



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

ผลของการตอบสนองต่อแสงของวัสดุนาโนคาร์บอน

Light radiation effect on carbon nanostructured materials



ประธาน บุรณศิริ
พิชญ์สิทธิ์ สุวรรณแพทย์

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินรายได้คณะ

ประจำปีงบประมาณ 2557

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

ผลของการตอบสนองต่อแสงของวัสดุนาโนคาร์บอน
Light radiation effect on carbon nanostructured materials

ประธาน บุรณศิริ
พิชญ์สินี สุวรรณแพทย์

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินรายได้คณะ

ประจำปีงบประมาณ 2557

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ ผลของการตอบสนองต่อแสงของวัสดุนาโนคาร์บอน

แหล่งเงิน งบประมาณเงินรายได้ ประเภทส่งเสริมนักวิจัย

ประจำปีงบประมาณ 2557 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 50,000 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ ตุลาคม 2556 ถึง กันยายน 2557

ชื่อ - สกุลหัวหน้าโครงการ ดร. ประธาน บุรณศิริ

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ชื่อ - สกุลผู้ร่วมโครงการวิจัย นางสาวพิชญ์สินี สุวรรณแพทย์

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยมหิดล

บทคัดย่อ

รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ (T-rGO) เป็นวัสดุคาร์บอนซึ่งถูกสังเคราะห์ขึ้นด้วยวิธีทางเคมีและการรีดักชันด้วยความร้อน เพื่อใช้ในการศึกษาสมบัติการตอบสนองทางแสงในช่วงที่ตามองเห็น จากการตรวจสอบคุณลักษณะด้วยรามานสเปกโตรสโกปีของฟิล์ม T-rGO บน Si/SiO₂ พบ G- และ D-peaks ชัดเจนที่ตำแหน่ง 1603.7 cm⁻¹ และ 1346.3 cm⁻¹ ตามลำดับ สามารถตรวจสอบลักษณะพื้นผิวได้ภายใต้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง และสามารถหาความหนาของ T-rGO เฉลี่ย < 2 nm ได้จากภาพ AFM ที่น่าสนใจคือ สมบัติทางแสงวัดด้วยโฟโตลูมิเนสเซนซ์สเปกโตรสโกปี ใช้ $\lambda_{ex} = 325$ nm (3.81 eV) ที่อุณหภูมิ 11 K แสดงการปลดปล่อยพลังงานในช่วงกว้างที่ตามองเห็นได้ ซึ่งแสดงถึงลักษณะ sp² cluster คล้ายโครงสร้างนาโนของอะมอร์ฟัสคาร์บอนตำแหน่ง peak สูงสุดที่ 560 nm (2.21 eV) แสดงการหลงเหลือของ disorder และ defects ใน T-rGO หลังจากการทำรีดักชัน ซึ่งสอดคล้องกับตำแหน่ง D-peak ที่ยังคงชัดเจนในสเปกตรัมรามาน นอกจากนี้ ฟิล์มบาง T-rGO ถูกสร้างเป็นอุปกรณ์สำหรับตรวจจับแสงเลเซอร์ไดโอดกำลังแสง < 1000 mW ที่มีความยาวคลื่น 450 nm, 532 nm และ 632 nm โดยมีการป้อนกระแส DC ให้แก่วงจร 0.5 mA จากผลการวัดพบว่า มีการตอบสนองทางไฟฟ้าต่อแสงเลเซอร์ทันทีที่ถูกกระตุ้นและคืนสภาพได้ทันทีเช่นกัน สังเกตค่าการตอบสนองจากความต้านทานไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปแบบ real-time โดยขึ้นอยู่กับความถี่ของแสง แสงที่มีความถี่สูงโดยเฉพาะแสงสีฟ้าจะมีการตอบสนองมากที่สุด ตามมาด้วยสีเขียว และสีแดง ตามลำดับ ซึ่งโครงการวิจัยนี้คาดว่าจะนำมาพัฒนาต่อเป็นตัวตรวจจับแสงที่มีการตอบสนองอย่างรวดเร็วและความเสถียรต่อไปได้ในอนาคต

คำสำคัญ : รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์, วัสดุคาร์บอน, การตอบสนองทางแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Research Title :Light radiation effect on carbon nanostructured materials

Researcher : Dr. PrathanBuranasiri

Department of Applied Physics, Faculty of Science,

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Research Assistant :PhitsiniSuvarnaphaet

Department of Physics, Faculty of Science, Mahidol University

ABSTRACT

Thermally reduced graphene oxide (T-rGO), a carbon-nanostructured material, was prepared from chemical and thermal reduction process for performing the photosensing in a visiblerange. Raman spectrum of the synthesized T-rGO thin film on Si/SiO₂ was observed strong intensity of two-major peaks, D-peak at 1603.7 cm⁻¹ and G-peak at 1346.3 cm⁻¹. The film morphology was observed by optical microscopy and was also determined the average thickness of T-rGO sheets <2 nm by AFM. Interestingly, the low-temperature PL spectrum of T-rGO thin film showed two-broad visible emission peaks, which have been similar to those of the presence of sp² domains in nanostructured amorphous carbons. Moreover, this strong broad band positioned at 560 nm (2.21 eV) was consistent with the remaining disorder induced defect states as shown at D-peak in Raman spectrum. In the application, the T-rGO was applied for photosensing to incident laser diodes with high power <1000 mW at wavelengths of 450 nm, 532 nm and 632nm. By applying 0.5 mA of DC current, the T-rGO sensor exhibited very fast response and fast recovery depending on the frequency of laser. The photosensing was investigated by measuring its resistance changes with incidence of laser beam with different frequencies in real-time. The higher frequency provided the more resistance change, especially that of the blue color. From the results above, the development of photosensors with high photosensitivity and stable response would be further proposed.

Keywords:Thermally reduced graphene oxide,Carbon-nanostructured material, Photosensing.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

รายงานนี้เป็นรายงานฉบับสมบูรณ์ของโครงการวิจัยผลของการตอบสนองต่อแสงของวัสดุนาโนคาร์บอน ซึ่งได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากแหล่งทุนงบประมาณเงินรายได้ ประเภทส่งเสริมนักวิจัย ประจำปีงบประมาณ2557

ผู้ดำเนินโครงการวิจัยขอขอบคุณ ดร.ปิยะพงษ์ อะสะนินิ และดร.ชุมพล เหลืองชัยศรี อาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์ด้านสถานที่ วัสดุสารเคมีในการสังเคราะห์ เครื่องมือวิเคราะห์ทางไฟฟ้า และให้คำปรึกษาข้อชี้แนะ ในการวิจัยจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีและคุณณัฐพากย์ พรอนันต์รัตน์ นักศึกษาช่วยวิจัย ที่ให้ความช่วยเหลือในการสร้างเครื่องสเปกโทรสโกปีโฟโวลติสในกระบวนการสร้างอุปกรณ์ตอบสนองทางแสง

ผู้ดำเนินโครงการวิจัยขอขอบคุณ ดร.ศุภนิจ พรธีระภัทร หัวหน้าห้องปฏิบัติการวิจัย และคุณจุฑาเพชร เวชรังษี นักวิจัย ห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีโฟโตนิกส์ ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) ที่ให้คำปรึกษาการวิเคราะห์ทางแสง และให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องโฟโตลูมิเนสเซนส์สเปกโตรสโกปี

สุดท้ายผู้ดำเนินโครงการวิจัยขอขอบคุณวิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องรามานสเปกโตรสโกปี

ดร. ประธาน บุรณศิริ

นางสาวพิชญ์สินี สุวรรณแพทย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 แกรฟีน สมบัติ และการสังเคราะห์	4
2.1.1 การสังเคราะห์แกรฟีนด้วยวิธี Sonication	7
2.1.2 การสังเคราะห์แกรฟีนด้วยวิธีรีดักชันจากแกรฟีนออกไซด์	8
2.2 การประยุกต์ใช้ทางแสงและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	9
2.2.1 การดูดซับแสงของแกรฟีน (Optical absorption)	9
2.2.2 การศึกษาทางแสงจาก Photoluminescence	10
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	18
3.1 การเตรียมนาโนแกรไฟต์ด้วยวิธีSonication	18
3.1.1 วัสดุและวิธีการ	18
3.1.2 การวิเคราะห์สมบัติของวัสดุ	18
3.2 การเตรียมรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ด้วยวิธีทางเคมี	19
3.2.1 วัสดุและวิธีการ	19
3.2.2 การวิเคราะห์สมบัติของวัสดุ	20
3.3 การศึกษาสมบัติทางแสงด้วยPhotoluminescence spectroscopy (PL)	22
3.4 การวัดการตอบสนองต่อแสงด้วยการทดลองอย่างง่าย	22
บทที่ 4 ผลการวิจัย	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1 ผลการวิจัย	24
4.2 วิจารณ์ผล	28

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	30
5.1 สรุปผลการวิจัย	30
5.2 ข้อเสนอแนะ	30
เอกสารอ้างอิง	31
ภาคผนวก	34
ภาคผนวก ก สรุปค่าใช้จ่ายการดำเนินโครงการวิจัย	35
ประวัตินักวิจัย	37



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 การดำเนินการวิจัย 1 ปี	2



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	อีกรูปของสารโครงสร้างคาร์บอน (a) แกรฟีน (2 มิติ), (b) แกรไฟต์ (3 มิติ), (c) คาร์บอนนาโนทิวป์(1 มิติ)และ (d) ฟลูเลอรีน(0 มิติ)	4
2	Electronic dispersion ของแลตทิซหกเหลี่ยมในแกรฟีนซึ่งมีแถบพลังงานของอิเล็กตรอนและโฮลสัมพันธ์กันที่จุดดิแรก	5
3	แผนภาพแสดงวิธีการสังเคราะห์แกรฟีน	6
4	แผนภาพแสดงวิธีการสังเคราะห์แกรฟีนด้วยวิธี Sonication	7
5	ภาพจาก AFM โหมด non-contact ของแผ่นแกรฟีนออกไซด์และความหนาที่ตำแหน่งต่างๆ	8
6	แสดงโครงสร้างแผ่นคาร์บอนในกระบวนการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันของมีหมู่ออกไซด์แทรกระหว่างชั้นของแกรไฟต์เรียกแกรไฟต์ออกไซด์ จากนั้นลอกชั้นของแกรไฟต์ออกไซด์ในน้ำหรือในตัวทำละลายชั้นเดียวที่หลุดลอกมาเรียก แกรฟีนออกไซด์ เมื่อทำปฏิกิริยารีดักชันกับ hydrazine hydrate (N_2H_4) จะได้อิเล็กตรอนแกรฟีนออกไซด์	9
7	แผนภาพพลังงานแสดงการดูดกลืนโฟตอนและกระบวนการต่างๆที่เกี่ยวกับการปล่อยแสงย่านฟลูออเรสเซนซ์และฟอสฟอเรสเซนซ์	11
8	(a) ภาพ SEM ลักษณะฟิล์มอะมอร์ฟัสคาร์บอนซึ่งเป็นลักษณะของนาโนคริสตัล (b) สเปกตรัม PL ซึ่งใช้เลเซอร์กระตุ้นที่ความยาวคลื่น 488 nm และฟิตด้วยฟังก์ชัน Gaussian (c) สเปกตรัม PL ที่อุณหภูมิห้องของรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์และแกรฟีนออกไซด์	12
9	โครงสร้างของอุปกรณ์แกรฟีนออปโตอิเล็กทรอนิกส์ : (a), (b), (c) โซลาร์เซลล์จากสารอินทรีย์, สารอินทรีย์ และสีย้อมไวแสง ตามลำดับ (d) ไดโอดเปล่งแสงสารอินทรีย์ (OLED) และ (e) อุปกรณ์ตรวจจับแสง	15
10	จอสัมผัสและหน้าต่างอัจฉริยะจากแกรฟีน : (a) จอสัมผัสแบบ Resistive, (b) จอสัมผัสแบบ Capacitive, (c) โครงสร้างหน้าต่างอัจฉริยะแกรฟีน PDLC, (d) หน้าต่างอัจฉริยะแกรฟีน/คาร์บอนนาโนทิวป์ขณะ OFF และ ON	16
11	(a) นาโนแกรไฟต์ในน้ำ DI เมื่อ sonicate เป็นเวลา 120 ชั่วโมง, (b) ภาพถ่ายจากกล้อง OM ของ (a) ที่เตรียมลงบน Si/SiO ₂ wafer กำลังขยาย 1,000 เท่า,	19

(c) แสดงสเปกตรัมรามานของนาโนแกรไฟต์ที่ผ่านการ sonication เปรียบเทียบกับของแกรไฟต์ที่ใช้เป็นสารตั้งต้น (d) ภาพ AFM แสดงความขื่นนาโนแกรไฟต์และความหนา

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
12	(a) แกรไฟต์ออกไซด์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีฮัมเมอร์ (b) ภาพจาก OM แสดงฟิล์มบางรีดิวซ์แกรไฟีนบน Si/SiO ₂ หลังอบที่อุณหภูมิ 250°C (C) สเปกตรัมรามานฟิล์มบางรีดิวซ์แกรไฟีนของรูป (b)และ (d) ภาพจาก AFM แสดงลักษณะผิวของฟิล์มบางและความหนา <2nm	21
13	การทดลองอย่างง่ายสำหรับวัดผลการตอบสนองต่อแสง	23
14	สเปกตรัม PL ของฟิล์มบางนาโนแกรไฟต์ แสดงความเข้มของพลังงานแสงที่ปล่อยออกมาเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงเลเซอร์ความยาวคลื่น 325 nm (3.81 eV)	24
15	ผลการตอบสนองต่อแสงสีฟ้า (450 nm) และแสงสีแดง (632 nm) ของนาโนแกรไฟต์ เมื่อเปิด (ON)และปิด (OFF)แสงเลเซอร์	25
16	สเปกตรัม PL ของฟิล์มบางรีดิวซ์แกรไฟีนออกไซด์ แสดงความเข้มของพลังงานแสงที่ปล่อยออกมาเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงเลเซอร์ความยาวคลื่น 325 nm (3.81 eV)	26
17	ผลการตอบสนองต่อแสงสีฟ้า (450 nm) และแสงสีเขียว (532 nm) ของรีดิวซ์แกรไฟีนออกไซด์ เมื่อเปิด (ON)และปิด (OFF)แสงเลเซอร์	27
18	ผลการตอบสนองต่อแสงสีฟ้า (450 nm) และแสงสีเขียว (532 nm) ของรีดิวซ์แกรไฟีนออกไซด์ จำนวน 5 รอบการตอบสนอง	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปี 2004 นักฟิสิกส์ชาวอังกฤษ Prof. Sir Andre Konstantin Geim และ Konstantin Novoselov แห่งมหาวิทยาลัยแมนเชสเตอร์ ได้ค้นพบวัสดุสองมิติ ประกอบด้วยอะตอมคาร์บอน จัดเรียงตัวกันอย่างหนาแน่นในแลตทิซแบบหกเหลี่ยม ลักษณะคล้ายรังผึ้ง และมีไฮบริดเซชัน (Hybridization) แบบ sp^2 มีความหนาเพียง 1 อะตอม หรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นชั้นเดียวของแกรไฟต์ (Monolayer of graphite) และเป็นอัญรูปพื้นฐานของสารประกอบคาร์บอน วัสดุดังกล่าวเรียกว่า “แกรฟีน” (Graphene) [1] ทำให้นักวิจัยทั่วโลกเกิดความตื่นตัวในการศึกษาวิจัยทั้งทางทฤษฎีและทางปฏิบัติ เนื่องจากคุณสมบัติเฉพาะตัวที่โดดเด่นกว่าวัสดุนาโนชนิดอื่นๆ เป็นอย่างมาก มีน้ำหนักเบา มีความยืดหยุ่นสูง ความแข็งแรงมากกว่าสแตนเลสถึง 200 เท่า มีสมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติทางความร้อนที่ดีมาก โดยเฉพาะความสามารถในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนหรือสภาพความคล่องถึง $200,000 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ที่อุณหภูมิห้อง [1-4] นอกจากนี้ สมบัติที่น่าสนใจอีกอย่างคือ สมบัติเชิงแสงของแกรฟีน ในการดูดซับแสงได้ในช่วงความยาวคลื่นกว้าง ตั้งแต่อัลตราไวโอเล็ต จนถึงตามองเห็นได้ และอินฟราเรด สามารถวัดค่าการดูดซับแสงได้ 2.3% จึงสามารถนำมาพัฒนาเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใสใช้สำหรับงาน เช่น จอสัมผัส เซลล์แสงอาทิตย์ ไดโอดเปล่งแสง หรือในงานทางโฟโตนิกส์ และออปโตอิเล็กทรอนิกส์ยุคใหม่ เป็นต้น [5]

โครงการวิจัยนี้จึงเล็งเห็นความสำคัญของสมบัติในการตอบสนองทางแสงของวัสดุดังกล่าว และได้สังเคราะห์แกรฟีนขึ้นด้วยวิธีทางเคมีและการรีดักชันด้วยความร้อน ตรวจสอบคุณลักษณะของแกรฟีนด้วยรามานสเปกโตรสโกปี (Raman spectroscopy) ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง ในโหมดสะท้อนแสง (OM) แสดงลักษณะฟิล์มบางแกรฟีนที่เคลือบบนซิลิกอน และภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (AFM) แสดงความหนาของแผ่นแกรฟีน $< 2 \text{ nm}$ สิ่งที่น่าสนใจคือ ผลจากการถูกระตุ้นและดูดกลืนแสงความยาวคลื่น 325 nm ที่อุณหภูมิ 11 K พบการคายพลังงานออกมาในช่วงกว้างที่ตามองเห็นได้ ซึ่งแสดงถึงลักษณะ sp^2 cluster ของโครงสร้างอะตอมคาร์บอนมีลักษณะคล้ายของ amorphous carbon และการเกิดขึ้นของ disorder ในแกรฟีน นอกจากนี้ ฟิล์มบางแกรฟีนที่สังเคราะห์ขึ้นถูกสร้างขึ้นเป็นอุปกรณ์สำหรับตรวจวัดแสงเลเซอร์ไดโอดกำลังแสง $< 1000 \text{ mW}$ ในการทดลองอย่างง่าย โดยใช้เลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 450 nm , 532 nm และ 632 nm คำนวณค่าการตอบสนองทางไฟฟ้าจากความต้านไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปแบบ real-time โดยมีการป้อนกระแสให้แก่วงจร 0.5 mA พบการตอบสนองต่อเลเซอร์ขึ้นอยู่กับความถี่หรือพลังงานของเลเซอร์ที่ตกกระทบ โดยเฉพาะแสงสีฟ้า ตามมาด้วยสีเขียว และสีแดง ตามลำดับ ซึ่งคาดว่าสามารถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำมาพัฒนาต่อเป็นหัววัดเซนเซอร์ตรวจวัดแสงที่มีการตอบสนองและคืนสภาพได้อย่างรวดเร็วและมีความเสถียรต่อไปได้ในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

ศึกษาผลของการตอบสนองต่อแสงของวัสดุคาร์บอนเพื่อพัฒนาต่อเป็นหัววัดเซนเซอร์ตรวจวัดแสงที่มีการตอบสนอง มีคืนสภาพได้อย่างรวดเร็ว และมีความเสถียรต่อไปได้ในอนาคต

