

บทความปริทัศน์ (Review Article)**แกรฟีน ตอนที่ 2: สมบัติและการนำไปประยุกต์ใช้****Graphene (Part 2): Properties and some of its applications**วิศณุสรณ์ ชาติอารยะวัติ^{1*}Widsanusan Chartarrayawadee^{1*}**บทคัดย่อ**

การทบทวนบทความในตอนนี้จะเป็นการกล่าวถึงสมบัติต่างๆ ของแกรฟีนอันได้แก่ สมบัติทางไฟฟ้า สมบัติการสั่น สมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกลและสมบัติทางแสง โดยพบว่าแกรฟีนสามารถนำไฟฟ้าได้อย่างยอดเยี่ยม นำความร้อนได้ดีมาก มีความแข็งแรงที่สุดในโลกและมีความโปร่งแสงมากถึง 97-98 เปอร์เซ็นต์ จากสมบัติที่สำคัญและโดดเด่นเหล่านี้ของแกรฟีนส่งผลให้นักวิทยาศาสตร์และนักวิจัยต่างให้ความสนใจในการนำแกรฟีนมาพัฒนาเป็นวัสดุชนิดใหม่และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ประเภทต่างๆ เช่น จอภาพและแผงเซลล์สุริยะที่โค้งงอได้ ทรานซิสเตอร์ เซ็นเซอร์ แอคชูเอเตอร์ แบตเตอรี่ ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ วัสดุคอมโพสิตและระบบนำส่งยา

คำสำคัญ : แกรฟีน, วัสดุคาร์บอน, สมบัติของแกรฟีน ,การประยุกต์ใช้แกรฟีน

Abstract

In Part 2 of this review article, properties of graphene, such as electrical properties, vibrational properties, thermal properties, mechanical properties and optical properties have been discussed. Graphene possessed an excellent electrical conductivity, superior thermal conductivity and superb mechanical properties. The graphene monolayer generally has a light transparency of about 97 to 98 percent. Scientists and researchers believe the remarkable and important properties of graphene could lead to the development of new materials and devices, such as flexible displays, flexible solar cells, transistors, sensors, actuators, batteries, supercapacitors and drug delivery systems.

Keywords : Graphene, carbon materials, graphene properties, graphene applications

¹ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จังหวัดพะเยา 56000

¹ Department of Chemistry, School of Science, University of Phayao, Phayao Province 56000

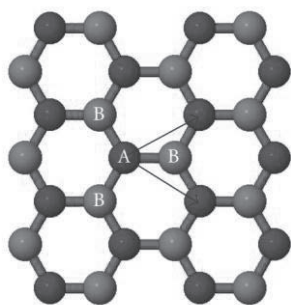
*Corresponding author, e-mail: widsanusan.ch@up.ac.th, widsanusan@hotmail.com

Received: 12 September 2013; Accepted: 30 March 2014

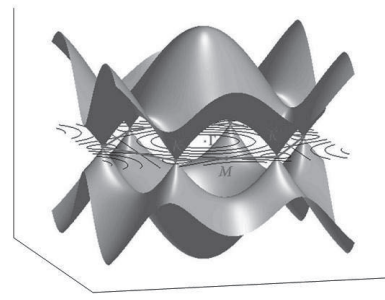
สมบัติของแกรฟีน (Graphene properties)

สมบัติทางไฟฟ้า (Electronic properties)

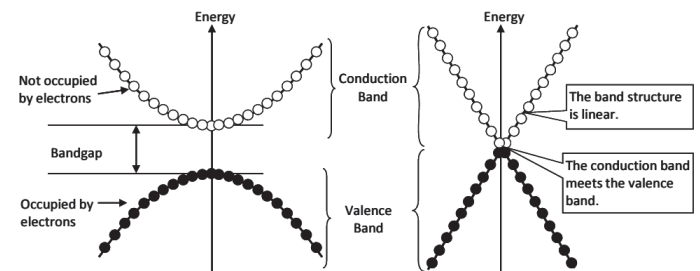
คาร์บอนมีการจัดเรียงอิเล็กตรอนในอะตอมเป็น ${}^6\text{C}=1s^2 2s^2 2p^2$ ซึ่งประกอบไปด้วยออร์บิทัล $2s$, $2p_x$, $2p_y$ และ $2p_z$ โดยออร์บิทัลเหล่านี้สามารถผสมกันไปมาได้ก่อให้เกิดโครงสร้างลูกผสมแบบต่างๆ เช่น ในกรณีของเพชรจะเกิดการผสมกันระหว่างออร์บิทัล S และ p_x p_y p_z เกิดเป็นออร์บิทัลลูกผสม (hybrid orbital) ชนิด sp^3 ในกรณีของแกรฟีนจะเกิดการผสมกันระหว่างออร์บิทัล S และ p_x p_y เกิดเป็นออร์บิทัลลูกผสมชนิด sp^2 ซึ่งจะเกิดเป็นพันธะ σ 3 พันธะและเหลือออร์บิทัล p_z ซึ่งจะเกิดเป็นพันธะ π 1 พันธะ เมื่อพิจารณาภาพที่ 1(ก) จะเห็นได้ว่าพันธะ σ จะเกิดขึ้นระหว่างอะตอมคาร์บอน A และ B ส่วนพันธะ π จะเกิดขึ้นตามแนวแกน z โดยพุ่งออกจากระนาบของกระดาษ พันธะ π ของแต่ละอะตอมของคาร์บอนสามารถเกิดการไฮบริไดเซชัน (hybridization) เกิดเป็นแถบของ π และ π^* ซึ่งส่งผลให้แกรฟีนมีสมบัติทางไฟฟ้าที่พิเศษ แกรฟีนมีแลตทิซเป็นแบบเฮกซะโกนอล (hexagonal lattice) ซึ่งสามารถแทนได้ด้วยแลตทิซแบบสามเหลี่ยมสองภาพดังแสดงในภาพที่ 1 (ก) แต่ละ อะตอมในแลตทิซย่อย (A) จะเชื่อมต่อกับอะตอมข้างเคียง (B) 3 อะตอม โดยมีความยาวพันธะระหว่างอะตอมคาร์บอนเท่ากับ $1.42 \text{ \AA}$



ภาพที่ 1 แสดงแลตทิซย่อยของแกรฟีนซึ่งแทนได้ด้วยแลตทิซแบบสามเหลี่ยมสองรูปโดยแต่ละอะตอมในแลตทิซย่อย (A) จะเชื่อมต่อกับอะตอมข้างเคียง (B) 3 อะตอม [1]



(ก)



(ข)

ภาพที่ 2 (ก) แสดงโครงสร้างแถบพลังงานของแกรฟีน โดยแกนตั้งเป็นพลังงานและแกนนอนเป็นโมเมนตัมซึ่งโครงสร้างแถบพลังงานมีลักษณะคล้ายกรวยเชื่อมต่อกัน 6 จุด [1] (ข) โครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ (ซิลิคอน) และแกรฟีน (ขวา) [2]

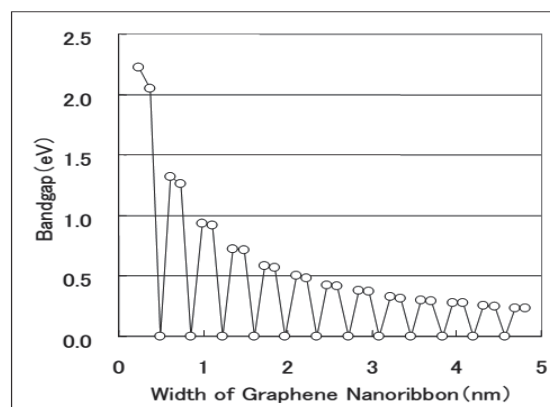
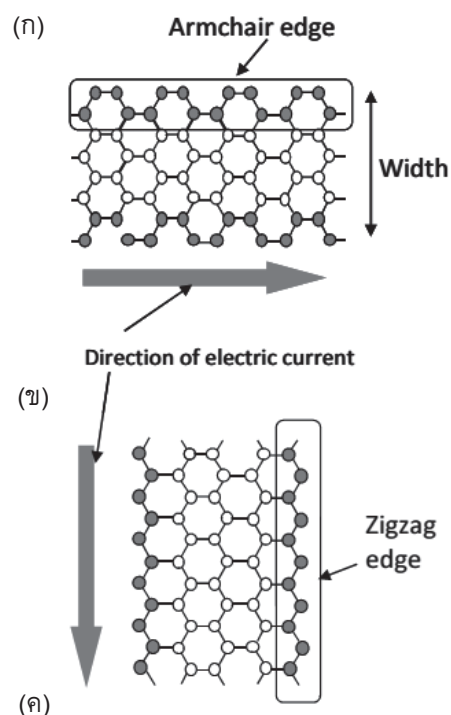
เนื่องจากอิเล็กตรอนในแกรฟีนมีการเคลื่อนที่ในระนาบ 2 มิติ เมื่อทำการพล็อตระหว่างค่าพลังงานและการกระจายโมเมนตัม ดังแสดงในภาพที่ 2 โดยใช้ tight-binding model หรือ TB model พบว่าแกรฟีนเป็นสารกึ่งตัวนำที่ไม่มีช่องว่างแถบพลังงาน (band gap) เลยเนื่องจากแถบเวเลนซ์ (valence band) นั้นสัมผัสกับแถบการนำที่จุดดิแรก (dirac point) ซึ่งจุดดิแรกเป็นจุดกึ่งกลางระหว่างแถบเวเลนซ์และแถบการนำนั่นเองดังแสดงในภาพที่ 2 โครงสร้างแถบพลังงาน (band structure) ในแกรฟีนแตกต่างจากสารกึ่งตัวนำทั่วไปไปคือ

1. ณ จุดที่แถบเวเลนซ์สัมผัสกับแถบการนำหรือที่จุดดิแรก ความชันของโครงสร้างแถบพลังงานจะเป็นเส้นตรงดังแสดงในภาพที่ 2 (ข) ขวา เมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำทั่วไป (ภาพที่ 2(ข) ซ้าย) พบว่าโครงสร้างแถบพลังงานที่จุดสูงสุดของแถบเวเลนซ์และจุดต่ำสุดของแถบการ

น่าจะเป็นเส้นโค้งพาราโบลาและมีความชันน้อยกว่า การที่เส้นความชันของโครงสร้างแถบพลังงานของ แกรฟีนเป็นเส้นตรงแสดงถึงมวลยังผลของอิเล็กตรอน (effective mass of electron) มีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้น แกรฟีนจึงมีความคล่องตัวของอิเล็กตรอน (electron mobility) มากกว่าซึ่งตามทฤษฎีพบว่ามีค่ามากถึง 1000 เท่าของซิลิคอนและจากการทดลองพบว่ามีค่าสูง ถึง $0.25 \times 10^6 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ [3] ซึ่งมีค่ามากกว่าซิลิคอน 100 เท่า

2. แถบเวเลนซ์และแถบการนำของแกรฟีนมีการสัมผัสเชื่อมต่อกันไปเป็นจุดๆอย่างต่อเนื่องซึ่ง แสดงให้เห็นว่าแกรฟีนไม่มีช่องว่างแถบพลังงานหรือ อาจกล่าวได้ว่าช่องว่างแถบพลังงานของแกรฟีนมีค่า เป็นศูนย์นั่นเองซึ่งสมบัติในข้อนี้เองทำให้แกรฟีนไม่ สามารถประพฤติตัวเป็นสารกึ่งตัวนำได้จึงทำให้เกิด อุปสรรคต่อการนำไปใช้งานเป็นทรานซิสเตอร์ใน อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ที่ต้องการอัตราการสลับการเปิด- ปิดที่สูง

ในแกรฟีนนาโนริบบอน สมบัติทางไฟฟ้ายัง ขึ้นอยู่กับลักษณะขอบของแกรฟีนอีกด้วย กล่าวคือ ขอบของแกรฟีนนาโนริบบอนส่งผลต่อสมบัติความเป็น ตัวนำหรือสารกึ่งตัวนำได้ โดยขอบของแกรฟีนนาโน ริบบอนสามารถเกิดขึ้นได้ 2 รูปแบบคือ แบบอาร์มเช (armchair type) และแบบซิกแซก (zigzag type) สำหรับแบบอาร์มเชนั้นที่ขอบของแกรฟีนนาโนริบบอน จะประกอบไปด้วยวงคาร์บอน 4 อะตอมเรียงตัวกันอยู่ ซึ่งแสดงสมบัติความเป็นสารกึ่งตัวนำ ดังแสดงในภาพ ที่ 3(ก) สำหรับแบบซิกแซกที่ขอบของแกรฟีนนาโนริบบอนจะมีการจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนสลับกัน เป็นแบบซิกแซก ดังแสดงในภาพที่ 3(ข) ซึ่งจะแสดง สมบัติความเป็นตัวนำเนื่องจากช่องว่างแถบพลังงานมี 3(ข) ซึ่งจะแสดงสมบัติความเป็นตัวนำเนื่องจาก อาร์มเชนั้นเนื่องจากมีสมบัติความเป็นสารกึ่งตัวนำ ดังนั้นเราจึงสามารถควบคุมช่องว่างแถบพลังงานได้ โดยการปรับเปลี่ยนความกว้างของแถบนาโนริบบอน จากความสัมพันธ์ในภาพที่ 3(ค) จะเห็นได้ว่าช่องว่าง แถบพลังงานจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อความกว้างของ แถบแกรฟีนนาโนริบบอนมีขนาดเล็กลง



ภาพที่ 3 แสดงขอบของแกรฟีนนาโนริบบอน (ก) แบบ อาร์มเช (armchair type) (ข) แบบซิกแซก (zigzag type) และ (ค) ช่องว่างแถบพลังงานที่คำนวณได้ตาม ทฤษฎีของแกรฟีนนาโนริบบอนแบบอาร์มเช [2]

สมบัติการสั่นและสมบัติทางความร้อน

(Vibrational properties and Thermal properties)

นอกจากสมบัติทางไฟฟ้าที่น่าสนใจแล้ว แกรฟีนยังมีสมบัติที่น่าสนใจอีกประการหนึ่งคือสมบัติ การสั่นและสมบัติทางความร้อน โดยปกติแล้วเมื่อมี พลังงานความร้อนเกิดขึ้นจะส่งผลให้แลตทิซของ ของแข็งเกิดการสั่น (lattice vibration) และมีการ ปลดปล่อยพลังงานภาพที่หนึ่งซึ่งเรียกว่าโฟนอน (phonon) หรือควอนตัมของคลื่นแลตทิซหรืออาจ

