

วารสารฟิสิกส์ไทย

Thai Journal of Physics

วารสารสำหรับผู้รักและสนใจในแวดวงฟิสิกส์

ISSN 0857-1449

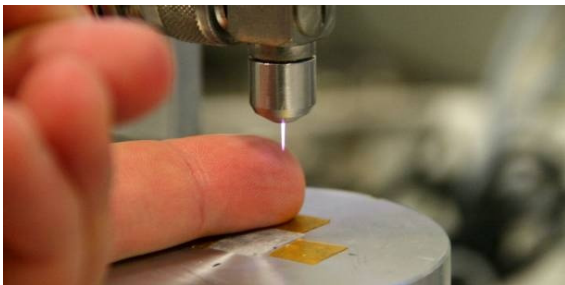
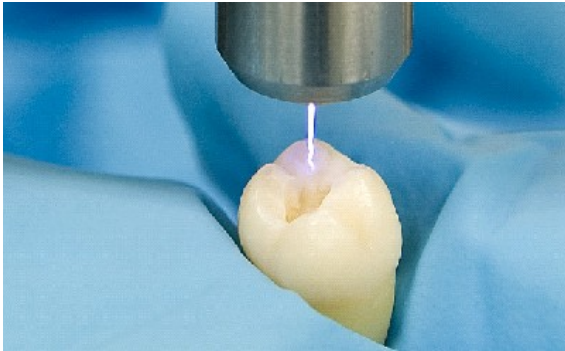
ปีที่ 27 ฉบับที่ 1 : มีนาคม 2553 – พฤษภาคม 2553



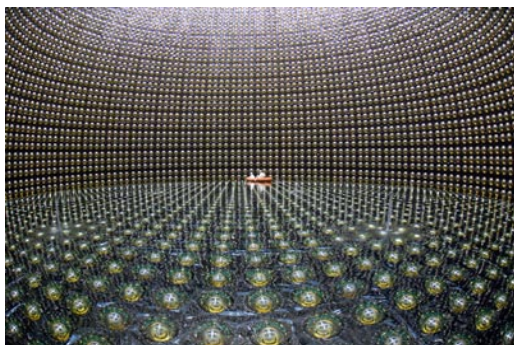
ฟิสิกส์ของสเก็ตน้ำแข็ง

แกรฟีน (Graphene) วัสดุน้ำทิ้งจากปลายดินสอ
ดิเรกอิเล็กทรอนิกส์ในแกรฟีนกับก้าวแรกของการเริ่มต้นยุคแห่ง
เทคโนโลยีจากการรวมสัมพัทธภาพและควอนตัมเข้าด้วยกัน
หลักการของไฟเบอร์ออปติกใจโรสโคป
การวิเคราะห์โครงสร้างระดับนาโน
ด้วยเทคนิคการวัดการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์และการคำนวณ

รูปประกอบจากสรุปข่าว หน้า 2 – 4



พลาสติกเย็น

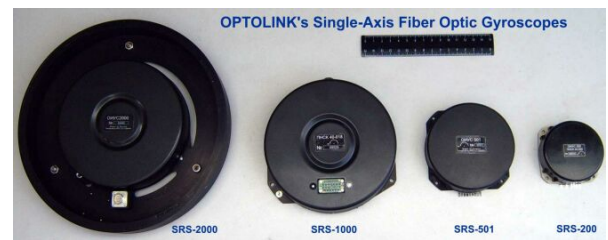


The SuperKamiokande detector

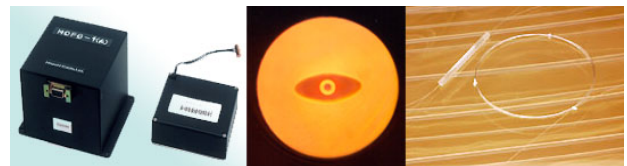


ส่วนหนึ่งในอุโมงค์ของ Neutrino Experimental Facility
ณ ห้องปฏิบัติการ J-PARC ประเทศญี่ปุ่น

รูปประกอบจากบทความ “หลักการของไฟเบอร์ออปติก
ใยโรสโคป” หน้า 5 – 12



Commercial single axis fiber optical gyroscope



Commercial fiber optical gyroscope

รูปประกอบจากบทความ “ฟิสิกส์ของสเก็ตน้ำแข็ง”
หน้า 13 – 18



รูปที่ 5

(มีต่อปกหลังด้านใน)

สารบัญ

สวัสดิ์	1
สรุปข่าว	2
หลักการของไฟเบอร์ออปติกโครสโคป	5
พรเทพ นิศามณีพงษ์	
ฟิสิกส์ของสเก็ดน้ำแข็ง	13
สตรีรัตน์ กำแพงแก้ว โฮดัก	
แกรฟีน (Graphene) วัสดุที่น่าทึ่งจากปลายดินสอ	19
สิริโชค จิงถาวรธรรม	
การวิเคราะห์โครงสร้างระดับนาโน	25
ด้วยเทคนิคการวัดการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์และการคำนวณ	
จิรโรจน์ ต.เทียนประเสริฐ	
ดิเรกอิเล็กทรอนิกส์ในแกรฟีนกับก้าวแรกของการเริ่มต้นยุค	29
แห่งเทคโนโลยีจากการรวมสัมพัทธภาพและควอนตัมเข้าด้วยกัน	
บำเหน็จ สุขชมโฉม	



สวัสดิ์

กลับมาพบกันอีกครั้งหนึ่งกับวารสารฟิสิกส์ไทย ในช่วงฤดูฝน สำหรับในฉบับนี้ทางวารสารมีบทความที่น่าสนใจหลายบทความ โดยเฉพาะอย่างยิ่งมีถึงสองบทความด้วยกันที่เกี่ยวข้องกับสารที่กำลังเป็นที่สนใจอย่างกว้างขวางในปัจจุบันนั่นคือ แกรฟีน (Graphene) ทั้งนี้เนื่องจากแกรฟีนเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติพิเศษหลายอย่างทั้งคุณสมบัติเชิงการนำไฟฟ้า การนำความร้อน สมบัติเชิงกล ที่ทำให้แกรฟีนเป็นวัสดุที่เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้ในงานด้านเซมิคอนดักเตอร์ อิเล็กทรอนิกส์ สปินทรอนิกส์ และอื่นๆ นอกจากนั้นเรายังมีเรื่องราวของการวิเคราะห์โครงสร้างสารในระดับนาโนด้วยเทคนิคการวัดการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ (X-ray absorption spectroscopy) และเรื่องราวของไฟเบอร์ออปติกโครสโคป และในฉบับนี้ทางวารสารได้รับเกียรติจากอาจารย์สตรีรัตน์ กำแพงแก้ว โฮดัก ที่นอกจากจะเขียนบทความเรื่องอธิบายฟิสิกส์ของสเก็ดน้ำแข็งให้แล้ว ยังกรุณาเป็นแบบขึ้นปกวารสารให้ในฉบับนี้ ซึ่งอาจารย์นอกจากจะเป็นนักฟิสิกส์ที่เก่งกาจแล้ว ยังเป็นนักสเก็ดน้ำแข็งที่มีฝีมือยอดเยี่ยมอีกด้วย ซึ่งเป็นตัวอย่างที่ดีที่แสดงให้เห็นว่านักฟิสิกส์นั้นไม่จำเป็นต้องจะเก่งแค่ฟิสิกส์เพียงอย่างเดียวเสมอไป

กองบรรณาธิการ

กองบรรณาธิการ ชานุกิจ คันถ่อง, ศุภกร รักใหม่, วันทนา คล้ายสุบรรณ, ฉัตรชัย ศรีนิติวรพงศ์, นฤมล สุวรรณจันทร์ดี, พวงรัตน์ ไพเราะ, พรทิพย์ สุดเมือง, ศิรามาส โกมลจินดา, พรรณ วัฒนกลวิษฐ์ หัวหน้ากองบรรณาธิการ ประพนธ์ คล้ายสุบรรณ ที่ปรึกษากองบรรณาธิการ สมสร สิงขรัตน์ ภาพและออกแบบปก ประพนธ์ คล้ายสุบรรณ เลขานุการกองบรรณาธิการ ประพนธ์ คล้ายสุบรรณ จำนวนพิมพ์ 2,000 เล่ม

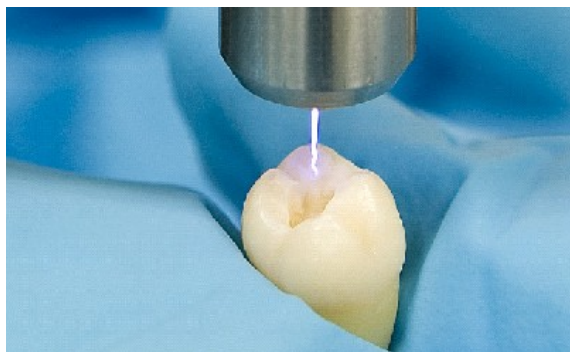
ติดต่อกองบรรณาธิการ วารสารฟิสิกส์ไทย สมาคมฟิสิกส์ไทย อาคารสุรพัฒน์ 3 ถนนมหาวิทยาลัย ต.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000 โทรศัพท์: 044-217040 โทรสาร: 044-217047 วารสารฟิสิกส์ไทย เป็นวารสารราย 3 เดือน มีวัตถุประสงค์เพื่อเผยแพร่สาระ ข่าวสาร และเป็นสื่อสัมพันธ์ในมวลหมู่สมาชิกและผู้สนใจในแวดวงฟิสิกส์ ส่งเสริมให้เกิดการแลกเปลี่ยนข้อมูลและประสบการณ์เกี่ยวกับฟิสิกส์ในวงกว้างที่สร้างสรรค์ โดยความคิดเห็นและทัศนะที่ปรากฏอยู่ในบทความต่างๆ เป็นเฉพาะของผู้เขียนแต่ละท่าน สมาคมฟิสิกส์ไทยไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป

Website: www.thps.org ผู้ดูแล: ญัฐวุฒิ สุเดช ติดต่อ: info@thps.org

คณะกรรมการสมาคมฟิสิกส์ไทย ประจำปี 2552 – 2554 นายกสมาคมฯ รศ. ดร. วีระพงษ์ แพสุวรรณ อุปนายก รศ. ดร. วิทยา อมรกิจบำรุง เลขานุการ ผศ. ดร. ประยูร ส่งศิริฤทธิกุล เหรัญญิก ศ. ดร. ชูกิจ ลิ้มปิฉานนท์ นายทะเบียน ดร. สาโรช รุจิวรรณธน บรรณาธิการ วารสารฟิสิกส์ไทย ดร. ประพนธ์ คล้ายสุบรรณ ปฎิคม ผศ. ดร. ศุภกร รักใหม่ ประธานสัมพันธ์ ดร. สัมภาส นิดเกตุ รองเลขานุการ ดร. ขรรค์ชัย โกศลทองกี กรมการ ผศ. ดร. ขจรยศ อยู่ดี, ผศ. รัชนา ชินพิทักษ์, รศ. ดร. ชีรพรรณ บุญญวรรณ, ผศ. ดร. ธนากร โอสดจันทร์, ผศ. ดร. นิรันดร์ วิทอนันต์, ผศ. ดร. ขวัญ อารยะรัตนกุล, ดร. สิริพัฒน์ ประโตนเทพ, ดร. ญัฐพร นัทรแถม

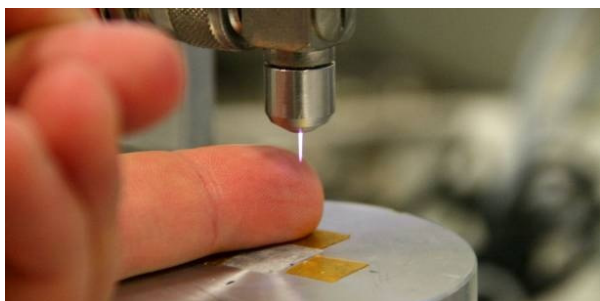
สรุปข่าว

รักษาฟันผุด้วยพลาสมาเย็น



ข่าวดีสำหรับคนที่กลัวการทำฟัน เพราะในปัจจุบันได้มีนักวิทยาศาสตร์จากประเทศเยอรมนีได้นำเทคโนโลยีพลาสมา มาใช้ประดิษฐ์เครื่องพ่นพลาสมา หรือ “Plasma Jet” มาใช้ในการช่วยมาเชื่อมเนื้อฟันเพื่อรักษาฟันผุ

ฟันผุนั้นเกิดจากคราบแบคทีเรียที่เกาะตามผิวฟันสร้างกรดขึ้นมากัดกร่อนผิวฟัน ทำให้เคลือบฟันเสียหาย หมอฟันจะรักษาโดยใช้เครื่องกรอฟัน (Drill) กรอเนื้อฟันที่ติดเชื้อและแบคทีเรียออก เพื่อใส่วัสดุอุดฟัน (Filling) เข้าไป ด้วยเทคโนโลยีการนำพลาสมาเย็น (Cool plasma) มาใช้จะทำให้ผู้ป่วยไม่รู้สึกเจ็บกับขั้นตอนดังกล่าว เพราะเครื่องพ่นพลาสมานี้จะสามารถกำจัดเชื้อแบคทีเรีย และเนื้อเยื่อที่ติดเชื้อในโพรงฟันบริเวณตัวฟันออกแทนการใช้เครื่องกรอฟัน



พลาสมาซึ่งเป็นก๊าซที่มีลักษณะเป็นไอออน ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในวงการทางการแพทย์มานานแล้ว แต่สำหรับในวงการทันตกรรม การนำพลาสมามาใช้ยังมีปัญหาอยู่ เนื่องจากมัน

จะไปทำลายเนื้อฟัน จากปัจจัยสำคัญของอุณหภูมิ เพราะอุณหภูมิที่ใช้ส่วนใหญ่จะไม่ต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส การค้นพบใหม่ของ Stefan Rupf จาก Saarland University's Clinic of Operative Dentistry และ ทีมนักวิจัยจาก Leibniz Institute of Surface Modification (IOM) เป็นการพัฒนาพลาสมาอุณหภูมิต่ำ ด้วยการควบคุมการเปิดปิดของพัลส์ของพลาสมาด้วยความถี่สูง ระบบจะใช้พลังงานไมโครเวฟให้ความร้อนกับพลาสมา และใช้ก๊าซที่มีอัตราการไหลสูงมาทำให้ผิวของพลาสมาเย็นเมื่อพลาสมาถูกปิด

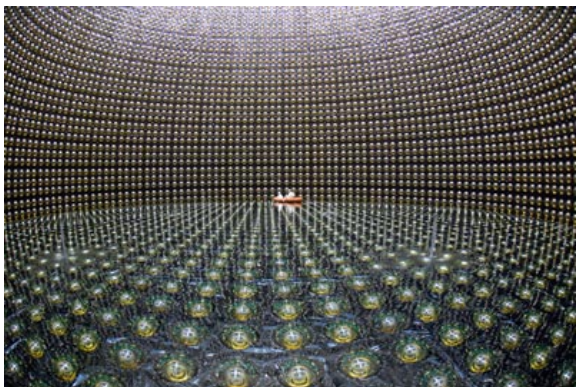
พลาสมาเย็นได้ถูกทดสอบกับเชื้อแบคทีเรียหลายชนิด ซึ่งเป็นแบคทีเรียที่มักก่อตัวอยู่ตามผิวฟัน และสามารถกัดกร่อนเคลือบฟันและเนื้อฟันจนเป็นโพรงได้ ผลการทดสอบพบว่าสามารถกำจัดเชื้อแบคทีเรียได้มากถึง 10,000 เท่าเมื่อเทียบกับกระบวนการดั้งเดิม โดยการทดสอบพลาสมาจะทำให้ผิวของเนื้อฟันร้อนขึ้นจนถึงประมาณ 44 องศาเซลเซียส แต่ไม่ได้สร้างความเจ็บปวดให้กับผู้ป่วย เป็นความรู้สึกแค่เพียงมีก๊าซไหลผ่านและรู้สึกอุ่นขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

ซินด์เลอร์ (Schindler) หัวหน้าทีมนักวิจัยจาก IOM กล่าวทิ้งท้ายไว้ว่า มีจุดมุ่งหมายที่จะให้เครื่องพ่นพลาสมาเย็นนี้สามารถนำไปใช้ในวงการทันตกรรมให้ได้ภายในสามปี ซึ่งเครื่องนี้จะมีราคาอยู่ที่ประมาณ 2,000 – 3,000 ยูโร ถือเป็นราคาที่แพงมากเนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้สร้างคลื่นไมโครเวฟมีราคาถูก หาได้ง่ายและปลอดภัย อย่างเทคโนโลยีเตาไมโครเวฟที่ใช้ในการอุ่นอาหารในปัจจุบันนี้

ที่มา

[1] <http://physicsworld.com/cws/article/news/41506>

ตรวจเจอปรากฏการณ์นิวตริโนครั้งแรก ที่ J-PARC



The SuperKamioKande detector

นักฟิสิกส์ญี่ปุ่นจาก Tokai-to-Kamioka (T2K) ได้ฉลองความสำเร็จจากการตรวจวัด นิวตริโน (Neutrino) ได้เป็นครั้งแรก โดยใช้แสงซินโครตรอนจากเครื่องเร่งอนุภาคโปรตอนพลังงาน 50 GeV ของสถาบัน Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC) ซึ่งตั้งอยู่ในเมือง Tokai บริเวณชายฝั่งตะวันออกของประเทศญี่ปุ่น



ส่วนหนึ่งในอุโมงค์ของ Neutrino Experimental Facility ณ ห้องปฏิบัติการ J-PARC ประเทศญี่ปุ่น

นิวตริโนที่ได้จากการทดลองนี้เกิดจากการยิงอนุภาคโปรตอนพลังงานสูงที่เกิดจากเครื่องเร่ง J-PARC เข้าไปยังเป้าแกรไฟต์ ซึ่งการชนกันนี้ทำให้เกิดอนุภาคไพออน (Pions) ออกมา โดยอนุภาคนี้นี้จะสลายตัวกลายเป็นอนุภาคมิวออนนิวตริโน (Muon

neutrino) หลังจากนั้น มิวออนนิวตริโน จะถูกส่งไปตรวจวัดยังเครื่องตรวจวัดระยะใกล้และเครื่องตรวจวัดขนาดใหญ่ที่เรียกว่า “SuperKamioKande” ซึ่งห่างออกไปประมาณ 300 กิโลเมตร ตั้งอยู่ในเมือง Hida บริเวณชายฝั่งตะวันตกของประเทศญี่ปุ่น จากเหตุผลที่นิวตริโนมักเกิดปฏิกิริยาอย่างอ่อนกับสสาร จึงทำให้ต้องสร้างห้ววัด SuperKamioKande ที่ประกอบไปด้วย Photomultiplier tubes (PMT) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 เซนติเมตร จำนวนมากถึง 11,146 อัน และประกอบไปด้วยน้ำอีก 50,000 ตัน ซึ่ง Photomultiplier tubes นี้จะเป็นตัวตรวจจับรังสีที่ปล่อยออกมาเมื่อนิวตริโนเกิดปฏิกิริยากับโมเลกุลของน้ำ

ทั้งนี้ นิวตริโนจะมีอยู่ 3 ชนิด คือ อิเล็กตรอนนิวตริโน (Electron-neutrino) มิวออนนิวตริโน (Muon-neutrino) และทาวนิวตริโน (Tau-neutrino) โดยนิวตริโนรูปแบบหนึ่งสามารถเปลี่ยนไปเป็นนิวตริโนอีกรูปแบบหนึ่งได้เมื่อเคลื่อนที่ผ่านพื้นที่ว่าง นักวิจัยจาก J-PARC จึงพยายามที่จะวัดการแกว่งของนิวตริโนจาก มิวออนนิวตริโนเป็นอิเล็กตรอนนิวตริโนนี้

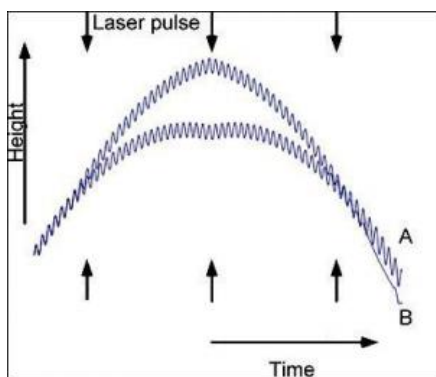
J-PARC นั้นสามารถผลิตอนุภาคมิวออนได้ครั้งแรกจากเป้าแกรไฟต์ในเดือนกันยายน ปี 2007 และเป็นไปได้ที่จะเกิดอนุภาคมิวออนนิวตริโนขึ้นในตอนนั้นด้วย แต่ขณะนั้นไม่สามารถตรวจวัดได้ เนื่องจากเป็นช่วงที่กำลังสร้างเครื่องวัดระยะใกล้และพลังงานของแสงโปรตอนอาจจะยังไม่เพียงพอ ปัจจุบันนี้ทาง J-PARC ได้พัฒนาเครื่องเร่งอนุภาคโปรตอนจนสามารถเพิ่มพลังงานของแสงโปรตอนได้ประมาณ 100 kW ซึ่งเพียงพอที่จะผลิตมิวออนนิวตริโนได้ โดยสามารถยืนยันความสำเร็จได้จากการตรวจเจอ ปรากฏการณ์นิวตริโน ครั้งแรกจากการทดลองนี้

ที่มา

- [1] <http://physicsworld.com/cws/article/news/41044>
- [2] <http://www.sciencedaily.com/releases/2009/11/091127141406.htm>

พิสูจน์ปรากฏการณ์ Gravitational Redshift ตามคำทำนายของไอน์สไตน์จาก Atom Interferometer

ปรากฏการณ์หนึ่งที่ถูกทำนายไว้ในทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไปของไอน์สไตน์คือ แรงโน้มถ่วงทำให้นาฬิกาเดินช้าลง ซึ่งเคยได้รับการยืนยันด้วยการทดลองไปเป็นที่เรียบร้อยแล้วเมื่อ 30 ปีก่อน จากการทดลองด้วยการใช้เครื่องบินและจรวด ปัจจุบันวารสาร Nature ได้ตีพิมพ์รายงานการทดลองใหม่ล่าสุดที่ยืนยันคำทำนายนี้ของไอน์สไตน์ โดยการทดลองใหม่นี้มีความแม่นยำสูงกว่าการทดลองเดิมข้างต้นถึงหนึ่งหมื่นเท่า ด้วยการใช้เทคนิคอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์จากอะตอมของซีเซียม (Cesium) โดยการทดลองนี้ได้พิสูจน์ให้เห็นถึงปรากฏการณ์ที่เมื่อแสงเคลื่อนที่ภายใต้สนามโน้มถ่วง แล้วจะทำให้การสั่นของคลื่นแสงนั้นช้าลง นั่นคือแสงมีการเลื่อนความถี่ไปทางแสงสีแดงมากขึ้น ซึ่งเราเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Gravitational redshift



Holger Muller ผู้ช่วยศาสตราจารย์สาขาฟิสิกส์ ของมหาวิทยาลัยแคลิฟอร์เนีย เบิร์กลีย์ (University of California, Berkeley; UCB) ได้กล่าวถึงการทดลองนี้ว่า เขาใช้แนวคิดจากทฤษฎีกลศาสตร์ควอนตัมที่ว่า สสารมีคุณสมบัติเป็นได้ทั้งคลื่นและอนุภาค (Wave-particle duality) ทำการทดลองกับอะตอมซีเซียมที่ประพฤติตัวเป็นคลื่นสสาร (Matter wave) ที่สั้นด้วยความถี่ 3×10^{25} ครั้งต่อวินาที เมื่อคลื่นอะตอมซีเซียมเข้าสู่ชุดทดลอง มันจะเจอกับแสงวาวที่เกิดจากแสงเลเซอร์ ซึ่งแสงเลเซอร์ในตอนแรก (ด้านซ้ายของรูปด้านบน) จะผลักให้อะตอมของซีเซียมเคลื่อนที่สูงขึ้นประมาณ 0.1 มิลลิเมตร (คุณสมบัติของคลื่น) เพื่อให้มันเคลื่อนออกห่างจากสนามโน้มถ่วงของโลกเล็กน้อย ในขณะที่เดียวกันอะตอมซีเซียมก็ยังเคลื่อนที่ต่อไปโดยไม่ได้รับ