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. วัสดุคาร์บอนที่จะนำมาใช้ศึกษาผลของการตอบสนองทางแสง คือ รีดิทซ์แกรฟีนออกไซด์ ซึ่งสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีคือ วิธีของฮัมเมอร์(Hummers' method) และทำรีดักชันด้วยการอบที่อุณหภูมิต่ำ

2. ตรวจสอบคุณสมบัติและลักษณะเฉพาะของแกรฟีนด้วย Raman spectroscopy แสดงลักษณะพื้นผิวด้วย optical microscope (OM) ตรวจสอบความหนาของรีดิทซ์แกรฟีนด้วย Atomic Force Microscope (AFM) และวัดสมบัติทางแสงของการดูดกลืนและแสดงการคายพลังงานด้วย Photoluminescence spectroscopy (PL) ใช้แสงเลเซอร์ He-Cd ที่ความยาวคลื่น 325 nm วัดที่อุณหภูมิ 11 K

3. การวัดสมบัติทางแสงและสมบัติทางไฟฟ้า จะใช้แสงเลเซอร์ไดโอดที่มีกำลังแสง <1000 mW ความยาวคลื่น 450 nm, 532 nm และ 632 nm เป็นแหล่งกำเนิดแสงตกกระทบ และวัดการตอบสนองด้วยวิธีโพรบ 4 ชั่วโมง เพื่อศึกษาผลของความถี่ของแสง (ความยาวคลื่น) อีกทั้งความไวและพฤติกรรมในการตอบสนอง

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัย 1ปี	เดือน											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
กิจกรรม												
1. ศึกษาแนวคิด งานวิจัย และทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์แกรฟีน สมบัติทางแสง และการประยุกต์ทางแสง	←	→										
2. สังเคราะห์แกรฟีนด้วยวิธีต่างๆ เช่น Sonication-assisted method และ Hummers' method	←	→										
3. ตรวจสอบลักษณะเฉพาะตัวของแกรฟีนที่												

เอกสารนี้ใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

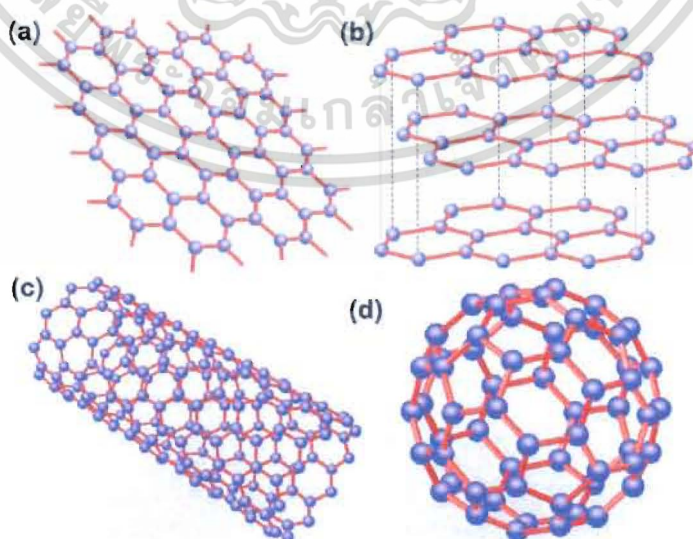
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แกรฟีน สมบัติ และการสังเคราะห์

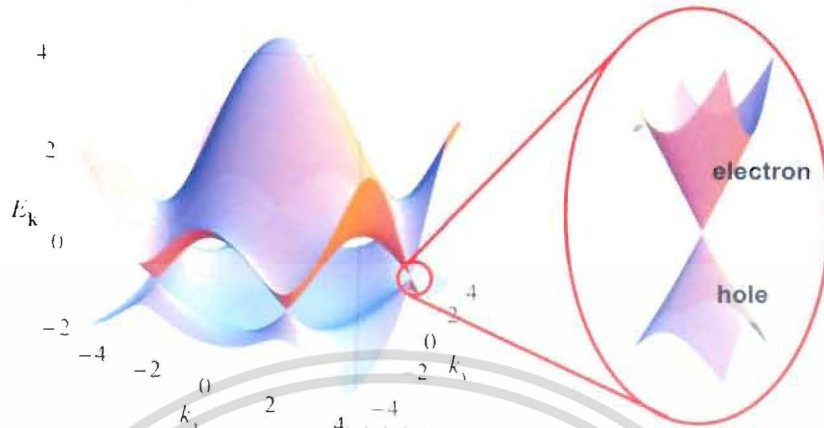
แกรฟีน (Graphene) [1, 6-8] เป็นวัสดุสองมิติที่ประกอบด้วยอะตอมคาร์บอนจัดเรียงตัวกันอย่างหนาแน่นในแลตทิซแบบหกเหลี่ยม ลักษณะคล้ายรังผึ้ง และมีไฮบริไดเซชัน (Hybridization) แบบ sp^2 มีความหนาเพียง 1 อะตอม หรืออาจกล่าวได้เป็นชั้นเดียวของแกรไฟต์ หรือประมาณ 0.335 nm ดังภาพที่ 1(a) และเป็นอิฐรูปพื้นฐานของสารประกอบคาร์บอนอื่นๆ ได้แก่ แกรไฟต์, คาร์บอนนาโนทิวป์ และ ฟูลเลอรีน แกรฟีนเป็นวัสดุสารกึ่งโลหะ หรือเป็นสารกึ่งตัวนำที่ไม่มีแถบช่องว่างพลังงาน มีความสัมพันธ์ของพลังงานกับเวกเตอร์คลื่นของอนุภาคพาหะ (charge carriers) ในโซนบริลลูแวน (Brillouin zone) เป็นแบบเชิงเส้น ดังภาพที่ 2 จึงทำให้แกรฟีนมีความแตกต่างจากวัสดุสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น และทำให้เกิดสมบัติทางไฟฟ้าที่มีลักษณะเฉพาะตัว มวลยังผล (Effective mass) ของอิเล็กตรอนและโฮลในแกรฟีนเป็นศูนย์ และมีพฤติกรรมเลียนแบบอนุภาคเฟอร์มิออนแบบสัมพัทธภาพ มีการเคลื่อนที่แบบไม่มีการกระเจิงใดๆ (Ballistic transport) ด้วยความเร็วของอนุภาค m/s ซึ่งอธิบายได้ด้วยสมการการเคลื่อนที่ของดิแรก (Dirac equation) สำหรับอนุภาคสปิน 1/2

Electronic dispersion ของแกรฟีนคำนวณจาก Tight binding approximation ประกอบ ด้วยแถบพลังงาน 2 แถบคือ แถบวาเลนซ์หรือแถบของโฮล (แถบล่าง) และแถบคอนดักชันของอิเล็กตรอน (แถบบน) จุดที่ทั้งสองแถบสัมผัสกันเรียกว่า จุดดิแรก (Dirac point) มี 6 จุด สัมพันธ์กับตำแหน่งของอะตอมคาร์บอน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 1 : อัญรูปของสารโครงสร้างคาร์บอน (a) แกรฟีน (2 มิติ), (b) แกรไฟต์ (3 มิติ), (c) คาร์บอนนาโนทิวป์ (1 มิติ) และ (d) ฟลูเลอร์รีน (0 มิติ) [6]



ภาพที่ 2 : Electronic dispersion ของแลตทิซหกเหลี่ยมในแกรฟีน [7] ซึ่งมีแถบพลังงานของอิเล็กตรอนและโฮลสัมผัสกันที่จุด Dirac

มีสมการพลังงานที่อธิบายได้ด้วย

$$E(k_x, k_y) = \pm t \sqrt{1 + 4 \cos^2 \left(\frac{\sqrt{3}}{2} a_0 k_x \right) + 4 \cos \left(\frac{\sqrt{3}}{2} a_0 k_x \right) \cos \left(\frac{3}{2} a_0 k_y \right)} \quad (1)$$

เมื่อ $t (\approx 2.8 \text{ eV})$ คือพลังงาน hopping ระหว่างอะตอมคาร์บอนที่ใกล้ที่สุด และ $a_0 (\approx 1.418 \text{ \AA})$ เป็นระยะห่างระหว่างอะตอม C - C

ในเชิงปฏิบัติ มีรายงานวิจัยแสดงสมบัติต่างๆ สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ค่าความนำไฟฟ้าของแกรฟีนมีค่าต่ำสุดไม่เป็นศูนย์แม้ความหนาแน่นของประจุไฟฟ้าเป็นศูนย์
2. ปรากฏการณ์ควอนตัมฮอลล์ในแกรฟีนเป็นแบบจำนวนเต็มครึ่ง สอดคล้องกับความสัมพันธ์ของพลังงานเชิงเส้นของอนุภาค Dirac อิเล็กตรอน
3. มวลไซโคลตรอน (Cyclotron mass, m_c) ของอนุภาคเฟอร์มิออนในแกรฟีน มีสภาพไร้มวล (Massless) สามารถอธิบายได้ด้วย

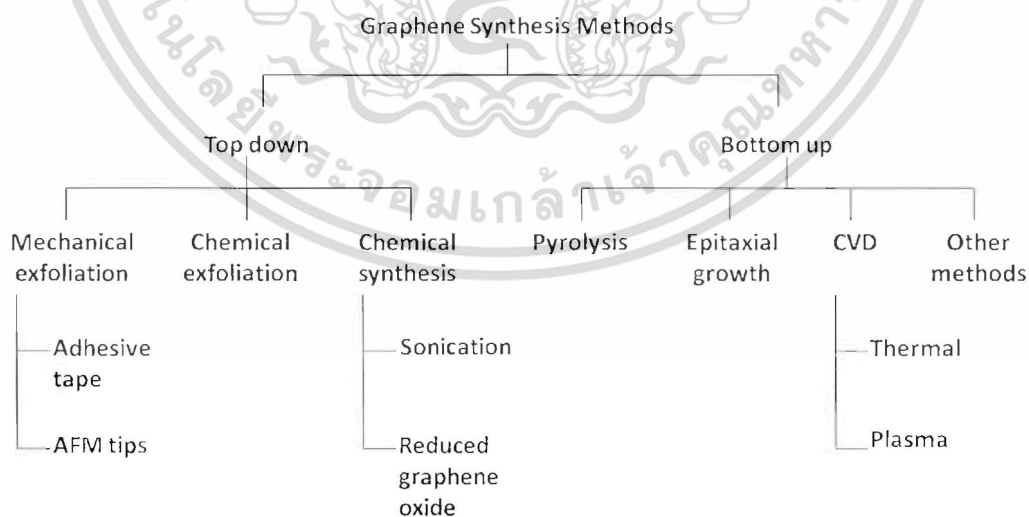
$$m_c = \frac{E_f}{v_F^2} \quad (2)$$

4. เกิดปรากฏการณ์ขัดแย้งของไคลน์ (Klein paradox) กล่าวคืออนุภาคพาหะในแกรฟีนสามารถเคลื่อนที่ทะลุผ่านกำแพงศักย์ได้ 100% เมื่ออนุภาคพาหะนั้นตกกระทบกำแพงศักย์ที่มีมุมศูนย์ แตกต่างจากอนุภาคพาหะในวัสดุสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นๆ ซึ่งจะเกิดการสะท้อนพลังงานขณะที่เคลื่อนที่ทะลุผ่านกำแพงศักย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ยังมีสมบัติอื่นๆ ที่น่าสนใจและสำคัญต่อการประยุกต์ใช้ เช่น มีความเข้มข้นของตัวนำพาหะสูงอยู่ในระดับ 10^{13} cm^{-2} มีความยาวคลื่นเฟอร์มิ $\lambda_F \approx 50\text{-}100 \text{ nm}$ ระยะทางอิสระเฉลี่ย (Mean free path) $\sim 400 \text{ nm}$ มีการนำความร้อนสูง แต่สภาพต้านทานต่ำ ซึ่งน้อยความของเงินที่อุณหภูมิห้อง และอันตรกิริยาระหว่างสปินของการเคลื่อนที่ของตัวนำพาหะ (spin-orbit coupling) ต่ำ จึงคาดว่าแกรฟีนจะถูกนำมาใช้เพื่อทดแทนซิลิกอนในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน ไม่ว่าจะเป็นเซนเซอร์ โซลาร์เซลล์ ทรานซิสเตอร์ เป็นต้น โดยเฉพาะไม่ใคร่ชอบในคอมพิวเตอร์ ทั้งยังเพิ่มประสิทธิภาพให้แก่อุปกรณ์เหล่านั้น ในแง่ของความเร็วที่เพิ่มขึ้น ลดการสูญเสียพลังงาน และราคาถูก

ในการสังเคราะห์แกรฟีน [8] สามารถทำได้หลายวิธีซึ่งสรุปได้ดังภาพที่ 3 แบ่งตามกระบวนการสังเคราะห์วัสดุนาโน คือ กระบวนการสังเคราะห์แบบบนลงล่าง (Top-down) และแบบล่างสู่บน (Bottom-up) ในกระบวนการสังเคราะห์แบบบนลงล่างแบ่งเป็นการลอกแผ่นแกรฟีนโดยตรง เช่น ใช้สก็อตเทปลอกแผ่นแกรฟีนจากแกรไฟต์บริสุทธิ์ การใช้เข็ม AFM ลอกแผ่นแกรฟีนออกมา และการสังเคราะห์ทางเคมี เช่น การ Sonication หรือการสั่นด้วยเสียงความถี่สูง และการรีดิวซ์จากแกรฟีนออกไซด์ ส่วนกระบวนการสังเคราะห์แบบล่างสู่บน ได้แก่ กระบวนการไพโรไลซิส การปลูกฟิล์มบางแกรฟีนแบบผลึกเดี่ยว การปลูกฟิล์มบางแกรฟีนด้วยไอระเหยทางเคมี เป็นต้น ซึ่งวิธีการสังเคราะห์แบบล่างสู่บนจะเป็นวิธีที่ซับซ้อนยุ่งยาก ต้องใช้เครื่องมือชั้นสูง แต่ให้ปริมาณของแกรฟีนจำนวนมาก ส่วนใหญ่จะทำในระดับอุตสาหกรรม ส่วนกระบวนการสังเคราะห์แบบบนลงล่างสามารถทำได้ง่ายกว่า สามารถทำในระดับห้องปฏิบัติการและงานวิจัยได้

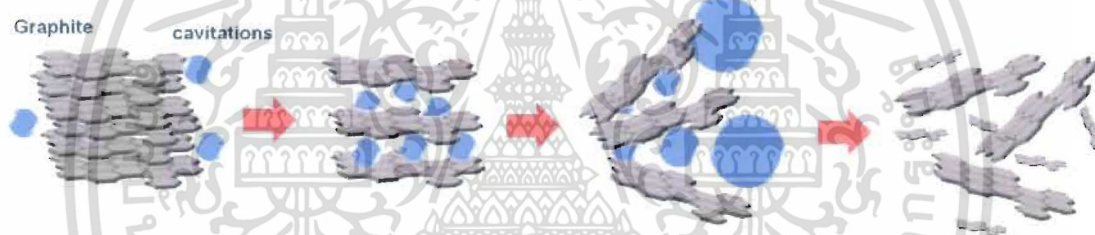


ภาพที่ 3 :แผนภาพแสดงวิธีการสังเคราะห์แกรฟีน[8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1 การสังเคราะห์แกรไฟีนด้วยวิธี Sonication

วิธี Sonication หรือการใช้คลื่นเสียงที่มีความเข้มสูงช่วยในการสังเคราะห์แกรไฟีน [9-14] เนื่องจากคลื่นเสียงสามารถเดินทางผ่านไปในตัวกลางที่เป็นของเหลวหรือสารละลายได้ ถ่ายทอดพลังงานให้แก่ของเหลวทำให้มีการเปลี่ยนแปลงความดันส่วนอัด (compression) และส่วนขยาย (rarefaction) จึงเกิดฟองสุญญากาศขนาดเล็กในของเหลวจำนวนมาก โดยเฉพาะบริเวณส่วนอัดซึ่งมีความดันสูง เรียกว่า Cavitation และเกิดการระเบิดของฟองอากาศในเวลาต่อมา โดยปกติ cavitation หรือจุดความร้อนขนาดเล็กๆ นี้ จะมีอุณหภูมิสูงมากถึง 5,000 K และอาจมีความดันถึง 2,000 atm ขึ้นอยู่กับความถี่หรือพลังงานของคลื่นเสียง ซึ่งการระเบิดดังกล่าวสามารถทำให้โมเลกุลของเหลวมีความเร็วถึง 280 m/s [10] ภาพที่ 4 แสดงกระบวนการลอกแผ่นแกรไฟีนจากแกรไฟต์ด้วยวิธีการ Sonication ซึ่งเกิดฟองอากาศขนาดเล็กหรือ cavitation และแรงระเบิดที่มากกว่าแรงแวนเดอร์วาลส์ ทำให้สามารถลอกชั้นของแกรไฟีนออกได้ ปรากฏการณ์นี้นำมาใช้ในทาง Sonochemistry ทำอันตรกิริยาระหว่างพลังงานกับสารด้วยจุดความร้อนที่เกิดขึ้นภายในฟองอากาศขนาดเล็ก เมื่อมีการลดอุณหภูมิด้วยอัตรา $>1,010$ K/s ซึ่งใช้สำหรับการสังเคราะห์อนุภาคระดับนาโนได้ [11]



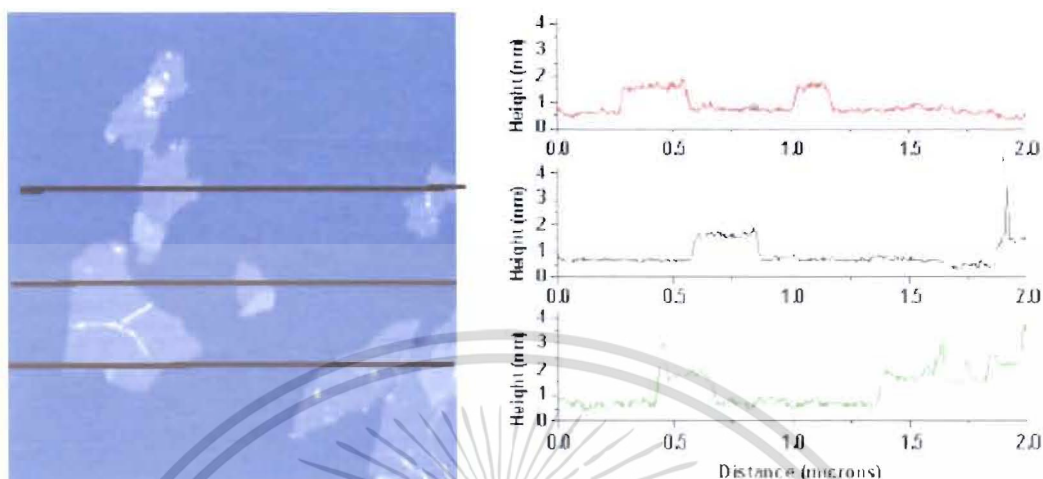
ภาพที่ 4 : แผนภาพแสดงวิธีการสังเคราะห์แกรไฟีนด้วยวิธี Sonication

สำหรับการเตรียมแกรไฟีน การใช้คลื่นเสียงเป็นวิธีทางเลือกหนึ่งที่สามารถให้ผลแผ่นแกรไฟีนค่อนข้างใหญ่ และเป็นวิธีที่ง่าย สังเคราะห์ได้ในปริมาณมาก ซึ่งได้มีการพัฒนาโดยสังเคราะห์ในสารละลายต่างๆ เช่น กรดอินทรีย์ แอลกอฮอล์ น้ำ และมีการฉายแสงเพื่อเพิ่มพลังงานให้แก่โมเลกุลทำให้สามารถแยกชั้นของแกรไฟีนออกจากแกรไฟต์ได้ดีขึ้น

มีรายงานการวิจัยได้เสนอถึงการใช่วิธี Sonication ในการสังเคราะห์แกรไฟีนจากแกรไฟต์ในรูปแบบของสารละลาย โดยใช้ตัวทำละลายที่มีค่าพลังงานผิว (Surface energy) ตรงกับของแกรไฟีน เช่น N-methyl-pyrrolidone (NMP) [12] ทำให้ได้ชั้นของแกรไฟีนที่หลุดลอกออกมาเป็นชั้นที่บางมาก และกระจายตัวได้ดีมาก แต่ Lotya [13] ได้แสดงให้เห็นว่าชั้นของแกรไฟีนสามารถถูกลอกได้ในน้ำ และกระจายตัวได้ดีเช่นเดียวกัน เมื่อมีการใช้สารลดแรงตึงผิว (Surfactant) ภายใต้วิธี Sonication แกรไฟีนจะกระจายตัวอยู่ในรูปของสารละลาย ซึ่งง่ายต่อการนำไปผสมหรือคอมโพสิตกับสารชนิดอื่น เช่น อนุภาคนาโนของโลหะ โพลีเมอร์ เป็นต้น

Stankovich *et al.* [14] สังเคราะห์แกรไฟีนด้วยการลอกภายใต้คลื่นเสียงความถี่สูง (Ultrasonication) ภาพที่ 5 แสดงภาพจาก AFM ในโหมด non-contact ของแผ่นแกรไฟีน ออกไซด์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการศึกษาค้นคว้า เมื่อผู้ดูแลเห็นประโยชน์ด้านการศึกษาไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ถูกลอกด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงนี้ ที่ความเข้มข้น 1 mg/mL ในน้ำ แสดงความหนา ~1 nm อย่างสม่ำเสมอทุกแผ่น

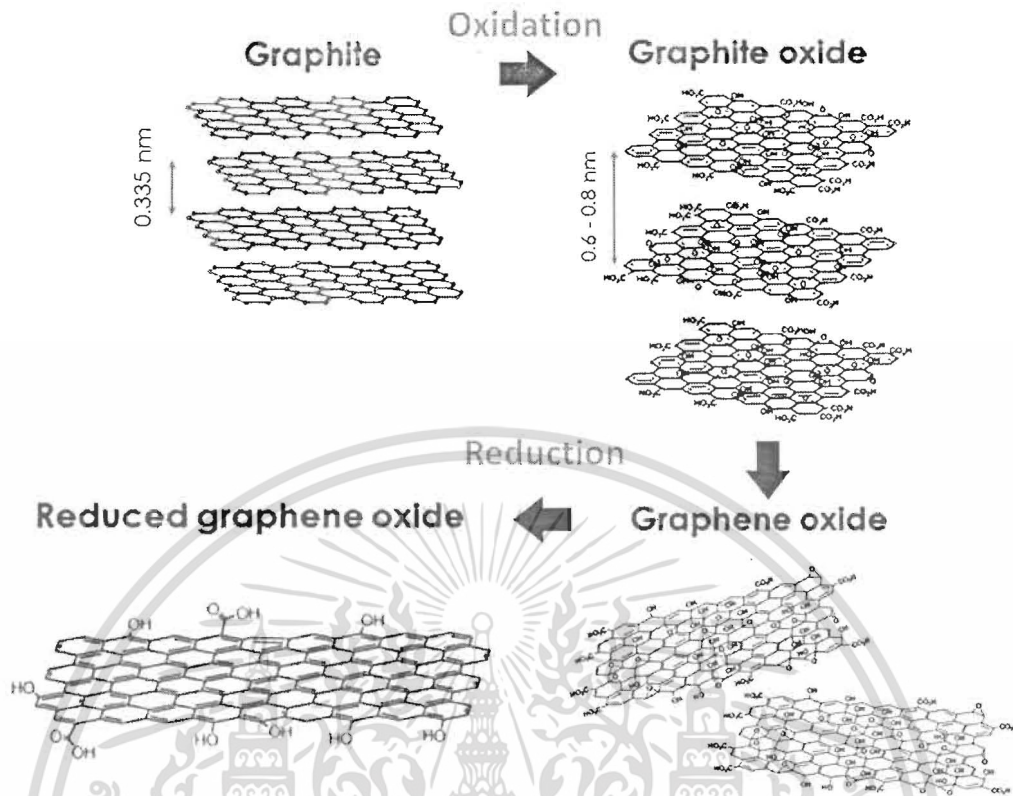


ภาพที่ 5 : ภาพจาก AFM โหมด non-contact ของแผ่นแกรไฟีนออกไซด์และความหนาที่ตำแหน่งต่างๆ[14]

2.1.2 การสังเคราะห์แกรไฟีนด้วยวิธีรีดักชันจากแกรไฟีนออกไซด์

แกรไฟีนออกไซด์ (Graphene oxide) เป็นแกรไฟีนที่มีการดัดแปลงทางเคมี (Chemically modified graphene) เติร์มจากกระบวนการปฏิกิริยาออกซิเดชันของแกรไฟต์ และลอกเป็นชั้นเดี่ยวของแกรไฟีน ซึ่งสัดส่วนของปริมาณอะตอมของคาร์บอนต่อออกซิเจน (C/O) น้อยกว่า 3.0 และสัดส่วนที่ต่ำที่สุดมีค่าใกล้เคียง 2.0 [15-16] ภาพที่ 6 แสดงโครงสร้างแผ่นคาร์บอนในกระบวนการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันของแกรไฟต์ด้วยการทำปฏิกิริยากับกรดแก่[16] จากแบบจำลองของ Lefc - Klinowski [19] แสดงหมู่ออกไซด์แทรกระหว่างชั้นของแกรไฟต์หรือบนผิวของแผ่นแกรไฟต์ โดยเฉพาะกลุ่ม 1,2-epoxides และ hydroxyl ส่วนบริเวณขอบจะมีกลุ่ม carboxyl และ hydroxyl เกาะเป็นส่วนใหญ่ และอาจมี 5- และ 6-membered lactols [20] ทำให้ d-spacing จาก 0.335 nm ขยายถึง 2-3 เท่า เรียกว่า กราไฟต์ออกไซด์ (Graphite oxide) จากนั้นสามารถแยกชั้นของแกรไฟต์ออกไซด์ในน้ำหรือในตัวทำละลายเป็นชั้นเดี่ยวเรียก แกรไฟีนออกไซด์ (Graphene oxide) เมื่อทำปฏิกิริยารีดักชันกับ hydrazine hydrate (N_2H_4) จะได้รีดิวซ์แกรไฟีนออกไซด์ (Reduced graphene oxide) ซึ่งหมู่ออกไซด์ส่วนใหญ่ที่อยู่บริเวณผิวของแผ่นแกรไฟีนหลุดออก อาจมีหลงเหลือตามขอบบ้าง อย่างไรก็ตาม การทำรีดักชันสามารถทำได้ด้วยการให้อุณหภูมิสูง [4] เพื่อกำจัดออกซิเจนที่สร้างพันธะกับกลุ่ม aromatic carbon, การใช้คลื่นไมโครเวฟ, การใช้แสงเป็นต้น [19-20]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 6 แสดงโครงสร้างแผ่นคาร์บอนในกระบวนการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันของมีหมู่ออกไซด์แทรกระหว่างชั้นของแกรไฟต์เรียก แกรไฟต์ออกไซด์ จากนั้นลอกชั้นของแกรไฟต์ออกไซด์ในน้ำหรือในตัวทำละลาย ชั้นเดียวที่หลุดออกมาเรียก แกรฟีนออกไซด์ เมื่อทำปฏิกิริยารีดักชันกับ hydrazine hydrate (N_2H_4) จะได้รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ [16-19]

2.2 การประยุกต์ใช้ทางแสงและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 การดูดซับแสงของแกรฟีน (Optical absorption)

การดูดซับแสงของแกรฟีน (Optical absorption) เป็นผลจากโครงสร้างไฮบริดไดเซชัน sp^2 ของแกรฟีน ซึ่งมีอิเล็กตรอนอิสระในออร์บิทัล p_z ของอะตอมคาร์บอนใน sublattice รั้งฝั่ง (ภาพที่ 2) ออร์บิทัลที่ overlap ของสถานะ π และ π^* นี้ทำให้เกิดสมบัติต่างๆที่เฉพาะตัวโดยเฉพาะด้านแสงและการตอบสนองต่อแสง แกรฟีนสามารถตอบสนองต่อแสงได้ในช่วงกว้างตั้งแต่อินฟราเรดไกลถึงอัลตราไวโอเล็ต ดังนี้ [21-22]

1. ช่วงอินฟราเรดไกล (Far-infrared) การตอบสนองทางแสงเป็นผลมาจากอิเล็กตรอนอิสระย้ายสถานะในแถบพลังงานเดียวกัน (intraband transition) สามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองของ Drude [22] ถึงพฤติกรรมเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนในแกรฟีนเหมือนดิแรกเฟอร์มิออนไร้มวล (Massless Dirac fermions) พบว่าค่าสภาพนำไฟฟ้า (Conductivity) ขึ้นอยู่กับความถี่ (Drude-like frequency dependence) และเพิ่มขึ้นอย่างมากที่ความถี่ระดับ THz ค่า Drude weight (D) สำหรับ electron-hole ที่สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3) เกิดความไม่สมมาตร

เอกซอสาร์เป็นเอกซอสาร์ที่ใช้สำหรับใช้งานที่ความเร็วสูงและมีความทนทานสูงซึ่งไม่เหมือนกับวัสดุคาร์บอนธรรมดาไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$D = \frac{v_f \cdot e^2}{\hbar} \sqrt{\pi |n|} \quad (3)$$

เมื่อ $v_f = 1.1 \times 10^6 \text{ m/s}$ เป็นความเร็วเฟอร์มิ

$|n|$ เป็นความหนาแน่นอนุภาคพาหะ

และละเว้นผลเนื่องจากอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอน-อิเล็กตรอน นอกจากนี้ยังพบว่า สามารถควบคุมการตอบสนองต่อแสงในช่วงอินฟราเรดไกลของอนุภาคพาหะในแกรฟีนได้ด้วยการกระตุ้นพลาสมอน (Plasmonic excitation)

2. ช่วงอินฟราเรดกลาง-ใกล้ (Mid- to Near- infrared) การดูดซับแสงในช่วงนี้ไม่ขึ้นอยู่กับความถี่และค่อนข้างมีค่าคงที่ประมาณ สมบัติทางแสงสามารถควบคุมได้ด้วย electrostatic gate ซึ่งทำให้ค่าพลังงานเฟอร์มิเกิดการ shift และเหนี่ยวนำให้เกิด Pauli blocking (สถานะของอิเล็กตรอนถูกบรรจุเต็ม จนอิเล็กตรอนอิสระไม่สามารถเข้ามาเติมได้อีกจึงไม่เกิดการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอน)

3. ช่วงอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet) เป็นการตอบสนองในสเปกตรัมรูปอานม้าหรือจุดที่มีลักษณะเป็น singularity (ภาพที่ 2) ของแกรฟีน ซึ่งเป็นพฤติกรรมเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงอาจทำให้เกิดเอกซิตอน (Excitonic effect)

2.2.2 การศึกษาทางแสงจาก Photoluminescence

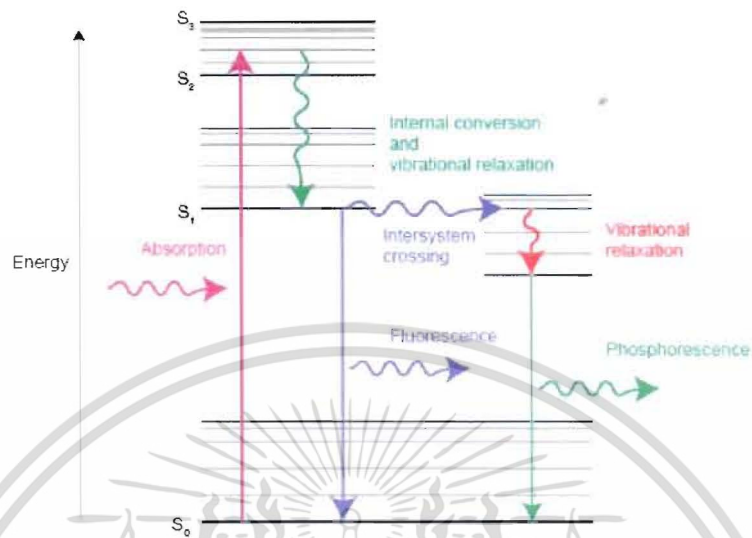
การเปล่งแสง (Luminescence) เป็นการปล่อยแสง (Emission) ของสสารซึ่งเป็น cold body radiation คือไม่ได้เกี่ยวข้องกับการปล่อยความร้อน การเปล่งแสงนี้มีอยู่หลายชนิดขึ้นอยู่กับพลังงานที่ใช้กระตุ้น (Excitation energy) กล่าวคือ [\[en.wikipedia.org\]](http://en.wikipedia.org) Chemiluminescence (CL) เป็นการปล่อยแสงที่เกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาทางเคมี ทำให้โมเลกุลของสสารถูกกระตุ้นอยู่ในสภาวะ intermediate [0] เช่น ปฏิกิริยาของลูมินอลกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เกิด vibronic (3-APA, [0]) ในสภาวะ intermediate ซึ่งถูกกระตุ้นขึ้นไปสถานะ fluorescing เมื่อมีการคายพลังงานออกมาขณะลดสถานะลงมาชั้นที่ต่ำกว่า เกิดผลิตภัณฑ์เป็น 3-aminophthalate (3-APA) จึงมีการปล่อยแสงออกมา



Crystalloluminescence (XTL) เป็นการปล่อยแสงระหว่างกระบวนการ crystallization เช่น การเกิดผลึกของ certain salt ในเฟสของของเหลว แต่ยังไม่มีการอธิบายการเกิดปรากฏการณ์ที่แน่ชัดได้ Electroluminescence (EL) เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นทั้งทางแสงและทางไฟฟ้า ซึ่งวัสดุเช่น สารกึ่งตัวนำ อิเล็กตรอนและโฮลอาจจะถูกแยกกันในรอยต่อ p-n เมื่อมีการกระตุ้นจากอิเล็กตรอนในกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านหรืออยู่ในสนามไฟฟ้าความเข้มสูง จะปลดปล่อยแสงหรือโฟตอนออกมา ซึ่งนำมาใช้ทำเป็นหน้าจอต่างๆ (สาร phosphors) หรือ LED

Photoluminescence (PL) เป็นปรากฏการณ์ปลดปล่อยแสงซึ่งถูกกระตุ้นด้วยโฟตอนหรือเป็นการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า หรือเรียกว่าเป็นการปล่อยแสงโดยกระตุ้นด้วยแสงนั่นเอง ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

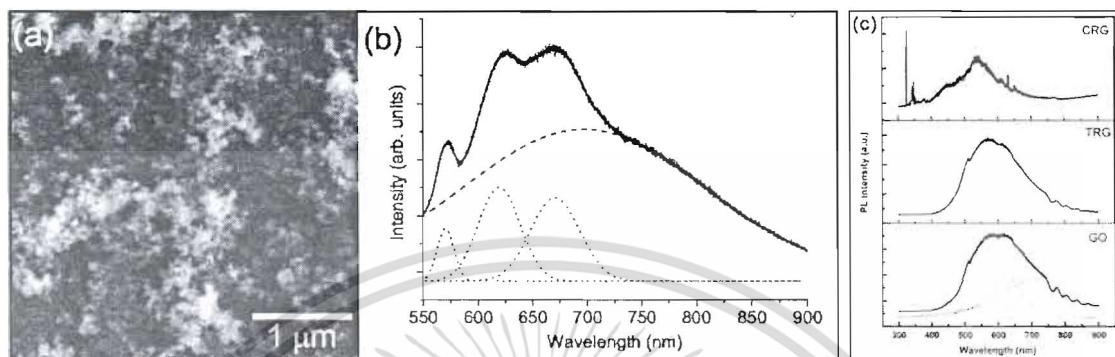
ปรากฏการณ์ปล่อยแสงที่เกิดขึ้นแสดงดังภาพที่ 7 แบ่งออกเป็น การวาวแสง (Fluorescence) และการเรืองแสง (Phosphorescence) ทั้งสองปรากฏการณ์ต่างกันที่กระบวนการกลับมาสู่สถานะพื้น



ภาพที่ 7: แผนภาพพลังงานแสดงการดูดกลืนโฟตอนและกระบวนการต่างๆที่เกี่ยวกับการปล่อยแสงย่านฟลูออเรสเซนซ์และฟอสฟอเรสเซนซ์[www.renishaw.com]

PL ในวัสดุโครงสร้างนาโนของอะมอร์ฟัสคาร์บอน มีรายงานว่าเกิดขึ้นเนื่องจากรวมกันของอิเล็กตรอนและโฮลใน band-tail state โดยคริสเตอร์ของ sp² Henley, *et al.* [23] แสดงให้เห็นถึงการปล่อยแสงในสเปกตรัม PL ที่อุณหภูมิ 6 K ออกมาในช่วงที่ตามองเห็นของอะมอร์ฟัสคาร์บอนในโครงสร้างระดับนาโนที่ไม่มีพันธะ (เนื่องจากเคยมีการศึกษาก่อนหน้านี้ว่าการเกิดพันธะกับไฮโดรเจนทำให้ค่า PL เพิ่มสูงขึ้น) ด้วยเลเซอร์แสงในการกระตุ้น ความยาวคลื่น 488 nm พบว่า peak ของการปล่อยแสงมีความ board ค่อนข้างมากและสามารถแยกออกเป็น peak ต่างๆกันกับการฟิตด้วยฟังก์ชัน Gaussian ที่ตำแหน่ง 575 nm มี peak ค่อนข้างชัดและที่ตำแหน่งราวๆ 700 nm ค่อนข้าง board เนื่องจากอิเล็กตรอนของคาร์บอนถูก localized และ polarized ในคริสเตอร์ของ sp² [23] นอกจากนี้ Cuong, *et al.* [24] ได้ศึกษาสมบัติเชิงแสงของแกรฟีนที่สังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีจากสเปกตรัมรามานและสเปกตรัม PL ซึ่งเสนอว่าทั้งสเปกตรัม PL ทั้งสามดังภาพที่ 8(c) ของ แกรฟีนออกไซด์ (GO) เปรียบเทียบกับของรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ด้วยสารเคมี (CRG) และด้วยความร้อนที่ 700°C (TRG) วัดด้วยเลเซอร์กระตุ้นความยาวคลื่น 325 nm มีความ board ค่อนข้างมากคล้ายกันกับของโครงสร้างนาโนอะมอร์ฟัสคาร์บอนและฟิตด้วยฟังก์ชัน Gaussian พบ peak ที่ตำแหน่งต่างๆ ได้แก่ 513, 559, 620 และ 689 nm ซึ่ง GO และ TRG มีความกว้างของ peak มากกว่าและมีความคล้ายกัน คาดว่าเป็นผลจาก disorder ในโครงสร้าง sp² และการ localize อิเล็กตรอนในแถบช่องว่างพลังงานโดยเฉพาะของ GO แต่เมื่อถูกรีดิวซ์และกำจัดหมู่ฟังก์ชันออกไซด์ต่างๆ ทำให้ช่องว่างพลังงานแคบลง จะเห็นชัดเจนในสเปกตรัมของ CRG อิเล็กตรอนมีพฤติกรรมเคลื่อนที่แบบ tunnel barrier ผ่านบริเวณรอยต่อของคริสเตอร์ จึงพบ blue-shift ปล่อยในช่วงแสง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ตามองเห็นได้ขึ้นอยู่กับปริมาณของ defect และขนาดของแผ่นคริสเตออร์ อย่างไรก็ตาม กลไกจริงๆ ของการปล่อยแสงในแกรฟีนยังคงไม่ชัดเจนเพราะปัจจัยในการทำรีดักชันแกรฟีนที่สังเคราะห์ด้วยวิธีเคมีนั้นมีผลต่อการควบคุมการเกิดช่องว่างพลังงาน



ภาพที่ 8: (a) ภาพ SEM ลักษณะฟิล์มอะมอร์ฟัสคาร์บอนซึ่งเป็นลักษณะของนาโนคริสเตออร์ [23] (b) สเปกตรัม PL ซึ่งใช้เลเซอร์กระตุ้นที่ความยาวคลื่น 488 nm และฟิตด้วยฟังก์ชัน Gaussian [23] (c) สเปกตรัม PL ที่อุณหภูมิห้องของรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์และแกรฟีนออกไซด์ [24]

เนื่องจากสมบัติทางแสงและอิเล็กทรอนิกส์ที่น่าสนใจของแกรฟีน จึงมีงานวิจัยมากมายที่นำแกรฟีนมาประยุกต์ใช้ในโฟโตนิกส์และออปโตอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งเป็นการประสานความโดดเด่นของสองสมบัติเข้าด้วยกัน ตัวอย่างเช่น โซลาร์เซลล์, ไดโอดเปล่งแสง, หน้าจอสัมผัส, อุปกรณ์ตรวจจับแสง และ ultrafast laser เป็นต้น [5]

1. ตัวนำโปร่งใส (Transparent conductors) เป็นอุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์นำมาใช้ใน จอสัมผัส ไดโอดเปล่งแสง โซลาร์เซลล์ จำเป็นต้องใช้วัสดุที่มีความต้านทานต่ำในขณะที่มีความโปร่งใสสูง ในปัจจุบันตัวนำโปร่งใสทำมาจากวัสดุสารกึ่งตัวนำ เช่น อินเดียมออกไซด์ (In_2O_3), ซิงค์ออกไซด์ (ZnO), ดีบุกออกไซด์ (SnO_2) เป็นต้น อินเดียมออกไซด์เจือดีบุก (ITO) [25-26] เป็นวัสดุสารกึ่งตัวนำชนิด n-type ประกอบด้วย 90% In_2O_3 และ 10% SnO_2 สมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงของ ITO เป็นผลมาจาก impurities อะตอมดีบุกเป็น n-type donor สามารถดูดซับแสงเนื่องจากการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนในแถบพลังงานเดียวกัน มีการกระเจิงของอิเล็กตรอนอิสระจากอะตอมของดีบุก ซึ่งเป็นผลจาก grain boundary ที่ระดับพลังงานต่ำๆ โดยทั่วไป ITO มีค่าการส่องผ่านแสง $T = 80\%$ ที่ความยาวคลื่น 550 nm และมีค่าความต้านทานต่ำ $R_s \sim 10 \ \Omega / \square$ บนกระจก และ $R_s \sim 60 - 300 \ \Omega / \square$ บน อย่างไรก็ตาม polyethylene terephthalate/ITO นั้นมีราคาแพง เนื่องจากอินเดียมกระบวนการผลิตที่ซับซ้อน การสร้าง pattern ที่ยุ่งยาก และการตอบสนองได้ทั้งในสภาพที่เป็นกรดและสภาพทั่วไป นอกจากนี้ การนำ ITO มาใช้ในจอสัมผัสโค้งงอได้ อาจเกิดปัญหาการแตกหัก รวมไปถึงอุปกรณ์ตัวนำไฟฟ้าโปร่งใสต่างๆ ต้องมีการพัฒนาควบคู่ไปด้วย เช่น กรดโลหะ เส้นลวดนาโนโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับงานวิจัยเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
จึงคาดว่าวัสดุคาร์บอนอย่างแกรฟีนและคาร์บอนนาโนทิวป์จะถูกนำมาทดแทนในอนาคต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Wu *et al.* [27] ได้เริ่มต้นการเตรียมฟิล์มแกรฟีนออกไซด์ตัวนำโปร่งใส (Graphene oxide-based transparent conductive films, GOTCFs) แต่เนื่องจากความเป็นฉนวนของแกรฟีนออกไซด์ จึงทำรีดักชันด้วย dimethylhydrazine และให้ความร้อน ช่วยเพิ่มความนำไฟฟ้าจาก $R_s = 4 \text{ M}\Omega/\square$ เหลือเพียง $R_s = 800 \Omega/\square$ ที่ค่าการส่องผ่าน $T = 82\%$

Blake *et al.* [28] รายงานแกรฟีนตัวนำโปร่งใส (Graphene-based transparent conductive films, GTCFs) ที่ดีที่สุด ณ ตอนนี้อยู่ ซึ่งเตรียมด้วยวิธีการกรองสุญญากาศและให้ความร้อน ทำให้ได้ค่าความต้านทาน $R_s = 5 \text{ k}\Omega/\square$ ที่ค่าการส่องผ่าน $T = 90\%$ การที่ค่าความต้านทานยังคงสูงอยู่เมื่อเทียบกับของ ITO เป็นเพราะแกรฟีนที่สังเคราะห์ได้มีขนาดเล็กๆ และเป็นการ assembly กันของแผ่นเล็กๆเหล่านั้น และพบว่าค่าความต้านทานลดลงเมื่อแผ่นแกรฟีนมีขนาดใหญ่ขึ้น แต่ค่าการส่องผ่านลดลง

2. โซลาร์เซลล์ (Photovoltaic devices) หรือโฟโตโวลเทอิกเซลล์ เป็นอุปกรณ์ที่แปลงพลังงานแสงให้เป็นพลังงานไฟฟ้า ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานหาได้จาก

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{inc}} \quad (4)$$

เมื่อ $P_{\max} = V_{OC} \times I_{SC} \times FF$

P_{inc} เป็นพลังงานตกกระทบ

I_{SC} เป็นกระแส short-circuit สูงสุด

V_{OC} เป็นแรงดัน open-circuit สูงสุด

$FF = (V_{\max} \times I_{\max}) / (V_{OC} \times I_{SC})$

ปัจจุบันเทคโนโลยีโซลาร์เซลล์มักใช้ซิลิกอนเป็นส่วนหลัก มีประสิทธิภาพ 25.6% ซึ่งรายงานว่าการพัฒนาโดยใช้ perovskite/silicon multijunction ขนาด 1 cm^2 ให้ค่าสูงถึง 1.65 V [29] นอกจากนี้ยังมีการใช้โพลิเมอร์นำไฟฟ้ามาทำเป็น Organic photovoltaic cells ซึ่งประกอบด้วยตัวนำไฟฟ้าโปร่งใส, ชั้น photoactive และขั้วไฟฟ้า การทำงานอาศัยหลักการของ charge transport เมื่อมีการดูดซับแสง แต่ยังให้ประสิทธิภาพที่ค่อนข้างต่ำ สำหรับโซลาร์เซลล์สีย้อมไวแสง จะใช้อิเล็กโทรไลต์เป็นตัวกลางนำไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วย photoanode เป็นนาโนคริสตัล มีรูพรุนสูงอย่าง TiO_2 และโมเลกุลสีย้อม เคลือบลงบนตัวนำไฟฟ้าโปร่งใส เมื่อแสงตกกระทบโมเลกุลสีย้อมจะถูกกระตุ้นทำให้เกิดคู่ electron-hole อิเล็กตรอนใน TiO_2 จะถูกกระตุ้นขึ้นไปในแถบนำไฟฟ้าและเคลื่อนที่ไปยัง counter-electrode ส่วนโมเลกุลสีย้อมจะคืนสภาพโดยการได้รับอิเล็กตรอนจากอิเล็กโทรไลต์ ปัจจุบัน ITO เป็นวัสดุที่มักนำมาทำเป็น photoanode และ cathode โดยเคลือบแพลทินัม

แกรฟีน ถูกนำมาพัฒนาในโฟโตโวลเทอิก เป็นตัวนำไฟฟ้าโปร่งใส, ขั้ว photoactive, ช่องทางสำหรับการเคลื่อนย้ายพาหะ และคะตะลิสต์ ภาพที่ 9 (a-c) แสดงโครงสร้างของโซลาร์เซลล์จากสารอินทรีย์, สารอินทรีย์ และสีย้อมไวแสง ตามลำดับ ที่มีการนำแกรฟีนมาใช้เป็นตัวนำโปร่งใส ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Wang *et al.* [30] ใช้ GTCFs จากกระบวนการสังเคราะห์ทางเคมีสร้างโซลาร์เซลล์มีประสิทธิภาพ 0.3% ส่วนโซลาร์เซลล์ที่ทำจากรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ มีประสิทธิภาพ 0.4% ความต้านทาน $R_s = 1.6 \text{ k}\Omega / \square$ แต่มีค่าการส่องผ่านต่ำเพียง 55% De Arco *et al.* [31] สังเคราะห์แกรฟีนด้วยวิธี Chemical vapor deposition (CVD) สำหรับเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใส พบว่าให้ความต้านทาน $R_s = 230 \Omega / \square$ และค่าการส่องผ่าน 72%

3. ไดโอดเปล่งแสงอินทรีย์ (Organic Light-emitting diode, OLED) จะมีชั้นของสารเปล่งแสง (Emissive layer) ระหว่างขั้วนำไฟฟ้า อย่างน้อยด้านหนึ่งต้องมีความโปร่งใส วัสดุดังกล่าวมีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีระดับชั้นพลังงาน 2 ชนิด ได้แก่ ชั้นพลังงานที่มีอิเล็กตรอนบรรจุอยู่เต็ม (Highest occupied molecular orbital, HOMO) และชั้นพลังงานว่างเปล่าที่ไม่มีอิเล็กตรอนบรรจุอยู่ (Lowest unoccupied molecular orbital, LUMO) เมื่อป้อนแรงดันขั้วไฟฟ้าทั้งสอง กระแสอิเล็กตรอนไหลจากขั้วลบ (cathode) ไปยังขั้วบวก (anode) โสไลจะเคลื่อนที่จากขั้วบวกเข้าไปใน HOMO ขณะที่อิเล็กตรอนจากขั้วลบจะเคลื่อนที่เข้าไปใน LUMO เกิดแรงทางไฟฟ้าทำให้อิเล็กตรอนและโฮลดึงดูดเข้าหากันและรวมตัวกันเป็นเอกซิตอนอยู่ในบริเวณใกล้ๆ สารเปล่งแสง เนื่องจากโฮลในโมเลกุลสารกึ่งตัวนำอินทรีย์สามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายกว่า ทำให้เกิดการสลดระดับชั้นพลังงานของอิเล็กตรอนและเกิดการคายพลังงาน แผลงสีออกมาในช่วงที่ตามองเห็น ซึ่งความถี่ของรังสีที่แผ่ออกมาขึ้นอยู่กับความกว้างของช่องว่างพลังงานหรือความแตกต่างระหว่างชั้น HOMO และ LUMO ของวัสดุนั่นเอง ดังนั้น OLED ที่มีประสิทธิภาพจะต้องมีค่า work function ของขั้วนำไฟฟ้าสอดคล้องกับความแตกต่างระหว่างชั้น HOMO และ LUMO ของสารเปล่งแสง OLED นี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในจอแสดงผลและคอมพิวเตอร์ กล้องดิจิทัล และหน้าจอของโทรศัพท์มือถือได้

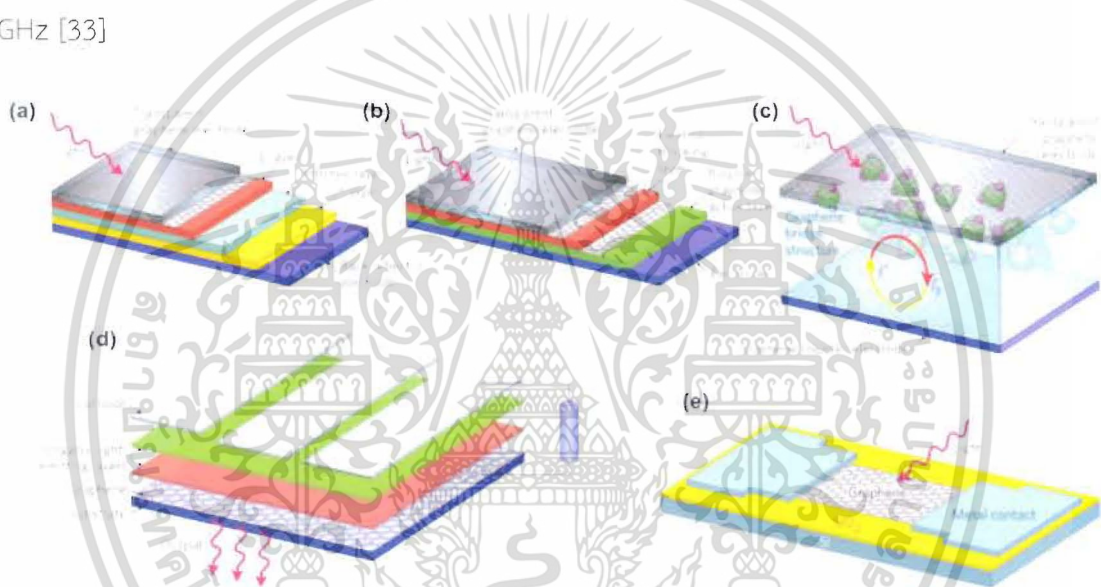
โดยทั่วไปจะใช้ ITO ซึ่งมี work function 4.4-4.5eV สำหรับเป็นฟิล์มนำไฟฟ้าโปร่งใส แต่มีข้อจำกัดที่ราคาค่อนข้างแพง และแตกหักได้เมื่อพัฒนาเป็นฟิล์มโค้งงอ นอกจากนี้ อินเดียมอาจจะแพร่เข้าไปในชั้น active ของ OLED ได้ ซึ่งจะปลดประสิทธิภาพของ OLED เมื่อเวลาผ่านไป ดังนั้นจึงมีการพัฒนา ค้นหาตัวนำไฟฟ้าโปร่งใสที่มีประสิทธิภาพคล้าย ITO หรือที่ดีกว่า และแกรฟีน ซึ่งมี work function 4.5eV มีความยืดหยุ่นได้ดีและราคาถูก คาดว่าจะนำมาทดแทน ITO ใช้เป็น TCFs ภาพที่ 9(d) เป็นโครงสร้างของ OLED ที่ใช้แกรฟีนขั้วไฟฟ้าโปร่งใสในส่วน anode [27]

4. อุปกรณ์ตรวจจับแสง (Photodetectors) เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดฟลักซ์โฟตอน หรือกำลังแสง แปลงมาจากพลังงานโฟตอนที่ดูดกลืนเป็นกระแสไฟฟ้า มักใช้ในพวกกรีโมทคอนโทรล โทรทัศน์ เครื่องเล่น DVD อาศัยหลักการคือ เมื่อแสงหรือโฟตอนมาตกกระทบที่บริเวณตรวจจับทำให้พาหะถูกกระตุ้นจากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบคอนดักชันเกิดการไหลของกระแสไฟฟ้า ช่วงของสเปกตรัมแสงที่สามารถตรวจจับได้ขึ้นอยู่กับารดูดกลืนแสงของวัสดุ ซึ่งสารกึ่งตัวนำที่ใช้กันในปัจจุบันมีข้อจำกัดอยู่ที่ช่วงความยาวคลื่นที่สามารถดูดกลืนได้ และไม่สามารถตรวจจับแสงที่มี

พลังงานตกกระทบต่ำกว่าช่องว่างพลังงานของวัสดุ แกรฟีนเป็นวัสดุที่สามารถดูดกลืนได้ในช่วงกว้าง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติให้หาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตั้งแต่อัลตราไวโอเลตถึงเทระเฮิรตซ์ ดังนั้น การนำแกรฟีนมาสร้างเป็นอุปกรณ์ตรวจจับแสง (Graphene-based photodetector, GPDs) ดังภาพที่ 9(e) สามารถตอบสนองได้ช่วงที่กว้างมาก มีสภาพความคล่องสูง จึงทำให้เป็นตัวตรวจจับแสงความเร็วสูง

มีรายงานวิจัยพบว่า อุปกรณ์ตรวจจับแสงที่ใช้แกรฟีนสามารถตอบสนองต่อแสงความยาวคลื่น 0.514, 0.633, 1.5 และ 2.4 μm [32] ซึ่งเกินคาด ก่อนหน้านี้ Xia *et al.* [33] รายงานผลการทดลองการตรวจจับแสงความเร็วสูง ได้ในสเปกตรัมช่วงกว้างของแกรฟีน โดยไม่มีการเสื่อมสภาพหรือการลดลงของสัญญาณต่อแสงที่มีความเข้มสูงถึง 40 GHz มี RC-limited bandwidth ~ 640 GHz และระยะเวลาตอบสนองต่อแสง (transit time) หรือเวลาที่ใช้ในการแปลงพลังงานแสงเป็น photocurrent ซึ่งเป็นข้อจำกัดของอุปกรณ์ตรวจจับแสงโดยทั่วไป ในแกรฟีนวัดได้มากกว่า 1,500 GHz [33]

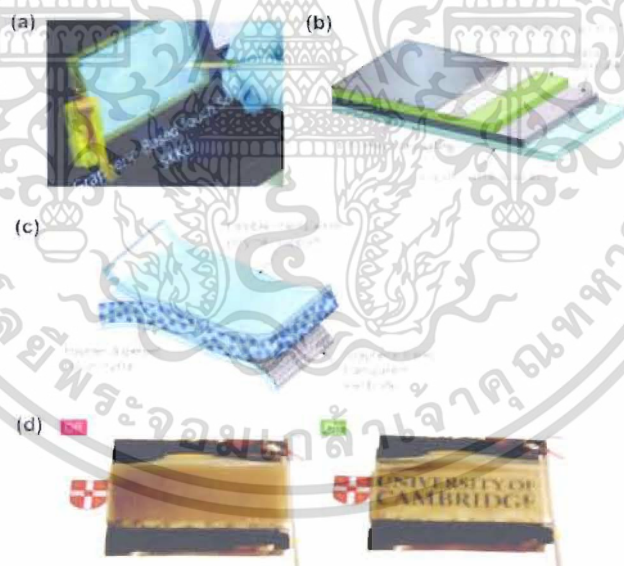


ภาพที่ 9: โครงสร้างของอุปกรณ์แกรฟีนออปโตอิเล็กทรอนิกส์ [5]: (a), (b), (c) โซลาร์เซลล์จากสารอินทรีย์, สารอินทรีย์ และสีย้อมไวแสง ตามลำดับ (d) ไดโอดเปล่งแสงสารอินทรีย์ (OLED) และ (e) อุปกรณ์ตรวจจับแสง

5. จอสัมผัส (Touch screens) ภาพที่ 10(a-b) แสดงโครงสร้างของจอสัมผัสที่สร้างโดยใช้แกรฟีน แบบ Resistive และแบบ Capacitive ตามลำดับ จอสัมผัสแบบ Capacitive ประกอบด้วยฉนวนที่เคลือบด้วย ITO เมื่อใช้นิ้วสัมผัสบนจอจะทำให้เกิดการบิดของสนามไฟฟ้าสถิต ซึ่งสามารถวัดได้ในรูปของการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้า และไม่จำเป็นต้องใช้แรงกดมากเท่ากับจอสัมผัสแบบ Resistive และแกรฟีนสามารถนำมาพัฒนาเพื่อลดต้นทุนได้ ส่วนจอสัมผัสแบบ Resistive ประกอบด้วยวัสดุรองรับที่เป็นตัวนำไฟฟ้า จอควบคุมผลึกเหลว และ TCF เมื่อกดลงบนหน้าจอสัมผัสจะเชื่อมต่อ TCF จุดที่สัมผัสจะถูกคำนวณเป็นค่าความต้านทาน จอสัมผัสแบบนี้มี 2 ชนิด คือ matrix และ analogue ชนิดแรก matrix จะเป็นขั้วไฟฟ้าที่มี pattern แต่ analogue ขั้วไฟฟ้าโปร่งใสจะเป็นแบบ non-pattern ซึ่งราคาถูกกว่า สำหรับ TCF จำเป็นต้องมีค่าความต้านทานของจอควบคุมเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$R \sim 500-2,000 \ \Omega/\square$ และค่าการส่องผ่าน $>90\%$ ที่ 550 nm ภาพที่ 10(b) แสดงหน้าจอสัมผัสที่สร้างขึ้นด้วยวิธี Screen-printing บนแผ่นแกรฟีน CVD เป็นลักษณะของจอสัมผัสแบบ analogue เมื่อมีการนำ GTCFs เข้ามาแทนที่ ITO สามารถแก้ไขข้อจำกัดในเรื่องความยืดหยุ่นที่มากกว่าสามารถโค้งงอได้ ต้นทุนที่ต่ำลง มีความทนทานต่อสภาพแวดล้อมสารเคมี

6. หน้าต่างอัจฉริยะโค้งงอได้ (Flexible smart windows) พลิกเหลวโพลิเมอร์ (Polymer-dispersed liquid crystal, PDLC) เป็นอุปกรณ์ที่ถูกพัฒนามาในช่วงปี 1980 ประกอบด้วยฟิล์มบางโพลิเมอร์โปร่งใสที่มีผลึกเหลวขนาดไมครอนบรรจุในรูพรุนของโพลิเมอร์ที่เป็นไอโซส เมื่อแสงผ่านเข้าไปในโพลิเมอร์ผลึกเหลวนี้อาจเกิดการกระเจิงแสงก่อตัวเป็นฟิล์มขุ่นขึ้นมา ถ้าหากมีการให้สนามไฟฟ้าแก่ PDLC ที่มีค่าดัชนีหักเหของผลึกเหลวใกล้เคียงกับของโพลิเมอร์ที่เป็นไอโซสจะกลายเป็นสถานะโปร่งใส สมบัติการเปลี่ยนสถานะจากทึบเป็นสถานะโปร่งแสงด้วยการใช้สนามไฟฟ้าเป็นสมบัติที่น่าสนใจในการนำมาประยุกต์ใช้เป็นหน้าต่างอัจฉริยะ โดยปกติแล้วจะใช้ ITO บนแก้วเป็นชั้นนำไฟฟ้าสำหรับจ่ายสนามไฟฟ้าให้แก่ PDLC แต่ด้วยข้อจำกัดของ ITO ให้กระจกที่มีค่าการส่องผ่าน 60-90% หรือสูงกว่า มีค่า $R \ 100-1,000 \ \Omega/\square$ ภาพที่ 10(d) แสดงผลการทำงานของโปรโตไทป์หน้าต่างอัจฉริยะที่สามารถโค้งงอได้ โดยใช้ GTCF แทน ITO และใช้วัสดุสารรองรับเป็น polyethylene terephthalate



ภาพที่ 10 :จอสัมผัสและหน้าต่างอัจฉริยะจากแกรฟีน [5] : (a) จอสัมผัสแบบ Resistive, (b) จอสัมผัสแบบ Capacitive, (c) โครงสร้างหน้าต่างอัจฉริยะแกรฟีน PDLC, (d) หน้าต่างอัจฉริยะแกรฟีน/คาร์บอนนาโนทิวป์ขณะ OFF และ ON

ฟิล์มบางแกรฟีนและวัสดุคอมโพสิต จึงเป็นแนวคิดในการประยุกต์ใช้ด้านโฟโตนิกส์และออปโตอิเล็กทรอนิกส์ คาดว่าจะมาทดแทน ITO และวัสดุตัวนำไฟฟ้าโปร่งใสอื่นๆ ในผลดีที่มีความยืดหยุ่นสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และราคาถูก นอกจากนี้มีการวิจัยนำแกรฟีนมาใช้ในงานด้าน nonlinear optics ระบบ Photosensitive และ Ultrafast laser



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 การเตรียมนาโนแกรไฟต์ด้วยวิธีSonication

3.1.1 วัสดุและวิธีการ

แกรไฟต์บริสุทธิ์ขนาด 0.7 - 2 mm (คาร์บอน >99.2%, ความชื้น<0.35%) จาก Graphene Supermarket, US เป็นวัสดุตั้งต้นในการเตรียมนาโนแกรไฟต์ในน้ำดีไอออนไนซ์ (Deionized water) ด้วยวิธี sonication ใช้คลื่นเสียงความถี่ 40 kHz (Elma) จากเครื่องโซนิเคชัน เป็นเวลา 120 ชั่วโมง ทำให้ชั้นของแกรไฟต์หลุดลอกออกเป็นแผ่นๆ ได้สารละลายสีดำของนาโนแกรไฟต์ (n-GP) กระจายตัวในน้ำโดยไม่ใช้สารเคมีใด ดังภาพที่ 11 (a)

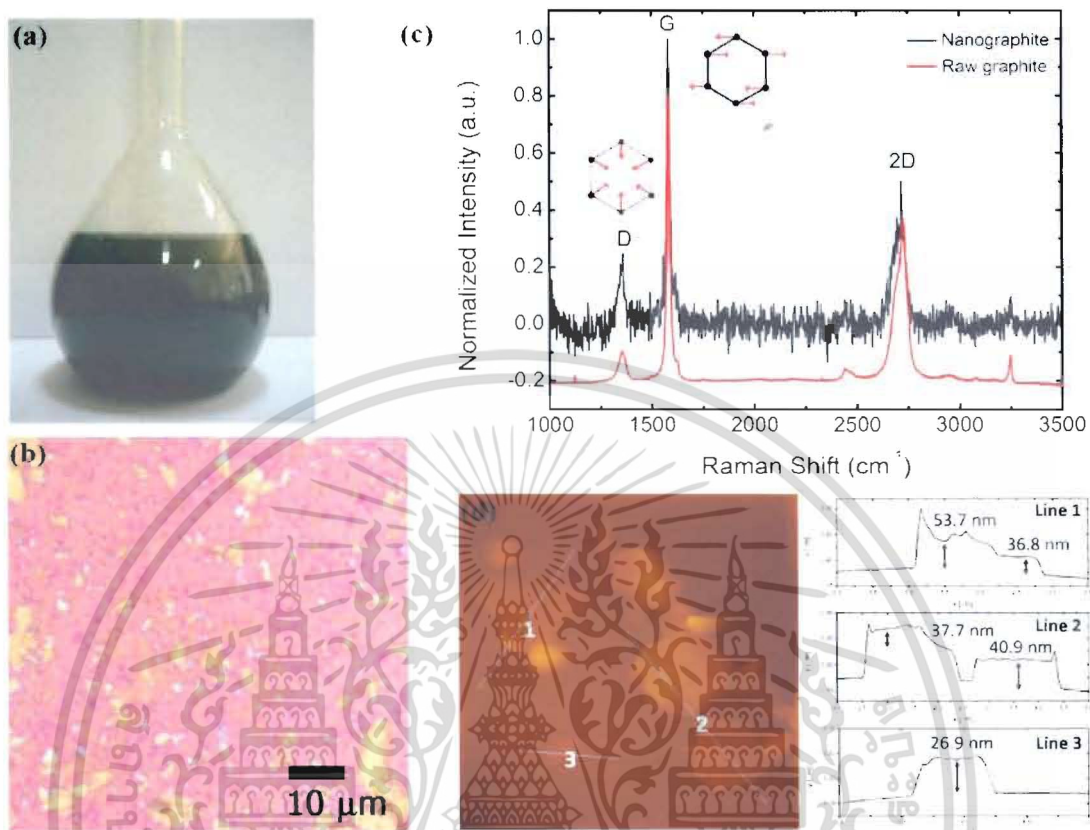
3.1.2 การวิเคราะห์สมบัติของวัสดุ

วัสดุนาโนแกรไฟต์ถูกเตรียมลงบน-Si/SiO₂ ที่มีออกไซด์ความหนาจำเพาะ 300 nm ด้วยวิธี dropped-deposition และอบที่อุณหภูมิ 50 °C ให้ฟิล์มแห้ง สามารถเห็นลักษณะสีฐานและจำแนกความหนาของนาโนแกรไฟต์ได้ด้วยตาเปล่าภายใต้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Olympus, BX60) ในโหมดสะท้อนแสง กำลังขยาย 1,000 เท่า ดังภาพที่ 11(b) พบชั้นบางๆ ของแกรไฟต์และมีลิตเลเยอร์แกรไฟต์ และมีการซ้อนทับกันมากมาเยื้องจากนาโนแกรไฟต์มีความเป็น hydrophobic จึงเกิดการเกาะกลุ่ม (aggregation) จับกันเองมากกว่ากระจายตัววัสดุสารรองรับซึ่งเห็นเป็นสีต่างๆ ที่เกิดจากการหักเหผ่านชั้นฟิล์มของวัสดุนาโนแกรไฟต์และชั้นออกไซด์ของซิลิกอนแล้วแทรกสอด [34] แสดงสีม่วงและสีฟ้าตามจำนวนชั้นของแกรไฟต์ที่เพิ่มขึ้น ส่วนแผ่นที่หนาจนเป็นระดับไมครอนแสดงสีขาว ส่วนวัสดุสารรองรับหรือซิลิกอนแสดงสีชมพู

การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของนาโนแกรไฟต์ที่ผ่านการโซนิเคชันด้วย DXR SmartRaman spectrometer (Thermo Scientific) ด้วยเลเซอร์กระตุ้นความยาวคลื่น 532 nm (2.33 eV) แสดงสเปกตรัมดังภาพที่ 11(c) เส้นสีดำเป็นสเปกตรัมรามานของนาโนแกรไฟต์เปรียบเทียบกับเส้นสีแดงซึ่งเป็นสเปกตรัมอ้างอิงของสารตั้งต้นแกรไฟต์ พบว่า D-peak เกิดที่ตำแหน่ง 1359.1 cm⁻¹ เป็นผลมาจากการเรโซแนนซ์สั่นแบบ breathing mode เนื่องจาก disorder ที่เพิ่มขึ้น อาจถูกฉีกขาดในระนาบขณะสังเคราะห์แบบโซนิเคชัน พบตำแหน่ง G-peak ที่ 1579.0 cm⁻¹ เนื่องจากการเรโซแนนซ์ของ E_{2g} mode ที่จุด ในสเปกตรัมพลังงานของแกรไฟต์ ทำให้พันธะทกเหลี่ยมเกิดการสั่นแบบ stretching mode ในโครงสร้างวงอะตอมคาร์บอน sp² hybridization และ 2D-peak หรือ G'-peak เกิดที่ตำแหน่ง 2716.8 cm⁻¹ เป็น disordered mode อันดับสองในวัสดุนาโนคาร์บอน สัดส่วนความเข้มรามาน I_D/I_G มีค่าเท่ากับ 0.25 แสดงถึงความไม่สมบูรณ์ที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับสารตั้งต้น และสัดส่วนความเข้มรามาน I_{2D}/I_G มีค่าเท่ากับ 0.50 มีความเป็นไปได้ว่าสารที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สังเคราะห์ได้ซึ่งเป็นการปะปนรวมกัน (assembly) ของหลากหลายความหนาของแกรไฟีนและนาโนแกรไฟต์เหล่านั้นซ้อนทับกันอย่างไม่เป็นระเบียบ



ภาพที่ 11 : (a) นาโนแกรไฟต์ในน้ำ DI เมื่อ sonicate เป็นเวลา 120 ชั่วโมง, (b) ภาพถ่ายจากกล้อง OM ของ (a) ที่เตรียมลงบน Si/SiO₂ wafer กำลังขยาย 1,000 เท่า, (c) แสดงสเปกตรัมรามานของนาโนแกรไฟต์ที่ผ่านการ sonication เปรียบเทียบกับของแกรไฟต์ที่ใช้เป็นสารตั้งต้น (d) ภาพ AFM แสดงความขึ้นนาโนแกรไฟต์และความหนา

การวัดความหนาและลักษณะโครงสร้างคาร์บอนในระดับอะตอมใช้เครื่อง Atomic Force Microscopy (AFM, SPI3800N) โหมด non-contact ซึ่งแสดงดังภาพที่ 11(d) พบว่า นาโนแกรไฟต์มีความหนาหลากหลาย <100 nm ส่วนใหญ่จะเกาะกลุ่มซ้อนทับกันดังแสดงในภาพ topograph บริเวณขนาด 7.5 μm x 7.5 μm

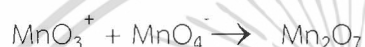
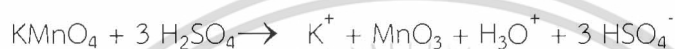
3.2 การเตรียมรีดิวซ์แกรไฟีนออกไซด์ด้วยวิธีทางเคมี

3.2.1 วัสดุและวิธีการ

การเตรียมแกรไฟีนด้วยวิธีทางเคมี ใช้วิธีการของฮัมเมอร์ (Hummers method) [16] สารเคมีที่ใช้เป็น analytical grade ทั้งหมด ได้แก่ กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 95-98% H₂SO₄ (QRc), โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต KMnO₄ (UNIVAR), โซเดียมไนเตรต NaNO₃ (UNIVAR) และ 30% ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ H₂O₂ (MERCK)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนการเตรียม ใช้ผงแกรไฟต์ 1.0 g ใส่ลงในกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 23.0 ml และตามด้วยโซเดียมไนเตรต 0.50 g ผสมกันในบีกเกอร์ที่แช่อยู่ในอ่างน้ำแข็งที่อุณหภูมิ 0°C จากนั้นค่อยๆเติมโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต 3.0 g ขณะนี้ จะเกิดปฏิกิริยาที่ทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้น ให้ควบคุมอุณหภูมิไม่ให้เกิน 20°C เมื่อนำอ่างน้ำแข็งออกอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นอีก ให้คุมอุณหภูมิอยู่ที่ 35°C สำหรับการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและ stir เป็นเวลา 30 นาที ขณะเกิดปฏิกิริยาสังเหตสีของสารผสมจะกลายเป็นสีเขียวอมน้ำตาล และอาจมีแก๊สพิษกลุ่ม NO_x ปล่อยออกมา โดยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตจะทำหน้าที่เป็นตัว oxidant (dihydroxylations) สารที่ได้จากปฏิกิริยาคือ diamanganeseheptoxide (Mn₂O₇) ดังสมการ [36]



ซึ่ง Mn₂O₇ จะเป็นตัวการสำคัญในการออกซิเดชันกับโครงสร้างของแกรไฟต์นั่นเอง กลายเป็นแกรไฟต์ออกไซด์ จากนั้นค่อยๆ เติมน้ำ DI 46 ml ซึ่งจะทำให้เกิดการปล่อยความร้อนออกมา (exotherm) ปริมาณมากทำให้อุณหภูมิอาจขึ้นไปสูงถึง 98°C ให้คุมอุณหภูมิด้วย heater ต่อไปเป็นเวลา 30 นาที สีจะเปลี่ยนจากสีเขียวอมน้ำตาลเป็นสีน้ำตาลเข้มและค่อยๆเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลเหลือง จากนั้นเจือจางด้วยน้ำ DI อีกครั้ง จำนวน 140 ml ให้อุณหภูมิลดลงประมาณ 10 นาที สุดท้ายเติม 3.0 ml ของ 30% H₂O₂ เพื่อรีดิวซ์เปอร์แมงกาเนตและแมงกานีสไดออกไซด์ที่ตกค้างอยู่ สารละลายแกรไฟต์ออกไซด์ที่ได้จะมีสีเหลืองน้ำตาลดังแสดงในภาพที่ 12(a) ปริมาตรสุทธิที่สังเคราะห์ได้ 212 ml แกรไฟต์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ถูกปรับค่า pH ให้เป็นกลางด้วยน้ำ DI และการกรองสุญญากาศ จากนั้นถูกแยกชั้นแกรไฟีนออกไซด์ด้วยวิธี sonication และทำให้แห้งเป็นลักษณะผงเพื่อนำมาใช้ต่อไป

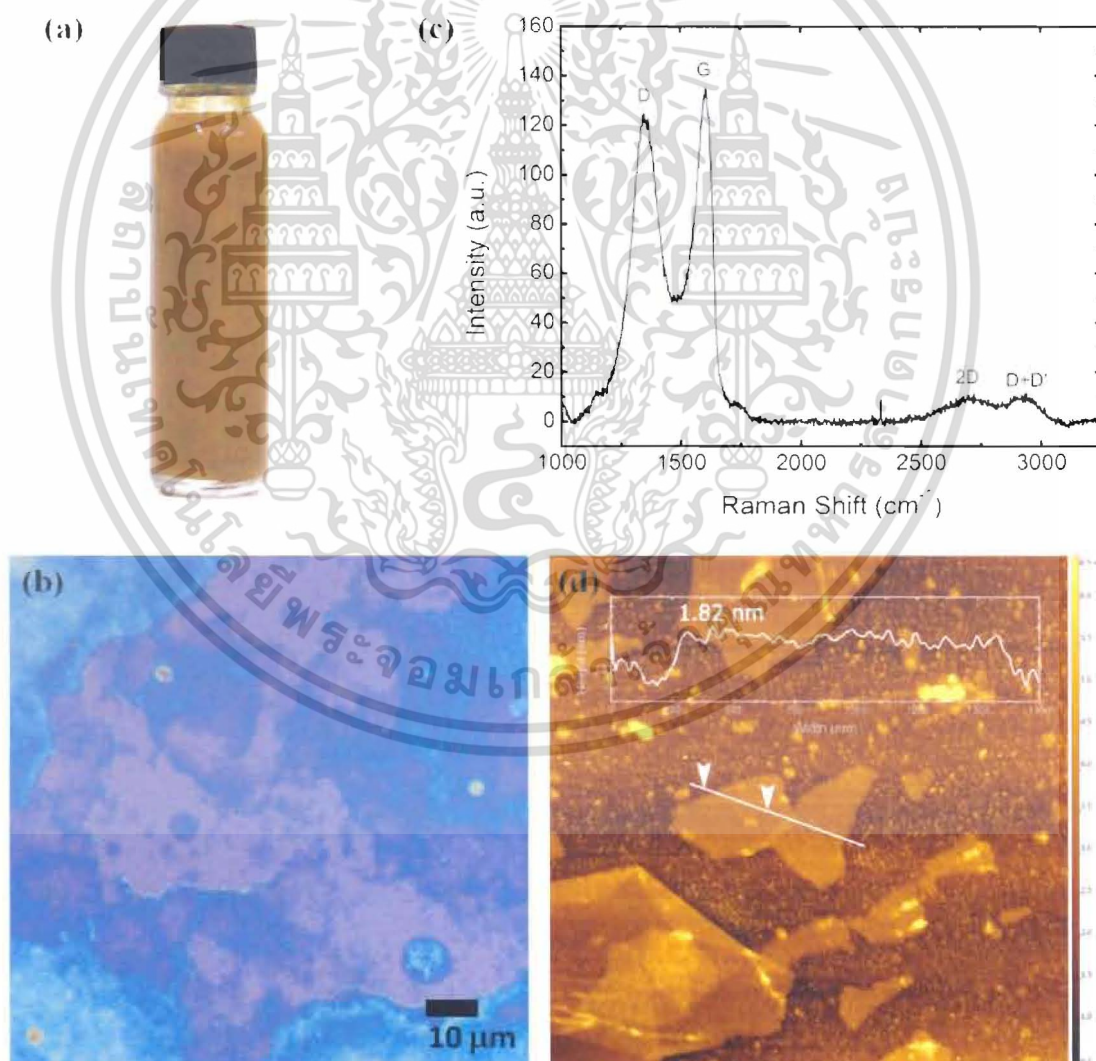
ผงแกรไฟีนออกไซด์ที่ได้ข้างต้น ถูกนำมาละลายน้ำด้วยความเข้มข้น 1 mg/ml เตรียมเป็นสารละลายแกรไฟีนออกไซด์ และใช้วิธีสเปรย์ไพโรไลซิสที่อุณหภูมิต่ำ 60°C เพื่อเคลือบฟิล์มแกรไฟีนออกไซด์ลงบน Si/SiO₂ จากนั้นการทำรีดักชันด้วยการให้ความร้อนด้วยการอบที่อุณหภูมิ 250°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ในบรรยากาศปกติ รีดิวซ์แกรไฟีนออกไซด์ที่ได้จากการผ่านกระบวนการทางความร้อนนี้เรียกว่า Thermally reduced graphene oxide (T-rGO)

3.2.2 การวิเคราะห์สมบัติของวัสดุ

ฟิล์มบางรีดิวซ์แกรไฟีนหลังจากที่การอบแสดงจากภาพ OM ดังภาพที่ 12(b) แสดงบริเวณชั้นบางๆ สีม่วงที่เชื่อมต่อเนืองกัน ซึ่งการสังเคราะห์และเตรียมด้วยวิธีนี้จะให้แกรไฟีนที่มีขนาดใหญ่และสามารถทำได้ในระดับอุตสาหกรรม ในส่วนบริเวณที่เป็นสีฟ้าจะมีความหนาหรือจำนวนชั้นของแกรไฟีนที่เพิ่มขึ้น การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะวิเคราะห์ด้วย DXR SmartRaman spectrometer (Thermo Scientific) ด้วยเลเซอร์กระตุ้นความยาวคลื่น 532 nm (2.33 eV) เช่นเดียวกันกับนาโนแกรไฟต์ แสดงสเปกตรัมดังภาพที่ 12(c) พบว่า D-peak และ G-peak เกิดที่ตำแหน่ง 1346.3 cm⁻¹ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ 1603.7 cm^{-1} ตามลำดับ ซึ่งกว้างกว่าของนาโนแกรไฟต์ โครงสร้างของรีดิวซ์แกรไฟีนออกไซด์ เป็นการฟื้นฟู network จากแกรไฟีนออกไซด์ที่มีหมู่ฟังก์ชันออกซิเจนตามผิวและขอบของแผ่นอะตอมคาร์บอน เมื่อออกซิเจนเหล่านั้นหลุดไปจึงทิ้งร่องรอย defect ไว้ ทำให้ไม่เป็นโครงสร้างรังผึ้งไม่สมบูรณ์ 2D-peak เกิดที่ตำแหน่ง 2700 cm^{-1} ซึ่งค่อนข้างต่ำ เป็นผลจาก double resonance ของ defect เช่นเดียวกัน และเกิดตำแหน่งของ D+D' ที่ 2931 cm^{-1} จากการรวมตัวกันของโฟนอนที่ถูกกระตุ้นด้วย defect มีค่าสัดส่วนความเข้มรามาน ($I_{D+D'}/I_{2D}$) 0.92 [4,37]

ส่วนความหนาและลักษณะของรีดิวซ์แกรไฟีนออกไซด์วัดด้วยเครื่อง AFM ในโหมด non-contact ภาพ topograph บริเวณขนาด $5 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$ ซึ่งแสดงดังภาพที่ 12(d) พบว่า มีความหนา $< 2 \text{ nm}$ สามารถกระจายตัวได้ดีและแต่ละแผ่นมีขนาดใหญ่ เหมาะสำหรับการนำมาประยุกต์ใช้ในงานฟิล์มบาง เช่นการสร้าง TCFs ในระดับใหญ่ๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 12 : (a) แกรไฟต์ออกไซด์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีฮัมเมอร์ (b) ภาพจาก OM แสดงฟิล์มบางรีดิวซ์แกรฟีนบนSi/SiO₂หลังอบที่อุณหภูมิ 250°C (C) สเปกตรัมรามานฟิล์มบางรีดิวซ์แกรฟีนของรูป (b) และ (d) ภาพจาก AFM แสดงลักษณะผิวของฟิล์มบางและความหนา <2 nm

3.3 การศึกษาสมบัติทางแสงด้วยPhotoluminescence spectroscopy (PL)

สมบัติทางแสงของวัสดุคาร์บอนที่สังเคราะห์ขึ้น วัดสเปกตรัมของการปล่อยแสง (Emission) ด้วยเครื่อง Photoluminescence spectroscopy (Acton SpecraPro-2300i monochromator) โดยใช้แสงเลเซอร์ (IK Series He-Cd) กระตุ้นด้วยความยาวคลื่น 325 nm หรือพลังงานกระตุ้น 3.81 eVที่อุณหภูมิ 11 K

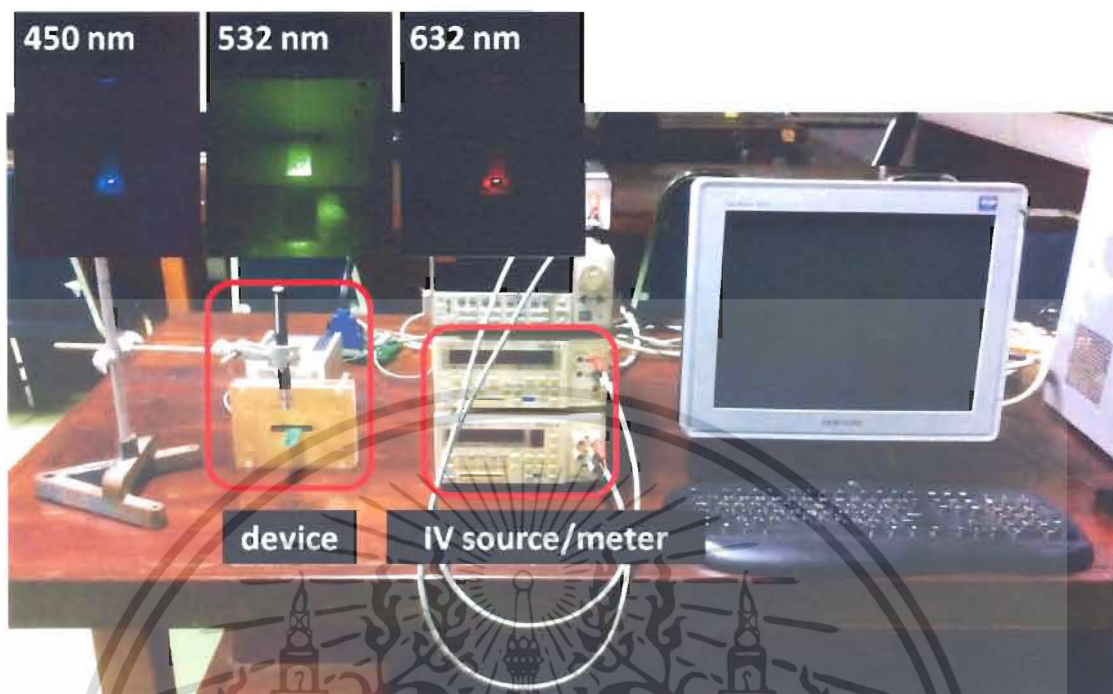
3.4 การวัดการตอบสนองต่อแสงด้วยการทดลองอย่างง่าย

ในการทดลองอย่างง่ายสำหรับวัดผลการตอบสนองทางไฟฟ้า ดังภาพที่ 13 โดยต่อหัววัดฟิล์มบางนาโนแกรไฟต์และรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์เข้ากับขั้วไฟฟ้า 4 ขั้ว ใช้ Programmable DC source (Yokogawa, 7651) เป็นตัวจ่ายกระแสคงที่ให้แก่วงจร 2 ขั้วและใช้ Digital multimeter (Yokogawa, 7561) วัดสัญญาณแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม 2 ขั้วที่เหลือ และเก็บข้อมูลแบบ real time และคำนวณออกมาเป็นค่าความต้านทานไฟฟ้า โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง (25°C) ในการทดลองจะใช้แสงจากเลเซอร์ไดโอดกำลังแสง <1000mWที่มีความยาวคลื่น 450 nm, 532 nm และ 632 nm ฉายตกกระทบในแนวตั้งฉากห่างจากวัสดุที่สร้างเป็นหัววัด 5 cm โดยค่าความต้านทานไฟฟ้าอ้างอิงขณะมืด (R₀) และค่าความต้านทานไฟฟ้าขณะตอบสนอง (R) เมื่อให้แสงตกกระทบบริเวณตอบสนอง การคำนวณค่าการตอบสนองนิยามด้วย

$$S(\%) = \frac{|R - R_0|}{R_0} \times 100\% \quad (5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อสังเกตพฤติกรรมการตอบสนองต่อแสงและการคืนสภาพของหัววัด ความเสถียรของหัววัด



ภาพที่ 13 : การทดลองอย่างง่ายสำหรับวัดผลการตอบสนองต่อแสง

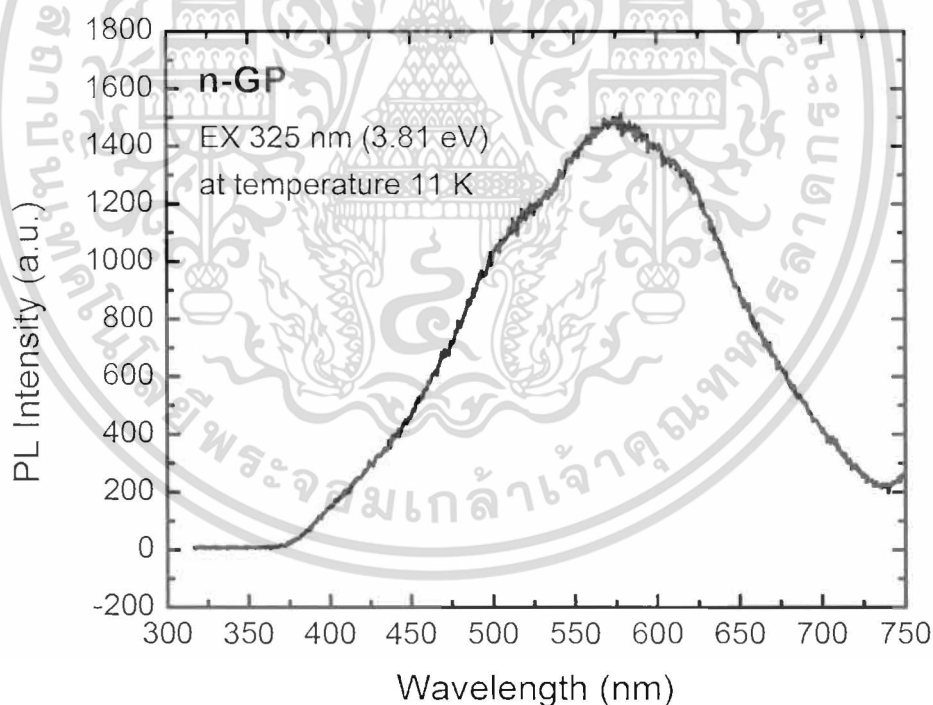
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัย

4.1 ผลการวิจัย

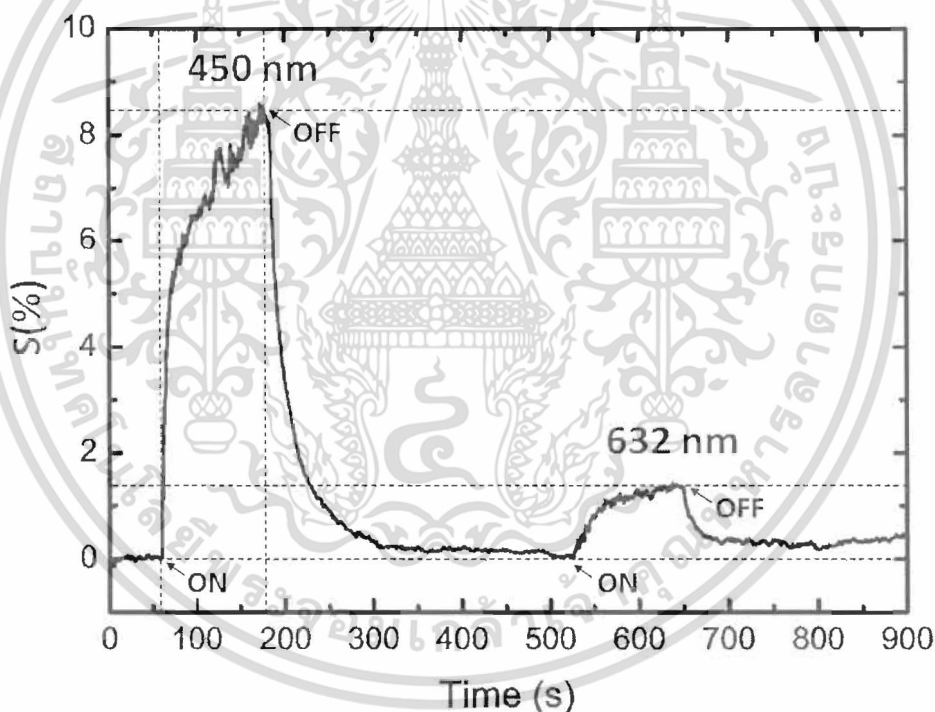
ในการศึกษาสมบัติทางแสงจากสเปกตรัม PL ของนาโนแกรไฟต์ วัดสเปกตรัมของการปล่อยแสงดังภาพที่ 14 ซึ่งแสดงค่าพลังงานที่วัสดุนาโนแกรไฟต์มีการปล่อยออกมาเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงเลเซอร์ความยาวคลื่น 325 nm หรือพลังงานกระตุ้น 3.81 eV เฉพาะที่อุณหภูมิต่ำ 11 K แสดงตำแหน่งสูงสุดชัดเจนที่ 574 nm ในช่วงกว้างมากเกือบทั้งช่วงที่ตามองเห็นหรือพลังงานช่วง 1.7 – 3.0 eV ซึ่งมีความเข้มของพลังงานที่ปล่อยออกมาค่อนข้างต่ำ เนื่องมาจากการมี defect เกิดขึ้นจากการถูกฉีกขาดด้วยวิธี sonication และอาจเป็นผลจากการ assembly ด้วย อย่างไรก็ตาม ตำแหน่ง peak ที่เกิดขึ้นเลื่อนมาทาง blue-shift ต่างจากอะมอร์ฟัสคาร์บอน ปล่อยแสงออกมาในช่วงสีแดง [23] แต่ฟิล์มบางนาโนแกรไฟต์ปล่อยออกมาในช่วงกว้างชัดเจนในช่วงสีเขียวแสดงถึง defect level transition [24]



ภาพที่ 14 : สเปกตรัม PL ของฟิล์มบางนาโนแกรไฟต์ แสดงความเข้มของพลังงานแสงที่ปล่อยออกมาเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงเลเซอร์ความยาวคลื่น 325 nm (3.81eV)

ในการทำการทดลองเบื้องต้นได้เลือกวัสดุนาโนแกรไฟต์เพื่อศึกษาการตอบสนองต่อแสงเอกซเรย์ เนื่องจากเป็นวัสดุที่สังเคราะห์ง่าย มีโครงสร้างพื้นฐานเป็นสารประเภทคาร์บอนประกอบขึ้นด้วยชั้นไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของแกรฟีน จึงสามารถนำไฟฟ้าได้ ในการเตรียมฟิล์มบางนาโนแกรไฟต์และสร้างเป็นอุปกรณ์เพื่อศึกษาการตอบสนองต่อแสงได้เชื่อมต่อขั้วไฟฟ้าที่ง่าย วัสดุการตอบสนองโดยจัดการทดลองดังภาพที่ 13 ใช้แสงเลเซอร์ฉายที่ความยาวคลื่น 450 nm และ 632 nm จากภาพที่ 15 แสดงค่าการตอบสนอง %S ตามเวลา พบว่าค่าการตอบสนองค่อนข้างต่ำมากการตอบสนองต่อแสงเลเซอร์สีเขียว ~8.5% และสีแดง ~1.5% ตามลำดับ แสดงสัญญาณอ้างอิงขณะมืดหรือก่อนฉายแสงเลเซอร์ที่เวลา 0 - 50 วินาที เมื่อฉายเลเซอร์แสงสีฟ้า 450 nm พบว่าวัสดุมีการตอบสนองต่อแสงทันทีแต่ค่อยๆเพิ่มขึ้นจนมีค่าการตอบสนอง ~8.5% และเริ่มคงที่ ใช้เวลาในการเปลี่ยนแปลงประมาณ 2 นาที เมื่อปิดแสงเลเซอร์ การตอบสนองค่อยๆ ลดระดับและกลับคืนสู่สภาพเดิมโดยใช้เวลาประมาณ 2 นาที เช่นเดียวกัน ต่อมาเปิดเลเซอร์แสงสีแดง 632 nm ฉายลงบนวัสดุ พบว่ามีค่าการตอบสนองค่อยๆ เพิ่มขึ้นเช่นกันและเข้าสู่ค่าคงที่ ~1.5% เมื่อปิดเลเซอร์วัสดุมีการคืนสภาพทำให้ค่าการตอบสนองลดลง แต่อาจมีการเสียหายของฟิล์มสังเกตจากระดับของเส้นอ้างอิงที่เลื่อนขึ้น

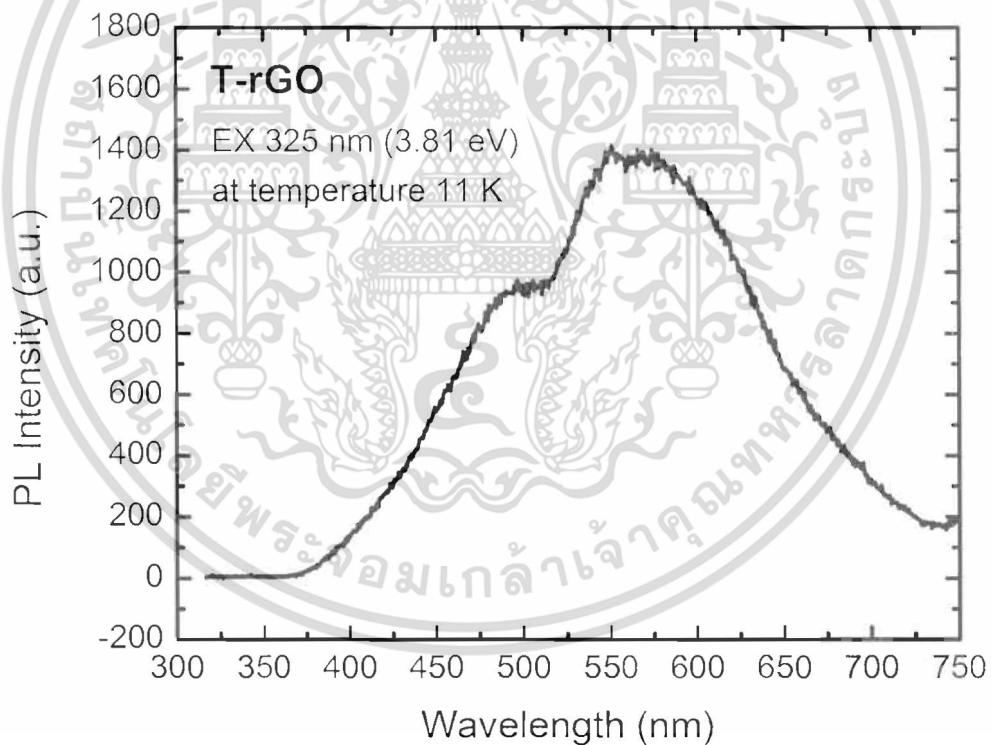


ภาพที่ 15 : ผลการตอบสนองต่อแสงสีฟ้า (450 nm) และแสงสีแดง (632 nm) ของนาโนแกรไฟต์เมื่อเปิด (ON) และปิด (OFF) แสงเลเซอร์

จากผลการทดลองเบื้องต้นพบว่า การตอบสนองของนาโนแกรไฟต์ %S มีค่าค่อนข้างต่ำมาก หากนำมาประยุกต์ใช้เป็นเลเซอร์อาจให้ผลการตอบสนองมีประสิทธิภาพต่ำและไม่เสถียร อย่างไรก็ตาม การสังเคราะห์วัสดุนาโนคาร์บอนด้วยวิธีนี้เป็นวิธีต้นทุนต่ำ ง่าย สะดวก ให้ปริมาณสารที่สังเคราะห์ในปริมาณมากเมื่อเทียบกับวิธีอื่น จึงอาจนำมาประยุกต์สำหรับงานที่ไม่ได้การดูแลเอาใจใส่สูงในการตรวจจับได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นจึงได้ปรับเปลี่ยนวิธีการสังเคราะห์วัสดุคาร์บอนที่ใช้เป็นวิธีการทางเคมี คือ การทำรีดักชันทางความร้อนกับแกรไฟต์ออกไซด์ได้ T-rGO ซึ่งคาดว่าจะให้ประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแสงที่ดีขึ้นและมีการนำไฟฟ้าที่ดีกว่า โดยมีการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีสเปรย์ไพโรไลซิสและอบที่อุณหภูมิสูงเพื่อลด defect ในการศึกษาสมบัติทางแสงจากการสเปกตรัมของ PL ที่วัดในรู็ร้อนไขเดียวกันกับของนาโนแกรไฟต์ คือใช้พลังงานกระตุ้นที่ 3.81 eV หรือแสงเลเซอร์ความยาวคลื่น 325 nm ที่อุณหภูมิ 11 K ให้ผลแสดงดังภาพที่ 16 ตำแหน่ง peak สูงสุดอยู่ที่ 560 nm ใกล้เคียงกับของ Cuong et al. [24] แต่ปรากฏไหล่ (shoulder) ที่ 490 nm (2.53 eV) ชัดเจน สเปกตรัมช่วงค่อนข้างกว้างเช่นเดียวกับในนาโนแกรไฟต์ คือทั้งช่วงที่ตามองเห็น (400 – 700 nm) ซึ่งสอดคล้องกับสเปกตรัมรามานแสดงการเกิด defect ใน D-band เกิดจากกระบวนการรีดักชันในการเปลี่ยนโครงสร้างของแกรไฟต์เป็นแกรไฟต์และทั้ง defect และ disorder ไว้ อาจแก้ไขได้ด้วยการอบที่อุณหภูมิสูงมาก

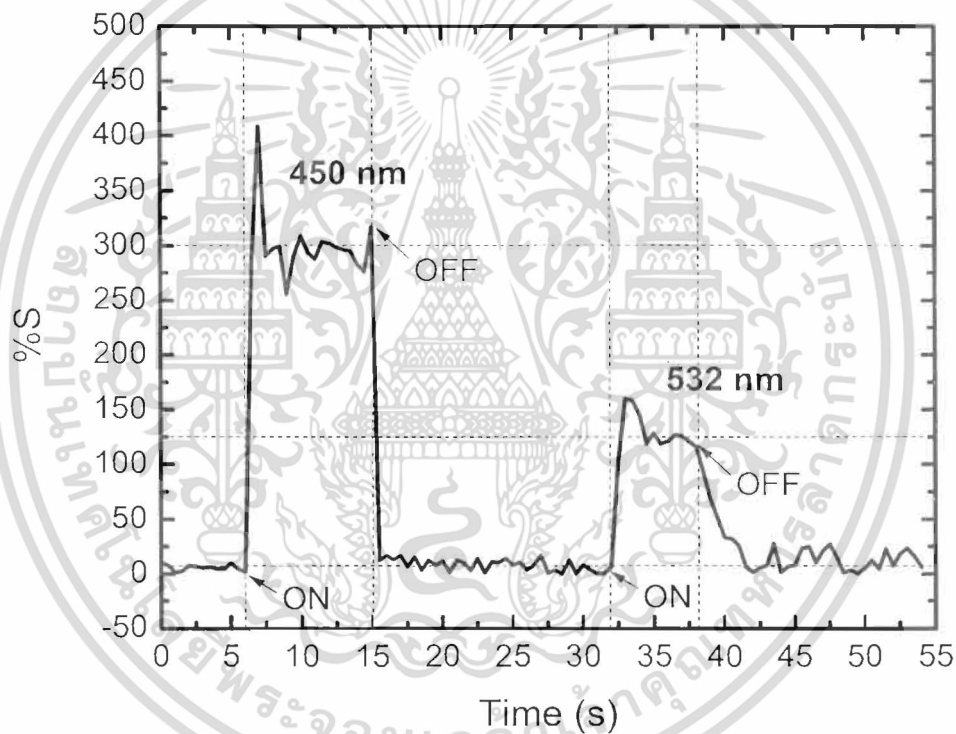


ภาพที่ 16 : สเปกตรัม PL ของฟิล์มบางรีดิวซ์แกรไฟต์ออกไซด์ แสดงความเข้มของพลังงานแสงที่ปล่อยออกมาเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงเลเซอร์ความยาวคลื่น 325 nm (3.81 eV)

สำหรับผลการตอบสนองแสดงดังภาพที่ 17 ใช้เลเซอร์แสงสีฟ้า (450 nm) และแสงสีเขียว (532 nm) ในการศึกษา พบว่าค่าการตอบสนองสูงมากถึง 300% และ 125% เมื่อใช้แสงสีฟ้า

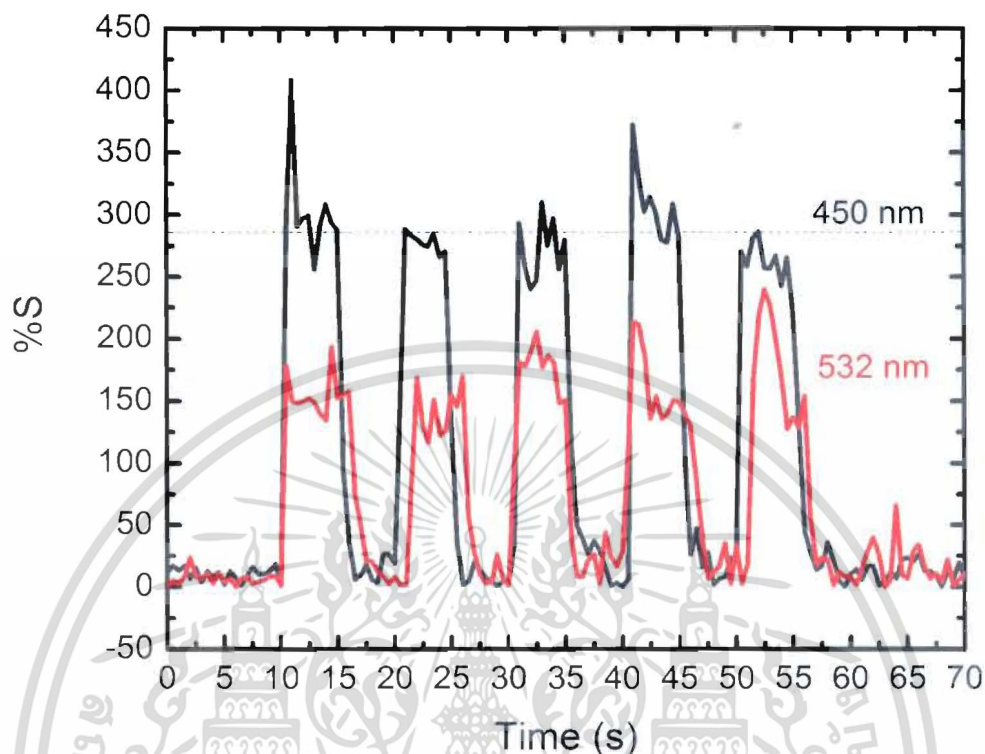
และสีเขียวตกกระทบตามลำดับ ที่เวลา 0 – 6 วินาที เป็นค่าการตอบสนองขณะมืดหรือก่อนฉายแสง
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การเขียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้จัดทำเห็นชอบจะขึ้นหน้าปก
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลเซอร์ เมื่อเปิดเลเซอร์แสงสีฟ้าวัสดุถูกกระตุ้นทันทีและทำให้เกิดค่า overshoot สูงสุดถึง 400% และลดระดับลงมา 300% ในเวลาไม่ถึง 1 วินาที และเมื่อปิดเลเซอร์วัสดุสามารถตอบสนองในการคืนสภาพได้ภายในเวลาน้อยกว่า 1 วินาทีเช่นเดียวกัน ในขณะที่เมื่อใช้เลเซอร์แสงสีเขียว วัสดุสามารถตอบสนองได้ทันทีเช่นเดียวกันแต่เกิด overshoot $\sim 160\%$ และใช้เวลาในการลดลงสู่ค่าที่เสถียรอยู่ในระดับ $\sim 125\%$ ประมาณ 2 วินาที เมื่อปิดแสงเลเซอร์ วัสดุสามารถคืนสภาพกลับมาในรูปร่างอ้างอิงได้ภายในเวลา 5 วินาที แต่เมื่อเทียบกับของนาโนแกรไฟต์ ทั้งความไวในการตอบสนอง (Sensitivity) พบว่ามีประสิทธิภาพมากกว่าและเวลาที่ใช้ในการตอบสนองเร็วกว่าเป็นร้อยเท่าเช่นเดียวกัน วัสดุ T-rGO นี้จึงมีความเหมาะสมและที่จะนำมาพัฒนาต่อเป็นเซนเซอร์ ซึ่งสามารถสร้างและนำมาประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรมได้



ภาพที่ 17 : ผลการตอบสนองต่อแสงสีฟ้า (450 nm) และแสงสีเขียว (532 nm) ของรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ เมื่อเปิด (ON) และปิด (OFF) แสงเลเซอร์

Reproducibility ได้แสดงดังภาพที่ 18 เป็นรอบการตอบสนองจำนวน 5 รอบ โดยใช้เวลาเมื่อเปิดแสงเลเซอร์ฉายลงวัสดุและเวลาคืนสภาพของวัสดุ รอบละ 5 วินาที เส้นสีดำแสดงรอบการตอบสนองเมื่อมีแสงสีฟ้ามาตกกระทบ ส่วนเส้นสีแดงแสดงรอบการตอบสนองสำหรับแสงสีเขียว พบการตอบสนองที่ค่อนข้างเสถียรทั้งสอง แต่สำหรับการพัฒนาต่อเพื่อเป็นเซนเซอร์อาจต้องศึกษาและวัดรอบการตอบสนองที่มากกว่านี้เพื่อให้เกิดความแม่นยำทั้งความไวและเวลาที่ใช้ในการตอบสนอง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 18 : ผลการตอบสนองต่อแสงสีฟ้า (450 nm) และแสงสีเขียว (532 nm) ของรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ จำนวน 5 รอบการตอบสนอง

4.2 วิจัยผล

ในช่วงแรกของการวิจัยได้ทำการสังเคราะห์วัสดุคาร์บอนด้วยวิธี sonication ซึ่งให้ผลคือ นาโนแกรไฟต์ในน้ำ มีหลายความหนาปะปนกันซึ่งมีค่าต่ำกว่า 100 nm สามารถวิเคราะห์ลักษณะกายภาพของนาโนแกรไฟต์ด้วยกล้อง OM ในโหมดสะท้อนแสง และใช้ Raman และ AFM แสดงลักษณะเฉพาะของวัสดุที่เป็นโครงสร้าง สมบัติทางแสงศึกษาด้วย PL โดยใช้แสงเลเซอร์ที่กระตุ้นความยาวคลื่น 325 nm ที่อุณหภูมิ 11 K พบการคายพลังงานออกมาในช่วงกว้างที่ตามองเห็นได้ สำหรับในนาโนแกรไฟต์พบ broad peak ที่กว้างใกล้เคียงกับใน T-rGO แต่สเปกตรัมของ T-rGO ปรากฏ shoulder ที่ 490 nm แสดงโครงสร้างที่มี defect เกิดขึ้นบนโครงสร้าง sp^2 ของวัสดุคาร์บอนเหล่านี้ เมื่อนำวัสดุทั้งสองมาสร้างเป็นอุปกรณ์สำหรับศึกษาการ ตรวจจับแสงจากเลเซอร์ไดโอดกำลังแสง <math><1000\text{mW}</math> ในการทดลองอย่างง่าย โดยใช้เลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 450 nm, 532 nm และ 632 nm ป้อนกระแสให้แก่วงจร 0.5 mA พบว่าการตอบสนองทางไฟฟ้าค่อนข้างต่ำ อาจเนื่องจากบริเวณที่ถูกกระตุ้นด้วยแสงเกิดจากการรวมกลุ่มของนาโนแกรไฟต์ (Assembly of nanographite) จึงเป็นไปได้ว่าอาจทำให้อิเล็กทรอนิกส์สูญเสียสภาพคล่อง อีกทั้งมี grain boundary จำนวนมาก จึงไม่เหมาะสำหรับการทำเป็นหัวเซนเซอร์ที่ต้องการความไวในการเอกซารีนเป็นเอกซารีนที่ส่งวนเวียนสำหรับการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตอบสนอง ดังนั้นจึงพัฒนาอุปกรณ์ตรวจจับแสงต่อโดยสังเคราะห์วัสดุนาโนคาร์บอนด้วยวิธีฮัมเมอร์ และทำรีดักชันทางความร้อนเป็นฟิล์มบางระดับนาโน นำมาศึกษาสมบัติต่างๆ เช่นเดียวกันกับของนาโนแกรไฟต์ พบว่าสามารถพัฒนาการตรวจจับแสงได้ดีกว่ามากกว่า 300 เท่า เนื่องโครงสร้างของรีดิวซ์แกรไฟ์นออกไซด์มีความเป็นแกรไฟ์นมากกว่า สามารถนำไฟฟ้าได้ดีกว่า สังเคราะห์ได้แผ่นที่ใหญ่กว่า ไม่ได้เกิดจากผลของการ assembly ซึ่งทำให้เกิดการกระเจิงของอิเล็กตรอน ลดทอนความไวในการตอบสนอง และยังให้ความเสถียรของสัญญาณที่มากกว่า โครงการวิจัยนี้สามารถนำมาพัฒนาต่อเป็นหัววัดเซนเซอร์แสงที่มีการตอบสนองอย่างรวดเร็วและความเสถียรต่อไปได้ โดยวัดรอบการตอบสนองเพิ่มขึ้นและพัฒนาการเคลือบฟิล์มบางจากสารละลายที่สังเคราะห์ได้ให้เป็นชั้นเดียวของแกรไฟ์นมากที่สุด อาจใช้การอบ (Annealing) เพื่อลด defect และทดลองกับแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ที่เสถียรกว่านี้ ซึ่งอาจทำการทดลองเพิ่มในการเปลี่ยนแปลงความเข้ม และความถี่ของแสงเลเซอร์นอกช่วงที่ตามองเห็นเช่น UV และ IR เป็นต้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

วัสดุนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ขึ้นเพื่อศึกษาใช้ในการศึกษาการตอบสนองต่อแสง ได้แก่ รีติวซ์แกรฟีนออกไซด์ ซึ่งสังเคราะห์ขึ้นด้วยวิธีของฮัมเมอร์และทำการรีดักชันทางความร้อน เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพด้วย OM และ ศึกษาลักษณะเฉพาะของโครงสร้างด้วย AFMRaman และ สมบัติเชิงแสงด้วย PL ให้ผลการตอบสนองทางไฟฟ้าต่อแสงเลเซอร์ไดโอดที่มีความเข้ม <math><1000\text{ mW}</math> ในช่วงที่ตามองเห็น แสดงความไวในการตอบสนอง เวลาที่ใช้ในการตอบสนอง และความเสถียรของ วัสดุที่ตอบสนอง พบว่ามีความไวในการตอบสนองสูงถึง $\sim 300\%$ ต่อแสงสีฟ้า และ $\sim 125\%$ ต่อแสงสีเขียว สามารถตอบสนองได้ทันทีและคืนสภาพได้ทันทีเช่นกัน อีกทั้งมีความเสถียร

นอกจากนี้ในเบื้องต้นได้สังเคราะห์นาโนแกรไฟต์ ซึ่งเป็นวัสดุนาโนคาร์บอนที่มีโครงสร้าง พื้นฐานของแกรฟีนเช่นเดียวกับรีติวซ์แกรฟีนออกไซด์ เพื่อทดสอบก่อนแต่ให้ผลการตอบสนอง ค่อนข้างต่ำมาก แต่อาจเป็นประโยชน์ต่อการประยุกต์ใช้ในงานที่ไม่ต้องการความละเอียดสูง

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการพัฒนาจากหัววัดเซนเซอร์จากวัสดุนาโนคาร์บอน อาจจะต้องจำเป็นต้องพัฒนาใน ส่วนต่างๆดังนี้

1. ส่วนวัสดุที่ใช้เป็นบริเวณตอบสนอง เนื่องจากเป็นวัสดุโครงสร้างคาร์บอนจึงอาจทนแสง ที่มีพลังงานหรือความเข้มสูงๆได้ไม่นานนัก อาจทำให้ฟิล์มใหม่หรือเสียหายได้ง่าย แต่สามารถพัฒนา เป็นหัววัดความไวสูงได้ขึ้นอยู่กับการใช้งาน

2. ส่วนการทดลองเพื่อทดสอบการตอบสนองของหัววัด ความไวและความเร็วในการตอบสนองเป็นสิ่งสำคัญ อาจลดความเข้มแสงลง และจัดการทดลองเพื่อวัดแสงจากแหล่งกำเนิดที่มีความถี่ต่างๆ ในช่วงกว้างได้แก่ UV, visible และ และอาจทำการทดลองเพื่อวัดในลักษณะพัลส์ IR สำหรับงานที่ต้องใช้ความไวสูงในการวัด อีกทั้งทดสอบความเสถียรของการตอบสนองของวัสดุโดยเพิ่ม รอบการวัด Cycle ของการตอบสนอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Novoselov, K. S., Geim, A. K., Morozov, S. V., Jiang, D., Katsnelson, M. I., Grigorieva, I. V., Dubonos, S. V. and Firsov, A. A. (2004). Electric field effect in atomically thin carbon films. *Science*, 306, 666.
- [2] Bolotin, K.I., Sikes, K.J., Jiang, Z., Klimac, M., Fudenberg, G., Honec, J. and Kim, P. (2008). Ultrahigh electron mobility in suspended graphene. *Solid State Communications*, 146, 351.
- [3] Lee, C., Wei, X., Kysar, J.W. and Hone, J. (2008). Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene. *Science*, 321, 385.
- [4] Kim, J., Ishihara, M., Koga, Y., Tsugawa, K., Hasegawa, M. and Iijima, S. (2011). Low-temperature synthesis of large-area graphene-based transparent conductive films using surface wave plasma chemical vapor deposition. *Applied Physics Letters*, 98, 091502.
- [5] Bonaccorso, F., Sun Z., Hasan, T. and Ferrari, A.C. (2010). Graphene photonics and optoelectronics. *Nature Photonics*, 4, 611.
- [6] CastroNeto, A.H., Guinea, F. and Peres, N.M.R. (2006). Drawing conclusions from graphene. *Physics World*.19, 33.
- [7] CastroNeto, A.H., Guinea, F., Peres, N.M.R., Novoselov, K.S. and Geim, A.K. (2009). The electronic properties of graphene. *Reviews of Modern Physics*, 81, 109.
- [8] Choi, W. and Lee, J.-W. (2012). *Graphene Synthesis and Applications*. CRC Press Taylor & Francis Group. U.S. Ch. 2.
- [9] Cravotto, G. and Cintas P. (2010). Sonication-assisted fabrication and post-synthetic modifications of graphene-like materials. *Chem. Eur. J.* 16, 5246.
- [10] Suslick, K., Didenko, Y., Fang, M.M., et al. (1999). Acoustic cavitation and its chemical consequences. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A* 357, 335.
- [11] Bang, J. H. and Suslick, K. S. (2010). Applications of ultrasound to the synthesis of nanostructured materials. *Advanced Materials* 22, 1039.
- [12] Hernandez, Y., Nicolosi, V., Lotya, M., Blighe, F.M., Sun, Z., De, S., McGovern, I.T., Holland, B., Byrne, M., Gun'Ko, Y.K., Boland, J.J., Niraj, P., Duesberg, G., Krishnamurthy, S., Goodhue, R., Hutchison, J., Scardaci, V., Ferrari, A.C. and Coleman, J.N. (2008). High-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

yield production of graphene by liquid-phase exfoliation of graphite. *Nature Nanotechnology*, 3, 563.

[13] Lotya, M., Hernandez, Y., King, P.J., Smith, R.J., Nicolosi, V., Karlsson, L.S., Blighe, F.M., De, S., Wang, Z., McGovern, I.T., Duesberg, G.S. and Coleman, J.N. (2009). Liquid phase production of graphene by exfoliation of graphite in surfactant/water solutions, *Journal of the American Chemical Society*, 131, 3611.

[14] Stankovich, S., Dikin, D.A., Piner, R.D., Kohlhaas, K.A., Kleinhammes, A., Jia, Y., Wu, Y., Nguyen, S.T., Ruoff, R.S. (2007). Synthesis of graphene-based nanosheets via chemical reduction of exfoliated graphite oxide. *Carbon* 45, 1558.

[15] Elsevier Ltd. (2013). All in the graphene family – A recommended nomenclature for two-dimensional carbon materials. *Carbon* 65, 1.

[16] Hummers, W.S., Jr. and Offeman, R.E. (1958). Preparation of graphitic oxide. *Journal of the American Chemical Society*, 80, 1339.

[17] Gao, W., Alemany, L.B., Ci, L. and Ajayan, P.M. (2009). New insights into the structure and reduction of graphite oxide. *Nature Chemistry*, 1, 403.

[18] Singh, V., Joung, D., Zhai, L., Das, S., Khondaker, S.I. and Seal, S. (2011). Graphene based materials: Past, present and future *Progress in Materials Science*, 56 (8), 1178.

[19] Chua, C.K. and Pumera, M. (2014). Chemical reduction of graphene oxide: a synthetic chemistry viewpoint. *Chem. Soc. Rev.* 43, 291.

[20] Pei, S. and Cheng, H.-M. (2012). The reduction of graphene oxide. *Carbon*, 50, 3210.

[21] Mak, K.F., Ju, L., Wang, F. and Heinz, T.F. (2012). Optical spectroscopy of graphene: From the far infrared to the ultraviolet. *Solid State Communications* 152, 1341.

[22] Horng, J., Chen, C.-F., Geng, B., et. al. (2011). Drude conductivity of Dirac fermions in graphene. *Phys. Rev. B* 83, 165113.

[23] Henley, S.J., Carey, J.D. and Silva, S.R.P. (2004). Room temperature photoluminescence from nanostructured amorphous carbon. *85(25)*, 6236.

[24] Cuong, T.V., Phama, P.H., Tran, Q.T., Hahn, S.H. Chung, J.S., Shin, E.W. and Kima, E.J. (2010). Photoluminescence and Raman studies of graphene thin films prepared by reduction of graphene oxide, *Materials Letters*, 64, 399.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [25] Hamberg, I. and Granqvist, C.G. (1986). Evaporated Sn-doped In₂O₃ films: basic optical properties and applications to energy-efficient windows. *J. Appl. Phys.* 60, R123.
- [26] Minami, T. (2005). Transparent conductive oxide semiconductors for transparent electrodes. *Semicond.Sci.Technol.* 20, S35.
- [27] Wu, J., et al. (2009). Organic light-emitting diodes on solution-processed graphene transparent electrodes. *ACS Nano* 4, 43.
- [28] Blake, P., et al. (2008). Graphene-based liquid crystal device. *Nano Lett.* 8, 1704.
- [29] Mailoa, J.P., Bailie, C.D., et al. (2015). A 2-terminal perovskite/silicon multijunction solar cell enabled by a silicon tunnel junction. *Appl. Phys. Lett.* 106, 121105.
- [30] Wang, X., et al. (2008). Transparent carbon films as electrodes in organic solar cells. *Angew.Chem.* 47, 2990.
- [31] De Arco, L.G. et al. (2010). Continuous, highly flexible, and transparent graphene films by chemical vapor deposition for organic photovoltaics. *ACS Nano* 4, 2865.
- [32] Mueller, T., Xia, F. and Avouris, P. (2010). Graphene photodetectors for high-speed optical communications. *Nature Photon.* 4, 297.
- [33] Xia, F., Mueller, T. et al. (2009). Ultrafast graphene photodetector. *Nature Nanotech.* 4, 839.
- [34] Roddaro, S., Pingue, P., Piazza, V., Pellegrini, V. and Beltram, F. (2007). The optical visibility of graphene: interference colors of ultrathin graphite on SiO₂. *Nano Letters*, 7(9), 2707.
- [35] Ferrari, A.C. (2007). Raman spectroscopy of graphene and graphite: Disorder, electron-phonon coupling, doping and nonadiabatic effects. *Solid State Communications*, 143, 47.
- [36] Dreyer, D.R., Park, S., Bielawski, C.W. and Ruoff, R.S. (2010). The chemistry of graphene oxide. *Chem. Soc. Rev.*, 39, 228.
- [37] Song, N.-J., et al. (2014). Thermally reduced graphene oxide films as flexible lateral heat spreaders, 2, 16563.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รหัสโครงการ/รหัสสัญญา.....



แบบรายงานการใช้จ่ายเงินโครงการวิจัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

รายงานความก้าวหน้าครั้งที่ 3 รอบ 12 เดือน ประจำปีงบประมาณ 2557

 แหล่งงบประมาณแผ่นดิน(แบบปกติ) แหล่งเงินรายได้

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) ผลของการตอบสนองต่อแสงของนาโนคาร์บอน

(ภาษาอังกฤษ) Light radiation effect on carbon nanostructured materials

ชื่อ-สกุลหัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน/ผู้วิจัย ดร. ประธาน บุณศิริ

รายงานในช่วงตั้งแต่วันที่ ตุลาคม 2556 ถึงวันที่กันยายน 2557

ระยะเวลาดำเนินการ 1 ปี เดือนตั้งแต่วันที่ ตุลาคม 2556 ถึงวันที่กันยายน 2557

ข้อมูลการรายงานค่าใช้จ่ายงบประมาณโครงการวิจัย

1. การเบิกจ่ายงบประมาณ (กรณีการจ่ายเงินถ้าจ่ายงวดเดียวให้ลบข้อที่ไม่เกี่ยวข้องออก)

งวดที่ 1 50,000 บาท 100 % วันที่ได้รับอนุมัติให้เบิกจ่ายเงิน (ป/ด/ว)

2. สรุปงบประมาณค่าใช้จ่ายที่ใช้ นับตั้งแต่เริ่มทำการวิจัยถึงปัจจุบัน (จำแนกตามหมวดค่าใช้จ่าย)

หมวดค่าใช้จ่าย	งบประมาณรวมทั้งโครงการ	ค่าใช้จ่าย (บาท)	คงเหลือ (หรือเกิน)
งบบุคลากร: ค่าจ้างชั่วคราว			
งบดำเนินงาน			
ค่าตอบแทน			
ค่าใช้สอย	10,000	10,000	0
ค่าวัสดุ	40,000	40,000	0
ค่าสาธารณูปโภค			
งบลงทุน: ค่าครุภัณฑ์			
รวม	50,000	50,000	0

.....
 (.....)

ลงนามหัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน

.....//.....

.....
 (.....)

ลงนามเจ้าหน้าที่การเงิน/เจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้อง

.....//.....

หมายเหตุ : นักวิจัยหรือเจ้าหน้าที่การเงินสามารถปรับหรือเปลี่ยนแปลงเพิ่มเติมข้อความได้ตามความเหมาะสมและสอดคล้องกับการดำเนินงานเอาที่ต้น
 ใจใส่ในส่วนที่เป็นเอกสารหลักฐานหรือหลักฐานที่ส่งมาเพื่อพิจารณาเท่านั้น เมื่อผู้จัดทำเห็นว่าเป็นประโยชน์จึงจะพิจารณาตามราคา
 นักวิจัยอยู่ระหว่างการดำเนินการเคลียร์ด้านเอกสารทางการเงิน หรือข้อความอื่นๆ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PrathanBuranasiri

Lecturer

Physics, Faculty of Science,

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Bangkok, Thailand, 10520.

Mobile: 083-815-4829, 084-071-0279

Tel: 02-326-4339 ext. 324, 02-737-3000 ext 6202

Fax: 02-326-4413

Email: mayga1@gmail.com



EDUCATION

Ph.D. Electrical and Computer Engineering, Major Electro-Optics, University of Dayton, Dayton, Ohio, U.S.A. 2006.

Thesis: Optical Correlation Using Isotropic and Anisotropic Self-Diffraction in Photorefractive material.

Advisor: Dr. Partha. P. Banerjee

M.S. Physics, Major Optics, University of Alabama in Huntsville, Huntsville, Alabama, U.S.A. 2000.

Thesis: Coherent and Incoherent Self Imaging Using Photorefractive Barium Titanate Crystal.

Advisor: Dr. Partha. P. Banerjee

B.S. Physics, Minor Mathematics, Ramkhamhaeng University, Bangkok, Thailand. 1993

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EXPERIENCE

03/06-present and 04/96-05/97

Lecturer, Applied Physics Department, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand.

Research areas: Semiconductor Lasers, Nonlinear optics, Photonic Crystals, Optical Communication, Computational Electromagnetics, Optical tweezers Terahertz optics, Digital Holography

Teaching areas: Fundamental Physics, Fundamental Physics Laboratory in Thai and English, Intermediate Physics Laboratory, Physical and Quantum Electronics, Lasers Physics, Physical Optics, Computational Fluid Dynamics, Polarized Light.

04/08-07/08

Visiting Scholar, Center for Biophotonics and Laser Science, Physics Department, School of Physical Sciences, University of Queensland, Brisbane, Qld 4072 Australia.

Investigate an optical tweezers system for measurement some parameters transfer between the laser and the particle in liquids.

Building a cheap optical tweezers system for using in undergraduate laboratory

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติ

ผู้ร่วมโครงการวิจัย

ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) : น.ส. พิชญ์สินีสุวรรณแพทย์

ชื่อ - นามสกุล(ภาษาอังกฤษ) : Miss PhitsiniSuvarnaphaet

หน่วยงานและสถานที่อยู่ติดต่อได้สะดวก : ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยมหิดล ถนน
พระราม 6 ท่งพญาไท เขตราชเทวี กรุงเทพฯ 10400

โทรศัพท์ : 085-515-3764

ประวัติการศึกษา :

2008 : วิทยาศาสตรบัณฑิต (วท.บ.) ฟิสิกส์ (เกียรตินิยม)มหาวิทยาลัยศิลปากร

2010 : วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วท.ม.) ฟิสิกส์มหาวิทยาลัยมหิดล

2010 - ปัจจุบัน : กำลังศึกษาในหลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยมหิดล

ประสบการณ์งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และ/หรือที่ผ่านมา ทั้งภายในและภายนอกประเทศ โดยระบุ
สถานภาพในการทำวิจัยว่าเป็นผู้อำนวยการแผนงานวิจัย หัวหน้าโครงการวิจัย หรือผู้ร่วมวิจัยในแต่ละ
ข้อเสนอการวิจัย

1. ตำแหน่งนักศึกษาช่วยวิจัย

ห้องปฏิบัติการวิจัยวัสดุยุคใหม่ ศูนย์วิจัยฟิสิกส์บูรณาการ ศูนย์ความเป็นเลิศทางฟิสิกส์ (ThEP)
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล (ระยะที่ 1)

ปี 2552 โครงการวิจัยการคำนวณค่ากระแสไฟฟ้าในรอยต่อที่ประกอบด้วยวัสดุตัวนำยวดยิ่งและ
วัสดุแม่เหล็ก(Simulation of the current flow in a superconductivity magnetic
tunnel junction)

ปี 2553 โครงการวิจัยการคำนวณประสิทธิภาพของอุปกรณ์สปินทรอนิกส์โดยใช้แถบนาโนริบบอน
แกรฟีน(Simulation of the performance of spintronics devices based on
graphenenanoribbons)

ปี 2554-55 โครงการวิจัยแบบจำลองการทำงานของอุปกรณ์สปินทรอนิกส์โดยใช้แกรฟีนริบบอนและ
แกรฟีนไบเลเยอร์และการสร้างตัวนำส่งยาขนาดนาโนเมตร(Development of
spintronic devices of the future: Simulation of the performance of
spintronic devices made with graphenenanoribbons and bilayer graphene
and the fabrication of nano drug delivery vehicles)

2. ตำแหน่งผู้ร่วมโครงการวิจัย
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปี 2557 โครงการผลของการตอบสนองต่อแสงของวัสดุคาร์บอน (Light radiation effect
on carbon nanostructured materials)

3. ตำแหน่งผู้ช่วยวิจัยระยะสั้น

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ปี 2558 โครงการศึกษาและพัฒนาเซนเซอร์จากคาร์บอนนาโนทิวป์/แกรฟีน/อนุภาคโลหะระดับ
นาโน เพื่อประยุกต์ใช้ในการติดตามปฏิสัมพันธ์ของโปรตีน (ระยะที่ 2)

ผลงาน

1. Suvarnaphaet, P., Tang, I.-M. and Asanithi, P. (2013). Multi-layered graphene- and nanographite-based actuators for detecting acetone vapor, ASEAN+ 2013 The 2nd Regional Symposium on Biosensors, Biodiagnostics and Biochips Proceeding, 60 – 63.
2. Puangbuppha, B.*, Suvarnaphaet, P.*, Luangchaisri, C., Tang, I.-M. and Asanithi, P. (2013). assembly of single-walled carbon nanotubes for ammonia sensor, ASEAN+ 2013 The 2nd Regional Symposium on Biosensors, Biodiagnostics and Biochips Proceeding, 56 – 59.
3. Prongmanee, W., Suvarnaphaet, P. and Asanithi, P. (2013). Copper nanoparticle/PVP composite film for colorimetric ammonia sensor, ASEAN+ 2013 The 2nd Regional Symposium on Biosensors, Biodiagnostics and Biochips Proceeding, 64 – 68.
4. Suvarnaphaet, P., Asanithi, P., Luangchaisri, C., and Tang, I.M. (2013). Graphene/Nanographite assembly as a disposable chemical vapor sensor, EECS Proceeding, 301 – 309.
5. Suvarnaphaet, P., Suvarnaphaet, P., Vittayaphattananurak-raksasiri, B., Khumthongmak, S., Mansukpol, W., Rungcharoenkiat, D. (2011). Development of the e-Learning courseware media on Thermodynamics, Proceeding of NCCIT, 770-775.
6. Suvarnaphaet, P., Tang, I.M. and Hoonsawat, R. Simulation of the performance of an epitaxial graphene based magnetic tunnel junction: effect of the gap opening, NanoThailand, 2010.
7. Suvarnaphaet, P., Tang, I.M. and Hoonsawat, R. (2011). Gap effect on relativistic tunneling conductance in a proximity inducing ferromagnetism in gapped graphene junction, Thai Journal of Physics, series 6, 2012.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. Suvarnaphaet, P., Tang, I.M. and Hoonsawat, R. (2010). Effects of the Fermi energy mismatch on spin transport in a magnetic barrier graphene structure, Thai Journal of Physics, series 5, 2011.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้