เรียกว่าควอนตัมเดี่ยวของพลังงานการสั่น โดยโฟนอนจะแพร่ผ่านวัตถุที่มีการสั่นนั้นด้วยความเร็วเสียง จากปรากฏการณ์ดังกล่าวทำให้เราสามารถศึกษาสมบัติทางความร้อน เช่นความจุความร้อนหรือการนำความร้อนของของแข็งได้แกรฟีนแสดงสมบัติของอะคูสติกโฟนอน (acoustic phonon) ได้ [4] โดยค่าการนำความร้อน (thermal conductivity, K) ของแกรฟีนแบบชั้นเดียวส่วนใหญ่เป็นผลมาจากอะคูสติกโฟนอน จากการศึกษาพบว่าความเร็วโฟนอน (phonon velocity) หรือความเร็วเสียงในแกรฟีนมีค่าสูงมากซึ่งความเร็ว โฟนอนจะแปรผันโดยตรงกับค่าการนำความร้อน ดังนั้นยิ่งความเร็วโฟนอนมีค่าสูงมากเท่าใดยิ่งส่งผลให้ค่าการนำความร้อนสูงมากตามไปด้วยเท่านั้น นอกจากนั้นค่าการนำความร้อนในแกรฟีนยังเป็นตัวชี้วัดถึงความสมบูรณ์ในโครงสร้างผลึกได้อีกด้วย โดยค่าการนำความร้อนในแกรฟีนที่มากขึ้นแสดงถึงความบกพร่องในโครงสร้างผลึกที่น้อยลง การที่แกรฟีนมีค่าการนำความร้อนที่สูงจึงถูกเลือกมาใช้เป็นตัวช่วยระบายความร้อนในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ จากการศึกษาพบว่าค่าการนำความร้อนของแกรฟีนเหนือกว่าท่อนาโนคาร์บอน เพชรและสารกึ่งตัวนำดังแสดงในตารางที่ 1 สำหรับทองแดงมีค่าการนำความร้อนประมาณ $4 \text{ W/cm}\cdot\text{K}$ ที่อุณหภูมิห้องแกรฟีนจึงนำความร้อนได้ดีกว่าทองแดงมากกว่า 10 เท่า ค่าการนำความร้อนของแกรฟีนและสารกึ่งตัวนำต่างๆ แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าการนำความร้อนของแกรฟีน ท่อนาโนคาร์บอน เพชร และสารกึ่งตัวนำต่างๆ [2,4]

Material	Thermal Conductivity
	$\text{W/cm}\cdot\text{K}$
Graphene	~ 50
Carbon Nanotube	~ 35
Diamond	$10 \sim 22$
Si	1.4
Ge	0.6
SiC	4.1

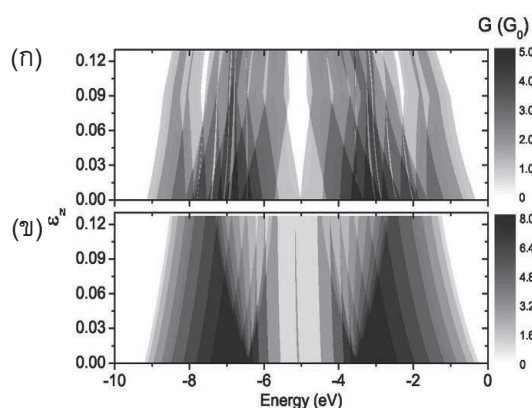
อย่างไรก็ดีเมื่อนำแกรฟีนไปวางบนตัวรองรับ (substrate) เช่น SiO_2 จะเกิดการรั่วไหลของโฟนอนบนรอยต่อระหว่างแกรฟีนและตัวรองรับ SiO_2 ซึ่งเมื่อทำการวัดค่าการนำความร้อนจะมีค่าประมาณ 6

$\text{W/cm}\cdot\text{K}$ ที่อุณหภูมิห้อง [5, 6] ค่าการนำความร้อนของแกรฟีนที่วัดได้นี้แม้จะมีค่าลดลงแต่ก็ยังคงมีค่ามากกว่าค่าการนำความร้อนของทองแดง การลดลงของค่าการนำความร้อนเป็นผลมาจากชนิดของตัวรองรับ กลไกการกระจายของโฟนอนและจำนวนชั้นของแกรฟีน

สมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

แกรฟีนได้รับสมยานามว่าเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงที่สุดในโลก แกรฟีนมีความแข็งแรงมากโดยมีค่าความแข็งแรงต้านการแตกหัก (breaking strength) สูงถึง 42 นิวตันต่อเมตร ค่าความเครียดเชิงกลประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์ ค่ายังโมดูลัส (Young's modulus) สูงถึง 1 เทระปาสกาล [7] และค่าความแข็งแรงภายใน (intrinsic strength) สูงถึง 130 กิกะปาสกาลซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณได้ตามทฤษฎี [7,8] ด้วยสมบัติเชิงกลที่พิเศษเหล่านี้ของแกรฟีนประกอบกับความเบา แข็งแต่ยืดหยุ่นทำให้แกรฟีนถูกนำมาพัฒนาเพื่อใช้ในการสร้างอุปกรณ์ไฟฟ้าเชิงกลระดับจิ๋วประเภท Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) และ Nano Electro Mechanical Systems (NEMS) อย่างไรก็ดีทั้งสมบัติเชิงกลและสมบัติทางไฟฟ้าต่างก็จัดเป็นปัจจัยที่สำคัญทั้งคู่ต่อการเลือกใช้แกรฟีนในงานอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ อย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นการนำไฟฟ้าของแกรฟีนนาโนริบบอนนอกจากจะขึ้นอยู่กับลักษณะของขอบว่าเป็นแบบอาร์มแชร์หรือซิกแซกแล้วยังขึ้นอยู่กับพฤติกรรมเชิงกลอีกด้วย ซึ่งในทางเชิงกลลักษณะทางไฟฟ้าของแกรฟีนนาโนริบบอนสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามความเครียดที่เปลี่ยนไป (strain) [9-13] ดังแสดงในภาพที่ 4 จากภาพที่ 4(ก) จะเห็นได้ว่าสมบัติทางไฟฟ้าของแกรฟีนนาโนริบบอนแบบอาร์มแชร์จะไวต่อการเปลี่ยนแปลงความเค้นเชิงกล (mechanical stress) มากกว่าหรืออาจกล่าวได้ว่า แกรฟีนนาโนริบบอนแบบอาร์มแชร์สามารถเกิดช่องว่างแถบพลังงานหรือแสดงพฤติกรรมแบบสารกึ่งตัวนำได้ภายใต้ความเครียดเพียงเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับแกรฟีนนาโนริบบอนแบบซิกแซกจะเห็นได้ว่าโครงสร้างทางไฟฟ้าจะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าภายใต้ความเครียดและช่องการนำไฟฟ้า (conducting channel) จะอ่อนลงเพียง

เล็กน้อยเมื่อความเครียดเพิ่มสูงขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 4(ข) ดังนั้นแกรฟีนนาโนริบบอนแบบอาร์มแชร์จึงมีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้ในอุปกรณ์ไฟฟ้าเชิงกลมากกว่านั่นเองและดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นว่าแกรฟีนนาโนริบบอนแบบอาร์มแชร์สามารถปรับเปลี่ยนช่องว่างแถบพลังงานได้ตามการปรับเปลี่ยนขนาดของแถบนาโนริบบอน ดังนั้น แกรฟีนนาโนริบบอนแบบอาร์มแชร์จึงถูกนำไปประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่นทรานซิสเตอร์

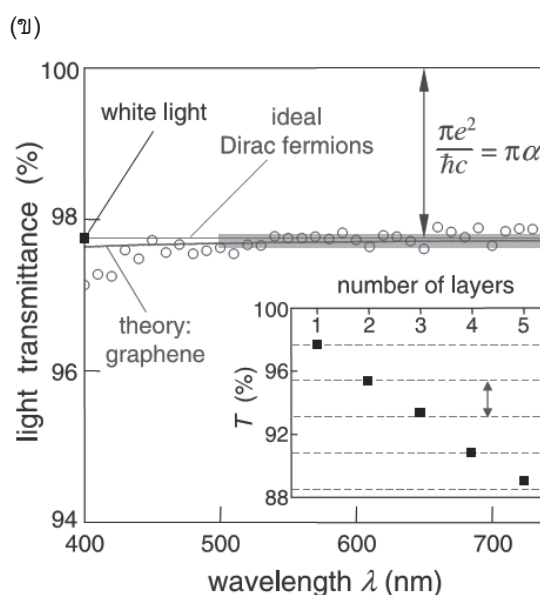
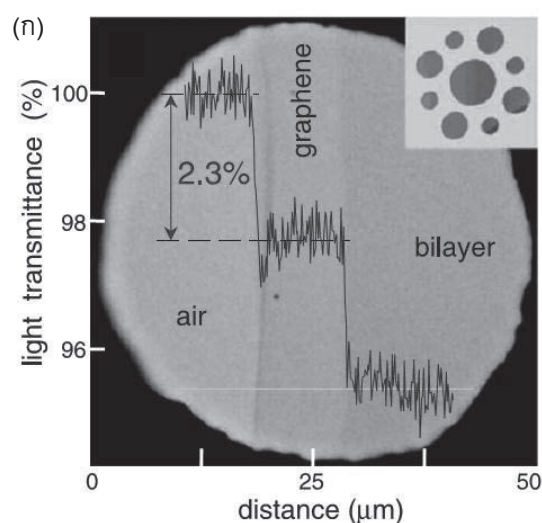