ผลกระทบจากแสงเลเซอร์ (คุณสมบัติของอนุภาค) อยู่ในสนามแรงโน้มถ่วงของโลกที่เวลาจะเดินไปช้ากว่าในเส้นทางบน เลเซอร์ชุดที่สอง (ตรงกลางของรูป) จะผลักอะตอมซีเซียมกลับสู่เส้นทางเดิม ส่วนเลเซอร์ชุดที่สาม (ด้านซ้ายของรูป) นั้นทำหน้าที่วัดความต่างเฟสของคลื่นทั้งสองชุด

เนื่องจากความถี่ของคลื่นอะตอมซีเซียมสูงเกินไปที่จะวัดได้ Muller และเพื่อนร่วมงานได้ใช้หลักการแทรกสอดระหว่างคลื่นอะตอมซีเซียมขณะที่เคลื่อนผ่านแสงเลเซอร์ เพื่อวัดผลการเปลี่ยนแปลงของความถี่ หรือ Redshift ที่เกิดขึ้น ซึ่งผลการทดลองนั้นสอดคล้องกับที่ทำนายได้จากสมการทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไปในระดับความถูกต้อง 1 ส่วน 100 ล้าน (7×10^{-9}) หรือมากกว่าหนึ่งหมื่นเท่าเมื่อเทียบกับการทดลองเมื่อ 30 ปีก่อน ซึ่งทำโดยการเปรียบเทียบนาฬิกาอะตอมไฮโดรเจน (Hydrogen maser clock) สองชุดที่อยู่บนโลกกับที่อยู่บนจรวดซึ่งถูกปล่อยขึ้นสูงจากพื้นดิน 10,000 กิโลเมตร

หลักการของการแทรกสอดของอะตอม (Atom interferometer) เป็นหลักการเดียวกันกับการแทรกสอดของแสง ที่เรานำมาประยุกต์ใช้ในการแทรกสอดของคลื่นแสงในการตรวจวัดเวลาและระยะทาง แต่สำหรับการแทรกสอดของอะตอมนั้นใช้การแทรกสอดของคลื่นสสาร และเนื่องจากคลื่นสสารจะมีความถี่ที่สูงกว่าคลื่นแสง ทำให้เราสามารถวัดเวลาและระยะทางที่สั้นมากๆ ได้ นั่นคือการวัดมีความถูกต้องแม่นยำมากขึ้น

ไม่เพียงแต่เป็นการพิสูจน์ทางทฤษฎีเท่านั้น แต่ผลการทดลองยังมีประโยชน์สำหรับระบบระบุตำแหน่งบนโลก (Global positioning satellite system; GPS) การจับเวลาอย่างละเอียด และการตรวจจับคลื่นแรงโน้มถ่วง (Gravitational wave detectors) Muller ได้ให้ความเห็นไว้ว่า ถ้าเราใช้นาฬิกาที่ดีที่สุด ด้วยความละเอียด 17 หลักสำหรับระบบกำหนดตำแหน่งบนโลก เราสามารถที่จะระบุตำแหน่งได้ในระดับมิลลิเมตร แต่หากเราขนานนาฬิกาให้สูงขึ้น 1 เมตร ค่าที่อ่านได้ในหลักที่ 16 จะเปลี่ยนไป ดังนั้นเมื่อเราใช้นาฬิกาที่ดีขึ้นเราต้องรู้เกี่ยวกับธรรมชาติและผลของแรงโน้มถ่วงให้มากขึ้นด้วย

ที่มา

[1] <http://www.sciencedaily.com/releases/2010/02/100217131125.htm>

หลักการของไฟเบอร์ออปติกไจโรสโคป

พรเทพ นิศามณีพงษ์¹

แนวคิดที่จะใช้ Laser interferometer ในการอ่าน Phase shift ที่เกิดจากปรากฏการณ์ Sagnac (Sagnac effect หรือ Sagnac interference) นั้นได้มีมาหลังจากที่มนุษย์ได้คิดประดิษฐ์เลเซอร์ขึ้นมาไม่นาน การประยุกต์ที่สำคัญคือ เครื่องมือนำร่องเครื่องบิน หรือที่มีชื่อเรียกกันว่า Inertial Navigation Platform เลเซอร์ชนิดฮีเลียม-นีออน (He-Ne laser) นั้นได้ถูกประดิษฐ์ขึ้นในราวๆ ปี ค.ศ. 1961 ประมาณหนึ่งปีหลังจากนั้น Macek และ Davis ได้รายงานผลเกี่ยวกับการตรวจสอบการหมุนของโลกโดยใช้ปรากฏการณ์ Sagnac การวิจัยและพัฒนาไม่สามารถก้าวไปอย่างรวดเร็วได้เนื่องจากทั้งปัญหาด้านแนวคิดและปัญหาด้านการออกแบบเพื่อนำไปสู่ผลผลิตที่คุ้มค่าในเชิงพาณิชย์ จนกระทั่งราวๆ ปี ค.ศ. 1977 จึงได้ถึงจุดที่แนวคิดของการออกแบบได้เริ่มตกผลึกและสามารถผลิตเลเซอร์ไจโรสโคป (Laser gyroscope) ชนิดที่มีชื่อว่า RLG (Ring Laser Gyroscope) ขึ้นมาได้เป็นครั้งแรก หลังจากนั้นจนกระทั่งในช่วงปี ค.ศ. 1980 เป็นต้นมา ได้มีการประยุกต์และออกแบบอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ทั้งในด้านพลเรือนและทางการทหารอย่างมากมาย ไม่ว่าจะเป็นเซ็นเซอร์ที่ใช้ใน INU (Inertial Navigation Unit) หรือว่า HARS (Heading Altitude Reference System) ในช่วงเวลาดังกล่าวมูลค่าของอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับพวก Optical Sensor มีมูลค่าประมาณหนึ่งพันล้านเหรียญสหรัฐต่อปีก้าวกระโดดทางเทคโนโลยีของเซ็นเซอร์เชิงแสง (Optical sensor) เกิดวิวัฒนาการครั้งใหญ่ในราวปี ค.ศ. 1976 เมื่อ Vali และ Shorthill ได้เสนอแนวทางที่นำไปสู่การออกแบบ FOG (Fibre Optic Gyroscope) ซึ่งได้ทำการต่อยอดที่ได้จากการพัฒนา Single-mode fiber ตัวใหม่ที่เกิดขึ้นในเวลานั้น ข้อดีของ FOG ก็คือ ลดต้นทุนการผลิต ตลอดจนสามารถลดขนาดของ Optical gyroscope ลง จะติดอยู่ที่ตรงที่ความไว (Sensitivity) ของตัวอุปกรณ์ กล่าวคือ RLG มีค่าความไวประมาณ 0.001° ต่อชั่วโมง ในขณะที่ FOG มีความไวอยู่ที่ประมาณ 0.1° ต่อชั่วโมง แต่ในด้านอื่นๆ ไม่

ว่าจะเป็น ขนาด น้ำหนัก และการใช้พลังงาน (Power consumption) ตลอดจนอายุการใช้งาน FOG จะเหนือกว่าในทุกด้าน ตัวแปรของการออกแบบที่สำคัญๆ ก็คือ Sensitivity และ Dynamic range ซึ่งส่งผลต่ออุปกรณ์ที่เราจะออกแบบและสร้างขึ้นมา ดังนั้นการเลือกระหว่าง RLG และ FOG จึงขึ้นกับงานที่เราจะใช้ ตัวอย่างเช่น พวกที่ต้องการความไวสูงๆ อย่างพวก Space navigation พวกขีปนาวุธข้ามทวีปที่มีระยะตั้งแต่ 300 กิโลเมตรขึ้นไป (Intercontinental Ballistic Missile; ICBM) Horizon sensor เครื่องบิน และขีปนาวุธ กลุ่มนี้จะใช้ RLG ติดตั้งในระบบนำวิถี ส่วนพวกขีปนาวุธระยะปานกลางและใกล้ที่มีระยะหวังผลน้อยกว่า 300 กิโลเมตรลงมา (Tactical missile) พวกเครื่องขุดเจาะน้ำมัน พวกนี้จะใช้ไจโรสโคปชนิด FOG

หลักการทางฟิสิกส์ของปรากฏการณ์ Sagnac

ปรากฏการณ์นี้ถูกค้นพบโดยนักฟิสิกส์ชาวฝรั่งเศสนามว่า Georges Sagnac ในปี ค.ศ.1913 เขาค้นพบว่าในระบบแกนอ้างอิงที่มีการหมุนรอบตัวเอง แสงที่วิ่งตามเส้นทางทวนและตามการหมุนจะมี Phase difference เกิดขึ้น หรืออาจกล่าวได้ว่าเวลาที่แสงใช้ในการเดินทางครบในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาเร็วกว่าเวลาที่แสงใช้ในการเดินทางตามเข็มนาฬิกา เราสามารถแสดงการคำนวณคร่าวๆ โดยใช้ Classical physics ได้ดังนี้

จากรูปที่ 1 เป็นหมุนรัศมี R หมุนในทิศทางเข็มนาฬิกาด้วยความเร็วเชิงมุม ω เวลาที่แสงใช้ในการเดินทางในทิศทางตามเข็มนาฬิกาเท่ากับทิศของเป็นหมุน t_1 แสดงได้ตามสมการ $t_1 = \frac{2\pi R + \Delta L_1}{c}$, ในที่นี้ ΔL_1 คือ เส้นทางการเดินทางของแสง (จากรูปคือสีแดง) จากจุด o ไปยัง o' ซึ่งมีค่าเท่ากับ $R\omega t_1$ นั่นคือ

$$t_1 = \frac{2\pi R}{c(1 - \frac{R\omega}{c})}$$

¹ ดร. ผู้อำนวยการฝ่ายของค์ความรู้และต้นแบบ สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

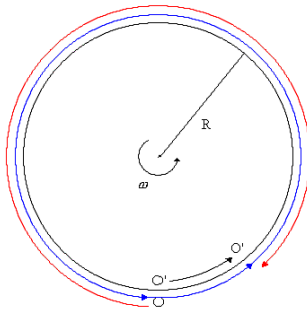
ในทำนองเดียวกัน เวลา t_2 ที่แสงใช้เดินทางในทิศทวน
เข็ม หรือ ทิศเดียวกับการหมุนของแป้น คือ

$$t_2 = \frac{2\pi R}{c(1 + \frac{R\omega}{c})}$$

เพราะฉะนั้นความแตกต่างของเวลาที่ใช้ในสองทิศ จะมีค่าเท่ากับ

$$\Delta t = t_1 - t_2 = \frac{4A\omega}{c^2}; \quad (1)$$

โดยที่ $A = \pi R^2$

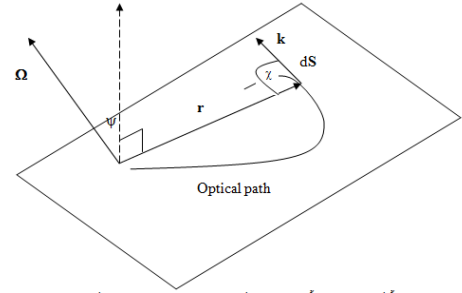


รูปที่ 1 แสดงภาพของเส้นทางเดินแสงในวงเส้นใยแก้วนำแสงที่
กำลังหมุนด้วยความเร็วเชิงมุม ω (สัณฐานตามรูป) แสงที่ถูกส่ง
เข้าไปในเส้นใยแก้วนำแสงในทิศสวนทางการหมุนและตามการ
หมุนจะมี Path difference ต่างกัน ผลที่เกิดขึ้นดังกล่าว มีชื่อว่า
Sagnac effect

โดยทั่วไปแล้วผลที่ได้ในสมการ (1) จะเป็นจริงตามนี้
โดยไม่ขึ้นกับรูปทรงของพื้นที่ A ดังนั้นค่าเฟสที่เปลี่ยนไป $\Delta\phi$
หรือที่เรียกว่า Phase shift จะมีค่าเท่ากับ

$$\Delta\phi = \frac{2\pi c}{\lambda} \Delta t = \frac{8\pi A}{\lambda c} \omega \quad (2)$$

เราสามารถแสดงให้เห็นได้โดยไม่ยากว่าในกรณีทั่วไป
ผลที่ได้ข้างต้นนี้ใช้ได้กับวงปิดรูปต่างๆ กล่าวคือผลที่ได้นี้ไม่
ขึ้นกับรูปทรงทางเรขาคณิตของเส้นทางเดินของแสง



รูปที่ 2 แสดงเส้นทางเดินแสงบนระนาบที่กำลังหมุนด้วยความเร็ว
เชิงมุม Ω ซึ่งแนวเวกเตอร์นี้ทำมุม Ψ กับเส้นที่ตั้งฉากกับระนาบ
 dS เป็น Differential vector element ที่สัมผัสกับเส้นทางเดินแสงที่
ตำแหน่ง r

ในรูปที่ 2 เป็นระนาบที่กำลังหมุนด้วยความเร็วเชิงมุม
 Ω ซึ่งแนวเวกเตอร์นี้ทำมุม Ψ กับเส้นที่ตั้งฉากกับระนาบ (แนว
เส้นประ) พิจารณาทางเดินแสงบริเวณเล็กๆ dS ซึ่งเป็น
Differential vector element ที่สัมผัสกับเส้นทางเดินแสงที่ตำแหน่ง
 r นั่นคือ

$$\Delta \vec{k} = k \frac{\vec{v}}{c} \quad (3)$$

โดยในที่นี้ $\vec{v} = \vec{\Omega} \times \vec{r}$ เมื่อ $\vec{k}$ คือ Wavevector และ c คือ
อัตราเร็วแสง ดังนั้น จากเรขาคณิตเราสามารถเขียน Differential
optical phase shift ได้ว่า

$$d\phi = \Delta \vec{k} \cdot d\vec{S} \quad (4)$$

หลังจากแทนค่า $\Delta \vec{k}$ ลงไปจะได้

$$d\phi = [\vec{\Omega} \times \vec{r} \cdot d\vec{S}] \frac{k}{c} = \left(\frac{k}{c} \right) \Omega \cos \Psi r \sin \Psi dS \quad (5)$$

โดยที่ χ คือมุมที่เวกเตอร์ r ทำกับเวกเตอร์ dS

หลังจากอินทิเกรต สมการ (5) เราจะได้ค่า Optical
phase shift $\Delta\phi$ ออกมา ดังสมการ (6)

$$\Delta\phi = 2AN \left(\frac{k}{c} \right) \Omega \cos \Psi \quad (6)$$

จากรูปที่ 2 จะเห็นได้ว่า $r \sin \chi dS = 2AN$, โดยที่ A คือ
พื้นที่ที่ถูกล้อมรอบด้วยเส้นทางเดินแสงและ N คือจำนวนรอบของ
เส้นทางเดินแสง ความที่ Sagnac phase shift ϕ_s ถูกกำหนดโดย
ความแตกต่างของมุมเฟสในสองทิศทาง ตามการหมุนของระนาบ

กับส่วนทางการหมุนของระนาบ นั่นคือ $\phi_s = 2\Delta\phi$ ดังนั้นเราจะได้ว่า

$$\phi_s = \frac{8\pi AN}{\lambda c} \Omega_p \quad (7)$$

ผลที่ได้ในสมการ (7) แสดงให้เห็นว่า Sagnac phase shift ϕ_s ขึ้นกับค่า Ω_p เมื่อ $\Omega_p = \Omega \cos\psi$ ซึ่งเป็นค่าความเร็วเชิงมุมในทิศที่ตั้งฉากกับระนาบการหมุน ในการออกแบบ FOG จำนวนรอบ N ก็คือจำนวนรอบของสายไฟเบอร์ที่ม้วนอยู่ภายใน และ A คือพื้นที่ของไฟเบอร์แต่ละวงที่ขดอยู่ภายในอุปกรณ์

Sagnac effect จากทฤษฎีสัมพัทธภาพกรณีพิเศษ (Special Theory of Relativity)

เราสามารถแสดงการคำนวณ Phase difference ที่ได้ปรากฏการณ์ Sagnac จากทฤษฎีสัมพัทธภาพได้สองวิธีด้วยกัน

วิธีที่ 1 โดยการคำนวณความแตกต่างของเวลา Δt ที่ใช้ในทางเดินแสงที่สวนทางและตามทิศทางการหมุนของแกนอ้างอิง ค่า Phase difference $\Delta\phi$ สามารถคำนวณได้จาก

$$\Delta\phi = 2\pi\nu \Delta t \text{ เมื่อ } \nu \text{ คือ ความถี่ของแสง}$$

วิธีที่ 2 โดยการคำนวณจำนวนคลื่น ΔN ของแสงทั้งสองทิศ เราก็จะได้ค่า Phase difference มีค่า

$$\Delta\phi = 2\pi \Delta N$$

ผลที่ได้จะแสดงให้เห็นว่า ไม่ว่าจะทำกรคำนวณด้วยวิธีใดก็ตามก็จะได้ค่าของ Phase difference เท่ากัน

วิธีที่ 1 จากผลของทฤษฎีสัมพัทธภาพกรณีพิเศษ เราทราบว่าความเร็วแสง c ที่เคลื่อนที่ในตัวกลางดัชนีหักเห n ที่กำลังเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว V ในทิศทางเดียวกับการหมุนของแกนอ้างอิงจะมีค่าเท่ากับ

$$c_{cw} = \frac{\frac{c}{n} + V}{1 + \frac{n}{c^2}V} \approx \frac{c}{n} + V(1 - \frac{1}{n^2}),$$

ในที่นี้ n คือ ดัชนีหักเหของตัวกลาง V คือความเร็วของตัวกลางที่กำลังเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว กรณีของ FOG n ก็คือดัชนีหักเหของเส้นใยแก้วนำแสง V คือความเร็วตามแนวเส้นสัมผัสของเส้นใยแก้วนำแสง

โดยทั่วไปแล้ว $V \ll c$ นั่นคือเราสามารถประมาณ c_{cw} ข้างต้นได้ว่า

$$c_{cw} \approx \frac{c}{n} + V(1 - \frac{1}{n^2})$$

ในทำนองเดียวกัน ความเร็วแสงในทิศสวนทางเคลื่อนที่กับการหมุน จะมีค่าเท่ากับ

$$c_{ccw} = \frac{\frac{c}{n} - V}{1 - \frac{n}{c^2}V} \approx \frac{c}{n} - V(1 - \frac{1}{n^2})$$

เวลาที่แสงวิ่งในทิศเดียวกับการหมุนของเส้นใยแก้วนำแสงรัศมี R มีค่าเท่ากับ t_{cw} ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$t_{cw} \cdot c_{cw} = 2\pi R + V \cdot t_{cw}$$

$$t_{cw} = \frac{2\pi R}{c_{cw} - V}$$

ในทำนองเดียวกัน กรณีที่แสงวิ่งสวนทางกับการหมุนเวลาที่ใช้สามารถเขียนได้ว่า

$$t_{ccw} = \frac{2\pi R}{c_{ccw} + V}$$

นั่นคือเราจะได้ความแตกต่างของเวลาที่ใช้ในทั้งสองทิศทาง $\Delta t = t_{cw} - t_{ccw}$ ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$\Delta t = t_{cw} - t_{ccw} = 2\pi R \left[\frac{1}{c_{cw} - V} - \frac{1}{c_{ccw} + V} \right] \approx \frac{4\pi R V}{c^2}$$

โดยที่เราประมาณว่า Second order term มีค่าน้อยมากสามารถตัดทิ้งได้

ในที่สุดเราสามารถเขียน Phase difference $\Delta\phi$ ได้ว่า

$$\Delta\phi = 2\pi\nu\Delta t = \frac{2\pi c}{\lambda} \Delta t \approx \frac{8\pi A}{\lambda c} \omega$$

โดยที่ A คือ พื้นที่ของเส้นใยแก้วนำแสงรัศมี R ที่กำลังหมุนด้วยความเร็วเชิงมุม ω , λ คือ ความยาวคลื่นและ c คือความเร็วของแสง

วิธีที่ 2 เราสามารถคำนวณหา Phase shift จากการวัดจำนวนคลื่น โดยเริ่มจาก Relativistic Doppler effect ในทิศทางเดียวกับการหมุน

$$v_{cw} = \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{V}{c}\right)^2}}{1 - \frac{V}{c}} V = \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{V}{c}\right)^2}}{1 - \frac{V}{c}} c$$

$$\lambda_{cw} = \frac{c_{cw}}{v_{cw}} = \frac{c_{cw} \left(1 - \frac{V}{c_{cw}}\right)}{\sqrt{1 - \left(\frac{V}{c}\right)^2}} = \frac{\lambda}{c} \frac{c_{cw} - V}{\sqrt{1 - \left(\frac{V}{c}\right)^2}}$$

ความที่ $V \ll c$ เราสามารถทำการประมาณค่าข้างต้น ซึ่งจะได้ว่า

$$\lambda_{cw} \approx \frac{\lambda}{c} \left[\frac{c}{n} + V \left(1 - \frac{1}{n^2}\right) - V \right] = \frac{\lambda}{n} \left(1 - \frac{V}{nc}\right)$$

ในทำนองเดียวกันสำหรับทิศที่สวนทางการหมุน

$$\lambda_{ccw} \approx \frac{\lambda}{n} \left(1 + \frac{V}{nc}\right)$$

ในที่สุดเราจะได้จำนวนในทั้งสองทิศ กล่าวคือ ทิศตามการหมุน N_{cw} , และทิศสวนทางการหมุน N_{ccw} ดังนี้

$$N_{cw} = \frac{2\pi R}{\lambda_{cw}} \approx \frac{2\pi R}{\frac{\lambda}{n} \left(1 - \frac{V}{nc}\right)} = \frac{2\pi Rn}{\lambda \left(1 - \frac{V}{nc}\right)}$$

$$N_{ccw} = \frac{2\pi R}{\lambda_{ccw}} \approx \frac{2\pi R}{\frac{\lambda}{n} \left(1 + \frac{V}{nc}\right)} = \frac{2\pi Rn}{\lambda \left(1 + \frac{V}{nc}\right)}$$

เพราะฉะนั้นความแตกต่างของจำนวนคลื่นในทั้งสองทิศทาง จะมีค่าเท่ากับ

$$\Delta N = N_{cw} - N_{ccw} = \frac{2\pi Rn}{\lambda} \left[\frac{1}{\left(1 - \frac{V}{nc}\right)} - \frac{1}{\left(1 + \frac{V}{nc}\right)} \right] = \frac{4\pi RnV}{\lambda c \left(1 - \left(\frac{V}{nc}\right)^2\right)}$$

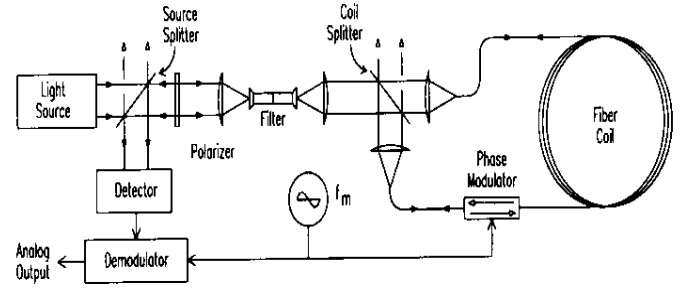
ความที่ $V \ll c$ เราสามารถประมาณได้ว่า

$$\Delta N \approx \frac{4A\omega}{\lambda c}$$

ในที่นี้ A คือพื้นที่ของเส้นใยแก้วนำแสงที่มีววนเป็นวงกลมรัศมี R และ ω คือความเร็วเชิงมุมของวงเส้นใยแก้วนำแสงนั้นคือ ค่า Phase shift จะมีค่าเท่ากับ

$$\Delta \phi \approx \frac{8\pi A\omega}{\lambda c}$$

ขีดจำกัดทางด้านสมรรถนะของ FOG



รูปที่ 3 แสดงภาพของ FOG ที่ถูกนำมาเชื่อมต่อกับ Phase modulator/demodulator, Detector และชุดของ Beam splitter

