บทที่ 2
ทฤษฎี

คาร์บอนเป็นธาตุที่มีความสำคัญเนื่องจากเป็นส่วนประกอบของสิ่งมีชีวิตทุกชนิดบนโลก แล้วยังเป็นปัจจัยหลักในการดำรงชีวิตของมนุษย์ เพราะคาร์บอนก็เป็นแหล่งพลังงานให้กับมนุษย์ด้วยจึงสามารถมีชีวิตอยู่ได้

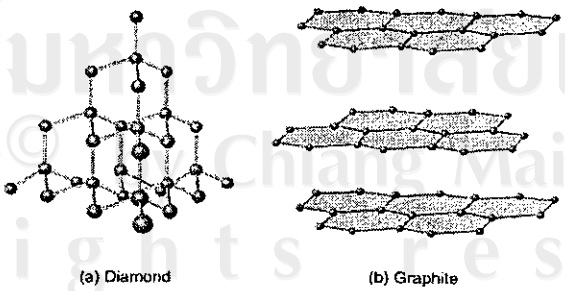
นอกจากนี้คาร์บอนยังเป็นที่รู้จักในแง่การนำมาประยุกต์ใช้ในด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเนื่องจากคาร์บอนมีโครงสร้างหลายรูปแบบ ซึ่งแต่ละรูปแบบก็มีคุณสมบัติแตกต่างกันไป ดังนี้

2.1 รูปแบบโครงสร้างของคาร์บอน

คาร์บอนเป็นธาตุที่มีลักษณะพิเศษสามารถพบได้ในหลายรูปแบบโครงสร้าง (Allotropic Forms) [1] และแบ่งออกเป็น 4 ชนิดหลัก ๆ คือ [1]

1. แบบมีโครงสร้างแข็งแรงทั้ง 3 มิติ โดยที่อะตอมของคาร์บอนทั้งหมดจะเกาะยึดด้วยพันธะโควาเลนท์ (Covalent Bond) อย่างเดียวกันกับที่พบได้ในรูปแบบของอัญมณีราคาแพง คือ เพชรที่มีความสวยงาม และแข็งแรงที่สุดในบรรดาวัสดุทั้งหลาย

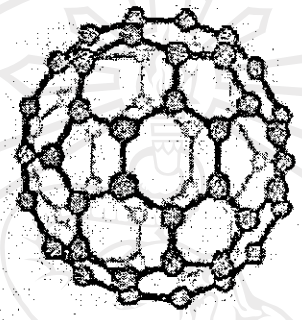
2. แบบมีโครงสร้างเป็นชั้น ๆ หรือเป็นแผ่น 2 มิติที่วางซ้อนทับ และยึดระหว่างชั้นเข้าด้วยกันด้วยแรงที่ต่ำกว่า คือ แรงวัลเดอร์วาลส์ (Van Der Waals Force) ซึ่งพบว่าเป็นโครงสร้างของแกรไฟต์ อย่างถ่านไม้ที่รู้จักกัน



รูป 2.1 โครงสร้างของเพชร (a) และ แกรไฟต์ (b)[1]

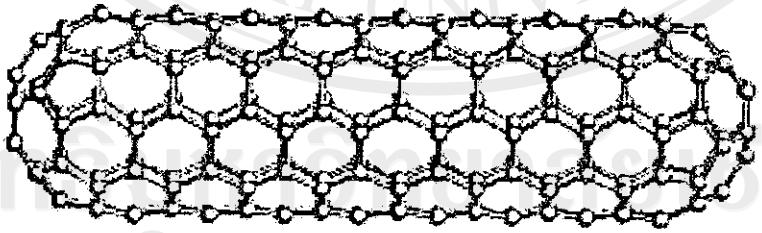
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

3. แบบมีโครงสร้างเป็นก้อนเล็ก จนอาจถือได้ว่ามันเป็นจุดที่ไม่มีมิติ หรือศูนย์มิติ เรียกว่า ฟลูเลอรีนส์ (Fullerenes) ซึ่งส่วนใหญ่ที่พบเป็นคาร์บอนหกสิบ (C_{60}) ที่แต่ละโมเลกุลจะประกอบไปด้วยอะตอมของคาร์บอนจำนวนทั้ง 60 อะตอม มาจับกันด้วยพันธะโควาเลนท์แล้วได้รูปทรงเป็นแบบก้อนทรงกลมคล้าย ๆ ลูกตะกร้อ หรือลูกบอลขนาดจิ๋ว



รูป 2.2 โครงสร้างคาร์บอน หกสิบ (C_{60})[1]

4. แบบโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นแผ่นม้วนตัวเป็นท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยมาก จนทำให้ดูเหมือนเป็นเส้นยาวในแนวหนึ่งมิติ และเรียกว่า ท่อนาโนคาร์บอน ซึ่งเป็นโครงสร้างของคาร์บอนแบบใหม่ที่เพิ่งค้นพบ



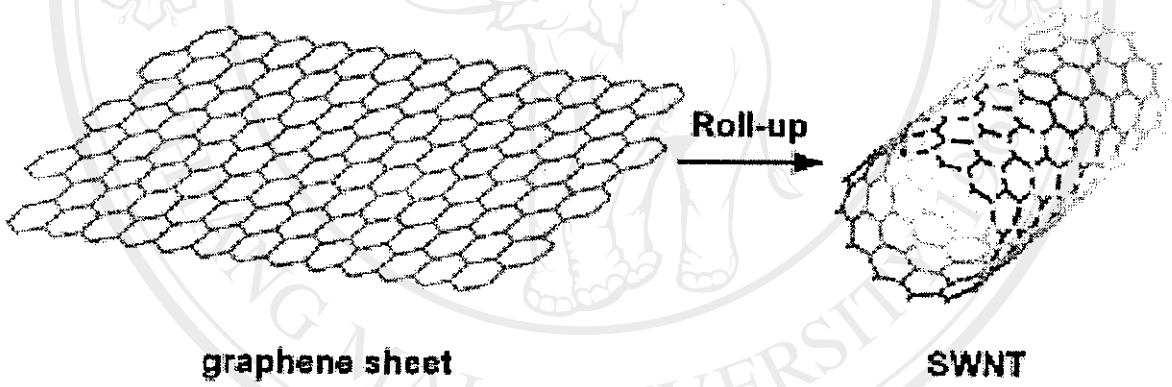
รูป 2.3 โครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอน[1]

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2.2 ท่อนาโนคาร์บอน (carbon nanotubes)

ท่อนาโนเป็นวัสดุนาโนชนิดหนึ่งที่ประกอบขึ้นเป็นโครงสร้างจากอะตอมของคาร์บอน โดยโครงสร้างแต่ละหน่วยย่อยของผนังท่อประกอบขึ้นจากวงแหวนรูปหกเหลี่ยม คือจะมีอะตอมของคาร์บอนในแต่ละวงแหวนจำนวนหกอะตอม

ท่อนาโนคาร์บอนค้นพบครั้งแรก เมื่อปี พ.ศ.2534 โดยนักวิทยาศาสตร์ชาวญี่ปุ่น ชื่อ สุมิโอะ อีจิมะ (Sumio Iijima) [2,3] ภายหลังการค้นพบฟลูเลอร์รีน (Fullerene) 6 ปี มีลักษณะเหมือนกับแผ่นแกรไฟต์ที่ม้วนเป็นท่อแสดงดังรูปที่ 2.4 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2 นาโนเมตรจนถึงหลายสิบนาโนเมตร 'โดยที่อะตอมคาร์บอนเหล่านี้เชื่อมต่อกันแบบ SP^2 [14]



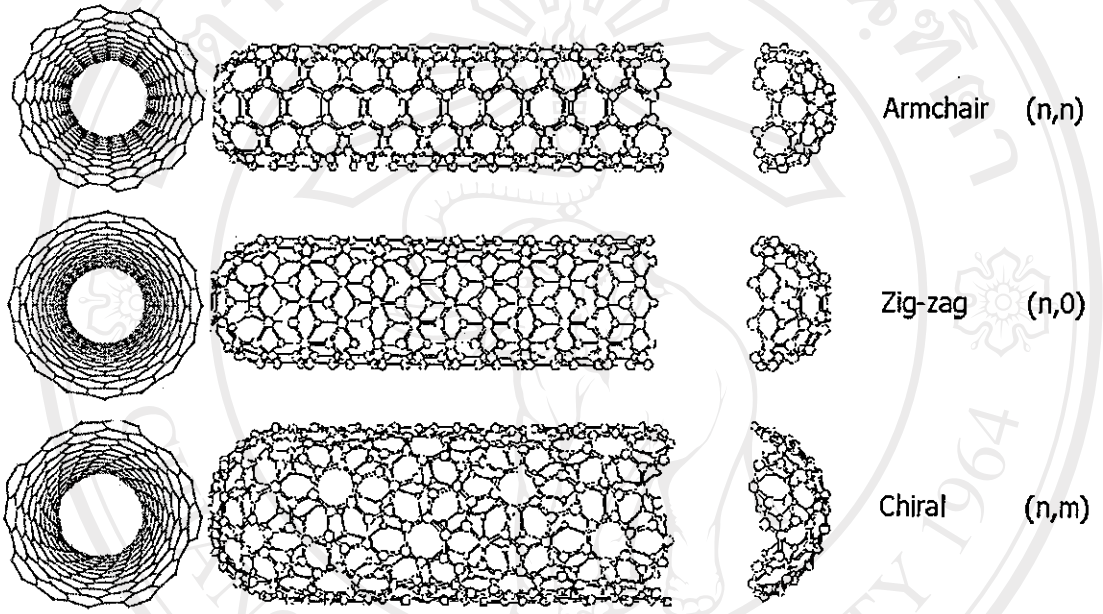
รูป 2.4 ลักษณะพื้นฐานของท่อนาโนชนิดคาร์บอน[15]

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2.2.1 โครงสร้างท่อนาโนชนิดคาร์บอน (Carbon Nanotubes)

ท่อนาโนชนิดคาร์บอนแบ่งออกเป็นสองชนิดหลัก ๆ คือ

1) ท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียว (Single-Walled Nanotubes, SWNTs) มี 3รูปแบบ ดังแสดงในรูป 2.5



รูปที่ 2.5 รูปแบบโครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอน [15]

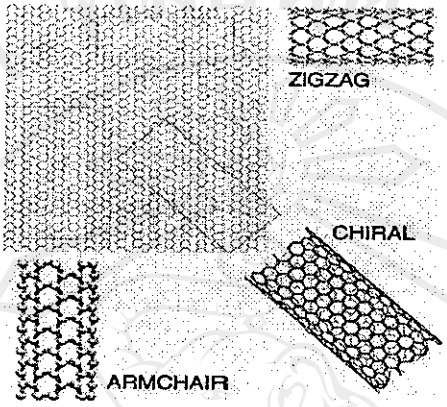
โดยดัชนี(n,m) ซึ่งบ่งบอกรูปแบบการจัดเรียงตัวของอะตอมบนท่อนาโนคาร์บอน โดยเวกเตอร์ลัพธ์ของผลรวมเวกเตอร์ n + m คือเส้นรอบวงของท่อนาโนคาร์บอน ดังแสดงในรูปที่ 2.7

ถ้า m = n จะได้ ท่อนาโนคาร์บอนที่ลักษณะของแบบจำลองเกิดจากการม้วนให้ตำแหน่ง (0,0) ไปพบกับตำแหน่ง (n,n) มีขนาดของมุม θ ท่ากับ 30 องศา ที่มีการจัดเรียบอะตอมแบบ Armchair (n,n)

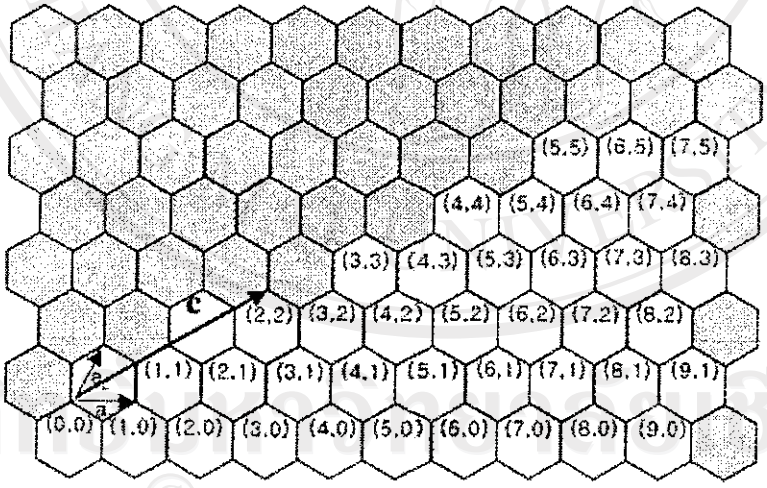
ถ้า m = 0 จะได้ ท่อนาโนคาร์บอนที่ลักษณะของแบบจำลองเกิดจากการม้วนให้ตำแหน่ง (0,0) ไปพบกับตำแหน่ง (n,0) มีขนาดของมุม θ เท่ากับ 0 องศา ที่มีการจัดเรียบอะตอมแบบ Zig-zag

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ถ้า $m \neq n$ จะได้ท่อนาโนคาร์บอนที่ลักษณะของแบบจำลองเกิดจากการม้วนให้ตำแหน่ง (0,0) ไปพบกับตำแหน่ง (n,m) มีขนาดของมุมθ อยู่ระหว่าง 0 – 30 องศา ที่มีการจัดเรียบอะตอมแบบ chiral (n,m)



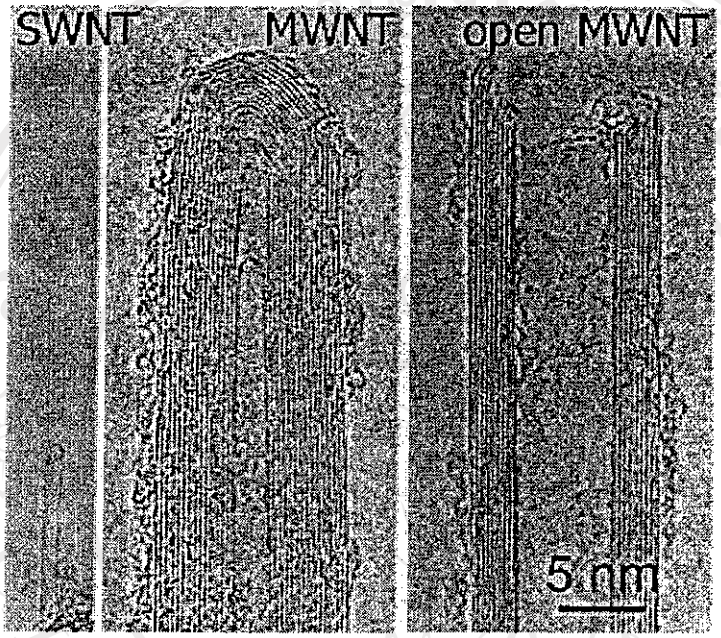
รูป 2.6 แสดงท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียว ในรูปแบบต่างๆ



รูป 2.7 แสดงดัชนีบ่งบอกรูปแบบการจัดเรียงตัวของอะตอมบนท่อนาโนคาร์บอน [16]

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2) ท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น (Multiple-Walled Nanotubes, MWNTs) คือท่อนาโนคาร์บอนที่มีผนังซ้อนกันอยู่หลายชั้น ดังแสดงในรูป 2.8



(a) (b) (c)

รูป 2.8 แสดงตัวอย่างภาพท่อนาโนคาร์บอนที่ถ่ายโดยกล้องจุลทรรศน์ชนิด Transmission Electron Microsopy (TEM) [15]

รูป 2.8 (a)แสดงตัวอย่างภาพของท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียว (Single-Walled Nanotubes, SWNTs)

รูป 2.8 (b)แสดงตัวอย่างภาพของท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น (Multiple-Walled Nanotubes, MWNTs)แบบท่อปลายปิด

รูป 2.8 (c)แสดงตัวอย่างภาพของท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น (Multiple -Walled Nanotubes , MWNTs) แบบท่อปลายเปิด

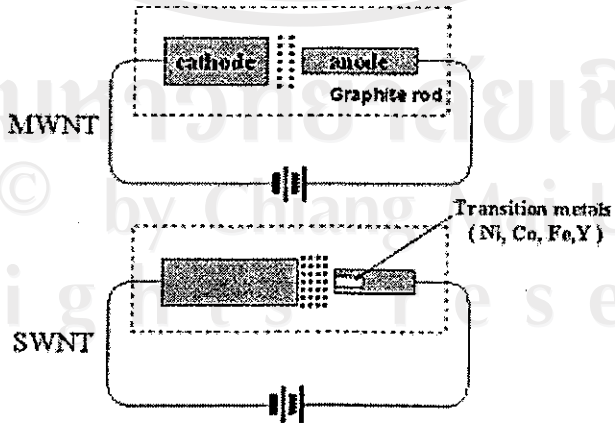
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

2.3 การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน

เนื่องจากการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนมีหลายเทคนิค ซึ่งแต่ละวิธีก็มีข้อดีและข้อด้อยแตกต่างกันไป ทั้งในด้านขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง ความยาว ปริมาณและความบริสุทธิ์ของท่อนาโนคาร์บอนที่ได้ โดยสามารถแบ่งวิธีการสังเคราะห์หลักๆได้ดังนี้คือ

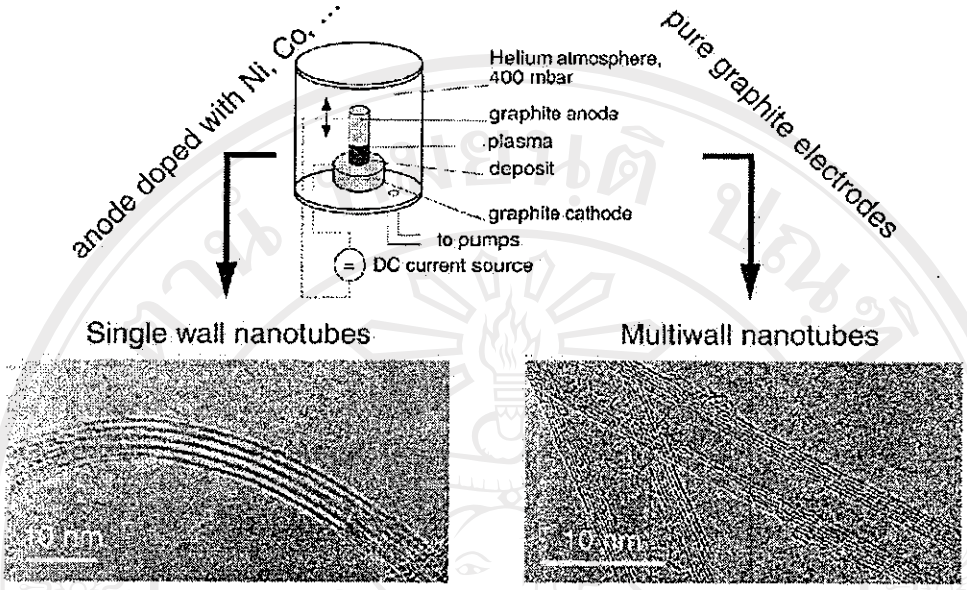
1. วิธีอาร์คดิสชาร์จ (Arc Discharge) [2,3]
2. วิธีระเหยด้วยแสงเลเซอร์ (Laser Varporisation) [5]
3. วิธีอิเล็กโตรไลซิส (Electrolysis) [11]
4. วิธีการตกสะสมไอเคมี (Chamical vapour deposition, CVD) [4,10]

2.3.1 วิธีอาร์คดิสชาร์จ (Arc Discharge) เป็นการสังเคราะห์โดยใช้การจ่ายกระแสตรงประมาณ 50-120 แอมแปร์ที่ความต่างศักย์ประมาณ 18-40 โวลต์ ตกคร่อมระหว่างแท่งแกรไฟต์สองแท่งที่ว่างใกล้ๆกันในระห่างระหว่างแท่งประมาณ 1 มิลลิเมตร ภายใต้บรรยากาศก๊าซเฉื่อย เช่น ก๊าซฮีเลียม อาร์กอนที่ความดันต่ำระหว่าง 50-700 มิลิเมตรปรอท จะทำให้มีความร้อนสูงระหว่างขั้วอิเล็กโทรดเกิดเป็นสถานะพลาสมาขึ้น ส่งผลให้เกิด ท่อนาโนคาร์บอนขึ้นตรงบริเวณกลางขั้วของแท่งแกรไฟต์ที่ต่อกับขั้วลบ ซึ่งการควบคุมขนาดและความยาวของท่อนาโนคาร์บอนนั้น อาจทำได้โดยการควบคุมอุณหภูมิและความสม่ำเสมอของการเกิดสถานะพลาสมา และสามารถกำหนดชนิดของท่อนาโนคาร์บอนได้โดยจะผสมโลหะบางชนิด เช่น เหล็ก นิเกิล และ โคบอลต์เป็น ตัวคะตะลิสติก (metal catalyst) เป็นตัวช่วยให้เกิดการสร้างท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียว ดังรูป 2.9



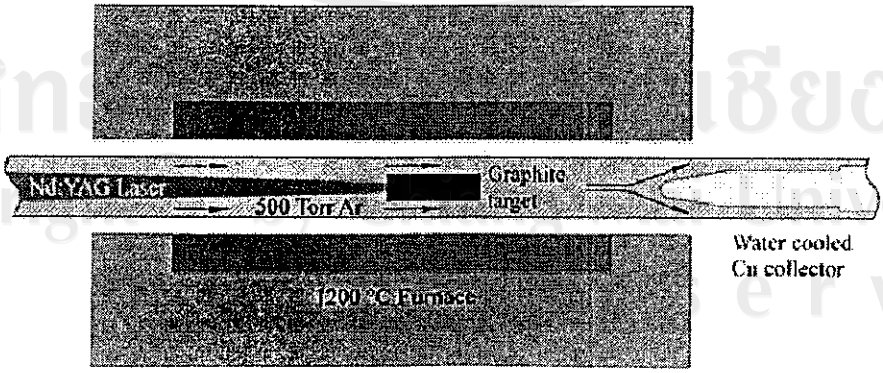
รูป 2.9 แสดงแผนภาพ อย่างง่าย ในกระบวนการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน
โดยวิธี อาร์กดีสชาร์จ [15]

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูป 2.10 แสดงภาพของชนิดของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดจากเติมตัวเป็นตัวคะตะลิสติก (metal catalyst) และไม่เติม [15]

2.3.2 วิธีระเหยด้วยแสงเลเซอร์ (Laser Vaporization) [16,17] วิธีนี้จะใช้แสงเลเซอร์ที่มีความเข้มแสงสูง ยิงไปยังเป้า ซึ่งเป็นแกรไฟต์ ภายใต้สภาวะบรรยากาศก๊าซเฉื่อย เช่น ก๊าซฮีเลียม อาร์กอน เป็นต้น ความดันต่ำประมาณ 500 มิลิเมตรปรอท ที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส โดยเทคนิคนี้คล้ายกับวิธีอาร์กดีสชาร์จ จะผสมโลหะบางชนิด เช่น เหล็ก นิเกิล และ โคบอลต์เป็นตัวคะตะลิสติก (metal catalyst) เป็นตัวช่วยให้เกิดท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียว ดังรูป 2.11



รูป 2.11 แสดง วิธีระเหยด้วยแสงเลเซอร์ (Laser Vaporization)[16]

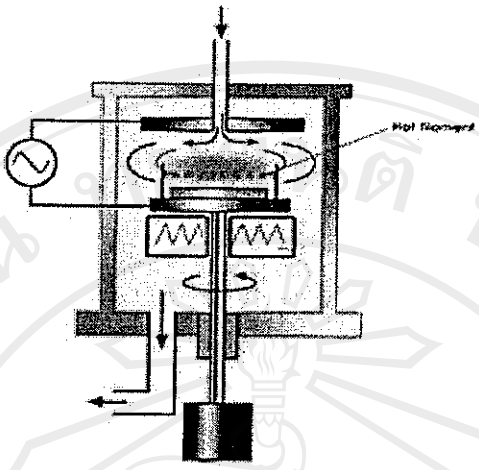
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2.3.3. วิธีอิเล็กโตรไลซิส (Electrolysis)[11] วิธีนี้จะใช้การผ่านกระแสไฟฟ้าระหว่างขั้วแกรไฟต์ขณะจุ่มอยู่ในของเหลวที่เรียกว่า อิเล็กโทนโทรไลท์ เช่น ลิเทียมคลอไรด์ (LiCl) ที่อุณหภูมิ 600 ^{0}C โดยการผสมหรือเจือสารอิเล็กโทรไลท์ด้วยธาตุหรือสารประกอบอื่น ๆ เช่น ผสมด้วยเกลือที่มีบิสมัส และปรอทจะสามารถควบคุมขนาดและรูปร่างของท่อนาโนคาร์บอนได้

2.3.4 วิธีการตกสะสมไอเคมี (Chemical vapor deposition, CVD) เป็นวิธีที่ให้ความร้อนไปยังก๊าซไฮโดรคาร์บอนที่ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน เพื่อสร้างท่อนาโนคาร์บอน โดยก๊าซที่นิยมใช้ คือ มีเทน (CH_4) อะเซทิลีน (C_2H_2) และคาร์บอนมอนออกไซด์ (CO) ซึ่งเทคนิคนี้ต้องอาศัยโลหะตัวคะตะลิสต์ (metal catalyst) เช่น เหล็ก นิเกิล และ โคบอลต์ เป็นต้น เป็นตัวช่วยให้เกิดการสร้างท่อนาโนคาร์บอน โดยอุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ประมาณ 650-900 องศาเซลเซียส ซึ่งเทคนิคนี้สามารถควบคุมขนาดและความยาวของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดขึ้นได้ โดยการควบคุมขนาดของตัวคะตะลิสต์ และอัตราการไหลของก๊าซ ตามลำดับ ทั้งนี้เทคนิคก็ต้องทำภายใต้บรรยากาศก๊าซเฉื่อย เช่น ก๊าซฮีเลียม อาร์กอน เป็นต้น ซึ่งเทคนิคนี้สามารถผลิตท่อนาโนคาร์บอนได้ในปริมาณมาก และมีความบริสุทธิ์สูง ซึ่งวิธีนี้มีหลายเทคนิคด้วยกันคือ

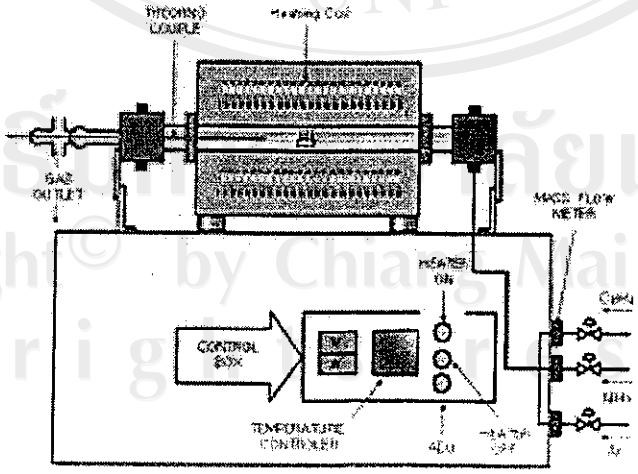
1) เทคนิคการตกสะสมไอเคมีด้วยพลาสมา[18,19](Plasma enhanced chemical vapor deposition) โดยให้ความต่างศักย์สูงระหว่างขั้วอิเล็กโทรด เพื่อให้เกิดการก๊าซไฮโดรคาร์บอนเช่น อะเซทิลีน มีเทน เอทิลีน เป็นต้น แตกตัว และตกบนฐานรองเช่น ซิลิกอน ซิลิกอนไดออกไซด์และแก้ว โดยมีโลหะตัวคะตะลิสต์ (metal catalyst) เช่น เหล็ก นิเกิล และ โคบอลต์ เป็นต้น เคลือบอยู่บนผิว ซึ่งเป็นตัวช่วยให้เกิดการจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนเป็น ท่อนาโนคาร์บอน ดังรูป 2.12

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูป 2.12 เทคนิคการตกสะสมไอเคมีด้วยพลาสมา[18]
(Plasma enhanced chemical vapor deposition)

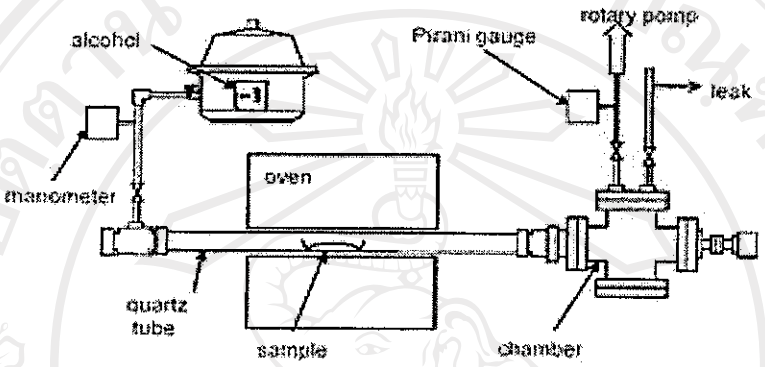
2) เทคนิคการตกสะสมไอเคมีด้วยความร้อน[20] (Thermal chemical vapor deposition) โดยเทคนิคนี้จะใช้ เหล็ก นิเกิล โคบอลต์ หรือ โลหะผสมของทั้งสามชนิดนี้ เป็นตัวคะตะลิสต์ ให้ตกเคลือบบนฐานรอง หลังจากนำฐานรองไปทำการกัดด้วยกรดไฮโดรคลอริก หรือ ใช้ก๊าซแอมโมเนีย เพื่อให้เกิดก้อนอะตอมของโลหะที่เรียกว่า "การเกิดใหม่"(nucleation) แล้วนำไปปลูกท่อนาโนคาร์บอน โดยนำไปใส่ในห้องเผาซึ่งจะใช้อุณหภูมิประมาณ 750-1050 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศของไฮโดรคาร์บอนและอาร์กอน ดังรูป 2.13



รูป 2.13 เทคนิคการตกสะสมไอเคมีด้วยความร้อน [20] (Thermal chemical vapor deposition)

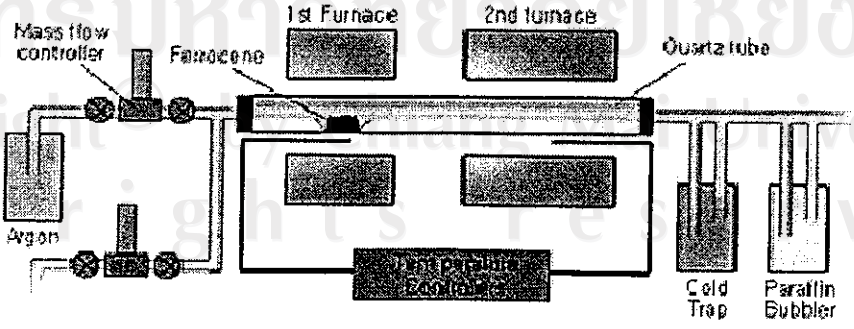
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

3) เทคนิคการตกสะสมไอเคมีโดยใช้แอลกอฮอล์เป็นตัวเร่งปฏิกริยา (Alcohol catalytic chemical vapor deposition,ACVD) ซึ่งจะไปทำปฏิกิริยากับโลหะตัวคะตะลิสต์เช่น เหล็กและโคบอลต์ ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เพื่อให้เกิดกระบวนการตกสะสมไอเคมีได้รวดเร็วยิ่งขึ้น ดังรูป 2.14



รูป 2.14 เทคนิคการตกสะสมไอเคมีโดยใช้แอลกอฮอล์เป็นตัวเร่งปฏิกริยา[21]
(Alcohol catalytic chemical vapor deposition,ACVD)

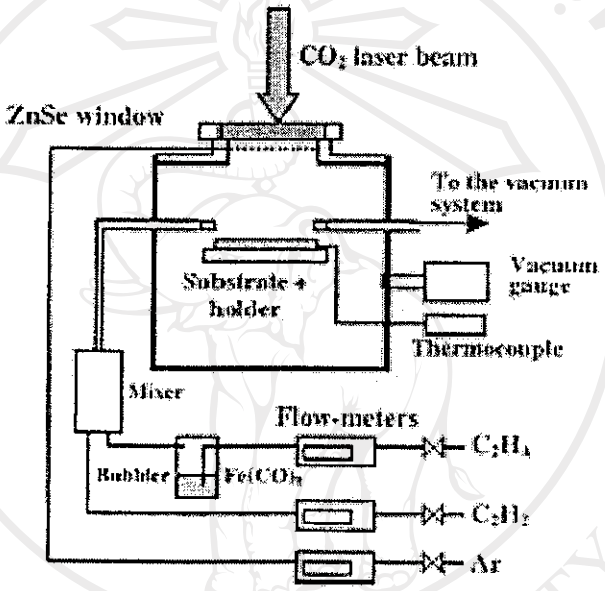
4) เทคนิคการแบ่งเฟสในการปลูก (Vapor phase growth) เป็นการสังเคราะห์โดยการแบ่งพื้นที่ในห้องทดลองเป็นสองส่วน ซึ่งในพื้นส่วนหน้าซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่าจะวางภาชนะใส่ผงโลหะตัวคะตะลิสต์วางไว้ และส่วนที่สองจะมีอุณหภูมิสูงกว่า เมื่อปล่อยก๊าซไฮโดรคาร์บอนเข้ามาก็พาไอของตัวคะตะลิสต์ที่ระเหยออกมาแล้วไปรวมตัวกันส่วนที่สอง และเกิดการจัดเรียงตัวเป็นท่อนาโนคาร์บอนขึ้น ซึ่งผลที่ได้ทั้งชนิดผนังชั้นเดียว 2-4 นาโนเมตรและชนิดหลายชั้น 70-100 นาโนเมตร ดังรูป 2.15



รูป 2.15 เทคนิคการแบ่งเฟสในการปลูก[22](Vapor phase growth)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

5) เทคนิคการตกสะสมไอเคมีโดยใช้แสงเลเซอร์เป็นแหล่งความร้อน (Laser-assisted thermal chemical vapor deposition ,LCVD) เป็นการใช้เลเซอร์ เป็นแหล่งให้ความความร้อนและใช้ตัวคะตะลิสต์ จากสารละลาย เหล็ก เพนตะคาร์บอนิว $Fe(CO)_5$ โดย ไอระเหยของเหล็กจะผสมกับก๊าซไฮโดรคาร์บอนในห้องผสม แล้วถูกทำให้ร้อนด้วยแสงเลเซอร์ แล้วก่อตัวเป็นท่อนาโนคาร์บอน ดังรูป 2.16



รูป 2.16 เทคนิคการตกสะสมไอเคมีโดยใช้แสงเลเซอร์เป็นแหล่งความร้อน[23]
(Laser-assisted thermal chemical vapor deposition ,LCVD)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

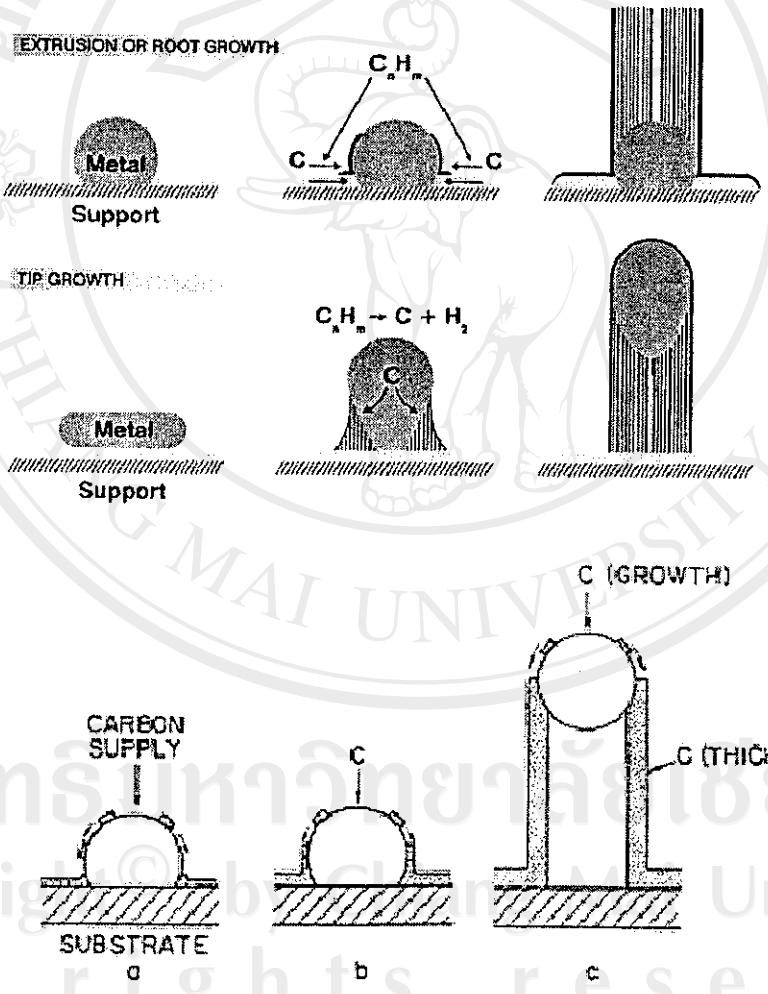
2.4. ทฤษฎีการปลูกท่อนาโนคาร์บอน (Growth mechanism)

