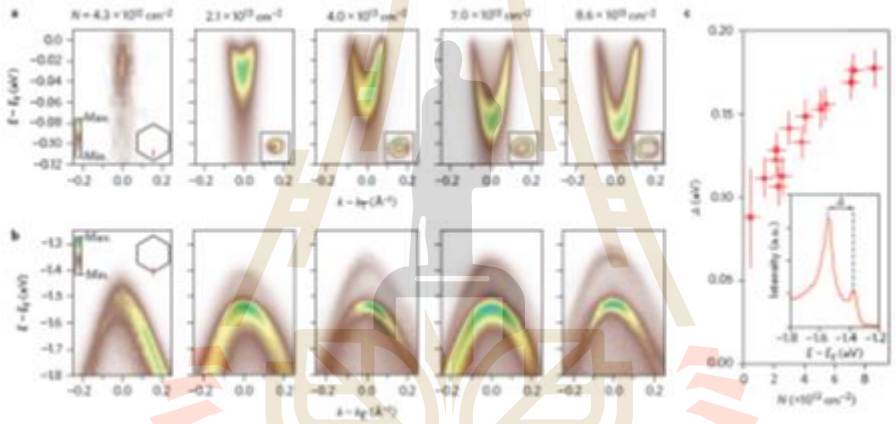


รูปที่ 1 โครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ของ MoS2 ที่คล้ายกับของชั้นอะตอมเดี่ยวซึ่งเกิดจากการแทรกตัวของอะตอมโพแทสเซียม (จากเอกสารอ้างอิงที่ [8] ที่เป็นผลงานของคณะผู้วิจัย)

วิธีการระเหยโพแทสเซียมเพื่อปรับโครงสร้างของ MoS2 นี้น่าจะยังมีประโยชน์ในการศึกษาเชิงสเปกโทรสโกปีของสภาพการนำไฟฟ้ายวดยิ่งที่น่าสนใจของ MoS2 ซึ่งพบว่าถ้ามีการใส่สนามไฟฟ้าเข้าไปอุณหภูมิวิกฤตจะมีค่าสูงได้ถึง 10.8 K (เทียบกับ Tc ที่ประมาณ 2-3 K ในก้อนสาร) [10, 11] ซึ่งน่าจะเป็นผลจากการบังคับเชิงควอนตัมให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ได้ในสองมิติเท่านั้น [6, 10, 12] ทั้งนี้วิธีระเหยโพแทสเซียมลงบนพื้นผิวอาจจะ

ช่วยให้เราสามารถศึกษา MoS2 จากตรวจสอบว่าโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ (โดย ARPES) ว่ามีส่วนไหนที่เปลี่ยนแปลงไปเพื่อที่จะได้เข้าใจกลไกการเกิดสภาพการนำไฟฟ้ายวดยิ่งที่มีค่าอุณหภูมิวิกฤตที่สูงขึ้นนี้ได้ ทั้งนี้ยังมีผลึกตัวนำไฟฟ้ายวดยิ่ง PdTe2 [13] ที่มีการคำนวณว่าโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์จะมีการเปลี่ยนแปลงมากเมื่อเป็นผลึกที่มีความบางในระดับ 1 ชั้นอะตอม [14] ที่น่าสนใจในการศึกษาต่อ

ในการใช้วิธีการเดียวกันนี้ WSe2 คณะผู้วิจัยสามารถเข้าใจในเชิงลึกเกี่ยวกับฟิสิกส์ของการโพลาไรซ์ของสปินในโครงสร้างอะตอมที่มีลักษณะสมมาตร [5, 15] รวมถึงสภาพทางควอนตัมที่เรียกว่า negative electron affinity [16] (รูปที่ 2) โดยความรู้ที่ได้ในโครงการนี้สามารถนำมาใช้ในการช่วยสร้างแพลตฟอร์มใหม่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบใหม่ อาทิ เช่น spintronics และ valleytronics ซึ่งพยายามใช้ประโยชน์จากสมบัติทางสปินของอิเล็กตรอนและระดับพลังงานสูงสุด/ต่ำสุดของชั้นพลังงาน valence/conduction band ตามลำดับ ทั้งนี้จากผลงานใน [16] ความรู้ส่วนนี้ยังสามารถนำมาประยุกต์พัฒนาระบบเก็บพลังงานไฟฟ้า (energy storage) เช่น ตัวเก็บประจุ หรือ supercapacitor ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นได้มากโดยใช้วัสดุที่น้อยมากๆ

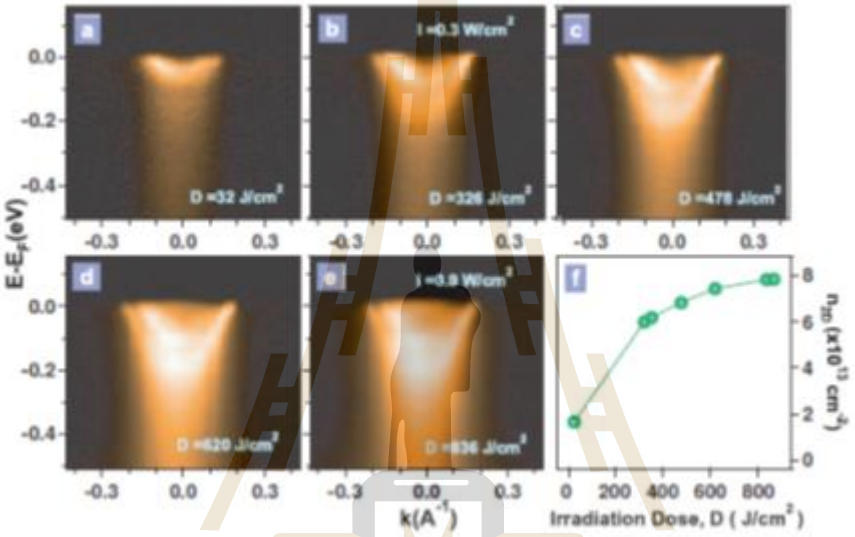


รูปที่ 2 โครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ของ WSe2 ซึ่งมีสภาพทางควอนตัมที่เรียกว่า negative electron affinity ที่บ่งบอกถึงประโยชน์ต่อการสร้างตัวเก็บพลังงานไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูงโดยใช้วัสดุนี้ (จากเอกสารอ้างอิงที่ [16] ที่เป็นผลงานของคณะผู้วิจัย)

โลหะออกไซด์

โลหะออกไซด์มีสมบัติทางไฟฟ้าที่หลากหลายที่อาจนำมาใช้พัฒนาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ทำหน้าที่ในรูปแบบใหม่ๆได้ [17,18] สมบัติทางไฟฟ้าที่ว่านั้นมีตัวอย่าง เช่น สภาพนำไฟฟ้ายิ่งยวด [19] สภาพ colossal magnetoresistance ในสารกลุ่มแมงกานีสออกไซด์ [20] หรือ สภาพ multiferroics อย่าง BiFeO3 [21] ที่ได้รับความสนใจมากในปัจจุบัน ในโครงการนี้ขอแนะนำโลหะออกไซด์ที่รู้จักกันมานาน คือ สารประกอบสตรอนเทียมไททาเนต (SrTiO3) เป็นอันดับแรก SrTiO3 มีสมบัติทางไฟฟ้าแม่เหล็กที่หลากหลายที่อุณหภูมิต่ำ สตรอนเทียมไททาเนตนั้นเป็นที่รู้จักมานานเนื่องจากเป็นสารประกอบที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Static dielectric constant) ที่สูงเป็นพิเศษถึงหลักหมื่น [22] และเป็นสารประกอบโลหะออกไซด์ที่ถูกค้นพบว่าสามารถนำไฟฟ้ายิ่งยวดได้เป็นสารแรก ทั้งสองสมบัตินี้อาจกล่าวได้ว่าเป็นสมบัติในก้อนสาร (Bulk properties) แต่ทั้งนี้ถึงแม้รู้จักกันมานานก็ยังมีการค้นพบอะไรใหม่ๆจาก SrTiO3 กันอยู่เรื่อย ๆ

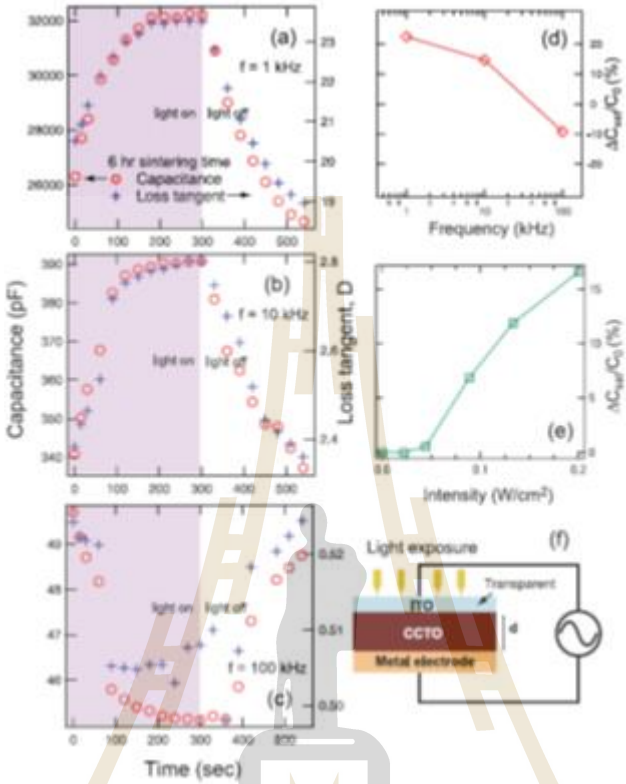
นอกเหนือจากคุณสมบัติภายในก้อนสารที่ได้กล่าวไปแล้ว ในปัจจุบันสตรอนเทียมไททาเนตได้ถูกค้นพบว่าเป็นสารประกอบที่มีคุณสมบัติเฉพาะตัวที่ผิวสัมผัส (สมบัติเชิงพื้นผิว) กับโลหะออกไซด์ชนิดอื่นๆเช่น LaAlO3 หรือกับตัวมันเองเมื่อมีการเติมสารเจือที่ต่างกัน สมบัติเหล่านี้รวมถึงค่าการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน (Electron mobility) แบบสองมิติที่มีค่าสูง [23], ชั้นการนำไฟฟ้ายิ่งยวดแบบสองมิติ [24], สภาพทางแม่เหล็กที่ชั้นผิว [25] และค่าสัมประสิทธิ์เทอร์โมอิเล็กตริก (Thermoelectric coefficient) สองมิติที่มีค่าสูง [26] จากคุณสมบัติที่มีลักษณะเฉพาะดังกล่าว สตรอนเทียมไททาเนตจึงมีศักยภาพที่จะถูกพัฒนามาประยุกต์ใช้ประโยชน์ได้หลายทาง เช่น การผลิตพลังงานไฟฟ้าทดแทนจากความร้อน หรือการผลิตอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์จากรอยต่อ (Junction) ของสารโลหะออกไซด์ยุคใหม่ ซึ่งในอนาคตอาจจะมีบทบาทที่สำคัญเช่นเดียวกับอุปกรณ์จากรอยต่อของสารกึ่งตัวนำ (p-n junction) เป็นต้น



รูปที่ 3 แสดงค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่เปลี่ยนไปตามการโดปด้วยการฉายรังสีบนผลึก SrTiO3 (จากเอกสารอ้างอิงที่ [28] ที่เป็นผลงานของคณะผู้วิจัย)

จากความน่าสนใจดังที่ได้กล่าวมานี้ คณะผู้วิจัยได้ทำการศึกษาโครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ในก้อนสาร (bulk electronic structure) ของ SrTiO3 [27] โดยการใช้เทคนิคโฟโตอิมิชชันแบบแยกแยะเชิงมุม ซึ่งทำให้เข้าใจถึงสมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์ในก้อนสารดีขึ้นบางส่วน แต่ทั้งนี้สิ่งที่น่าสนใจมากกว่านั้นอยู่ที่บริเวณบนพื้นผิว จากการทำวิจัยเบื้องต้นพบว่าการฉายแสงยูวีช่วยทำให้เกิดชั้นผิวอิเล็กตรอนใน 2 มิติบนพื้นผิวของ SrTiO3 และยังเป็นวิธีการใหม่ที่ใช้ควบคุมความหนาแน่นของอิเล็กตรอนแบบ 2 มิติได้ด้วย [28] ตามรูปที่ 3 โดยโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ที่วัดได้จาก ARPES มีการเปลี่ยนแปลงไปจากของก้อนสารโดยมีมวลของอิเล็กตรอนยังผล (effective electron mass) ที่น้อยลง ลักษณะที่เห็นนี้มีความสอดคล้องกับผลงานวิจัยอีกกลุ่ม [29] ซึ่งพบว่าตัวเก็บประจุที่มีชั้นผิวอิเล็กตรอนใน 2 มิติของ LaAlO3/SrTiO3 สอดแทรกอยู่จะสามารถมีค่าความจุไฟฟ้าที่สูงขึ้นได้ถึง 40% ลักษณะดังกล่าวสอดคล้องกับการที่มวลของอิเล็กตรอนยังผลมีค่าลดลง และเป็นสมบัติเชิงควอนตัมที่เรียกว่าการบีบอัดอิเล็กตรอนที่เป็นลบ (negative electron compressibility) ที่รุนแรง ทั้งนี้คณะผู้วิจัยยังได้ทำการศึกษาต่อเนื่องและค้นพบว่า ตัวเก็บประจุที่ใช้ CaCu3Ti4O12 เป็นสารไดอิเล็กทริกสามารถถูกกระตุ้นให้เกิดสภาพนำไฟฟ้าบนพื้นผิวแล้วส่งผลให้มีค่าความจุไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจน

[30] (รูปที่ 4) ซึ่งคณะผู้วิจัยคาดว่าจะเกิดจากสภาพการบีบอัดอิเล็กตรอนที่เป็นลบบนพื้นผิว นอกจาก SrTiO3 และ CaCu3Ti4O12 แล้วคณะผู้วิจัยยังได้ทำการทดลองเบื้องต้นกับสาร BiFeO3 และ KTaO3 ซึ่งแสดงถึงการเพิ่มขึ้นของค่าความจุไฟฟ้าที่น่าจะมาจากสภาพการบีบอัดอิเล็กตรอนที่เป็นลบนี้



รูปที่ 4 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงของค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ CaCu3Ti4O12 (จากเอกสารอ้างอิงที่ [30] ที่เป็นผลงานของคณะผู้วิจัย)

2.3 บทคัดย่อโครงการวิจัย

อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในปัจจุบันส่วนใหญ่สร้างจากสารกึ่งตัวนำแบบดั้งเดิมโดยเฉพาะจากซิลิกอน สารกึ่งตัวนำตามชื่อนั้นคือมีสมบัติที่เปลี่ยนไปมาได้ระหว่างสภาพฉนวนไฟฟ้าและนำไฟฟ้าซึ่งนำมาพัฒนาเป็นทรานซิสเตอร์ที่ควบคุมการเปิดปิดของการนำไฟฟ้าและกลายเป็นเลข 0 และ 1 ในโลกดิจิตอล อย่างไรก็ตามการพัฒนาของชิปคอมพิวเตอร์ในปัจจุบันดูเหมือนว่าจะเข้ามาถึงจุดสิ้นสุดแล้วด้วยข้อจำกัดทางขนาดอะตอมที่ทำให้ความเร็วของการคำนวณไม่สามารถเพิ่มมากขึ้นอีกต่อไป ปัจจุบันเราจึงพยายามหาทางต่างๆเพื่อเอาชนะข้อจำกัดนี้ วิธีการแก้ปัญหานี้อาจต้องหาวัสดุใหม่ที่มีความสามารถสูงกว่าสารกึ่งตัวนำแบบดั้งเดิม ในโครงการนี้คณะวิจัยมีความสนใจวัสดุในสองกลุ่มได้แก่ โลหะออกไซด์และโลหะแชลโคจิไนด์ โดยวัสดุเหล่านี้อาจมาใช้สำหรับการสร้างอิเล็กทรอนิกส์รุ่นใหม่ / Spintronics / คอมพิวเตอร์ควอนตัม หรือเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานทดแทน, การจัดเก็บพลังงาน (เช่นแบตเตอรี่และ supercapacitor) อย่างไรก็ตามเพื่อให้การใช้ประโยชน์จากฟังก์ชันการทำงานของวัสดุเหล่านี้ให้ได้เต็มที่ เราควรจะเข้าใจธรรมชาติของวัสดุขั้นสูงเหล่านี้ให้ดีในเชิงพื้นฐาน

ในข้อเสนอโครงการนี้คณะวิจัยสนใจที่จะศึกษาโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ของสารประกอบกลุ่มโลหะทรานซิชั่นแชลโคเจไนด์ (เช่น MoS2, MoSe2, WSe2 เป็นต้น) และออกไซด์ (เช่น KTaO3 และ BiFeO3 เป็นต้น) ทั้งเชิงทดลองและทฤษฎี และค้นหาสถานะทางควอนตัมทั้งแบบใหม่ และ/หรือที่มีเอกลักษณ์จากโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ข้างต้นรวมถึงศึกษาสมบัติแม่เหล็กไฟฟ้า โดยท้ายที่สุดคณะวิจัยจะพยายามประยุกต์ใช้ความรู้ที่ได้ข้างต้นในการประดิษฐ์อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต้นแบบอย่างง่ายที่แสดงถึงความสามารถที่แตกต่างจากที่มีอยู่แล้วในปัจจุบัน

เอกสารอ้างอิง

[1] S.Z. Butler et al., ACS Nano 7, 2898-2926 (2013)

[2] K.F. Mak et al., Phys. Rev. Lett. 105, 136805 (2010)

[3] H. Zeng et al., Nature Nanotech. 7, 490 (2012)

[4] K.F. Mak et al., Nature Nanotech. 7, 494 (2012)

[5] H. Yuan et al., Nature Phys. 9, 563 (2013)

[6] A. Splendiani et al., Nano Lett. 10, 1271 (2010)

[7] H. Zeng et al., Nature Nanotech. 7, 490 (2012)

[8] T. Ekanapakul, ..., W. Meevasana, Nano Lett., 14, 1312 (2014).

[9] Z. Y. Zhu, Y. C. Cheng, and U. Schwingenschlogl, Phys. Rev. B 84, 153402 (2011)

[10] J.T. Ye et al., Science 338, 1193 (2012)

[11] K. Taniguchi et al., Appl. Phys. Lett. 101, 042603 (2012).

[12] A. Kuc, N. Zibouche, and T. Heine, Phys. Rev. B 83, 245213 (2011).

[13] M. Chhowalla, et al. Nature Chem. 5, 263 (2013).

[14] S. Lebegue, et al. Phys. Rev. X 3, 031002 (2013).

[15] J.M. Riley, ..., W. Meevasana, ..., P.D.C. King, Nature Phys. 10, 835-839 (2014)

[16] J.M. Riley, W. Meevasana, et al. Nature Nano., Advance Online Publication (2015) ; DOI: 10.1038/NNANO.2015.217.

[17] H. Takagi, and H.Y. Hwang, Science 327, 1601 (2010)

[18] J. Mannhart, and D. G. Scholm, Science 327, 1607 (2010)

[19] J.G. Bednorz and K.A. Muller, Rev. Mod. Phys. 60, 585 (1988)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

[20] R. Von Helmolt, et al., Phys. Rev. Lett. 71, 2331 (1993)

[21] T. Kimura, et al., Nature 426, 55 (2003)

[22] K. A. Muller and H. Burkard, Phys. Rev. B 19, 3593 (1979)

[23] A. Ohtomo, and H. Y. Hwang, Nature 427, 423 (2004)

[24] N. Reyren, et al., Science 317, 1196 (2007)

[25] A. Brinkman, et al., Nature Mater. 6, 493 (2007)

[26] H. Ohta, et al., Nat. Materials 6, 129 (2007)

[27] W. Meevasana, et al., New J. Phys. 12 023004 (2010)

[28] W. Meevasana, et al., Nature Mater., 10, 114 (2011)

[29] L. Li, et al., Science 332, 825-828 (2011)

[30] C. Masingboon, ..., W. Meevasana, Appl. Phys. Lett. 102, 202903 (2013)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

วิธีการดำเนินงาน

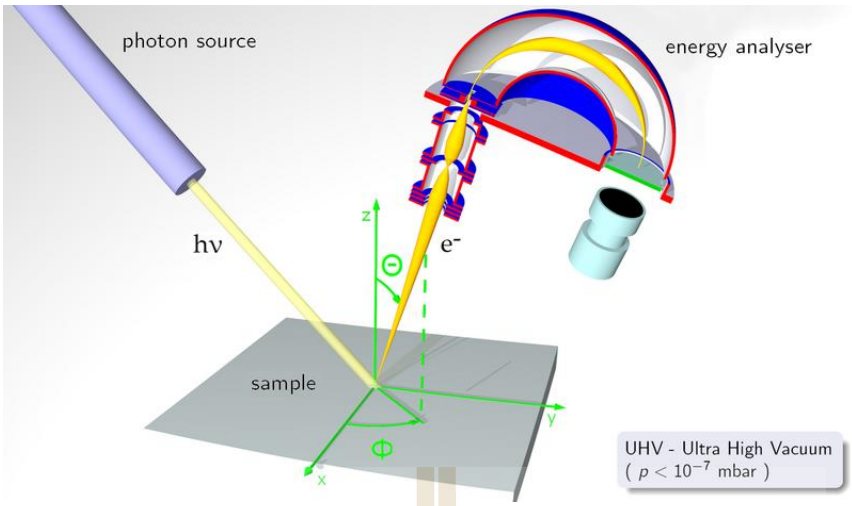
ก. ขั้นตอนการเตรียมสารตัวอย่างโลหะออกไซด์และโลหะแซลโคจิไนด์

สำหรับผลึกที่ไม่ทราบระนาบของผลึกอาจจะต้องวัดระนาบของผลึกด้วยเครื่อง X-ray Diffraction แบบ Laue ในการทดลองโฟโตอิมิชชันต้องการความสะอาดสูงมาก วิธีหนึ่งที่ใช้ทั่วไปคือการทำให้ผลึกแตกออกในสุญญากาศเพื่อได้พื้นผิวที่สะอาด เพื่อที่ผลึกแตกออกอย่างราบเรียบ ก่อนนำผลึกไปวัดเทคนิคที่สำคัญคือการตัดผลึกบางส่วนในแนวที่ผลึกจะแตกออก การตัดนำร่องนี้ต้องอาศัยเครื่องตัดผลึกแบบเส้นลวด หลังจากการตัดนำร่องต้องล้างผลึกให้สะอาดด้วยแอลกอฮอล์ก่อนใส่เข้าสู่ระบบสุญญากาศในเครื่องโฟโตอิมิชชัน สำหรับโลหะแซลโคจิไนด์มีการเตรียมคล้ายกันแต่ไม่ต้องมีการตัดนำร่อง

ข. ขั้นตอนการวัดโครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์โดยเทคนิคโฟโตอิมิชชันแบบต่างๆ (ARPES, SR-PES และ XPS)

เทคนิคโฟโตอิมิชชันอาศัยหลักการเดียวกับปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก โดยแสงที่มีพลังงานสูงจะเข้าไปกระตุ้นอิเล็กตรอนที่อยู่ภายในให้หลุดออกมา โดยเครื่องจะทำการวัดจำนวนของอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาที่พลังงานและมุมต่างๆ (ตามรูปที่ 1) เพื่อใช้ดูโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ของวัสดุที่สนใจ สำหรับโครงการนี้จะเลือกอุณหภูมิสองช่วงคืออุณหภูมิห้อง และอุณหภูมิประมาณ 20 เคลวินโดยใช้ฮีเลียมเหลวในการควบคุมอุณหภูมิ หลังจากปรับอุณหภูมิให้เท่ากับอุณหภูมิที่จะศึกษาแล้วทำผลึกให้แตกออก สามารถตรวจสอบความเรียบได้โดยการฉายแสงเลเซอร์เพื่อดูภาพสะท้อน หลังจากนั้นทำการวัดโครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ โดยฉายแสงยูวีที่มีความเข้มสูงจากเครื่องซินโครตรอนที่พลังงานโฟตอนระหว่าง 40-80 eV สำหรับเทคนิค ARPES และ SR-PES แต่สำหรับเทคนิค XPS พลังงานแสงจะกำหนดโดยธาตุที่ต้องการศึกษา หมายเหตุ สำหรับสารประกอบ $SrTiO_3$ การฉายแสงดังกล่าวยังทำให้เกิดชั้นอิเล็กตรอนสองมิติขึ้นด้วยซึ่งอยู่รวมกับโครงสร้างอิเล็กตรอนในก้อนสาร จากนั้นวัดสเปกตรัมความหนาแน่นของโฟโตอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาเป็นฟังก์ชันของพลังงาน เปลี่ยนไปวัดที่ค่ามุมต่างๆเพื่อเป็นการแยกแยะเชิงมุมเพื่อดูการกระจายตัวที่ค่าโมเมนตัมต่างๆซึ่งจะเป็นข้อมูลสำคัญในโครงการนี้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูป แผนภาพเทคนิคโฟโตอิมิชชันแบบแยกแยะเชิงมุม

ค. ขั้นตอนการวัดต้านทานไฟฟ้าบนพื้นผิวหลังการฉายแสงยูวี

นำสารตัวอย่างเข้าสู่ระบบสุญญากาศซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของการฉายแสง เนื่องจากแสงยูวีจะถูกดูดกลืนได้ง่ายในอากาศปกติทำให้ความเข้มลดลง หลังจากความดันอากาศอยู่ในช่วงต่ำกว่า 10^{-7} torr จะทำการตรวจสอบสภาพนำไฟฟ้าบนผิวโดยการวัดความต้านทานก่อนฉายแสง ต่อจากนั้นฉายแสงบนสารตัวอย่างด้วยแสงยูวีที่ปรับ ความเข้มแสง พลังงาน และขนาดของลำแสงให้มีค่าตามที่ต้องการ แล้วจึงตรวจสอบสภาพนำไฟฟ้าบนผิว โดยการวัดความต้านทานหลังฉายแสงอีกครั้ง หมายเหตุ เพื่อช่วยในการวัดความต้านทานของผลึกที่เป็นฉนวนการทำขั้วไฟฟ้าโดยเทคนิค sputtering อาจจำเป็น

ง. ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มไดมอนดอยด์

มีการเตรียมฟิล์มไดมอนดอยด์ 2 แบบ แบบแรกทำได้โดยการปลูกฟิล์มไดมอนดอยด์ที่เรียกว่า Self assembly monolayer โดยการจุ่มแผ่นฟิล์มบางของทองนสารละลาย adamantane ซึ่งผสม toluene และ ethanol ประมาณครึ่งๆ แช่ไว้ประมาณ 24 ชม แล้วยกแผ่นฟิล์มบางของทองออกจะมีไดมอนดอยด์ติดอยู่บางๆ แบบที่ 2 ทำได้โดยวิธี Chemical Vapor Deposition (CVD) ซึ่งใช้แผ่นโลหะโดยให้อุณหภูมิสูงประมาณ 1000 องศาเซลเซียสแล้วใส่แก๊ซของ adamantine เข้าไปจะได้แผ่นฟิล์มบางๆของไดมอนดอยด์

จ. ขั้นตอนการวิเคราะห์ผลและการเปรียบเทียบผลที่ได้กับการคำนวณ

ใช้โปรแกรม Igor ของบริษัท Wavematrics ในการวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อดูโครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์โดยเฉพาะการกระจายตัวของอิเล็กตรอนในฟังก์ชั่นของพลังงานและโมเมนตัม หรือ Electron band dispersion ในช่วงพลังงานใกล้กับชั้นพลังงานเฟอร์มิ (ประมาณ 0-300 meV) เปรียบเทียบกับโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ที่ได้จากการคำนวณโดยวิธี Local Density Approximation ที่มีอยู่แล้ว หรือผลการคำนวณเพิ่มเติมจากนักวิจัยร่วม จากนั้นทำการเปรียบเทียบกับผลการทดลองจากเทคนิคอื่นเช่น ค่ามวลประสิทธิ (Effective mass) ของอิเล็กตรอนจากค่าความต้านทาน หรือจากสมบัติทางแสงเพื่อเป็นการยืนยัน หรือในกรณีที่ผลการทดลองไม่ตรงกับผลการคำนวณ ข้อมูลส่วนที่ต่างกันนี้อาจจะช่วยบ่งบอกถึงที่มาของการ

กำเนิดสมบัติโดดเด่นของสตรอนเทียมไททาเนตที่กล่าวมาข้างต้นได้ นอกจากนี้ยังส่วนของการคำนวณหาชั้นพลังงานตามแบบจำลอง Quantum well เพื่อดูการเกิดชั้นอิเล็กตรอนสองมิติ

มีแผนการดำเนินงานดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 วิธีการดำเนินงานวิจัยและแผนการดำเนินงานวิจัย โครงการย่อยที่ 4

กิจกรรม	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ปี 2564												
1.เตรียมวัสดุที่ต้องการศึกษา												
2.ศึกษาแนวทางในการวิจัยพื้นฐาน ร่วมกับการศึกษาเชิงทฤษฎี												
3.ปรับแต่งระบบทดลองและดำเนินการวิจัย												
4.วิเคราะห์ผลการวิจัย และสรุปผล												
5.นำเสนอผลการวิจัยและเผยแพร่ผลงานวิจัย												

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 4

ผลการวิจัย

ผลงานวิจัยของโครงการย่อยที่ 4

1. Electronic Structure and Thermoelectric Properties of Two-dimensional Electron Gases at the Surface of La-doped SrTiO3(110) Single Crystal, [P. Buaphet, T. Eknapakul, C. Jaisuk, S. Chaiyachad,W. Jindata, P. Moontragoon and W. Meevasana*, *Chiang Mai J. Sci.* 48, 1141 - 1148 (2021)]

คณะวิจัยรายงานโครงสร้างอิเล็กทรอนิคส์แอนไอโซโทรปิกแบบสองมิติ (2D) ซึ่งมีต้นกำเนิดจากพื้นผิวขั้วของ La0.1Sr0.9TiO3 (110) โดยใช้สเปกโทรสโกปีการแผ่รังสีด้วยแสงแบบแก้ไขมุม (ARPES) มีการสังเกตมวลของอิเล็กตรอนแบบเบาและหนักที่ 0.41me และ 10.39me ที่มีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนแบบ 2D ที่คำนวณได้สูงถึง $2x10^{14}$ cm^{-2} ซึ่งลดลงในช่วงที่สมบูรณ์แบบสำหรับการใช้งานเทอร์โมอิเล็กทริก ต้นกำเนิดของพฤติกรรมแอนไอโซทรอปิกได้รับการศึกษาโดยแบบจำลองการยึดเกาะแน่น (TB) ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยธรรมชาติแอนไอโซทรอปิกของ Ti d-orbitals ในทิศทางนี้ ด้วยวิธีกึ่งคลาสสิก ค่าสัมประสิทธิ์ Seebeck (S) สามารถคำนวณได้ถึง 170 μV/K ที่อุณหภูมิห้อง ค่าสัมประสิทธิ์ Seebeck นี้สามารถปรับปรุงได้ที่ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนจำเพาะเนื่องจากโครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ของสถานะ 2DEG ซึ่งถูกแก้ไขเมื่อเปรียบเทียบกับสถานะจำนวนมาก การค้นพบนี้ชี้ให้เห็นถึงโอกาสในการสร้างพื้นผิวแอนไอโซโทรปิกและความเข้มข้นของยาสลบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกแบบออกไซด์

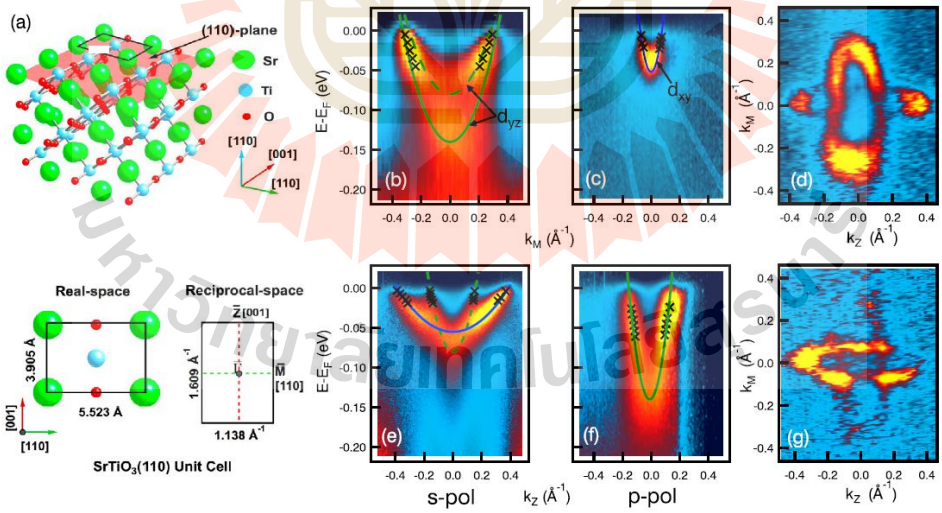


Figure 1. (Top) Crystal structure of LSTO(110), (Bottom) the 2D unit cell in real-space and reciprocal-space of $(SrTiO)^{4+}$ surface (a). The 2D electronic structure measured at = 50eV along M--M (s-pol) (b), M--M (p-pol) (c), Z--Z (s-pol) (e), Z--Z (p-pol) (f), give the information of anisotropic pockets. Fermi surface maps measured with (d) s-pol and (g) p-pol suggest different Ti d-orbital characters.

2. Resistive Switching in Diamondoid Counter Electrodes of Dye-Sensitized Solar Cells (DSSCs) [Sumeth Siriroj, Sekson Lowpa, Dulyawat Doonyapisut, Suppanut Sangphet, Hideki Nakajima, Ratchadaporn Supruangnet, Santi Maensiri, Vittaya Amornkitbamrung and Worawat Meevasana* *Chiang Mai J. Sci.*, 48, 1404-1411 (2021)]

คณะวิจัยได้เตรียมไดมอนด์อยด์ (อดามันเทน) ที่เคลือบบนพื้นผิวซิลิกอนโดยใช้อิเล็กโทรดเทคนิคการสะสมไอเคมี (CVD) (ADA/Si: CVD) อิเล็กโทรดนี้ถูกใช้เป็นอิเล็กโทรดเคาน์เตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (DSSCs) และสิ่งนี้นำไปสู่ความหนาแน่นกระแสลัดวงจรสูง (Jsc) Jsc สูงสามารถอธิบายได้โดยพฤติกรรมการสลับความต้านทานของฟิล์มไดมอนด์อยด์ที่ความต้านทานบนอคติไปข้างหน้าต่ำกว่าอคติย้อนกลับ ทำให้การขนส่งอิเล็กตรอนที่ส่วนต่อประสานระหว่างอิเล็กโทรดกับอิเล็กโทรไลต์ง่ายขึ้น จากการใช้ photoemission spectroscopy (UPS/XPS) พบว่า ADA/Si: ส่วนประกอบฟิล์ม CVD ที่ 81% SP2 และ 19% ของ SP3 hybridization ของฟิล์มตรวจสอบคาร์บอนสามารถดำเนินการและยังมีคุณสมบัติที่น่าสนใจของ เพชรเช่น ความสัมพันธ์ของอิเล็กตรอนเชิงลบ (NEA) Jsc ของอิเล็กโทรดเคาน์เตอร์ ADA/Si: CVD สูงถึง 22.1 $mA{\cdot}cm^{-2}$ เมื่อเทียบกับ 19.8 $mA{\cdot}cm^{-2}$ ของอิเล็กโทรดเคาน์เตอร์อ้างอิง Pt อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพของอิเล็กโทรดตัวนับ ADA/Si: CVD นั้นต่ำกว่าอิเล็กโทรดตัวนับอ้างอิง Pt เนื่องจากฟิล์มมีค่าการนำไฟฟ้าต่ำและส่งผลให้มีปัจจัยเติม (FF) เพียง 0.36 ซึ่งบ่งชี้ว่าเราสามารถปรับปรุงอิเล็กโทรดนี้ได้โดยการปรับสภาวะกระบวนการ CVD ให้เหมาะสม การค้นพบนี้ควรเป็นแนวทางที่น่าสนใจในการปรับปรุงประสิทธิภาพของ DSSC ด้วยต้นทุนการผลิตที่ต่ำลง เช่นเดียวกับการใช้งานตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งครอบคลุมเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด perovskite ตัวเก็บประจุยิ่งยวด และเซลล์โฟโตคะตาไลติก

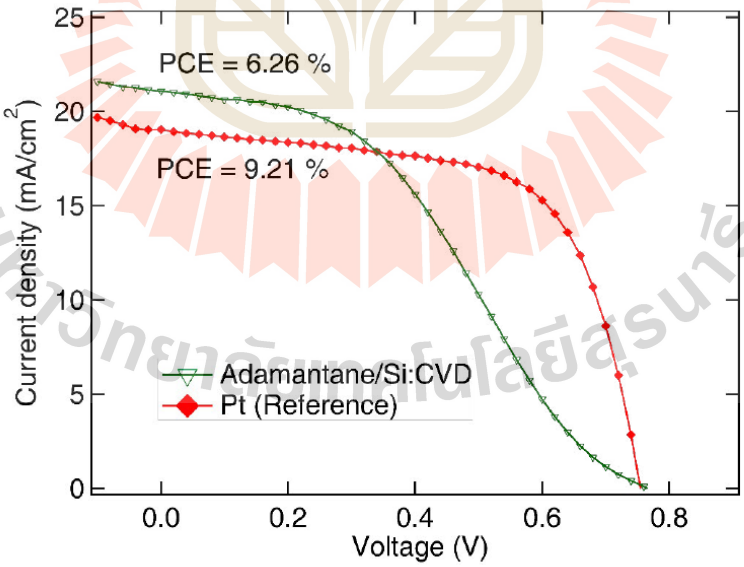


Figure 4. J-V curve and efficiency of DSSCs, green line is a curve of adamantane coated on silicon via the CVD technique (ADA/Si: CVD) and the red line is Pt reference counter electrode.

3. Large increase in photoinduced conductivity of two-dimensional electron gas at SrTiO3 surface with BiFeO3 topping layers [Peerawat Laohana, Siwat Polin, Warakorn Jindata, Aissara Rasritat, Tanachat Eknapakul, Pimchanok Leuasoongnoen, Pattanaphong Janphuang, Wittawat Saenrang, and Worawat Meevasana*, submitted to Applied Physics Letters (2022)]

ในงานนี้ คณะวิจัยทำการศึกษาและเปรียบเทียบค่าการนำไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำด้วยแสงของก๊าซอิเล็กตรอนแบบสองมิติ (2DEG) ที่พื้นผิวเปล่าของ SrTiO3 และในโครงสร้าง heterostructure ของ BiFeO3 (BFO) และ SrTiO3 (STO) โดยที่ BiFeO3 ถูกสะสมโดยแมกนีตรอนสปัตเตอร์ด้วยคลื่นความถี่วิทยุ . ค่าการนำไฟฟ้าจากการเหนี่ยวนำด้วยแสงของอินเทอร์เฟซ BFO/STO แสดงให้เห็นการเพิ่มขึ้นอย่างมาก ซึ่งมากกว่าผลรวมของค่าการนำไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำด้วยแสงจากฟิล์มบาง BFO และคริสตัล STO แต่ละตัวถึง 20.62 เท่า เนื่องจากค่าการนำไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำด้วยแสงของโครงสร้างเฮเทอโรโครงสร้าง BFO/STO สามารถปรับให้สูงขึ้นและต่ำลงได้โดยใช้สนามไฟฟ้ากับพื้นผิวด้านบน เราจึงถือว่าการเพิ่มขึ้นอย่างมากนี้มาจากโพลาไรซ์ไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำด้วยแสงของ BiFeO3 ด้วยการตั้งค่าสองจุดของอคติเชิงบวกและอคติเชิงลบ การนำไฟฟ้ายังแสดงพฤติกรรมเหมือนไดโอด งานนี้ให้วิธีการโต้ตอบระหว่างการฉายรังสีแสง สนามไฟฟ้า และการนำไฟฟ้าในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบออลออกไซด์

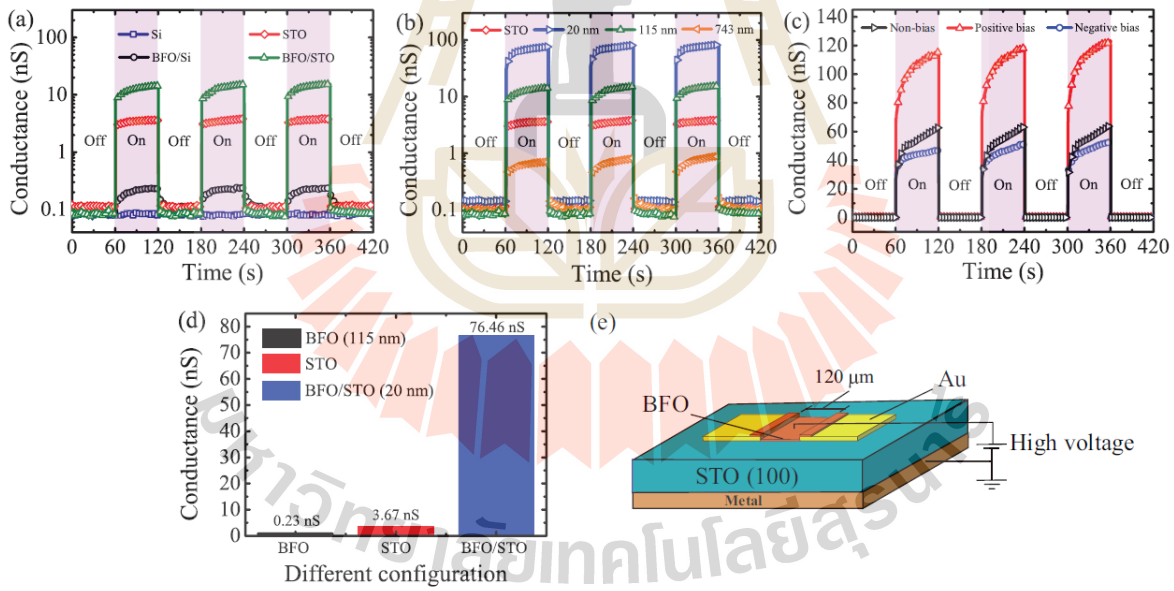


FIG. 2. The time-dependent conductance of samples with multiple UV light exposure cycles. (a) Different configurations with Si, BFO film (BFO/Si at 115 nm), STO crystal, and BFO/STO interface (BFO thickness at 115 nm). (b) BFO/STO interface with no BFO films and varying thicknesses of 20, 115, and 743 nm. (c) BFO/STO interface with the zero-bias, positive bias, and negative bias. (d) The stack column of the maximum conductance at different configurations with BFO (BFO/Si at 115 nm), STO crystal, and BFO/STO interface at 20 nm under illumination. (e) The schematic device geometry of the BFO/STO interface upon applying a high voltage across the top and bottom electrodes.

4. High performance in the removal of methylene blue dye by grass synthesis of photocatalyst absorbent CuONiO/ BAG composites [Rarm Phinjaroenphan, Kornkanok Boonserm, and Worawat Meevasana*, to be submitted (2022)]

ประสิทธิภาพสูงในการกำจัดสีย้อมอินทรีย์เมทิลีนบลู (MB) กล่าวคือ CuONiO ที่ประดิษฐ์ขึ้นจากการรองรับจีโอโพลีเมอร์ได้รับการพัฒนาอย่างประสบความสำเร็จ อนุภาคนาโนคลัสเตอร์แบบ bimetallic ของ CuONiO ได้รับการสังเคราะห์จากสารละลายที่สกัดด้วยหญ้านิ้วบวมโดยกระบวนการลดขนาดพร้อมกัน จากนั้นจึงชุบบนวัสดุชีวมวลขี้เถ้าจีโอโพลีเมอร์ (BAG) ผลิตภัณฑ์เหล่านี้จะเป็นที่รู้จักในฐานะวัสดุดูดซับตัวเร่งปฏิกิริยาสีเขียวที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม 0, 5, 10 และ 15 % โดยน้ำหนักของโหลดตัวเร่งปฏิกิริยา CuONiO บนตัวดูดซับ BAG ได้ถูกสังเคราะห์และตรวจสอบแล้ว ข้อมูลโครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีและพันธะมีลักษณะเฉพาะโดยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD), ฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (FT-IR), กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านความละเอียดสูง (HR-TEM), กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดภาคสนาม (FE-SEM) และเทคนิคเอ็กซ์เรย์สเปกโตรมิเตอร์แบบกระจายพลังงาน (EDS)

นอกจากนี้ กิจกรรมการดูดซับตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้การส่องสว่างด้วยแสงยูวีของคอมโพสิต CuONiO/BAG ถูกสังเกตด้วย UV-Vis Spectrometer (UV-Vis) เป็นเรื่องที่น่าสนใจมากที่คอมโพสิต CuONiO/BAG ให้ความสามารถในการกำจัด MB ที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นๆ ที่ใช้ CuO, NiO และจีโอโพลีเมอร์จากวัสดุผสมอื่นๆ ประสิทธิภาพที่ดีที่สุดได้มาจาก 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ CuONiO/BAG ซึ่งมีค่าความสามารถในการดูดซับ (qe) ที่ 46.60 (มก./กรัม) ในขณะที่ CuONiO/BAG 15, 5 และ 0 % โดยน้ำหนักถูกเปิดเผยที่ 45.93 , 45.62 และ 42.12 (มก./กรัม) ตามลำดับ ไม่เพียงเท่านั้น แต่ BAG ที่ไม่โหลดยังนำเสนอความสามารถในการกำจัด MB ที่ใหญ่กว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุจีโอโพลีเมอร์อื่นๆ งานนี้แสดงให้เห็นถึงวัสดุต้นทุนต่ำที่พัฒนาขึ้นใหม่ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดสารละลายย้อมอินทรีย์ MB เพื่อใช้ในการบำบัดน้ำเสีย

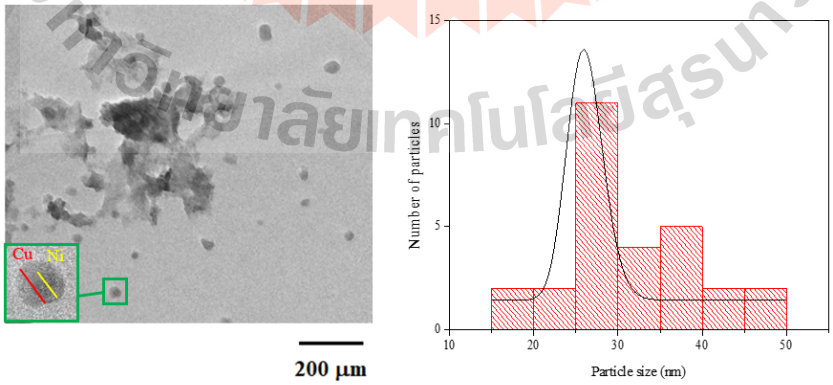
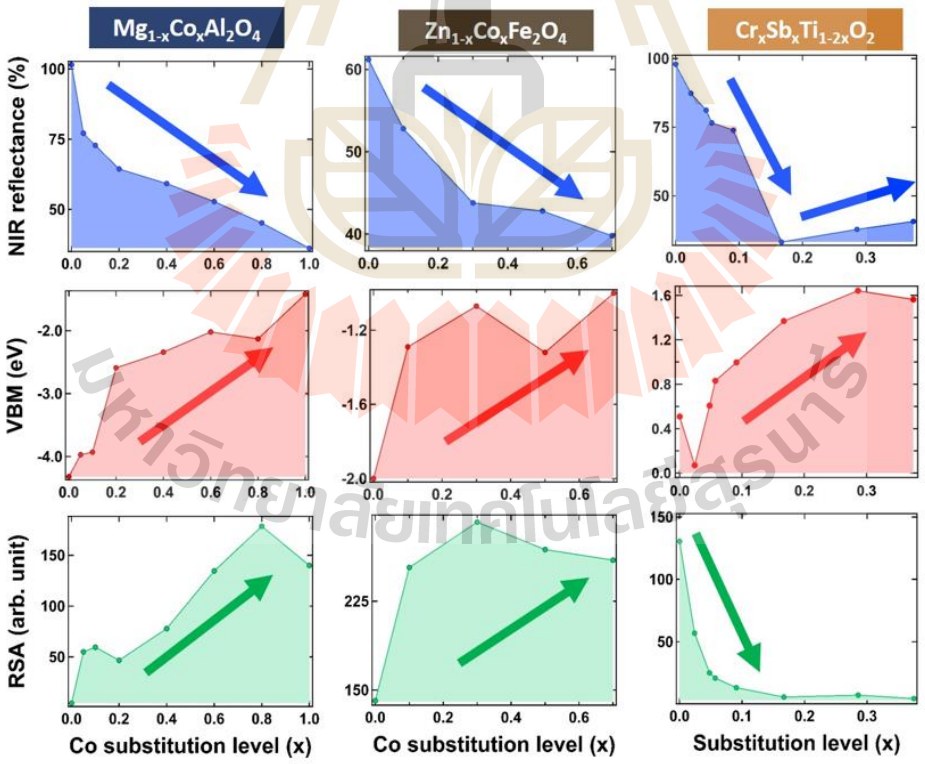


Figure 3. HR-TEM images of the grass synthesis CuONiO nanoparticles.

5. Electronic and phononic absorption contributions to near-infrared reflectance of Mg1-xCoxAl2O4, Zn1-xCoxFe2O4 and CrxSbxTi1-2xO2 pigments [Worasarit Saengsui, Teerasak Tangkittimasak, Mantana Suwan, Nuchjarin Sangwong, Chalita Tangon, Narong Chanlek, Pattana Rakkwamsuk, Sitthisunthon Supothina, Worawat Meevasana*, to be submitted to Ceramics International (2022)]

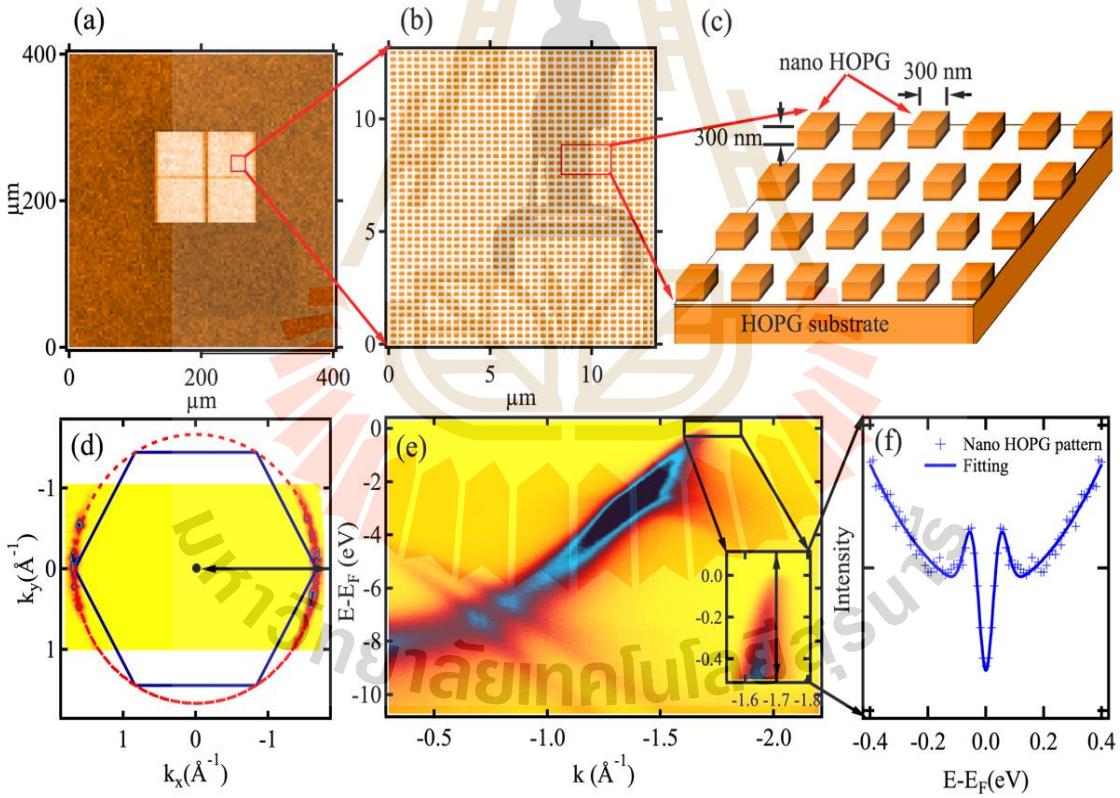
Mg1-xCoxAl2O4, Zn1-xCoxFe2O4 และ CrxSbxTi1-2xO2 ชุดสีที่มีโครงสร้างทางเคมีที่แตกต่างกันถูกเตรียมและยืนยันโครงสร้าง แถบวาเลนซ์สูงสุดที่สกัดจากสเปกตรัมการปล่อยแสงและพื้นที่สัญญาณรามันที่ได้จากสเปกตรัมรามันถูกใช้เป็นตัวแทนของการดูดกลืนแบบอิเล็กทรอนิกส์และแบบโฟโนนิกตามลำดับ Mg1-xCoxAl2O4, Zn1-xCoxFe2O4 แสดงพฤติกรรมความร่วมมือเล็กน้อยของการดูดกลืนทางอิเล็กทรอนิกส์และการออกเสียงต่อการสะท้อนแสงใกล้อินฟราเรด อย่างไรก็ตาม CrxSbxTi1-2xO2 ได้สร้างพฤติกรรมการดูดซึมเสียงที่ไม่สำคัญ ที่ระบบการให้สารเสพติดต่ำใน CrxSbxTi1-2xO2 การดูดกลืนทางอิเล็กทรอนิกส์จะควบคุมการควบคุมการสะท้อนแสงใกล้อินฟราเรด ในทางกลับกัน ที่ระบบการให้สารเสพติดสูง การหดตัวของการดูดกลืนเสียงแบบโฟโนนิกมีบทบาทสำคัญในการสะท้อนแสง สถานการณ์ที่ไม่สำคัญอาจนำไปสู่ความเข้าใจในกลไกการสะท้อนแสงที่เกี่ยวข้องกับผลกระทบจากโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์และคุณสมบัติของโครงตาข่าย ผลที่ได้จะเป็นการปูทางสำหรับการปรับปรุงเม็ดสีสะท้อนแสงอาทิตย์ด้วยการปรับจูนสีที่ดีขึ้น



Figure·3:·NIR·reflectance·(Blue),·VBM·(Green),·and·RSA·(Blue)·of·(A)·$Mg_{1-x}Co_xAl_2O_4$,·(B)·$Zn_{1-x}Co_xFe_2O_4$·and·(C)·$Cr_xSb_xTi_{1-2x}O_2$¶

6. Direct observation of bandgap opening at the metasurface of nano-scale highly oriented pyrolytic graphite [Sujinda Chaiyachad, Sirisak Singsen, Tanachat Eknapakul, Warakorn Jindata, Chutchawan Jaisuk, Patrick Le fevre, Francois Bertran, Donghui Lu, Yaobo Huang, Hideki Nakajima, Watchara Liewrian, Ittipon Fongkaew and Worawat Meevasana*, to be submitted to Scientific Reports (2022)]

ด้วยการใช้สเปกโทรสโกปีการเปล่งแสงที่แก้ไขมุม (ARPES) เราศึกษาโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ของกราไฟท์ไพโรไลติกที่มีความเข้มข้นสูง (HOPG) ตรงกันข้ามกับ HOPG ที่เก่าแก่ การเปิดช่องว่างของแถบความถี่ประมาณ 100 meV จะสังเกตได้โดยตรงที่พื้นผิวของรูปแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส HOPG ระดับนาโน ข้อมูลรามานและการคำนวณทฤษฎีฟังก์ชันความหนาแน่นของเราแนะนำว่าช่องเปิดช่องสัญญาณอาจเกิดจากความเครียดที่เกิดจากแรงดึงที่เกิดจากรูปแบบ เราเชื่อว่าวิศวกรรมพื้นผิวของ HOPG จะไม่เพียงแต่มีประโยชน์สำหรับการปรับปรุงอุปกรณ์เทอร์เฮิร์ตซ์เท่านั้น แต่ยังให้เส้นทางสำหรับการปรับเปลี่ยนวัสดุ/พื้นผิวเมตาอื่น ๆ สำหรับการใช้งานออปโตอิเล็กทรอนิกส์



รูป: การค้นพบมี Band gap opening ในสาร HOPG

7. Experimental Study of Carbon-based Planar Supercapacitor in Aqueous Electrolyte [Ukrit Jitropas, Worasarit Saengsui, and Worawat Meevasana*, to be submitted to Journal of Power Sources (2022)]

ลักษณะเด่นประการหนึ่งของ supercapacitor คือสามารถชาร์จ-คายประจุได้เร็วกว่าแบตเตอรี่มาก น่าเสียดายที่การเพิ่มอัตราการชาร์จส่งผลให้ความจุลดลง เพื่อหลีกเลี่ยงความขัดแย้ง จึงมีการนำอิเล็กโทรดอินเตอร์ดิจิเนตแบบระนาบซึ่งให้อัตราที่ดี ที่นี่ ความจุจำเพาะของรูปแบบที่แตกต่างกันสามแบบของอิเล็กโทรดระนาบที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักและตัวเก็บประจุแบบซุปเปอร์คาปาซิเตอร์แบบแซนด์วิชทั่วไป ถูกตรวจสอบโดยใช้ระบบอิเล็กโทรดสองระบบของเทคนิค Cyclic-Voltammetry (CV) ความจุของตัวอย่างระนาบทั้งหมดเพิ่มขึ้นอย่างน่าสนใจจนถึงพีคสูงสุดและยังคงสูงกว่าค่าเริ่มต้นแม้ว่าจะเพิ่มอัตราการสแกน 50 เท่าก็ตาม สังเกตได้ว่าขอบขั้วอิเล็กโทรดระนาบแคบให้กระแสไฟฟ้าที่เข้มข้นและส่งผลให้มีการเพิ่มความจุอัตราการสแกนที่เหมาะสมที่สุดสามารถจัดการได้โดยความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์ที่แตกต่างกัน มีการเสนอรูปแบบที่เรียบง่ายของพฤติกรรมการจัดเก็บประจุไฟฟ้า ได้มีการกล่าวถึงอิทธิพลของความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์และอัตราการสแกนที่ใช้ต่อความจุทั้งหมด ความสามารถด้านอัตราที่ยอดเยี่ยมที่สังเกตพบในที่นี้บ่งชี้ถึงประสิทธิภาพทางไฟฟ้าเคมีที่เหนือกว่าของตัวเก็บประจุยิ่งยวดที่มีการกำหนดค่าอิเล็กโทรดระนาบเหนือโครงสร้างแซนวิชทั่วไป

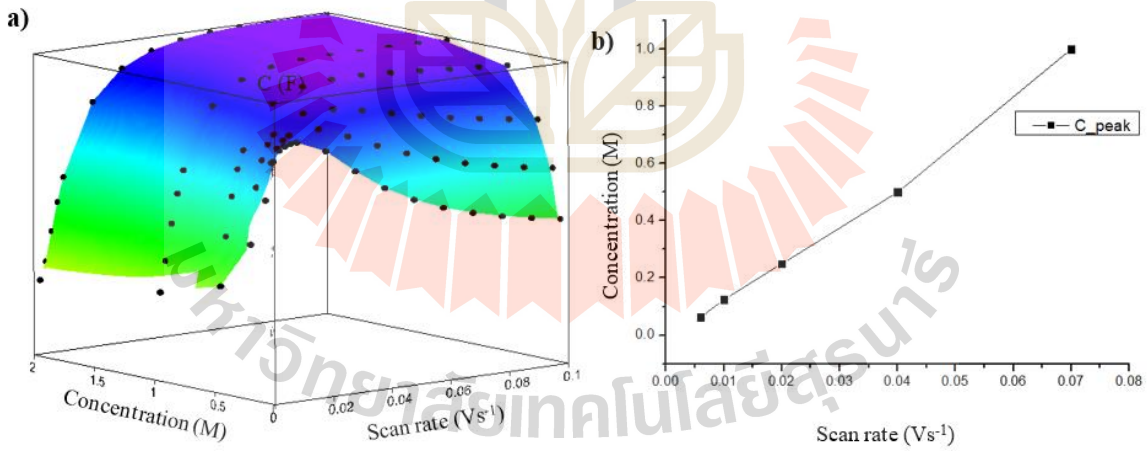


Figure4: a) capacitance of planar electrode with varied scan rate and electrolyte concentration and b) optimum scan rate which provide the maximum capacitance

8. Surface chemistry and work function of MoS2 and WSe2 flakes studied by synchrotron-based photoemission electron microscopy (PEEM) [Chutarat Yonchaia, Aissara Rasritatb, Thipusa Wongpinija, Narong Chanleka,b*, Chanan Euaruksakula,b*, Worawat Meevasanab, Prayoon Songsiriritthigulb, Saroj Rujirawata, Rattikorn Yimnirunc submitted to Radiation Physics and Chemistry (2022)]

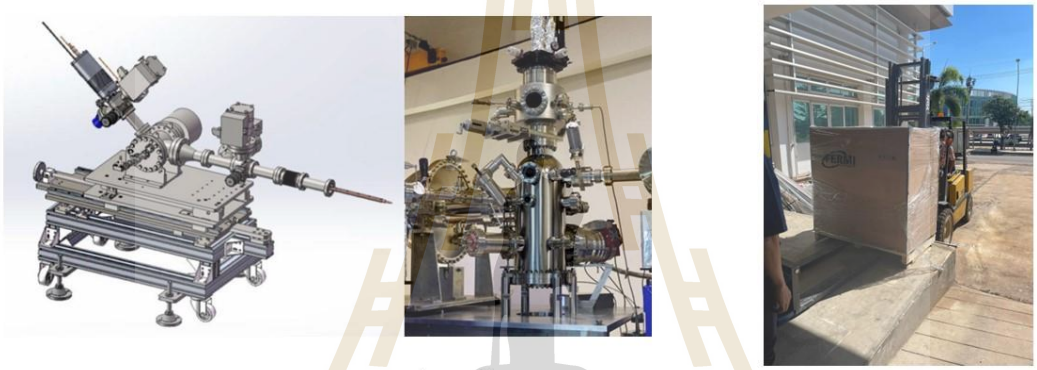
Layered two-dimensional (2D) transition metal dichalcogenides (TMDs), such as, molybdenum disulfide (MoS2) and tungsten diselenide (WSe2) have recently become very attractive due to their potential applications in novel electronic, semiconductor and optoelectronic devices. The optical and electronic properties of the layered TMDs strongly depend on the layer number and surface chemistry. In this work, the few-layer MoS2 and WSe2 flakes were prepared from bulk by using the scotch-tape based mechanical exfoliation technique. The surface chemistry and electronic structure and their variation with the layer number were studied by using synchrotron-based photoemission electron microscopy (PEEM), atomic force microscopy (AFM) and Raman spectroscopy.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

การพัฒนาระบบการวัดโครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ในส่วนของแหล่งกำเนิดแสง VUV

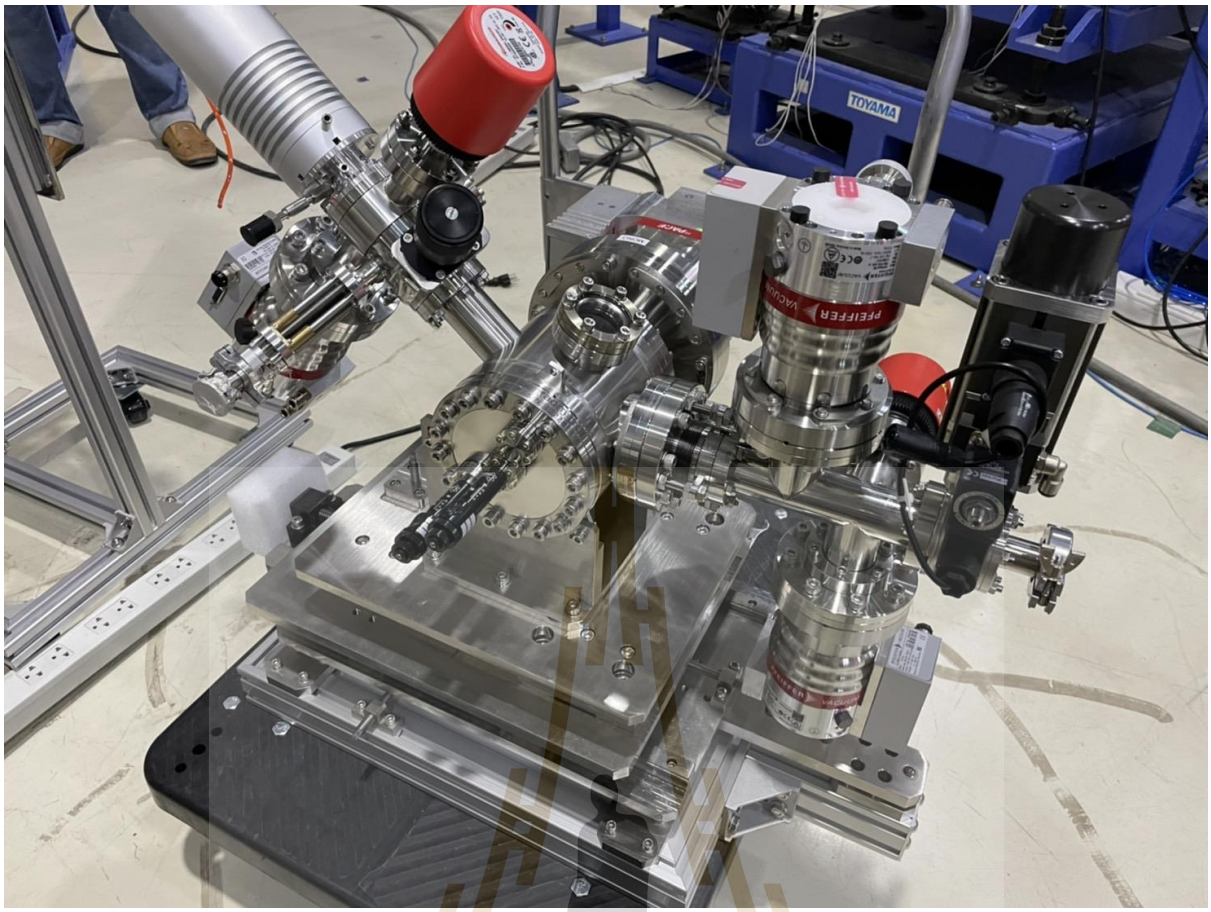
การออกแบบและติดตั้งระบบปฏิบัติการแหล่งกำเนิดและลำเลียงแสงยูวีสำหรับใช้วัดโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ด้วยเทคนิคโฟโตอิมิชชั่นจำนวน 1 ห้อง เน้นที่การเชื่อมต่อแหล่งกำเนิดแสงยูวี (VUV light source) ที่พลังงาน 21.2182 eV ที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่มีความเข้มสูง สำหรับการวัดของ photoemissionspectroscopy (VUV Monochromator (Scienta VUV5K), chamber, vacuumpump, Gas control, and high precision stage) ซึ่งจะมีประโยชน์สูงกว่าที่จะช่วยวัดโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ของสารได้หลากหลายชนิดมากกว่าเพื่อสร้างผลงานตีพิมพ์ที่คุณภาพ

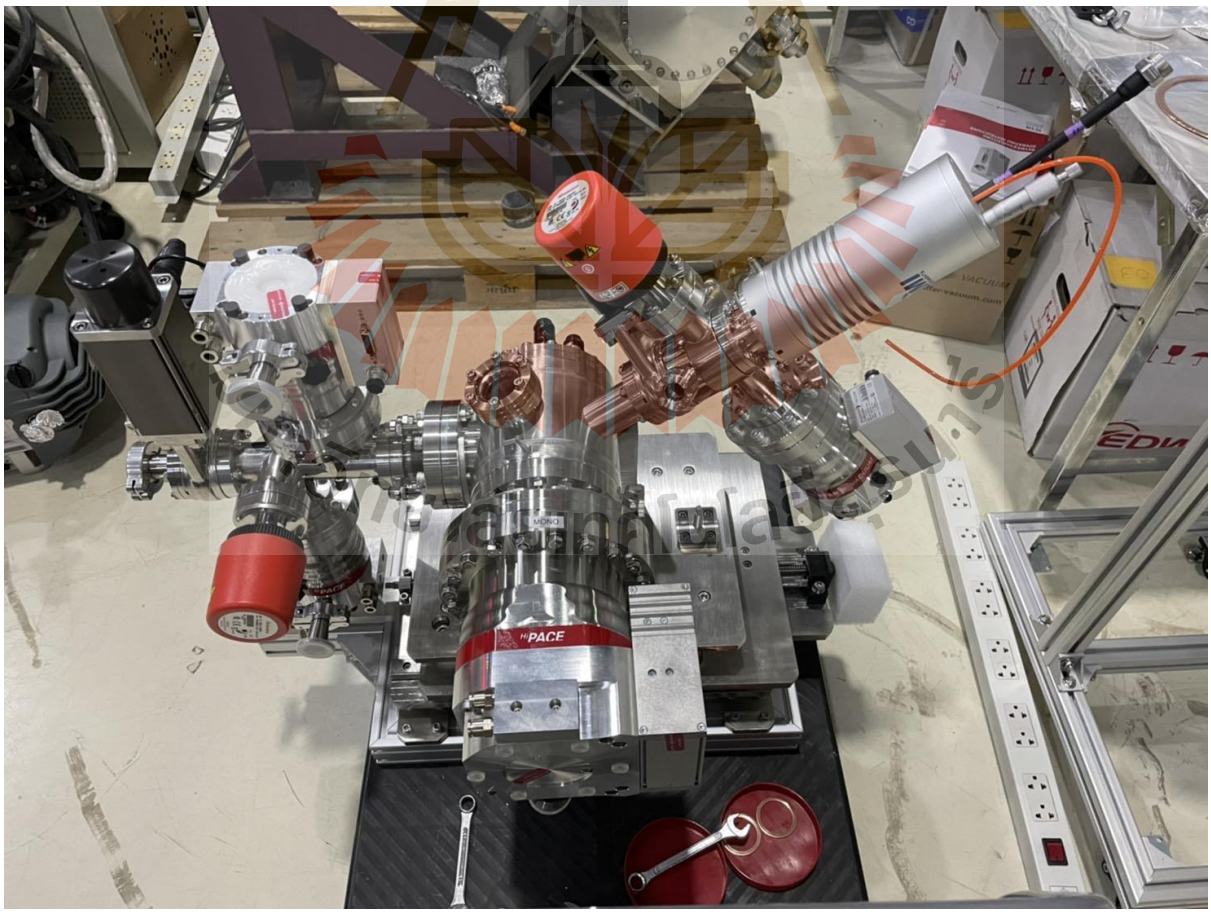
การติดตั้งแหล่งกำเนิดแสงยูวี ณ ระบบลำเลียงแสง BL 3.2a

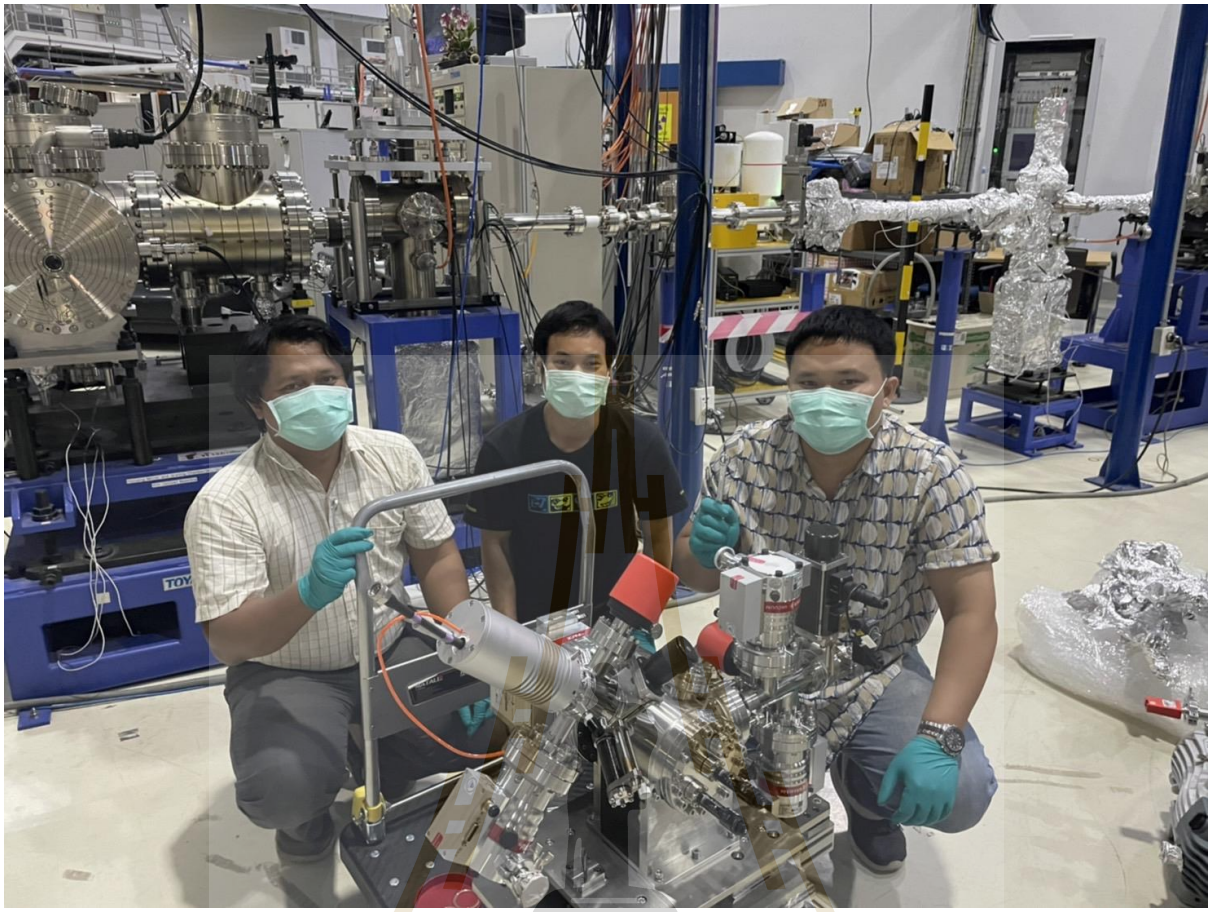


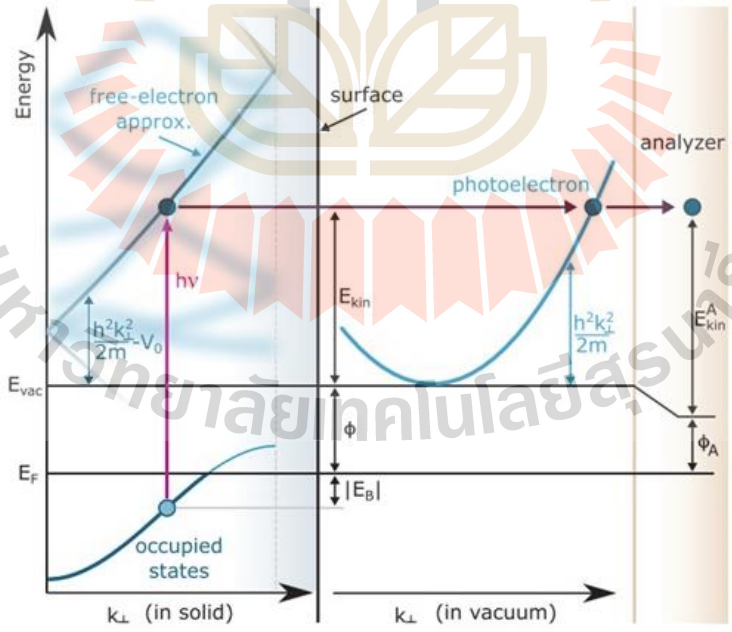
ลักษณะของแหล่งกำเนิดแสงยูวี เพื่อติดตั้งเข้ากับระบบ PES ณ ระบบลำเลียงแสง BL 3.2a

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี


TOYAMA
PFEIFFER

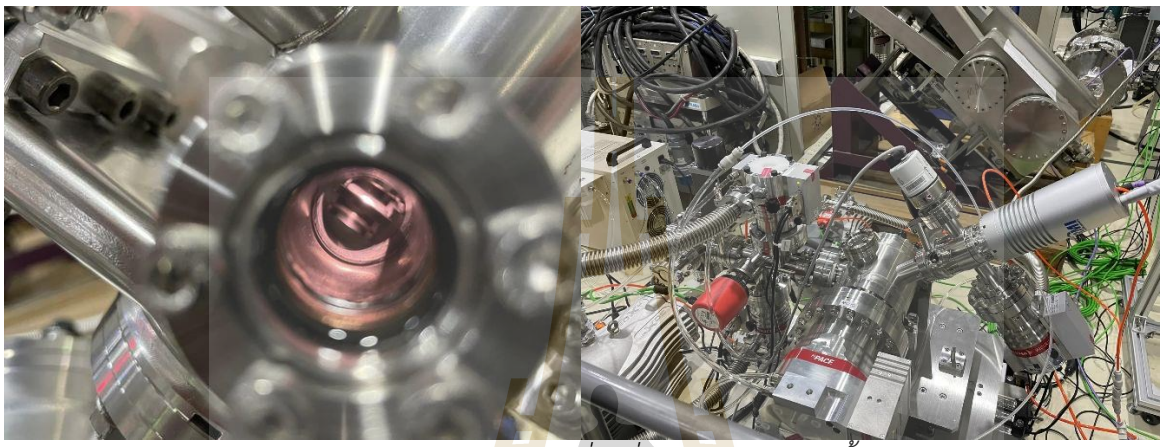

PACE





มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สถานะปัจจุบันของแหล่งกำเนิดแสงยูวี (VUV light source) ที่พลังงาน 21.2 eV คือประกอบเสร็จเรียบร้อย โดยในภาพด้านล่างสามารถผลิตแสงที่ 21.2 eV ได้สำเร็จเป็นผลที่น่าพอใจ ตามภาพด้านล่าง โดยเครื่องพร้อมติดตั้งเข้ากับระบบลำเลียงแสง 3.2a ของสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน ซึ่งในขณะอยู่ช่วงดำเนินการเอกสารทางด้านความปลอดภัยหลังจากนั้นจะนำฐานวาง (ซึ่งได้ประสานก่อนหน้านี้) มาติดตั้งเพื่อเชื่อมต่อกับระบบลำเลียงแสงต่อไป โดยคาดว่าจะได้ใช้งานได้ประมาณต้นปี 2566



ภาพซ้ายแสดงลำแสงยูวี (21.2 eV) และภาพขวาเครื่องที่ประกอบพร้อมติดตั้งเข้ากับระบบลำเลียงแสง 3.2a ของสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน

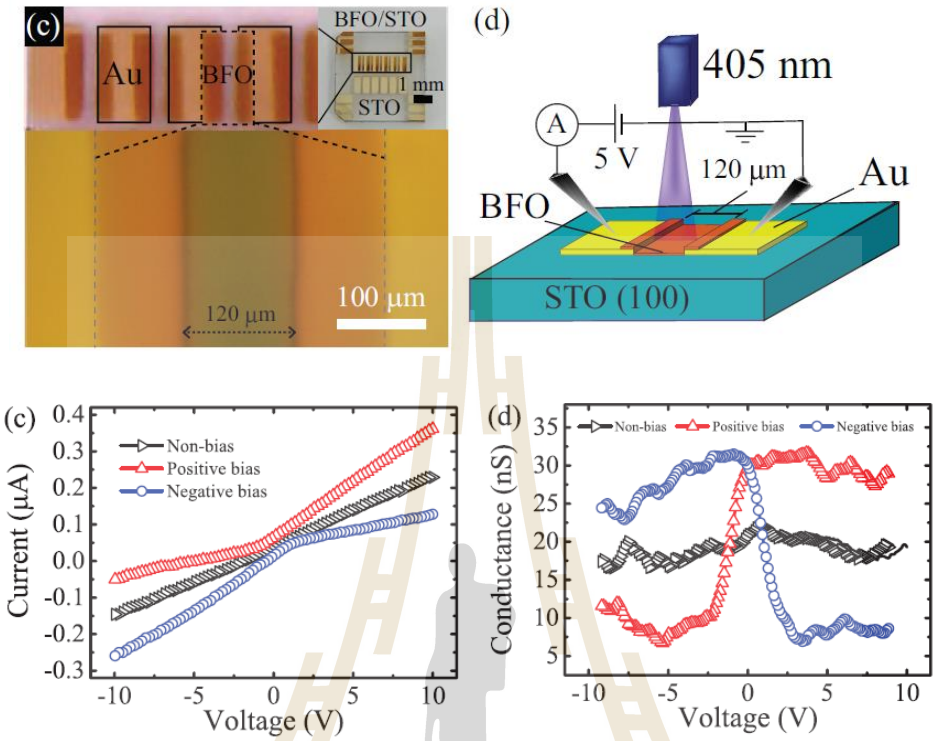
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

อุปกรณ์ต้นแบบ 2 ชิ้นงาน

1. ออกแบบและสร้างระบบกักเก็บพลังงานเพื่อการประยุกต์ใช้ประโยชน์ของพลังงานแสงอาทิตย์และระบบกักเก็บพลังงานเพื่อการเกษตรและเลี้ยงสัตว์น้ำ *(เพิ่มเติม)* ทำการติดตั้งที่กลุ่มเลี้ยงปลานิล หมู่บ้านวังม่วง อ. โนนสูง จ. นครราชสีมา

ระบบที่ประกอบขึ้นมีแผงโซลาเซลล์กำลังไฟฟ้ารวม 4.68 kW ที่ทำงานควบคู่กับระบบกักเก็บพลังงานขนาดความจุ 12.3 kWh (51.2 V 240 Ah) โดยปริมาณไฟฟ้าทั้งหมดที่ผลิตได้อยู่ที่ประมาณ 18.7 kWh ต่อวัน (ซึ่งคิดเป็นมูลค่าไฟฟ้าประมาณ 34,000 บาทต่อปี) โดยออกแบบให้ใช้ระหว่างประมาณ 6 kWh และ กลางคืนประมาณ 12 kWh เพื่อปั่นกังหันเพิ่มปริมาณออกซิเจนให้กับปลาที่เลี้ยงในกระชัง ช่วยเกษตรกรลดค่าใช้จ่ายไฟฟ้าและใช้พลังงานที่สะอาดรักษาสิ่งแวดล้อมแทนการปั่นไฟฟ้าโดยใช้น้ำมันเชื้อเพลิง

2. ต้นแบบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกซ์ที่สามารถใช้แสงในการเพิ่มลดความต้านทานได้เหมือนเซ็นเซอร์แสง แต่มีความพิเศษกว่าตรงที่สามารถปรับให้เป็นได้ทั้งตัวนำ หรือ ตัวนำไฟฟ้าที่คล้ายกับไดโอด ซึ่งมีค่าความต้านทานต่างกันในทิศ forward/ backward bias



เราศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการปรับเปลี่ยนการนำไฟฟ้าของฟิล์มบาง BiFeO3/SrTiO3 (BFO/STO) เพื่อสาธิตอุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์เหล่านี้ BFO/STO ถูกเปิดที่แรงดันไฟฟ้าสูง 0.80 kV (2.0 109 V/m) เป็นเวลา 5 นาทีระหว่างขั้วไฟฟ้าซึ่งรวมถึง (i) E บวก (Eþ) และ bias 1 รวมทั้ง (ii) E ลบ (E) และ bias 2 ในเวลาเดียวกัน ทิศทางของไบอัสแรงดันสูงที่เป็นบวกและลบนั้นสรุปไว้ในรูป หลังจากนั้นอิเล็กโทรดสำหรับใช้สนามไฟฟ้าภายนอกจะถูกลบออก และคุณลักษณะของกระแส-แรงดัน (I-V) ถูกวัดด้วยแรงดันไฟฟ้าสูงที่ใช้และการฉายรังสี UV ดังแสดงในรูป Rectification แบบไดโอดเกิดขึ้นที่ BFO/STO interface เมื่อใช้สนามไฟฟ้าภายนอกกับพื้นผิว BFO ภายใต้การฉายรังสียูวี ต้นแบบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์นี้ แสดง concept ใหม่ของการใช้แสดงและสนามไฟฟ้าในการปรับทิศของตัวไดโอดได้โดยใช้ BFO/STO interface

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

วัตถุประสงค์หลักในโครงการนี้สามารถแบ่งออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกจะเน้นที่การศึกษาโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ของวัสดุที่อาจมีสมบัติที่น่าสนใจและเป็นประโยชน์เชิงอิเล็กทรอนิกส์ โดยการศึกษานี้จะเป็นการหาสมบัติที่แปลกใหม่หรือช่วยให้เข้าใจถึงสมบัติที่ทราบอยู่แล้วในเชิงลึกได้ ในส่วนที่สองคณะวิจัยจะพยายามใช้คุณสมบัติที่เป็นเอกลักษณ์ของวัสดุจากการศึกษาในส่วนแรกมาประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์ โดยสรุปมีผลงานตีพิมพ์ในวารสารแล้ว จำนวน 3 เรื่อง และ อีก 5 เรื่องอยู่ระหว่างการตีพิมพ์

1. Electronic Structure and Thermoelectric Properties of Two-dimensional Electron Gases at the Surface of La-doped SrTiO3(110) Single Crystal, [P. Buaphet, T. Eknapakul, C. Jaisuk, S. Chaiyachad,W. Jindata, P. Moontragoon and W. Meevasana*, Chiang Mai J. Sci. 48, 1141 - 1148 (2021)]
2. Resistive Switching in Diamondoid Counter Electrodes of Dye-Sensitized Solar Cells (DSSCs) [Sumeth Siriroj, Sekson Lowpa, Dulyawat Doonyapisut, Suppanut Sangphet, Hideki Nakajima, Ratchadaporn Supruangnet, Santi Maensiri, Vittaya Amornkitbamrung and Worawat Meevasana* Chiang Mai J. Sci., 48, 1404-1411 (2021)]
3. Large increase in photoinduced conductivity of two-dimensional electron gas at SrTiO3 surface with BiFeO3 topping layers [Peerawat Laohana, Siwat Polin, Warakorn Jindata, Aissara Rasritat, Tanachat Eknapakul, Pimchanok Leuasoongnoen, Pattanaphong Janphuang, Wittawat Saenrang, and Worawat Meevasana*, submitted to Applied Physics Letters (2022)]
4. High performance in the removal of methylene blue dye by grass synthesis of photocatalyst absorbent CuONiO/ BAG composites [Rarm Phinjaroenphan, Kornkanok Boonserm, and Worawat Meevasana*, to be submitted (2022)]
5. Electronic and phononic absorption contributions to near-infrared reflectance of Mg1-xCoxAl2O4, Zn1-xCoxFe2O4 and CrxSbxTi1-2xO2 pigments [Worasarit Saengsui, Teerasak Tangkittimasak, Mantana Suwan, Nuchjarin Sangwong, Chalita Tangon, Narong Chanlek, Pattana Rakkwamsuk, Sitthisunthon Supothina, Worawat Meevasana*, to be submitted to Ceramics International (2022)]
6. Direct observation of bandgap opening at the metasurface of nano-scale highly oriented pyrolytic graphite [Sujinda Chaiyachad, Sirisak Singsen, Tanachat Eknapakul, Warakorn Jindata, Chutchawan Jaisuk, Patrick Le fevre, Francois Bertran, Donghui Lu, Yaobo Huang, Hideki Nakajima, Watchara Liewrian, Ittipon Fongkaew and Worawat Meevasana*, to be submitted to Scientific Reports (2022)]

7. Experimental Study of Carbon-based Planar Supercapacitor in Aqueous Electrolyte [Ukrit Jitropas, Worasarit Saengsui, and Worawat Meevasana*, to be submitted to Journal of Power Sources (2022)]

8. Surface chemistry and work function of MoS2 and WSe2 flakes studied by synchrotron-based photoemission electron microscopy (PEEM) Chutarat Yonchaia, Aissara Rasritatb, Thipusa Wongpinija, Narong Chanleka,b*, Chanan Euaruksakula,b*, Worawat Meevasanab, Prayoon Songsiriritthigulb, Saroj Rujirawata, Rattikorn Yimnirunc submitted to Radiation Physics and Chemistry (2022)

มีการออกแบบและติดตั้งระบบปฏิบัติการแหล่งกำเนิดและลำเลียงแสงยูวีสำหรับใช้วัดโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ด้วยเทคนิคโฟโตอิมิชชั่นจำนวน 1 ห้อง เน้นที่การเชื่อมต่อแหล่งกำเนิดแสงยูวี (VUV light source) ที่พลังงาน 21.2182 eV ที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่มีความเข้มสูง ที่จะช่วยวัดโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ของสารได้หลากหลายชนิดมากกว่าเพื่อสร้างผลงานตีพิมพ์ที่คุณภาพ ทั้งนี้มีการสร้างต้นแบบ 2 ชิ้นงาน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี