

บทที่ 2

ทฤษฎี

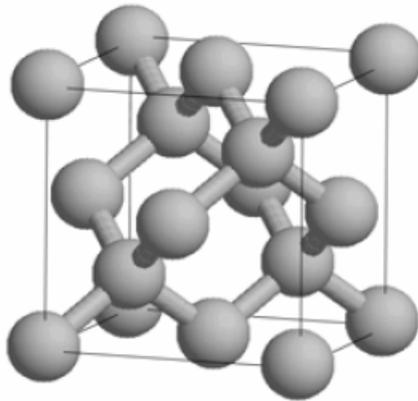
ในบทนี้จะกล่าวถึงรูปแบบโครงสร้างของคาร์บอน วิธีการเตรียมโลหะคะตะลิสต์ ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเส้นใยนาโนคาร์บอน ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับท่อนาโนคาร์บอน และทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการทำงานวิจัยในครั้งนี้

2.1 รูปแบบโครงสร้างของคาร์บอน⁸

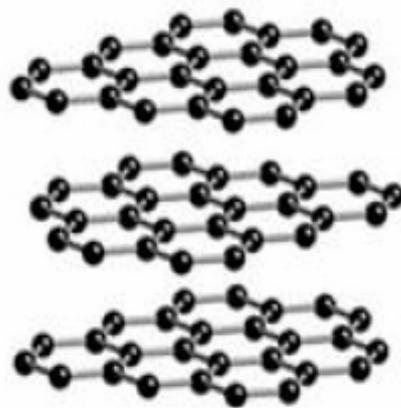
คาร์บอนเป็นธาตุที่มีความสำคัญเนื่องจากเป็นส่วนประกอบของสิ่งมีชีวิตทุกชนิดบนโลกแล้วยังเป็นปัจจัยหลักในการดำรงชีวิตของมนุษย์ เพราะคาร์บอนก็เป็นแหล่งพลังงานให้กับมนุษย์ด้วยจึงสามารถมีชีวิตอยู่ได้ นอกจากนี้คาร์บอนยังเป็นที่รู้จักในแง่การนำไปประยุกต์ใช้ในด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

คาร์บอนเป็นธาตุที่มีการจัดเรียงอะตอมได้หลายอัญรูป หรืออาจมีการจัดเรียงตัวเป็นอสัณฐาน (amorphous) ตัวอย่างโครงสร้างแบบอสัณฐานของคาร์บอนก็คือ เหมะถ่านทั้งหลาย เป็นธาตุที่มีลักษณะพิเศษสามารถพบได้ในหลายรูปแบบโครงสร้าง (Allotropic Forms) ซึ่งแต่ละรูปแบบก็มีสมบัติแตกต่างกันไป และแบ่งออกเป็น 4 ชนิดหลักๆ คือ

(1) เพชร (Diamond)⁸ เป็นอัญรูปกึ่งเสถียรของคาร์บอน คาร์บอนแต่ละอะตอมจะสร้างพันธะกับคาร์บอน 4 ตัว เป็นพันธะประเภทโควาเลนต์ (Covalent Bond) โดยสมบูรณ์ มีโครงสร้างแบบ 3 มิติ เพชรมีสมบัติทางกายภาพที่น่าสนใจ มีความแข็งสูงมาก (เป็นวัสดุที่แข็งที่สุด) และมีความสามารถในการนำไฟฟ้าที่ต่ำมาก ลักษณะเหล่านี้มีผลมาจากลักษณะโครงสร้างผลึกและพันธะโควาเลนต์ที่แข็งแรง นอกจากนี้เพชรยังมีความสามารถในการนำความร้อนที่สูงมากเมื่อเทียบกับวัสดุโลหะตัวอื่น ๆ มีความโปร่งใสต่อแสงขาวและอินฟราเรด มีดัชนีหักเหที่สูง ผลึกเดี่ยวขนาดใหญ่ของเพชรใช้ในงานอัญมณี ส่วนทางอุตสาหกรรมเพชรใช้สำหรับงานขัดหรือตัดวัสดุอื่นที่มีความแข็งน้อยกว่า

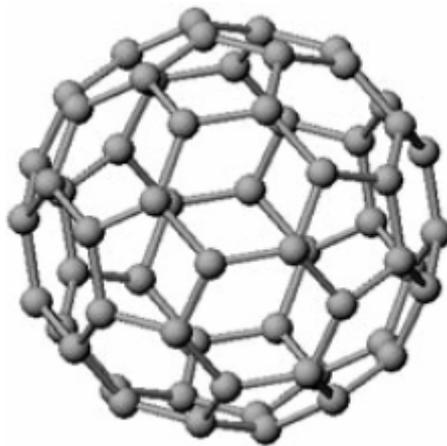
รูป 2.1 โครงสร้างของเพชร⁹

(2) แกรไฟต์ (Graphite)⁸ โครงสร้างของแกรไฟต์ลักษณะเป็นชั้น ๆ หรือเป็นแผ่นสองมิติวางซ้อนทับกัน แต่ละชั้นประกอบด้วยอะตอมคาร์บอนที่เรียงตัวกันเป็นรูปหกเหลี่ยม ภายในแต่ละชั้นอะตอมคาร์บอนสร้างพันธะสามพันธะกับอะตอมคาร์บอนใกล้เคียงในระนาบเดียวกันด้วยพันธะโควาเลนต์ที่แข็งแรง อิเล็กตรอนตัวที่สี่สร้างพันธะแวนเดอร์วาลส์แบบอ่อน ๆ กับชั้นใกล้เคียง และยึดระหว่างชั้นด้วยแรงแบบอ่อน ๆ คือ แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van Der Waals Force) ด้วยเหตุนี้ทำให้การแตกหักของแกรไฟต์เป็นแบบแตกเป็นพื้นเรียบ (Cleavage) ระหว่างชั้นอะตอมของคาร์บอน ซึ่งเป็นบริเวณที่พันธะมีความแข็งแรงต่ำที่สุด การนำไฟฟ้าในทิศทางขนานกับชั้นคาร์บอนค่อนข้างสูง สมบัติอื่น ๆ ที่น่าสนใจของแกรไฟต์มีอยู่หลายประการ เช่น ความแข็งแรงและความเสถียรทางเคมีที่สูงในสภาวะอุณหภูมิสูงและบรรยากาศที่ไม่เกิดออกไซด์ การนำความร้อนที่ดี ดูดซับก๊าซได้ดี สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ เป็นต้น

รูป 2.2 โครงสร้างของแกรไฟต์¹⁰

(3) ฟูลเลอร์รีน (Fullerene)⁸ เป็นอัญรูปหนึ่งของคาร์บอนที่ถูกค้นพบในปี 1985 มันเกิดขึ้นในรูปแบบโมเลกุลที่เป็นทรงกลมกลวง ประกอบด้วยอะตอมคาร์บอน 60 ตัว หนึ่งโมเลกุลเขียนแทนด้วย C_{60} แต่ละโมเลกุลประกอบด้วยกลุ่มย่อยของอะตอมคาร์บอนที่สร้างพันธะโควาเลนต์กันเป็นรูปหกเหลี่ยม และห้าเหลี่ยม ดังรูป 2.3 เป็นโมเลกุลที่ประกอบด้วยรูปหกเหลี่ยม 20 หน้า รูปห้าเหลี่ยม 12 หน้า โดยรูปห้าเหลี่ยมแต่ละหน้าจะไม่มีด้านที่ติดกับรูปห้าเหลี่ยมอื่นเลย ผิวของโมเลกุลจึงคล้ายกับผิวของลูกฟุตบอล มีโครงสร้างเป็นก้อนเล็ก จนอาจถือได้ว่ามันเป็นจุดที่ไม่มีมิติหรือศูนย์มิติ วัสดุที่ประกอบด้วยโมเลกุลของฟูลเลอร์รีนเรียกว่า บักมินสเตอร์ฟูลเลอร์รีน (buckminsterfullerene) ซึ่งตั้งชื่อเป็นเกียรติแก่ R. Buckminster Fuller ผู้คิดค้นโดมที่มีรูปทรงแบบนี้ แต่อาจจะเรียกสั้น ๆ ได้ว่า บักกี้บอล (buckyball) คำว่าฟูลเลอร์รีนใช้เรียกกลุ่มของวัสดุที่ประกอบด้วยโมเลกุลประเภทนี้

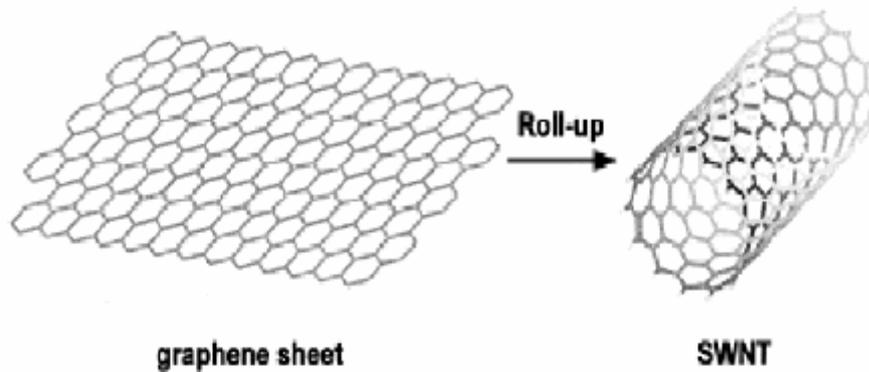
ในขณะที่เพชรและแกรไฟต์เป็นของแข็งที่เป็นโครงตาข่าย (Network solid) อะตอมคาร์บอนเกิดพันธะปฐมภูมิต่อเนื่องทั่วทั้งวัสดุ ฟูลเลอร์รีนจะมีลักษณะที่อะตอมคาร์บอนจับตัวกันเป็นหน่วยของบักกี้บอล แล้วในสภาวะของแข็งหน่วยของบักกี้บอลซึ่งคือ C_{60} จะมาเรียงตัวแบบ FCC ฟูลเลอร์รีนบริสุทธิ์เป็นฉนวนไฟฟ้า แต่ถ้ามีสารเจือปนในปริมาณพอเหมาะจะสามารถเปลี่ยนสมบัติเป็นตัวนำหรือสารกึ่งตัวนำได้



รูป 2.3 โครงสร้างของโมเลกุล C_{60} ¹⁰

(4) ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon Nanotubes)⁸ ท่อนาโนคาร์บอนเป็นรูปแบบโมเลกุลของคาร์บอนอีกแบบหนึ่งซึ่งถูกค้นพบเมื่อไม่นานมานี้ มีโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นแผ่นของแกรไฟต์ม้วนตัวเป็นท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยมากจนทำให้ดูเหมือนเป็นเส้นยาวในแนวหนึ่งมิติ และ

ปิดหัวท้ายด้วยครึ่งทรงกลมของฟูลเลอรีน ท่อนาโนคาร์บอนแต่ละอันเป็นหนึ่งโมเลกุลที่ประกอบด้วยอะตอมจำนวนมาก ความยาวของท่อมีขนาดมากกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางมาก และท่อนาโนคาร์บอนบางชนิดอาจมีผนังชั้นเดียว หรือมีผนังหลายชั้นซ้อนกันภายในหนึ่งโมเลกุล



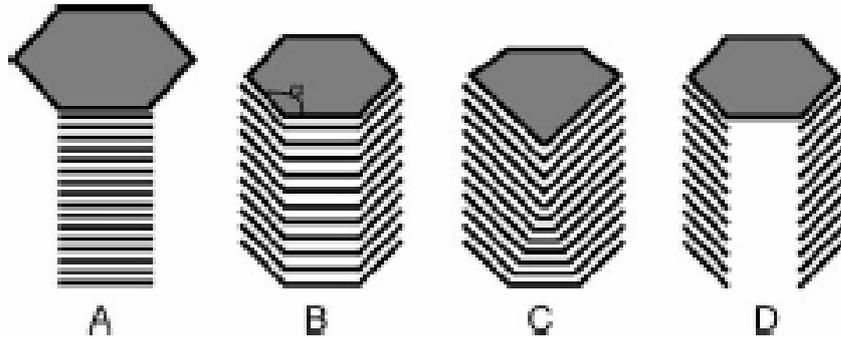
รูป 2.4 โครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอน¹¹

2.2 เส้นใยนาโนคาร์บอน (Carbon Nanofibers, CNFs)¹²

เส้นใยนาโนคาร์บอน เป็นโครงสร้างในระดับนาโนของแกรไฟต์ ซึ่งชั้นของแกรไฟต์จัดเรียงตัวกันเป็นรูปทรงกระบอก เป็นรูปถ้วยหรือแผ่น

รูป 2.5 เป็นการอธิบายการสร้างตัวและโครงสร้างของเส้นใยนาโนคาร์บอน โดยสมมติว่าคะตะลิสต์เป็นของแข็งตลอดจนสิ้นสุดการสังเคราะห์ แบบจำลองที่เกิดขึ้นดังรูป 2.5 นี้ ขึ้นอยู่กับการสลายตัว การแพร่ การตกตะกอน การดูดกลืนแหล่งกำเนิดคาร์บอนบนผิวของอนุภาคคะตะลิสต์ สิ่งที่เกิดขึ้นเมื่อคาร์บอนกระจายตัวที่ผิวคะตะลิสต์แล้ว หลังจากนั้นก็เกิดการแพร่เข้าไปในคะตะลิสต์ และตกตะกอนจากด้านล่างของผิวคะตะลิสต์แล้วก็จะเกิดไปอย่างต่อเนื่องจนเกิดเส้นใยนาโนคาร์บอน หรือท่อนาโนคาร์บอน

ถ้าคาร์บอนตกสะสมจากผิวด้านล่างของอนุภาคคะตะลิสต์ ดังรูป 2.5 A เป็นรูปของเส้นใยนาโนคาร์บอนที่มีการสร้างตัวเป็นชั้น (platelet carbon nanofibers) เส้นใยนาโนชนิดนี้ปกติจะตรง เพราะคาร์บอนเกิดการกระจายตัว แพร่ และตกตะกอนที่ด้านล่างของผิวคะตะลิสต์ สำหรับอนุภาคคะตะลิสต์ขนาดใหญ่ การตกตะกอนบริเวณขอบจะเกิดขึ้นมากกว่าบริเวณตรงกลางของผิวคะตะลิสต์ เพราะวาระยะการแพร่ของคาร์บอนน้อยกว่า ความแตกต่างที่เกิดขึ้นนี้จะเห็นได้ชัดเจนในอนุภาคคะตะลิสต์ขนาดใหญ่มากกว่าในอนุภาคคะตะลิสต์ขนาดเล็ก



รูป 2.5 แบบจำลองการสร้างตัวของเส้นใยนาโนคาร์บอน¹²

- (A) เส้นใยนาโนคาร์บอนที่มีการสร้างตัวเป็นชั้น (platelet structure)
- (B) เส้นใยนาโนคาร์บอนที่มีการสร้างตัวเป็นโครงสร้างคล้ายถ้วย (cup-like structure)
- (C) เส้นใยนาโนคาร์บอนที่มีการสร้างตัวเป็นโครงสร้างรูปตัววี หรือรูปกรวย (herringbone structure or conical shape)
- (D) เส้นใยนาโนคาร์บอนที่มีการสร้างตัวเป็นท่อกลวง (hollow tube)

ถ้าคาร์บอนตกตะกอนจากผิวเอียงด้านข้างพร้อมกันกับผิวด้านล่างของคะตะลิสต์ จะมีโครงสร้างของเส้นใยนาโนคาร์บอนคล้ายรูปถ้วย (cup-like) ดังรูป 2.5 B

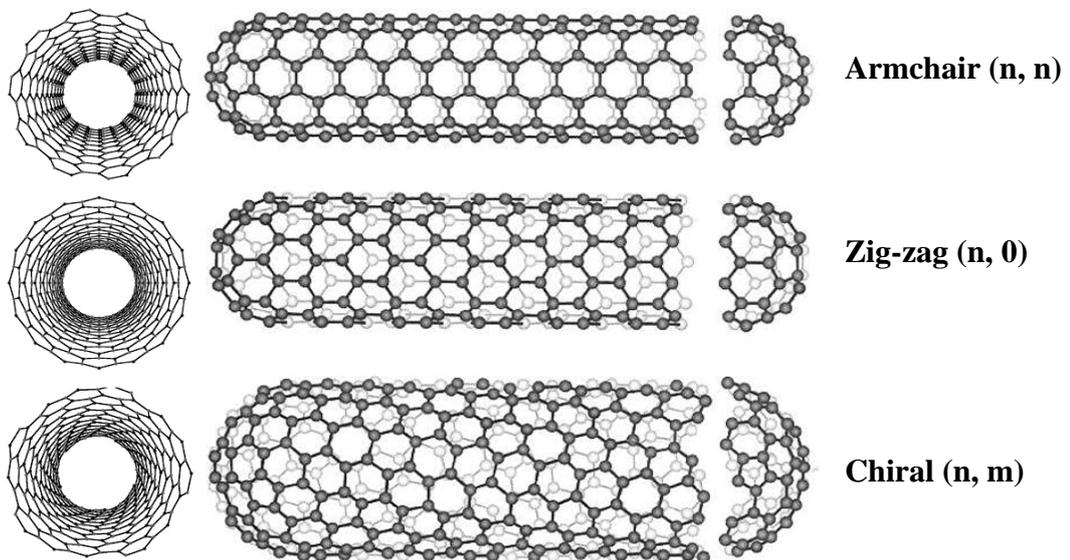
เมื่อโครงสร้างของเส้นใยนาโนคาร์บอนคล้ายรูปถ้วย ดังรูป 2.5 B เกิดการเปลี่ยนแปลง นั่นคือ ระยะเวลาที่ผิวฐานด้านล่างมีขนาดเล็กลง การตกตะกอนของคาร์บอนก็จะมีโครงสร้าง ดังรูป 2.8 C ดังนั้นโครงสร้างของเส้นใยนาโนจะมีการเปลี่ยนแปลงจากโครงสร้างคล้ายถ้วย ไปสู่โครงสร้างคล้ายรูปตัววี (herringbone carbon nanofibers) จนสุดท้ายก็เป็นโครงสร้างรูปกรวย (conical carbon nanofibers)

อีกกรณีหนึ่งก็คือ คาร์บอนไม่ตกตะกอนที่ผิวฐานด้านล่าง มีเฉพาะการตกตะกอนที่ผิวเอียงด้านข้าง ดังรูป 2.5 D เส้นใยนาโนคาร์บอนจะมีโครงสร้างเป็นท่อกลวง (hollow carbon nanofibers)

2.3 โครงสร้างท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotubes structure)

ท่อนาโนคาร์บอนเป็นวัสดุนาโนชนิดหนึ่งที่ประกอบขึ้นเป็นโครงสร้างจากอะตอมของคาร์บอน โดยโครงสร้างแต่ละหน่วยย่อยของผนังท่อประกอบขึ้นจากวงแหวนรูปหกเหลี่ยม ก็จะมีอะตอมของคาร์บอนในแต่ละวงแหวนจำนวนหกอะตอม ถูกค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 1991 โดยนักวิทยาศาสตร์ชาวญี่ปุ่น ชื่อ สุมิโอะ อิจิมะ (Sumio Iijima)

(1) ท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียว (Single Walled Nanotubes, SWNTs) มี 3 รูปแบบ ดังแสดงในรูป 2.6

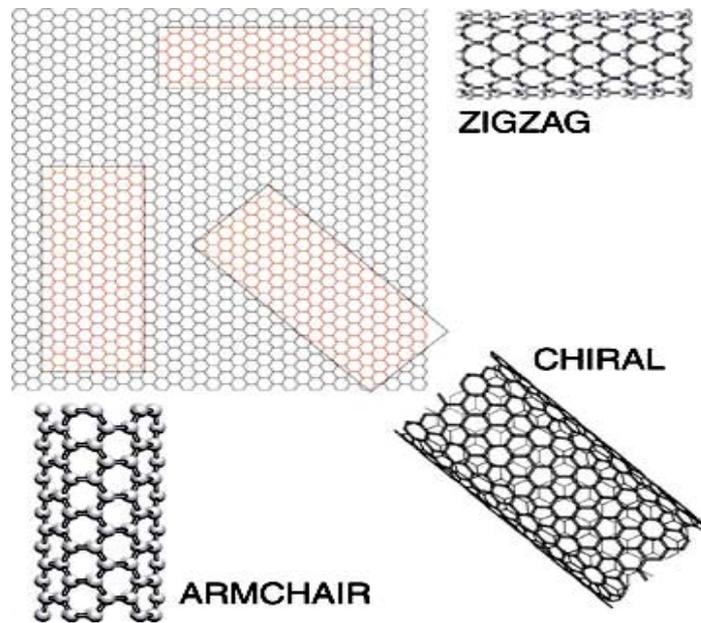


รูป 2.6 รูปแบบโครงสร้างท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียว (SWNTs)¹³

(a) Armchair structure (n, n)

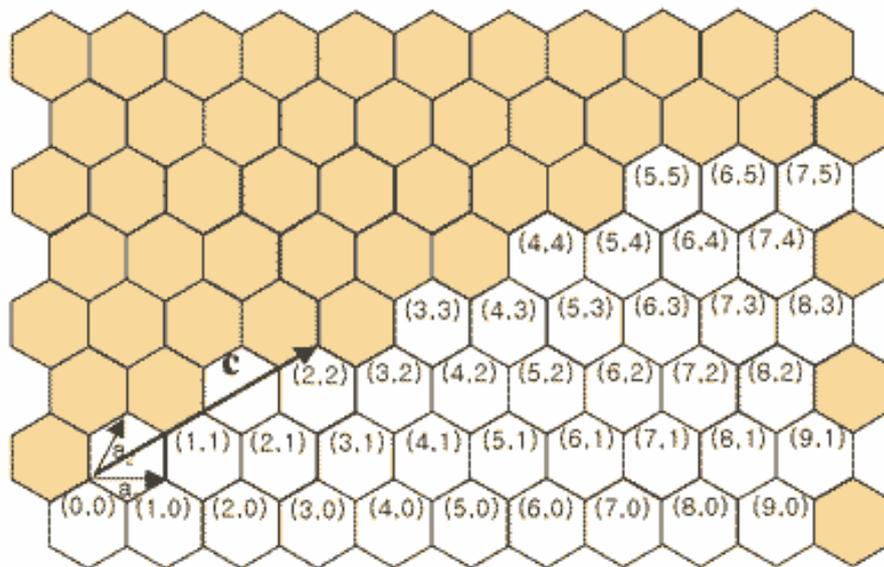
(b) Zig-zag structure (n, 0)

(c) Chiral structure (n, m)



รูป 2.7 การม้วนของแผ่นแกรไฟต์ในทิศทางที่ต่างกัน¹⁴

โดยดัชนี (n, m) ซึ่งบ่งบอกรูปแบบการจัดเรียงตัวของอะตอมบนท่อนาโนคาร์บอน โดยเวกเตอร์ผลลัพธ์ของผลรวมเวกเตอร์ $n + m$ คือ เส้นรอบวงของท่อนาโนคาร์บอนดังแสดงในรูป 2.8



รูป 2.8 ดัชนีบ่งบอกรูปแบบการจัดเรียงตัวของอะตอมบนท่อนาโนคาร์บอน¹⁵

ถ้า $m = n$ จะได้ ท่อนาโนคาร์บอนที่ลักษณะของแบบจำลองเกิดจากการม้วนให้ตำแหน่ง (0, 0) ไปพบกับตำแหน่ง (n, n) มีขนาดมุม θ เท่ากับ 30 องศา ที่มีการจัดเรียงอะตอมแบบ Armchair (n, n)

ถ้า $m = 0$ จะได้ ท่อนาโนคาร์บอนที่ลักษณะของแบบจำลองเกิดจากการม้วนให้ตำแหน่ง (0, 0) ไปพบกับตำแหน่ง (n, 0) มีขนาดมุม θ เท่ากับ 0 องศา ที่มีการจัดเรียงอะตอมแบบ Zig-zag

ถ้า $m \neq n$ จะได้ ท่อนาโนคาร์บอนที่ลักษณะของแบบจำลองเกิดจากการม้วนให้ตำแหน่ง (0, 0) ไปพบกับตำแหน่ง (n, m) มีขนาดมุม θ เท่ากับ 0-30 องศา ที่มีการจัดเรียงอะตอมแบบ Chiral (n,m)

สมบัติการนำไฟฟ้า ถ้า (n-m)หาร 3 ลงตัวพอดี ท่อนาโนคาร์บอนจะนำไฟฟ้าได้แบบโลหะ (Metallic type) แต่หากเหลือเศษ 1 หรือ 2 ท่อนาโนคาร์บอนจะนำไฟฟ้าได้แบบสารกึ่งตัวนำ (Semiconducting type)

Chiral vector (C_h) มีทิศที่ตั้งฉากกับแนวแกนของท่อ และขนาดเท่ากับเส้นรอบวง C_h หาได้จาก¹⁶

$$C_h = n\hat{a}_1 + m\hat{a}_2$$

เมื่อ \hat{a}_1 และ \hat{a}_2 คือ unit vectors
 n และ m คือ เลขจำนวนเต็ม

เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนาโนสามารถหาได้จากสูตร

$$d = \sqrt{(n^2 + m^2 + nm)}0.0783nm$$

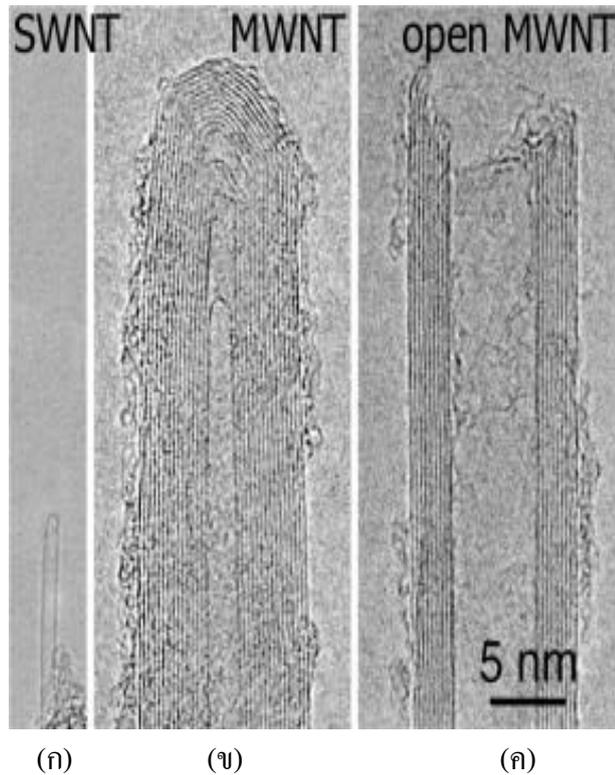
Chiral angle (θ) มุมของการม้วนของท่อนาโนสามารถหาได้จากสูตร

$$\theta = \tan^{-1}\left(\sqrt{3}\frac{m}{m+2n}\right)$$

(2) ท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น (Multiple Walled Nanotubes, MWNTs) คือ ท่อนาโนคาร์บอนที่มีผนังซ้อนกันหลายชั้น ดังแสดงในรูป 2.9



รูป 2.9 แสดง MWNTs ซึ่งมีผนัง 3 ชั้น¹⁷



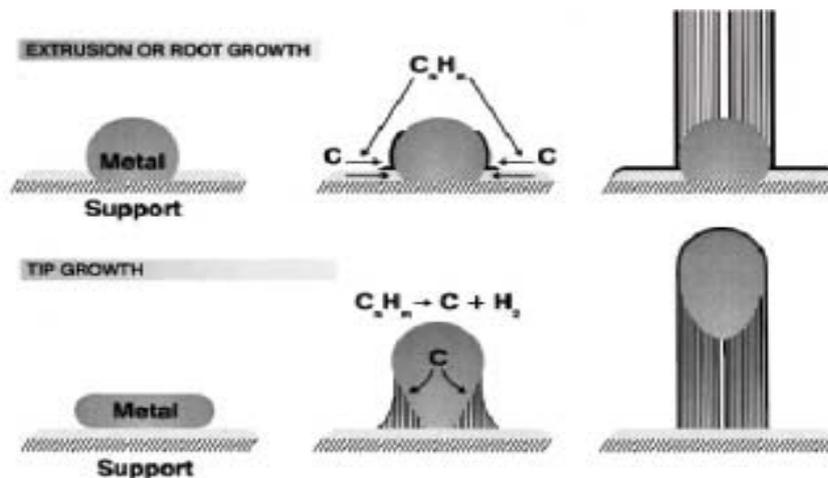
รูป 2.10 ตัวอย่างภาพท่อนาโนคาร์บอนที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน(TEM)¹³

- (ก) ท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียว
- (ข) ท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้นแบบท่อกดปิด
- (ค) ท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้นแบบท่อกดเปิด

2.3 ทฤษฎีการเติบโตของท่อนาโนคาร์บอน (Growth mechanism)¹⁵

การเติบโตของท่อนาโนคาร์บอนนั้นมีหลายทฤษฎีที่ใช้อธิบายการสร้างตัวของท่อนาโนคาร์บอน แต่นักวิทยาศาสตร์ยังไม่สรุปอย่างชัดเจนถึงรายละเอียดที่แน่นอน แต่มีทฤษฎีที่เป็นที่ยอมรับกันอย่างแพร่หลาย คือ Vapor-Liquid-Solid (VLS) Method ซึ่งสามารถอธิบายกลไกการเติบโตของท่อนาโนคาร์บอนได้จากรูป 2.11

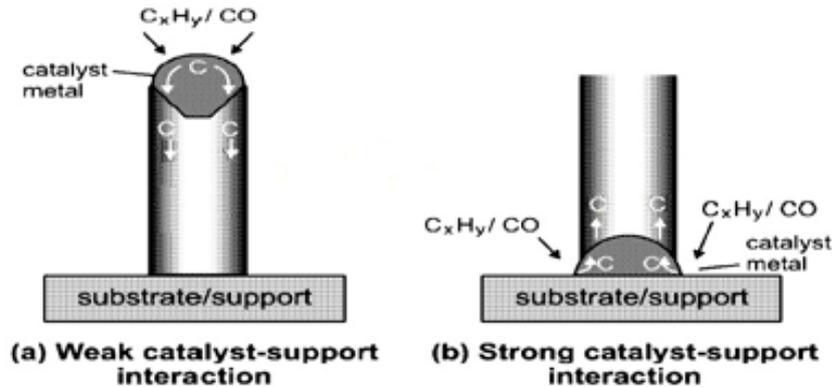
แก๊สไฮโดรคาร์บอน เช่น มีเทน(CH_4) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และอะเซทิลีน (C_2H_2) เป็นต้น สลายตัวได้อะตอมของไฮโดรเจนและคาร์บอนที่บริเวณผิวหน้าของอนุภาค โลหะคะตะลิสต์ จากนั้นอะตอมคาร์บอนจะละลายเข้าสู่ผิวโลหะคะตะลิสต์ที่หลอม แล้วทำการแพร่ไปรวมกันและสะสมกันมากขึ้นจนเกิดการตกตะกอนที่ผิวนอกเป็น Fullerene dome และสร้างตัวเป็นท่อในที่สุด โดยรูปแบบการเติบโตของท่อนาโนคาร์บอนมีอยู่ด้วยกัน 2 แบบ คือ แบบ Root growth และ Tip growth ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอันตรกิริยา (Interaction) ของโลหะคะตะลิสต์กับฐานรอง (Substrate)



รูป 2.11 ภาพจำลองขั้นตอนการเติบโตของท่อนาโนคาร์บอน
แบบ Root Growth และแบบ Tip Growth¹⁵

ถ้าอันตรกิริยาของโลหะคะตะลิสต์กับฐานรองแข็งแรง (Strong substrate-catalyst interaction) การเติบโตของท่อนาโนคาร์บอนจะเป็นแบบ Root growth โดยโลหะคะตะลิสต์จะอยู่ด้านล่างของท่อ ดังแสดงในรูป 2.12

ถ้าอันตรกิริยาของโลหะคะตะลิสต์กับฐานรองอ่อน (Weak substrate-catalyst interaction) การเติบโตของท่อนาโนคาร์บอนจะเป็นแบบ Tip growth โดยโลหะคะตะลิสต์จะอยู่ด้านบนของปลายท่อ ดังแสดงในรูป 2.12



รูป 2.12 ภาพจำลองอันตรกิริยาระหว่างฐานรองกับอนุภาคโลหะคะตะลิสต์²⁰

ความสมบูรณ์ผลึกของท่อนาโนคาร์บอนขึ้นอยู่กับธรรมชาติทางเคมีของอนุภาคโลหะคะตะลิสต์ อุณหภูมิและองค์ประกอบของแก๊สที่ใช้ระหว่างการสร้างตัวของท่อ ส่วนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนั้นสามารถควบคุมได้จากขนาดของอนุภาคคะตะลิสต์ ดังนั้นการเตรียมอนุภาคคะตะลิสต์จึงเป็นสิ่งสำคัญที่สามารถใช้ควบคุมขนาดของท่อนาโนคาร์บอนได้

2.4 การเตรียมโลหะคะตะลิสต์^{20,21}

โดยการเตรียมคะตะลิสต์นั้นจะมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ การนำท่อนาโนคาร์บอน ไปใช้งาน วิธีที่นิยมใช้กันทั่วไปมีดังนี้

(1) **คะตะลิสต์แบบเปียก (Wet catalyst)** เป็นการใช้สารละลายของเหลวที่มีคะตะลิสต์อยู่ในรูปของเกลือมาจบบนฐานรองด้วยวิธี การจบบแบบฉีดพ่น (Spray coating) การจบบแบบปั่น (Spin coating) หรือ Microcontact printing โดยสารละลายเกลือที่นิยมใช้ ได้แก่ เหล็กไนเตรด $[\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}]$ นิกเกิลไนเตรด $[\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}]$ หรือโคบอลต์ไนเตรด $[\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}]$ หลังจากนั้นจึงนำมาเผาแคลไซน์ (ให้ความร้อนในอากาศ) ให้เกิดเป็นโลหะออกไซด์ โดยออกไซด์เหล่านี้สามารถทำให้เป็นอนุภาคโลหะที่มีขนาดระดับนาโนได้ (เช่น การใช้ไฮโดรเจน) จากนั้นก็นำไปปลูกท่อนาโนคาร์บอนต่อไป การเตรียมคะตะลิสต์แบบเปียกมีอีกวิธีหนึ่งคือ การตกตะกอนร่วม (Co-precipitation) เป็นการเกิดปฏิกิริยาของสารละลายเกลือโลหะกับแอมโมเนียมไบคาร์บอเนต (Ammonium bicarbonate) ไปเป็นโลหะคาร์บอเนต (Metal carbonate) และสามารถทำให้กลายเป็นโลหะออกไซด์ได้โดยการเผาแคลไซน์ จากนั้นทำให้เป็นโลหะคะตะลิสต์ได้ระหว่างทำการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนโดยใช้แก๊สไฮโดรเจน

(2) **ฟิล์มบางโลหะ (Thin film metals)** เป็นการฉาบโลหะคะตะลิสต์โดยการตกสะสมไอระเหยเชิงฟิสิกส์ (Physical Vapor Deposition, PVD) ซึ่งการทำฟิล์มบางของเหล็ก โคบอลต์ หรือนิกเกิล ต้องทำการตกสะสมบนฐานรองอย่างระมัดระวังโดยใช้การฉาบผิวด้วยโลหะ (Sputtering) หรือการฉาบผิวด้วยการระเหย (Evaporation)

(3) **ฟิล์มโลหะคะตะลิสต์หนาหรือฐานรองโลหะคะตะลิสต์ (Thick metal catalyst or metal catalyst)** ท่อนาโนคาร์บอนสามารถปลูกลงบนฟิล์มโลหะคะตะลิสต์หนาหรือฐานรองโลหะคะตะลิสต์ได้ เมื่อผ่านกระบวนการทางพื้นผิว โดยทำให้พื้นผิวของฐานรองเกิดผิวขรุขระ โดยความขรุขระนั้นอาจทำได้จากเครื่องมือหรือการกัดกรดด้วยเคมีไฟฟ้า อีกวิธีหนึ่งคือ การกัดกรดด้วย Plasma หรือ Ion bombardment ซึ่งวิธีนี้จะให้ขนาดน้อยกว่าเรือนไมโครเมตร

(4) **คอลลอยด์ (Colloid)** อนุภาคของโลหะ (หรือออกไซด์) ที่อยู่ในสภาพของคอลลอยด์สามารถนำมาใช้เป็นตัวคะตะลิสต์ในการปลูกท่อนาโนได้ ข้อดีของการใช้คอลลอยด์ คือ มีความเป็นเนื้อเดียวกันสูงและสามารถสังเคราะห์ให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคได้ต่ำกว่า 2 นาโนเมตร โดยการเคลือบสารแขวนลอยหรือสารละลายของอนุภาคคะตะลิสต์ในสภาพของคอลลอยด์ลงบนฐานรอง ซึ่งจะใช้เทคนิคคล้ายกับวิธีการเตรียมคะตะลิสต์แบบเปียก (Wet catalyst)

(5) **เทคนิคโซล-เจล (Sol-Gel Technique)** วิธีนี้ใช้เตรียมคะตะลิสต์สำหรับสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังชั้นเดียวและผนังหลายชั้น เป็นวิธีที่ทำให้โลหะคะตะลิสต์มีพื้นที่ผิวสัมผัสและรูพรุนสูง แต่มีความหนาแน่นต่ำมาก

(6) **Floating catalyst method** วิธีนี้ใช้สำหรับผลิตท่อนาโนจำนวนมากโดยใช้วิธีการตกสะสมไอสารเคมี ข้อดีของวิธีนี้คือ ให้ความบริสุทธิ์สูง วิธีนี้ทำได้ง่ายโดยนำอนุภาคคะตะลิสต์ขนาดนาโน (เช่น สารแขวนลอยหรือสารละลายของอนุภาคคะตะลิสต์ในสภาพของคอลลอยด์ หรือสารตั้งต้นที่เป็นโลหะอินทรีย์) ใส่เข้าไปในท่อเผาการตกสะสมไอสารเคมี อุณหภูมิที่ใช้จะแตกต่างกันอยู่ 2 ช่วง คือ ใช้เพื่อทำให้โลหะอินทรีย์บริสุทธิ์และมีขนาดนาโนและใช้เพื่อทำการปลูกท่อนาโนคาร์บอน โดยสารประกอบโลหะอินทรีย์ที่นิยมใช้เป็นตัวคะตะลิสต์ คือ เหล็กเพนตะคาร์บอนนิล

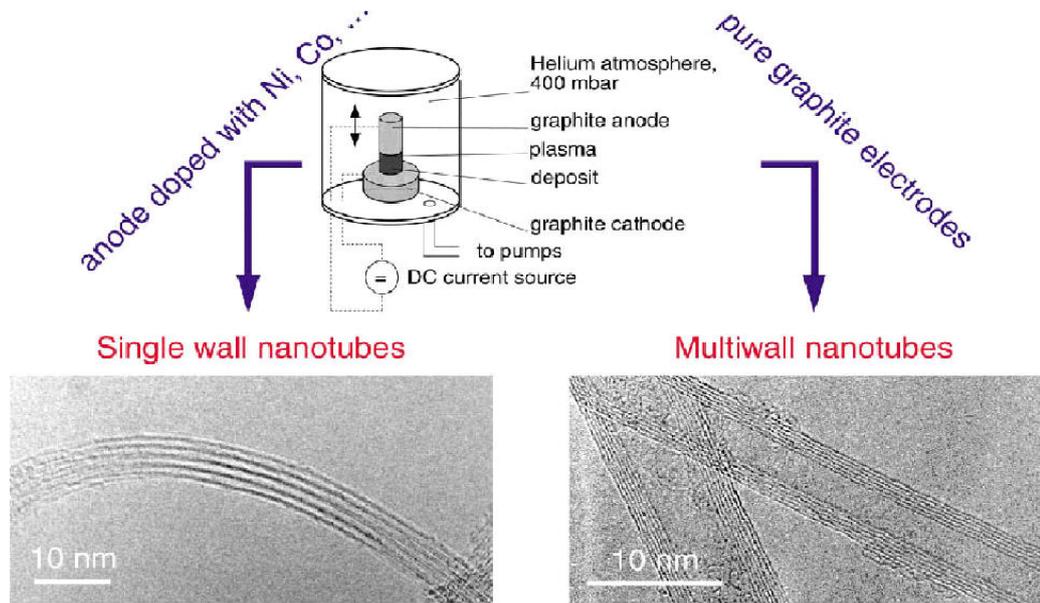
2.5 การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน (Synthesis of carbon nanotubes)¹⁵

เนื่องจากการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนมีหลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีก็มีข้อดีและข้อด้อยแตกต่างกันไป ทั้งในด้านขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง ความยาว ปริมาณและความบริสุทธิ์ของท่อนาโนคาร์บอนที่ได้ โดยสามารถแบ่งวิธีการสังเคราะห์หลักๆ ได้ดังนี้

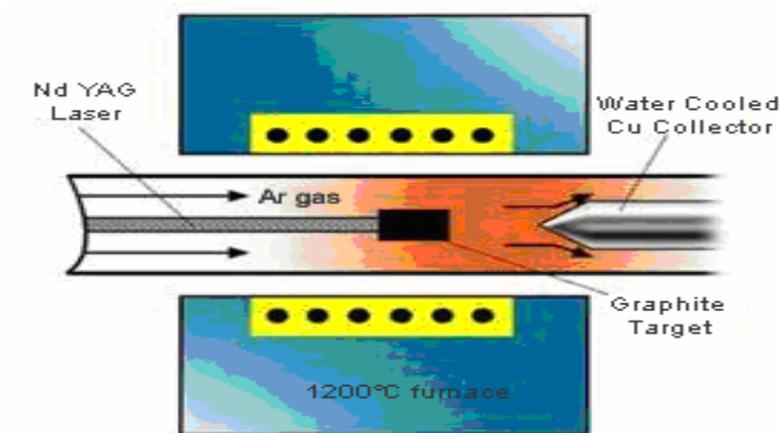
1. วิธีอาร์คดิซชาร์จ (Arc Discharge)
2. วิธีระเหด้วยแสงเลเซอร์ (Laser Ablation)
3. วิธีการตกสะสมไอสารเคมี (Chemical Vapor Deposition, CVD)

(1) **วิธีอาร์คดิซชาร์จ (Arc Discharge)**¹⁵ เป็นการสังเคราะห์โดยใช้การจ่ายกระแสตรงประมาณ 50-120 แอมแปร์ ที่ความต่างศักย์ประมาณ 18-40 โวลต์ ตกคร่อมระหว่างแท่งแกรไฟต์สองแท่งที่วางใกล้ๆ กัน ในระยะห่างระหว่างแท่งประมาณ 1 มิลลิเมตร ภายใต้บรรยากาศแก๊สเฉื่อย เช่น แก๊สฮีเลียม อาร์กอน ที่ความดันต่ำระหว่าง 50-700 มิลลิเมตรปรอท จะทำให้มีความร้อนสูงระหว่างขั้วอิเล็กโทรดเกิดเป็นสถานะพลาสมาขึ้น ส่งผลให้เกิดท่อนาโนคาร์บอนขึ้นตรงบริเวณกลางขั้วของแท่งแกรไฟต์ที่ต่อกับขั้วลบ ซึ่งการควบคุมขนาดและความยาวของท่อนาโนคาร์บอนนั้น อาจทำได้โดยการควบคุมอุณหภูมิและความสม่ำเสมอของการเกิดสถานะพลาสมาและสามารถกำหนดชนิดของท่อนาโนคาร์บอนได้โดยจะผสมโลหะบางชนิด เช่น เหล็ก นิกเกิลและโคบอลต์เป็นโลหะคะตะลิสต์ (Metal catalyst) เพื่อเป็นตัวช่วยให้เกิดการสร้างท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียว ดังรูป 2.13

(2) **วิธีระเหด้วยแสงเลเซอร์ (Laser Ablation)** วิธีนี้จะใช้แสงเลเซอร์ที่มีความเข้มแสงสูงยิงไปยังเป้าซึ่งเป็นแกรไฟต์ ภายใต้สภาวะบรรยากาศแก๊สเฉื่อย เช่น แก๊สฮีเลียม อาร์กอน เป็นต้น ความดันต่ำประมาณ 500 มิลลิเมตรปรอท ที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส โดยเทคนิคนี้คล้ายกับวิธีอาร์คดิซชาร์จตรงที่จะผสมโลหะบางชนิด เช่น เหล็ก นิกเกิลและโคบอลต์ เป็นโลหะคะตะลิสต์ (Metal catalyst) เพื่อช่วยให้เกิดการสร้างท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียว ดังรูป 2.14



รูป 2.13 แผนภาพการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนโดยวิธีอาร์คดิสชาร์จ¹⁵

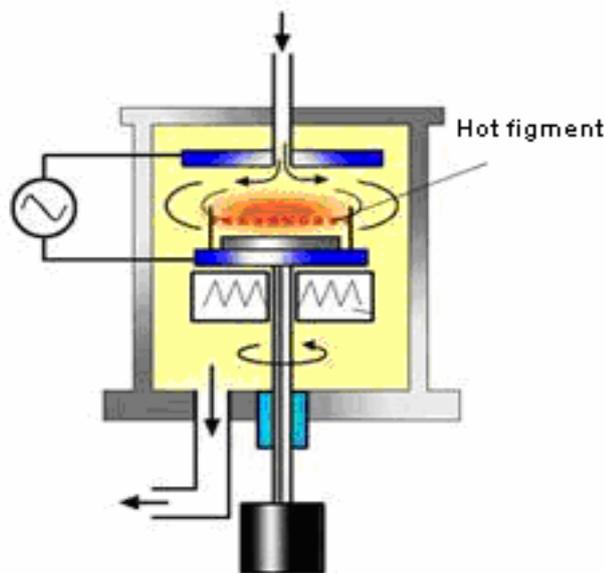


รูป 2.14 แผนภาพการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนโดยวิธีระเหยด้วยแสงเลเซอร์¹⁵

(3) วิธีการตกสะสมไอเคมี (Chemical Vapor Deposition, CVD)¹⁵ เป็นวิธีที่ให้ความร้อนไปยังแก๊สไฮโดรคาร์บอนที่ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอนเพื่อสร้างท่อนาโนคาร์บอน โดยแก๊สที่นิยมใช้คือ มีเทน(CH_4) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และอะเซทิลีน(C_2H_2) เป็นต้น ส่วนแหล่งความร้อนที่ใช้ในการแยกโมเลกุลของแก๊สให้แตกเป็นอะตอมของคาร์บอนนั้นนิยมใช้ พลาสมาหรือขดลวดความร้อน ซึ่งเทคนิคนี้ต้องอาศัยโลหะคะตะลิสต์ (Metal catalyst) เช่น นิกเกิล เหล็ก และโคบอลต์ เป็นต้น เป็นตัวช่วยให้เกิดการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน โดยอุณหภูมิเหมาะสมอยู่ที่

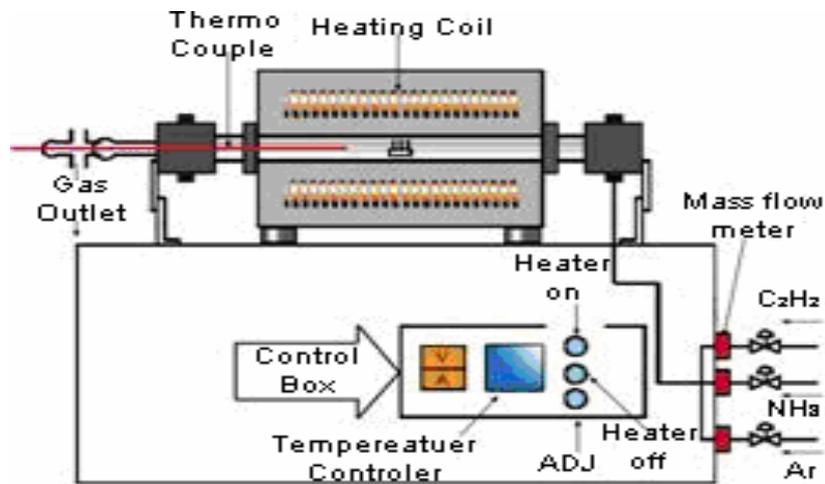
ประมาณ 650-900 องศาเซลเซียส ซึ่งวิธีนี้สามารถควบคุมขนาดและความยาวของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดขึ้นได้ โดยการควบคุมขนาดของตัวคะตะลิสต์และอัตราการไหลของแก๊ส ตามลำดับ ทั้งนี้วิธีนี้ก็ต้องทำภายใต้บรรยากาศแก๊สเฉื่อย เช่น แก๊สฮีเลียม อาร์กอน เป็นต้น วิธีนี้สามารถผลิตท่อนาโนคาร์บอนได้ในปริมาณมากและมีความบริสุทธิ์สูง ซึ่งวิธีนี้มีด้วยกันหลายเทคนิค คือ

(3.1) เทคนิคการตกสะสมไอเคมีด้วยพลาสมา (Plasma enhanced chemical vapor deposition) โดยให้ความต่างศักย์สูงระหว่างขั้วอิเล็กโทรด แล้วให้แก๊สไฮโดรคาร์บอน เช่น อะเซทิลีน มีเทน เอทิลีน เป็นต้น เกิดการแตกตัวและตกบนฐานรอง เช่น ซิลิกอน ซิลิกอนไดออกไซด์ และแก้ว โดยมีโลหะคะตะลิสต์ เช่น เหล็ก นิกเกิลและโคบอลต์ เป็นต้น เคลือบอยู่บนผิวซึ่งเป็นตัวช่วยให้เกิดการจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนเป็นท่อนาโนคาร์บอน ดังรูป 2.15



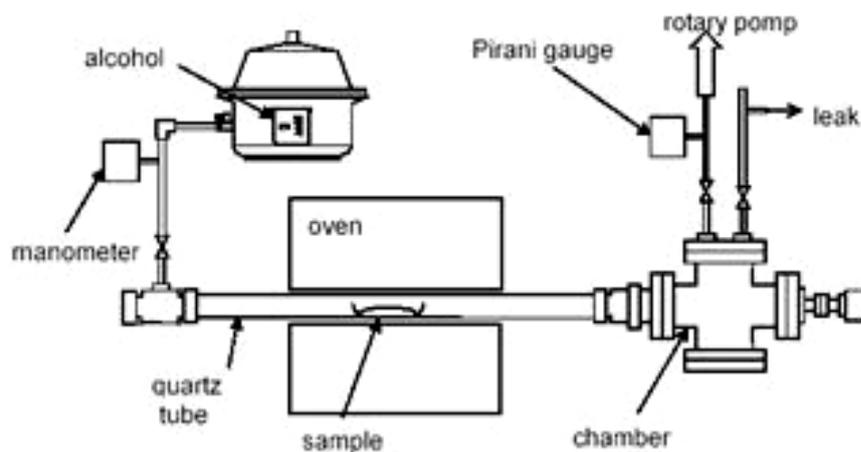
รูป 2.15 แผนภาพการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนโดยเทคนิคการตกสะสมไอเคมีด้วยพลาสมา¹⁵

(3.2) เทคนิคการตกสะสมไอเคมีด้วยความร้อน (Thermal chemical vapor deposition) โดยเทคนิคนี้จะใช้ เหล็ก นิกเกิล โคบอลต์หรือโลหะผสมของทั้งสามชนิดนี้เป็นตัวคะตะลิสต์ ให้ตกเคลือบบนฐานรอง หลังจากนั้นนำฐานรองไปกักกรดไฮโดรคลอริกหรือแก๊สแอมโมเนีย เพื่อให้เกิดก้อนอะตอมของโลหะที่เรียกว่า “การเกิดใหม่” (Nucleation) แล้วนำไปปลูกท่อนาโนคาร์บอน โดยนำไปใส่ในห้องเผาซึ่งจะใช้อุณหภูมิประมาณ 750-1050 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศของแก๊สไฮโดรคาร์บอนและอาร์กอน ดังรูป 2.16



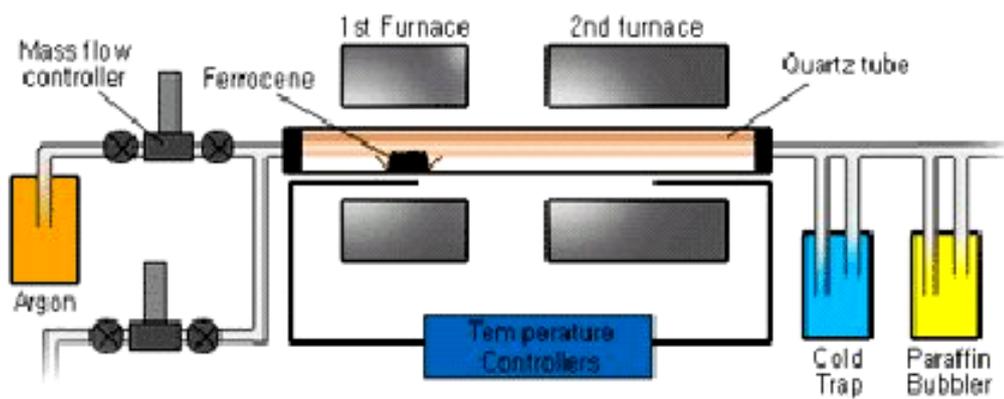
รูป 2.16 แผนภาพการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนโดยเทคนิคการตกสะสมไอเคมีด้วยความร้อน¹⁵

(3.3) เทคนิคการตกสะสมไอเคมีโดยใช้แอลกอฮอล์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Alcohol catalytic chemical vapor deposition, ACVD) ซึ่งจะ去做ปฏิกิริยากับโลหะคะตะลิสต์ เช่น เหล็ก นิกเกิลและโคบอลต์ ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เพื่อให้เกิดกระบวนการตกสะสมไอเคมีได้รวดเร็วยิ่งขึ้น ดังรูป 2.25



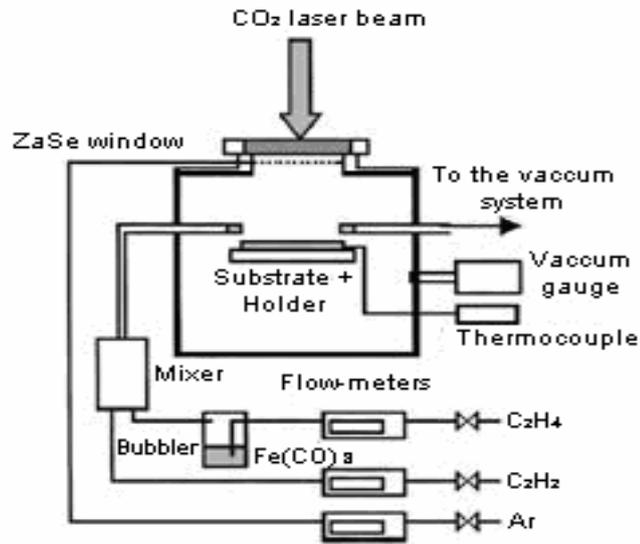
รูป 2.17 แผนภาพการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน โดยเทคนิคการตกสะสมไอเคมีโดยใช้แอลกอฮอล์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา¹⁵

(3.4) เทคนิคการแบ่งเฟสในการปลูก (Vapor phase growth) เป็นการสังเคราะห์โดยการแบ่งพื้นที่ในห้องทดลองเป็นสองส่วน ซึ่งในพื้นที่ส่วนหน้าจะมีอุณหภูมิต่ำกว่า พื้นที่ส่วนนี้จะใส่ภาชนะที่บรรจุผงโลหะอะตอมลิสไว้ พื้นที่ส่วนที่สองจะมีอุณหภูมิสูงกว่า เมื่อปล่อยแก๊สไฮโดรคาร์บอนเข้ามา ก็จะพาไอของอะตอมลิสที่ระเหยออกมาแล้วไปรวมตัวกันในพื้นที่ส่วนที่สองและเกิดการจัดเรียงตัวเป็นท่อนาโนคาร์บอนขึ้น ซึ่งผลที่ได้มีทั้งชนิดผนังชั้นเดียวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2-4 นาโนเมตร และชนิดผนังหลายชั้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 70-100 นาโนเมตร ดังรูป 2.18



รูป 2.18 แผนภาพการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนโดยเทคนิคการแบ่งเฟสในการปลูก¹⁵

(3.5) เทคนิคการตกสะสมไอเคมีโดยใช้แสงเลเซอร์เป็นแหล่งความร้อน (Laser-assisted thermal chemical vapor deposition, LCVD) เป็นการใช้แสงเลเซอร์เป็นแหล่งให้ความร้อนและใช้โลหะอะตอมลิสจากสารละลายเหล็กเพนตะคาร์บอนนิล ($\text{Fe}(\text{CO})_5$) โดยไอระเหยของเหล็กจะผสมกับแก๊สไฮโดรคาร์บอนในห้องผสมแล้วถูกทำให้ร้อนด้วยแสงเลเซอร์ แล้วก่อตัวเป็นท่อนาโนคาร์บอน ดังรูป 2.19



รูป 2.19 แผนภาพการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนด้วยเทคนิคการตกสะสมไอเคมี โดยใช้แสงเลเซอร์เป็นแหล่งความร้อน¹⁵

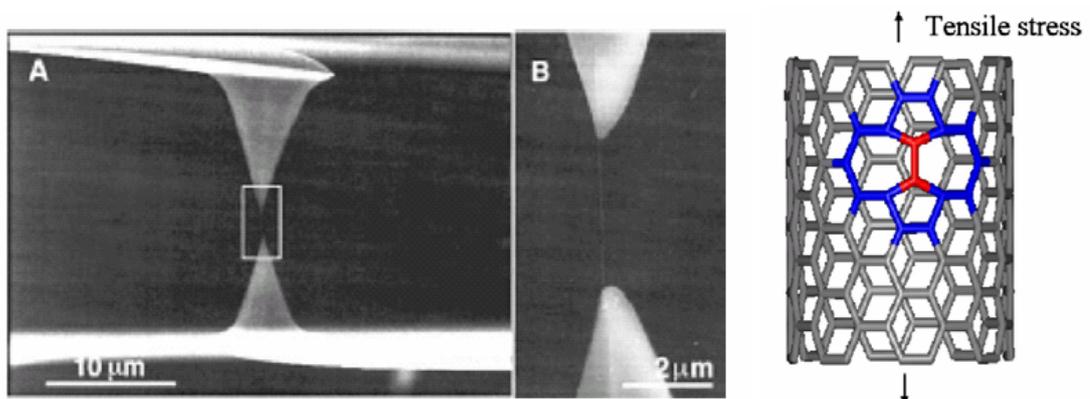
2.6 คุณสมบัติของท่อนาโนคาร์บอน (Properties of carbon nanotubes)²⁶

ท่อนาโนคาร์บอนมีราคาสูงมากเนื่องจากเป็นวัสดุที่มีสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล สมบัติทางไฟฟ้า และสมบัติทางความร้อนที่ดีมาก ซึ่งสมบัติเหล่านี้ขึ้นอยู่กับวิธีสังเคราะห์ ชนิด (SWNT และ MWNT) เส้นผ่านศูนย์กลาง และลักษณะโครงสร้างของท่อนาโน เช่น ลวดลายตามผนังของท่อ เป็นต้น สมบัติโดยทั่วไปของท่อนาโนคาร์บอน มีดังต่อไปนี้

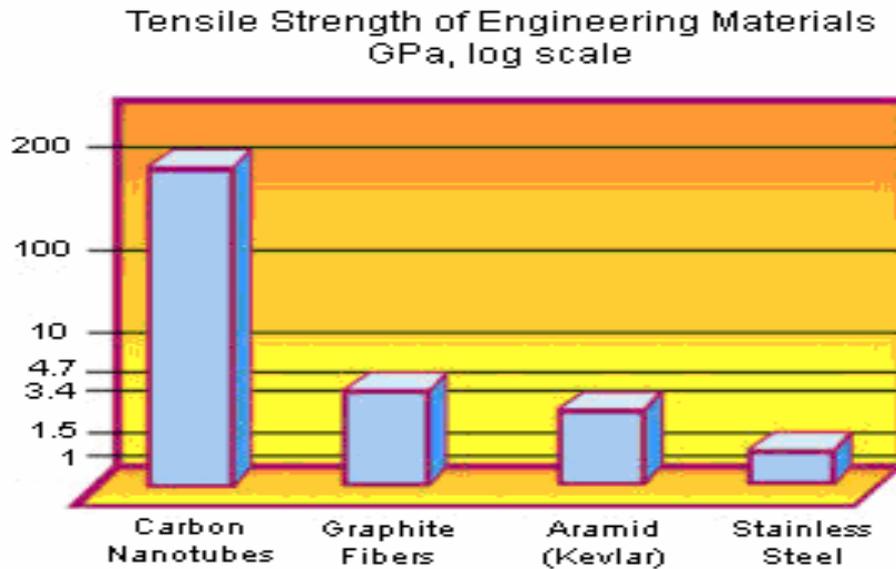
(1) สมบัติทางกายภาพ²⁶ ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียว (SWNT) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ระหว่าง 0.7 และ 2 นาโนเมตร ส่วนท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น (MWNT) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่ออยู่ในช่วง 10 – 300 นาโนเมตร และมีช่องว่างระหว่างชั้นของแต่ละท่อประมาณ 0.34 – 0.36 นาโนเมตร ความยาวของท่อนาโนคาร์บอนโดยทั่วไปอยู่ในช่วงไมโครเมตร ทำให้ท่อนาโนคาร์บอนมีอัตราความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางสูงมาก ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ดีของวัสดุที่ใช้เป็นวัสดุเสริมแรงหรือการนำท่อนาโนคาร์บอนไปใช้ในงานบางอย่างได้โดยตรง ท่อนาโนคาร์บอนมีน้ำหนักเบา โดยมีค่าความหนาแน่นเพียง 1.33–1.40 กรัม / ลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งถือว่าน้อยมากเมื่อเทียบกับอะลูมิเนียมที่มีความหนาแน่น 2.7 กรัม / ลูกบาศก์เซนติเมตร นอกจากนี้ท่อนาโนคาร์บอนยังเป็นโมเลกุลของคาร์บอนที่มีพื้นที่ผิวมากถึง 1,250 ตารางเซนติเมตร/กรัม ซึ่งมากกว่าคาร์บอนที่ว่างไว้ออกฤทธิ์ (Active Carbon) ถึง 2 เท่า

(2) สมบัติเชิงกล²⁶ (Mechanical properties) เนื่องจากโครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอน และพันธะของคาร์บอนที่ยาวเพียง 0.14 นาโนเมตรเท่านั้น ทำให้ท่อนาโนคาร์บอนมีความแข็งแรงกว่าเพชรและแกรไฟต์ กล่าวคือมีค่าความยืดหยุ่นหรือค่าโมดูลัสของยัง (Young's Modulus) สูงถึง 1 เทอราปาสคาล (TPa) และมีความทนทานต่อแรงดึง (Tensile Strength) สูงถึง 200 จิกะปาสคาล (GPa) ซึ่งมีค่าสูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับเหล็กกล้าอัลลอยที่มีค่าเพียง 2 จิกะปาสคาลเท่านั้น นอกจากนี้ ท่อผนังชนิดเดียวยังสามารถถูกดึงยืดได้ถึง 10–13 % ก่อนที่จะขาดอีกด้วย

การวัดค่าสมบัติเชิงกลของท่อนาโนคาร์บอนซึ่งมีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตรนั้นสามารถทำได้หลายวิธี เช่นการวัดค่าโมดูลัสของยังโดยอาศัยเครื่องจุลทรรศน์แรงอะตอมหรือเครื่อง AFM (Atomic Force Microscope ; AFM) ฆตรงกลางท่อนาโนที่วางพาดอยู่บนรูระดับนาโน (Nanopores) ดังรูป 2.20 หรือใช้เข็มของกล้องจุลทรรศน์แบบเข็มกวาดหรือ SPM (Scanning Probe Microscope ; SPM) ำไปงท่อนาโนที่ยึดปลายข้างหนึ่งไว้ แล้ววัดการสั่นสะเทือนของท่อในสนามไฟฟ้า หรืออาจวัดการสั่นของโมเลกุลเนื่องจากความร้อน (Thermal Vibration) ก็ได้ ส่วนการวัดค่าความทนทานต่อแรงดึงนั้นทำได้โดยการใช้เข็มของเครื่อง AFM จับทั้งสองข้างของท่อนาโนแล้วดึงจนขาด ดังแสดงในรูป 2.20



รูป 2.20 แสดงการใช้กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) หาค่าโมดูลัสของยัง²⁷



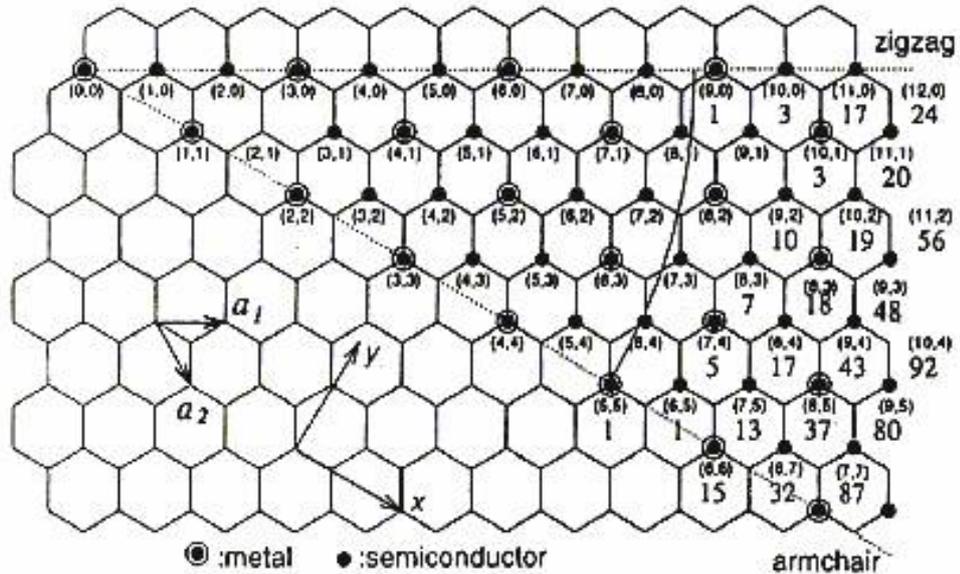
รูป 2.21 แสดงการเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของท่อนาโนคาร์บอนกับวัสดุต่างๆ
(สเกลของกราฟเป็นสเกล log)²⁸

(3) สมบัติทางไฟฟ้า²⁶ ท่อนาโนคาร์บอนสามารถนำไฟฟ้าได้ดีกว่าตัวนำไฟฟ้าทุกชนิด และมีคุณสมบัติเป็นตัวนำยิ่งยวดในบางสภาวะได้ด้วย ซึ่งท่อนาโน 1 มัด สามารถนำไฟฟ้าได้ถึง 10^9 แอมแปร์ / ตารางเซนติเมตร ขณะที่ทองแดงมีค่าการนำไฟฟ้าสูงสุดเพียงแค่ 10^6 แอมแปร์ / ตารางเซนติเมตร

นอกจากท่อนาโนคาร์บอนจะมีสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้าแล้ว ยังสามารถเป็นสารกึ่งตัวนำเหมือนซิลิกอนได้ด้วย ซึ่งขึ้นอยู่กับโครงสร้างของท่อนาโนที่สังเคราะห์ให้ได้ เช่น การที่ท่อนาโนมีลวดลายผนังท่อที่ต่างกันทำให้การนำไฟฟ้าของท่อนาโนต่างกัน โครงสร้างของท่อนาโนแบบ Armchair จะแสดงสมบัติทางไฟฟ้าเหมือนตัวนำไฟฟ้า ขณะที่โครงสร้างแบบ Zigzag แสดงสมบัติทางไฟฟ้าเหมือนสารกึ่งตัวนำไฟฟ้า ส่วนแบบ Chiral จะมีอยู่ระหว่างสองแบบแรก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อและทิศทางการจัดเรียงตัวของวงแหวนหกเหลี่ยม (helicity or chirality) ที่ทำมุมเทียบกับแกนของท่อ (chiral angle)¹⁶

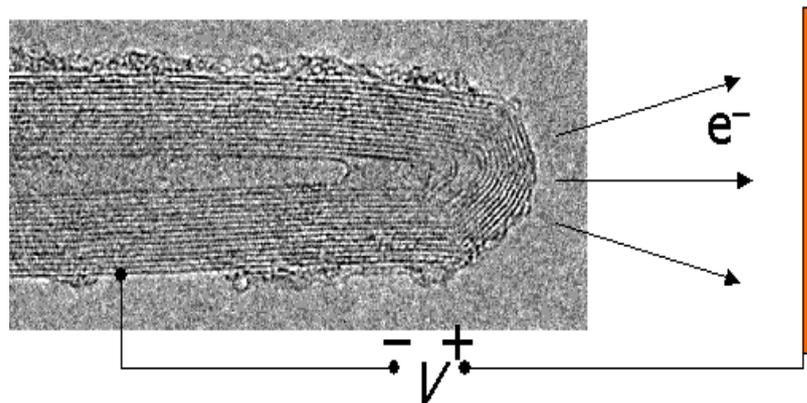
ที่ตำแหน่ง $(n-m)/3$ ได้เป็นจำนวนเต็ม จะแสดงสมบัติทางไฟฟ้าแบบตัวนำไฟฟ้า (Conductor) หรือโลหะซึ่งส่วนใหญ่เป็นท่อนาโนคาร์บอนแบบ armchair

ที่ตำแหน่ง $(n-m)/3$ ได้ไม่เป็นจำนวนเต็ม จะแสดงสมบัติทางไฟฟ้าแบบสารกึ่งตัวนำไฟฟ้า (Semiconductor) ซึ่งส่วนใหญ่เป็นท่อนาโนคาร์บอนแบบ chiral และ 2 ใน 3 ส่วนของแบบ zig-zag



รูป 2.22 แสดงลักษณะการเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนทำให้สมบัติต่างกันไป¹⁵

สมบัติทางไฟฟ้าอย่างหนึ่งที่น่าสนใจของท่อนาโนคาร์บอน คือ มีคุณสมบัติควอนตัม (Quantum) สามารถควบคุมการไหลเคลื่อนอิเล็กตรอนแบบไม่ต่อเนื่อง ซึ่งอาจเป็นกลุ่มหรืออิเล็กตรอนทีละตัวได้ และสามารถปลดปล่อยอิเล็กตรอนจากปลายของท่อนาโนที่วางอยู่ในสนามไฟฟ้าภายใต้สภาวะสุญญากาศได้ ดังรูปที่ โดยที่ศักย์ไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนนั้นมีค่าต่ำกว่าขั้วที่ทำจากวัสดุอื่น เช่น สามารถกระตุ้น Phosphors ที่วางไว้ห่าง 1 มิลลิเมตร ได้โดยใช้ศักย์ไฟฟ้าเพียง 1-3 โวลต์ ขณะที่ต้องใช้ศักย์ไฟฟ้าสูงถึง 50-100 โวลต์กับปลายขั้วโมลิบดีนัม

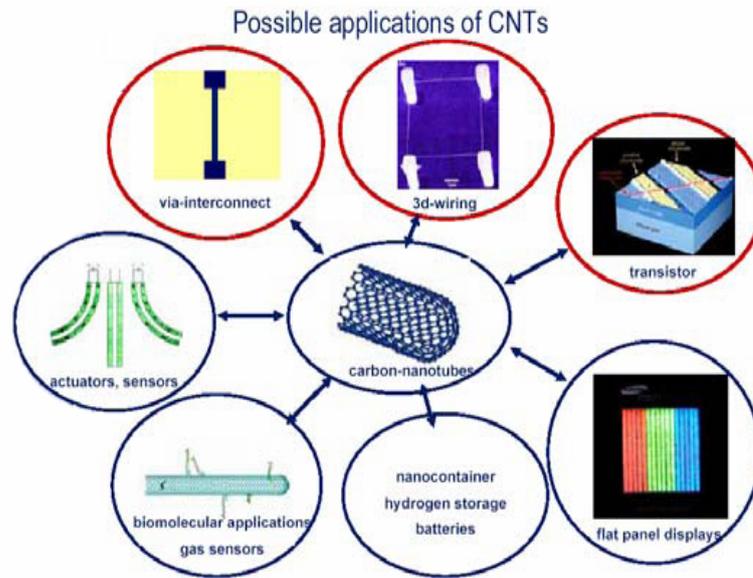


รูป 2.23 การปลดปล่อยอิเล็กตรอนจากปลายของท่อนาโนคาร์บอน²⁹

(4) สมบัติทางความร้อน²⁶ การนำความร้อนของท่อนาโนคาร์บอนมีค่าสูงประมาณ 2000 วัตต์ / เมตรเคลวิน และบางรายงานกล่าวว่ามีการนำความร้อนสูงถึง 6000 วัตต์ / เมตรเคลวิน ซึ่งมากกว่าเพชรและแกรไฟต์ ซึ่งมีค่าประมาณ 2000 วัตต์ / เมตรเคลวิน หลายเท่า นอกจากนี้ท่อนาโนคาร์บอนยังทนต่ออุณหภูมิได้ถึง 750 องศาเซลเซียส ในสภาวะปกติ และ 2800 องศาเซลเซียส ภายใต้ภาวะสูญญากาศอีกด้วย

2.7 การประยุกต์ใช้ท่อนาโนคาร์บอน (Applications)³⁰

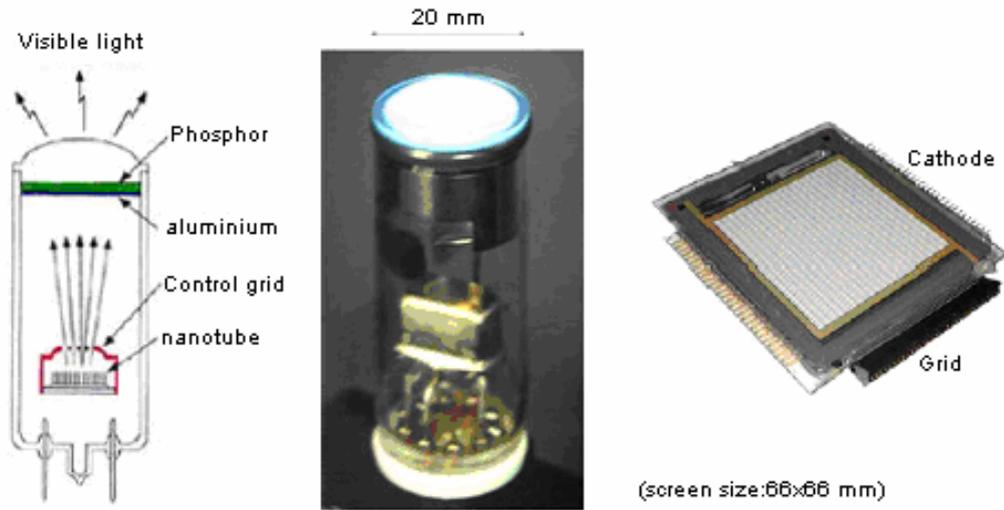
- เป็นขั้วไฟฟ้าทางเคมีและแหล่งจ่ายพลังงานจากการแตกตัวให้แก๊สไฮโดรเจน (Electrochemical and gas phase hydrogen storage)
- เป็นวัสดุผสมท่อนาโนคาร์บอน (Carbon Nanotube composites)
- ทำพลาสติกชนิดนำไฟฟ้า (Conductive Plastics for Electrostatic Painting and Static Dissipation)
- เป็นอุปกรณ์ป้องกันสนามแม่เหล็ก (Electromagnetic Interference Shielding, EMI)
- ตัวเก็บประจุยิ่งยวด (Supercapacitor)
- เป็นแบตเตอรี่ชนิดประจุลิเทียม (Lithium ion batteries)
- เป็นอุปกรณ์ใช้ในการปลดปล่อยอิเล็กตรอนแบบฟิลด์อิมิสชัน (Field Emission Display)
- เป็นเชื้อเพลิงผ่านแลกเปลี่ยนโปรตอนเพื่อเป็นแหล่งพลังงาน (Proton Exchange Membrane (PEM) Fuel Cells)
- อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กระดับนาโนเมตร (Nanoelectronics)
- หัววัดของเครื่องวัดแรงระหว่างอะตอม (AFM Tips)
- เป็นอุปกรณ์เซนเซอร์ (Nanotube Actuators sensors)



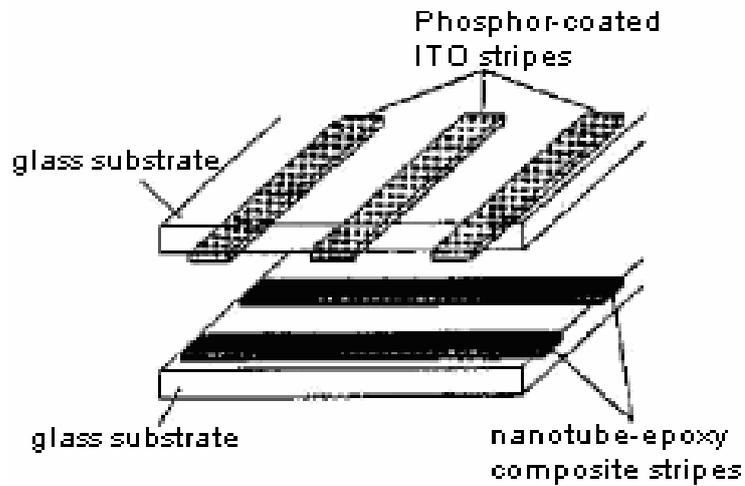
รูป 2.24 แสดงการนำท่อนาโนคาร์บอนไปประยุกต์ใช้³¹

(1) แหล่งกำเนิดแสงแบบแคโทด (Cathode-Ray Lighting Element)³² ท่อนาโนคาร์บอน มาประยุกต์ใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสงแบบแคโทดที่ทำหน้าที่เหมือนกับแบบฟิลด์อิมิสชัน รูป 2.25 แสดงแหล่งกำเนิดแสงแบบแคโทด (Cathode-Ray Lighting Element) สามารถทำได้โดยนำแท่งทรงกระบอกที่บรรจุด้วยท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (MWNTs) ที่ผ่านการสังเคราะห์ด้วยวิธีอาร์คดิสชาร์จไปตัดเป็นแผ่นกลมบางๆ และติดให้แน่นกับแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยกาวเงิน หรืออาจทำได้อีกวิธีหนึ่ง คือ นำท่อนาโนคาร์บอนทาลงบนแผ่นโลหะ ส่วนจากเรืองแสงจะทาบบนพื้นผิวภายในของแผ่นแก้ว ความแตกต่างของสีนั้นขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้เป็นฟลูออเรสเซนต์ ซึ่งค่าแห่งความส่องสว่างบนฉากเรืองแสงที่วัดได้จากแสงสีเขียวในแนวแกนเดียวกับท่อเป็น $6.4 \times 10^4 \text{ cd/cm}^2$ ที่กระแสไฟฟ้าขั้วแอโนดเป็น $200 \mu\text{A}$ ซึ่งเป็นสองเท่าของวัสดุให้แสงแบบแคโทดแบบเดิม ภายใต้อิทธิพลเดียวกัน

(2) จอภาพแบบแบน (Flat Panel Display)^{32,33} การนำท่อนาโนคาร์บอนมาใช้เป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนแบบฟิลด์อิมิสชันในจอภาพ แบบแบน (Flat Panel Display) นั้นมีต้นแบบมาจาก Northwestern University ซึ่งประกอบด้วยแถบ epoxy ผสมท่อนาโนอยู่บนแผ่นแก้วเป็นขั้วแคโทดและทำแถบ Indium-Tin-Oxide (ITO) ที่ฉาบด้วยสารเรืองแสงบนแผ่นขั้วแอโนด ดังแสดงในรูป 2.25

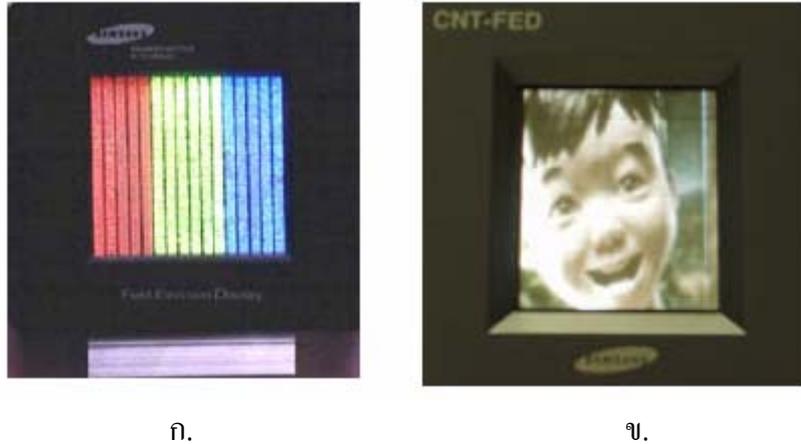


รูป 2.25 แสดงแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ท่อนาโนคาร์บอนเป็นขั้วแคโทด (ผลิตโดยบริษัท Ise Electronic ประเทศญี่ปุ่น)³⁴



รูป 2.26 แสดงแผนผังต้นแบบเครื่องให้อิเล็กตรอนแบบฟิล์มอิมิสชันที่ใช้ท่อนาโนคาร์บอน⁴¹

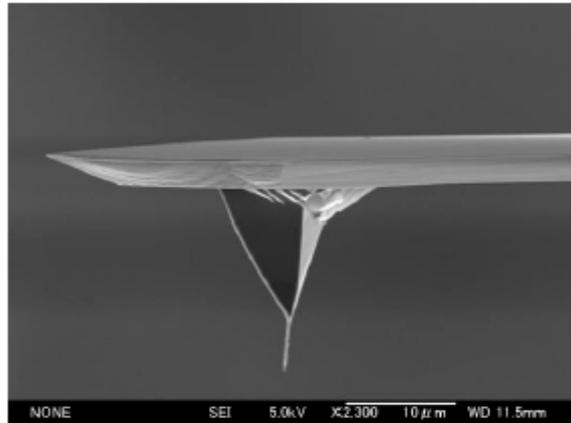
ปัจจุบันบริษัท Samsung ได้ผลิตเครื่องให้อิเล็กตรอนแบบฟิล์มอิมิสชันชนิดไดโอดขนาด 4.5 และ 5 นิ้ว ได้ทำการสังเคราะห์แถบท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวด้วยวิธี อาร์คคิสซาร์จ โดยให้เป็นขั้วแคโทด และแถบ ITO ที่ฉาบด้วยสารเรืองแสงเป็นขั้วแอโนด ดังรูปที่ 2.27



รูป 2.27 แสดงต้นแบบเครื่องให้อิเล็กตรอนแบบฟیلด์อิมิตชันที่ใช้ท่อนาโนคาร์บอน
ของบริษัท Samsung (ก) ขนาด 4.5 นิ้ว และ (ข) 5 นิ้ว³²

(3) **จอภาพแบบรังสีแคโทด**³⁵ จอภาพแบบรังสีแคโทด ที่ใช้ในจอทีวี หรือจอคอมพิวเตอร์ นั้นถูกประดิษฐ์ขึ้นโดยนักวิจัยชาวญี่ปุ่นชื่อยาฮาชิ ไชโตะ (Yahachi Saito) โดยใช้ท่อนาโนคาร์บอน แทนโลหะในส่วนที่เป็นขั้วในตัวหลอดสำหรับจ่ายค่าอิเล็กตรอน ด้วยคุณสมบัติที่เหนือกว่า คือให้ความสม่ำเสมอให้ปริมาณที่เพียงพอ และมีอายุการใช้งานของการจ่ายอิเล็กตรอนนานกว่า นอกจากนี้แล้วยังไม่จำเป็นต้องใช้ในสุญญากาศและยังเป็นการประหยัด พลังงาน เนื่องจากมันสามารถจ่ายอิเล็กตรอนได้ที่อุณหภูมิห้อง โดยไม่จำเป็นต้องเผาไส้หลอดให้แดง

(4) **โพรบวัด (Probing tip)**³⁵ เนื่องจากท่อนาโนคาร์บอนมีสมบัติเชิงกลที่ดี คือ มีค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นสูง และมีรูปร่างเหมาะสม ที่จะนำมาทำเป็นโพรบวัดของกล้องจุลทรรศน์แบบเข็มกวาด (Scanning Probe Microscopes, SPMs) ตัวอย่างเช่น กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscope, AFM) และกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดทันเนลลิง (Scanning tunneling microscopy, STM)⁴¹ เป็นต้นทั้งนี้เพราะท่อนาโนคาร์บอนมีข้อได้เปรียบกว่าโพรบวัดที่ทำจากซิลิคอนหรือซิลิคอนไนไตรด์ ในแง่ของความมีเสถียรภาพและความคงทน ที่สำคัญท่อนาโนคาร์บอนสามารถทำให้มีขนาด เส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลงไปได้ถึง 1.2 นาโนเมตร จึงลดปัญหาในเรื่องขีดจำกัดมุมโคนและรัศมีความโค้งของปลายโพรบวัด เช่น การวัดภาพดีเอ็นเอ เป็นต้น ทำให้โพรบวัดที่มีปลายเป็นท่อนาโนคาร์บอนช่วยเพิ่มความสามารถในการแยกแยะให้กับกล้องจุลทรรศน์ประเภทนี้



รูป 2.28 โพรบวัดท่อนาโนคาร์บอนของกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม ภาพถ่ายจากเครื่อง SEM³⁶

(5) วัสดุผสมท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotube composite) ท่อนาโนคาร์บอนมีสมบัติเชิงกลที่ดี มีการนำท่อนาโนคาร์บอนมาใช้เป็นวัสดุผสม ซึ่งมีการใช้อย่างแพร่หลายในอุปกรณ์กีฬา ตัวอย่างวัสดุที่สามารถนำท่อนาโนคาร์บอนไปผสมได้ เช่น พลาสติก โลหะ คาร์บอน และ epoxy การผสมท่อนาโนคาร์บอนกับวัสดุเหล่านี้สามารถจะเพิ่มความแข็งแรง และความยืดหยุ่นของวัสดุเหล่านี้ได้⁴⁵

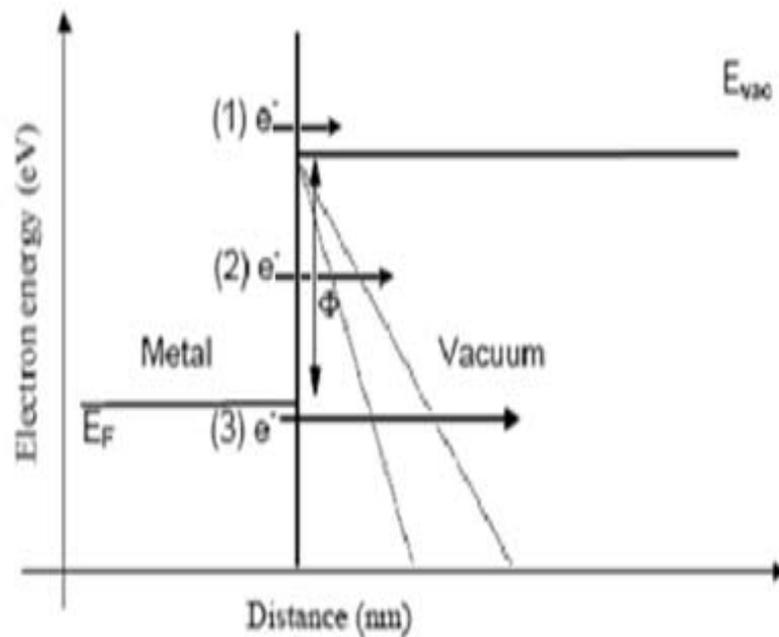
 An advertisement for the VS Nanotube™ Drive tennis racket. The ad features a green and white color scheme. On the right is a photograph of the racket. On the left, there is text and a diagram of the racket's head. The text includes:

- VS Nanotube™ Drive**
- Racket with power and comfort for more playing ease.
- DUAL** (with a diagram of the racket head showing two zones)
- Carbon Nanotube™ Stabilizers increase torque (+50%) and flex (+20%) resistance.
- Dual Woofer, 5 times more shock absorbing than conventional grommet.
- A control dial with settings for **PASSION**, **COMPETITION**, and **RECREATION**, with a slider between **Power** and **Control**.
- Head Size:** 722 cm² / 112 sq.in.
- Weight:** 255 gr / 9.0 oz.
- Composition:** Carbon Nanotube™ / High modulus graphite.
- Grip:** Air Touch Grip.

รูป 2.29 ตัวอย่างแร็กเก็ตที่มีท่อนาโนคาร์บอนเป็นวัสดุผสม³⁷

2.8 การปลดปล่อยอิเล็กตรอน (Field Emission)⁴⁰

(1) พื้นฐานของการปลดปล่อยอิเล็กตรอนในสุญญากาศ⁴⁰ การปลดปล่อยอิเล็กตรอนเป็นกระบวนการที่ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากผิวของของแข็งภายในสุญญากาศ ในของแข็งอิเล็กตรอนจะยึดกันอยู่ภายในอะตอมด้วยแรงทางไฟฟ้า กำแพงศักย์ของแรงทางไฟฟ้าในบริเวณนี้เรียกว่า เวิร์กฟังก์ชัน (ϕ) ในชั้นนี้อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่จากผิวของของแข็ง และสามารถเอาชนะกำแพงศักย์ได้ แล้วถูกปลดปล่อยเข้าสู่สุญญากาศ กระบวนการของการปลดปล่อยอิเล็กตรอนส่วนใหญ่จะเกิดจากการที่โลหะร้อนปล่อยอิเล็กตรอนออกมา และให้สนามไฟฟ้า ในกระบวนการนี้พลังงานภายในเกิดจากความร้อนหรือสนามไฟฟ้า เป็นการพยายามทำให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนกลไกของกระบวนการนี้สามารถอธิบายโดยพิจารณาแผนผังดังรูปที่ 2.30



รูป 2.30 แผนภาพแสดงกลไกสำหรับกระบวนการปลดปล่อยอิเล็กตรอน⁴⁰

- (1) การปลดปล่อยอิเล็กตรอนจะเกิดเมื่อโลหะได้รับความร้อนสูง (thermionic)
- (2) การปลดปล่อยอิเล็กตรอนจะเกิดเมื่อโลหะได้รับความร้อนปานกลาง หรือมีสนามไฟฟ้าระดับปานกลาง (thermionic-field)
- (3) การปลดปล่อยอิเล็กตรอนจะเกิดเมื่อโลหะมีความร้อนน้อย มีสนามไฟฟ้าสูง (field emission)

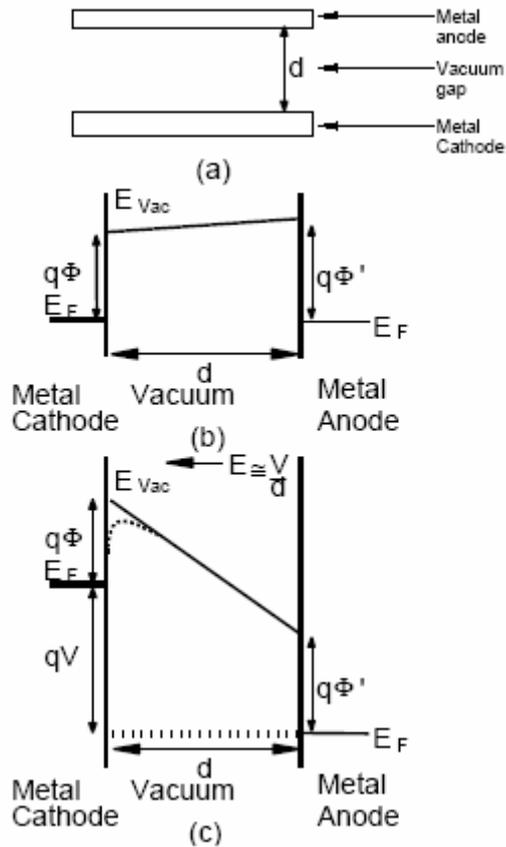
ถ้าอุณหภูมิของโลหะสูงเพียงพอ จะทำให้อิเล็กตรอนบางตัวมีพลังงานรวมสูงกว่าระดับพลังงานสุญญากาศ (E_{vac}) อิเล็กตรอนตัวนี้จะถูกปล่อยเข้าสู่สุญญากาศ ซึ่งในระดับนี้ไม่มีพลังงานจลน์ การปลดปล่อยอิเล็กตรอนโดยให้ความร้อนที่โลหะ ปกติจะเกิดที่อุณหภูมิสูงประมาณ 1500-2500 °C

ถ้าอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิปานกลางอิเล็กตรอนบางตัวจะมีพลังงานสูงกว่าระดับพลังงานเฟอร์มิ แต่จะต่ำกว่าระดับพลังงานสุญญากาศ อิเล็กตรอนจะไม่ปลดปล่อยเข้าสู่สุญญากาศโดยเร็ว ในขั้นนี้สำหรับอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่เข้าสู่สุญญากาศ สนามไฟฟ้าปานกลาง กำแพงศักย์น้อยลง อุณหภูมิสนามไฟฟ้าที่กระตุ้นให้เกิดกระบวนการปลดปล่อยโดยการทะลุผ่านทางกลศาสตร์ควอนตัม เรียกว่า thermionic-field emission เกิดขึ้นบนเว็รคฟังก์ของโลหะ thermionic-field emission จากโลหะสามารถสังเกตได้ที่อุณหภูมิปานกลางประมาณ 700-1500 °C

ที่อุณหภูมิต่ำ อิเล็กตรอนส่วนใหญ่จะมีพลังงานต่ำกว่าระดับพลังงานเฟอร์มิ สนามไฟฟ้าสูง กำแพงศักย์น้อยลง ดังนั้นจึงยอมให้อิเล็กตรอนในทางกลศาสตร์ควอนตัมทะลุผ่านเข้าไปในสุญญากาศ จึงถูกเรียกว่าการปลดปล่อยสนามไฟฟ้า (Field Emission) เพราะว่าเป็นสนามไฟฟ้าเป็นแหล่งพลังงานหลักที่ทำให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอน (Electron Emission)

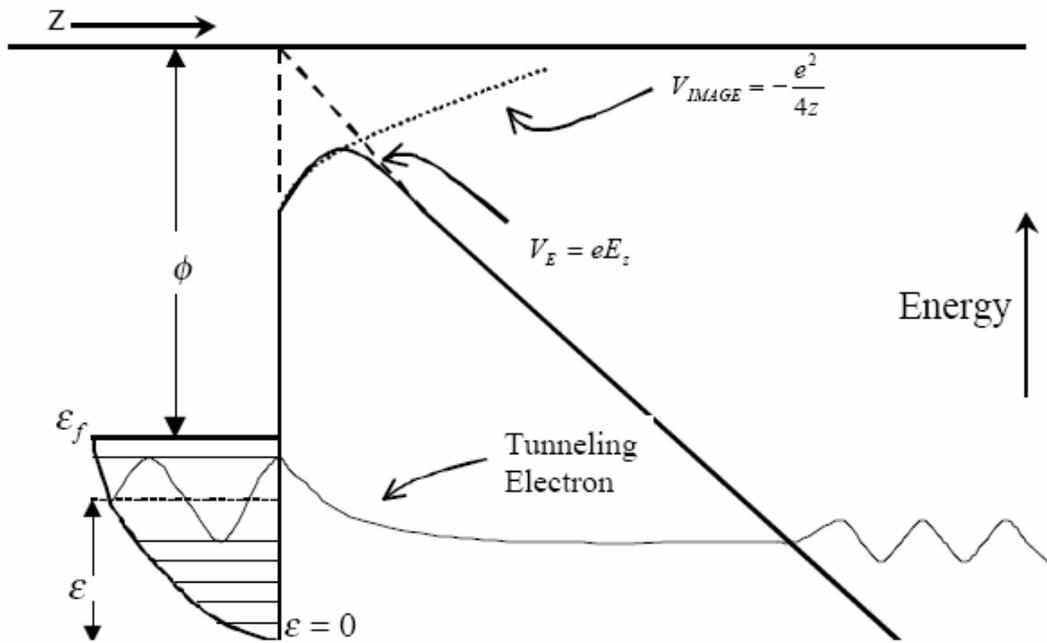
(2) การปลดปล่อยอิเล็กตรอนของไดโอดที่อยู่ในสุญญากาศ⁴⁰ การปลดปล่อยอิเล็กตรอนของไดโอดที่อยู่ในสุญญากาศ เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีสองขั้ว ซึ่งมีโครงสร้างอย่างง่าย ดังรูปที่ 2.31 ขั้วแรกเรียกว่าขั้วลบ จะเกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอน ขั้วที่สองเรียกว่าขั้วบวก อิเล็กตรอนจะสะสมไว้บริเวณนี้ ขั้วทั้งสองจะถูกแยกโดยช่องว่างสุญญากาศ ซึ่งการปลดปล่อยอิเล็กตรอนจะเกิดขึ้นเมื่อสนามไฟฟ้ามีค่าต่ำ ปกติขั้วลบจะทำจากวัสดุที่มีค่าเว็รคฟังก์ชันน้อย หรือมีรูปร่างแหลม

หลักการทั่วไปของการปลดปล่อยอิเล็กตรอนของไดโอดในสุญญากาศ มีดังนี้ เมื่อให้ความต่างศักย์ซึ่งมีค่าเป็นบวก ใส่ที่ขั้วบวกของไดโอด และให้ความต่างศักย์ที่มีค่าเป็นลบที่ขั้วลบของไดโอด การปลดปล่อยอิเล็กตรอนจะเกิดจากขั้วลบผ่านกำแพงศักย์ แล้วเข้าไปในสุญญากาศ โดยกระบวนการทะลุผ่าน Fowler-Nordheim อิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยจะถูกเร่งผ่านช่องว่างสุญญากาศ ภายใต้อสนามไฟฟ้า และไปสะสมที่ขั้วบวก เมื่ออิเล็กตรอนปะทะกับขั้วบวก อิเล็กตรอนจะปล่อยพลังงานออกมาในรูปของความร้อน



รูป 2.31 แสดงการปลดปล่อยอิเล็กตรอนของไดโอดที่อยู่ในสุญญากาศ⁴⁰

(3) ทฤษฎีฟาวเลอร์-นอร์ดเฮียม (Fowler-Nordheim)^{41,44} การปลดปล่อยอิเล็กตรอนแบบฟิลด์อิมิสชัน (Field Emission) เป็นการเพิ่มพลังงานแก่อิเล็กตรอนที่อยู่ผิวโลหะ โดยการป้อนสนามไฟฟ้าสูงเข้าสู่ผิวโลหะด้านขั้วลบ จึงทำให้อิเล็กตรอนสามารถวิ่งทะลุผ่านกำแพงพลังงานศักย์ออกมา เข้าสู่สุญญากาศ และมาที่ขั้วบวกได้ ซึ่งเรียกรวมการนี้ว่า tunneling ดังรูปที่ 2.32 และกระแสไฟฟ้าอันเนื่องมาจาก Field Emission จะมีค่าตามสมการฟาวเลอร์-นอร์ดเฮียม (Fowler-Nordheim)⁴³



รูป 2.32 แผนภาพแสดงการปลดปล่อยอิเล็กตรอน⁴¹

ทฤษฎี Fowler-Nordheim เป็นทฤษฎีที่อธิบายการปลดปล่อยอิเล็กตรอนที่อุณหภูมิต่ำ โดยใช้สนามไฟฟ้าในการทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาตามสมการที่ 1

$$J = \frac{AE^2}{\phi^2(y)} \exp\left(-B \frac{\phi^{\frac{3}{2}}}{E} v(y)\right) \text{ A/cm}^2 \quad (1)$$

- | | | | |
|-----|---|-----|---|
| โดย | J | คือ | ความหนาแน่นของกระแส มีหน่วยเป็น A/cm ² |
| | E | คือ | สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผิว มีหน่วยเป็น V/cm |
| | φ | คือ | กำแพงพลังงานศักย์(work function) มีหน่วยเป็น eV |

$$A = 1.54 \times 10^{-6} \frac{\text{A} \cdot \text{eV}}{\text{V}^2} \quad (2)$$

$$B = 6.87 \times 10^7 \frac{\text{V}}{\text{cm} \cdot \text{eV}^{\frac{3}{2}}} \quad (3)$$

$$y = \left\{ 3.79 \times 10^{-4} \left(\frac{cm}{V} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot eV \right\} \frac{E^{\frac{1}{2}}}{\phi} \quad (4)$$

โดย A และ B คือ ค่าคงที่
 y คือ ค่า Schottky ที่ทำให้ความสูงของกำแพงพลังงานศักย์ “work function” ลดต่ำลง

และจาก สมการ (1) ฟังก์ชัน $t(y)$ และ $v(y)$ สามารถแทนได้ด้วยการประมาณค่าของ Spindt

โดย $t^2(y) = 1.1$ (5)

และ $v(y) = 0.95 - y^2$ (6)

ค่าของ y , $t(y)$ และ $v(y)$ ถูกตรวจแก้โดยนอร์ดไฮม์ (Nordheim)

โดย $J = \frac{I}{\alpha}$ (7)

และ $E = \frac{\beta V}{d}$ (8)

เมื่อ I คือ กระแสไฟฟ้า มีหน่วยเป็น A
 A คือ พื้นที่ผิวที่ปลดปล่อยอิเล็กตรอน มีหน่วยเป็น cm^2
 β คือ หน่วยเล็กสุดของสนามที่กำหนดโดยปัจจัยทางเรขาคณิต
 V คือ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ให้กับระบบ มีหน่วยเป็น V
 d คือ ระยะห่างระหว่างขั้วบวกและขั้วลบ มีหน่วยเป็น cm

และเมื่อแทนค่าสมการที่ (7) และ(8) ลงในสมการที่ (1)

จะได้

$$\frac{I}{\alpha} = \frac{A(\beta V / d)^2}{\phi^2(y)} \exp\left(-B \frac{\phi^{\frac{3}{2}}}{\beta V / d} v(y)\right) \quad (9)$$

หรือ

$$I = aV^2 \exp\left(-\frac{b}{V}\right) \quad (10)$$

เมื่อ

$$a = \frac{\alpha A \beta^2}{1.1 \phi d^2} \exp\left(\frac{B(1.44 \times 10^{-7})d}{\phi^{1/2}}\right) \quad (11)$$

$$b = \frac{0.95 B \phi^{\frac{3}{2}}}{\beta} \quad (12)$$

โดย

A B ϕ และ d เป็นค่าปริมาณสเกลลา

a ขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวของการปลดปล่อยอิเล็กตรอน

b ขึ้นอยู่กับลักษณะและขนาดของมุมปลายของโพรบหัววัด

และจากสมการที่ 2.10 สามารถแปลงให้อยู่ในรูปของสมการได้คือ

$$\ln\left(\frac{I}{a \cdot V^2}\right) = -\frac{b}{V} \quad (13)$$

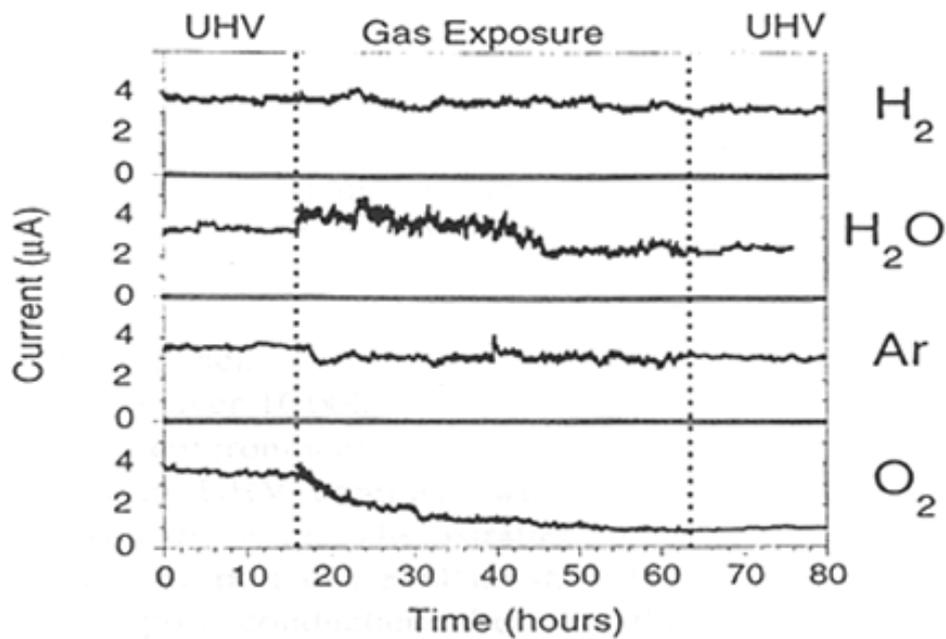
ซึ่งมีความสัมพันธ์มีลักษณะเป็นเส้นตรงระหว่าง $\ln(I/V^2)$ และ $1/V$

(4) การปลดปล่อยอิเล็กตรอนของท่อนาโนคาร์บอน⁴² การปลดปล่อยอิเล็กตรอนมีการทดสอบจาก SWNTs, MWNTs และเส้นใยนาโน ซึ่งมีองค์ประกอบหลายอย่างที่จะทำให้เกิดลักษณะการปลดปล่อยอิเล็กตรอน เช่น ความต่างศักย์ ช่องว่าง และเงื่อนไขของความเป็นสุญญากาศ เป็นต้น ที่จะสามารถทำให้เกิดความแตกต่างของผลการทดลอง ท่อนาโนคาร์บอนจะมีค่าของสนามไฟฟ้าที่ปลดปล่อยออกมาต่ำสุดประมาณ $1 \text{ V}/\mu\text{m}$ และมีค่าความหนาแน่นกระแสสูงสุดอยู่ที่ค่าประมาณ $1 \text{ A}/\text{cm}^2$

การปลดปล่อยอิเล็กตรอนของ SWNTs คาดว่าน่าจะให้ค่าความต่างศักย์เริ่มต้นที่มีค่าต่ำกว่า MWNTs เพราะว่ามีลักษณะของปลายท่อที่แหลมกว่า แต่ว่ามันก็จะแตกหักและได้รับความ

เสียหายได้ง่าย ดังนั้นการปลดปล่อยอิเล็กตรอนของท่อนาโนคาร์บอนจึงมักใช้ MWNTs เพราะมีโครงสร้างหลายชั้นและแข็งแรงกว่า

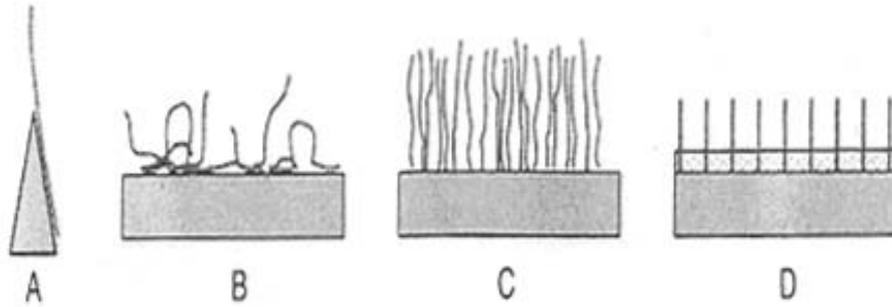
(4.1) ความสำคัญของสิ่งแวดล้อม การเปลี่ยนแปลงของธรรมชาติมีผลต่อการปลดปล่อยอิเล็กตรอน โดยเฉพาะอย่างยิ่งน้ำและออกซิเจน น้ำทำให้กระแสของการปลดปล่อยอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้น ในขณะที่ออกซิเจนจะทำให้ลดลง แก๊สไนโตรเจนไม่มีผลต่อการปลดปล่อยอิเล็กตรอน ความเป็นสุญญากาศที่สูงมีความจำเป็นสำหรับการปลดปล่อยอิเล็กตรอน ดังรูปที่ 2.33



รูป 2.33 แสดงผลของแก๊สที่มีต่อการปลดปล่อยอิเล็กตรอน⁴³

(4.2) โครงสร้างของการปลดปล่อยอิเล็กตรอน⁴² การวิจัยส่วนใหญ่เริ่มสร้างอุปกรณ์การปลดปล่อยอิเล็กตรอนจาก SWNTs ดังรูปที่ 2.34 A ซึ่งแสดงให้เห็นองค์ประกอบของ SWNTs บนฐานปลายแหลม โครงสร้างของ SWNTs ส่วนใหญ่จะแตกหักง่าย เพราะพันกันอยู่เป็นกลุ่มคล้ายเชือก และมีความซับซ้อนในการควบคุมโครงสร้างขนาดเล็ก การปลดปล่อยอิเล็กตรอนจะเกิดขึ้นเมื่อกระแสมากกว่า 100 μA ความหนาแน่นกระแสสูงสุดประมาณ 10^7 A/cm^2 อุปสรรคสำคัญของการนำ SWNTs ไปสร้างอุปกรณ์การปลดปล่อยอิเล็กตรอนคือ การเกิดความเสียหายทางกายภาพ เช่น การแตกหัก ซึ่งจะสามารนำไปสู่การสูญเสียการปลดปล่อยอิเล็กตรอนได้

ท่อนาโนมีโครงสร้างแข็งแรง การสร้างเป็นอุปกรณ์การปลดปล่อยอิเล็กตรอนที่ง่าย สะดวก มีลักษณะการปลดปล่อยอิเล็กตรอนที่ดี มีพลังงานสูงเหมาะสำหรับการนำไปใช้ ท่อนาโนมีลักษณะดังรูปที่ 2.34 B และ C ส่วนในรูปที่ 2.34 D เป็นการใช้นาโนเทคนิคที่สูงในการควบคุมระยะห่างระหว่างท่อซึ่งตั้งตรง เป็นกระบวนการที่ซับซ้อน

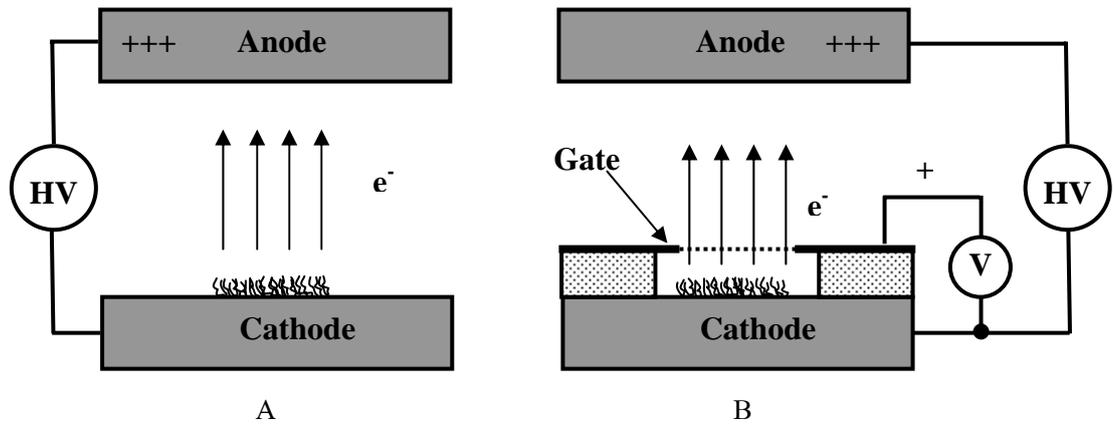


รูป 2.34 โครงสร้างการปลดปล่อยอิเล็กตรอนของ CNTs⁴²

- (A) SWNTs (B) ท่อนาโนที่โตไม่มีรูปร่างที่แน่นอน
(C) ท่อนาโนที่โตในแนวตั้ง (D) ท่อนาโนที่โตเป็นแถวมีความเป็นระเบียบสูง

(4.3) รูปร่างของชุดอุปกรณ์การปลดปล่อยอิเล็กตรอน⁴² แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ความต่างศักย์สูง รูปที่ 2.35 (A) แสดงโครงสร้างของไดโอดอย่างง่าย ซึ่งใช้ความต่างศักย์สูงระหว่างขั้วบวกและขั้วลบ แล้วให้สนามไฟฟ้าออกมา ระยะทางระหว่างขั้วไฟฟ้าจัดให้มีขนาดที่เหมาะสมสอดคล้องกับโครงสร้างของไดโอด โครงสร้างไดโอดแบบนี้เป็นโครงสร้างที่เหมาะสมสำหรับการวิจัย เพราะสร้างได้ง่ายและสะดวก การปลดปล่อยกระแสออกมาจะถูกควบคุมโดยการใส่ความต่างศักย์ที่มีค่าสูงมากพอ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงที่ขั้วบวก ระยะห่างของช่องว่าง และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีความต่างศักย์สูง มีผลต่อการปลดปล่อยอิเล็กตรอน

การปลดปล่อยอิเล็กตรอนในไดโอด ซึ่งควบคุมการเกิดสนามไฟฟ้าที่ผิว ใช้การเร่งความต่างศักย์ไฟฟ้า รูปที่ 2.35 (B) แสดงให้เห็นองค์ประกอบของไดโอด ซึ่งกระแสถูกควบคุมโดยความต่างศักย์ไฟฟ้าของเกต ซึ่งเกิดขึ้นจากการเร่งให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้า



รูป 2.35 โครงสร้างของอุปกรณ์การปลดปล่อยอิเล็กตรอน⁴²

(A) โครงสร้างของไดโอด (B) โครงสร้างของไตรโอด