ในการวัดค่า Phase shift ใน FOG นั้น จะต้องรวมเอา สัญญาณ DC เข้าไปด้วย ซึ่งต้องการความไวประมาณ 10^{-6} rad หรือถ้าเทียบเป็น Path difference ก็ประมาณ 10^{-12} m สำหรับ Path-length รวมที่เกิดขึ้นในขดของเส้นใยแก้วนำแสงประมาณ 100 เมตร รูปที่ 3 แสดงให้เห็นถึงแผนภาพของ IFOG (Interferometric Fibre Optic Gyroscope) ที่ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ยิงผ่าน Coupler ซึ่งเป็น Passive device ที่ใช้ในการแยกแสงเลเซอร์ออกเป็นสองส่วน ส่วนหนึ่งทิศทางการหมุน อีกส่วนวิ่งสวนทางกับการหมุน ทั้งสองส่วนวิ่งผ่านขดเส้นใยแก้วนำแสงก่อนที่จะเข้าไปรวมกันใน Photodetector ค่า Phase difference ที่เกิดขึ้นจากแสงเลเซอร์ในทั้งสองทิศนี้ เป็นข้อมูลที่สำคัญของ FOG สำหรับเส้นใยแก้วนำแสงในอุดมคติ คือไม่คิดว่ามีการสูญเสียกำลังงานของแสงในระหว่างที่วิ่งอยู่ในเส้นใยแก้วนำแสง ค่า Output ที่ได้จากการแปลงสัญญาณแสงให้อยู่ในรูปกระแสอิเล็กทรอนิกส์ จะเป็นไปตามสมการ

$$I = I_0(1 - \cos \phi_s)$$

ในที่นี้ I_0 คือ ค่ากระแสที่ได้ก่อนที่จะเข้า PD ซึ่งเป็นไปตามสมการ

$$I_0 = \sigma \frac{P}{2} \quad (\sigma \text{ คือค่า Responsivity ของ PD ในขณะที่มี } P \text{ คือกำลังของแสงเลเซอร์ที่ Couple กันในเส้นใยแก้วนำแสง) และ } \phi_s$$

คือค่า Sagnac phase shift ค่า Phase noise ที่ Quantum limit มีค่าเป็นสัดส่วนผกผันกับ Amplitude signal-to-noise ratio (SNR) ที่เฟสเท่ากับ $\pi/2$ ค่า Phase noise ϕ_N ถูกนิยามว่าเป็นสัดส่วนระหว่าง I_0 กับ กระแส Shot noise I_{shot}

$$\phi_N = \frac{I_{shot}}{I_0}$$

ในทางปฏิบัติ เราสามารถวัดหา I_{shot} จากแบนด์วิดท์ (Bandwidth) ของสัญญาณกล่าวคือ

$$I_{shot} = \sqrt{2eI_0B}$$

ในที่นี้ B คือ ค่าแบนด์วิดท์ที่วัดได้ และ e คือ ประจุอิเล็กตรอน และจากปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก เราทราบได้ว่าค่า I_0 ยังมีความสัมพันธ์กับความถี่ f ของแสง กล่าวคือ

$$I_0 = \frac{eP_0}{hf} \eta$$

ในที่นี้ f คือความถี่ของแสง, h คือค่าคงที่ของแพลงค์ (Planck's constant) และ η คือค่า Quantum efficiency ของ Photodetector ซึ่งเป็นตัววัดประสิทธิภาพในการแปลงสัญญาณแสงไปเป็นกระแสอิเล็กตรอน นั่นคือค่า Phase noise ϕ_N ในรูปของการใช้งาน สามารถเขียนได้ว่า

$$\phi_N = \sqrt{\frac{2hf}{P_0}} B$$

โดยที่ P_0 คือค่ากำลังที่วัดได้ อีกค่าหนึ่งที่สำคัญในแง่ของการออกแบบในทางปฏิบัติก็คือค่า Noise equivalent rotation $NE\Omega$ ค่านี้มีความสัมพันธ์กับ ค่า Phase noise ϕ_N กล่าวคือ

$$NE\Omega = \frac{\lambda c}{8\pi A N \sqrt{\eta}} \phi_N$$

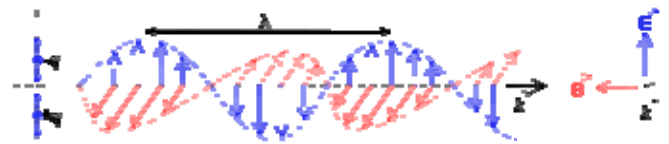
โดย A ในที่นี้คือ พื้นที่ขดเส้นใยแก้วนำแสง ส่วน N คือจำนวนวงของเส้นใยแก้วนำแสง และ c คือความเร็วของแสง ตัวอย่างเช่น สำหรับ $B = 1$ Hz และ $P_0 = 0.1$ mW จะให้ค่า Phase noise ϕ_N เท่ากับ 5×10^{-8} rad = 2.86×10^{-6} องศา หรือ $NE\Omega$ ประมาณ 0.1 ซึ่งเป็นค่าที่ดีเกินพอในทางปฏิบัติสำหรับการออกแบบระบบนาฬิกา

เราอาจจะกล่าวได้ว่าผลกระทบและตัวแปรต่างๆ ที่เป็นอุปสรรคต่อการออกแบบ FOG จะเข้าสู่ขีดจำกัดของ Quantum noise ตัวอย่างเช่น Phase noise ที่เกิดจากเส้นใยแก้วนำแสงก็เนื่องมาจาก Thermodynamic fluctuation ที่ขึ้นกับดัชนีหักเหของเส้นใยแก้วนำแสง ตลอดจนความยาว อย่างไรก็ตาม Noise พวกนี้จะมีผลอย่างมากในทางปฏิบัติ ก็ต่อเมื่อเลเซอร์ที่ใช้มี Input power ก่อนข้างสูง สำหรับเลเซอร์ที่มีกำลังประมาณ 20 มิลลิวัตต์ จะให้ $\phi_N \geq 10^{-8}$ rad/Hz

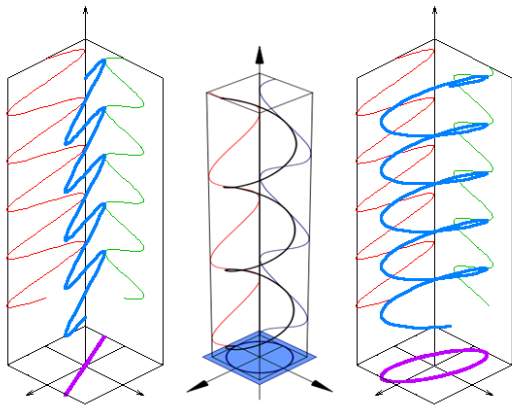
ปัญหาในการพัฒนา

ปัญหาในการออกแบบเพื่อให้ได้ค่า Sensitivity ที่เข้าใกล้ Quantum limit ก็คือ ความพยายามที่จะลด Defect ที่เกิดขึ้นในเส้นใยแก้วนำแสงอันส่งผลต่อการเปลี่ยนค่าโพลาไรเซชันของแสง ผลดังกล่าวทำให้ค่า Phase shift ที่อ่านได้เกิดความคลาดเคลื่อน [W.M. Macek, D.I.M. Davis, Rotation rate sensing with ring-laser, J. Quant. Electr. **QE-13** (1977), pp. 739 - 745]

การควบคุมโพลาไรเซชันของแสงนั้นนับว่าเป็นเรื่องที่สำคัญมากในแง่ของการออกแบบระบบ Optical Telecommunication ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพของตัว Optical modulator, Optical sensor, Beam splitter interferometer และอื่นๆ และจะส่งผลต่อค่า PMD (Polarization mode dispersion) และค่า PDL (Polarization dependence loss) โพลาไรเซชันซึ่งเป็นสมบัติที่สำคัญของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่บรรยายถึงทิศทางการสั่นของสนามไฟฟ้า ซึ่งทิศทางโพลาไรเซชันจะอยู่ในทิศเดียวกับทิศการสั่นของสนามไฟฟ้า ชนิดของโพลาไรเซชันมีด้วยกันหลายแบบ คือ Linear polarization, Circular polarization และ Elliptical polarization



รูปที่ 4 แสดงภาพของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เวกเตอร์ k ในภาพแสดงทิศทางของการส่งพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งตั้งฉากกับระนาบการสั่นของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 5 แสดงชนิดของโพลาริเซชันแบบต่างๆ รูปซ้ายสุดแสดงทิศทางการสั่นของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่มีทิศทางที่ในระนาบที่ตั้งฉากกับการส่งผ่านพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (สีฟ้า) เป็น Linear polarization, ส่วนรูปกลางเป็น Circular polarization ส่วนรูปขวาสุดเป็น Elliptical polarization

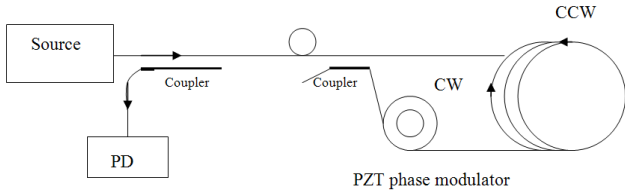
หลังจากที่โพลาริเซชันของแสงในเส้นใยแก้วนำแสงถูกควบคุมให้อยู่ภายใต้ขอบเขตของการออกแบบที่สามารถใช้งานได้ เส้นใยแก้วนำแสงจะมี Defect ที่ทำให้แสงภายในเส้นใยแก้วนำแสงมีโพลาริเซชันเปลี่ยนไปจากเดิมหรืออาจถูกทำลายลง ขึ้นอยู่กับขนาดของ Defect ที่เกิดขึ้นภายใน เพื่อที่จะแก้ปัญหาดังกล่าวจึงได้มีการพัฒนาเส้นใยแก้วนำแสงชนิดพิเศษที่ เรียกกันว่า PM fibre เพื่อควบคุมโพลาริเซชันของแสงที่เดินทางในเส้นใยแก้วนำแสง ปัญหาอื่นๆ ในการออกแบบ FOG ก็คือ ปัญหาการกระเจิงของแสง [G.C. Cutler, S.A. Newton, and H.J. Shaw, Limitation of rotation sensing by scattering, Opt. Lett. 5, 1980, pp. 488 – 490; P. Chien and C. Pan, Fier-optic gyroscopes based on polarization scrambling, Opt. Lett. 16, 1991, pp. 11 - 42] ที่วิ่งในเส้นใยแก้วนำแสง ซึ่งนำไปสู่ปัญหา Cross-talk ระหว่างแสงที่วิ่งในทิศทางเข้มาตามเข็มนาฬิกา ปัญหาของการกระเจิงของแสงที่เกิดใน FOG โดยทั่วไปจะเป็นการกระเจิงกลับ Rayleigh (Rayleigh backscattering) ซึ่งจะเกิดขึ้นที่รอยต่อของเส้นใยแก้วนำแสง ปัญหาดังกล่าวนี้สามารถแก้ไขได้โดยใช้เลเซอร์ที่มี Coherence length ที่สั้น [R.A. Bergh, H.C. Lefevre, and H.J. Shaw, All single mode fiber optic gyroscope with long term stability, Opt. Lett. 6, 1981, pp. 502 - 504] ซึ่งจะแก้ปัญหาดังกล่าวที่เกิดจาก

การกระเจิงกลับของแสง การใช้ Superluminescent diode เป็นทางเลือกที่ดีที่สุดในการแก้ปัญหาดังกล่าว นอกจากนี้จะทำให้ประสิทธิภาพที่ดีในแง่ของ Coupling efficiency ใน Single-mode fiber

ปัญหาที่เกิดขึ้นจาก Magneto-optical Faraday effect อันเนื่องมาจาก Electromagnetic interference อันเป็นสาเหตุมาจาก Defect ภายในโครงสร้างของเส้นใยแก้วนำแสงนั้นสามารถแก้ไขได้โดยการใช้ PMF (Polarization maintain fiber) [K. Hotate, Noise sources and counter measures in optical passive ring-resonator gyro, Proc. OFS7, 1990, pp. 11 - 12, IEEE J. Lightwave Technol. LT-5, 1987, pp. 997 - 1001] ที่จะคอยควบคุมโพลาริเซชันไม่ให้มีค่าแกว่งมาก ซึ่งจะมีผลอย่างมากต่อค่าที่อ่านได้จาก Sagnac phase shift ส่วนปัญหาที่เกิดขึ้นจาก Kerr Effect [N.J. Frigo, H.F. Taylor, L. Goldberg, J.F. Weller, and S.C. Rashleigh, Optical Kerr effect in fiber gyroscope effects of nonmonochromatic sources, Opt. Lett. 8, 1983, pp. 119 - 121] ซึ่งเกิดจากการที่ค่าดัชนีหักเหของแสงเปลี่ยนค่าตามสนามไฟฟ้า สามารถควบคุมได้โดยการใช้แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ที่เป็น Broad-band, Low coherence และ Unpolarized

โครงสร้างแบบ Open loop ที่มี Phase modulation

ปัญหาที่ได้กล่าวไปแล้วเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นมาในช่วงแรกของการวิจัยและพัฒนาในช่วงแรกๆ ซึ่ง Noise ที่เกิดขึ้นจากตัว Defect ของโครงสร้างเส้นใยแก้วนำแสงนั้นรบกวนสัญญาณที่ได้จาก Sagnac phase shift วิธีการอีกอันหนึ่งที่เข้ามามีส่วนร่วมในแง่ของการเพิ่มประสิทธิภาพของ FOG ก็คือการเพิ่ม Optical phase modulation เข้าไป เทคนิคนี้เป็นเทคนิคมาตรฐานที่ใช้กันในปัจจุบัน Phase modulator จะถูกเสริมเข้าไปในม้วนสายไฟเบอร์ ใกล้กับ Coupler output ซึ่ง Phase modulator นี้ถูกสร้างจากม้วนสายไฟเบอร์ม้วนรอบแกนท่อ Piezoceramic (PZT) สองสามรอบ [G. Martini, Analysis of a single mode optical fiber piezoceramic phase modulator, J. Opt. Quantum Electron. 19, 1987, pp. 179 - 190] เราสามารถควบคุม Stress ของ PZT โดยการให้ศักย์ไฟฟ้าภายนอกเข้าไป ซึ่งจะทำให้ Optical path length ของม้วนไฟเบอร์รอบ PZT เกิดการเปลี่ยนแปลงอันเนื่องมาจากปรากฏการณ์ Elasto-optic



รูปที่ 6 แสดงภาพของ FOG ที่มี Phase modulator

นั่นคือ จะเกิด Phase delay $\phi(t)$ และ $\phi(t+\tau)$ ซึ่งเกิดขึ้นจากแสงในทิศทางตามเข็มนาฬิกา (CW) และ ทวนเข็มนาฬิกา (CCW) ตามลำดับ โดยที่ในที่นี่ $\tau = L/v$ คือ Transit time ที่เกิดขึ้นในเส้นใยแก้วนำแสงความยาว L ความแตกต่างของเฟสที่วัดได้ใน Detector $\Delta\Phi$ จะมีค่าสัมพันธ์กับ $\phi(t)$ และ $\phi(t+\tau)$ กล่าวคือ

$$\Delta\Phi = \Phi_{ccw} - \Phi_{cw} = \Phi_s - \phi(t) - \phi(t+\tau) = \Phi_s - \phi(t-\tau/2) - \phi(t+\tau/2)$$

$$\text{สำหรับ } \Phi(t) = \Phi_{m0} \cos \omega_m t$$

$$\Delta\Phi = \Phi_{ccw} - \Phi_{cw} = \Phi_s + 2\Phi_{m0} \sin \omega_m \tau / 2 \sin \omega_m t = \Phi_s + \Phi_m \sin \omega_m t$$

ในที่นี้ค่าแอมพลิจูดจากสมการ $\Phi_m = 2\Phi_{m0} \sin \omega_m \tau / 2$ จะมีค่ามากที่สุดเมื่อเราควบคุมให้ความถี่ของ PZT modulator มีค่าเท่ากับ $f_m = \omega_m / 2\pi = 1/(2\tau)$

สัญญาณที่วัดได้ที่ PD จะมีรูปเป็น

$$I_1 = I_{01}[1 + \cos(\Phi_{ccw} - \Phi_{cw})]$$

ฟังก์ชันดังกล่าวสามารถเขียนในรูปของ Bessel function ได้ดังนี้

$$I' = \frac{I_1}{I_{01}} = 1 + [J_0(\Phi_m) + 2\sum_{k=1}^{\infty} J_{2k}(\Phi_m) \cos(2k\omega_m t)] \cos \phi_s + 2\sum_{k=1}^{\infty} J_{2k-1}(\Phi_m) \cos(2k-1)\omega_m t \sin \phi_s$$

สัญญาณที่วัดโดยโฟโตไดโอดจะประกอบด้วยสัญญาณ DC และทุกๆ ฮาร์โมนิกของสัญญาณที่ถูกมอดูเลต ค่า $\Phi_m = 1.8$ เป็นค่าที่ Bessel function $J_1(\Phi_m)$ มีค่าสูงสุด นั่นคือ ค่า Noise equivalent rotation $NE\Omega$ ที่ Quantum limit ณ ค่านี้จะมีค่าเท่ากับ

$$NE\Omega = \frac{\lambda C}{8\pi A} \sqrt{\frac{2\hbar f B}{\eta P}} \frac{\sqrt{1+J_0(\Phi_m)}}{2J_1(\Phi_m)}$$

สำหรับค่ากำลังเท่ากับ $100 \mu W$ และ Φ_m ที่ 1.8 จะให้ค่า Normalized $NE\Omega$ ดังนี้

$$\frac{NE\Omega}{\sqrt{B}} = \frac{0.14 \mu W / s}{\sqrt{Hz}} = 0.03^\circ / \sqrt{Hz}$$

ซึ่งต้องทำการเปรียบเทียบค่านี้กับค่า Sensitivity ที่วัดได้ในห้องปฏิบัติการ ซึ่งจะอยู่ในช่วง $0.1^\circ - 1^\circ$ ต่อชั่วโมง ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ในช่วงแรกของการพัฒนา FOG

FOG ที่ใช้ 3x3 coupler

เราสามารถออกแบบ FOG โดยการใช้ 3x3 coupler ในการควบคุม Sagnac phase shift แทน Phase modulator กรณีอุดมคติ (Ideal case) โดยคิดว่าไม่มีการสูญเสียสัญญาณเชิงแสง Output field ที่ออกจากแต่ละขาของ Coupler ตามรูปที่ 7 เป็นดังนี้

$$\vec{E}_D = \frac{1}{\sqrt{3}} \vec{E}_o e^{i(-90^\circ)}, \vec{E}_{1C} = \vec{E}_{2C} = \frac{1}{\sqrt{3}} \vec{E}_o e^{i(30^\circ)}$$

ในที่นี้ $\vec{E}_o$ คือ Input field ส่วน C และ D คือ Output signal สำหรับการ Cross signal และ Direct signal โดยที่ Direct signal จะรวบรวม Phase delay -90° ในขณะที่อีกสอง Cross signal จะรวบรวม Phase delay 30° เทียบกับ Input signal สัญญาณแสงที่ส่งผ่านเส้นใยแก้วนำแสงจะถูกรวมอีกครั้งโดย Coupler ก่อนที่จะส่งต่อไปยังโฟโตไดโอดสองตัว คือ PD_1 และ PD_2 ตามรูปที่ 7 โดยที่จะมีค่าสัญญาณแสงดังนี้

$$\vec{E}_{PD_1} = \vec{E}_{1CC} + \vec{E}_{2CD} = \frac{1}{3} \vec{E}_o e^{i(60^\circ + \phi_s)} + \frac{1}{3} \vec{E}_o e^{i(-60^\circ - \phi_s)}$$

$$\vec{E}_{PD_2} = \vec{E}_{1CD} + \vec{E}_{2CC} = \frac{1}{3} \vec{E}_o e^{i(-60^\circ + \phi_s)} + \frac{1}{3} \vec{E}_o e^{i(60^\circ - \phi_s)}$$

กระแสที่เกิดขึ้นจากแสงที่ตกลงบน PD_1 และ PD_2 จะมีค่าเท่ากับ

$$I_{PD_1} = \frac{2}{9} \sigma P [1 + \cos(120^\circ + 2\phi_s)]$$

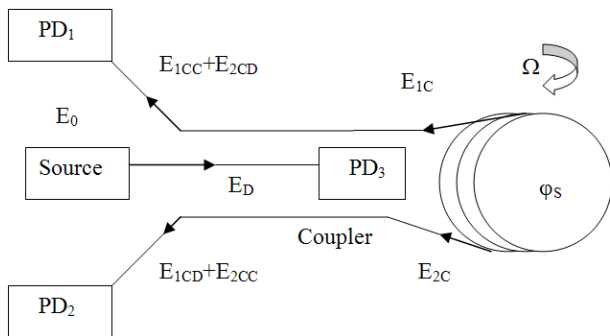
$$I_{PD_2} = \frac{2}{9} \sigma P [1 + \cos(120^\circ - 2\phi_s)]$$

โดยที่ ϕ_s คือ Sagnac phase shift และ P คือ ค่า Input power นั่นคือค่าความแตกต่างของกระแสที่เกิดขึ้นจาก PD_1 และ PD_2 จะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับ $\sin \phi_s$ กล่าวคือ

$$I_{PD_2} - I_{PD_1} = \frac{2\sqrt{3}}{9} \sigma P \sin(2\phi_s)$$

ส่วนสัญญาณที่ออกมาจากขาที่สามของ Coupler ทำหน้าที่เป็นตัวมอนิเตอร์สัญญาณ Input power ข้อดีของการใช้ 3x3

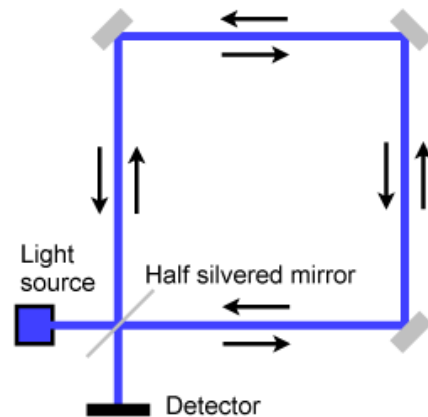
coupler แทน Phase modulator ก็คือ ลดต้นทุนการผลิต นอกจากนี้ยังสามารถใช้กับสัญญาณแสงในช่วง 700-900 นาโนเมตร ข้อเสียก็คือ Coupler มีความไวต่อการถูกระงับด้วยความร้อน นั่นคือการแกว่งของอุณหภูมิมีผลต่อสัญญาณที่เราอ่าน เราสามารถแก้ปัญหการแกว่งของอุณหภูมิได้โดยเพิ่มตัว Depolarizer เข้าไป ซึ่งก็คือ Mandrel ของเส้นใยแก้วนำแสง เส้นใยแก้วนำแสงขนาดความยาว 150 เมตรที่ม้วนเป็นขดคอยล์ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 40 มิลลิเมตร จะให้ค่า Sagnac phase shift 0.1° ต่ออัตราการหมุน 1° ต่อวินาที ซึ่งเป็นช่วงของ Sensitivity ที่ใช้ในยานยนต์ โดยที่มีค่าความคลาดเคลื่อนประมาณ 0.5% ในขณะที่ค่า Long-term baseline drift อยู่ที่ 0.05° ต่อวินาที ส่วนค่า $NE\Omega$ นั้นประมาณ 0.01° ต่อวินาที สำหรับสัญญาณที่มีแบนด์วิธเท่ากับ 10 Hz



รูปที่ 7 FOG 3x3

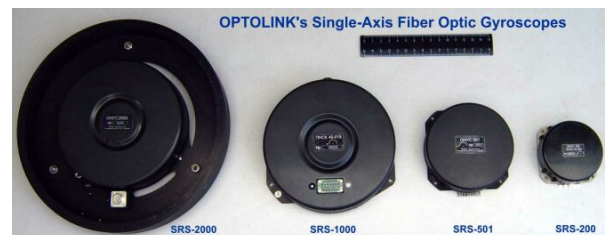
นอกจาก FOG แล้วยังมี Optical gyroscope แบบอื่นๆ อาทิเช่น RROG (Ring Resonator Optical Gyro), FRLG (Fiber Ring Laser Gyro) ซึ่งได้ใช้เส้นใยแก้วนำแสงด้วยธาตุ Rare-earth ซึ่งทำหน้าที่เป็น Active medium ต่อเชื่อมกับ Coupler พวก WDM (Wavelength Division Multiplexer) ในการขยายสัญญาณแสง นอกจากนี้ยังได้มีการคิดค้นพัฒนา IOG (Integrated Optical Gyro) ซึ่งนอกจากลดต้นทุนการผลิตแล้ว ยังสามารถลดขนาดให้เล็กลงอีกด้วย และยังลดผลของการกระเพื่อมของสัญญาณอันเนื่องมาจากความร้อน [Opto-Laser Europe, vol. 46, p.23-25,

1997] สรุปคือการเลือกใช้ Gyro แบบต่างๆ นั้นขึ้นกับงานที่จะถูกนำไปประยุกต์ใช้ว่าต้องการ Sensitivity และ Tolerance ในช่วงใด



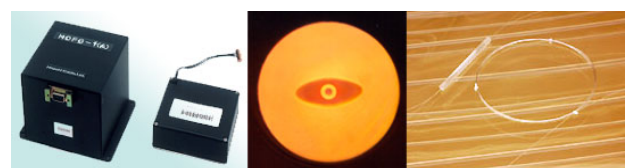
หลักการของ Sagnac effect ใน Ring interferometer

[<http://www.sensorwiki.org/doku.php/sensors/gyroscope>]



Commercial single axis fiber optical gyroscope

[<http://www.optolink.ru>]



Commercial fiber optical gyroscope

[<http://www.hitachi-cable.co.jp/en/products/optical/gyro/>]

ฟิสิกส์ของสเก็ตน้ำแข็ง

Physics of Ice Skating

สตรีรัตน์ กำแพงแก้ว โชคชัย¹

หลังจากที่ผู้เขียนเอง ซึ่งเป็นทั้งอาจารย์สอนฟิสิกส์และนักสเก็ตน้ำแข็งลีลา มาตั้งแต่สมัยเรียนปริญญาเอกที่สหรัฐอเมริกา ได้ลงแข่งขันกีฬาสเก็ตน้ำแข็งลีลา ในรายการ Skate Asia 2010 ที่เมืองหางโจว (Hangzhou) ประเทศสาธารณรัฐประชาชนจีน ในช่วงที่ผ่านมา ทำให้เกิดแรงบันดาลใจในการเขียนบทความถ่ายทอดเรื่องราวฟิสิกส์ของสเก็ตน้ำแข็งนี้ขึ้นมา

ผู้เขียนจะเริ่มเรื่องด้วยการขุดคุ้ยความคิดเดิมๆ ที่ว่าทำไมน้ำแข็งถึงลื่น ในอดีตผู้คนเชื่อว่าการเคลื่อนที่บนน้ำแข็ง เกิดจากแรงกดและแรงเสียดทานทำให้น้ำแข็งละลายและลื่น แต่จากการค้นพบเมื่อไม่นานมานี้ของ Somorjai พบว่าแรงกดและแรงเสียดทาน ไม่เพียงพอที่จะทำให้เคลื่อนที่บนพื้นน้ำแข็งได้ แต่เป็นชั้น “Quasi-fluid layer” หรือ “ชั้นคล้ายน้ำ” ทำให้น้ำแข็งลื่น ไม่ว่าน้ำแข็งจะมีอุณหภูมิเท่าไร ก็ยังพบชั้นนี้อยู่

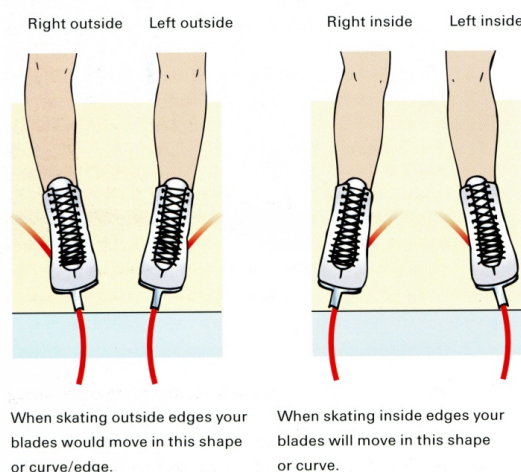
โดยเมื่อน้ำแข็งมีอุณหภูมิสูงขึ้น ก็จะทำให้ชั้น Quasi-fluid layer มีมากขึ้น ก็จะทำให้น้ำแข็งลื่นมากขึ้น (Fast ice) แต่เมื่อน้ำแข็งมีอุณหภูมิลดลง ชั้น Quasi-fluid layer จะมีน้อยลง ทำให้น้ำแข็งฝืดลง (Slow ice) นอกจากนี้ชั้น Quasi-fluid นี้ยังทำให้น้ำแข็งนุ่มลงด้วย

ก่อนที่ผู้เขียนจะใช้ฟิสิกส์กลศาสตร์อธิบายการเล่นสเก็ตน้ำแข็ง จะแนะนำให้รู้จักส่วนประกอบคร่าวๆ ของรองเท้าสเก็ต ก่อน รองเท้าสเก็ตประกอบด้วยอุปกรณ์สองส่วน คือ รองเท้า (Boot) และใบมีด (Blade) สำหรับใบมีดมีส่วนประกอบคร่าวๆ 3 ส่วน คือ ส่วนที่เรียกว่า Toe pick ไว้สำหรับจิกน้ำแข็ง ส่วนที่เรียกว่า Rocker เป็นส่วนที่ใช้สำหรับหมุน ส่วนที่เรียกว่าขอบ (Edges) ประกอบด้วยขอบใน (Inside edge) และขอบนอก (Outside edge) นั่นคือเมื่อนักสเก็ตน้ำแข็งลื่นไปบนพื้นน้ำแข็งจะมี

ผิวสัมผัสกับน้ำแข็งเพียง เล็กน้อยแค่บริเวณขอบใบมีด เพื่อลดแรงเสียดทาน ด้วยเหตุนี้เราจึงไม่เคยเห็นพื้นใบมีดที่มีลักษณะแบนราบ



รูปที่ 1 ส่วนประกอบของรองเท้าสเก็ต



รูปที่ 2 ส่วนประกอบของใบมีดแสดงขอบ (Edges) ประกอบด้วยขอบใน (Inside edge) และขอบนอก (Outside edge)

¹ อาจารย์ (ผศ. ดร.) ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3 ทำ Arabesque Spiral ในรูปนี้ใช้ Right outside ของใบมีดเท้าขวาในการทรงตัว เป็นการเคลื่อนที่บนขาขวา (Skating leg) โดยที่ขาซ้าย (Free leg) ยกขึ้นสูงเหนือลำตัว น้ำหนักตัวนักสเก็ตจะอยู่ที่ขอบนอกของใบมีดของเท้าขวา



รูปที่ 4 ทำ Catch Foot Spiral ในรูปนี้ใช้ Right outside ของใบมีดเท้าขวาในการทรงตัว เป็นการเคลื่อนที่บนขาขวา (Skating leg) โดยที่ขาซ้าย (Free leg) ยกขึ้นสูงเหนือลำตัวโดยใช้มือจับใบมีดเท้าซ้าย น้ำหนักตัวนักสเก็ตจะอยู่ที่ขอบนอกของใบมีดของเท้าขวา

สังเกตว่าท่า Spiral Right Outside Edge ในรูปที่ 3 และ 4 ลำตัวจะต้องเอียงไปทางขวามือ เข้าสู่จุดศูนย์กลาง จึงจะช่วยให้การทรงตัวโดยใช้ขอบนอกของใบมีดเท้าขวาดำเนิน



รูปที่ 5 ทำ Back Inside Pivot ในรูปนี้ใช้ Toe pick ของใบมีดเท้าซ้ายเป็นจุดหมุน ขอบในของใบมีดเท้าขวากวาดไปทางข้างหลังตามเข็มนาฬิกา ลักษณะการกวาดจะคล้ายกับการวาดวงกลมด้วยวงเวียน ดังนั้นน้ำหนักตัวส่วนใหญ่จะอยู่ที่ Toe Pick ของใบมีดเท้าซ้าย

กฎของนิวตัน (Newton's Law)

ระดับความยากง่ายของฟิสิกส์ที่ใช้อธิบายฟิสิกส์ของสเก็طن้ำแข็งอยู่ในเนื้อหาฟิสิกส์กลศาสตร์ของนักเรียนมัธยมศึกษาปีที่ 4 จะเริ่มต้นด้วยกฎของนิวตัน (Newton's Law) ถ้ารู้ว่ามีแรงผ่านวัตถุเท่าไร และรู้มวลของวัตถุ เราสามารถหาอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วของวัตถุ ในทางฟิสิกส์กล่าวว่า แรงที่กระทำกับวัตถุ (F) จะเท่ากับมวลของวัตถุ (m) คูณกับความเร่ง (a)

$$F = ma$$

กฎข้อที่หนึ่งของนิวตัน กล่าวว่า วัตถุจะหยุดนิ่งหรือเคลื่อนที่ไปเรื่อยๆ ด้วยความเร็วคงที่เว้นแต่จะมีแรงภายนอกมากระทำ ตัวอย่างเช่น การหยุด (Braking) เมื่อนักสเก็ตน้ำแข็งต้องการหยุด ขอบนี้แหละจะช่วยเพิ่มแรงเสียดทานระหว่างใบมีดกับพื้นน้ำแข็ง



รูปที่ 6 แสดงการหยุดที่ใช้ขอบนอกของเท้าซ้ายช่วยในการหยุด

สำหรับกฎข้อที่สามของนิวตัน ที่กล่าวว่า แรงกิริยา = แรงปฏิกิริยา (Action = Reaction) อธิบายการวิ่งไปข้างหน้า (Stroking) ได้ โดยที่นักสเก็ตน้ำแข็งจะใช้ขอบใบมีดส่งแรงไปข้างหลังเพื่อเคลื่อนตัวไปข้างหน้า

ส่วนนักโรลเลอร์สเก็ตจะใช้แรงกดไปบนพื้นคอนกรีตในลักษณะเดียวกัน



รูปที่ 7 แสดงการวิ่งไปข้างหน้า นักสเก็ตทรงตัวด้วยเท้าซ้ายวิ่งบนน้ำแข็งโดยใช้ขอบในของเท้าขวาผลักไปข้างหลัง

สำหรับการเลี้ยวโดยใช้ขาไขว้ (Cross over) นักสเก็ตจะใช้ขอบของใบมีดกดลงไปบนพื้นน้ำแข็ง ยกตัวอย่าง การเลี้ยวเป็นวงทวนเข็มนาฬิกา นักสเก็ตจะใช้เท้าขวาดันออกด้านข้าง ในขณะที่เท้าซ้ายจะมีแรงกดจากขอบนอกของใบมีดก่อนที่จะใช้เท้าขาไขว้เท้าซ้าย



รูปที่ 8 แสดงการเลี้ยวทวนเข็มนาฬิกาโดยใช้ขาไขว้ (Cross over)

โมเมนตัมเชิงมุม (Angular Momentum)

ผู้อ่านเคยสงสัยหรือไม่ว่าทำไมนักสเก็ตถึงหมุนเร็วขึ้นได้ เรื่องนี้อธิบายง่ายๆ ด้วยการอนุรักษ์โมเมนตัมเชิงมุม (Conservation of Angular Momentum) เมื่อวัตถุหมุนรอบแกนแรงที่กระทำกับวัตถุเรียกว่าแรงสู่ศูนย์กลาง ซึ่งแรงนี้มีทิศทางเข้าสู่ศูนย์กลางของวงโคจร ความเร็วของวัตถุจะมีทิศเป็นเส้นสัมผัสกับวงโคจร เวกเตอร์ของโมเมนตัมเชิงมุมจะตั้งฉากกับความเร็วมุมและแรง อ้างอิงจากกฎมือขวา เมื่อเปรียบเทียบกับโมเมนตัมเชิงเส้น $P = mv$, เมื่อ m คือ มวลของวัตถุและ v คือ ความเร็วเชิงเส้น $v = \frac{s}{t}$ โมเมนตัมเชิงมุม (L) เขียนได้ว่า $L = I\omega$ เมื่อ I คือโมเมนต์ความเฉื่อย (Moment of inertia) ซึ่งแปรผันตามกับมวลของวัตถุและระยะห่างระหว่างวัตถุนั้นถึงจุดศูนย์กลางการหมุนกำลังสอง ($I \propto mr^2$) และ ω คือความเร็วเชิงมุมหรืออัตราของการเปลี่ยนแปลงของมุมที่กวาดไปเทียบกับเวลา ($\omega = \frac{\theta}{t}$) โดยปกติมวลของวัตถุจะกระจายไปรอบๆ แกนหมุน ดังนั้นนักสเก็ต

น้ำแข็งจะมีโมเมนต์ความเฉื่อยที่แตกต่างกันออกไป ขึ้นอยู่กับ การกางแขนของนักสเก็ต การอนุรักษ์โมเมนตัมเชิงมุมจะเกิดขึ้น เมื่อไม่มีแรงภายนอกมากระทำต่อวัตถุ ตามสมการที่ (1) กล่าวได้ ว่า โมเมนต์ความเฉื่อยลดลงมุมของการหมุนจะเพิ่มขึ้น เพื่อรักษา โมเมนตัมเชิงมุม ตัวอย่างเช่น การหมุนของนักสเก็ต โดยนักสเก็ต จะเริ่มจากการหมุนด้วยการกางแขนออก ซึ่งจะให้มีโมเมนต์ ความเฉื่อยมาก แต่เมื่อนักสเก็ตหุบแขน โมเมนต์ความเฉื่อยจะ ลดลงและความเร็วในการหมุนจะเพิ่มขึ้น

$$I_1\omega_1 = I_2\omega_2 \quad (1)$$

สำหรับการหมุน นักสเก็ตจะทิ้งน้ำหนักตัวบนบริเวณที่ เรียกว่า Rocker ซึ่งจะช่วยให้ลดแรงเสียดทานระหว่างใบมีดกับ น้ำแข็งระหว่างหมุน จะไม่ใช้บริเวณใบมีดทั้งหมดในการหมุน เนื่องจากจะมีแรงเสียดทานเกิดขึ้นมากเกินไป

พลังงานจลน์และพลังงานศักย์ (Kinetic Energy: KE and Potential Energy: PE)

พลังงานจลน์เป็นพลังงานของการเคลื่อนที่ การที่นัก สเก็ตน้ำแข็งกระโดดข้ามน้ำแข็งจะต้องใช้พลังงานจลน์มาก เมื่อ นักสเก็ตมีการโยนตัวลงบนน้ำแข็ง จะมีการส่งผ่านพลังงานความ ร้อน เสียง และงานที่กระทำบนตัวนักสเก็ต (เขาจะรู้สึกว่ามีแรงกด เมื่อกระโดดลงบนน้ำแข็ง) การวัดพลังงานจลน์จะวัดโดยมวลของ วัตถุกับความเร็วของวัตถุนั้นได้เป็นความสัมพันธ์ที่ว่า

$$KE_{linear} = \frac{1}{2}mv^2$$

ถ้าการเคลื่อนที่นั้นมีการหมุนเกิดขึ้นแทนที่จะเป็น

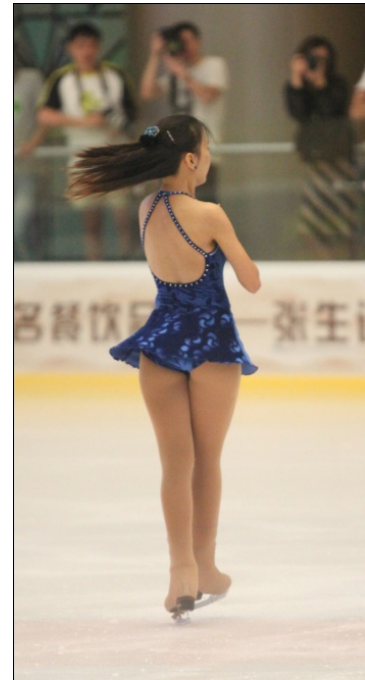
การเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง สมการจะคล้ายๆกัน คือ

$$KE_{rotation} = \frac{1}{2}I\omega^2$$

ในชีวิตประจำวัน เราสามารถเห็นพลังงานจลน์

ได้ง่าย ๆ เมื่อมีการเคลื่อนที่ของวัตถุ แต่สำหรับพลังงานศักย์แล้ว จะถูกกักเก็บไว้ อย่างเช่น การกดสปริง ($PE = \frac{1}{2}kx^2$, k คือ ค่า

นิยสปริง, x คือ ระยะยืดของสปริงจากจุดสมดุล) หรือ การทำงาน ด้านแรงโน้มถ่วง ($PE = mgh$) เช่น การวางของไว้บนชั้นสูงๆ สำหรับนักสเก็ตน้ำแข็งแล้วกล้ามเนื้อที่เข่นกันจะทำหน้าที่เหมือน สปริง สังเกตว่าท่าเตรียมกระโดดจะต้องมีการย่อขาข้างใดข้างหนึ่ง และ พลังงานศักย์ในรูปของพลังงานศักย์เคมีของกล้ามเนื้อ ก็จะถูก เปลี่ยนเป็นพลังงานจลน์ของการเคลื่อนที่



รูปที่ 9 แสดงการหมุนแบบ Scratch spin นักสเก็ตหมุนเร็วขึ้นเมื่อ หุบแขนและขาเข้าใกล้ลำตัว รูปทางซ้ายมือเป็นการหมุนแบบ Forward Scratch Spin สำหรับคนที่ถนัดมือขวา เท้าขวาจะอยู่บน น้ำแข็งและหมุนทวนเข็มนาฬิกา รูปทางขวามือเป็นการหมุนแบบ Backward Scratch Spin สำหรับคนที่ถนัดมือขวา เท้าซ้ายจะอยู่บน น้ำแข็งและหมุนทวนเข็มนาฬิกา

การอนุรักษ์พลังงาน (Conservation of Energy) ในการกระโดด

ในการกระโดด นักสเก็ตน้ำแข็งจะใช้พลังงานศักย์เคมี (กำลังกล้ามเนื้อ) เพื่อจะเพิ่มความเร็วในการเคลื่อนที่บนน้ำแข็ง เมื่อกระโดดพลังงานศักย์ในรูปของพลังงานศักย์เคมีของกล้ามเนื้อจะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานจลน์ของการเคลื่อนที่ และขณะที่ลอยขึ้นไปพลังงานจลน์จะถูกเปลี่ยนกลับไปเป็นพลังงานศักย์โน้มถ่วง เมื่อความเร็วลดลงความสูงจะเพิ่มมากขึ้น ที่จุดสูงสุดของการกระโดดจะไม่มีพลังงานจลน์เหลืออยู่ (อยู่นิ่ง) ณ ตำแหน่งนี้พลังงานจลน์ทั้งหมดจะกลายเป็นพลังงานศักย์โน้มถ่วง เมื่อขณะเคลื่อนที่ลงพลังงานศักย์ก็จะกลายมาเป็นพลังงานจลน์จนกระทั่งกระทบน้ำแข็ง ดังนั้นนักสเก็ตจึงรู้สึกว่ามีแรงมากระทบกับตัวเองมากจึงจะต้องงอเข่าของขาที่อยู่บนน้ำแข็ง (Skating leg) เมื่อ Landing เพื่อลดแรงกระแทก ถ้าเรารู้ความสูงของการกระโดดเราสามารถคำนวณแรงที่ใช้ในการกระโดด และแรงที่กระแทกในการลงได้

$$KE_1 + PE_1 = KE_2 + PE_2 \quad (2)$$

สังเกตว่าเส้นทางการกระโดดถ้าดูตามจุดศูนย์กลางมวลจะมีลักษณะคล้ายกับการเคลื่อนที่เป็นโปรเจกไทล์ ซึ่งถ้านักสเก็ตต้องการกระโดดให้สูง แน่นนอนจะต้องเตรียมพร้อมกระโดดด้วยความเร็วต้นที่สูงเช่นเดียวกัน



รูปที่ 10 แสดงการกระโดดที่ทุกตำแหน่งของการกระโดดมีการอนุรักษ์พลังงานตามสมการที่ (2)

จากการแข่งขันครั้งนี้ ผู้เขียนได้เห็นว่ามาสองเหรียญทองจากโปรแกรม Artistic ที่เน้นลีลา ความสวยงาม และโปรแกรม Footwork ที่เน้นความเร็วในการเคลื่อนที่ของเท้าเป็นหลัก หนึ่งเหรียญเงินจากโปรแกรม Solo Compulsory เป็นท่าบังคับ กระโดด และหมุน หนึ่งเหรียญทองแดง จากโปรแกรม Freestyle



ทำนี้ ผู้เขียนอยากจะฝากข้อคิดให้ผู้อ่านไว้ว่า ถ้าเราฝันจะทำอะไรสักอย่างหนึ่ง อย่างที่ความฝัน ต้องพยายามเอื้อมันนั้นมาให้ได้ หมั่นฝึกฝนด้วยเทคนิคที่ถูกต้อง เชื่อฟังโค้ช สก๊อตล์มได้ก็ลูกได้ เหมือนกันกับถ้าเราฝันอยากตีพิมพ์ในวารสารนานาชาติ เราจะต้องขยันทำวิจัยอย่างต่อเนื่อง อย่างมีหลักการ อย่าท้อถอย ไม่เพิกเฉยต่อคำแนะนำจาก Mentor หรือ Advisor เมื่อโดนรีเจกเปเปอร์ก็แก้ไขแล้วส่งไปลองตีพิมพ์อีกรอบ รับรองจะมีงานตีพิมพ์ต่อเนื่องทุกปีแน่นอน และผู้เขียนอยากแนะนำให้ดูภาพยนตร์ของ Disney เรื่อง Ice Princess ซึ่งเป็นภาพยนตร์เกี่ยวกับเรื่องราวของเด็กสาวคนหนึ่งที่มีความสามารถทางด้านฟิสิกส์ ซึ่งได้ค้นพบพรสวรรค์ของตัวเองอีกด้านในการเล่นสเก็ตน้ำแข็งลีลา เธอจึงได้ทำโครงการฟิสิกส์เกี่ยวกับฟิสิกส์ของสเก็ตน้ำแข็งโดยใช้ตัวเองเป็นตัวทดสอบทฤษฎี ด้วยความน่าสนใจในเนื้อหาโครงการและด้วยความที่เธอทดลองเล่นสเก็ตน้ำแข็งโดยใช้หลักการฟิสิกส์เข้ามาช่วย จนสามารถกระโดดหมุนสามรอบกลางอากาศ ทำให้เธอได้รับข้อเสนอในการเข้าเป็นนักศึกษาของมหาวิทยาลัยฮาร์วาร์ด

ทั้งทำอีกรอบด้วยเนื้อหาในเพลง Reaching for Heaven ที่นางเอกในเรื่อง Ice Princess ได้ใช้ประกอบการแข่งสเก็ตในตอนจบของเรื่อง

All my life, there was just me and my dreams and the days went ticking by like the beat of my heart. Spend my nights wondering how it would be, when the waiting would end and tomorrow would start. Suddenly I see a light out of the darkness I'm coming alive. So this how it feels reaching for heaven. Like a phoenix rising from the flames I'm reaching for heaven. All this time I never knew I was so strong and you made me find the fire that was there all along. In your eyes, I can see all I can be. Suddenly, I want it all. I know you catch me whenever I fall.

.... So this how it feels reaching for heaven. This is how it feels kissing the sky

ทุกคนมีไฟอยู่ในตัว มีความฝัน เริ่มจากความชอบและใจรัก แต่ต้องหมั่นฝึกฝนในสิ่งนั้นๆ เป็นเวลานานจนเกิดการพัฒนาศักยภาพในด้านนั้น กลายเป็นทักษะที่ติดตัว เป็นมีอาชีพเช่นเดียวกับประโยคที่ว่า

.....This what it means touching forever.....