การเกิดท่อนาโนคาร์บอนนั้นมีหลายทฤษฎีที่ใช้อธิบายการสร้างตัวของท่อนาโนคาร์บอน แต่นักวิทยาศาสตร์ยังไม่สรุปอย่างชัดเจนถึงรายละเอียดที่แน่นอน แต่มีทฤษฎีที่เป็นที่ยอมรับกันอย่างแผ่หลาย คือ Vapor-Liquid-Solid (VLS) Methode[40,41] ซึ่งเกิดจากการแตกตัวธาตุคาร์บอนของวัตถุดิบเริ่มต้น จากนั้นจะเกิดการทำปฏิกริยาระหว่างโลหะกับอะตอมของคาร์บอนเกิดการรวมตัว

รวมตัวกันและควบแน่นให้อะตอมคาร์บอนมีรูปร่างอย่างไรขึ้นอยู่กับลักษณะการเรียงตัวของธาตุคาร์บอน ดังรูป 2.17

ถ้าคาร์บอนทำ ปฏิกริยากับโลหะโดยเข้ามาเกาะที่อะตอมของโลหะแล้วเรียงตัวกันขึ้นไปก็จะทำให้เกิดเส้นใยหรือท่อที่มีเฉพาะคาร์บอน และ

ถ้าคาร์บอนทำ ปฏิกริยากับโลหะโดยเข้ามาดันอะตอมของโลหะขึ้นไปและเรียงต่อลงมาด้านล่างก็จะพบว่าที่ปลายจะพบอะตอมของโลหะ



รูป 2.17 แสดงลักษณะการเกิดท่อนาโนคาร์บอน[24] (Growth mechanism)

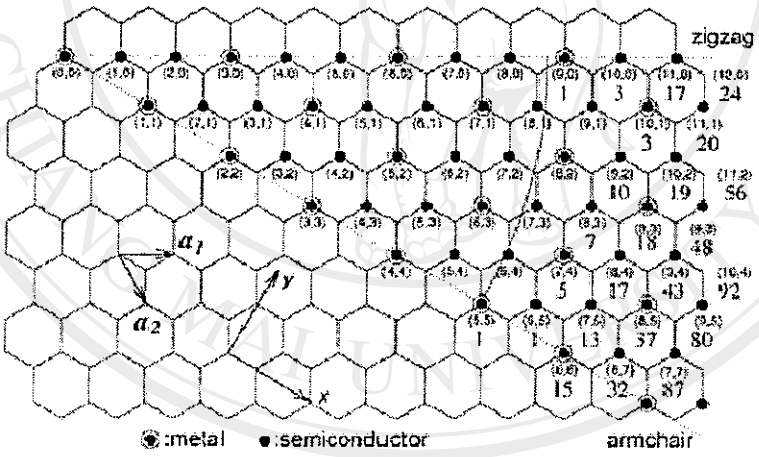
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2.5 คุณสมบัติและการประยุกต์ใช้

2.5.1. สมบัติเชิงอิเล็กทรอนิกส์(Electronic)
สามารถแสดงสมบัติได้ทั้งตัวนำไฟฟ้าและกึ่งตัวนำไฟฟ้า[25] รูปแสดงลักษณะการจัดเรียงอะตอมของคาร์บอนของท่อนาโนคาร์บอนทำให้สมบัติต่างกันไป

1.1 ที่ตำแหน่ง (n-m)/3 : ได้เป็นจำนวนเต็ม จะแสดงสมบัติตัวนำไฟฟ้า (metal) ส่วนใหญ่เป็นท่อนาโนคาร์บอนแบบ amchair

1.2 ที่ตำแหน่ง (n-m)/3 : ได้ไม่เป็นจำนวนเต็มจะแสดงสมบัติกึ่งตัวนำไฟฟ้า (semiconducter) ส่วนใหญ่เป็นท่อนาโนคาร์บอนแบบ chiral และ 2ใน3 ส่วนของแบบ zigzag

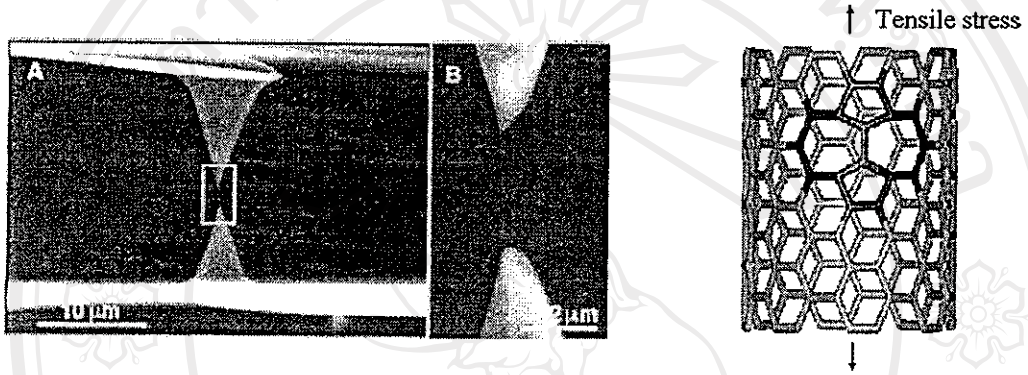


รูป 2.18 แสดงลักษณะการเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนทำให้สมบัติต่างกันไป[25]

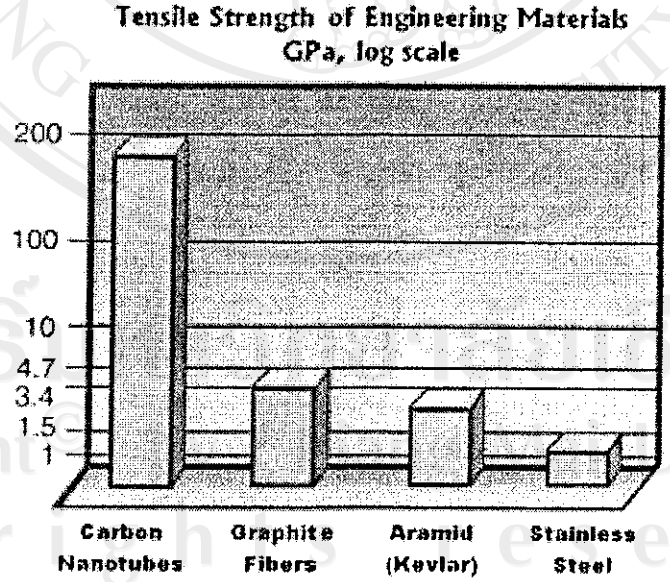
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2.5.2. สมบัติเชิงกล (mechanical)

มีค่าโมดูลัสของยังเกินกว่า 1 Tpa สำหรับท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียว และมีค่าประมาณ 1.25 Tpa สำหรับท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น ค่าความแข็งแกว่งต่อการดึงสูงสุดเท่ากับ 200 Gpa[26,27] ซึ่งมากกว่าเหล็กประมาณ ร้อยเท่า ขณะที่น้ำหนักเบากว่าประมาณ 6 เท่า[1]



รูป 2.19 แสดงการใช้ใช้กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม[34] (Atomic Force Microscopy , AFM) หาค่าโมดูลัสของยัง

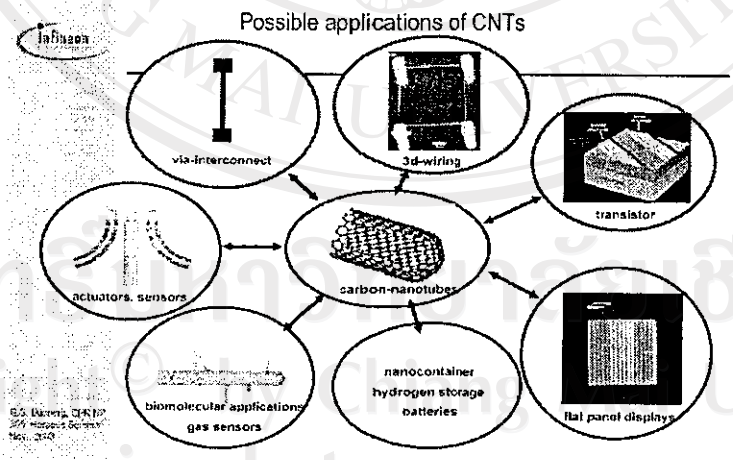


รูป 2.20 แสดงการเปรียบเทียบค่า Tensile Strength ของท่อนาโนคาร์บอน กับวัสดุต่างๆ สเกลของกราฟเป็นสเกล log[33]

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

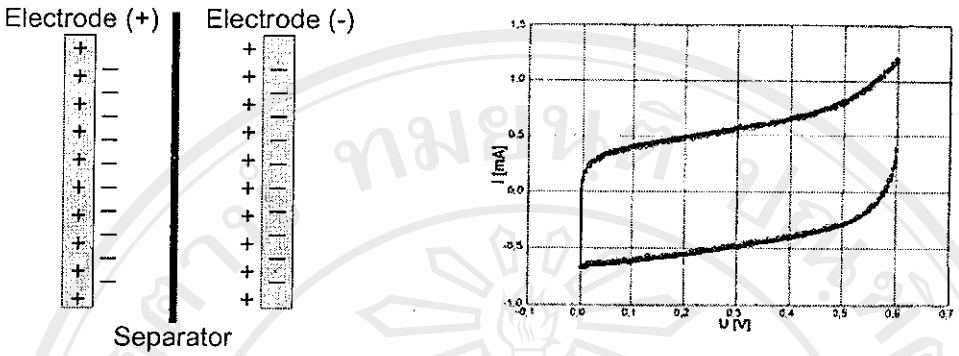
2.6 การประยุกต์ใช้ท่อนาโนคาร์บอน (Applications)[34]

- เป็นขั้วไฟฟ้าทางเคมีและแหล่งจ่ายพลังงานจากแตกตัวให้ก๊าซไฮโดรเจน (Electrochemical and gas phase hydrogen storage)
- เป็นวัสดุผสมท่อนาโนคาร์บอน (Carbon Nanotube composites)
- ทำพลาสติกชนิดนำไฟฟ้า(conductive Plastics for Electrostatic Painting and Static Dissipation)
- เป็นอุปกรณ์ป้องกันสนามแม่เหล็ก(Electromagnetic Inference Shielding ,EMI)
- ตัวเก็บประจุยิ่งยวด (Supercapacitor)
- เป็นแบตเตอรี่ชนิดประจุของลิเทียม(Lithium ion batteries)
- เป็นอุปกรณ์ใช้ในการปลดปล่อยอิเล็กตรอน(Field Emission Display)
- เป็นเยื่อเลือกผ่านแลกเปลี่ยนโปรตอน เพื่อเป็นแหล่งพลังงาน(Proton Exchange Membrane (PEM) Fuel Cells)
- อุปกรณ์อิเล็กโทรนิกส์ขนาดเล็กระดับนาโนเมตร(Nanoelectronics)
- หัววัดของเครื่องวัดแรงระหว่างอะตอม (AFM Tips)
- เป็นอุปกรณ์เซนเซอร์(Nanotube Actuators,sensors)

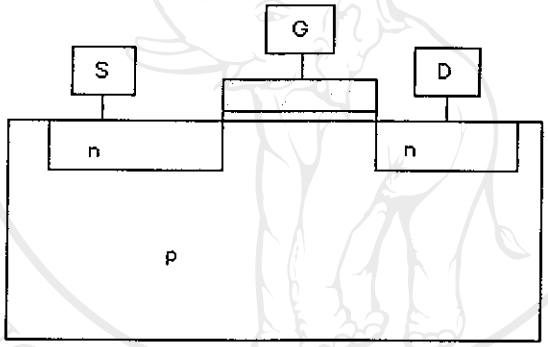


รูป 2.21 แสดงการนำท่อนาโนคาร์บอนไปประยุกต์ใช้[42]

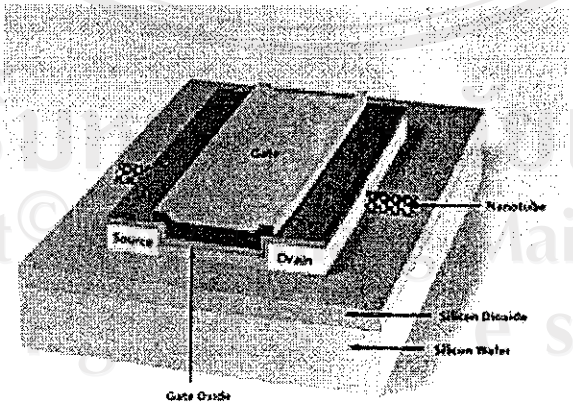
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูป 2.22 แสดงการนำท่อนาโนคาร์บอนไปประยุกต์ใช้เป็นตัวเก็บประจุ[34]



รูป 2.23 ไดอะแกรมแสดงการนำท่อนาโนคาร์บอนไปประยุกต์ใช้เป็น Transistor[34]



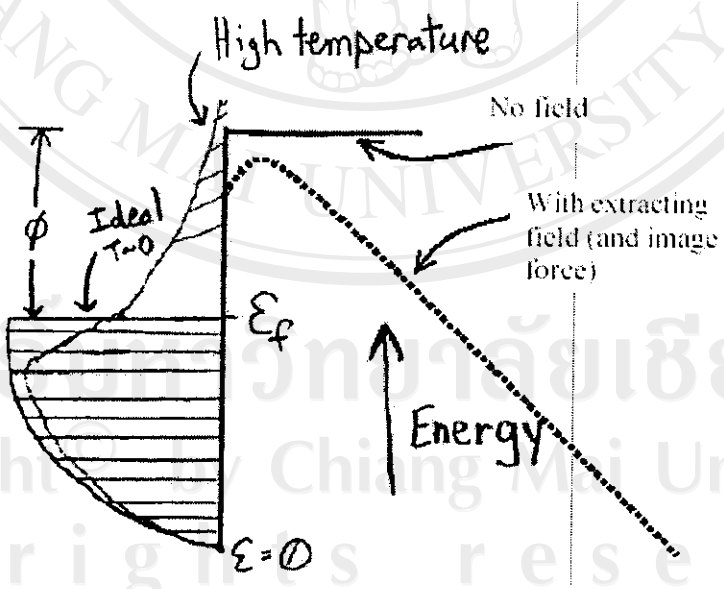
รูป 2.24 แสดงการนำท่อนาโนคาร์บอนไปประยุกต์ใช้เป็น Transistor[34]

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2.7 การปลดปล่อยอิเล็กตรอน แบบฟิลด์อิมิสชัน(Field Emission)

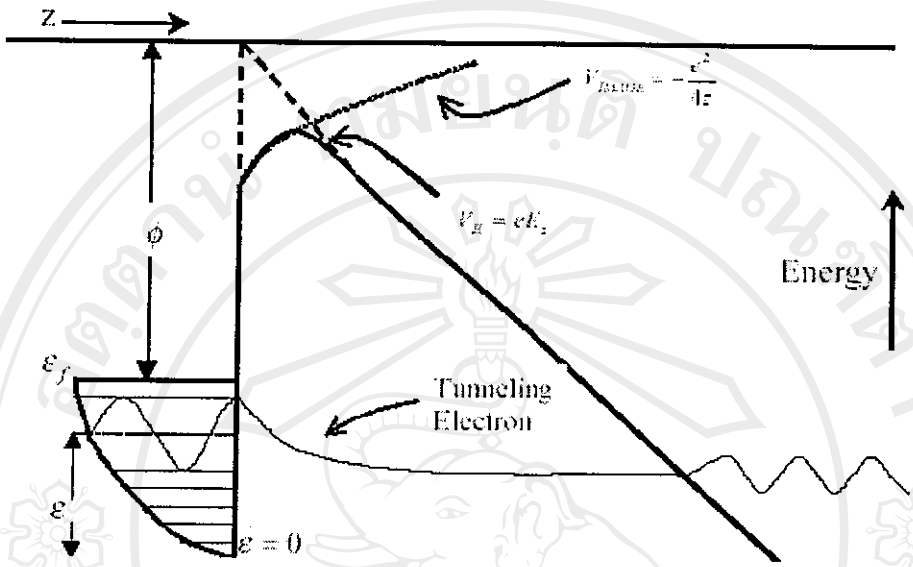
การทำให้อิเล็กตรอนหลุด(ปล่อย) ออกมาจากโลหะ ซึ่งมีหลักการพื้นฐานคือ ต้องป้อนพลังงานให้แก่อิเล็กตรอนที่อยู่ที่ผิวของโลหะมีได้หลายวิธี เช่นให้ความร้อนแก่โลหะมากๆ (Thermionic emission) หรือ ส่องแสงลงบนผิวโลหะ (Photoelectric emission)หรือการให้สนามไฟฟ้ากับโลหะ (Field emission) ปรากฏการณ์ที่ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาเหล่านี้เรียกว่าปรากฏการณ์อิเล็กตรอนอิมิสชัน (Electron Emission)

ซึ่งการปลดปล่อยอิเล็กตรอนแบบฟิลด์อิมิสชัน(Field Emission)เป็นการเพิ่มพลังงานแก่อิเล็กตรอนที่อยู่ที่ผิวโลหะ โดยการป้อนสนามไฟฟ้าเข้าสู่ผิวโลหะ เพื่อให้ความสูงของกำแพงพลังงานศักย์และขณะเดียวกัน ความหนาของกำแพงพลังงานศักย์ก็ลดลงด้วย จึงทำให้อิเล็กตรอนสามารถวิ่งทะลุผ่านกำแพงพลังงานศักย์ออกมาได้ ซึ่งเรียกวิธีการนี้ว่า tunneling ดังรูปที่ 2.26 และกระแสไฟฟ้าอันเนื่องจาก Field Emission จะมีค่าตามสมการฟาวเลอร์-นอร์ดเฮียม (Fowler-Nordheim)[43]

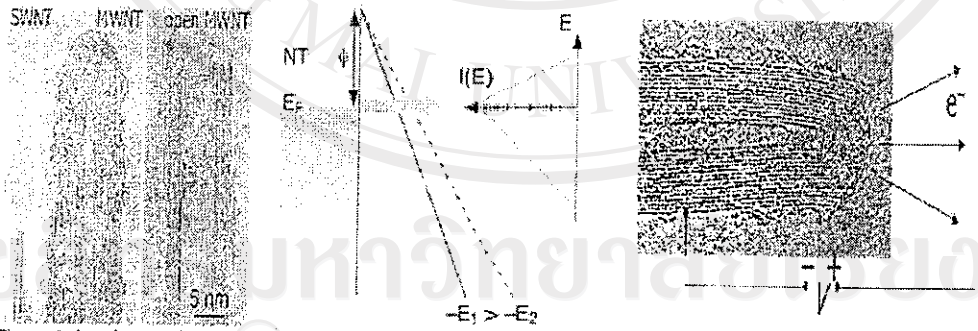


รูป 2.25 แผนภาพแสดงพลังงานเมื่อให้ความร้อนแก่โลหะเพื่อให้อิเล็กตรอนหลุดออกมา[43] (Thermionic emission)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูป 2.26 แผนภาพแสดงการปลดปล่อยอิเล็กตรอน แบบฟิลด์อิมิสชัน(Field Emission)[43]



Transmission electon microscopy (TEM) pictures of the ends of different nanotubes. Each black line correspond to one graphene sheet viewed edge-on.

Fig1: Standard field emission model from a metallic emitter, showing the potential barrier and the corresponding energy distribution (energy on the vertical axis, current on the horizontal logarithmic axis).

Fig2: Typical set-up for field emission: a potential difference is applied between a nanotube (or an assembly of nanotubes) and a counter electrode.

รูป 2.27 แสดงการปลดปล่อยอิเล็กตรอนของท่อนาโนคาร์บอนเมื่อให้สนามไฟฟ้าเข้าไป[46]

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2.7.1 ทฤษฎีฟาวเลอร์-นอร์ดเฮียม(Fowler-Nordheim)[43,44,45]

เป็นทฤษฎีที่ว่าด้วยการปลดปล่อยอิเล็กตรอนที่อุณหภูมิต่ำ โดยใช้สนามไฟฟ้าในการทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาตามสมการที่ 2.1

$$J = \frac{AE^2}{\phi t^2(y)} \exp\{-B\frac{\phi^{\frac{3}{2}}}{E} v(y)\} \qquad A/cm^2 \qquad 2.1$$

โดย J คือ ความหนาแน่นของกระแส มีหน่วยเป็น A/cm^2

E คือ สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผิว มีหน่วยเป็น V/cm

ϕ คือ กำแพงพลังงานศักย์(work function) มีหน่วยเป็น eV

เมื่อ $A = 1.54\times10^{-6} \quad \frac{A \cdot eV}{V^2}$ 2.2

$B = 6.87\times10^{7} \quad \frac{V}{cm \cdot eV^{\frac{3}{2}}}$ 2.3

$y = \{3.79\times10^{-4}\sqrt{\frac{cm}{V}} \cdot eV\} E^{1/2}/\phi$ 2.4

โดย A และ B คือ ค่าคงที่

y คือ ค่า Schottkyที่ทำให้ความสูงของกำแพงพลังงานศักย์"work function"ลดต่ำลง

และจาก สมการ 2.1 ฟังค์ชัน t(y) และ v(y) สามารถแทนได้ด้วยการประมาณค่าของ Spindt

โดย $t^2(y) = 1.1$ 2.5

และ $v(y) = 0.95 - y^2$ 2.6

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ค่าของ y , t(y) และ v(y) ถูกตรวจแก้โดยนอร์ดเฮียม (Nordheim)

โดย

$$J = I/\alpha \qquad 2.7$$

และ

$$E = \beta V/d \qquad 2.8$$

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 2.7 และ2.7 ลงในสมการที่2.1

จะได้

$$\frac{I}{\alpha} = \frac{A(\beta V/d)^2}{\phi t^2(y)} \exp\{-B\frac{\phi^{\frac{3}{2}}}{\beta V/d} V(d) \qquad 2.9$$

หรือ

$$I = aV^2 \exp(-\frac{b}{V}) \qquad 2.10$$

เมื่อ

$$a = \frac{\alpha A\beta^2}{1.1\phi d^2} \exp(\frac{B(1.44\times10^{-7})d}{\phi^{1/2}} \qquad 2.11$$

$$b = \frac{0.95B\phi^{3/2}}{\beta} \qquad 2.12$$

โดย A B ϕ และ d เป็นค่าปริมาณสเกลล่า

a ขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวของการปลดปล่อยอิเล็กตรอน

b ขึ้นอยู่กับลักษณะและขนาดของมุมปลายของโพรบหัววัด

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

และจากสมการที่ 2.10 สามารถแปลงให้อยู่ในรูปของสมการล๊อกธรรมชาติได้ คือ

$$In(\frac{I}{a \cdot V^2}) = -\frac{b}{V} \qquad 2.13$$

ซึ่งมีความสัมพันธ์มีลักษณะเป็นเส้นตรงระหว่าง ล๊อกธรรมชาติของ(I/V^2) และ 1/V

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved