

บทที่ 2

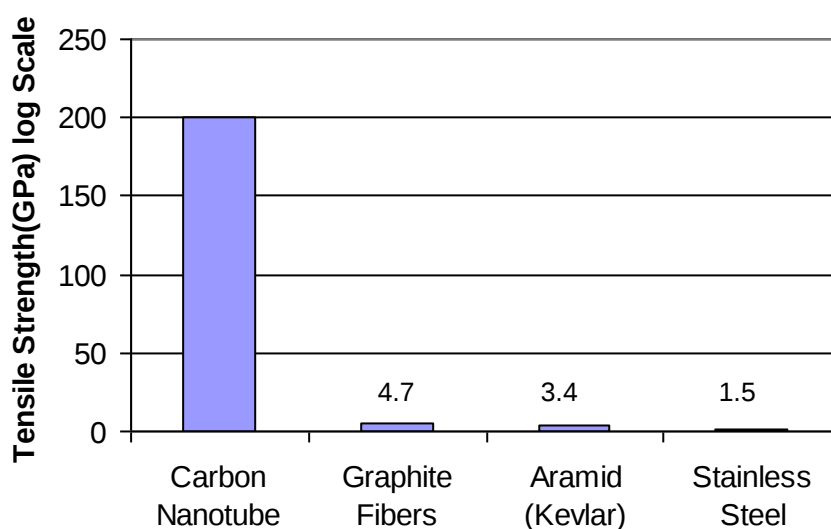
ภาพรวมเกี่ยวกับท่อนาโนคาร์บอน

คาร์บอนเป็นธาตุที่มีความสำคัญและมีประโยชน์หลายด้าน ซึ่งนอกจากจะเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของสิ่งมีชีวิตแล้ว คาร์บอนยังเป็นที่รู้จักในแง่ของการถูกนำไปใช้ประโยชน์ในการพัฒนาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมากมาย เนื่องจากคุณสมบัติที่ดีหลายอย่าง เช่น ความแข็งแรงเมื่อมีโครงสร้างอยู่ในอีกรูปของเพชรซึ่งเป็นวัสดุที่แข็งมากที่สุด เช่นเดียวกับกับสมบัติพิเศษของท่อนาโนคาร์บอนเมื่อเปรียบเทียบขนาดพื้นที่หน้าตัดเท่ากัน สามารถทนต่อแรงดึงได้สูงกว่าเหล็กกล้าหลายเท่า จึงได้มีการวิจัยเชิงประยุกต์เพื่อนำไปเป็นวัสดุเสริมความแข็งแรงหรือผสมกับวัสดุอื่น เช่น พอลิเมอร์ ยาง โลหะ และ เซรามิกส์ นอกจากนี้แล้วคุณสมบัติทางไฟฟ้าของท่อนาโนคาร์บอน สามารถนำไฟฟ้าดีเหมือนโลหะ หรือเป็นสารกึ่งตัวนำ ทำให้มีการศึกษาวิจัย เพื่อนำมาใช้เป็นส่วนประกอบในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีขนาดเล็กลงถึงระดับนาโนเมตร

2.1 คุณสมบัติของท่อนาโนคาร์บอน

2.1.1 คุณสมบัติเชิงกล

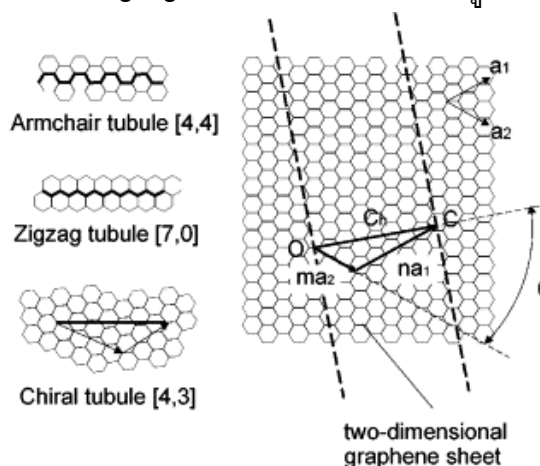
ท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียว มีค่ายังมอดูลัสมากกว่า 1 TPa ส่วนของท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้น มีค่าประมาณ 1.25 TPa ความทนทานต่อแรงดึงสูงสุด (Tensile strength) เท่ากับ 200 GPa^{13,14} ซึ่งมากกว่าเหล็กประมาณ 100 เท่าในขณะที่น้ำหนักเบากว่า 6 เท่า ดังแสดงเปรียบเทียบในรูป 2.1



รูป 2.1 แสดงการเปรียบเทียบความทนทานต่อแรงดึงสูงสุด¹⁵

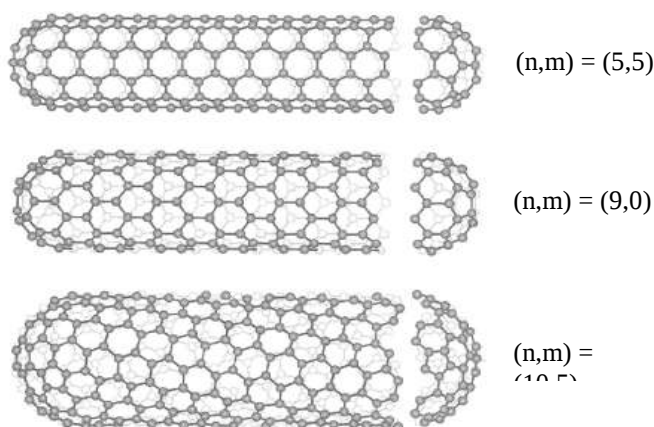
2.1.2 คุณสมบัติเชิงไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์

สมบัติทางไฟฟ้าของท่อนาโนคาร์บอน สามารถกำหนดได้ด้วยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ และมุม θ (Chiral angle) ซึ่งเป็นมุมระหว่างทิศการเรียงตัวของวงแหวนหกเหลี่ยมกับแนวแกนของท่อ ทำให้สามารถชนิดของท่อนาโนคาร์บอนแบ่งโดยใช้เกณฑ์ดังกล่าวนี้เป็นสามชนิด ได้แก่ Armchair, Zigzag และ Chiral ดังแสดงในรูป 2.2



รูป 2.2 แสดงโครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอนชนิดต่างๆ ที่มีทิศการเรียงตัวของวงแหวนหกเหลี่ยมกับแนวแกนของท่อต่างกัน¹

ขนาดเส้นรอบวงของท่อนาโนคาร์บอนแสดงด้วยขนาดของเวกเตอร์ที่เรียกว่า Chiral vector ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของคู่อันดับ (n, m) หรือ $\vec{C}_n = n\hat{a}_1 + m\hat{a}_2$ จากรูป 2.2 อธิบายได้ว่า เมื่อ $\theta = 0$ องศา ได้ท่อนาโนคาร์บอนที่มีการจัดเรียงตัวของวงแหวนหกเหลี่ยมเป็นแบบ Zigzag แสดงได้ด้วยเวกเตอร์ $(n, 0)$ และหาก $\theta = 30$ องศา จะมีการจัดเรียงอะตอมคาร์บอนเป็นแบบ Armchair แสดงด้วยเวกเตอร์ (n, n) และเมื่อ θ มีค่าอยู่ระหว่าง $0 - 30$ องศา ก็จะมีการจัดเรียงตัวเป็นแบบ Chiral ซึ่งแสดงด้วยเวกเตอร์ (n, m) ¹ ดังตัวอย่างในรูป 2.3



รูป 2.3 แสดงท่อนาโนคาร์บอนที่มี Chiral vector แบบต่าง ๆ¹

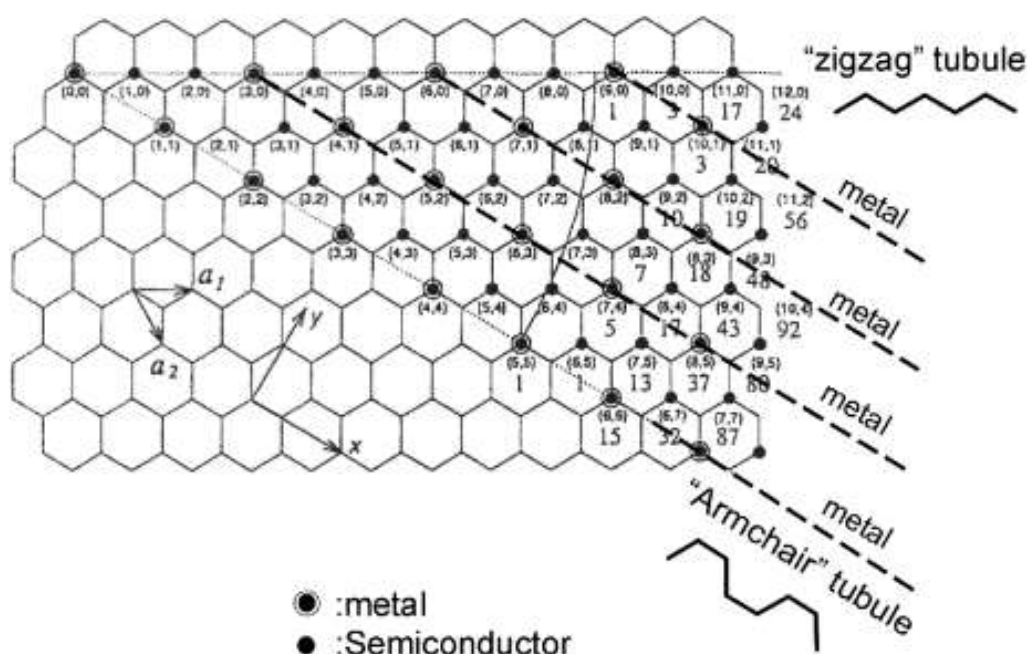
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อและ Chiral angle สามารถคำนวณได้จากสูตร ดังตาราง

2.1

ตาราง 2.1 แสดงตัวแปรและค่าของตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับท่อนาโนคาร์บอน¹

Symbol	Name	Formula	Value
a_{C-C}	Carbon-carbon distance		1.42 Å
a	Length of unit vector	$\sqrt{3}a_{C-C}$	2.46 Å
a_1, a_2	Unit vectors	$\left(\frac{\sqrt{3}}{2}, \frac{1}{2}\right) a, \left(\frac{\sqrt{3}}{2}, -\frac{1}{2}\right) a$	ln(x,y) coordinates
C_b	Chiral vector	$C_b = na_1 + ma_2 \equiv (n, m)$	n, m : integer
L	Circumference of nanotube	$L = C_b = a\sqrt{n^2 + m^2 + nm}$	$0 \leq m \leq n$
d	Diameter of nanotube	$d = \frac{L}{\pi} = \frac{\sqrt{n^2 + m^2 + nm}}{\pi} a$	
θ	Chiral angle	$\sin \theta = \frac{\sqrt{3}m}{2\sqrt{n^2 + m^2 + nm}}$ $\cos \theta = \frac{2n + m}{2\sqrt{n^2 + m^2 + nm}}$ $\tan \theta = \frac{\sqrt{3}m}{2n + m}$	$0 \leq \theta \leq 30^\circ$

สมบัติการนำไฟฟ้าของท่อนาโนคาร์บอนนั้นขึ้นอยู่กับ ทิศการเรียงตัวของวงแหวนหกเหลี่ยม เทียบกับแนวแกนของท่อ โดยที่โครงสร้างท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียวแบบ Armchair จะแสดงสมบัติการนำไฟฟ้าเหมือนเป็นโลหะ ส่วนโครงสร้างท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียวแบบ Zigzag และ chiral จะแสดงสมบัติการนำไฟฟ้าเหมือนสารกึ่งตัวนำ ดังแสดงในรูป 2.4



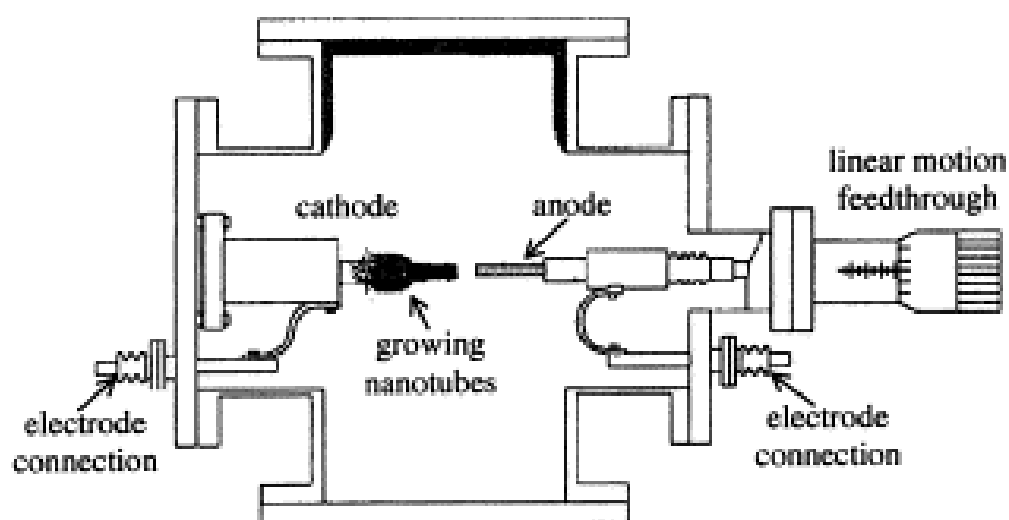
รูป 2.4 สมบัติการนำไฟฟ้าของท่อนาโนคาร์บอนที่ขึ้นกับ Chiral vector¹

2.2 การสังเคราะห์และกลไกการเติบโต (Synthesis and growth mechanism)

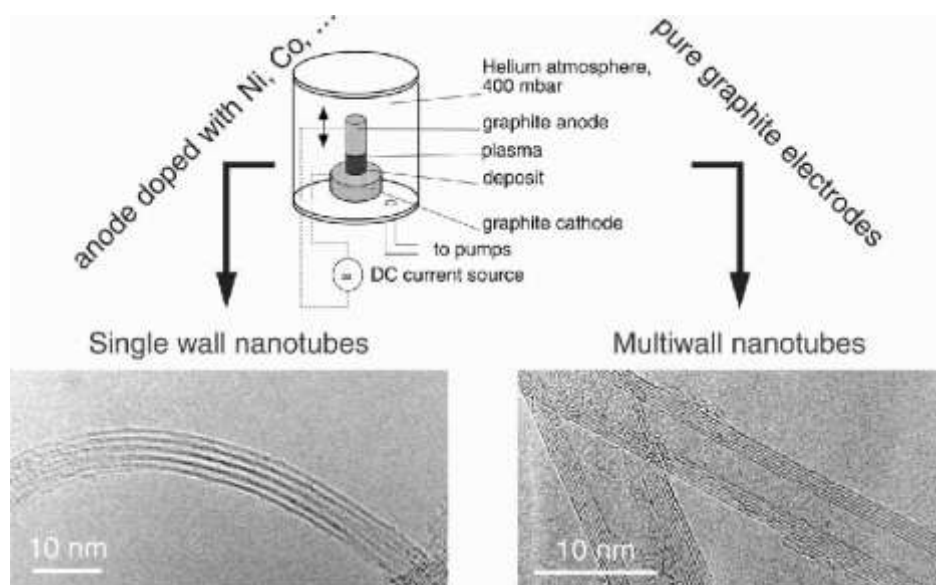
ท่อนาโนคาร์บอนสามารถสังเคราะห์ได้หลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีก็มีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันทั้งในด้านความสมบูรณ์ของโครงสร้าง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ความยาว ปริมาณที่ผลิตและความบริสุทธิ์ของท่อนาโนคาร์บอนที่ได้ อาจแบ่งวิธีการสังเคราะห์ออกเป็น 3 วิธีหลักๆ ได้ดังนี้

2.2.1 วิธีอาร์คดิสชาร์จ (Arc Discharge)

เป็นการสังเคราะห์โดยท่อนาโนคาร์บอนโดยใช้ไฟฟ้ากระแสตรงประมาณ 50 - 120 แอมแปร์ ที่ความต่างศักย์ประมาณ 18 - 40 โวลต์ ตกคร่อมระหว่างปลายแท่งแกรไฟต์สองแท่งที่วางใกล้ๆ กันในระยะห่างประมาณ 1 มิลลิเมตร ภายใต้บรรยากาศก๊าซเฉื่อย เช่น ก๊าซฮีเลียม หรืออาร์กอนเป็นต้น ที่ความดันต่ำระหว่าง 50 - 700 Torr ทำให้มีแท่งแกรไฟต์มีการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งกลายเป็นไอ และควบแน่นกลับเป็นของเหลวและของแข็งหรือเป็นท่อนาโนคาร์บอน ณ บริเวณที่อุณหภูมิต่ำกว่า ซึ่งการควบคุมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และความยาวของท่อนาโนคาร์บอนนั้น อาจทำได้โดยการควบคุมอุณหภูมิและความสม่ำเสมอของการเกิดสถานะพลาสมาระหว่างปลายแท่งแกรไฟต์ และอาจควบคุมชนิดของท่อนาโนคาร์บอนได้โดยการผสมโลหะบางชนิดลงไป เช่น เหล็ก นิเกิล และ โคบอลต์เรียกว่าโลหะคะตะลิสต์ (Metal catalyst) ซึ่งเป็นตัวช่วยให้เกิดท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียวขึ้น ดังรูป 2.5 และ 2.6



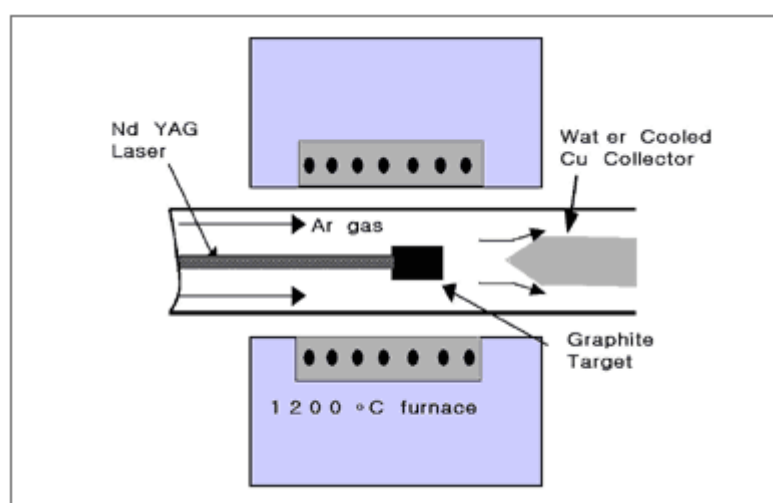
รูป 2.5 แผนภาพแสดงการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน¹
โดยวิธี อาร์คดิสชาร์จ¹³



รูป 2.6 แสดงภาพของชนิดของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดจากเติมและไม่เติม โลหะคะตะลิสต์¹

2.2.2 วิธีระเหยด้วยแสงเลเซอร์ (Laser Vaporization)^{15,16}

เป็นวิธีการสร้างท่อนาโนคาร์บอนโดยใช้แสงเลเซอร์ที่มีความเข้มแสงสูงยิงไปยังเป้า ซึ่งเป็นแกรไฟต์ ภายใต้สภาวะบรรยากาศก๊าซเฉื่อย เช่น ก๊าซฮีเลียม อาร์กอน เป็นต้น ความดันต่ำ ประมาณ 500 มิลลิเมตรปรอท ที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส โดยเทคนิคนี้คล้ายกับวิธี อาร์คดิสชาร์จ จะผสมโลหะบางชนิด เช่น เหล็ก นิกเกิล และ โคบอลต์เป็นตัวคะตะลิสต์ซึ่งจะช่วยให้เกิดท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียว ดังรูป 2.7

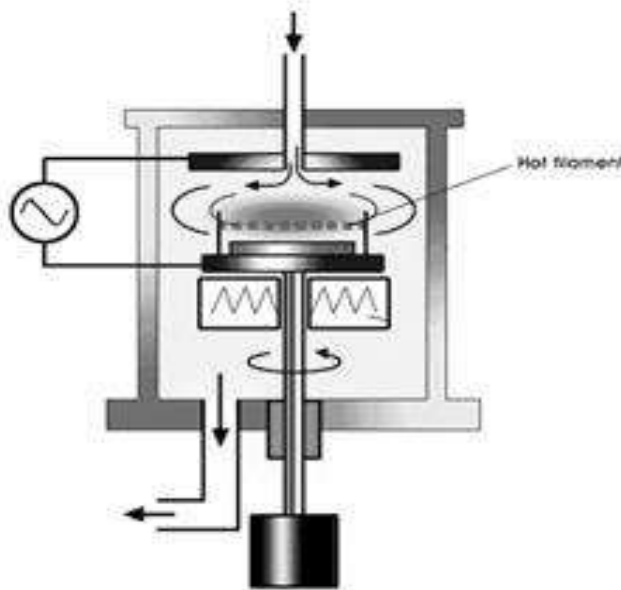


รูป 2.7 แสดงวิธีระเหยด้วยแสงเลเซอร์

2.2.3 วิธีการตกสะสมไอสารเคมี (Chemical Vapor Deposition, CVD)

เป็นวิธีที่ให้ความร้อนกับก๊าซไฮโดรคาร์บอนที่ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน เพื่อให้มีการแตกตัวและมีการสร้างท่อนาโนคาร์บอนบนเม็ดตะลิสต์ โดยก๊าซที่นิยมใช้ได้แก่ มีเทน (CH_4) อะเซทิลีน (C_2H_2) และคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ซึ่งวิธีนี้จำเป็นต้องอาศัยตัวตะลิสต์ เช่น เหล็ก นิเกิล และ โคบอลต์ เป็นต้น เป็นตัวช่วยให้เกิดการสร้างท่อนาโนคาร์บอน อุณหภูมิที่เหมาะสมของการสังเคราะห์อยู่ที่ประมาณ 650 - 900 องศาเซลเซียส ซึ่งเทคนิคนี้สามารถควบคุมเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดและความยาวของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดขึ้นได้ โดยการควบคุมขนาดของตัวตะลิสต์ และอัตราการไหลของก๊าซตามลำดับ ทั้งนี้ต้องทำภายใต้บรรยากาศก๊าซเฉื่อย เช่น ก๊าซฮีเลียม หรืออาร์กอน เป็นต้น วิธีนี้สามารถผลิตท่อนาโนคาร์บอนได้ปริมาณมาก และมีความบริสุทธิ์สูง ซึ่งอาจแบ่งเป็นวิธีย่อยๆ ได้อีกดังนี้

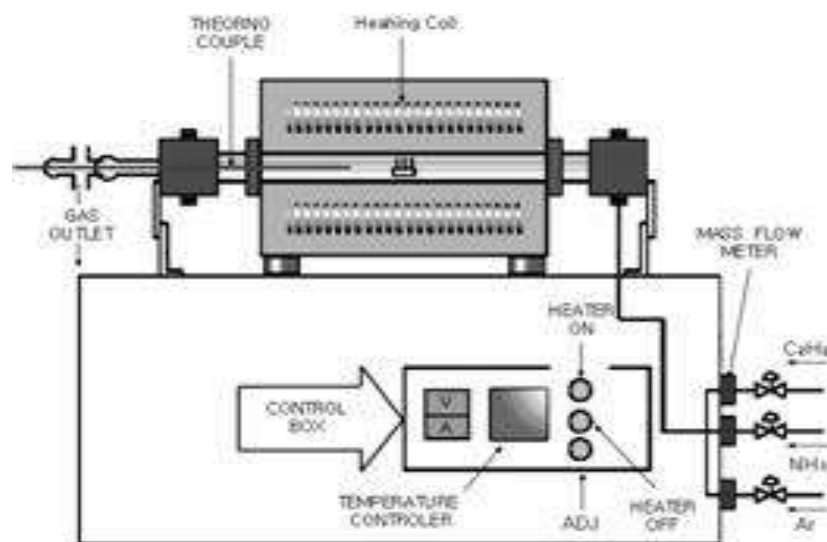
(1) การตกสะสมไอสารเคมีด้วยพลาสมา (Plasma enhanced chemical vapor deposition)^{17,18} เป็นการให้ความต่างศักย์สูงระหว่างขั้วอิเล็กโทรด เพื่อให้ก๊าซไฮโดรคาร์บอน เช่น อะเซทิลีน มีเทน เอทิลีน เกิดการแตกตัว และคาร์บอนจะตกบนวัสดุฐานรอง เช่น ซิลิกอน ซิลิกอนไดออกไซด์ และแก้ว โดยมีโลหะตะลิสต์ เคลือบอยู่บนผิว ซึ่งเป็นตัวช่วยให้เกิดการจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนเป็น ท่อนาโนคาร์บอน ดังรูป 2.8



รูป 2.8 แสดงวิธีการตกสะสมไอสารเคมีด้วยพลาสมา¹⁷

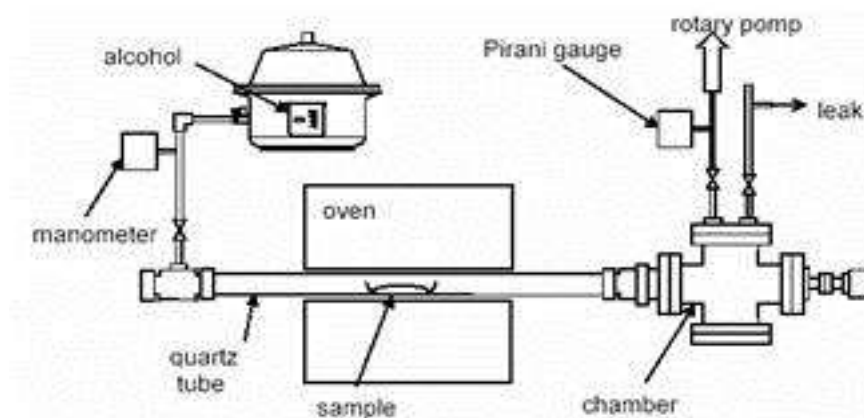
(2) การตกสะสมไอสารเคมีด้วยความร้อน (Thermal chemical vapor deposition)¹⁹ เป็นเทคนิคที่ใช้ เหล็ก นิเกิล โคบอลต์ หรือ โลหะผสมของทั้งสามชนิดนี้ เป็นตัวตะลิสต์ ให้ตกเคลือบบนวัสดุฐานรอง หลังจากนั้นนำฐานรองไปทำการกัดด้วยกรดไฮโดรคลอริก หรือ ใช้ก๊าซ

แอมโมเนีย เพื่อให้เกิดก้อนของโลหะขนาดนาโนเมตรที่เรียกว่า “การเกิดใหม่” (nucleation) แล้วนำไปปลูก ท่อนาโนคาร์บอน โดยนำไปใส่ในห้องเผาหรือเตาเผาแบบท่อ ซึ่งจะใช้อุณหภูมิประมาณ 600 - 1,050 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศของก๊าซไฮโดรคาร์บอนและอาร์กอน ดังรูป 2.9



รูป 2.9 เทคนิคการตกสะสมไอสารเคมีด้วยความร้อน¹⁹

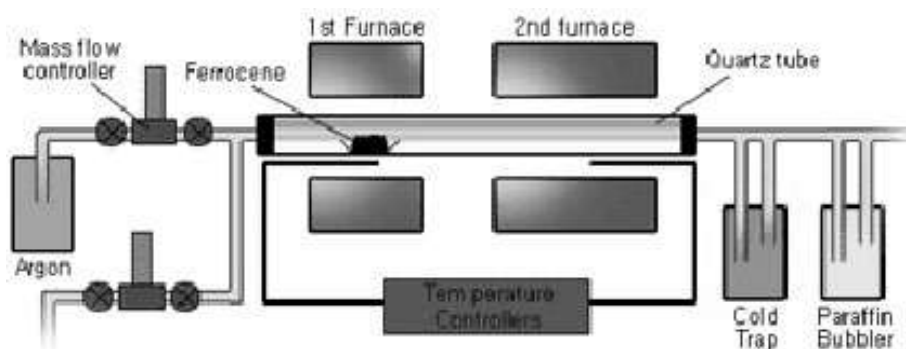
(3) การตกสะสมไอสารเคมีจากแอลกอฮอล์ (Alcohol catalytic chemical vapor deposition, ACVD)²⁰ ซึ่งจะ去做ปฏิกิริยากับโลหะตัวคะตะลิสต์ เช่น เหล็ก และโคบอลต์ ที่อุณหภูมิ 550 °C เพื่อให้เกิดกระบวนการตกสะสมไอสารเคมีได้รวดเร็วยิ่งขึ้นดังรูป 2.10



รูป 2.10 เทคนิคการตกสะสมไอสารเคมีจากแอลกอฮอล์²⁰

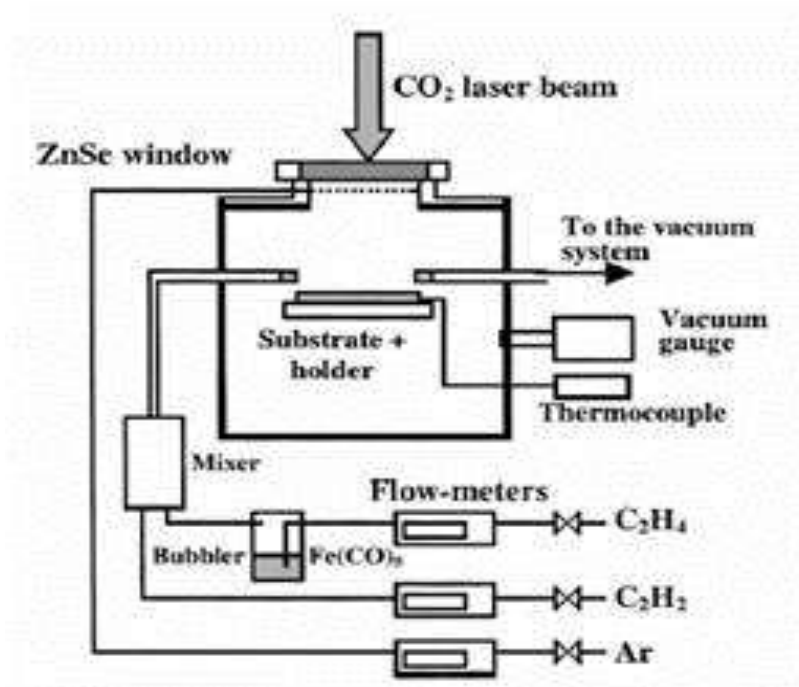
(4) การปลูกจากสถานะไอ (Vapor phase growth) การสังเคราะห์มีการแบ่งพื้นที่ในห้องทดลองออกเป็นสองส่วน พื้นที่ส่วนแรกมีอุณหภูมิต่ำกว่าจะวางภาชนะใส่ผง ferrocene ($\text{Fe}(\text{C}_5\text{H}_5)_2$) ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดโลหะคะตะลิสต์วางอยู่ และส่วนที่สองมีอุณหภูมิสูงกว่า เมื่อปล่อยก๊าซไฮโดรคาร์บอนเข้าไปก็พาไอของกำเนิดคะตะลิสต์ที่ระเหยออกมาไปรวมตัวกันส่วนที่

สอง และเกิดการจัดเรียงตัวเป็นท่อนาโนคาร์บอนขึ้น ซึ่งผลที่ได้มีทั้งท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียว 2-4 นาโนเมตรและชนิดผนังหลายชั้น 70 - 100 นาโนเมตร ดังรูป 2.11



รูป 2.11 การปลูกจากสถานะไอ²¹

(5) การตกสะสมไอสารเคมีโดยใช้แสงเลเซอร์เป็นแหล่งให้ความร้อน (Laser-assisted thermal chemical vapor deposition, LCVD)²² โดยใช้ตัวกระตุ้นจากไอระเหยของสารละลายเหล็กเพนตะคาร์บอนิว $\text{Fe}(\text{CO})_5$ ซึ่งถูกพาเข้ามาใน Reactor ด้วยการผ่านก๊าซ C_2H_2 แล้วจึงทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นด้วยแสงเลเซอร์ ทำให้มีการสร้างตัวของท่อนาโนคาร์บอนบนเม็ดกระตุ้น เหล็กที่ได้จากการแตกตัวของเหล็กเพนตะคาร์บอนิว ดังรูป 2.12

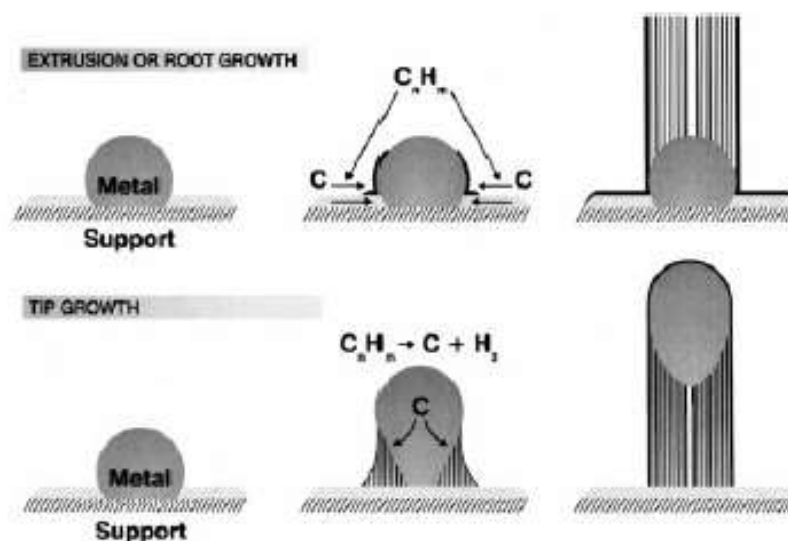


รูป 2.12 การตกสะสมไอสารเคมีโดยใช้แสงเลเซอร์เป็นแหล่งความร้อน²²

2.2.4 กลไกการเติบโต

ทฤษฎีที่เป็นที่ยอมรับกันอย่างแพร่หลายสำหรับกลไกการเติบโตของท่อนาโนคาร์บอน คือ Vapor-Liquid-Solid (VLS) Method^{23,24} ซึ่งเกิดจากการให้ความร้อนแก่วัตถุติดอุณหภูมิต่ำสูงจะทำให้คาร์บอนและธาตุอื่นๆที่เป็นสารประกอบของวัตถุติดเปลี่ยนสถานะจากของแข็งไปเป็นไอ (Vapor) ซึ่งอะตอมของไจะไปแพร่จากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปอุณหภูมิต่ำกว่าทำให้เกิดการรวมตัวและควบแน่นเป็นของเหลว (Liquid) แล้วตกตะกอน (Precipitation) เป็นของแข็ง (Solid) ซึ่งจะเกิดปรากฏการณ์นี้บริเวณรอยต่อของพื้นผิวของของเหลวและของแข็ง (Liquid alloy – Solid interface) ส่งผลให้เกิดการสร้างตัวของท่อนาโนคาร์บอน โดยรูปร่างของท่อนาโนคาร์บอนขึ้นอยู่กับลักษณะการเรียงตัวของธาตุคาร์บอน

ถ้าคาร์บอนทำปฏิกิริยากับโลหะโดยเข้ามาเกาะที่อะตอมของโลหะแล้วเรียงตัวกันขึ้นไปก็จะทำให้เกิดเส้นใยหรือท่อที่มีเฉพาะคาร์บอน และถ้าคาร์บอนทำปฏิกิริยากับโลหะโดยเข้ามาต้นอะตอมของโลหะขึ้นไปและเรียงต่อลงมาด้านล่างก็จะพบว่าที่ปลายจะพบอะตอมของโลหะดังรูป 2.13



รูป 2.13 แสดงลักษณะการเกิดท่อนาโนคาร์บอน²⁵

2.3 การหาลักษณะเฉพาะและการทดสอบคุณสมบัติ

2.3.1 การวิเคราะห์โครงสร้าง

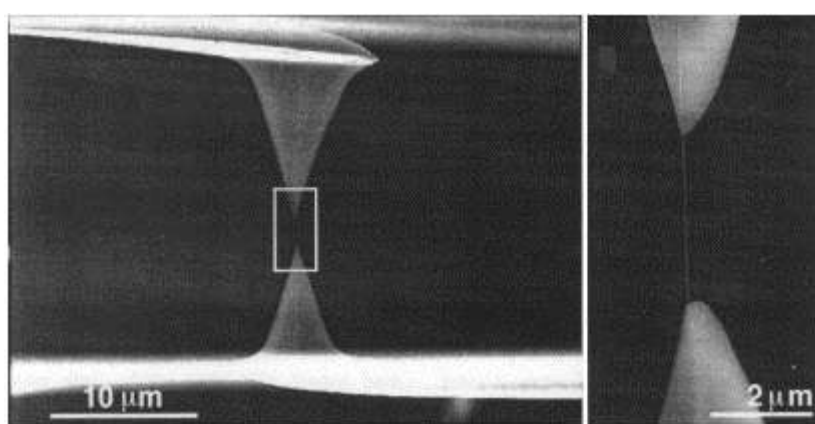
การตรวจสอบขนาด รูปร่างของท่อนาโนคาร์บอน ทำโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) หรือ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope; TEM)²⁶

2.3.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบ

การวิเคราะห์ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของท่อนาโนคาร์บอน โดยใช้ Energy Dispersive Analysis of X-ray EDX)²⁷ และวิเคราะห์โครงสร้างของสารประกอบด้วย X-Ray Diffraction (XRD)²⁸

2.3.3 การทดสอบสมบัติเชิงกล

การวิเคราะห์สมบัติเชิงกล หรือโมดูลัสของความยืดหยุ่น (Young's Modulus) ของท่อนาโนคาร์บอน โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscopy; AFM) ค่าที่ได้จะอยู่ในช่วง 1×10^{12} N/m แสดงตัวอย่างการวัดดังในรูป 2.14



รูป 2.14 การวัดความต้านทานต่อแรงดึงด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม¹

2.3.4 การวัดสมบัติทางไฟฟ้า

ตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของท่อนาโนคาร์บอน โดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์ภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน²⁹

2.4 การประยุกต์ใช้ท่อนาโนคาร์บอน

2.4.1. วัสดุเส้นใยเสริมความแข็งแรงในวัสดุผสม

เนื่องจากท่อนาโนคาร์บอนมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดี จึงมีการวิจัยเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ได้ อย่างหลากหลาย เช่น ใช้ทำหลอดทดลองขนาดนาโน ใช้เป็นเส้นใยเสริมแรงในวัสดุผสมสำหรับ โครงสร้างตัวถังรถยนต์ เครื่องบิน สิ่งปลูกสร้าง ในด้านการทหารใช้เป็นส่วนผสมสำหรับวัสดุทำ เสื้อเกราะกันกระสุน หมวก รองเท้าและกระจก้นกระสุน รวมทั้งใช้ทำโปรบวัดในกล้อง จุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM Tips) เป็นต้น ดังตัวอย่างงานวิจัยต่อไปนี้

Peigmeier และคณะ (2000)³⁰ ได้ทำการเตรียมและศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคและ สมบัติเชิงกลของวัสดุผสม CNTs/Fe/Al₂O₃ ที่เตรียมโดยวิธี Hot pressing ภายในเบ้าแกรไฟต์ ซึ่งในการเตรียมผงวัสดุผสมนี้ ก่อนที่จะทำการ Hot press นั้นพบว่า สภาวะที่ดีที่สุดในการปลูก

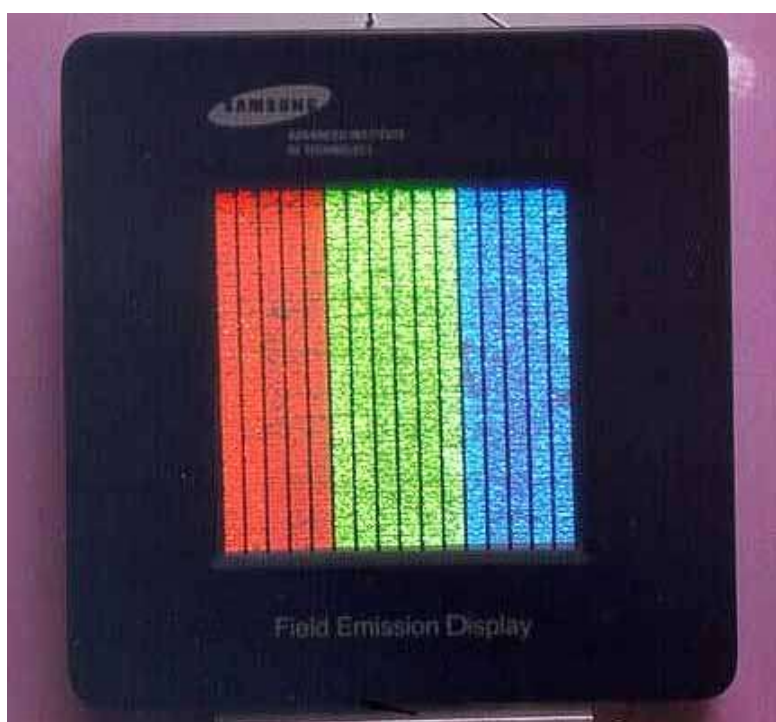
CNTs ลงบนวัสดุผสม ให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 100 nm ในลักษณะของเส้นใยร่างแห และมีปริมาณมาก คลุมเนื้อสารหลัก (Matrix) อะลูมินา คือการผ่านก๊าซมีเทน(CH_4) 18% และบรรยากาศของก๊าซไฮโดรเจนผสมมีเทน($\text{H}_2 - \text{CH}_4$) บนคะตะลิสต์เหล็ก 10% และ Al_2O_3 89.35% โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 1,050 °C เป็นเวลา 6 นาที

2.4.2. การประยุกต์ด้านสมบัติเชิงไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์

นอกจากงานวิจัยเชิงประยุกต์ที่ใช้สมบัติเชิงกลของท่อนาโนคาร์บอนแล้ว ยังมีการวิจัยที่ประยุกต์โดยอาศัยสมบัติเชิงอิเล็กทรอนิกส์ด้วย เช่น ทำเป็นอิเล็กทรอนิกส์ในอุปกรณ์ไฟฟ้าเคมี อุปกรณ์กักเก็บก๊าซไฮโดรเจน พลาสติกนำไฟฟ้า อุปกรณ์ป้องกันสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ส่วนประกอบในแบตเตอรี่ชนิดประจุของลิเทียม อุปกรณ์ปลดปล่อยอิเล็กตรอน รวมทั้งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และเซนเซอร์ขนาดนาโนเมตร ดังตัวอย่างงานวิจัยต่อไปนี้

Li และคณะ(2004)³¹ ได้ทำการศึกษาสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนชนิดหลายชั้นที่ตั้งในแนวตั้งบนอนุภาคเหล็ก ซึ่งอยู่ภายในรูพรุนของแผ่นรองรับซิลิคอน โดยวิธีตกสะสมไอสารเคมี ที่อุณหภูมิ 700 °C การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธีนี้ได้ท่อนาโนคาร์บอนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 – 100 nm เมื่อใช้เป็น อุปกรณ์สำหรับจ่ายอิเล็กตรอนจะเริ่มปล่อยกระแสที่สนามไฟฟ้าเริ่มต้นประมาณ 4 V/ μm (เทียบกับ Molybdenum tips มีค่าประมาณ 50 – 100 V/ μm) และมีความหนาแน่นกระแสประมาณ 1 mA/ cm^2 ที่สนามไฟฟ้า 9.5 V/ μm ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นส่วนประกอบในจอแสดงผลแบบ ฟิลด์อิมิสชัน (Field emission display)

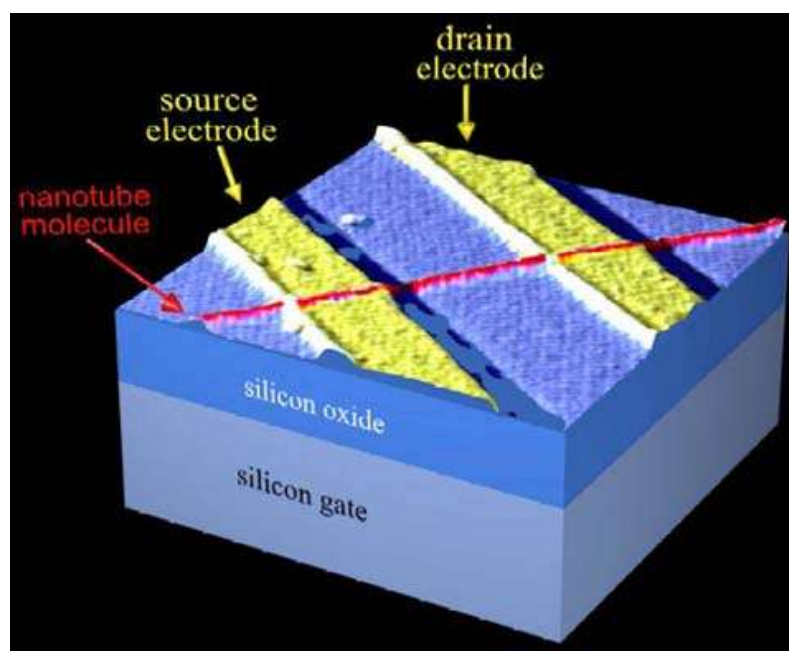
Choi และคณะ (1999)¹¹ ได้ประดิษฐ์ จอภาพสีแบบจ่ายอิเล็กตรอนด้วยสนามไฟฟ้าขนาด 4.5 ตารางนิ้ว ที่สร้างจากท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังชั้นเดียว การสร้างจอภาพนี้สามารถทำ scalable ได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 415 °C และท่อนาโนคาร์บอนจะถูกสร้างให้ตั้งในแนวตั้งเรียงกันอย่างเป็นระเบียบ โดยเทคนิค Paste squeeze, Surface rubbing และ Electric field conditioning ในการทดสอบสมบัติพบว่ามีการปล่อยอิเล็กตรอนพบว่ามีสนามไฟฟ้าเริ่มต้นที่ 1 V/ μm สามารถให้กระแสไฟฟ้า 1.5 mA ที่สนามไฟฟ้า 3 V/ μm (ความหนาแน่นกระแส = 90 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$) และให้ความสว่าง 1,800 cd/ m^2 ที่สนามไฟฟ้า 3.7 V/ μm บนพื้นที่ 4.5 ตารางนิ้ว ของ แก้วที่เรืองแสงสีเขียวจาก Indium – tin – oxide และพบว่ามีการกระเพื่อมของกระแสประมาณ 7% ดังรูป 2.15



รูป 2.15 จอภาพสีที่ใช้ท่อนาโนคาร์บอนเป็นตัวจ่ายอิเล็กตรอน¹¹

จอภาพสีแบบจ่ายอิเล็กตรอนด้วยสนามไฟฟ้านี้เป็นผลิตภัณฑ์ต้นแบบที่ประยุกต์ใช้ท่อนาโนคาร์บอนเป็นครั้งแรก เพื่อเป็นแหล่งจ่ายอิเล็กตรอนที่มีขนาดกะทัดรัด ประหยัดพลังงาน และมีอายุการใช้งานยาวนานกว่าหลอดสุญญากาศที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน เนื่องจากสมบัติในการจ่ายอิเล็กตรอนได้ง่ายและสม่ำเสมอของท่อนาโนคาร์บอน

Tans และคณะ (1998)³ ได้ทำการสร้างทรานซิสเตอร์ชนิด field effect ประกอบด้วยวัสดุฐานรองซิลิคอน โดยมีสารประกอบออกไซด์ของซิลิคอน (Silicon oxide) เป็นฉนวนไฟฟ้ากั้นระหว่างขั้วทั้งสามคือ ขั้วจ่ายกระแส (Source electrode) ขั้วรับกระแส (Drain electrode) และขั้วควบคุมกระแส (Gate electrode) โดยใช้ ท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวชนิดสารกึ่งตัวนำเป็นทางเดินของกระแสไฟฟ้าที่เชื่อมระหว่างสองขั้วตัวนำไฟฟ้าที่ทำจากทองคำ (Gold) หรือทองคำขาว (Platinum) แยกห่างกันประมาณ 400 nm บนวัสดุฐานรองดังรูป 2.16



รูป 2.16 แสดงโครงสร้างของทรานซิสเตอร์แบบใหม่ สีแดงเป็นท่อนาโนคาร์บอน และสีเหลืองเป็นขั้วตัวนำ ที่สร้างขึ้นจากทองคำหรือทองคำขาว³

การควบคุมการเปิด-ปิด การไหลของกระแสไฟฟ้าจะสามารถทำได้โดยการเปลี่ยนความต่างศักย์ที่ขั้วควบคุมกระแส (V_g) เมื่อปรับให้ V_g เป็นค่าลบ ก็จะทำให้ท่อนาโนคาร์บอนนำไฟฟ้าได้มากขึ้น และเมื่อให้ V_g มีเป็นค่าบวกปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านก็จะตรงกันคือนำกระแสไฟฟ้าได้น้อยลง การทดลองนี้สามารถกระทำได้ที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งเป็นผลการทดลองที่สำคัญต่อการนำไปประยุกต์ใช้จริง และเป็นจุดเริ่มต้นของเทคโนโลยีระดับโมเลกุล

2.4.3 อุปกรณ์ตรวจวัดก๊าซ

Cantalini และคณะ (2004)³² ได้ทำการสังเคราะห์ฟิล์มบางของท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น โดยวิธีการตกสะสมไอของสารเคมีด้วยพลาสมาลงบนชั้นฟิล์มบางของโลหะนิกเกิลที่หนาประมาณ 5 nm บนวัสดุฐานรอง $\text{Si/Si}_3\text{N}_4$ เพื่อประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดก๊าซ การทดลองตรวจวัดก๊าซ NO_2 ในปริมาณ 10 – 100 ppm ของอากาศแห้ง ที่ช่วงอุณหภูมิ 25 – 250 °C นั้นพบว่า อุณหภูมิที่เกิดการตอบสนองได้ดีกับก๊าซ NO_2 คือ 165 °C และพบว่าการแปรความต้านทานไฟฟ้าของท่อนาโนคาร์บอนที่มีต่อก๊าซ NO_2 ลดลงแม้ว่าความเข้มข้นของก๊าซ NO_2 มีปริมาณต่ำที่ 10 ppm ดังนั้นท่อนาโนคาร์บอนจึงสามารถนำไปประยุกต์ทำเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดคุณภาพของอากาศได้