

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลองของแก๊สเซ็นเซอร์

การออกแบบแกรฟีนเพื่อดัดแปลงให้มีสมบัติในการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอล ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้ การฉายเลเซอร์เพื่ออบอุ่นแกรฟีน การนำแกรฟีนมาเจือด้วยไนโตรเจนหรือใช้ทั้งสองกระบวนการพร้อมกัน วัตถุประสงค์ของการฉายเลเซอร์คือการเพิ่มปริมาณตำหนิบนให้แกรฟีน โดยปริมาณของตำหนิที่เพิ่มสูงขึ้นจะทำให้ไนโตรเจนจากการเจือสามารถจับกับผิวแกรฟีนได้มากขึ้น จากนั้นนำไปทดสอบการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอล ซึ่งว่าในชั้นงานแกรฟีนธรรมดา มีค่าการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอลในระดับที่น้อยกว่า 1% และมีค่าการตอบสนองที่สูงขึ้นมากกว่า 1% เมื่อเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบเป็น 150°C ดังแสดงในรูปที่ 4.12A และ 4.13A เนื่องจากในแกรฟีนที่อุณหภูมิห้องจะมีอะตอมของออกซิเจนในอากาศจับอยู่บนพื้นผิว และเมื่อมีการปล่อยแก๊สเอทานอลเข้าไปยังชั้นงานอะตอมโมเลกุลของเอทานอลจะเข้าไปจับกับออกซิเจนที่ผิวของแกรฟีนและเกิดการดึงเกิดขึ้นทำให้เกิดอิเล็กตรอนขึ้นซึ่งจะทำให้ความต้านทานของแกรฟีนมีค่าลดลงและถ้าเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นเป็น 150°C จะยิ่งทำให้อัตราการดึงประจุของเอทานอลสูงขึ้นและส่งผลถึงค่าการตอบสนองต่อแก๊สที่สูงขึ้นตามปริมาตรของอิเล็กตรอนที่เกิดจากการดึงประจุของแก๊สเอทานอล แต่ในทางตรงกันข้ามถ้าแกรฟีนที่ถูกเจือด้วยไนโตรเจนพบว่าจะมีค่าการตอบสนองที่สูงขึ้นประมาณ 2% และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้สูงเป็น 150°C พบว่าค่าการตอบสนองของชั้นงานลดลงอยู่ในระดับที่น้อยกว่า 1% ซึ่งเป็นสาเหตุมาจากอะตอมของไนโตรเจนที่เจือในแกรฟีนได้หลุดออกไป โดยที่อะตอมไนโตรเจนที่เจือบนแกรฟีนเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้แกรฟีนมีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนสูงทำให้แกรฟีนที่ถูกเจือจะมีค่าการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอลที่สูงกว่าแกรฟีนธรรมดาและเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 150°C อะตอมของไนโตรเจนที่จับกับแกรฟีนแบบเชิงกายภาพ (physisorption) ได้หลุดออกจากผิวแกรฟีนโดยสังเกตได้จากผลของ XPS ในบทที่ 4 และมีผลทำให้ค่าการตอบสนองต่อแก๊สในชั้นงานลดลง

5.2 สรุปผลการทดลองของโฟโตดีเทคเตอร์

อุปกรณ์โฟโตดีเทคเตอร์ทำการออกแบบชิ้นงานแบบซ้อตก็ โดยใช้โครงสร้างไฮบริดระหว่างแกรฟีนกับท่อนาโนคาร์บอนที่มีสมบัติในการดูดซับแสงในย่านอินฟราเรด โดยการเตรียมชิ้นงานจำแนกเป็น 3 ชนิด ได้แก่ GP CNT และ CNT/GP สำหรับใช้ในการวัดประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแสงในอินฟราเรด โดยวิเคราะห์จากค่า R และ D^* การทดสอบโฟโตดีเทคเตอร์บนชิ้นงานทั้งสามแบบนี้ได้มีการควบคุมขนาดลำเลเซอร์ให้มีขนาดเล็กลงโดยใช้เลนส์รวมแสงและใช้แผ่นกรองแสงที่มีรูขนาด 5.6 mm x 5.6 mm โฟกัสแสงจากเลเซอร์ไปบนชิ้นงาน ในการทดลองทำการทดสอบนี้กับชิ้นงาน GP พบว่าค่า R ที่ได้ค่อนข้างต่ำเพียง 2.33 $\mu\text{A/W}$ ตรงกันข้ามกับ CNT ที่มีค่า R สูงถึง 77.9 $\mu\text{A/W}$ แต่ที่น่าสนใจคือ ในการวัดค่าความไวในการสร้างสัญญาณหรือ D^* พบว่าแกรฟีนสามารถทำได้สูงกว่า CNT โดยค่า D^* ของแกรฟีนอยู่ที่ $2.14 \times 10^8 \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$ โดยที่ CNT ทำค่า D^* ได้สูงเพียง $8.35 \times 10^7 \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$ ทั้งนี้เมื่อนำทั้งสองวัสดุมารวมกันในชิ้นงาน CNT/GP พบว่ามี R สูงที่สุดเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่เหลือ แม้ว่าค่า D^* จะอยู่ในระดับตรงกลางระหว่าง GP และ CNT จากการทดลองนี้ทำให้สรุปผลได้ว่า GP เป็นวัสดุที่มีค่า R ต่ำเนื่องจากไม่มีแถบช่องว่างพลังงานทำให้ประสิทธิภาพการกระตุ้นด้วยแสงอินฟราเรดไม่สามารถเดินทางไปยังขั้วได้ทำให้การเปลี่ยนแปลงของค่ากระแสอยู่ในระดับที่ต่ำประกอบกับแกรฟีนเป็นวัสดุที่โปร่งแสงการดูดกลืนแสงทำได้ต่ำ ส่วนค่า D^* ที่สูงมีสาเหตุมาจากสมบัติพื้นฐานของแกรฟีนที่มีความหนาแน่นของประจุสูง การเคลื่อนที่ของประจุพาหะหรืออิเล็กตรอนโฮลในแกรฟีนทำได้สูง ดังนั้นการถูกกระตุ้นด้วยแสงอินฟราเรดประจุในแกรฟีนจะมีการตอบสนองต่อพลังงานที่เข้าไปกระตุ้น (work function) อย่างรวดเร็วประกอบกับไม่มีแถบช่องว่างพลังงานมาขัดขวางการเคลื่อนที่ของประจุเหล่านี้ยิ่งทำได้สูงขึ้น แต่ในทางกลับกันชิ้นงาน CNT แม้ว่าจะมีค่า R ที่สูงกว่าแกรฟีนค่า D^* กลับมีค่าที่ต่ำสุด เนื่องจาก CNT เป็นวัสดุที่มีแถบช่องว่างพลังงานเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงอินฟราเรดประจุอิเล็กตรอนโฮลที่อยู่ใน CNT จะเริ่มเคลื่อนมาสะสมบริเวณที่เป็นช่องว่างพลังงานซึ่งการสะสมของประจุเหล่านี้นำไปสู่การเปลี่ยนแปลงของระดับกระแสไฟฟ้าใน CNT ประกอบกับเป็นวัสดุที่ทึบแสงสามารถดูดซับโฟตอนจากแสงที่มากกระตุ้นได้สูง แต่ในกรณีของค่า D^* ที่ต่ำเนื่องจากการเคลื่อนที่ของประจุใน CNT ถูกจำกัดด้วยแถบช่องว่างพลังงานและการนำ CNT มาผสมกับ PMMA เพื่อทำเป็นฟิล์มยิ่งทำให้ประจุใน CNT ถูกบริเวณการเคลื่อนที่จากตำแหน่งของพอลิเมอร์มากขึ้น ดังนั้นแนวทางในการนำ CNT และ GP มาไฮบริดกัน จึงเป็นแนวทางที่จะช่วยในการปรับปรุงประสิทธิภาพของโฟโตดีเทคเตอร์ได้ โดยมีหลักการดังนี้ เริ่มจากค่า R คือ GP มีประจุที่มีความหนาแน่นสูงการเคลื่อนที่ของประจุทำได้ง่ายเมื่อนำมาไฮบริดกับ CNT ที่สามารถชะลอระยะเวลาในการรวมประจุที่มาจาก GP ได้ ดังนั้นประจุที่ได้จากชิ้นงาน CNT/GP จึงมีความหนาแน่นสูงเพราะเป็นประจุที่มาจากทั้ง CNT และ GP รวมกันการเปลี่ยนแปลงของกระแสหรือค่า R จึงมีค่าสูง

(83.2 $\mu\text{A/W}$) ส่วนในกรณีของ D* การเคลื่อนที่ของประจุใน CNT สามารถทำได้ช้ากว่าของ GP ดังนั้นการนำเอาวัสดุทั้งสองมาไฮบริดกัน GP จึงทำหน้าที่เป็นเหมือนทางลัดหรือทางด่วนของประจุที่มาจาก CNT ทำให้ค่า D ของชิ้นงาน CNT/GP มีค่าที่สูง ($1.55 \times 10^8 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$) ขึ้นมาในระดับหนึ่ง แต่ยังไม่สูงเท่ากับแกรฟีน

5.3 ข้อเสนอแนะ

❖ แก๊สเซ็นเซอร์

สำหรับอุปกรณ์แก๊สเซ็นเซอร์ ซึ่งมีค่าการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอลที่ต่ำ ซึ่งเป็นไปได้ว่าแกรฟีนที่นำมาทำเซ็นเซอร์มีสมบัติที่ตอบสนองต่อแก๊สเอทานอลต่ำและอาจเป็นไปได้ว่าแกรฟีนมีความสามารถตอบสนองต่อแก๊ส เช่น แอมโมเนีย ไนโตรเจนไดออกไซด์ เป็นต้น หรืออีกสาเหตุหนึ่งคือ ระดับความเข้มข้นของแก๊สเอทานอลที่ทำการตรวจวัด เช่น 25 50 100 และ 200 ppm อาจมีความเข้มข้นที่สูงเกินระดับที่แกรฟีนจะสามารถตอบสนองได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งควรทำการทดสอบการตอบสนองต่อแก๊สที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า 5 ppm เพื่อหาระดับความเข้มข้นของแก๊สที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการตรวจวัด อีกปัจจัยหนึ่งคือ ลักษณะการประกบติดตัวของชิ้นงานกับเครื่องมือวัดที่มีความไม่ได้มาตรฐาน ซึ่งอาจส่งผลในส่วนของความต่อเนื่องของการวัดทำให้เกิดสัญญาณรบกวนขึ้น โดยสัญญาณดังกล่าวอาจมีค่าสูงกว่าสัญญาณข้อมูลที่ได้ จากการทดสอบหาการตอบสนองต่อแก๊สเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นพบว่าหากใช้การเพิ่มอุณหภูมิในระหว่างการวัดอย่างละเอียดจะทำให้ได้เงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการทำงานของเซ็นเซอร์ที่ทำจากแกรฟีนได้ ซึ่งในการทดลองของเราได้ทำการวัดอุณหภูมิ 25 100 และ 150 ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่หายสำหรับการทดสอบการตอบสนองต่อแก๊สเอทานอล

❖ โฟโตดีเทคเตอร์

จากการทดลองของอุปกรณ์โฟโตดีเทคเตอร์แบบไฮบริด แหล่งกำเนิดแสงจัดได้ว่าเป็นปัจจัยหลักในการทดลองนี้ แสงถ้ามีกำลังหรือความเข้มไม่เพียงพอที่จะกระตุ้นให้เกิดโฟตอนหรือเกิดโฟตอนแต่มีปริมาณที่น้อยก็จะไม่สามารถให้สัญญาณทางไฟฟ้าที่ออกมาจากชิ้นงานได้ ปัจจัยที่สองคือลักษณะหรือขนาดของชิ้นงานโฟโตดีเทคเตอร์ ถ้าชิ้นงานมีขนาดใหญ่และมีขั้วที่อยู่ห่างกันมาก เมื่อทำการฉายแสงเป็นไปได้ว่าสัญญาณที่ออกมาจากชิ้นงานเป็นเพียงสัญญาณที่เกิดจากโฟตอนในบริเวณที่อยู่ติดกับขั้วแต่ไม่ใช่ของชิ้นงานทั้งหมด ทำให้สัญญาณที่ได้ค่าที่ต่ำ ทั้งนี้ไม่รวมปัจจัยในส่วนของความสมบูรณ์ของชิ้นงาน เช่น ตำแหน่งชิ้นงานที่ก่อให้เกิดสัญญาณรบกวนในการตรวจวัด

สำหรับการทดลองที่จะทำการศึกษาต่อไปในหัวข้อที่เกี่ยวข้องกับโฟโตเทคเตอร์ที่ทำจากแกรฟีน และท่อนาโนคาร์บอน

1. จากผลการทดลองในส่วนของรูปที่ 4.25 ที่เป็นการวัดโฟโตดีเทคเตอร์ที่ทำเป็นโครงสร้างไฮบริดระหว่าง CNT กับ N-GP ซึ่งสามารถวัดค่าประสิทธิภาพของโฟโตดีเทคเตอร์ได้ แต่ยังไม่สามารถอธิบายความสัมพันธ์ของผลจากการเจือในโตรบนแกรฟีนที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของโฟโตดีเทคเตอร์ได้ รวมไปถึงในรูป 4.28 การฉายเลเซอร์แบบเลือกตำแหน่งบนโฟโตดีเทคเตอร์ เหตุผลที่ใช้ในการอธิบายยังไม่ครอบคลุมผลการทดลองทั้งหมด ซึ่งจำเป็นจะต้องทำการศึกษาต่อไป
2. เปลี่ยนแหล่งให้กำเนิดแสงในการทดสอบโฟโตดีเทคเตอร์จากไดโอดเลเซอร์เป็นโคมไฟอินฟราเรด (IR lamp) ทำให้ได้แสงในย่านอินฟราเรดที่มีช่วงความยาวคลื่นแสงที่กว้างขึ้น
3. ทำฟิวเตอร์กรองแสงให้มีขนาดเล็กระดับไมครอนแล้วตรวจวัดประสิทธิภาพของโฟโตดีเทคเตอร์
4. เนื่องจากชิ้นงานมีความแข็งแรงยืดหยุ่น จึงพยายามทำการวัดการตอบสนองต่อแสงในขณะที่ทำการบิดชิ้นงานไป เพื่อวิเคราะห์ผลจากการผิดรูปของชิ้นงานที่ส่งผลต่อค่าการตอบสนองต่อแสง
5. ลดขนาดของชิ้นงานให้อยู่ในระดับไมครอน และใช้การตรวจวัดการตอบสนองต่อแสงในระบบปิดของ focus ion beam (FIB) เพื่อลดปัญหาของสัญญาณรบกวนจากภายนอก
6. ทำการวัดคุณสมบัติของชิ้นงานระหว่างการทดสอบการตอบสนองต่อแสง
7. เพิ่มรายละเอียดของชิ้นงาน เช่น เพิ่มลวดลายในการทำชิ้นงาน ทำเป็นโครงสร้างรอยแบบ p-n หรือใช้ท่อนาโนคาร์บอนแบบตั้งฉากกับตัวฐานชิ้นงานในการทำเป็นโฟโตดีเทคเตอร์

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved