

เซ็นเซอร์ตรวจวัดรังสียูวีที่เตรียมจากโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์ ที่มีเซอร์เฟซพลาสมอนเรโซแนนซ์ช่วย

UV SENSOR BASED ON ZINC OXIDE NANOSTRUCTURES ASSISTED BY SURFACE PLAMON RESONANCE

พิชิตชัย ปิมแปง^{1*} และสุภาพ ชูพันธ์²

Pichitchai Pimpang^{1*} and Supab Chooon²

¹คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม

²คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

*corresponding author e-mail: p.pimpang@gmail.com

(Received: 1 November 2018 ; Revised: 14 March 2019 ; Accepted: 5 April 2019)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาสมบัติการตรวจวัดรังสียูวีของโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์เปรียบเทียบกับโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เติมอนุภาคนาโนทองคำ ขั้นตอนแรกทำการออกซิเดชันทางความร้อนฟิล์มซิงก์ที่ 700 องศาเซลเซียส นาน 10 ชั่วโมง จะได้โครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์ ขั้นตอนต่อมาทำการเติมอนุภาคนาโนทองคำลงบนโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์ ด้วยกระบวนการโฟโตรีดักชันของสารละลายกรดเตตระคลอโรอริก หลังจากนั้นนำสารที่สังเคราะห์ได้ไปประดิษฐ์เป็นเซ็นเซอร์ตรวจวัดรังสียูวี โดยมีพื้นที่ตรวจวัดรังสีขนาด 1 ตารางมิลลิเมตร และทำขั้วอิเล็กโทรดทองคำที่ปลายสองด้านของฟิล์ม ขั้นตอนสุดท้ายทำการทดสอบสมบัติการตรวจวัดรังสียูวี (365 นาโนเมตร) โดยให้ความต่างศักย์แก่เซ็นเซอร์ตรวจวัดรังสียูวีเท่ากับ 10 โวลต์ ผลการทดสอบสมบัติการตรวจวัดรังสียูวีพบว่าการเติมอนุภาคนาโนทองคำลงบนโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์ร่วมกับการฉายแสงสีเขียวกระตุ้น (532 นาโนเมตร) สามารถปรับปรุงสมบัติในการวัดค่าของเซ็นเซอร์ตรวจวัดรังสียูวี นอกจากนี้ เซ็นเซอร์ที่ทำจากโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เติมอนุภาคนาโนทองคำร่วมกับการฉายแสงสีเขียวกระตุ้นยังมีเวลาคืนตัวเร็วกว่าเซ็นเซอร์ตรวจวัดรังสียูวีแบบอื่นๆ เนื่องจากอัตราการขนส่งประจุที่รวดเร็ว ดังนั้น การปรับปรุงความสามารถในการวัดค่าและเวลาคืนตัวของเซ็นเซอร์ตรวจวัดรังสียูวีสามารถอธิบายได้ด้วยกระบวนการขนส่งอิเล็กตรอนในเซ็นเซอร์โดยพิจารณาผลเซอร์เฟซพลาสมอนเรโซแนนซ์ของทองคำ

คำสำคัญ: เซ็นเซอร์ตรวจจับรังสียูวี โครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์ อนุภาคนาโนทองคำ
เซอร์เฟซพลาสมอนเรโซแนนซ์

Abstract

In this work, ultraviolet (UV) sensing properties of ZnO nanostructures were investigated and compared to ZnO nanostructures embedded with gold nanoparticles. Firstly, zinc films were thermally oxidized to form ZnO nanostructures at 700°C for 10 hours. To form gold nanoparticles embedded ZnO nanostructures, gold nanoparticles were embedded onto the surface of ZnO nanostructures by photoreduction of HAuCl₄. ZnO nanostructures and gold nanoparticles embedded ZnO nanostructures were then fabricated as UV sensor with active area of 1 mm². Au electrodes were patterned on the sensing layer by screen printing of electrical conductive gold paste. Finally, UV sensing properties were investigated of UV illumination (365 nm) and a 10 V bias. The result of UV sensing investigation showed that embedding gold nanoparticles onto ZnO nanostructures and green light illumination (532 nm) caused to improve the sensor repeatability. In addition, the sensor recovery of gold nanoparticles embedded ZnO nanostructures and green light illumination seems to have lower recovery time than other cases due to the faster rate of charge transfer from embedded gold nanoparticles to ZnO nanostructures. Accordingly, the improvement of sensor repeatability and recovery time can be explained in terms of a charge transfer process by considering the surface plasmon resonance effect of gold.

Keywords; UV sensor, ZnO nanostructures, gold nanoparticles, surface plasmon resonance

บทนำ

รังสียูวีคือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีแหล่งกำเนิดจากดวงอาทิตย์ ประกอบด้วย ยูวีเอ (UVA) ยูวีบี (UVB) และ ยูวีซี (UVC) ซึ่งรังสียูวีเอเป็นรังสีที่มีช่วงคลื่นยาว 315 – 400 นาโนเมตร รังสียูวีบี มีช่วงคลื่นยาว 280 – 315 นาโนเมตร ส่วนรังสียูวีซี มีช่วงคลื่นยาว 100 – 280 นาโนเมตร ซึ่งมีพลังงานสูงที่สุดและอันตรายมากที่สุด แต่พบรังสียูวีซีได้น้อยเนื่องจากจะถูกชั้นบรรยากาศกรองไว้ มีรายงานว่า การรับแสงแดดหรือรังสียูวีเป็นเวลานานจะเป็นปัจจัยเสี่ยงของการเป็นมะเร็งผิวหนัง ซึ่งประเทศไทยพบผู้ป่วยมะเร็งผิวหนัง 300–400 รายต่อปี (ชนิดา ศรีปัญญา, 2557) เนื่องจากการได้รับรังสียูวีในแสงแดดปริมาณมากเป็นปัจจัยให้การเจริญเติบโตของเซลล์ผิวหนัง

ผิวดิน (Matsui, 1991; Schmitz et al., 1994; Rünger, 1994; Beani, 2014) นอกจากนี้การได้รับรังสียูวีเป็นปริมาณมากอาจมีส่วนเกี่ยวข้องกับการเกิดต่อกระจกและทำให้จอตาเสื่อมสภาพ ซึ่งองค์การอุตุนิยมวิทยาโลกได้กำหนด 1 หน่วยรังสียูวี (UV index) ไว้ที่ 25 mW/m^2 (Kinney et al., 2000) ดังนั้นเซ็นเซอร์ตรวจวัดรังสียูวีจึงมีความสำคัญที่จะช่วยแจ้งระดับความเข้มรังสียูวี ซึ่งสามารถประยุกต์เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดรังสียูวีแบบพกพา (portable UV sensors) อุปกรณ์ตรวจวัดรังสียูวีในนาฬิกาอัจฉริยะ (smart watch) และอุปกรณ์ตรวจวัดรังสียูวีในกระจกอัจฉริยะ (smart window) เป็นต้น

ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสังเคราะห์และเปรียบเทียบสมบัติตรวจวัดรังสียูวีของโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์และโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เติมอนุภาคนาโนทองคำ ซึ่งโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์จะถูกเตรียมด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยความร้อนและทำการเติมอนุภาคนาโนทองคำในโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์ด้วยกระบวนการโฟโตเดโพสิชัน หลังจากนั้นนำสารที่สังเคราะห์ได้ประดิษฐ์เป็นเซ็นเซอร์ตรวจวัดรังสียูวี ใช้พื้นที่ตรวจวัดรังสีขนาด 1 ตารางมิลลิเมตร แล้วจึงนำไปศึกษาสมบัติการตรวจวัดรังสียูวีขณะที่อยู่ในที่มีดเปรียบเทียบกับขณะที่มีรังสียูวีความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร

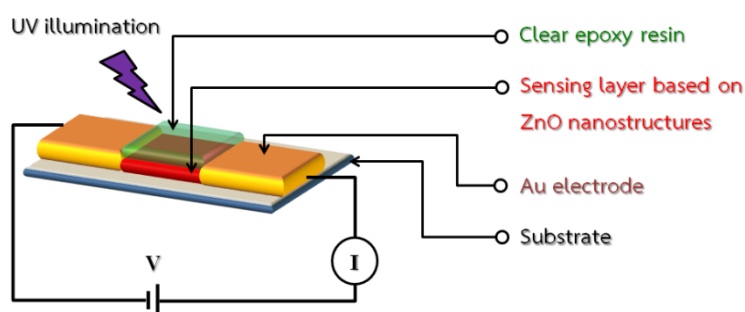
วิธีดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนการเตรียมโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์ (ZnO nanostructures) เริ่มจากการผสมผงซิงก์ (zinc, Ajax Finechem) กับสารละลายโพลีเอทิลีนไกลคอล (PEG, ศรีจันทร์โฮส) จนได้สารที่มีลักษณะสีเทาเข้ม จากนั้นนำซิงก์ไปสกรีนลงบนฐานรองรับอะลูมินา จะได้ฟิล์มซิงก์ที่เตรียมบนฐานรองรับอะลูมินาซึ่งมีสีเทา จากนั้นนำฟิล์มซิงก์ไปเผาภายใต้เงื่อนไขบรรยากาศปกติที่ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง จึงได้ฟิล์มสีขาวซึ่งเกิดจากสีของโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์ ขั้นตอนต่อไปทำการเติมอนุภาคนาโนทองคำลงบนโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์ด้วยกระบวนการโฟโตเดโพสิชัน (Pimpang et al., 2013; พิชิตชัย ปิมแปง, 2561) โดยใช้เวลาเดโพสิชัน 10 นาที หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการโฟโตเดโพสิชันจะได้ฟิล์มสีแดง ซึ่งเกิดจากอนุภาคนาโนทองคำที่เกาะบนโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์

ขั้นตอนการประดิษฐ์และทดสอบสมบัติการตรวจวัดรังสียูวีของเซ็นเซอร์ตรวจวัดรังสียูวี โดยใช้โครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์และเซ็นเซอร์ตรวจวัดรังสียูวีโดยใช้โครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เติมอนุภาคนาโนทองคำ เริ่มจากการนำสารที่สังเคราะห์ได้ประดิษฐ์เป็นแผ่นเซ็นเซอร์ตรวจวัดรังสียูวีขนาด 1 ตารางมิลลิเมตร ทำขั้วอิเล็กโทรดทองคำ (Au electrodes) ด้วยตัวเชื่อมประสานนำไฟฟ้าจากทองคำ (electrical conductive adhesive) ที่ปลายสองด้านของแผ่นเซ็นเซอร์ และทำการคลุมแผ่นเซ็นเซอร์ (sensing layer) ด้วยอีพอกซีเรซินชนิดใส (clear epoxy resin) เพื่อ

เป็นการป้องกันความชื้นและก๊าซอื่นๆ ในบรรยากาศที่อาจรบกวนการตรวจวัดรังสียูวี (ภาพที่ 1) จากนั้นทดสอบสมบัติการตรวจวัดรังสียูวีด้วยเครื่องอิเล็กทรอนิกส์ (Keithley 6517A) โดยให้ความต่างศักย์แก่เซ็นเซอร์ตรวจวัดรังสียูวี เท่ากับ 10 โวลต์ และทำการบันทึกค่ากระแสไฟฟ้าขณะที่ไม่มีรังสียูวี (I_{dark}) ลงในคอมพิวเตอร์ทุกๆ 0.5 วินาที ด้วยโปรแกรม labview (labview 2017 student edition) และบันทึกค่ากระแสไฟฟ้าเมื่อเซ็นเซอร์ตรวจวัดรังสียูวีได้รับรังสียูวี (365 nm) ความเข้มแสงประมาณ $50 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ (I_{UV}) ดังนั้น ค่าการตอบสนองต่อแสง (photo-response) ของเซ็นเซอร์ตรวจวัดรังสียูวีสามารถคำนวณได้จากสมการ (1)

$$\text{photo-response} = \frac{I_{\text{UV}}}{I_{\text{dark}}} \quad (1)$$



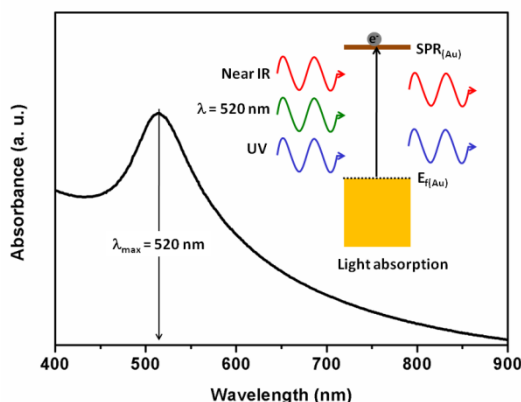
ภาพที่ 1 ส่วนประกอบเซ็นเซอร์ตรวจวัดรังสียูวีที่เตรียมจากโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์เป็นฐาน

สำหรับการศึกษาผลของเฟสพลาสมอนเรโซแนนซ์ของทองคำที่มีต่อสมบัติการตรวจวัดรังสียูวี สามารถทำได้โดยการฉายแสงสีเขียว (532 nm , $\sim 50 \mu\text{W}/\text{cm}^2$) ให้กับเซ็นเซอร์ตรวจวัดรังสียูวีแล้วทำการบันทึกค่ากระแสไฟฟ้าขณะที่เซ็นเซอร์ได้รับรังสียูวี (I_{UV}) เปรียบเทียบกับค่ากระแสไฟฟ้าเมื่อเซ็นเซอร์ไม่ได้รับรังสียูวี (I_{dark})

ผลการวิจัย

สเปกตรัมการดูดกลืน (absorbance spectra) ของอนุภาคนาโนทองคำแสดงดังภาพที่ 2 พบว่า อนุภาคนาโนทองคำมีการดูดกลืนช่วงแสงขาว (visible region) โดยความยาวคลื่นของการดูดกลืนสูงสุด (λ_{max}) เท่ากับ 520 นาโนเมตร ซึ่งเป็นผลมาจากปรากฏการณ์เรโซแนนซ์พลาสมอนเรโซแนนซ์ของอนุภาคนาโนทองคำที่ซึ่งความยาวคลื่นของแสงที่ตกกระทบบนอนุภาคนาโนทองคำเท่ากับระดับพลังงานเรโซแนนซ์พลาสมอนเรโซแนนซ์จึงทำให้เกิดการรบกวนที่ผิวของอนุภาคนาโนทองคำมีการดูดกลืนแสงและอิเล็กตรอนจะเปลี่ยนสถานะไปที่ระดับพลังงานเรโซแนนซ์พลาสมอนเรโซแนนซ์ (surface plasmon resonance; SPR) จากสเปกตรัมการดูดกลืนจะเห็นว่าอนุภาคนาโน

ทองคำมีการดูดกลืนแสงมากในช่วงสีน้ำเงิน-เขียว ดังนั้น อนุภาคนาโนทองคำจึงให้สีแดงปรากฏแก่สายตา



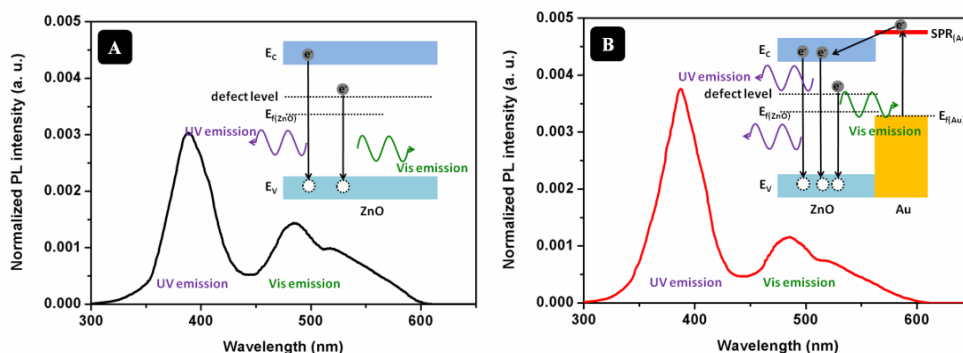
ภาพที่ 2 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของอนุภาคนาโนทองคำ ซึ่งศึกษาด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเลต-วิสิเบิลสเปกโตรสโคปี (UV-vis spectroscopy)
ภาพแทรก: แสดงกระบวนการดูดกลืนแสงของอนุภาคนาโนทองคำ

ภาพที่ 3(A) แสดงโฟโตลูมิเนสเซนส์สเปกตรัม (photoluminescence spectra) ของโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์และโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เติมอนุภาคนาโนทองคำ พบว่าโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์เกิดโฟโตลูมิเนสเซนส์ (photoluminescence; PL) ขึ้น 2 ช่วง คือ โฟโตลูมิเนสเซนส์ช่วงรังสียูวี (UV emission) ที่ความยาวคลื่น 300–420 นาโนเมตร และโฟโตลูมิเนสเซนส์ช่วงแสงขาว (visible emission) ที่ความยาวคลื่น 420–600 นาโนเมตร ซึ่งโฟโตลูมิเนสเซนส์ช่วงรังสียูวีเกิดจากอิเล็กตรอนในแถบนำ (conduction band; E_c) เปลี่ยนสถานะมายังแถบวาเลนซ์ (valence band: E_v) ซึ่งเรียกกระบวนการนี้ว่า electron-hole pair recombination จึงทำให้เกิดการเรืองแสงช่วงรังสียูวี (Gao and Li, 2004; Young, 2006) ส่วนโฟโตลูมิเนสเซนส์ช่วงแสงขาวเกิดจากอิเล็กตรอนในระดับพลังงานบกพร่อง (defect level) ในโครงสร้างซิงก์ออกไซด์เปลี่ยนสถานะมายังแถบวาเลนซ์ ดังนั้น UV emission yield ซึ่งเป็นปริมาณที่สัมพันธ์กับจำนวนอิเล็กตรอนที่เปลี่ยนระดับพลังงานจากแถบนำของซิงก์ออกไซด์มายังแถบวาเลนซ์ หาได้จากสมการ (2)

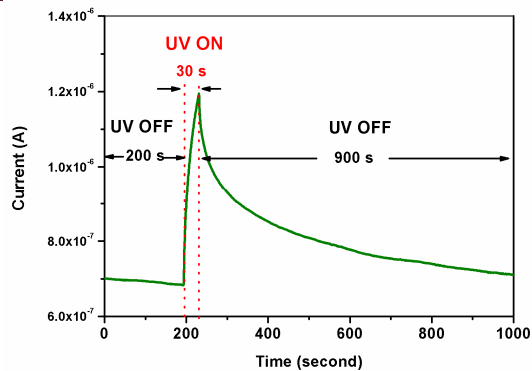
$$\text{UV emission yield} = \frac{\text{UV emission}}{\text{UV emission} + \text{visible emission}} \quad (2)$$

เมื่อ UV emission คือ ความเข้มแสงของโฟโตลูมิเนสเซนส์ช่วงรังสียูวีที่ความยาวคลื่น 300–420 นาโนเมตร และ visible emission คือ ความเข้มแสงของโฟโตลูมิเนสเซนส์ช่วงแสงขาวที่ความยาวคลื่น 420–600 นาโนเมตร

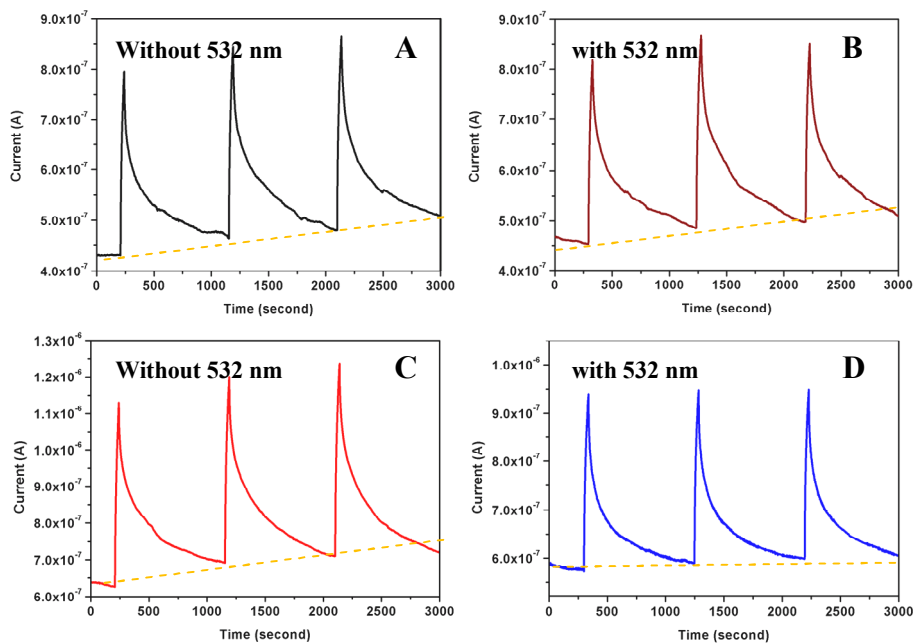
ภาพที่ 3(B) แสดงโฟโตลูมิเนสเซนส์สเปกตรัม (photoluminescence spectra) ของโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เติมอนุภาคนาโนทองคำ พบว่า โครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เติมอนุภาคนาโนทองคำมีความเข้มโฟโตลูมิเนสเซนส์ช่วงรังสียูวี (UV emission) มากกว่าโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์ และจากการหาค่า UV emission yield พบว่าโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เติมอนุภาคนาโนทองคำ UV emission yield เท่ากับ 0.64 ซึ่งสูงกว่าโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์ (เท่ากับ 0.51) ทั้งนี้เนื่องจากระดับพลังงานบกพร่องของ ZnO และระดับพลังงานแฟร์มี (fermi level) ของทองคำมีค่าใกล้เคียงกันมาก จึงทำให้อิเล็กตรอนจากระดับพลังงานบกพร่องขนส่งไปยังระดับพลังงานเซอร์เฟซพลาสมอนเรโซแนนซ์ของทองคำซึ่งอยู่สูงกว่าแถบนำของ ZnO ดังนั้นจึงเป็นการง่ายที่อิเล็กตรอนจะสามารถขนส่งกลับไปยังแถบนำของ ZnO และเป็นการส่งเสริมกระบวนการ electron-hole pair recombination (Lin et al., 2006; Khoa et al., 2015; Rouhi et al., 2015) ดังนั้น ผลโฟโตลูมิเนสเซนส์บ่งบอกว่าการเติมอนุภาคนาโนทองคำสามารถปรับปรุงโฟโตลูมิเนสเซนส์ช่วงรังสียูวีได้ และยังสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา (Guidelli et al., 2015; Cheng et al., 2010) ซึ่งอาจจะให้ผลที่ดีต่อการปรับปรุงสมบัติการตรวจวัดรังสียูวี



ภาพที่ 3 โฟโตลูมิเนสเซนส์สเปกตรัม ช่วงรังสียูวีของโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์ (A) และโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เติมอนุภาคนาโนทองคำ ด้วยกระบวนการโฟโตเดโพสิชัน (B) ภาพแทรก: แสดงกระบวนการเรืองแสงของโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์และโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เติมอนุภาคนาโนทองคำ



ภาพที่ 4 การตอบสนองต่อรังสียูวีของเซนเซอร์ตรวจวัดรังสียูวีขณะไม่มีรังสียูวีตกกระทบ (UV OFF) ขณะมีรังสียูวีตกกระทบ (UV ON) เป็นเวลา 30 วินาที



ภาพที่ 5 การตอบสนองต่อรังสียูวีของเซนเซอร์ตรวจวัดรังสียูวีที่เตรียมจากโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์โดยไม่ฉายแสงเลเซอร์กระตุ้น (A) ฉายแสงเลเซอร์กระตุ้น (B) และการตอบสนองต่อรังสียูวีของเซนเซอร์ตรวจวัดรังสียูวีที่เตรียมจากโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เติมอนุภาคนาโนทองคำโดยไม่ฉายแสงเลเซอร์กระตุ้น (C) ฉายแสงเลเซอร์กระตุ้น (D)

ภาพที่ 4 แสดงตัวอย่างการตอบสนองต่อรังสียูวีของเซนเซอร์ตรวจวัดรังสียูวี พบว่าในช่วงเวลาประมาณ 200 วินาทีแรก เซนเซอร์ไม่มีรังสียูวีตกกระทบ (UV OFF) ทำให้กระแสไฟฟ้าของเซนเซอร์มีค่าประมาณ 7×10^{-7} A หลังจากมีรังสียูวีตกกระทบ (UV ON) ทำให้กระแสไฟฟ้าของ

เซนเซอร์เพิ่มขึ้น มีค่าประมาณ 1.2×10^{-6} A ดังนั้น กระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นประมาณ 1.7 เท่า หรือค่าการตอบสนองต่อแสงประมาณ 1.7 เท่า เนื่องจากซิงก์ออกไซด์ ดูดกลืนรังสียูวีและทำให้จำนวนอิเล็กตรอนแถบนำของซิงก์ออกไซด์เพิ่มมากขึ้น (Jandow et al., 2012) เรียกอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นนี้ว่า photoelectron หลังจากที่ถูก 30 วินาที จึงหยุดให้รังสียูวี จะสังเกตเห็นว่ากระแสไฟฟาลดลงเรื่อยๆ จนกลับสู่สภาพปกติ เรียกกระบวนการนี้ว่า การคืนตัวของเซนเซอร์ (sensor recovery) และเรียกช่วงเวลาที่เซนเซอร์กลับสู่สภาพปกติว่า เวลาคืนตัว (recovery time) ซึ่งเวลาคืนตัว ตามนิยามคือเวลาที่เซนเซอร์มีการเปลี่ยนแปลงกลับสู่สภาพเดิมร้อยละ 90 (Na et al., 2018) เช่นกระแสไฟฟ้ากลับสู่สภาพเดิมร้อยละ 90 จากตอนเริ่มต้น

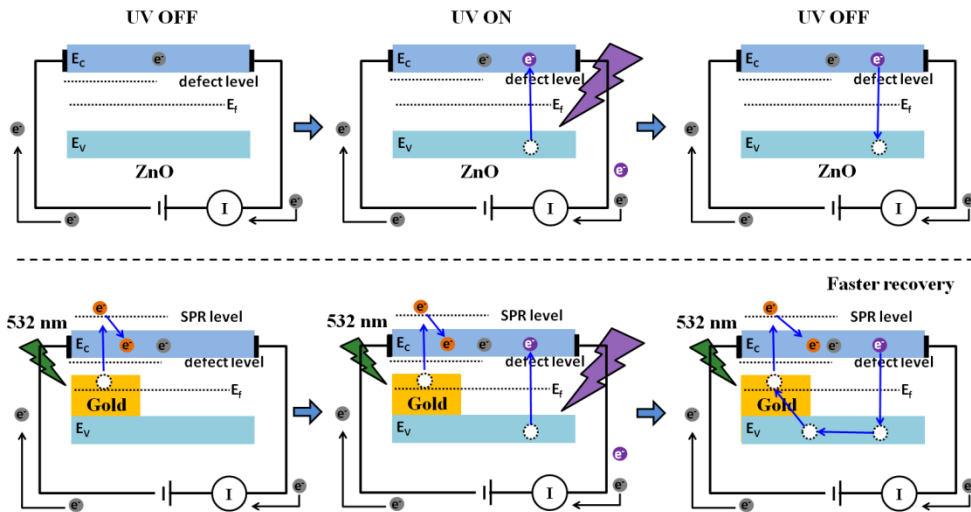
ภาพที่ 5(A)–(B) แสดงการตอบสนองต่อรังสียูวีของเซนเซอร์ตรวจวัดรังสียูวีที่เตรียมจากโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์ที่ไม่ฉายแสงสีเขียวกระตุ้น ดังภาพที่ 5(A) และรวมกับการฉายแสงสีเขียวกระตุ้น ดังภาพที่ 5(B) โดยทดสอบสมบัติการตรวจวัดรังสียูวีซ้ำ 3 ครั้ง พบว่าค่าการตอบสนองต่อแสงเฉลี่ยของเซนเซอร์ตรวจวัดรังสียูวีที่เตรียมจากโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์ทั้งที่ไม่ฉายแสงสีเขียวกระตุ้นและไม่ฉายแสงสีเขียวกระตุ้น มีค่าประมาณ 2 เท่า (ค่าการตอบสนองต่อแสงสำหรับทั้งสองเงื่อนไขไม่แตกต่างกัน) นอกจากนี้เซนเซอร์ตรวจวัดรังสียูวีที่เตรียมจากโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์ที่ไม่ฉายแสงสีเขียวกระตุ้นจะมีเวลาคืนตัว (recovery time) เท่ากับ 668 วินาที ส่วนกรณีที่ไม่ฉายแสงสีเขียวกระตุ้นจะมีเวลาคืนตัว เท่ากับ 676 วินาที ซึ่งไม่แตกต่างกัน และสมบัติการวัดซ้ำของทั้งสองเงื่อนไขยังไม่เหมาะสม สังเกตได้จากกระแสไฟฟ้าของเซนเซอร์ไม่สามารถกลับคืนค่าเดิมได้ ผลการทดสอบดังกล่าวบ่งบอกว่าฉายแสงสีเขียวกระตุ้นให้แก่เซนเซอร์ตรวจวัดรังสียูวีที่เตรียมจากโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์ไม่มีผลต่อการปรับปรุงสมบัติการตรวจวัดรังสียูวี

ภาพที่ 5(C)–(D) แสดงการตอบสนองต่อรังสียูวีของเซนเซอร์ตรวจวัดรังสียูวีที่เตรียมจากโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เติมอนุภาคนาโนทองคำที่ไม่ฉายแสงสีเขียวกระตุ้น ดังภาพที่ 5(C) และที่ฉายแสงสีเขียวกระตุ้น ดังภาพที่ 5(D) โดยทดสอบสมบัติการตรวจวัดรังสียูวีซ้ำ 3 ครั้ง พบว่าค่าการตอบสนองต่อแสงเฉลี่ยของเซนเซอร์ตรวจวัดรังสียูวีที่เตรียมจากโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์ทั้งที่ไม่ฉายแสงสีเขียวกระตุ้นและไม่ฉายแสงสีเขียวกระตุ้น มีค่าประมาณ 2 เท่า (ค่าการตอบสนองต่อแสงสำหรับทั้งสองเงื่อนไขไม่แตกต่างกัน) แต่เซนเซอร์ตรวจวัดรังสียูวีที่เตรียมจากโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เติมอนุภาคนาโนทองคำโดยไม่ฉายแสงสีเขียวกระตุ้นจะมีเวลาคืนตัว เท่ากับ 629 วินาที และกรณีที่ฉายแสงสีเขียวกระตุ้นจะมีเวลาคืนตัว เท่ากับ 535 วินาที ซึ่งน้อยกว่าเซนเซอร์แบบอื่นๆ อีกทั้งยังแสดงสมบัติการวัดซ้ำที่ดี สังเกตได้จากกระแสไฟฟ้าของเซนเซอร์สามารถกลับคืนค่าเดิมได้ ผลการทดสอบสมบัติการตรวจวัดรังสียูวีบ่งบอกว่าฉายแสง

สีเขียวกระตุ้นให้แก่เซนเซอร์ตรวจจับรังสียูวีที่เตรียมจากโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เติมอนุภาคนาโนทองคำสามารถปรับปรุงสมบัติการวัดซ้ำ นอกจากนี้ ค่าการคืนตัวของเซนเซอร์ตรวจจับรังสียูวีที่เตรียมจากโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เติมอนุภาคนาโนทองคำยังสอดคล้องกับพลโฟโวลูมิเนสเซนส์เปกตรัมที่อนุภาคนาโนทองคำสามารถปรับปรุงกระบวนการที่อิเล็กตรอนในแถบนำเปลี่ยนสถานะมายังแถบวาเลนซ์ ดังนั้น การปรับปรุงความสามารถในการวัดซ้ำและเวลาคืนตัวของเซนเซอร์ตรวจจับรังสียูวีสามารถอธิบายได้ด้วยกระบวนการขนส่งอิเล็กตรอนในเซนเซอร์โดยพิจารณาผลเซอร์เฟซพลาสมอนเรโซแนนซ์ ของทองคำ

อภิปรายผล

จากการทดสอบสมบัติการตอบสนองต่อรังสียูวีของเซนเซอร์ตรวจจับรังสียูวีที่เตรียมจากโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์และเซนเซอร์ตรวจจับรังสียูวีที่เตรียมจากโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เติมอนุภาคนาโนทองคำ ทำให้ทราบว่าการเติมอนุภาคนาโนทองคำลงบนโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์และร่วมกับการฉายแสงสีเขียวกระตุ้น (ความยาวคลื่น 532 nm) สามารถปรับปรุงสมบัติในการวัดซ้ำและเวลาคืนตัวของเซนเซอร์ตรวจจับรังสียูวี เนื่องจากอัตราการขนส่งประจุที่รวดเร็วกว่า ดังนั้น กลไกการตรวจจับรังสียูวีของโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์แสดงดังภาพที่ 6 โดยตอนเริ่มต้นขณะที่ไม่มีรังสียูวีตกกระทบเซนเซอร์ (UV OFF) แถบนำของโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์ (conduction band: E_c) จะมีอิเล็กตรอนในระดับพลังงานดังกล่าวอยู่จำนวนหนึ่ง และเมื่อให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าแก่เซนเซอร์จะสามารถวัดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเซนเซอร์ได้เท่ากับ I_{dark} แต่หลังจากที่รังสียูวีตกกระทบเซนเซอร์ (UV ON) จะทำให้แถบนำของโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์จะมีอิเล็กตรอนเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากอิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ (valence band: E_v) เปลี่ยนสถานะไปอยู่ที่แถบนำ (E_c) ดังนั้น จะสามารถวัดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเซนเซอร์ได้มากขึ้น เท่ากับ I_{UV} และกระบวนการสุดท้ายเมื่อไม่มีรังสียูวีตกกระทบเซนเซอร์ (UV OFF) จะทำให้แถบนำของโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์จะมีอิเล็กตรอนลดลง เนื่องจากอิเล็กตรอนในแถบนำเปลี่ยนสถานะมายังแถบวาเลนซ์ ดังนั้น กระแสไฟฟ้าไหลผ่านเซนเซอร์จะลดลงเรื่อยๆ จนกลับสู่สภาพปกติ เรียกกระบวนการนี้ว่า การคืนตัวของเซนเซอร์ และเรียกช่วงเวลาที่เซนเซอร์กลับสู่สภาพปกติว่า เวลาคืนตัว และหากทำการฉายแสงซ้ำหลายครั้งก็จะสามารถทราบความสามารถในการวัดซ้ำของเซนเซอร์ได้ นั่นคือ เซนเซอร์ตรวจจับรังสียูวีที่ดีก็ควรจะมีความสามารถในการวัดซ้ำที่ดีเช่นกัน



ภาพที่ 6 แผนภาพกลไกการตรวจวัดรังสียูวีของโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์และของโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เติมอนุภาคนาโนทองคำร่วมกับการฉายแสงสีเขียวกระตุ้น

สำหรับกลไกการตรวจวัดรังสียูวีของโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เติมอนุภาคนาโนทองคำร่วมกับการฉายแสงสีเขียวกระตุ้น พบว่าอนุภาคนาโนทองคำทำให้เซนเซอร์ตรวจวัดรังสียูวีมีความสามารถในการวัดซ้ำที่ดีและให้เวลาคืนตัวเร็วกว่าเซนเซอร์แบบอื่นๆ เนื่องจากการฉายแสงความยาวคลื่น 532 นาโนเมตร จะกระตุ้นให้เกิดอิเล็กตรอนในระดับพลังงานเซอร์เฟซ พลาสมอนเรโซแนนซ์ของอนุภาคนาโนทองคำแล้วจึงขนส่งไปยังแถบนำของโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์ (Do et al., 2018) ฉะนั้นเมื่อมีอิเล็กตรอนในระดับพลังงานเซอร์เฟซพลาสมอนเรโซแนนซ์ก็จะช่วยให้อัตราการขนส่งประจุในแถบนำรวดเร็ว (faster charge transfer process) (Li et al., 2013; Yu et al., 2014; Jiang et al., 2014) หลังจากปิดการฉายรังสียูวี (UV OFF) กระแสไฟฟ้าของเซนเซอร์ลดลงและยังลดลงเร็วกว่าเซนเซอร์ชนิดอื่นๆ อาจเป็นเพราะว่าอิเล็กตรอนในแถบนำสามารถเปลี่ยนสถานะมายังแถบวาเลนซ์ได้เร็วกว่า (faster electron-hole pair recombination) ซึ่งสอดคล้องตามผลการทดลองเมื่อเติมอนุภาคนาโนทองคำร่วมกับการฉายแสงสีเขียวกระตุ้น จะทำให้เวลาคืนตัวเร็วที่สุด (535 วินาที) เมื่อเทียบกับเซนเซอร์อื่นๆ อีกทั้งยังปรับปรุงความสามารถวัดซ้ำของเซนเซอร์ตรวจวัดรังสียูวีได้ และผลการปรับปรุงเวลาคืนตัวของเซนเซอร์ยังสอดคล้องกับผลโฟโตลูมิเนสเซนซ์

สรุปผลการวิจัย

การเติมอนุภาคนาโนทองคำลงบนโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์ร่วมกับการฉายแสงสีเขียวช่วยกระตุ้นสามารถปรับปรุงสมบัติการวัดซ้ำ และยังพบว่าเวลาคืนตัวของเซนเซอร์ตรวจวัดรังสียูวีที่เตรียมจากโครงสร้างนาโนซิงก์ออกไซด์ที่เติมอนุภาคนาโนทองคำมีเวลาคืนตัว เท่ากับ 535 วินาที ซึ่งน้อยกว่าเซนเซอร์แบบอื่นๆ ดังนั้น การปรับปรุงความสามารถในการวัดซ้ำและเวลาคืนตัวของเซนเซอร์ตรวจวัดรังสียูวีสามารถอธิบายได้ด้วยกระบวนการขนส่งอิเล็กตรอนในเซนเซอร์โดยพิจารณาผลเซอร์เฟซพลาสมอนเรโซแนนซ์ของทองคำ

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากมหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม (สัญญาเลขที่ RDI-1-60-6-8) ขอขอบคุณศูนย์วิทยาศาสตร์ และคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม ที่ให้การสนับสนุนเครื่องมือและสถานที่ทำงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- ชนิดา ศรีปัญญา. (2557). **กรมอนามัยแนะประชาชนเลี่ยงตากแดดนานช่วงสายถึงเย็นเพราะอาจเสี่ยงเป็นมะเร็งผิวหนังและตาต้อกระจก**. สำนักข่าวกรมประชาสัมพันธ์. เข้าถึงเมื่อวันที่ 8 ตุลาคม 2561, จาก http://thainews.prd.go.th/website_th/archive/print_news/WNSOC5705190020019.
- พิชิตชัย ปิมแปง, วีระศักดิ์ ทองอ่อน และสุภาพ ชูพันธ์. (2561). การปรับปรุงสมบัติการตรวจวัดอะเซทิลีนของเส้นลวดนาโนซิงก์ออกไซด์ด้วยการเติมอนุภาคนาโนทองคำ. **PSRU Journal of Science and Technology**, 3(2), 1–12.
- Beani, J. C. (2014). Ultraviolet A–induced DNA damage; role in skin cancer. **Bulletin de l'Académie nationale de médecine**, 198(2), 273–295.
- Cheng, C. W., Sie, E. J., Liu, B., Huan, C. H. A., Sum, T. C., Sun, H. D. and Fan, H. J. (2010). Surface plasmon enhanced band edge luminescence of ZnO nanorods by capping Au nanoparticles. **Applied Physics Letter**, 96, 071107. DOI:org/10.1063/1.3323091.
- Do, T. A. T., Ho, T. G., Bui, T. H., Pham, Q. N., Giang, H. T., Do, T. T., ... Tran, D. L. (2018). Surface–plasmon–enhanced ultraviolet emission of Au–decorated ZnO structures for gas sensing and photocatalytic devices. **Beilstein Journal of Nanotechnology**, 9, 771–779.
- Gao, W. and Li, Z. (2004). ZnO thin films produced by magnetron sputtering. **Ceramics International**, 30, 1155–1159.
- Guidelli, E. J., Baffa, O. and Clarke, D. R. (2015). Enhanced UV emission from silver/ZnO and gold/ZnO core–shell nanoparticles; photoluminescence, radioluminescence and optically stimulated luminescence. **Scientific Reports**, 5, 14004. DOI:10.1038/srep14004.

- Jandow, N. N., Abu Hassan, H., Yam, F. K. and Ibrahim, K. (2012). ZnO Metal–Semiconductor–Metal UV Photodetectors on PPC Plastic with Various Metal Contacts. Sanka Gateva (Ed.). **Photodetectors**, London: IntechOpen. 1–32.
- Jiang, R., Li, B., Fang, C. and Wang, J. (2014). Metal/Semiconductor Hybrid Nanostructures for Plasmon–Enhanced Applications. **Advanced Materials**, 26, 5274–5309.
- Khoa, N. T., Kim, S. W., Yoo, D.–H., Cho, S., Kim, E. J. and Hahn, S. H. (2015). Fabrication of Au/graphene–wrapped ZnO–nanoparticle–assembled hollow spheres with effective photoinduced charge transfer for photocatalysis. **ACS Applied Materials and Interfaces**, 7, 3524–3531.
- Kinney, J. P., Long, C. S. and Geller, A. C. (2000). The Ultraviolet Index; A Useful Tool. **Dermatology Online Journal**, 6(1). Retrieved October, 2018, from <https://escholarship.org/uc/item/5925w4hq>.
- Li, R., Zhang, F., Wang, D., Yang, J., Li, M., Zhu, J., ... Li, C. (2013). Spatial separation of photogenerated electrons and holes among [010] and [110] crystal facets of BiVO₄. **Nature Communications**, 4, 1432. DOI:10.1038/ncomms2401.
- Lin, H. Y., Cheng, C. L., Chou, Y. Y., Huang, L. L., Chen, Y. F. and Tsen, K. T. (2006). Enhancement of band gap emission stimulated by defect loss. **Optics Express**, 14(6), 2372–2379.
- Matsui, M. S. (1991). Longwave ultraviolet radiation and promotion of skin cancer. **Cancer Cells**. 3(1), 8–12.
- Na, C. W., Kim, J.–H., Kim, H.–J., Woo, H.–S., Gupta, A., Kim, H.–K., and Lee, J.–H. (2018). Highly selective and sensitive detection of NO₂ using rGO–In₂O₃ structure on flexible substrate at low temperature. **Sensors and Actuators B**, 255, 1671–1679.
- Pimpang, P., Zoolfakar, A. S., Wongrataphisan, D., Gardchareon, A., Nguyen, E. P., Zhuikov, S., Choopun, S. and Kalantar–zadeh, K. (2013). Atomic force microscopy adhesion mapping; Revealing assembly process in inorganic systems. **Journal of Physical Chemistry C**, 117, 19984–19990.
- Rouhi, J., Mamat, M. H., Ooi, C. H. R., Mahmud, S., Mahmood, M.R. (2015). High–performance dye–sensitized solar cells based on morphology–controllable synthesis of ZnO–ZnS heterostructure nanocone photoanodes. **PLoS One**, 10:1–14. DOI:10.1371/journal.pone.0123433.
- Rünger, T. M. (1994). Role of UVA in the pathogenesis of melanoma and non–melanoma skin cancer. A short review. **Photodermatol Photoimmunol Photomed**, 15(6), 212–216.
- Schmitz, S., Garbe, C., Tebbe, B. and Orfanos, C. E. (1994). Long–wave ultraviolet radiation (UVA) and skin cancer. **Hautarzt**, 45(8), 517–525.
- Young, S., Ji, L., Chang, S. and Su, Y. (2006). ZnO metal–semiconductor–metal ultraviolet sensors with various contact electrodes. **Journal of Crystal Growth**, 293, 43–47.
- Yu, S., Lee, S.Y., Yeo, J., Han, J. W. and Yi, J. (2014). Kinetic and Mechanistic Insights into the All–Solid–State Z–Schematic System. **Journal of Physical Chemistry C**, 118, 29583–29590.