ผู้เขียนขอขอบคุณโค้ช Penny Mitchell ที่ฝึกสเก็ตน้ำแข็งตอนที่ผู้เขียนเรียนปริญญาเอกที่อเมริกา ขอขอบคุณโค้ชจิน Tina (Pang Rui) ที่ทำให้ผู้เขียนกลับมาฝึกสเก็ตน้ำแข็งอย่างจริงจังอีกครั้งหนึ่งหลังจากห่างหายจากการซ้อมเป็นเวลาเกือบห้าปีเต็ม

แหล่งข้อมูลอ้างอิง

เว็บไซต์: <http://pioneer.netserv.chula.ac.th/~hsatreer>

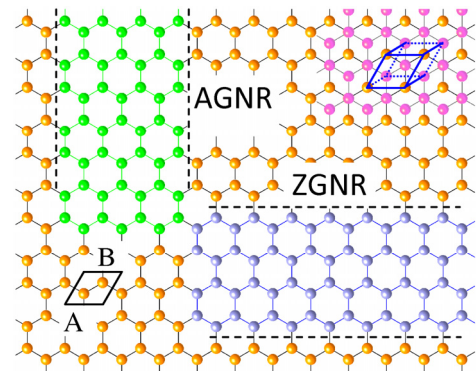
E-mail: satreerat.h@chula.ac.th

แกรฟีน (Graphene) วัสดุที่น่าทึ่งจากปลายดินสอ

สิริโชค จิงถาวรณ¹

ราวปี 2001 หลายคนอาจจำได้ว่าหน่วยประมวลผล (CPU) ตระกูลหนึ่งจากค่าย AMD สามารถปลดล็อกการตั้งค่าความเร็วด้วยการใช้ดินสอ 2B ลากเส้นเชื่อมระหว่างขั้วไฟฟ้าบน CPU เพื่อเพิ่มความถี่สัญญาณนาฬิกา (Overclocking) แทนการซื้อรุ่นที่แพงกว่า (แต่ก็ต้องลงทุนกับชุดระบายความร้อนแทน) ไม่น่าเชื่อเลยว่าในรอยดินสอจากแกรไฟต์ (Graphite) นั้นแฝงด้วยโครงสร้างอัจฉริยะที่เป็นชั้นย่อยๆ เรียกว่า แกรฟีน [1-6] (Graphene – โครงสร้างรูปหกเหลี่ยมของคาร์บอนที่หนาเพียงหนึ่งชั้นอะตอมดังรูปที่ 1) วัสดุที่กำลังเป็นที่สนใจอย่างมากในการศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของระบบที่จำกัดมิติ (Low-dimensional system) การพัฒนาชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ขนาดจิ๋ว (Nanoelectronics) การส่งผ่านประจุ (Transportation) และการพิสูจน์ปรากฏการณ์ที่ทำนายจากทฤษฎี Quantum electrodynamics (QED) เช่น ปรากฏการณ์ Klein paradox [3] ที่ยากยิ่งจนแทบไม่มีทางศึกษาได้ในระบบอนุภาคมูลฐานแต่กลับทำได้ในแกรฟีนบนโต๊ะทดลอง [7] การค้นพบฟิล์มที่หนาเพียงหนึ่งชั้นอะตอมถือได้ว่าเป็นเรื่องที่ไม่คาดฝัน เนื่องจากราว 40 ปีก่อน Mermin เสนอทฤษฎีบท (Mermin-Wagner theorem [8]) ที่ทำนายว่าระบบผลึกที่มีมิติน้อยกว่าสาม (เช่น ระบบเชิงเส้นและเชิงระนาบ) ไม่อาจเกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิใดใด (ยกเว้นที่อุณหภูมิ 0 K) เนื่องจากความไม่เสถียรเชิงสมมาตรและอุณหภูมิศาสตร์ ในอดีตมีการทดลองสนับสนุนทฤษฎีบทดังกล่าวพบว่าจุดหลอมเหลวของฟิล์มบางลดลงอย่างมากเมื่อฟิล์มบางลง (ราวสิบกว่าอะตอม) นักวิจัยพากันเชื่อว่าระบบสองมิติไม่มีทางเสถียรได้ด้วยตัวเอง (Free-standing) โดยปราศจากการสร้างพันธะกับสิ่งรองรับ (Substrate) อีกทั้งความอ่อนตัวทำให้ฟิล์มม้วนเป็นหลอดหรือรูปทรงอื่นเพื่อสร้างมิติที่มีปริมาตร จนเมื่อปี 2004 มีการพบแกรฟีนรวมทั้งสารอื่น เช่น โบรอนไนไตรด์ (BN) ในรูปแบบสองมิติที่หนาเพียงหนึ่งชั้นอะตอม ทั้งนี้ระบบเสถียรอยู่ได้เนื่องจากแผ่นฟิล์มมีการกระเพื่อมในแนวตั้งฉากกับระนาบเสมือนมิติที่สาม ระบบไม่เชิงเป็นสองมิติโดยแท้จริงไม่

ขัดต่อทฤษฎีใดใด การทดลองแกรฟีนครั้งแรกมีขึ้นในปี 2004 โดยกลุ่มวิจัยของ A. K. Geim ภาควิชาฟิสิกส์และดาราศาสตร์ University of Manchester, UK ได้ทำการแยกชั้นแกรฟีนออกจากแกรไฟต์ ด้วยวิธีง่ายๆ โดยการใช้เทปกาวแปะลงบนรอยดินสอแล้วดึงออกหลายๆ ครั้งจนได้ฟิล์มที่บางลงแล้วนำไปแช่ในสารละลายเพื่อแยกแกรฟีนออกจากเทปกาว ซึ่งเทคนิคนี้มีชื่อเรียกต่างกันไป เช่น Scotch-tape method หรือ Drawing method หรือแบบวิชาการ เช่น Mechanical cleavage หรือ Mechanical exfoliation นับแต่นั้นเป็นต้นมาได้มีการศึกษาคุณสมบัติของแกรฟีนอย่างมากมาย



รูปที่ 1 โครงสร้างแกรฟีนที่เซลล์หน่วยประกอบด้วย 2 แลตทิซย่อย (A กับ B) เส้นประแสดงรอยตัดรับบนแกรฟีนที่มีขอบแบบที่เท่าแขน (AGNR) และแบบซิกแซก (ZGNR) ด้านขวามือแสดงโครงสร้างและเซลล์หน่วยของแกรฟีนสองชั้นที่เรียงตัวแบบ AB

ปัญหาที่สำคัญต่อการพัฒนาชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ในหน่วยประมวลผลคือการลดขนาดและเพิ่มความเร็วการทำงานของวงจรรวมทั้งประกอบด้วยทรานซิสเตอร์ (Transistor) จำนวนมากอยู่ภายใน การพัฒนาไปข้างหน้าก็ข้อจำกัดของวัสดุซิลิคอน (Si) ที่เราเคยพอใจกับคุณสมบัติการนำไฟฟ้าและการส่งผ่าน

¹อาจารย์ (ดร.) สาขาวิชาฟิสิกส์ สำนักวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ประจุ ด้วยขนาดที่ยิ่งเล็กลงทำให้ความต้านทานมากขึ้น อีกทั้งความถี่การประมวลผลที่สูงขึ้นทำให้ความร้อนเป็นอุปสรรคกับประสิทธิภาพการทำงานของวงจรรวม ซึ่งส่อแววจะถึงทางตันของยุคซิลิคอนอีกไม่เกินทศวรรษ ทั้งนี้ผู้เข้าชิงตำแหน่งที่จะหมดวาระ ได้แก่ [9] สารประกอบกลุ่ม III-V เช่น InSb InAs GaAs สารผสม InGaAs และแกรฟีนตัวแทนธาตุกลุ่ม IV ซึ่งมีคุณสมบัติที่น่าสนใจ (ที่อุณหภูมิห้อง) ได้แก่

1. ความทนเชิงกล (Mechanical strength) สูงกว่าโลหะใดใดเกือบ 200 เท่า [10] เนื่องจากพันธะเคมีแบบ sp^2

2. พาหะประจุ (Charge carrier) เคลื่อนที่แบบไร้มวลด้วยความเร็ว 1 ใน 300 ของความเร็วแสง (ภาคผนวก) และไม่เกิดการกระเจิงใดใด (Ballistic transport) ในระดับไมโครเมตร จึงไม่เป็นปัญหากับการลดขนาดชิ้นส่วนในระดับนาโนเมตร และความสามารถในการเคลื่อนที่ (Carrier mobility) กว่า $15000 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ [1-2]

3. ความหนาแน่นกระแส (Current conduction capacity) 10^9 A/cm^2 [11] ที่ทนกว่าทองแดงพันเท่า

4. ความนำความร้อน (Thermal conductivity) กว่า 5300 W/mK [11]

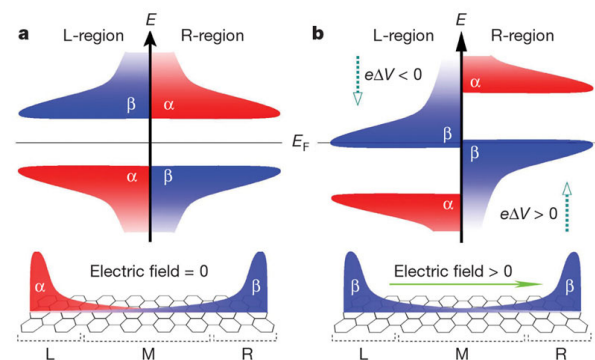
5. แกรฟีนบริสุทธิ์มีช่องว่างพลังงาน (Bandgap) เป็นศูนย์ (เหมือนจะเป็นข่าวยักษ์กับการใช้แกรฟีนในทรานซิสเตอร์) แต่จะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดเล็กลง

ด้วยขนาดที่บางเฉียบระดับอะตอมและนำไฟฟ้าเป็นเลิศ แกรฟีนจะเป็นวัสดุที่น่าจับตามองในการย่อขนาดและเพิ่มประสิทธิภาพของทรานซิสเตอร์ให้สูงขึ้นและกินพลังงานน้อยลง จึงมีการศึกษาคุณสมบัติของแกรฟีนที่มีขนาดเล็กคล้ายแถบรีบบิ้น งานวิจัยจำนวนมากแสดงความเป็นไปได้ที่จะใช้แกรฟีนในด้านต่างๆ เช่น ชิ้นส่วนทรานซิสเตอร์ การใช้เชื่อมต่อวงจรในวงจรรวม อุปกรณ์ที่ใช้คุณสมบัติของสปิน (Spintronics) และวัสดุตรวจจับโมเลกุลแก๊ส

รีบบิ้นแกรฟีน (Graphene nanoribbon, GNR)

รีบบิ้นแกรฟีน (GNR) มีคุณสมบัติเชิงอิเล็กทรอนิกส์ที่เป็นได้ทั้งโลหะและสารกึ่งตัวนำ ซึ่งขึ้นกับรูปร่างและขนาดของ

รีบบิ้น จากโครงสร้างแบบหกเหลี่ยมสามารถเลือกตัดแกรฟีนให้มีขอบได้หลายแบบดังรูปที่ 1 เช่น แบบซิกแซก (Zigzag, ZGNR) แบบที่เก้าแขน (Armchair, AGNR) และแบบผสม (Chiral-GNR) การศึกษาภาคทฤษฎี [12-13] พบว่า Bandgap ขึ้นกับลักษณะของขอบและแปรผกผันกับความกว้างของรีบบิ้น โดย Bandgap ของ AGNR เกิดขึ้นเนื่องจากพันธะของอะตอมคาร์บอนบริเวณขอบรีบบิ้นที่สั้นกว่าภายในรีบบิ้น ($1.42 \text{ \AA}$) ประมาณ 3.5% ร่วมกับการกักขังแบบควอนตัม (Quantum confinement) เนื่องจากความกว้างของรีบบิ้นที่จำกัดบริเวณเหมือนกับบ่อศักย์ (Potential well) ส่วน ZGNR ที่มีขอบแบบซิกแซกนั้นมีคุณสมบัติที่น่าสนใจอย่างมาก เนื่องจากอิเล็กตรอนที่ขอบมีสปินตรงข้ามกัน [13] (สมมติว่าขอบหนึ่งเป็นสปิน α และอีกขอบเป็น β) โดยทั้งแผ่นมีสปินรวมเป็นศูนย์ดังรูปที่ 2 ความต่างศักย์จากการเรียงตัวของสปินที่ขอบรีบบิ้นทำให้เกิด Bandgap ซึ่งลดลงเมื่อรีบบิ้นกว้างขึ้น เนื่องจากปริมาณสปินที่ขอบเท่าเดิมแต่ระยะห่างมากขึ้น ไม่ว่ารีบบิ้นแบบใดก็เป็นข่าวดีที่แกรฟีนมี Bandgap ซึ่งการทดลองส่วนมากยืนยันว่า GNR มี Bandgap และเป็นสารกึ่งตัวนำเนื่องจากความขรุขระที่ขอบรีบบิ้น [14-15] จึงเป็นไปได้ที่จะใช้แกรฟีนแทนซิลิคอน



รูปที่ 2 ความหนาแน่นสปินของอิเล็กตรอนใน ZGNR ที่บริเวณขอบซ้าย (L) และขวา (R) โดย E_F แทนระดับพลังงานสูงสุดที่อิเล็กตรอนอยู่ได้ (Fermi energy) รูป a) อิเล็กตรอนที่ขอบซ้ายมีสปิน α และขอบขวามีสปิน β เมื่อไม่มีสนามไฟฟ้า รูป b) สนามไฟฟ้าทำให้ช่องว่างพลังงานระหว่างสถานะนำไฟฟ้าของอิเล็กตรอนที่ขอบซ้ายและสถานะของอิเล็กตรอนที่ขอบขวาเข้ามาต่อกัน ทำให้อิเล็กตรอนสปิน β นำไฟฟ้าได้ (รูปจาก [16])

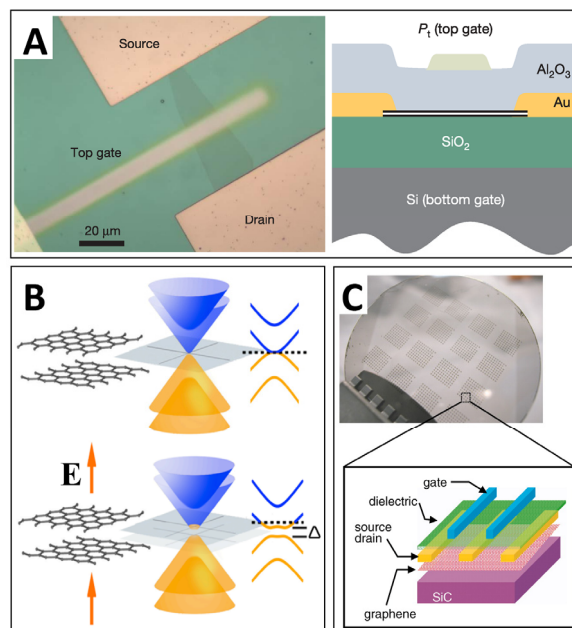
คุณสมบัติสปินใน ZGNR

ด้วยคุณสมบัติของสปินใน ZGNR กลุ่มวิจัยของ M. L. Cohen/S. G. Louie ภาควิชาฟิสิกส์ University of California at Berkeley, California (Louie จบปริญญาเอกในปี 1976 มี Cohen เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาและภายหลังได้กลับมาทำงานที่ภาควิชาฯ ในปี 1980) ได้วิจัยขยายผล [16] พบว่าเมื่อให้สนามไฟฟ้าผ่านขอบของ ZGNR ดังรูปที่ 2 จะทำให้สถานะของสปินชนิดหนึ่ง (β) มี Bandgap ลดลงส่วนสปินอีกชนิดหนึ่ง (α) กลับมี Bandgap กว้างขึ้น ซึ่งสนามไฟฟ้าทำให้เกิดการเลื่อนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนโดยฟังก์ชันที่ศักย์ไฟฟ้าสูงระดับพลังงานของอิเล็กตรอนจะลดลงและกลับกันในฝั่งตรงข้าม ถ้าค่าสนามไฟฟ้ามากพอ ZGNR จะกลายเป็นสารกึ่งโลหะ (Half-metallic) ที่เป็นตัวนำกับอิเล็กตรอนที่มีสปินเฉพาะเท่านั้น (β) โดยได้ประมาณว่าต้องให้สนามไฟฟ้าอย่างน้อย $0.1 \text{ V/\AA}$ กับริบบิ้นที่กว้าง 7 nm โดย Bandgap ที่เป็นฉนวนกับอีกสปิน (α) มีค่า 0.3 eV ทั้งนี้ค่าสนามไฟฟ้าที่ใช้จะลดลงเมื่อริบบิ้นกว้างขึ้น เช่น ต้องให้สนามไฟฟ้าอย่างน้อย $0.045 \text{ V/\AA}$ กับริบบิ้นขนาด $70 \text{ \AA}$

ทรานซิสเตอร์แกรฟีน

เนื่องจากการส่งผ่านประจุแบบ Ballistic แต่ไม่มี Bandgap เปรียบเสมือนรถความเร็วสูงที่วิ่งบนทางด่วนที่ควบคุมการเข้าออกไม่ได้ ข้อจำกัดของ Bandgap ทำให้กระแสไฟฟ้าในช่วงสัญญาณปิด (Off) มีค่าสูง อัตราส่วนสัญญาณเปิดต่อปิด (On-off ratio) ของทรานซิสเตอร์แบบควบคุมกระแสด้วยสนามไฟฟ้า (Field-effect transistors, FET) ที่ทำจากแกรฟีนมีค่าต่ำเพียงประมาณสิบซึ่งใช้งานไม่ได้ เมื่อเทียบกับ FET ที่ทำจากซิลิคอน (Bandgap ราว 1.12 eV) ที่อยู่ในหลักร้อย จนช่วงเดือนมิถุนายน 2009 ปัญหานี้เหมือนจะแก้ได้ โดยกลุ่มวิจัยของ Y. Zhang และ T.-T. Tang [17] ริเริ่มต้นแบบ Dual-gate bilayer graphene FET (รูปที่ 3) ที่ใช้ขั้วไฟฟ้าแบบคู่ (Dual-gate) ประกบด้านบน (Top gate) และด้านล่าง (Bottom gate) แผ่นแกรฟีนสองชั้น (Bilayer graphene) ที่เรียงตัวแบบ AB (AB stacking order) ดังรูปที่ 1 เพื่อควบคุมปริมาณพาหะประจุและปรับ Bandgap ด้วยการสร้างสนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นแกรฟีนซึ่งลดทอนสมมาตรของโครงผลึก (ภาคผนวก) ในเดือนมกราคม

2010 กลุ่มวิจัยของ P. Avouris จาก IBM Thomas J. Watson Research Center ภายใต้โครงการ Carbon Electronics for RF Applications (CERA) ที่สนับสนุนโดยหน่วยงานทางทหารของสหรัฐฯ ได้พัฒนาโครงสร้างทรานซิสเตอร์กับสารไดอิเล็กตริกที่กั้นระหว่างแถบแกรฟีนกับขั้วไฟฟ้า ซึ่งเพิ่มค่า Bandgap ได้ราว 130 meV ที่อุณหภูมิห้อง ทำให้อัตราส่วนสัญญาณเปิดต่อปิดขยับขึ้นเป็น 100 [18] และในช่วงเดียวกันนักวิจัยจาก Pennsylvania State University Electro-Optics Center (EOC) สามารถสังเคราะห์แกรฟีนบนแผ่นเวเฟอร์ (Wafer) ขนาด 100 mm ด้วยการระเหิดซิลิคอน (Silicon sublimation) ออกจากแผ่นเวเฟอร์ SiC และเริ่มพัฒนากระบวนการสังเคราะห์เวเฟอร์ขนาด 200 mm เพื่อให้เข้ากับการผลิตชิ้นส่วนจากซิลิคอนที่โรงงานแต่ละแห่งลงทุนไม่น้อยกว่าพันล้านเหรียญสหรัฐฯ ในเดือนพฤษภาคม 2010 ที่ผ่านมามี IBM ได้พัฒนาทรานซิสเตอร์ที่มีความถี่ถึง 100 GHz [19] (รูปที่ 3) และตั้งเป้าหมายต่อไปที่ 1 THz



รูปที่ 3 รูป a) ทรานซิสเตอร์แบบ Dual-gate bilayer graphene FET ที่ใช้ขั้วไฟฟ้าประกบด้านบน (Top gate) และด้านล่าง (Bottom gate) แผ่นแกรฟีน (รูปจาก [17]) รูป b) แผ่นแกรฟีนสองชั้นแบบ AB (รูปที่ 1) ที่ปรับ Bandgap ด้วยการให้สนามไฟฟ้าเพื่อลดทอนสมมาตรของโครงผลึก (รูปจาก [24])

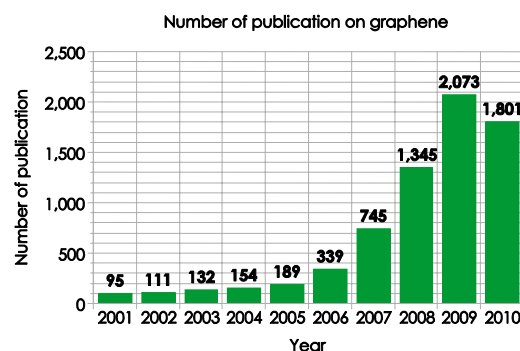
รูป c) ทรานซิสเตอร์บน SiC โดยนักวิจัยจาก IBM ที่ทำความเร็วได้ถึง 100 GHz (รูปจาก [19])

การใช้แกรฟีนเชื่อมต่อวงจร

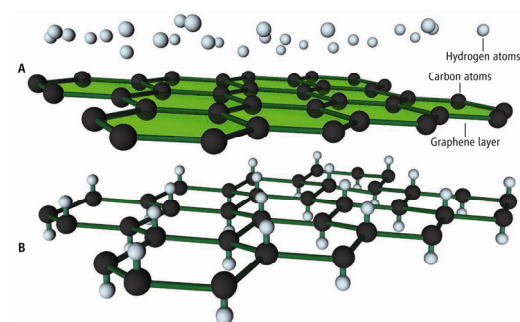
The International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS) ที่ตั้งขึ้นโดย 5 ผู้นำอุตสาหกรรมการผลิตชิป ได้แก่ ยุโรป ญี่ปุ่น เกาหลีใต้ หวัน และ สหรัฐอเมริกา เพื่อแลกเปลี่ยนเทคโนโลยีและลดต้นทุนการผลิต ได้วางแผนระยะยาวชื่อว่า “Beyond CMOS” ช่วงปี 2017 ถึง 2024 ในรายงานปี 2009 [11] เกี่ยวกับการประยุกต์ใช้คุณสมบัติสปินของแกรฟีนกับหน่วยความจำ (Non-volatile memory) หน่วยวิเคราะห์ตรรกะ (Logic functions) และการแก้ไขข้อจำกัดในการลดขนาดชิ้นส่วนโดยใช้แกรฟีนเชื่อมต่อวงจร แม้ว่าริบิ้นแกรฟีนอาจจะเป็นสารกึ่งตัวนำ แต่เนื่องจาก Bandgap ที่น้อยกว่า 0.1 eV ที่ความกว้างราว 11 nm (ขนาดรอยต่อที่ ITRS คาดไว้) พลังงานกระตุ้นจากความร้อนที่อุณหภูมิห้องจะช่วยให้ริบิ้นส่งผ่านประจุแบบ Ballistic ได้ไม่ต่างกับริบิ้นที่เป็นตัวนำ

แม้ว่าแกรฟีนจะสังเคราะห์ได้ง่ายด้วยดินสอกับเทปกาว แต่เทคนิคนี้ไม่เหมาะกับการผลิตในปริมาณมาก เพราะความไม่แน่นอนที่ขึ้นกับยี่ห้อเทปกาวและอื่นๆ อีกมากมาย (ถ้าลองวิจัยอาจได้รางวัลอิกโนเบล (Ig Nobel Prize [20]) ก็เป็นไปได้) ความเป็นไปได้ในการใช้เทคโนโลยีจากแกรฟีนจึงขึ้นกับกระบวนการสังเคราะห์ที่ทำให้จริงเชิงอุตสาหกรรม ที่สำคัญต้องเข้ากันได้กับกระบวนการผลิตปัจจุบันที่ลงทุนไปไม่น้อย การวิจัยอย่างต่อเนื่องนับตั้งแต่การสังเคราะห์แกรฟีนในปี 2004 ซึ่งจุดประกายในช่วงห้าปีที่ผ่านมา เห็นได้จากจำนวนงานวิจัยที่เพิ่มขึ้นตั้งแต่ปี 2007 ดังรูปที่ 4 ซึ่งส่วนมากมุ่งศึกษาคุณสมบัติเชิงอิเล็กทรอนิกส์ของแกรฟีนเพื่อหาวิธีเปิด Bandgap ซึ่งเป็นที่สนใจทั้งด้านทดลองและคำนวณ เช่น การเคลือบสารเคมีบนแกรฟีนเพื่อปรับคุณสมบัติ การเจือแกรฟีนด้วยโบรอนไนไตรด์ที่มีโครงสร้างคล้ายกัน การออกซิไดส์ (Oxidation) และการใช้อะตอมไฮโดรเจนสร้างพันธะกับคาร์บอนในบางบริเวณ (เพื่อลดทอนคุณสมบัติ [Passivation] ของแกรฟีน) หรือทั้งแผ่นแกรฟีนโดยเปลี่ยนพันธะจาก sp^2 เป็น sp^3 ซึ่งมีการทำนายโครงสร้างในปี 2007 และเรียกสารนี้

ว่าแกรเฟน (Graphane – Hydrogenated graphene) [21] มี Bandgap กว่า 3.5 eV โดยไฮโดรเจนจับกับแกรฟีนทั้งด้านบนและล่างดังรูปที่ 5 ในปี 2009 กลุ่มวิจัยของ Geim ได้ทดลองยืนยันโครงสร้างและพบว่ากระบวนการดังกล่าวผันกลับได้ [22] ซึ่งอาจเป็นไปได้ในการใช้แกรฟีนเพื่อเก็บไฮโดรเจนเพราะอัตราส่วน C:H แบบ 1:1 ต่อมามีการศึกษาโครงสร้างแกรฟีนที่มีไฮโดรเจนเพียงด้านเดียวเรียกว่าแกรฟอน (Graphone) ไม่น่าเชื่อเลยว่าวัสดุที่มีโครงสร้างอันเรียบง่ายกลับแสดงคุณสมบัติที่น่าทึ่งมากมาย ด้วยส่วนร่วมของนักวิจัยคาดว่าในอนาคตที่ไม่นานเกินรอเราอาจได้เห็นผลิตภัณฑ์หรือเทคโนโลยีที่สร้างขึ้นจากแกรฟีนไม่ช้าก็เร็ว



รูปที่ 4 จำนวนงานวิจัยที่เกี่ยวกับแกรฟีนในฐานข้อมูล ISI ณ วันที่ 17 สิงหาคม 2010

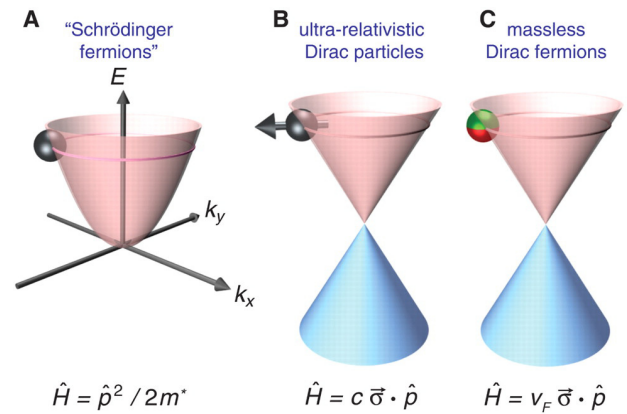


รูปที่ 5 โครงสร้างแกรฟีนที่สร้างพันธะกับไฮโดรเจน (CH) หรือแกรเฟน (รูปจาก [25])

ภาคผนวก: การสร้างพันธะของคาร์บอน โครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ของแกรฟีนและธาตุกลุ่มสี่อื่น

คาร์บอนมีการจัดเรียงอิเล็กตรอนแบบ $1s^2 2s^2 2p^2$ อิเล็กตรอนชั้นนอก 4 ตัว สามารถเกิดพันธะได้หลายแบบขึ้นกับการผสมสถานะ (Hybridization – sp sp^2 sp^3) การสร้างพันธะในแกรฟีน แกรไฟต์ และท่อคาร์บอนขนาดจิ๋ว (Carbon nanotube) เกิดจากอิเล็กตรอนชั้นนอก 3 ตัวสร้างพันธะแบบ sp^2 และ 1 ตัวที่เหลืออยู่ในสถานะ p_z (p_z -orbital) จึงมีที่ว่างให้อิเล็กตรอนได้อีก 1 ตัว เมื่อคาร์บอนอีกอะตอมมาสร้างพันธะด้วย จะทำให้สถานะ p_z จากสองอะตอมนี้เปลี่ยนเป็นสถานะที่มีพลังงานต่ำลง (Bonding state) และมีสถานะว่างที่มีพลังงานสูงกว่า (Antibonding state) เมื่อคาร์บอนจำนวนมากมารวมกันเป็นผลึกจึงเกิดเป็นแถบพลังงานที่มีอิเล็กตรอนอยู่ เนื่องจาก Bonding state (π -band) และแถบที่ว่างเนื่องจาก Antibonding state (π^* -band)

ผลการคำนวณโครงสร้างแถบพลังงาน (Band structure – ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานกับโมเมนตัมของอิเล็กตรอน) พบว่า π -band และกับ π^* -band พอดี (รูปที่ 6) แกรฟีนจึงมี Bandgap เป็นศูนย์ ที่น่าสนใจคือความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น ณ จุดสัมผัส (Dirac point) ซึ่งคล้ายกับอนุภาคโฟตอน (Photon) ของแสงที่ไร้มวลและมีพลังงานกับโมเมนตัมเป็น $E = pc$ (โดยที่ $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$) อิเล็กตรอนในสถานะนี้ จึงเคลื่อนที่ในระบบแบบไร้มวลและทำตัวเป็นอนุภาคเชิงสัมพัทธภาพ (Relativistic particle) ตามสมการของ Dirac ด้วยความเร็วประมาณ $c/300$ [3] มีการทำนายว่าคุณสมบัติที่คล้ายกันเกิดขึ้นได้กับธาตุกลุ่มสี่อื่น เช่น Si และ Ge ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวเกี่ยวข้องกับสมมาตรของโครงสร้างผลึกแบบหกเหลี่ยมร่วมกับสมมาตรแบบผกผัน [23] (Inversion symmetry – โครงสร้างผลึกไม่เปลี่ยนเมื่อกลับเครื่องหมายของตำแหน่งทั้งสามมิติ $(x, y, z) \rightarrow (-x, -y, -z)$) ซึ่งไม่มีในสารผลึก เช่น โบรอนไนไตรด์ Inversion symmetry เกี่ยวข้องกับ Bandgap อย่างชัดเจน เห็นได้จากชั้นแกรฟีนที่เรียงตัวแบบ AB (AB stacking order) ดังรูปที่ 1 ซึ่งมีสมมาตรนี้ แต่เมื่อสนามไฟฟ้าทะลุผ่านแผ่นแกรฟีน สมมาตรนี้ในแกน z จะหายไปทำให้เกิด Bandgap (รูปที่ 3)



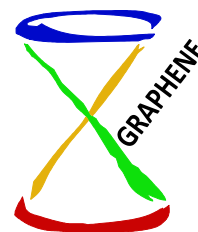
รูปที่ 6 รูป a) สถานะอิเล็กตรอนในสารทั่วไปอธิบายด้วยสมการ Schrodinger ที่พาหะประจุมีมวล m^* พลังงานกับโมเมนตัมสัมพันธ์กันแบบถ้วยพาราโบลา รูป b) อนุภาคที่ไม่มีมวลเคลื่อนที่ด้วยความเร็วแสง c และเป็นไปตามสมการ Dirac พลังงานกับโมเมนตัมสัมพันธ์กันแบบเชิงเส้น σ เป็นเมทริกซ์สปีน รูป c) โครงสร้างแถบพลังงานของแกรฟีนที่เป็นแบบเชิงเส้นเหมือนกรวยใน 2 มิติ บริเวณใกล้จุดสัมผัส (จุดนี้อยู่ที่ตำแหน่ง K ใน first Brillouin zone) พาหะประจุไม่มีมวลเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว $v_F \approx c/300$ σ แทนสปีนเทียมจากสองแลตทิซย่อย (รูปที่ 1) ในโครงผลึกแบบหกเหลี่ยม (รูปจาก [26])

คุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกับสมมาตรของโครงสร้างผลึกที่น่าสนใจในแกรฟีนคือบริเวณใกล้จุดสัมผัส เมื่อกระตุ้นอิเล็กตรอนจาก π -band ไป π^* -band จะเกิดสถานะว่างเปรียบเหมือนกับอนุภาคเทียม (Quasiparticle) ที่มีประจุบวกเรียกว่า โฮล (Hole) โดยทั่วไปอิเล็กตรอนและโฮลจะอธิบายด้วยสมการ Schrödinger คนละสมการเพราะอนุภาคทั้งสองมีมวลต่างกัน โดยขึ้นกับระบบของสาร แต่ในแกรฟีนอนุภาคทั้งสองกลับมีคุณสมบัติตามสมมาตรแบบควบคู่ประจุ (Charge-conjugation symmetry) [3] จากสมมาตรของโครงสร้างผลึกแบบหกเหลี่ยม (มี 2 แลตทิซย่อย [Sublattice] ที่เหมือนกันในเซลล์หน่วยดังรูปที่ 1) สมการอธิบายสถานะอิเล็กตรอนของระบบแสดงความเชื่อมโยงกับแลตทิซย่อยทั้งสองคล้ายกับดัชนีสปีน (Spin index) ในทฤษฎี Quantum electrodynamics (QED) [1, 3] โดยดัชนีนี้เกิดจากโครงสร้างผลึกไม่ใช่สปีนจริงของอนุภาค จึงเรียกว่าสปีนเทียม (Pseudospin) ซึ่งเกี่ยวข้องกับการอธิบายสถานะของ

อนุภาคทั้งสอง [3] จึงได้มีการศึกษาปรากฏการณ์ Klein paradox (การทะลุผ่านศักย์ขวางกั้นที่ทั้งสูงและกว้างได้อย่างสมบูรณ์แบบของอนุภาคสัมพัทธภาพ) ในแกรฟีน [7]

เอกสารอ้างอิง

- [1] A. K. Geim, and K. S. Novoselov, Nat. Mater. **6**, 183 (2007).
- [2] K. S. Novoselov *et al.*, Science **306**, 666 (2004).
- [3] A. H. Castro Neto *et al.*, Rev. Mod. Phys. **81**, 109 (2009).
- [4] A. K. Geim, and A. H. MacDonald, Physics Today **60**, 35 (2007).
- [5] K. Novoselov, Physics World, 27 (August 2009).
- [6] A. K. Geim, and P. Kim, Scientific American, 90 (April 2008).
- [7] A. F. Young, and P. Kim, Nat. Phys. **5**, 222 (2009).
- [8] N. D. Mermin, Phys. Rev. **176**, 250 (1968).
- [9] P. Gargini, (Intel's director of technology strategy), presented in the Industry Strategy Symposium Europe, Dublin, Ireland (February 2010).
- [10] C. Lee *et al.*, Science **321**, 385 (2008).
- [11] International Technology Roadmap for Semiconductors, <http://www.itrs.net/Links/2009ITRS/Home2009.htm> (2009).
- [12] K. Nakada *et al.*, Phys. Rev. B **54**, 17954 (1996).
- [13] Y.-W. Son, M. L. Cohen, and S. G. Louie, Phys. Rev. Lett. **97**, 216803 (2006).
- [14] M. Y. Han *et al.*, Phys. Rev. Lett. **98**, 206805 (2007).
- [15] P. Avouris, Z. Chen, and V. Perebeinos, Nat. Nano. **2**, 605 (2007).
- [16] Y.-W. Son, M. L. Cohen, and S. G. Louie, Nature **444**, 347 (2006).
- [17] Y. Zhang *et al.*, Nature **459**, 820 (2009).
- [18] F. Xia *et al.*, Nano Lett. **10**, 715 (2010).
- [19] Y.-M. Lin *et al.*, Science **327**, 662 (2010).
- [20] รางวัลที่ให้กับงานวิจัยที่ดูขบขันแต่กระตุ้นให้คิด ซึ่ง Prof. Geim ผู้โด่งดังจากแกรฟีนได้ครองรางวัลในปี 2000 ด้วยการทำให้กบลอยได้โดยใช้สนามแม่เหล็ก.
- [21] J. O. Sofo, A. S. Chaudhari, and G. D. Barber, Phys. Rev. B **75**, 153401 (2007).
- [22] D. C. Elias *et al.*, Science **323**, 610 (2009).
- [23] A. Y. Liu, R. M. Wentzcovitch, and M. L. Cohen, Phys. Rev. B **39**, 1760 (1989).
- [24] F. Wang, Bilayer Graphene Gets a Bandgap, <http://www.lbl.gov/msd/highlights/highlights.html>.
- [25] A. Savchenko, Science **323**, 589 (2009).
- [26] A. K. Geim, Science **324**, 1530 (2009).



การวิเคราะห์โครงสร้างระดับนาโน ด้วยเทคนิคการวัดการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์และการคำนวณ

จิรโรจน์ ต.เทียนประเสริฐ¹

ในปัจจุบันนี้ นักวิทยาศาสตร์ได้ให้ความสนใจในการสังเคราะห์และวิเคราะห์วัสดุที่มีขนาดในระดับนาโนเมตรเป็นอย่างมาก โดยจะเห็นได้จากผลงานวิจัยภายในช่วงหลายปีที่ผ่านมา เทคนิคการวิเคราะห์ที่ใช้โดยทั่วไปนั้นอาจให้ผลได้ไม่ดั่งใจเมื่อทำการวิเคราะห์โครงสร้างในระดับที่เล็กมาก ยกตัวอย่างเช่นเทคนิคที่ใช้กันอย่างแพร่หลายอย่าง การวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction) ซึ่งเทคนิคนี้เป็นเทคนิคที่สามารถใช้วิเคราะห์โครงสร้างของอะตอมภายในวัสดุที่เราสนใจได้ แต่หากอะตอมภายในวัสดุที่เราสนใจมีปริมาณอยู่น้อยมาก หรือรวมตัวกันเป็นกลุ่มของคลัสเตอร์เล็กๆ เทคนิคนี้ก็จะใช้ไม่ได้ผล ด้วยเหตุนี้ นักวิทยาศาสตร์จึงมีการคิดค้นเทคนิคการวัดด้วยวิธีอื่นเพื่อนำมาวิเคราะห์โครงสร้างของอะตอมภายในวัสดุที่มีปริมาณอยู่น้อยมาก หรืออยู่รวมกันเป็นกลุ่มก้อนในลักษณะของนาโนคลัสเตอร์ เทคนิคหนึ่งที่ใช้กันอย่างแพร่หลายและเป็นที่ยอมรับอย่างมากในการวิเคราะห์โครงสร้างระดับนาโนนี้ คือ เทคนิคสเปกโตรสโคปีการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ (X-ray absorption spectroscopy; XAS) [1] ดังนั้นในบทความนี้จะอธิบายถึงหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ตลอดจนถึงวิธีการคำนวณเพื่อใช้ประกอบในการวิเคราะห์โครงสร้างระดับนาโนนี้

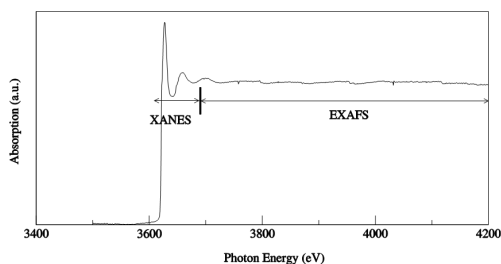
สเปกโตรสโคปีการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์นี้เป็นเทคนิคที่มีประโยชน์อย่างมากในการใช้วิเคราะห์เพื่อระบุโครงสร้างโดยรวมของอะตอมที่เราสนใจหรือต้องการศึกษาภายในวัสดุซึ่งอาจจะเป็นของแข็งหรือของเหลวก็ได้ ดังเช่นงานวิจัยการวิเคราะห์โครงสร้างโดยรวมของคลอไรด์และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในน้ำด้วยการวัดการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ [2] และการระบุโครงสร้างของระบบอัลลอยของสารอินเดียมออกไซด์ในไตรด์ (Indium Oxynitride) ด้วยสเปกโตรสโคปีการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ [3] เป็นต้น โดยหลักการแล้วเทคนิค XAS นี้คือการวัดการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ของอะตอมในสารตัวอย่าง

ที่เราสนใจที่ค่าพลังงานของรังสีเอ็กซ์ที่แตกต่างกัน ดังนั้นจะเห็นได้ว่าเทคนิคนี้จำเป็นต้องใช้แหล่งกำเนิดรังสีเอ็กซ์ที่สามารถให้ค่าพลังงานได้อย่างต่อเนื่องและจำเป็นต้องสามารถเลือกค่าพลังงานของรังสีเอ็กซ์ได้อย่างแม่นยำอีกด้วย ดังนั้นการทดลองที่ใช้เทคนิคนี้ส่วนใหญ่แล้วจะตั้งอยู่คู่กับแหล่งกำเนิดแสงซินโครตรอน เนื่องจากแหล่งกำเนิดแสงซินโครตรอนนี้จะให้ค่าพลังงานรังสีเอ็กซ์ที่มีค่าต่อเนื่องและสามารถเลือกค่าพลังงานของรังสีเอ็กซ์ได้อย่างแม่นยำไปพร้อมกัน ดังเช่นสถานีทดลองการวัดการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ (BL-8: XAS) ภายในสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) ที่ตั้งอยู่ที่จังหวัดนครราชสีมา ซึ่งข้อดีที่ตามมาอีกประการหนึ่งเมื่อใช้แสงซินโครตรอนเป็นแหล่งกำเนิดก็คือ รังสีเอ็กซ์ที่ได้นี้จะมีพลังงานที่ค่อนข้างสูงและมีความเข้มมาก ทำให้เหมาะกับการนำไปใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างของอะตอมในวัสดุที่มีปริมาณอยู่น้อยๆหรือรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนในระดับนาโนได้เป็นอย่างดี

เมื่อเราทำการทดลองวัดการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ของอะตอมในสารตัวอย่างที่เราสนใจ สิ่งที่ได้คือสเปกตรัมการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ (ซึ่งต่อไปจะเรียกสั้นๆ ว่าสเปกตรัมการดูดกลืน) ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยหลักการแล้วสเปกตรัมการดูดกลืนจะถูกแบ่งออกเป็นสองช่วง ดังนี้ ในช่วงแรกจะเรียกว่าสเปกโตรสโคปีการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ในย่านใกล้ขอบ (X-ray absorption near-edge spectroscopy) หรือเรียกโดยย่อว่า XANES ซึ่งในส่วนนี้จะครอบคลุมช่วงพลังงานไม่เกิน 50 eV จากขอบการดูดกลืน (Absorption edge) ดังแสดงในรูปที่ 1 ช่วงที่สองจะเรียกว่า สเปกโตรสโคปีอย่างละเอียดของส่วนขยายการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ (Extended x-ray absorption fine-structure spectroscopy) หรือเรียกโดยย่อว่า EXAFS โดยในส่วนนี้จะครอบคลุมช่วงพลังงานที่สูงกว่าในช่วงแรก โดยในย่านของ XANES นั้นจะเป็นส่วนที่ไวต่อ

¹อาจารย์ (ดร.) ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

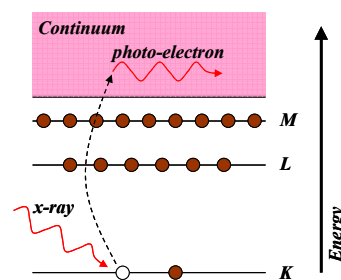
สถานะออกซิเดชันและลักษณะโครงสร้างโคจรของอะตอมที่ดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ ดังนั้นสเปกตรัมในย่านนี้จึงสามารถใช้ระบุถึงสถานะออกซิเดชันและลักษณะโครงสร้างโคจรของอะตอมที่ดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ได้ แต่สเปกตรัมในย่านของ EXAFS นั้นส่วนใหญ่จะใช้เพื่อคำนวณหาระยะห่างระหว่างอะตอม จำนวนของอะตอมรอบข้าง และชนิดของอะตอมรอบข้างของอะตอมที่ดูดกลืนรังสีเอ็กซ์



รูปที่ 1 สเปกตรัมการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ของ $1s$ อิเล็กตรอน (K -edge) ของคลอรีนไอออนที่ละลายอยู่ในน้ำ โดยภายในรูปได้แสดงให้เห็นถึงช่วงของ XANES และ EXAFS

การดูดกลืนรังสีเอ็กซ์โดยอิเล็กตรอนนั้นสามารถทำความเข้าใจได้โดยการพิจารณาจากปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric effect) ในกระบวนการนี้โฟตอนรังสีเอ็กซ์จะถูกดูดกลืนโดยอิเล็กตรอนที่อยู่ในระดับชั้นพลังงานที่อยู่ลึกลงไปมากหรือระดับชั้นพลังงานหลัก (Core level) นั่นคือ อิเล็กตรอนที่อยู่ในระดับชั้น $1s$ หรือ $2p$ เป็นต้น (ดังแสดงในรูปที่ 2) หลังจากนั้นโฟโตอิเล็กตรอน (Photoelectron) หรือฟลูออเรสเซนซ์จะถูกสร้างขึ้นมา โดยจะกล่าวถึงรายละเอียดในส่วนถัดไป

ในการที่จะทำให้เกิดกระบวนการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์นั้นพลังงานของรังสีเอ็กซ์ที่ฉายเข้ามาจะต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับค่าพลังงานยึดเหนี่ยว (Binding energy) ของอิเล็กตรอนในระดับชั้นพลังงานหลักนั้นๆ ถ้าพลังงานของรังสีเอ็กซ์ที่ฉายเข้ามามีค่าน้อยกว่าพลังงานยึดเหนี่ยว อิเล็กตรอนจะไม่ดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ แต่ถ้าพลังงานของรังสีเอ็กซ์ที่ฉายเข้ามามีค่ามากกว่าหรือเท่ากับค่าพลังงานยึดเหนี่ยวนั้น อิเล็กตรอนจะถูกกระตุ้นจากสถานะเริ่มต้น (Initial state) ซึ่งในกรณีนี้รังสีเอ็กซ์จะถูกดูดกลืนและพลังงานส่วนที่เกินมาจะเป็นพลังงานที่ติดตัวไปกับโฟโตอิเล็กตรอนที่หลุดออกจากอะตอมนั้นเอง



รูปที่ 2 รังสีเอ็กซ์ถูกดูดกลืนโดยอิเล็กตรอนในระดับชั้นพลังงานหลัก ($1s$) หลังจากนั้นอิเล็กตรอนในระดับชั้นพลังงานหลักนี้จะถูกกระตุ้นให้หลุดออกจากอะตอม

กระบวนการการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์นี้โดยพื้นฐานแล้วจะเกี่ยวข้องกับสัมประสิทธิ์การดูดกลืน นั่นก็คือความน่าจะเป็นที่อิเล็กตรอนจะดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ ซึ่งเป็นไปตามกฎของเบียร์ (Beer's Law)

$$I = I_0 e^{-\mu t}, \quad (1)$$

โดยที่ I_0 คือความเข้มของรังสีเอ็กซ์ที่ฉายเข้ามายังสารตัวอย่าง t คือความหนาของสารตัวอย่าง และ I คือความเข้มของรังสีเอ็กซ์ที่ผ่านออกมาจากสารตัวอย่าง (หลังถูกดูดกลืน)

เมื่อทำการเพิ่มพลังงานของรังสีเอ็กซ์ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งถึงจุดที่พลังงานของรังสีเอ็กซ์มีค่าเท่ากับพลังงานยึดเหนี่ยว จะเห็นว่าสเปกตรัมการดูดกลืนมีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนทำให้เห็นเป็นพีค ดังรูปที่ 1 ในตำแหน่งนี้จะถูกเรียกว่าขอบการดูดกลืน ซึ่งจะสอดคล้องกับพลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นอิเล็กตรอนในชั้นพลังงานหลักไปยังสถานะว่าง (Unoccupied state) แต่เนื่องจากอะตอมแต่ละชนิดมีระดับชั้นพลังงานหลักที่แตกต่างกัน ดังนั้นด้วยเทคนิคนี้จึงทำให้สามารถเลือกวิเคราะห์อะตอมที่เราสนใจที่อยู่ภายในสารตัวอย่างได้โดยการเลือกช่วงพลังงานของรังสีเอ็กซ์ที่ฉายเข้ามายังสารตัวอย่าง จะเห็นได้ว่าการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์นี้จะเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานของอิเล็กตรอนที่สถานะเริ่มต้นกับสถานะสุดท้าย (Final state) เนื่องจากสถานะเริ่มต้นหรือสถานะหลัก (Core state) มีระดับพลังงานที่ชัดเจนซึ่งแตกต่างกับสถานะสุดท้ายที่จะมีลักษณะเป็นช่วงที่กว้าง (Broad) ซึ่งเมื่อทำการตรวจสอบ (Probe) อะตอมที่อยู่ในสารตัวอย่าง สถานะการเกิดพันธะและสถานะไม่เกิดพันธะ (Bonding and anti-bonding state) นั้น จะเป็นสิ่งที่นำไปสู่โครงสร้างความหนาแน่นสถานะสุดท้าย โดยที่สัมประสิทธิ์การ

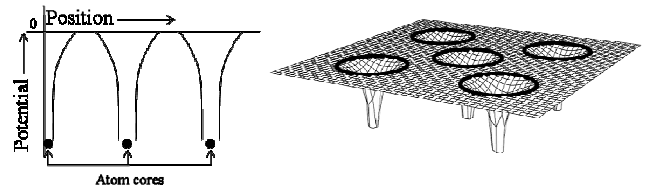
ดูกลืนรังสีอิเล็กซ์ $\mu(\omega)$ มีค่าเป็นไปตามกฎ Fermi's golden rule [4-5]

$$\mu \propto \sum_f |\langle f | D | i \rangle|^2 \delta(E_i - E_f + \omega), \quad (2)$$

โดย $|i\rangle$, $|f\rangle$, E_i , และ E_f คือสถานะเริ่มต้น สถานะสุดท้าย และค่าพลังงานที่สอดคล้องกับแต่ละสถานะตามลำดับ ω และ D คือความถี่ของโฟตอนและตัวดำเนินการไดโพล กฎ Fermi's golden rule นี้เป็นตัวกำหนดเงื่อนไขในการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนในสถานะเริ่มต้น (ระดับชั้นพลังงานหลัก) ไปยังสถานะสุดท้าย ยกตัวอย่างเช่น ถ้าสถานะเริ่มต้นของอิเล็กตรอนคือ 1s ดังนั้น สถานะสุดท้ายที่เป็นไปได้ตามกฎ Fermi's golden rule จะต้องเป็นสถานะที่มีสมมาตรแบบ p นั่นเอง แต่อย่างไรก็ตามการอธิบายผลจากสเปกตรัมการดูดกลืนโดยอาศัยแค่เพียงข้อมูลจากการทดลองนั้นเป็นสิ่งที่ทำได้ยาก นักวิทยาศาสตร์จึงได้คิดวิธีการคำนวณเพื่อทำการจำลองสเปกตรัมการดูดกลืนจากแบบจำลองที่สนใจ ซึ่งในทางทฤษฎีแล้วนั้น สามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน μ ได้อยู่สองวิธี [6]

วิธีที่หนึ่งเป็นการคำนวณหาค่า μ โดยทำการแก้ระบบสมการของชโรดิงเงอร์เพื่อให้ได้ค่าสถานะเริ่มต้น $|i\rangle$ และสถานะสุดท้าย $|f\rangle$ ซึ่งวิธีนี้ก็คือการคำนวณโครงสร้างแถบพลังงาน (Band structure calculation) นั่นเอง สำหรับกรณีของระบบโมเลกุลหรือระบบคลัสเตอร์เล็กๆ สถานะเหล่านี้สามารถคำนวณได้ด้วยโปรแกรมที่อยู่บนพื้นฐานของกระบวนการคำนวณทางเคมีเชิงควอนตัมได้แก่ โปรแกรม GAUSSIAN [7] แต่สำหรับในกรณีที่ระบบมีความเป็น Periodic (หรือระบบผลึก) การแก้สมการชโรดิงเงอร์สามารถทำได้อย่างมีประสิทธิภาพในปริภูมิส่วนกลับ (Reciprocal space) ดังนั้นในกรณีนี้จะสามารถคำนวณสถานะดังกล่าวได้ด้วยโปรแกรมที่อยู่บนพื้นฐานของกระบวนการคำนวณทางควอนตัมฟิสิกส์ของของแข็ง ซึ่งได้แก่ โปรแกรม LMTO [8-9] โปรแกรม Wein2k [10] โปรแกรม VASP [11-12] และโปรแกรม Siesta [13] เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามระดับชั้นพลังงานหลักที่อยู่ลึก (ได้แก่ 1s หรือ 2p เป็นต้น) ของอะตอมที่ประกอบขึ้นเป็นวัสดุนี้จะมีค่าเปลี่ยนแปลงน้อยมากหรือแทบจะไม่เปลี่ยนแปลงเลยจากระดับชั้นพลังงานหลักของอะตอมเดี่ยวๆ ดังนั้นระดับชั้นพลังงานหลักของอะตอมเดี่ยวสามารถประมาณใช้เป็นสถานะเริ่มต้นได้ แต่ในกรณีนี้นั้นจะมีข้อเสียคือค่าขอบการดูดกลืนที่คำนวณได้จะมี

ค่าไม่ถูกต้องเนื่องจากการเลื่อนของระดับพลังงานระหว่างอะตอมเดี่ยวๆ กับอะตอมที่ประกอบขึ้นเป็นวัสดุ ซึ่งการคำนวณด้วยวิธีนี้ให้ผลการคำนวณเป็นที่น่าเชื่อถืออย่างมาก ดังจะเห็นได้จากผลงานวิจัยหลายชิ้นที่ใช้วิธีการคำนวณนี้ผสมผสานกับการวัดการดูดกลืนรังสีอิเล็กซ์เพื่อใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างระดับนาโนของสารต่างๆ [3, 14-16]



รูปที่ 3 แสดงศักย์มัพิน-ติน (Muffin-tin potential) ที่ถูกใช้ค่าให้เป็นศูนย์ที่ตำแหน่งช่องว่างระหว่างอะตอม [1]

วิธีที่สองเป็นการคำนวณค่า μ โดยอาศัยวิธีการคำนวณแบบการกระเจิงซ้อน (Multiple scattering) ซึ่งในวิธีการคำนวณนี้ศักย์ของอะตอมจะถูกประมาณค่าเป็นแบบมัพิน-ติน (Muffin-tin) ดังแสดงในรูปที่ 3 จากรูปแสดงให้เห็นถึงศักย์ของอะตอมบนระนาบที่ตัดผ่านกึ่งกลางอะตอมในวัสดุ เมื่อพิจารณาโดยใช้ฟังก์ชันของกรีน [4] เราสามารถเขียนกฎ Fermi's golden rule ได้เป็น [6]

$$\mu(E) \propto -\frac{1}{\pi} \text{Im} \langle i | \hat{e}^* \cdot \mathbf{r} \mathbf{G}(r, r'; E) \hat{e} \cdot \mathbf{r}' | i \rangle \Theta(E - E_F), \quad (3)$$

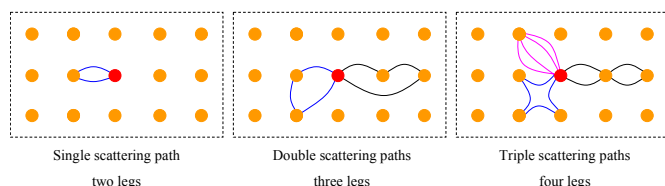
โดยที่

$$\begin{aligned} \mathbf{G} &= (\mathbf{1} - \mathbf{G}^0 \mathbf{t})^{-1} \mathbf{G}^0, \\ \mathbf{G} &= \mathbf{G}^0 + \mathbf{G}^0 \mathbf{t} \mathbf{G}^0 + \mathbf{G}^0 \mathbf{t} \mathbf{G}^0 \mathbf{t} \mathbf{G}^0 + \mathbf{G}^0 \mathbf{t} \mathbf{G}^0 \mathbf{t} \mathbf{G}^0 \mathbf{t} \mathbf{G}^0 + \dots, \end{aligned} \quad (4)$$

โดยที่ $\mathbf{G}$ เป็นฟังก์ชันที่ใช้อธิบายเส้นทางที่เป็นไปได้ทั้งหมดที่โฟโตอิเล็กตรอนมีปฏิสัมพันธ์กับอะตอมรอบข้าง $\mathbf{G}^0$ เป็นฟังก์ชันที่ใช้อธิบายถึงการเคลื่อนที่ของโฟโตอิเล็กตรอนระหว่างจุดสองจุดในปริภูมิ และ $\mathbf{t}$ คือฟังก์ชันที่ใช้ในการอธิบายถึงการกระเจิงของโฟโตอิเล็กตรอนกับอะตอมรอบข้าง

จากสมการข้างต้นแสดงให้เห็นว่า เราสามารถคำนวณสเปกตรัมการดูดกลืนได้โดยการรวมผลของการกระเจิงจากทุกๆ เส้นทาง ตัวอย่างการกระเจิงในบางเส้นทางแสดงได้ดังรูปที่ 4 ซึ่ง

รายละเอียดสำหรับการคำนวณด้วยวิธีนี้สามารถอ่านเพิ่มเติมได้จากเอกสารอ้างอิง [4] ในทางปฏิบัติแล้วเส้นทางการกระเจิงที่เกิดจากอะตอมรอบข้างซึ่งอยู่ใกล้อะตอมที่ดูดกลืนรังสีเอ็กซ์จะมีความสำคัญที่สุด วิธีการคำนวณดังกล่าวมานี้ได้มีผู้นำมาสร้างเป็นโปรแกรมเพื่อใช้ในการจำลองสเปกตรัมการดูดกลืนจากแบบจำลองต่างๆ นั่นคือโปรแกรม FEFF [1, 17] โปรแกรมนี้ได้รับความนิยมอย่างมากในการนำมาใช้เพื่อคำนวณสเปกตรัมการดูดกลืนจากแบบจำลองต่างๆ เนื่องจากสามารถทำได้ง่ายกว่าวิธีแรกและยังสามารถจำลองสเปกตรัมการดูดกลืนได้ทั้งสองช่วงทั้ง XANES และ EXAFS ดังนั้นวิธีการคำนวณแบบหลังนี้จึงได้รับความนิยมมาก ดังจะเห็นได้จากผลงานวิจัยที่ผ่านมา



รูปที่ 4 แสดงตัวอย่างเส้นทางการกระเจิง วงกลมสีแดงแสดงถึงอะตอมที่ดูดกลืนรังสีเอ็กซ์

กล่าวโดยสรุปจะเห็นว่าเทคนิคการวัดการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์สามารถใช้เพื่อวิเคราะห์โครงสร้างระดับนาโนได้เป็นอย่างดี แต่ถึงอย่างไรก็ตามการอธิบายผลโดยใช้เพียงข้อมูลจากการทดลองเป็นสิ่งที่ยาก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้วิธีการคำนวณเข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ วิธีการคำนวณทั้งสองวิธีที่กล่าวมาข้างต้นนี้มีความเหมาะสมในการคำนวณสเปกตรัมการดูดกลืนในย่านพลังงานที่แตกต่างกันนั่นคือ XANES หรือ EXAFS จากการคำนวณด้วยวิธีแรก สถานะเริ่มต้นและสถานะสุดท้ายที่คำนวณได้จะเป็นสถานะของระบบที่อยู่ในสถานะพื้น (Ground state) ซึ่งในการคำนวณนี้จะสามารถคำนวณสถานะว่างหรือสถานะสุดท้าย (สถานะแถบนำไฟฟ้าสำหรับสารกึ่งตัวนำ) ได้แม่นยำไปถึงประมาณ 50 eV จากระดับเฟอร์มี (Fermi level) ดังนั้นวิธีการคำนวณแบบแรกจึงสามารถใช้เพื่อคำนวณสเปกตรัมการดูดกลืนย่าน XANES ซึ่งเป็นย่านที่พลังงานของโฟโต้อิเล็กตรอนไม่สูงมาก ในทางตรงกันข้ามวิธีการคำนวณแบบหลังนี้สามารถคำนวณสเปกตรัมการดูดกลืนได้ทั้งสองช่วง และในการคำนวณวิธีที่สองนี้ถึงแม้ว่าในกรณีที่รูปร่างของศักย์อะตอมที่ใช้ในการ

คำนวณไม่ถูกต้องมากนักแต่ผลการคำนวณสเปกตรัมที่ได้ก็มีความถูกต้องเพียงพอ

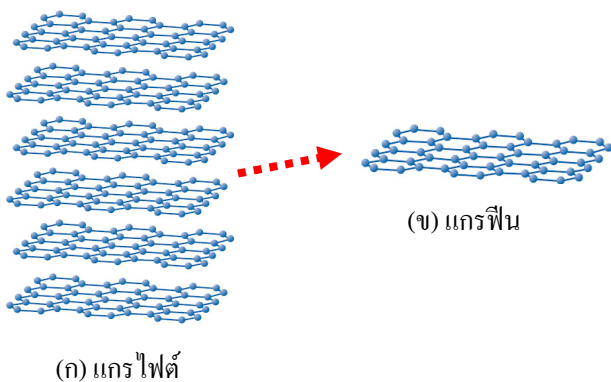
เอกสารอ้างอิง

- [1] J. J. Rehr and R. C. Albers, Rev. Modern Phys. 72, 621 (2000).
- [2] A. Tongraar *et al.*, Phys. Chem. Chem. Phys. (2010).
- [3] J. T-Thienprasert *et al.*, Appl. Phys. Lett. 93, 051903 (2008).
- [4] A. L. Ankudinov *et al.*, Phys. Rev. B 58, 7565 (1998).
- [5] J. J. Sakurai, *Modern Quantum Mechanics (Rev. Ed.)*, New York: Addison-Wesley (1994).
- [6] B. Ravel, *Introduction to XAS Theory [Available On-line]:* http://cars9.uchicago.edu/xafs/NSLS_2002/Ravel.pdf (2002).
- [7] M. J. Frisch *et al.*, *GAUSSIAN 03, Revision C.02*, Wallingford CT, United state (2003).
- [8] T. Jarlborg, and G. Arbman, J. Phys. F: Metal Physics 6, 189 (1976).
- [9] T. Jarlborg, and G. Arbman, J. Phys. F: Metal Physics 7, 1635 (1977).
- [10] P. Blaha *et al.*, *an Augmented Plane Wave + Local Orbitals Program for Calculating Crystal Properties*, Wien: Institut fur Materialphysik, Universitat Wien (2002).
- [11] G. Kresse, and J. Furthmuller, Phys. Rev. B 54, 11169 (1996).
- [12] G. Kresse, and J. Hafner, Journal of Physics: Condensed Matter 6, 8245 (1994).
- [13] J. M. Soler *et al.*, Journal of Physics: Condensed matter 14, 2745 (2002).
- [14] S. Limpijumrong *et al.*, App. Phys. Lett. 90, 103113 (2007).
- [15] S. Limpijumrong *et al.*, Appl. Phys. Lett. 89, 222113 (2006).
- [16] J. T-Thienprasert *et al.*, Computational Materials Science 49, S37 (2010).
- [17] J. J. Rehr, and R. C. Albers, Phys. Rev. B 41, 8139 (1990).

ดิแรกอิเล็กตรอนในแกรฟีนกับก้าวแรกของการเริ่มต้นยุคแห่งเทคโนโลยีจากการรวมสัมพัทธภาพและควอนตัมเข้าด้วยกัน

บำเหน็จ สุทธมนโณ¹

การค้นพบแกรฟีน (Graphene) ซึ่งเป็นคาร์บอนอะตอม โครงสร้างแบบรวงผึ้งชั้นเดียวเป็นแผ่น 2 มิติ ถูกสกัดแยกมาจาก แกรไฟต์ (Graphite) สามารถทำได้สำเร็จเป็นครั้งแรก เมื่อปี ค.ศ. 2004 โดย Novoselov และทีมงาน [1] การค้นพบครั้งนี้ทำให้เกิด กระแสความสนใจที่จะศึกษาคุณสมบัติต่างๆของแกรฟีนอย่างมาก ตลอดช่วงเวลา 6 ปีที่ผ่านมา และอย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน เหตุ เนื่องจากคุณสมบัติเชิงอิเล็กทรอนิกส์ที่โดดเด่นหลายอย่างของ แกรฟีนเหมาะที่จะนำมาสร้างอุปกรณ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ เช่น ใดโอด และทรานซิสเตอร์ ซึ่งเป็นหัวใจสำคัญของคอมพิวเตอร์ และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ นั่นเอง นักวิจัยหลายกลุ่มในโลก ถึงกับเชื่อว่าอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จากแกรฟีนจะมาแทนที่ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จากซิลิกอนในไม่ช้า



รูปที่ 1 โครงสร้างของ (ก) แกรไฟต์ และ (ข) แกรฟีน

ผลจากอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับอะตอม คาร์บอนของแกรฟีนทำให้พฤติกรรมของอิเล็กตรอนที่เคยเป็น แบบชโรดิงเงอร์อิเล็กตรอน (Schrödinger electron) ที่พบปกติใน โลหะทั่วไปกลายมาเป็นอิเล็กตรอนแบบสัมพัทธภาพ (หรือ เรียกว่าดิแรกอิเล็กตรอน “Dirac electron”) นับเป็นสิ่งแปลกใหม่

และน่าทึ่งกับการที่นักฟิสิกส์ได้สัมผัสอนุภาคเลียนแบบอนุภาค สัมพัทธภาพนี้ในแกรฟีน การเลียนแบบอิเล็กตรอนสัมพัทธภาพ ของอิเล็กตรอนในแกรฟีนนั้นไม่ได้เป็นแบบสัมพัทธภาพอย่าง แท้จริง (บางครั้งเรียกว่าสัมพัทธภาพเทียม “Pseudo relativity”) ซึ่ง มีค่าความเร็วแสงแบบยังผล (Effective speed of light) เป็นค่า ความเร็วเฟอร์มี (Fermi velocity) โดยมีค่าประมาณ $v_F \sim 1,000,000$ เมตรต่อวินาที ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานและ โมเมนตัมของอิเล็กตรอนในแกรฟีนแตกต่างจากอิเล็กตรอนแผน เดิม คือเป็นสมการเลียนแบบสมการพลังงานของไอน์สไตน์ ต่างกันแค่ค่าคงที่ v_F ที่ไม่ใช่ค่าความเร็วแสงแบบสมการของ ไอน์สไตน์

$$E = v_F \sqrt{p^2 + (mv_F)^2} \quad (1)$$

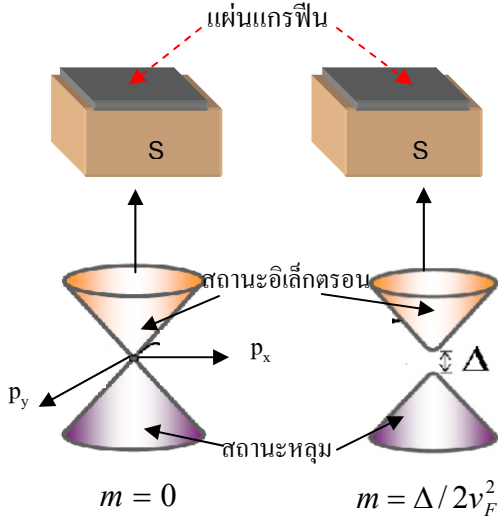
เมื่อ E เป็นพลังงานของอิเล็กตรอน p เป็นโมเมนตัม และ mv_F^2 เป็นพลังงานของมวลสัมพัทธภาพของอิเล็กตรอนในแกรฟีน สมการนี้ได้รับการยืนยันจากการทดลอง [1-3] แต่อย่างไรก็ตามในช่วงแรกของการค้นพบแกรฟีน [1, 2] นักฟิสิกส์ได้เตรียมแผ่น แกรฟีนบนแผ่นรองทำจากซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) สเปกตรัม ของพลังงานอิเล็กตรอนเป็นแบบอิเล็กตรอนสัมพัทธภาพที่มีมวล เป็นศูนย์

$$E = v_F p \quad (2)$$

สมการที่ (2) ก็คือสมการที่ (1) ที่แทน $m = 0$ นั่นเอง แต่เมื่อไม่นานมานี้ในปี ค.ศ. 2007 Zhou และ ทีมงานพบว่าเมื่อ เตรียมแกรฟีนบนซิลิกอนคาร์ไบด์ (SiC) [3] กลับพบว่ามวล อิเล็กตรอนสัมพัทธภาพไม่เป็นศูนย์ โดยมีค่าช่องว่างพลังงาน ระหว่างอิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ (Valence band) และแถบความ นำ (Conduction band) ประมาณ $\Delta \sim 2mv_F^2 = 260$ มิลลิ

¹ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน

อิเล็กตรอนโวลท์ ช่องว่างพลังงานนี้เปรียบเสมือนเป็นค่าของมวลของอิเล็กตรอนแบบสัมพัทธภาพ และถูกสันนิษฐานว่าเกิดจากอันตรกิริยาของแกรฟีนกับแผ่นรองซิลิกอนคาร์ไบด์ (SiC-substrate)



รูปที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานของอิเล็กตรอนในแกรฟีนที่วางบนพื้นรองแบบซิลิกอนไดออกไซด์ SiO_2 และซิลิกอนคาร์ไบด์ SiC

ในการศึกษาธรรมชาติการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในแกรฟีนจะอธิบายโดยสมการดิแรกแบบสองมิติ (2- dimension Dirac equation) ซึ่งฟังก์ชันคลื่นของอิเล็กตรอนมีสององค์ประกอบ และแฮมิลโทเนียนของสมการดิแรกสำหรับอิเล็กตรอนที่รวมการมีมวลด้วย (Hamiltonian for 2D massive Dirac fermion) คือ [4-6]

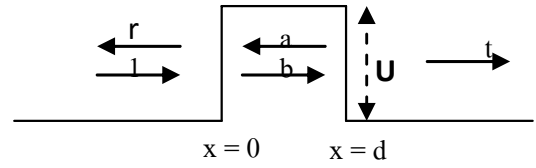
$$\hat{H} = -i\hbar v_F [\sigma_x \frac{\partial}{\partial x} + \sigma_y \frac{\partial}{\partial y}] + \sigma_z m v_F^2,$$

และ

$$E\psi(x, y) = \hat{H}\psi(x, y), \quad (3)$$

เมื่อ σ_x, σ_y และ σ_z เป็น เมตริกสปินเพาลี (Pauli spin matrices) สำหรับแกน x, y และ z ตามลำดับ การที่อิเล็กตรอนในแกรฟีนมีพฤติกรรมเลียนแบบอนุภาคเฟอร์มิออนแบบดิแรก สิ่งที่น่าสนใจอย่างหนึ่งก็คือ พฤติกรรมการทะลุทะลวงผ่านกำแพงศักย์

ที่แตกต่างจากอิเล็กตรอนแบบโซลิดเจอร์ เมื่ออิเล็กตรอนในแกรฟีนมีมวลเป็นศูนย์



รูปที่ 3 แสดงกระบวนการกระเจิงของคลื่นดิแรกอิเล็กตรอนโมเมนตัม $p_y = 0$ และ $m=0$ โดยกำหนดค่าศักย์ขนาด U และมีความหนา d และสัมประสิทธิ์ของคลื่นแต่ละบริเวณ l, r, a, b และ t

จากสมการที่ (3) และพิจารณากำแพงศักย์ในภาพที่ 3 ด้วย คลื่นของดิแรกอิเล็กตรอนแต่ละบริเวณมีผลเฉลยดังนี้

$$\psi(x < 0) = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} e^{iEx/\hbar v_F} + r \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} e^{-iEx/\hbar v_F},$$

$$\psi(0 < x < d) = a \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} e^{i(E-U)x/\hbar v_F} + b \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} e^{-i(E-U)x/\hbar v_F}$$

$$\text{และ} \quad \psi(d < x) = t \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} e^{iEx/\hbar v_F} \quad (4)$$

เมื่อเรากำหนดให้ฟังก์ชันคลื่นของอิเล็กตรอนมีค่าเดียวในตำแหน่งซึ่งเป็นค่าเงื่อนไขขอบเขตคือที่ $x = 0$ และ $x = d$ ทำให้ได้สมการ

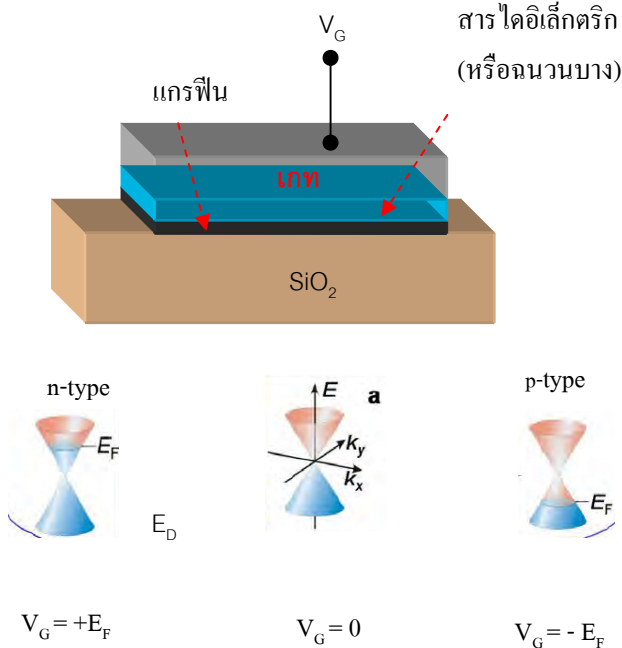
$$\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} + r \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} = a \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} + b \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix}$$

$$\text{และ} \quad a \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} e^{i(E-U)d/\hbar v_F} + b \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} e^{-i(E-U)d/\hbar v_F} = t \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} e^{iEd/\hbar v_F} \quad (5)$$

ผลจากการแก้สมการที่ 5 จะได้ค่าความน่าจะเป็นของแอมพลิจูดการส่งผ่าน (Transmission probability amplitude) $|t|^2 \sim 1$ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าดิแรกอิเล็กตรอนที่มีมวลเป็นศูนย์ (Massless Dirac electron) จะมีการส่งผ่านกำแพงศักย์โดยไม่มีการสะท้อนกลับเลย ปรากฏการณ์นี้รู้จักกันในฟิสิกส์พลังงานสูงว่า “Klein Paradox [7]” โดยคุณสมบัตินี้ไม่เกิดกับอิเล็กตรอนแบบโซลิดเจอร์

คุณสมบัติที่โดดเด่นที่สำคัญอย่างหนึ่งของแกรฟีนที่จะนำมาเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในอนาคต เช่น ไดโอด หรือ

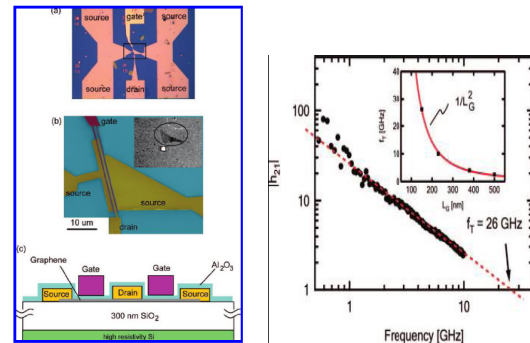
ทรานซิสเตอร์ ก็คือความสามารถในการปรับความหนาแน่นของพาหะกระแสโดยการควบคุมแรงดันจากขาคาท ด้วยคุณสมบัตินี้เราสามารถเตรียมเกรฟีนให้เป็นสารกึ่งตัวนำชนิด พี (P-type) หรือชนิด เอ็น (N-type) ได้โดยการกำหนดค่าแรงดันเกตเป็น ลบ หรือบวก ตามลำดับ [8]



รูปที่ 4 แสดงการเตรียมสารกึ่งตัวนำชนิด พี (P-type) หรือชนิด เอ็น (N-type) จากเกรฟีนโดยการได้ปด้วยสนามไฟฟ้าจากขาคาท โดย E_F คือระดับพลังงานเฟอร์มีที่เทียบกับระดับดิแรก E_D จากภาพ ที่ $V_G=0$ จะไม่มีพาหะ

การเตรียมเกรฟีนให้เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี (P-type) หรือชนิดเอ็น (N-type) ด้วยการได้ปด้วยสนามไฟฟ้าเป็นคุณสมบัติที่ต่างจากการเตรียมสารกึ่งตัวนำแบบซิลิกอนที่ต้องอาศัยสารเจือ ด้วยคุณสมบัติที่พาหะกระแสในเกรฟีนสามารถควบคุมได้ด้วยแรงดันไฟฟ้าจากขาคาท จึงเหมาะที่เราจะนำเอาเกรฟีนไปสร้างเป็น Field Effect Transistor (FET) ได้เป็นอย่างดี ด้วยเหตุนี้กลุ่มนักวิทยาศาสตร์จาก IBM ซึ่งเป็นบริษัทผลิตคอมพิวเตอร์ที่สำคัญของโลกได้ทำการวิจัยและพัฒนา FET จากเกรฟีนเพื่อให้สามารถนำมาใช้งานในอุตสาหกรรมคอมพิวเตอร์และอิเล็กทรอนิกส์อื่นๆ ในปี 2009 นักวิจัยจาก IBM ได้รายงานว่าเขาสามารถสร้าง FET จากเกรฟีนที่ทำงานได้ถึงความถี่ 26 GHz ด้วยความหนาของ

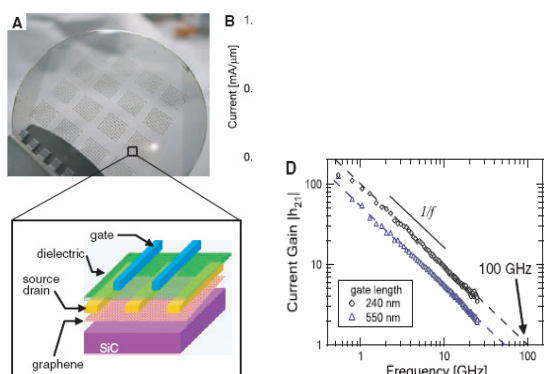
ขาคาท 150 nm [9] เป็นการแสดงถึงขีดความสามารถของเกรฟีนสำหรับการเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ทำงานในระดับความถี่สูง



รูปที่ 5 แสดงรูปของ FET ที่นักวิทยาศาสตร์ของ IBM สร้างขึ้น โดยเกรฟีนถูกเตรียมบนแผ่นซิลิกอนไดออกไซด์ (a) เป็นโครงสร้างจริงขนาดใหญ่แสดงขาคาท (Gate) เดรน (Drain) และซอร์ส (Source) (b) แสดงภาพถ่ายของภาพ (a) ในบริเวณสี่เหลี่ยม (c) แสดงโครงสร้างจำลองของ FET ที่มีเกรฟีนบนซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO₂) หนา 300 nm ของ IBM (d) แสดงอัตราขยายกระแส (h_{21} = กระแสเกต/กระแสเดรน)ทำงานได้จนถึง 26 GHz ที่ $L_G=150$ nm โดยแรงดันขาคาท $V_D=1.6$ โวลต์ ส่วนภาพเล็ก แสดงให้เห็นว่าความถี่ Cut off (f_T) จะมากขึ้นเมื่อความหนาของขาคาท L_G ลดลง [9]

แต่อย่างไรก็ดีหลังจากในช่วงแรกๆ ของการค้นพบเกรฟีนนั้นอิเล็กทรอนิกส์บนเกรฟีนเป็นแบบอิเล็กทรอนิกส์ที่ไม่มีมวล ซึ่งพบได้จากการเตรียมเกรฟีนบนซิลิกอนไดออกไซด์ [1, 2] แต่เมื่อเราเตรียมเกรฟีนให้เกิดบนแผ่นรองซิลิกอนคาร์ไบด์ (แสดงในภาพที่ 2 ข้างต้น) เราจะพบว่าอิเล็กทรอนิกส์ในการฟิเป็นแบบมีมวล [3] มวลนี้เป็นผลจากอันตรกิริยาระหว่างแถบของอิเล็กทรอนิกส์และแถบของหลุม ในช่วง 2 - 3 ปีที่ผ่านมา นักวิทยาศาสตร์เริ่มให้ความสนใจกับการมีอยู่ของช่องว่างพลังงานนี้ของเกรฟีนที่เกิดบนแผ่นรองซิลิกอนคาร์ไบด์ (SiC) มากขึ้น รวมทั้งราคาของเกรฟีนที่มี SiO₂ เป็นพื้นรองมีราคาแพงกว่ามากเมื่อเทียบกับเกรฟีนที่เกิดบนแผ่นรองซิลิกอนคาร์ไบด์ กรรมวิธีในการสร้างเกรฟีนบนซิลิกอนคาร์ไบด์นั้นทำได้โดยวิธีการที่เรียกว่า “Annealing” คือ การทำให้ซิลิกอนคาร์ไบด์มีอุณหภูมิสูงมากแล้วปล่อยให้เย็นตัวลง ผลที่ได้ก็คือเกิดเกรฟีนจากอะตอมคาร์บอนของซิลิกอนคาร์ไบด์หลุดออกมาก่อตัวบนผิวซิลิกอนคาร์ไบด์ได้เอง และหลังจากที่

นักวิทยาศาสตร์ของ IBM ประสบความสำเร็จในการสร้าง FET ที่ทำงานในความถี่สูงถึง 26 GHz นักวิทยาศาสตร์ของ IBM ก็เริ่มให้ความสำคัญกับเกรฟีนบนซิลิกอนคาร์ไบด์ และเมื่อเร็ว ๆ นี้ประมาณต้นปี 2010 พวกเขาได้รายงานว่าสามารถสร้างทรานซิสเตอร์แบบ FET จากเกรฟีนบนซิลิกอนคาร์ไบด์ที่ทำงานได้ถึงระดับความถี่ 100 GHz [10] ซึ่งมากกว่า FET ของเกรฟีนที่กลุ่มวิจัยอื่นที่ผ่านมาเคยทำได้ [9, 11-13] ทั้งนี้ ที่ขาเทของ FET มีความยาวถึง 240 nm มากกว่า FET ที่พวกเขาทำการปูเกรฟีนบนพื้น SiO_2 ซึ่งต้องลดความยาวเทถึง 150 nm [9] และคาดว่า FET จากเกรฟีนที่ก่อตัวบน SiC จะสามารถเพิ่มขีดการทำงานที่ความถี่สูงกว่นี้ โดยการลดขนาดของขาเทลงไปอีก



รูปที่ 6 แสดง FET ของนักวิทยาศาสตร์ของ IBM [9] ที่สร้างจากเกรฟีนบน SiO_2 ผลจากการทดลองโดยแรงดันขาคูกร $V_D = 2.5$ โวลต์ พบว่าที่ขาเท 550 nm FET ทำงานได้ถึง 53 GHz และเมื่อลดขนาดของขาเทลง 220 nm พบว่า FET ทำงานได้ถึง 100 GHz เป็นความถี่มากที่สุดที่ FET จากเกรฟีนทำได้ในขณะนี้

การสร้างทรานซิสเตอร์ของนักวิทยาศาสตร์กลุ่มต่างๆ ในโลกจนใกล้เข้าสู่การใช้งานในเชิงอุตสาหกรรม นับเป็นสิ่งที่น่าสนใจอย่างมากทั้งๆ ที่เกรฟีนเพิ่งถูกค้นพบได้ไม่นาน ประมาณเพียง 6 ปีเท่านั้น แต่กลับมีการพัฒนาเพื่อนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์อย่างรวดเร็ว จากงานวิจัยต่างๆ ที่ได้มีการตีพิมพ์เผยแพร่ แสดงให้เห็นว่าเกรฟีนมีศักยภาพที่จะเป็นอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่สำคัญในอนาคตได้อย่างแน่นอน เพราะสามารถพัฒนาตัวในช่วงเวลาสั้นๆ ให้มีความสามารถได้ใกล้เคียงกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จากซิลิกอนที่ถูกพัฒนามาเป็นเวลากว่า 50 ปี รวมทั้งด้วยคุณสมบัติทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ที่โดดเด่นหลาย

ด้าน และทิศทางการวิจัยของนักวิทยาศาสตร์ใน IBM และนักวิทยาศาสตร์ทั่วโลกที่ต่างมุ่งสู่การวิจัยเกรฟีนในช่วงที่ผ่านมาที่เป็นตัวยืนยันได้ว่าเกรฟีนจะถูกนำมาขับเคลื่อนอุตสาหกรรมคอมพิวเตอร์และอิเล็กทรอนิกส์อื่นๆ ของโลกในไม่ช้า ซึ่งการที่อิเล็กตรอนในเกรฟีนแสดงพฤติกรรมแบบอนุภาคเฟอร์มิออนพลังงานสูง (Dirac fermion) เป็นเหมือนประหนึ่งว่าเรากำลังเริ่มก้าวเข้าสู่ยุคของเทคโนโลยีที่เกิดจากการรวมสัมพัทธภาพและควอนตัมเข้าด้วยกัน

เอกสารอ้างอิง

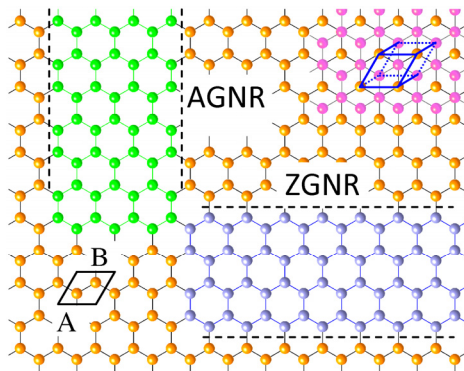
- [1] K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S. V. Dubonos, I. V. Grigorieva, A. A. Firsov, *Science* Vol. 306 (2004) p. 666.
- [2] Y. Zhang, Y.-W. Tan, H. L. Stormer, P. Kim, *Nature* Vol. 438 (2005) p. 201.
- [3] S.Y. Zhou *et al.*, *Nature materials* Vol. 6 (2007) p. 770.
- [4] B. Soodchomshom, I-M. Tang, R. Hoonsawat, *Physica E* Vol.41 (2009) p. 1475.
- [5] B. Soodchomshom, *Physica B* Vol. 405 (2010) p. 1383.
- [6] B. Soodchomshom, I-M. Tang, R. Hoonsawat, *Phys. Lett. A* Vol. 373 (2009) p. 3477.
- [7] O. Klein, *Z. Phys.* Vol. 53 (1929) p. 157.
- [8] A.K. Geim, K.S. Novoselov, *Nature Materials* Vol. 6 (2007) p. 183.
- [9] Yu-Ming Lin, Keith A. Jenkins, Alberto Valdes-Garcia, Joshua P. Small, Damon B. Farmer, and Phaedon Avouris, *Nano Lett.* Vol. 9 (2009) p. 422.
- [10] Y.-M. Lin, C. Dimitrakopoulos, K. A. Jenkins, D. B. Farmer, H.-Y. Chiu, A. Grill, Ph. Avouris, *Science* Vol. 327 (2010) p. 662.
- [11] I. I. Meric, N. Bakietskaya, P. Kim, K. L. Shepard, in *Electron Devices Meeting, 2008 (IEDM 2008)*, IEEE International, San Francisco, 15 to 17 December 2008, pp. 1-4.
- [12] J. S. Moon *et al.*, *IEEE Electron Device Lett.* Vol. 30 (2009) p. 650.
- [13] D. B. Farmer *et al.*, *Nano Lett.* Vol.9 (2009) p. 44.

รูปประกอบจากบทความ “ฟิสิกส์ของสเก็ตน้ำแข็ง”
หน้า 13 – 18 (ต่อจากปกหน้าด้านใน)

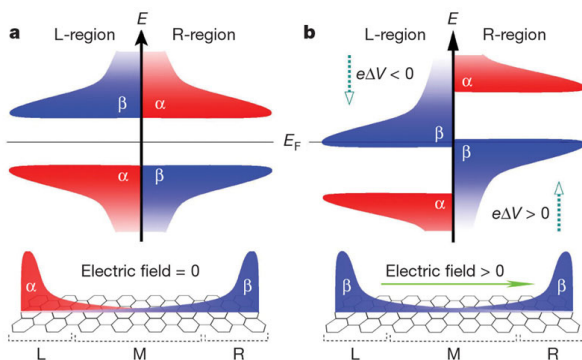


รูปที่ 9

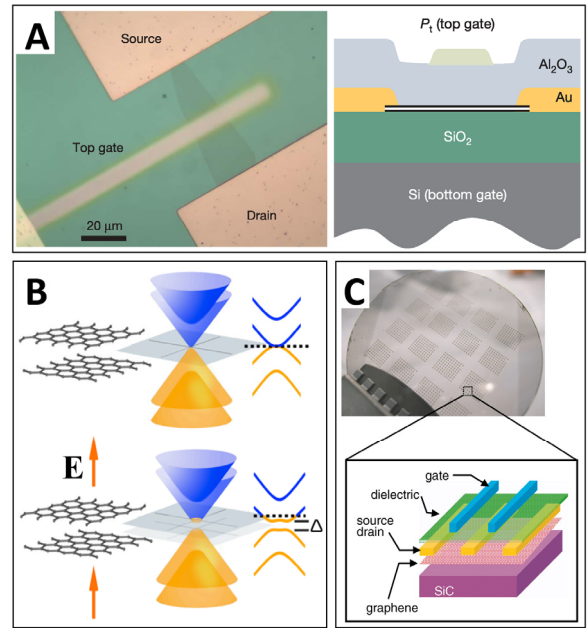
รูปประกอบจากบทความ “แกรฟีน (Graphene) วัสดุที่น่า
ทึ่งจากปลายดินสอ” หน้า 19 – 24



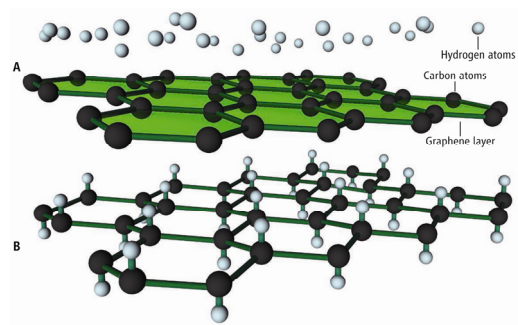
รูปที่ 1



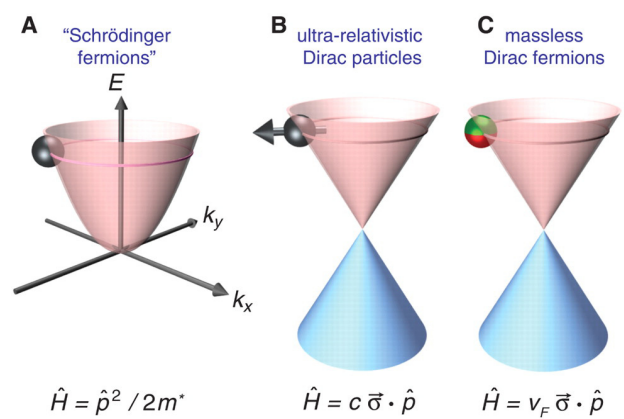
รูปที่ 2



รูปที่ 3

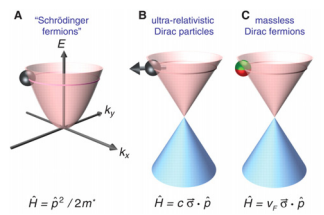
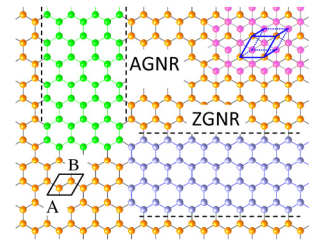
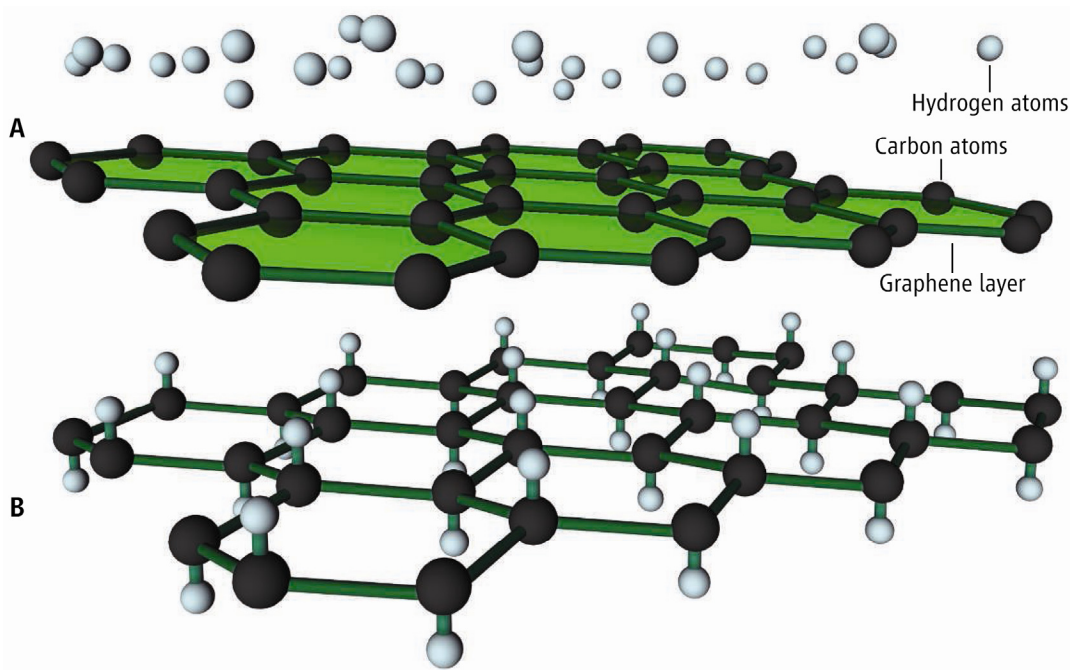


รูปที่ 5



รูปที่ 6

แกรฟีน (Graphene) วัสดุที่น่าทึ่งจากปลายคินสอ
(ดูรายละเอียดภายในเล่ม)



สมาคมฟิสิกส์ไทย

อาคารสุรพัฒน์ 3 ถนนมหาวิทยาลัย

ต. สุรนารี อ. เมือง

จ. นครราชสีมา 30000

ตู้ ปณ. 93 ปณจ. นครราชสีมา 30000

THAI PHYSICS SOCIETY

Surapat 3 Building, University Avenue

Tambon Suranaree, Muang District

Nakhon Ratchasima 30000

P.O. Box 93 Nakhon Ratchasima 30000

ชำระค่าฝากส่งเป็นรายเดือน

ใบอนุญาตเลขที่ 187/2552

ปท.จ. นครราชสีมา

สิ่งตีพิมพ์

หากไม่ถึงผู้รับ โปรดส่งคืนสมาคมฟิสิกส์ไทย