ภาพที่ 4 แผนภาพคอนทัวร์ของการนำไฟฟ้าซึ่งเป็นฟังก์ชันกับระดับพลังงานเฟอร์มี (fermi energy) และความเครียดเชิงกล สำหรับ (ก) แกรฟีนนาโนริบบอนแบบอาร์มแชร์ (ข) แกรฟีนนาโนริบบอนแบบซิกแซก [9]

สมบัติทางแสง (Optical properties)

ความโปร่งแสงของแกรฟีนสามารถทดสอบได้โดยการเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์ที่แสงส่องผ่านได้ในตัวกลางอากาศ แกรฟีนชั้นเดียว และแกรฟีนสองชั้น ดังแสดงในภาพที่ 5 (ก) จากการทดลองพบว่าแกรฟีนที่มีความหนาเพียงหนึ่งชั้นอะตอมจะมีค่าการดูดกลืนแสงที่ประมาณ 2.3 เปอร์เซ็นต์ [14] ของแสงขาวเท่านั้น จากผลการทดลองทางสเปกโตรสโกปี (optical spectroscopy) พบว่าค่าความทึบแสงของแกรฟีนจะไม่ขึ้นกับค่าความยาวคลื่นเลยดังแสดงในภาพที่ 5 (ข) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแกรฟีนมีค่าความโปร่งแสงสูงมากถึง 97-98 เปอร์เซ็นต์ในทุกความยาวคลื่น ดังนั้นแกรฟีนจึงเป็นวัสดุที่น่าสนใจเป็นอย่างยิ่งในการนำมาประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์เชิงแสงต่างๆ และจากการทดลองยังพบอีกด้วยว่าค่าความทึบแสงของแกรฟีนจะเพิ่มขึ้นตามจำนวนชั้นของแกรฟีนที่เพิ่มขึ้น โดยจำนวนชั้นของแกรฟีนที่เพิ่มขึ้น 1 ชั้นจะทำให้ค่า

ความทึบแสงเพิ่มขึ้นประมาณ 2.3 เปอร์เซ็นต์หรืออาจกล่าวได้ว่าค่าความโปร่งแสงจะมีค่าลดลงประมาณ 2.3 เปอร์เซ็นต์ต่อจำนวนชั้นของแกรฟีนที่เพิ่มขึ้น 1 ชั้นนั่นเอง (ภาพที่ 5 (ข) ภาพเล็ก) จากสมบัติทางแสงที่พิเศษของแกรฟีนนี้เองจึงทำให้แกรฟีนถูกนำมาใช้เป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง (transparent conductive electrode) ในจอแสดงผลเซลล์แสงอาทิตย์ หรืออุปกรณ์เชิงแสงต่างๆ



ภาพที่ 5 (ก) เส้นสีน้ำเงินจากซ้ายไปขวาแสดงเปอร์เซ็นต์ความเข้มของแสงขาวที่ส่องผ่านตัวกลางอากาศแกรฟีนชั้นเดียวและสองชั้น โดยความเข้มของแสงขาวมีค่าลดลงประมาณ 2.3 เปอร์เซ็นต์เมื่อส่องผ่านแกรฟีนชั้นเดียว (ข) เปอร์เซนต์ที่แสงส่องผ่านได้ของแกรฟีนแบบชั้นเดียวจะมีค่าประมาณ 97-98 เปอร์เซ็นต์และไม่

ขึ้นกับค่าความยาวคลื่นเลย รูปเล็กแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ที่แสงส่องผ่านได้ต่อจำนวนชั้นของแกรฟีนที่เพิ่มขึ้น [14]

การนำไปประยุกต์ใช้ (Graphene applications)

อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่โค้งงอได้ (Flexible electronics)

ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ในเครื่องใช้ไฟฟ้าหรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์บางประเภท เช่น หน้าจอทีวี แผงเซลล์สุริยะ หน้าจอสัมผัสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ และอุปกรณ์เปล่งแสงอินทรีย์ (Organic Light Emitting Diodes, OLEDs) ต้องการความโปร่งแสงมากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์และความต้านทานแผ่น (sheet resistance) ที่ต่ำ แกรฟีนจึงจัดเป็นตัวเลือกหนึ่งที่มีความโดดเด่นต่อการนำมาพัฒนาและประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์เหล่านี้ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น แกรฟีนชั้นเดียวจะมีการดูดกลืนแสงประมาณ 2.3 เปอร์เซ็นต์หรือให้ความโปร่งแสงสูงมากถึง 97-98 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนั้นยังนำไฟฟ้าได้ดีมากเนื่องจากช่องว่างแถบพลังงานมีค่าเป็นศูนย์

ดังนั้นแกรฟีนจึงจัดเป็นตัวเลือกที่สามารถตอบสนองความต้องการเหล่านี้ได้เป็นอย่างดีทั้งในด้านสมบัติทางแสงและสมบัติทางไฟฟ้า ในปัจจุบันได้มีความพยายามในการนำแกรฟีนมาใช้ทดแทนอินเดียมทินออกไซด์ (Indium Tin Oxide, ITO) [15] เนื่องจากราคาที่ถูกลง ทนต่อสารเคมีและการกัดกร่อน ให้สมบัติเชิงกลที่ดีกว่าและความยืดหยุ่นสูง ซึ่งแกรฟีนมีค่าความเครียดต่อการแตกหัก (fracture strain) สูงกว่าอินเดียมทินออกไซด์ถึง 10 เท่า [16] จึงทำให้เราสามารถผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่โค้งงอและม้วนได้สมบัติเหล่านี้เป็นสมบัติที่แกรฟีนมีความเหนือกว่าอินเดียมทินออกไซด์ทุกประการ ในอนาคตอันใกล้นี้เราคงจะได้เห็นโทรศัพท์มือถือที่ประกอบไปด้วยวงจรอิเล็กทรอนิกส์และจอแสดงผลที่โค้งงอได้ดังแสดงในภาพที่ 6(ก) หรือแผงเซลล์สุริยะที่มีความบางมากและโค้งงอได้ซึ่งฝังตัวอยู่กับอุปกรณ์ที่เราใช้ในชีวิตประจำวันดังแสดงในภาพที่ 6(ข)



(ก)

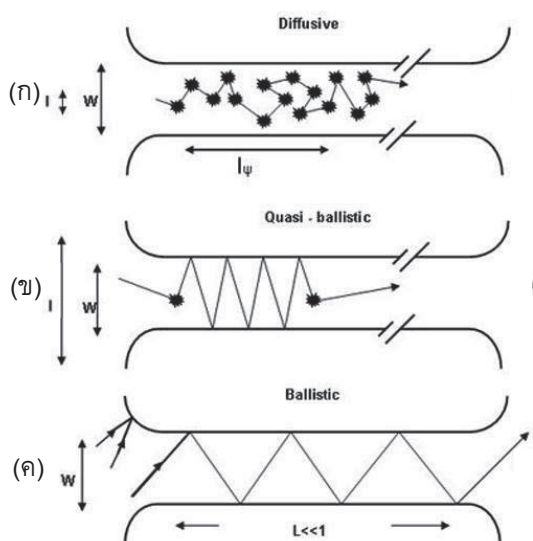


ภาพที่ 6 (ก) โทรศัพท์มือถือที่ประกอบไปด้วยวงจรอิเล็กทรอนิกส์และจอแสดงผลที่โค้งงอได้ [17] (ข) แผงเซลล์สุริยะที่บางและโค้งงอได้ซึ่งสามารถใช้ในการชาร์จแบตเตอรี่มือถือหรือเครื่องเล่น mp3 และสามารถพกพาไปได้ทุกที่ [18]

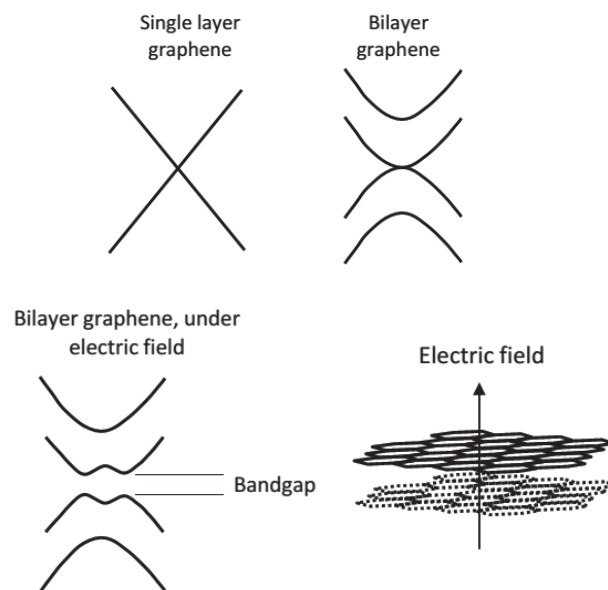
ทรานซิสเตอร์ (Transistor)

ทรานซิสเตอร์คืออุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ขยายสัญญาณไฟฟ้าเปิด/ปิดสัญญาณไฟฟ้า โดยทรานซิสเตอร์จะถูกบรรจุอยู่ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ เช่น คอมพิวเตอร์ เครื่องซักผ้า โทรศัพท์รถยนต์ หรือแม้แต่ไม้กอล์ฟและลูกกอล์ฟเพื่อช่วยวิเคราะห์สวิงในการเล่นกอล์ฟ ในปัจจุบันนักวิทยาศาสตร์มีความพยายามในการนำแกรฟีนมาใช้เป็นทรานซิสเตอร์เพื่อเพิ่มความถี่ให้กับทรานซิสเตอร์โดยคำนึงถึงปัจจัยที่สำคัญ 2 ประการคือ (i) แกรฟีนมีความคล่องตัวของอิเล็กตรอนสูงมาก ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น (ii) อิเล็กตรอนในแกรฟีนมีการเคลื่อนที่แบบบอลลิสติก (ballistic movement) หรือชิปนาวูธ (ภาพที่ 7) ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในแนวเส้นตรงโดยถือว่าความต้านทานไฟฟ้าจากการกระเจิงของอิเล็กตรอนมีผลน้อยมากจนตัดทิ้งได้

ผลจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนแบบบอลลิสติกทำให้เกิดความร้อนและความต้านทานในวงจรน้อยกว่าเมื่อเปรียบ เทียบกับการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำอื่นๆ ซึ่งมีการเคลื่อนที่แบบสุ่ม (diffusive) อย่างไรก็ตามเนื่องจากช่องว่างแถบพลังงานของแกรฟีนมีค่าเป็นศูนย์จึงทำให้แกรฟีนไม่สามารถประพฤติตัวเป็นสารกึ่งตัวนำได้ซึ่งเป็นอุปสรรคต่อการนำไปใช้งานเป็นทรานซิสเตอร์ที่ต้องการอัตราการสลับการเปิดปิดที่สูงข้อเสียเหล่านี้สามารถแก้ไขได้โดยการใช้แกรฟีนแบบสองชั้น (bilayer graphene) ซึ่งสามารถทำให้เกิดช่องว่างแถบพลังงานได้โดยการให้สนามไฟฟ้าเข้าไป ดังแสดงในภาพที่ 8 หรืออาจใช้แกรฟีนนาโนริบบอนแบบอาร์มแซซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนขนาดของช่องว่างแถบพลังงานได้ตามความกว้างของแถบนาโนริบบอน ดังแสดงในภาพที่ 3

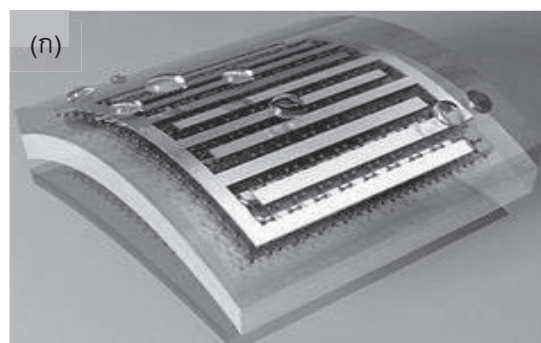


ภาพที่ 7 แสดงการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน (ก) แบบสุ่ม (diffusive) (ข) แบบกึ่งบอลลิสติก (quasi ballistic) (ค) แบบบอลลิสติก (ballistic) [19]



ภาพที่ 8 โครงสร้างแถบพลังงานของแกรฟีนชั้นเดียว แกรฟีนสองชั้นและแกรฟีนสองชั้นภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าซึ่งจะก่อให้เกิดช่องว่างแถบพลังงานเมื่อมีการให้สนามไฟฟ้าเข้าไป [2]

ในปัจจุบันนักวิทยาศาสตร์จากมหาวิทยาลัยแคลิฟอร์เนียสามารถสร้างทรานซิสเตอร์จากแกรฟีนที่มีความถี่สูงมากถึง 300 กิกะเฮิรตซ์ได้เป็นผลสำเร็จ [20] และยังมีงานวิจัยที่รายงานถึงการผลิตทรานซิสเตอร์จากแกรฟีนบนแผ่นพลาสติกที่โค้งงอได้เป็นผลสำเร็จโดยทรานซิสเตอร์ดังกล่าวสามารถทำงานได้ที่ความถี่สูงมากถึง 25 กิกะเฮิรตซ์ดังแสดงในภาพที่ 9 [21] ดังนั้นจึงไม่เป็นเรื่องที่น่าแปลกใจเลยถ้าในอนาคตอันใกล้นี้เราจะมีคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลที่สามารถทำงานด้วยความเร็วที่สูงมากสำหรับการใช้งานในชีวิตประจำวัน



ภาพที่ 9 ทรานซิสเตอร์ที่โค้งงอได้จากแกรฟีนซึ่งให้ความถี่สูงมากถึง 25 กิกะเฮิรตซ์ [21]

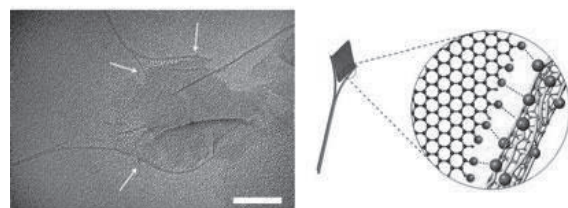
วัสดุเก็บพลังงาน (Energy storage materials)

ในปัจจุบันมีการศึกษาวิจัยเป็นอย่างมากในการนำแกรฟีนมาใช้ในแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน ปกติขั้วแคโทดในแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนมักจะพบปัญหาเกี่ยวกับการนำไฟฟ้าที่ไม่ดีซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยการเพิ่มปริมาณแกรไฟต์และคาร์บอนแบล็คในขั้วอิเล็กโทรด [16] อย่างไรก็ตามเนื่องจากแกรฟีนมีสมบัติการนำไฟฟ้าที่ยอดเยี่ยม มีพื้นที่ผิวมากและประกอบกับโครงสร้างของแกรฟีนที่มีลักษณะเป็นแผ่นซึ่งเอื้อต่อการเกิดการแทรกชั้น (intercalation) ดังนั้นแกรฟีนจึงถูกเลือกนำมาใช้เป็นสารเติมแต่งเพื่อช่วยปรับปรุงสมบัติการนำไฟฟ้า โดยแกรฟีนจะถูกเตรียมให้อยู่ในรูปของวัสดุนาโนคอมโพสิตรูปแบบต่างๆ เช่นวัสดุนาโนคอมโพสิตที่มีโครงสร้างแบบอนุภาคนาโนในรูปโลหะแกนกลางและเปลือกหุ้ม (core-shell system) [22] หรือวัสดุนาโนคอมโพสิตที่มีโครงสร้างแบบแซนด์วิช [23] ซึ่งจะช่วยให้อำนาจการนำไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนั้นแกรฟีนยังมียังสมบัติการนำความร้อนที่ดีมาก ดังนั้นการใช้แกรฟีนเป็นวัสดุนาโนคอมโพสิตในแบตเตอรี่จะช่วยลดความร้อนจากภาระงานซึ่งเกิดจากการใช้งานแบตเตอรี่ได้ สำหรับวัสดุกักเก็บพลังงานรูปแบบอื่นเช่น ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ แกรฟีนจะถูกนำมาใช้เป็นวัสดุนาโนคอมโพสิตร่วมกับท่อนาโนคาร์บอนซึ่งให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าการใช้แกรฟีนหรือท่อนาโนคาร์บอนเพียงอย่างเดียว [24] นอกจากนั้นแกรฟีนยังถูกนำมาใช้เป็นตัวรองรับสำหรับอนุภาคนาโนของโลหะบางประเภทเช่น แพลทินัมเพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการแยกแกลสไฮโดรเจนเป็นอิเล็กตรอนและโปรตอนในเซลล์เชื้อเพลิงแบบ PEM อีกด้วย จากการทดลองพบว่าแกรฟีนเป็นตัวรองรับที่ดีและยังช่วยลดขนาดของอนุภาคโลหะแพลทินัมบนแผ่นแกรฟีนให้อยู่ในระดับนาโนเมตรได้อีกด้วยซึ่งส่งผลให้ความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้น [25]

วัสดุพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิต (Polymer nanocomposite materials)

แกรฟีนถูกนำมาใช้เป็นสารเติมแต่งเพื่อปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ เช่น สมบัติเชิงกล สมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติทางความร้อน เมื่อเปรียบเทียบกับ

กับท่อนาโนคาร์บอนพบว่าแกรฟีนมีอัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูงกว่าอันเป็นผลมาจากรูปทรงของท่อนาโนคาร์บอนที่เป็นรูปทรงกระบอกทำให้พื้นที่ผิวด้านในไม่อาจสัมผัสกับพอลิเมอร์ได้ [26] จากลักษณะที่พิเศษนี้เองทำให้แกรฟีนมีความจำเพาะเจาะจงต่อการนำไปใช้งานในการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ได้ดีกว่าและที่มากกว่านั้นคือแกรฟีนสามารถสังเคราะห์ได้ในปริมาณมากและราคาถูกจึงส่งผลให้ต้นทุนการสังเคราะห์แกรฟีนต่ำกว่าและต่ำกว่าต้นทุนของการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนมาก [27, 28] พอลิเมอร์หลายชนิดถูกนำมาใช้เป็นแมทริกซ์ร่วมกับแกรฟีนเพื่อสังเคราะห์วัสดุคอมโพสิต เช่น พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ [29, 30] พอลิสไตรีน [31] เมื่อทำการทดสอบสมบัติของวัสดุคอมโพสิตเหล่านี้พบว่าการใช้แกรฟีนเป็นสารเติมแต่งร่วมกับพอลิเมอร์จะให้สมบัติต่างๆ ที่ดีกว่าไม่ว่าจะเป็นสมบัติเชิงกล สมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติทางความร้อน ในปัจจุบันนักวิทยาศาสตร์สามารถสังเคราะห์เส้นใยคอมโพสิตที่มีความเหนียวมากจากแกรฟีนออกไซด์ ท่อนาโนคาร์บอนและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ได้เป็นผลสำเร็จโดยถือว่าเป็นเส้นใยที่มีความแข็งแรงที่สุดในโลก ความแข็งแรงนี้เป็นผลมาจากพันธะไฮโดรเจนระหว่างแกรฟีนออกไซด์และท่อนาโนคาร์บอนดังแสดงในภาพที่ 10 [32]



ภาพที่ 10 แสดงพันธะไฮโดรเจนระหว่างแกรฟีนออกไซด์และหมู่ฟังก์ชันบนท่อนาโนคาร์บอนซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุกล่าวโดยสรุป แกรฟีนถูกนำมาใช้เป็นสารเติมแต่งให้กับพอลิเมอร์เนื่องจากสมบัติและลักษณะพิเศษที่สำคัญดังต่อไปนี้คือ [33] (i) แกรฟีนมีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูงกว่าส่งผลให้มีพื้นที่ผิวในการสัมผัสกับพอลิเมอร์ได้มากกว่า (ii) โครงสร้างของแกรฟีนที่เป็นแผ่นแบนเรียบจะช่วยลดความต้านทานความร้อนที่รอยต่อระหว่างพื้นผิวและความต้านทานไฟฟ้าได้ (iii) แกรฟีนมีพื้นที่ผิวและรอยย่นมากจึงส่งผลให้

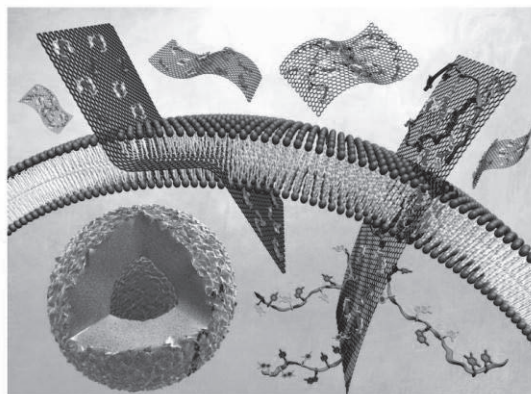
อันตรกิริยาที่รอยต่อระหว่างผิวของแกรฟีนและพอลิเมอร์เกิดขึ้นได้มากกว่าซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ (iv) แกรฟีนสามารถสังเคราะห์ได้ในปริมาณมากและมีราคาถูกจึงส่งผลให้การสังเคราะห์แกรฟีนมีต้นทุนต่ำซึ่งทำให้เราสามารถผลิตวัสดุคอมโพสิตที่มีสมบัติที่ดีแต่ราคาถูกได้

เซ็นเซอร์ (Sensors)

เนื่องจากแกรฟีนเป็นวัสดุ 2 มิติที่บางแต่แข็งแรง นำไฟฟ้าได้ดี มีความไวต่อสิ่งแวดล้อมมาก และมีความบกพร่องในโครงสร้างผลึก (defect) น้อยมาก แกรฟีนจึงถูกนำมาประยุกต์ใช้เป็นเซ็นเซอร์ที่มีความไวสูงและตรวจวัดได้ละเอียดมาก สาเหตุจากการที่แกรฟีนมีความไวสูงเนื่องมาจากอิเล็กตรอนในแกรฟีนมีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่สูงมาก ดังนั้นการถ่ายเทหรือแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนระหว่างแกรฟีนและสารตรวจวัดจึงเกิดได้ดีมากนั่นเอง นอกจากนั้นแกรฟีนยังมีพื้นที่ผิวมากหรือประมาณ 2 เท่าของท่อนาโนคาร์บอนดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นจึงส่งผลให้แกรฟีนมีพื้นที่ผิวสัมผัสต่อสารตรวจวัดมากตามไปด้วย แกรฟีนถูกนำมาใช้เป็นเซ็นเซอร์ทางเคมี เซ็นเซอร์ชีวภาพและแก๊สเซ็นเซอร์ [34-36] ยกตัวอย่างเช่นใช้เป็นเซ็นเซอร์สำหรับการตรวจหาปริมาณกลูโคส คอเลสเทอรอล ฮีโมโกลบินและดีเอ็นเอ [37] สำหรับการนำแกรฟีนมาใช้เป็นเซ็นเซอร์ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในปัจจุบันโนเกียได้ทำการจดสิทธิบัตรสำหรับการใช้แกรฟีนเป็นเซ็นเซอร์ในการจับโฟตอนซึ่งสามารถจับโฟตอนของแสงในช่วงสเปกตรัมที่ตามองเห็นได้ไปจนถึงช่วงรังสีอินฟราเรดและอัลตราไวโอเลต ซึ่งจากการค้นพบนี้จะส่งผลให้เซ็นเซอร์สำหรับการถ่ายภาพมีขนาดเล็กลงและบางลงมากกว่าการใช้เซ็นเซอร์แบบ CMOS และเนื่องจากแกรฟีนให้ค่าความโปร่งแสงมากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ จึงทำให้เซ็นเซอร์จากแกรฟีนสามารถทำงานได้เป็นอย่างดีแม้ในสภาพที่มีแสงน้อย อีกทั้งการสังเคราะห์แกรฟีนยังมีต้นทุนที่ต่ำจึงทำให้เราสามารถผลิตเซ็นเซอร์ที่มีประสิทธิภาพดีแต่ราคาถูกได้อย่างไรก็ตามขณะนี้ยังคงเป็นเพียงการจดสิทธิบัตรเพื่อคุ้มครองการประดิษฐ์คิดค้นหรือการออกแบบผลิตภัณฑ์ แต่คาดว่าเราคงได้มีโอกาสเห็นเซ็นเซอร์จากแกรฟีนในอนาคตอันใกล้อย่างแน่นอน [38, 39]

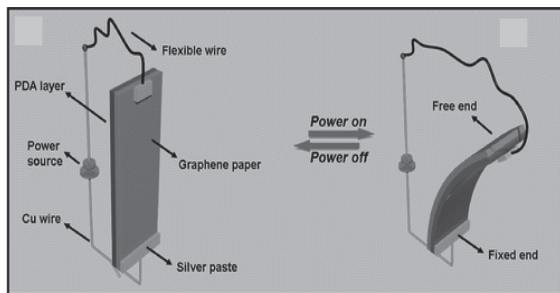
การใช้งานในทางชีวภาพ (Bioapplications)

จากการที่แกรฟีนมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากสามารถตกแต่งหมู่ฟังก์ชันลงไปได้ (functionalized graphene) [40] และมี π อิเล็กตรอนซึ่งไม่ได้อยู่ประจำที่ (delocalized electrons) แต่สามารถเคลื่อนที่ไปได้ทั่ว ดังนั้นแกรฟีนจึงสามารถรวมตัวเข้ากับโมเลกุลของยาเพื่อทำหน้าที่เป็นระบบนำส่งยาได้ [16] นอกจากนั้นแกรฟีนยังจัดเป็นสารที่ชอบไขมัน (lipophilic) ดังนั้น เราจึงสามารถใช้แกรฟีนเป็นตัวส่งผ่านยาเข้าสู่ภายในเซลล์ได้โดยตรงผ่านทางเยื่อหุ้มเซลล์ ดังแสดงในภาพที่ 11



ภาพที่ 11 แกรฟีนที่มีการตกแต่งหมู่ฟังก์ชันให้มีความชอบน้ำและไขมันสามารถสร้างอันตรกิริยากับเยื่อหุ้มเซลล์เพื่อใช้ในการปลดปล่อยยาเข้าสู่ภายในเซลล์ได้โดยตรง [16]

สำหรับการใช้งานในทางชีวภาพด้านอื่นๆ ในปัจจุบันนักวิทยาศาสตร์สามารถสร้างแอคชูเอเตอร์ (actuator) ที่สามารถควบคุมการเคลื่อนไหวเมื่อมีการให้กระแสไฟฟ้าเข้าไปได้เป็นผลสำเร็จ โดยแอคชูเอเตอร์นี้ถูกสร้างขึ้นจากแกรฟีนและพอลิไดอะเซทิลีน (ภาพที่ 12) ซึ่งให้อัตราการตอบสนองที่เร็วมากและมีความถี่เรโซแนนท์สูง (resonant frequency) [41] แอคชูเอเตอร์นี้สามารถนำไปใช้ในหุ่นยนต์เพื่อควบคุมทิศทางและการเคลื่อนไหวได้และอาจนำไปใช้เป็นกล้ามเนื้อเทียมในอนาคตได้อีกด้วย



ภาพที่ 12 แอคชูเอเตอร์จากแกรฟีนและพอลิไดอะเซทิลีนที่สามารถควบคุมการเคลื่อนไหวได้เมื่อมีการให้กระแสไฟฟ้าเข้าไป [41]

สรุปผลการศึกษา

แกรฟีนเป็นวัสดุคาร์บอนรูปแบบใหม่ที่มีสมบัติทางไฟฟ้า สมบัติการสั่น สมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกลและสมบัติทางแสงที่ดีมาก จากสมบัติที่พิเศษเหล่านี้จึงทำให้นักวิทยาศาสตร์ต่างให้ความสนใจในการนำแกรฟีนมาพัฒนาเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดสำหรับการนำไปใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ รวมไปถึงการนำไปใช้เป็นวัสดุคอมโพสิตร่วมกับวัสดุชนิดอื่นๆ เช่น พอลิเมอร์และอนุภาคนาโนของโลหะ เพื่อให้ได้วัสดุคอมโพสิตชนิดใหม่ที่มีสมบัติที่ดีขึ้นในปัจจุบันแกรฟีนยังถูกวิจัยและพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อนำไปใช้ในทางชีวภาพ เช่น ใช้เป็นระบบนำส่งยาในสิ่งมีชีวิตซึ่งจะก่อให้เกิดประโยชน์อย่างมหาศาลกับมวลมนุษย์ ดังนั้นแกรฟีนจึงจัดเป็นวัสดุมหัศจรรย์แห่งทศวรรษนี้และในอนาคตที่จะมาเปลี่ยนโลกและการดำรงชีวิตของมนุษย์ได้อย่างน่าอัศจรรย์

References

1. Cooper DR, D'Anjou B, Ghattamaneni N, Harack B, Hilke M, Horth A, et al. Experimental Review of Graphene. ISRN Condensed Matter Physics. 2012;2012:56.
2. Iyechika Y, Application of Graphene to High-Speed Transistors: Expectations and Challenges. Science and Technology Trends Quarterly Review. 2010;37:76-92.
3. Orlita M, Faugeras C, Plochocka P, Neugebauer P, Martinez G, Maude DK, et al. Approaching the Dirac Point in High-Mobility Multilayer Epitaxial Graphene. Physical Review Letters. 2008;101(26):267601.
4. Saito K, Nakamura J, Natori A. Ballistic thermal conductance of a graphene sheet. Physical Review B. 2007;76(11):115409.
5. Seol JH, Jo I, Moore AL, Lindsay L, Aitken ZH, Pettes MT, et al. Two-Dimensional Phonon Transport in Supported Graphene. Science. 2010 April 9, 2010;328(5975):213-6.
6. Seol JH, Jo I, Yao Z, Moore AL, Shi L. Thermal Conductivity Measurement of Graphene Exfoliated on Silicon Dioxide. Journal of Heat Transfer. [doi: 10.1115/1.4002608]. 2010;133(2):022403-.
7. Lee C, Wei X, Kysar JW, Hone J. Measurement of the Elastic Properties and Intrinsic Strength of Monolayer Graphene. Science. 2008 July 18, 2008;321(5887):385-8.
8. Liu F, Ming P, Li J. Ab initio calculation of ideal strength and phonon instability of graphene under tension. Physical Review B. 2007;76(6):064120.
9. Poetschke M, Rocha CG, Foa Torres LEF, Roche S, Cuniberti G. Modeling graphene-based nanoelectromechanical devices. Physical Review B. 2010;81(19):193404.
10. Erdogan E, Popov I, Rocha CG, Cuniberti G, Roche S, Seifert G. Engineering carbon chains from mechanically stretched graphene-based materials. Physical Review B. 2011;83(4):041401.
11. Hod O, Scuseria GE. Electromechanical Properties of Suspended Graphene Nanoribbons. Nano Letters. [doi: 10.1021/nl900913c]. 2009 2009/07/08;9(7):2619-22.

12. Topsakal M, Ciraci S. Elastic and plastic deformation of graphene, silicene, and boron nitride honeycomb nanoribbons under uniaxial tension: A first-principles density-functional theory study. *Physical Review B*. 2010; 81 (2):024107.
13. Topsakal M, Bagci VMK, Ciraci S. Current-voltage (I-V) characteristics of armchair graphene nanoribbons under uniaxial strain. *Physical Review B*. 2010;81(20):205437.
14. Nair RR, Blake P, Grigorenko AN, Novoselov KS, Booth TJ, Stauber T, et al. Fine Structure Constant Defines Visual Transparency of Graphene. *Science*. 2008 June 6, 2008;320(5881):1308.
15. Koh WS, Gan CH, Phua WK, Akimov YA, Bai P. The Potential of Graphene as an ITO Replacement in Organic Solar Cells: An Optical Perspective. *Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE Journal of*. 2014;20(1):4000107-.
16. Novoselov KS, Falko VI, Colombo L, Gellert PR, Schwab MG, Kim K. A roadmap for graphene. *Nature*. [10.1038/nature11458]. 2012;490(7419):192-200.
17. Graphene applications. Available from: URL: <http://www.mechanicalengineeringblog.com/tag/graphene-in-electronics> Accessed September 6, 2013.
18. Graphene: The Next Wonder Material? Available from: URL: <http://www.acs.org/content/acs/en/education/resources/highschool/chemmatters/past-issues/archive-2012-2013/graphene.html> Accessed September 6, 2013.
19. Electron Transport in Semiconductors. Available from: URL: <http://www.asdn.net/asdn/electronics/transport.shtml> Accessed September 6, 2013.
20. Liao L, Lin Y-C, Bao M, Cheng R, Bai J, Liu Y, et al. High-speed graphene transistors with a self-aligned nanowire gate. *Nature*. [10.1038/nature09405]. 2010;467(7313):305-8.
21. Lee J, Ha T-J, Li H, Parrish KN, Holt M, Dodabalapur A, et al. 25 GHz Embedded-Gate Graphene Transistors with High-K Dielectrics on Extremely Flexible Plastic Sheets. *ACS Nano*. [doi: 10.1021/nn403487y]. 2013.
22. Yang S, Feng X, Ivanovici S, Müllen K. Fabrication of Graphene-Encapsulated Oxide Nanoparticles: Towards High-Performance Anode Materials for Lithium Storage. *Angewandte Chemie International Edition*. 2010;49(45):8408-11.
23. Xu M, Wang L, Zhao X, Song J, Xie H, Lu Y, et al. Na₃V₂O₂(PO₄)₂F/graphene sandwich structure for high-performance cathode of a sodium-ion battery. *Physical Chemistry Chemical Physics*. [10.1039/C3CP52408F]. 2013;15(31):13032-7.
24. Chartarrayawadee W, Moulton S, Too C, Kim B, Yepuri R, Romeo T, et al. Facile synthesis of reduced graphene oxide/MWNTs nanocomposite supercapacitor materials tested as electrophoretically deposited films on glassy carbon electrodes. *J Appl Electrochem*. 2013 2013/09/01;43(9):865-77.
25. Chartarrayawadee W, Moulton SE, Li D, Too CO, Wallace GG. Novel composite graphene/platinum electro-catalytic electrodes prepared by electrophoretic deposition from colloidal solutions. *Electrochimica Acta*. 2012;60(0): 213-23.
26. Stankovich S, Dikin DA, Dommett GHB, Kohlhaas KM, Zimney EJ, Stach EA, et al. Graphene-based composite materials. *Nature*. [10.1038/nature04969]. 2006; 442(7100): 282-6.

27. Mass production of high quality graphene: An analysis of worldwide patents. Available from: URL: <http://www.nanowerk.com/spotlight/spotid=25744.php> Accessed September 6, 2013.
28. Cost is the main differentiator between graphene and other nanocarbons. Available from: URL: <http://www.printedelectronicsworld.com/articles/cost-is-the-main-differentiator-between-graphene-and-other-nanocarbons-00005225.asp> Accessed September 6, 2013.
29. Wu S-D, Lv W, Xu J, Han D, Chen X, Wang P, et al. A graphene/poly(vinyl alcohol) hybrid membrane self-assembled at the liquid/air interface: enhanced mechanical performance and promising saturable absorber. *Journal of Materials Chemistry*. [10.1039/C2JM32326E]. 2012;22(33):17204-9.
30. Wang J, Wang X, Xu C, Zhang M, Shang X. Preparation of graphene/poly(vinyl alcohol) nanocomposites with enhanced mechanical properties and water resistance. *Polymer International*. 2011;60(5):816-22.
31. Qi X-Y, Yan D, Jiang Z, Cao Y-K, Yu Z-Z, Yavari F, et al. Enhanced Electrical Conductivity in Polystyrene Nanocomposites at Ultra-Low Graphene Content. *ACS Applied Materials & Interfaces*. [doi:10.1021/am200628c]. 2011 2011/08/24;3(8):3130-3.
32. The world's strongest fibres. Available from: URL: <http://www.rsc.org/chemistryworld/News/2012/February/world-strongest-toughest-fibre-graphene-carbon-nanotubes.asp> Accessed September 6, 2013.
33. Du J, Cheng H-M. The Fabrication, Properties, and Uses of Graphene/Polymer Composites. *Macromolecular Chemistry and Physics*. 2012;213(10-11):1060-77.
34. Yang G, Lee C, Kim J, Ren F, Pearton SJ. Flexible graphene-based chemical sensors on paper substrates. *Physical Chemistry Chemical Physics*. [10.1039/C2CP43717A]. 2013;15(6):1798-801.
35. Ohno Y, Maehashi K, Matsumoto K. Chemical and biological sensing applications based on graphene field-effect transistors. *Biosensors and Bioelectronics*. 2010;26(4):1727-30.
36. Yuan W, Shi G. Graphene-based gas sensors. *Journal of Materials Chemistry A*. [10.1039/C3TA11774J]. 2013;1(35):10078-91.
37. Kuila T, Bose S, Khanra P, Mishra AK, Kim NH, Lee JH. Recent advances in graphene-based biosensors. *Biosensors and Bioelectronics*. 2011;26(12):4637-48.
38. Nokia photo sensor patent looks to take the hump out of Pureview Cameras. Available from: URL: <http://www.wpcentral.com/nokia-photo-sensor-patent-looks-take-hump-out-pureview-cameras> Accessed September 6, 2013.
39. After PureView, what's next frontier for Nokia imaging? How about graphene based photo-sensors. Available from: URL: <http://www.unwiredview.com/2012/08/16/after-pureview-whats-next-frontier-for-nokia-imaging-how-about-graphene-based-photo-sensors> Accessed September 6, 2013.
40. วิศณุสรณ์ ชาติอารยะวดี. แกรฟีนตอนที่ 1: การสังเคราะห์คาร์บอนรูปแบบใหม่. วารสารเศรษฐระพะเยา. 2556;6(1):10-24.
41. Liang J, Huang L, Li N, Huang Y, Wu Y, Fang S, et al. Electromechanical Actuator with Controllable Motion, Fast Response Rate, and High-Frequency Resonance Based on Graphene and Polydiacetylene. *ACS Nano*. [doi: 10.1021/nn3006812]. 2012 2012/05/22; 6(5):4508-19.