

รายงานโครงการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การสังเคราะห์ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธีCVDสำหรับอุปกรณ์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์

Synthesis of carbon nanotube films by CVD for microelectronics devices.



RCH

TA

A18.9

T45

๓๗๗1๖

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน..... 69725

วัน,เดือน,ปี... 17 ก.พ. 2550

เสนอ

สภาวิจัยแห่งชาติ


(ได้รับทุนสนับสนุนจากสภาวิจัยแห่งชาติประจำปีงบประมาณ 2548)

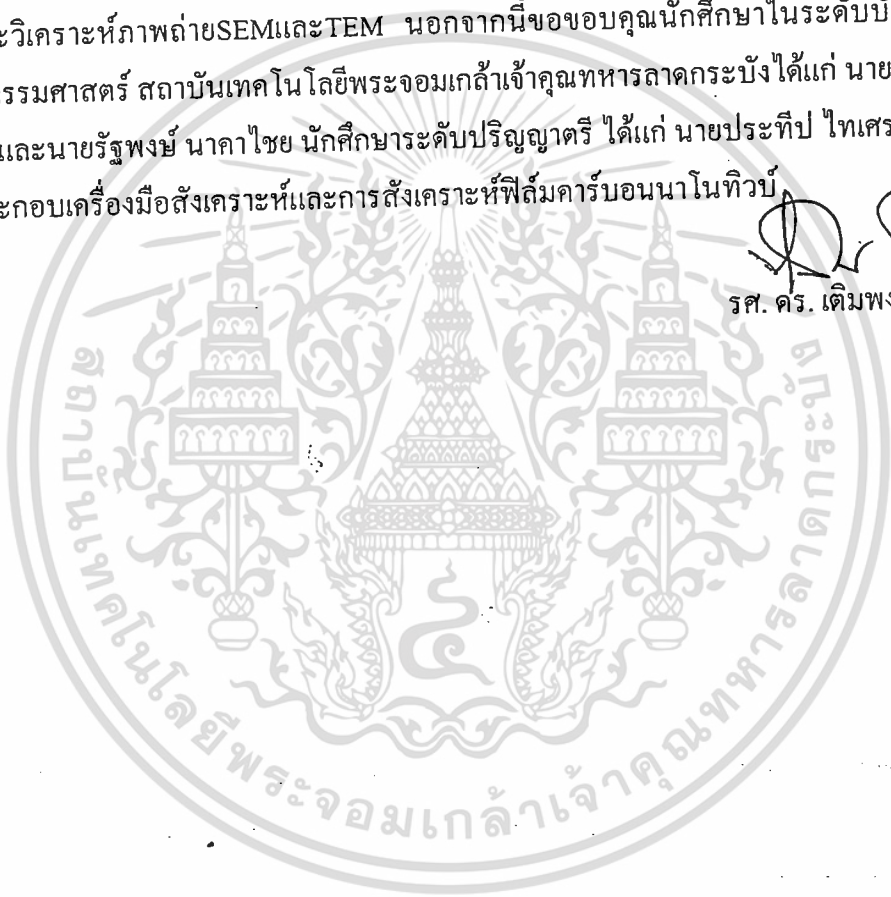
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11903062

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสภาวิจัยแห่งชาติ ผู้ให้การสนับสนุนทางการเงิน จนทำให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ขอขอบคุณภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์และศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ศูนย์MTECและTMEC ในการวัดและวิเคราะห์ภาพถ่ายSEMและTEM นอกจากนี้ขอขอบคุณนักศึกษาในระดับบัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ได้แก่ นายชนะ สิทธิ์พงษ์ และนายรัฐพงษ์ นาคาไชย นักศึกษาระดับปริญญาตรี ได้แก่ นายประทีป ไทเศรษฐวัฒน์กุล ในการประกอบเครื่องมือสังเคราะห์และการสังเคราะห์ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวป์


รศ. ดร. เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล



การนำเสนอผลงานโครงการวิจัยในการประชุมวิชาการ

1. The 10th International Conference on New Diamond Science and Technology (ICNDST-10), May 11-14, 2005, AIST Auditorium, AIST, Tsukuba, Japan.
2. The 3rd International Conference on Material for Advanced Technologies (ICMAT 2005), July 3-8, 2005, Singapore.
3. The 28th Electrical Engineering Conference (EE-CON 28), October 20-21, 2005, Thailand.



วิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาต
การคัดลอกหรือการเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจะถือว่าผิดกฎหมาย
The King Prajonnarat Rajavidyalaya University (KPRU) is a public university in Bangkok, Thailand. It was established in 1991 and is one of the largest universities in the country. The university is known for its focus on technology and engineering education. The logo of the university features a central stupa, two side stupas, and a sunburst, surrounded by the university's name in Thai script.

Final Circular

The 10th International Conference on New Diamond Science and Technology

ICNDST-10

May 11-14, 2005

AIST Auditorium,
AIST, Tsukuba, Japan



AFM image of single crystal diamond surface grown by plasma CVD.

■ Welcome Message from ICNDST-10	2
■ ICNDST-10 at a Glance	2
■ Oral Program	3
■ Poster Program	6
■ Conference Proceedings	12
■ Proceedings Manuscript	12
■ Information	14
■ Accommodation	14
■ Registration Information	15
■ Invited Speakers	18
■ Conference Committees	18

This conference is co-organized by Japan New Diamond Forum (JNDF),
New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO) and
National Institute of Industrial Science and Technology Japan (AIST)

P6-33 Control of p-type surface conductivity through charged membranes on the hydrogen-terminated diamond surface

M Tanaka*, D Ogiwara, Y Sasaki, K Song, H Umezawa, H Kawarada (Waseda University, Japan)

P6-34 Development of diamond MISFETs with low-temperature oxidized alumina gate insulator

M Yohara^{1*}, K Hirama^{1,3}, T Saitoh^{2,3}, K Park^{2,3}, M Satoh^{1,3}, H Umezawa^{1,3}, H Kawarada^{1,3} (¹Waseda University, Japan, ²AIST, Japan, ³NEDO, Japan)

P6-35 Ion doping of field effect transistor with carbon nanotube channel by using mass-separated ultra low energy ion beams

K Yamamoto^{1,3*}, T Kamimura^{2,3}, K Matsumoto^{1,2,3} (¹AIST, Japan, ²Osaka University, Japan, ³CREST JST, Japan)

P6-36 Electrical characterization of homoepitaxial diamond p-n⁺ junction

T Makino^{1,2*}, H Kato^{1,2}, S Ri^{1,2}, Y Chen^{1,2}, H Watanabe^{1,2}, K Park¹, H Okushi^{1,2} (¹AIST, Japan, ²CREST JST, Japan)

P6-37 All amorphous SiC based luminescent microcavity

J Xu*, J Mei, L Yang, D Chen, S Chen, W Li, K Chen (Nanjing University, China)

CNT

P7-1 Development of triode type RF plasma enhanced CVD for low temperature growth of carbon nanotube

Y Show^{1*}, Y Yabe¹, T Izumi¹, H Yamauchi² (¹Tokai University, Japan, ²Eiko Engineering, Japan)

P7-2 Generation of charged nanoparticles and their effect on the growth of carbon nanotubes in the hot filament chemical vapor deposition process

J Lee*, N Hwang (Seoul National University, Korea)

P7-3 Generation of charged clusters in the gas phase and their deposition as diamond films or carbon nanotubes in the hot filament CVD process

J Lee, N Hwang* (Seoul National University, Korea)

P7-4 Synthesis of petal-like graphitic nanoflakes on carbon nanotubes templates

C Chen*, C Chen, I Li, C Lu (National Chiao Tung University, Taiwan)

P7-5 Lateral growth of single-walled carbon nanotubes across electrodes and the electrical property characterization

W Lee*, Z Juang, C Weng, J Lai, K Leou, C Tsai (National Tsing Hua University, Taiwan)

P7-6 The preparation and properties of a novel carbon nanotubes thin films by pulsed laser deposition with various laser energy in high vacuum

M Rusop^{1*}, R Afre¹, M Sharon², T Soga¹, T Jimbo¹ (¹Nagoya Institute of Technology, Japan, ²Birla College, India)

P7-7 The properties of carbon nanotubes grown by excimer laser at room temperature in argon gas ambient

M Rusop*, T Kinugawa, T Soga, T Jimbo (Nagoya Institute of Technology, Japan)

P7-8 Super long catalyst life time over 20 hours for the growth of single-walled and multiwalled carbon nanotubes

T Aikawa*, T Yoshida, T Iwasaki, R Hosaka, G Zhong, H Kawarada (Waseda University, Japan)

P7-9 A possible approach exploring the melting state of catalyst during the low-temperature growth of carbon nanotubes

C Lin^{1*}, I Leu², J Yen¹, M Hon^{1,3} (¹National Cheng Kung University, Taiwan, ²Kun Shan University of Technology, Taiwan, ³Da-Yeh University, Taiwan)

P7-10 Narrowing of nanotubes with catalytic Ni-C nanoclusters using microwave plasma CVD

M Nagatsu*, T Yoshida, T Matsuda, T Tanaka, A Ogino (Shizuoka University, Japan)

P7-11 The growth of aligned carbon nanotubes on catalytic mesoporous materials

S Lee^{1*}, J Han¹, D Kuvshinov^{1,3}, A Berdinsky^{1,2}, J Yoo¹, C Park¹ (¹Sungkyunkwan University, Korea, ²Novosibirsk State Technical University, Russia, ³Boskov Institute of Catalysis, Russia)

P7-12 Effects of aluminum-based buffer layer on the characteristics of carbon nanotubes fabricated by plasma-enhanced chemical vapor deposition

W Wang, B Chuang, Y Peng*, C Kuo (National Chiao Tung University, Taiwan)

P7-13 Atmospheric pressure HFCVD synthesis of carbon nanotube by using ethanol source

T Phetchakul*, S Cheirsirikul, S Supadech (King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand)

P7-14 Transparent conductive film based on carbon nanotubes and PEDOT composites

J Moon^{1*}, J Park¹, T Lee¹, J Yoo¹, C Park¹, J Kim², C Lee² (¹Sungkyunkwan University, Korea, ²Samsung SDI, Korea)

P7-15 Adsorption characteristics of Ru(II) dye on carbon nanotubes for organic solar cell

T Lee*, J Yoo (Sungkyunkwan University, Korea)

P7-16 Bulk synthesis and manipulation of gallium-filled carbon nanotubes

J Zhan*, Y Bando, J Hu, D Golberg (NIMS, Japan)

P7-17 Synthesis of polyynes by laser ablation of diamond nanoparticles suspended in solution

H Tabata*, M Fujii, S Hayashi (Kobe University, Japan)

P7-18 Morphological and structural characterization of fullerene nanotubes fabricated by the liquid-liquid interfacial precipitation method

J Minato*, K Miyazawa (NIMS, Japan)

P7-19 Synthesis and characterization of one-dimensional single-crystalline AlN nanostructures

L Yin*, Y Bando (NIMS, Japan)

P7-20 Fabrication of boron nitride nanohorn

C Zhi*, Y Bando, C Tang, D Golberg (NIMS, Japan)

P7-21 The mechanism and characteristics of silicon nanotips fabricated by MPE-CVD

B Chuang, W Wang, I Teng*, C Kuo (National Chiao Tung University, Taiwan)

P7-22 Fabrication and optical properties of nanotip arrays

Y Huang^{1*}, C Lin¹, H Lo², C Hsu³, K Chen², L Chen³ (¹National Taipei University of Technology, Taiwan, ²Academia Sinica, Taiwan, ³National Taiwan University, Taiwan)

Processing

P8-1 Measurement of oxygen plasma for diamond etching process

H Yoshikawa*, Y Nakano, N Sato, T Ikehata (Ibaraki University, Japan)

P8-2 Preparation of diamond whiskers using Ar/O₂ plasma etching

C Li*, H Yoshimura, A Hatta (Kochi University of Technology, Japan)

P8-3 Nanoprocessing of carbon materials using variable pressure scanning electron microscope

J Niitsuma*, X Yuan, S Koizumi, T Sekiguchi (NIMS, Japan)

Mechanical Properties and Applications

P9-1 Tribological properties of partly polished diamond

T Takeno^{1*}, T Komoriya¹, I Nakamori², H Miki¹, T Abe¹, T Uchimoto¹, T Takagi¹ (¹Tohoku University, Japan, ²Japan Science and Technology Agency, Japan)

P9-2 Microstructure of mono-layer diamond tool by self-propagating high-temperature synthesis

F Zhang*, C Wang, H Yuan, Z Qin, J Fan, Y Zhou, K Fu (Guangdong University of Technology, China)

P9-3 Microstructure of mono-layer diamond tool brazed by Cu-Sn-Cr alloy

Y Zhou*, C Wang, F Zhang, K Fu (Guangdong University of Technology, China)

P9-4 Direct simulation of Monte Carlo analysis of nano-floating effect on diamond-coated surface

I Nakamori^{1*}, T Takeno², T Abe², T Uchimoto², T Takagi², Y Kohama² (¹Japan Science and Technology Agency, Japan, ²Tohoku University, Japan)

Atmospheric pressure HFCVD synthesis of carbon nanotube by using ethanol source

T. Phetchakul *, S. Cheirsirikul, S. Supadech

*Electronic Department, Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand
kptoempo@kmitl.ac.th*

ABSTRACT

Carbon nanotubes (CNTs) were grown by hot filament chemical vapor deposition at atmospheric pressure. Ethanol and hydrogen were used as source. Diamond can be synthesized at condition 8 vol% of the ratio of H₂ gas passed through ethanol (for bubbling) to total H₂ gas. The heated tungsten filament 2300 °C, Ø = 0.3 mm, 3 mm above substrate radiated thermal to silicon substrate at 850 °C which was on Mo substrate holder. The high quality of diamond was obtained by Raman spectroscopy inspection. In the case of CNTs, the filament temperature was about 2000 °C and substrate temperature was in the range 550-750 °C with the same ratio of carbon source. The growth rate and density depended on the substrate. The silicon substrate which used iron nitrate (Fe(NO₃)₂) as catalyst and carbon and graphite with non-catalyst substrate were used in this experiment. Both of them can be obtained CNTs at very difference rate of growth. The case of carbon and graphite substrate was higher growth rate than the case of silicon with catalyst. The increasing of ethanol increased the growth rate. CNTs were characterized by SEM and TEM.

Keywords: Atmospheric pressure HFCVD, Carbon nanotube, Diamond, Ethanol

1. Introduction

It is well known that carbon nanotubes (CNTs) are very attracting at present. Due to their unique properties both electrical and mechanical [1,2], many applications have been expected such as electronics devices and sensors [3-5]. Several methods include the arc discharge, the laser ablation vaporization and the chemical vapor deposition (CVD) from catalytic decomposition of hydrocarbon synthesizing either the single-walled or the multi-walled CNT [6-9]. Among of them, CVD has several advantages over the others in growing CNT. It can be synthesized well-aligned both single-walled and multi-wall CNT and also recognized as the most promising for industrial scale-up.

Synthesis of CNT by CVD generally requires catalyst such as Fe, Ni, Co and alloy that coated on the substrate prior CNT growth. The catalysts are usually deposited by sputtering or evaporation, and an etching process is frequently employed after the deposition. Under several of substrate and hydrocarbon source at the appropriate conditions, CNT can be grown. Mostly conditions operated at low-pressure mTorr but

Substrate temperatures 550 – 1000 °C have been reported.

In this work, the new effective process has been study. CNTs have been synthesized by HFCVD at atmospheric pressure. The ethanol and hydrogen gas were used as hydrocarbon source. The substrates are catalyst coated silicon and non-catalyst carbon and graphite. This process is low cost, short time operation, easily controlled and simplicity. From some advantages, it is possible for a commercial process for mass-product scale.

2. Experiment

2.1 Substrate preparation

Three kind substrates were used for CNT growing. The first one was silicon substrate <100>, 450-µm thickness. Some Si substrates were scratched the surface by diamond particle, diameter Ø 3 -µm and the others were mirror-polished surface. Both substrates were dipped for a few minutes into the solution of iron nitrate (Fe(NO₃)₂) diluted in ethanol. Then they were dried by air at room temperature.

เอ ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The second one was amorphous carbon substrate, which received from the pressed carbon powder. The planar surface was flat but roughly with 3mm thickness. The last one was graphite substrate that original circular shape was scraped by cutter for planar surface with 2 mm thickness. In the case of carbon and graphite, they were not coated any catalyst layer or particle.

2.2 HFCVD

Figure 1 shows a schematic diagram of HFCVD system was designed in this study. The chamber is Pyrex glass and tungsten filament, \varnothing 0.3 mm, that was heated about 2000°C is 3mm above Mo substrate holder. The temperature substrate was monitor by thermocouple under substrate holder. The hydrogen was separated in two paths, which one pass through ethanol for vapor bubbling. Hydrogen and ethanol vapor flow rate were controlled by flow meters and valve as mixed vapor source. The rest reaction gas and by product were entrapped by water before wasted in air. Another reason of water stopper is for safety.

2.3 The condition

In this experiment, the tungsten filament was heated by DC power supply up to the temperature range 2000- 2300°C. The substrate temperature radiated from. the upper heated filament was in the range 550-850°C. The ratio of H_2 gas passed

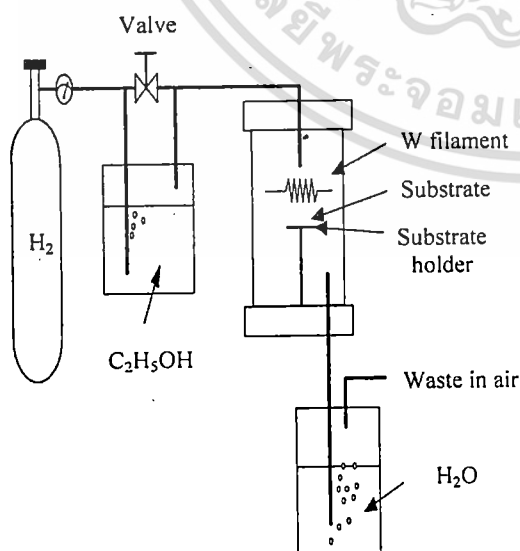


Fig. 1 Schematic diagram of HFCVD

through ethanol to total H_2 was 8 vol%. The synthesis time was 30 minutes at atmosphere pressure.

3. Results and discussion

The deposited films were investigated by SEM. Figure 2 a-d show the surface of the three kinds of substrate that are Fe catalyst coated mirror-polished silicon, carbon and graphite, respectively. The condition was the same as in 2.3.

Figure 2a shows CNTs of Fe coated silicon substrate and figure 2b shows the micrograph of the planar surface. The CNTs appeared all over the surface. The length was very long in micron scales. For the non-catalyst, carbon and graphite, CNTs was observed as shown in Fig. 2c and 2d, respectively. The density of CNT was very dense and in the case of graphite, growth rate was the highest. The length of CNT deposited on graphite seems to be longer than the others are. At the substrate temperature below as 550°C, CNT did not observe on any kind of substrate. It was investigated that CNT was depend on the substrate temperature in the case of silicon substrate when it varied within the range.

Figure 3 shows the SEM photograph of the films deposited on scratched surface silicon and coated Fe later by dipped in solution in 2.1. The reason is to check that when the condition change, high temperature and high of vapor rate, what kind of film between diamond or carbon or both of them can be deposited. The scratched surface helps the nucleation for diamond growth under the appropriate condition. Figure 3a shows the deposited film when the substrate temperature and the vapor ratio reaches to or small upper 850°C and 10 Vol%. Diamond film was observed only rather than CNT or carbon. It means that temperature substrate is higher out of the range of CNT

Figure 3b shows the deposited film at the temperature below in the case of Figure 3a, around 850°C. Amorphous carbon was deposited cover the surface easily than CNT. Some CNTs were observed upon the amorphous carbon but did not observe on silicon surface. The amorphous carbon was depended on both the temperature and ratio of vapor source. Amorphous carbon films protected the substrate surface so some CNT were grown on it.

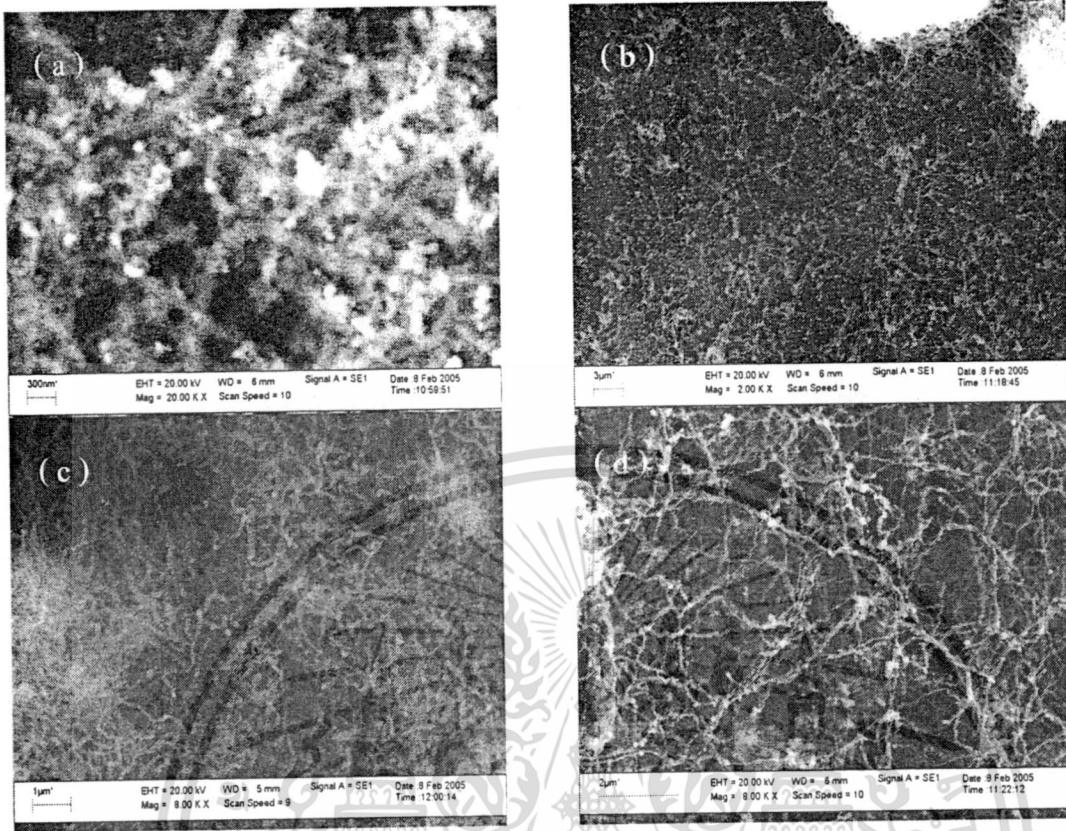


Fig 2. SEM photograph of carbon nanotube of a) Fe coated mirror-polished silicon substrate, b) planar surface of Fe coated mirror-polished Si, c) carbon substrate and d) graphite substrate at substrate temperature 650-750°C

Figure 4 shows the TEM images of CNT. They show that all of them are multi-walled. The end of the tip is closed. The outer diameter is less than 10 nm and the inner diameter is less than 10 nm.

4. Conclusions

CNT can be synthesized by ethanol mixed hydrogen at atmospheric pressure. The

important parameters are substrate temperature and vapor source ratio. The film can be deposited on both catalyst-coated silicon and non-catalyst coated carbon and graphite. The receiving CNT are multi-walled with high density. The length of tube is in several micron scales. This system is easily control and simplicity. The other advantages are non-hazard and no pollution do not vast the material source.

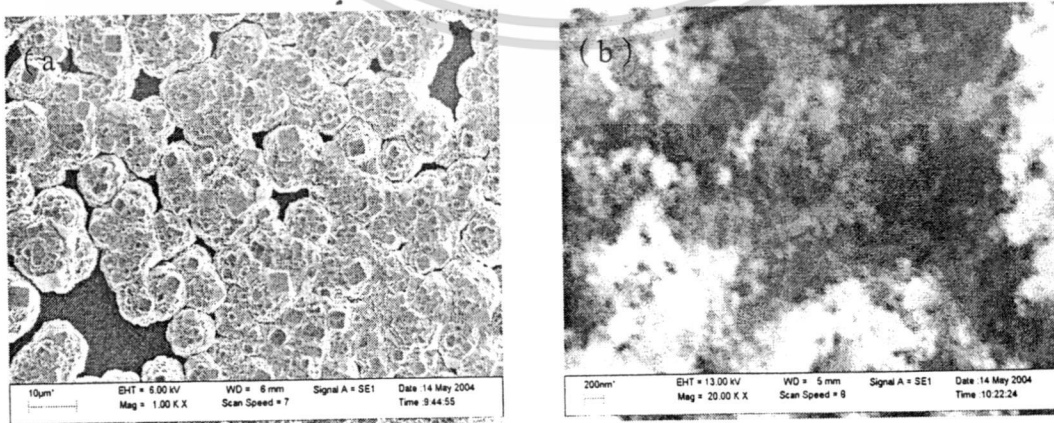
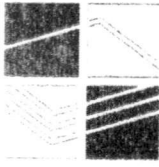


Fig 3. SEM photograph at vapor ratio 10 Vol % of a) Fe coated scratched Si surface at substrate temperature >850°C, b) Fe coated scratched Si surface at substrate temperature around 850°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TECHNICAL PROGRAMME



ICMAT
2005

3rd International Conference on
Materials for Advanced Technologies
(ICMAT 2005)

AND



9th International Conference on
Advanced Materials
(ICAM 2005)

3-8 July 2005, Singapore

www.mrs.org.sg

Organised by

MRS
Materials Research Society
SINGAPORE

In association with



NUS
National University
of Singapore



Institute of
Materials Research
and Engineering



**NANYANG
TECHNOLOGICAL
UNIVERSITY**



Unleashing Minds
Transforming Lives

A Centennial Conference

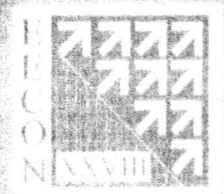
- G-6-PO13 Ageing Effect in CdSe Quantum Dots Embedded in Borosilicate Glass Matrix
Abhishhek Verma, Krili Sharma, P.K. Pandey, P.K. Bhatnagar, P.C. Mathur, Swati Nagpal
- G-6-PO14 Quantum Confinement of Nanocrystal Silicon
Mei Yin Chian, Pooi See Lee
- G-6-PO15 In-situ Investigation of HF-chemical Etching of AFM Localized Ultrathin Oxide on Si-substrate
Hong Jing Chung, Xianning Xie, Andrew Thye Shen Wee
- G-6-PO16 A Novel Coral-like Carbon Nanotubes
Ting kai Zhao, Yongning Liu, Jiewu Zhu
- G-6-PO17 Long Amorphous Carbon Nanotube Ropes Synthesized by an Arc Discharge at Controlled Temperature
Ting kai Zhao, Yongning Liu and Jiewu Zhu
- G-6-PO18 Screen-printed Carbon Nanotube Films for Field Emission Displays
Tao Feng
- G-6-PO19 Studies on Humidity Sensing Properties of Carbon Nanotubes Thin Films
Chunlan Cao, Wanlu Wang, Kejun Liao, Jie Yang
- G-6-PO20 Carbon Nanotubes Based Interconnect Technology
Pradeep Dixit, Jianmin Miao
- G-6-PO21 Formation and Stability of Carbon Nanorings
Liu Ping, Lu Chun, Zhang Yong Wei
- G-6-PO22 Gold and Silver Coated Carbon Nanotubes: A Superior Broad-band Optical Limiter
Kok Chung Chin, Ghee Lee Chong, Gohel Amarsinh, Weizhe Chen, Wei Ji, Hendry Izaac Elim, Chong Haur Sow, Andrew Thye Shen Wee
- G-6-PO23 Synthesis of Highly Oriented Carbon Nanotubes by Alloy Catalysts Using MPCVD
Chi-Min Lo, Yang-Ming Lu
- G-6-PO24 Using Pre-treated Silicon Substrates to Grow Nano-polycrystalline Diamond Film by MPCVD
Seri-Hui Chen, Yang-Ming Lu
- G-6-PO25 C60 Nanowhiskers: Synthesis, Characterization, and Self-Assembly
Guoqiang Tan, Hongyan Miao, Min Dong, Huijun Ren
- G-6-PO26 Effects of Carbon Source on the Titanium Nitride Powder Synthesized by Carbon Thermal Reduction
Xinglong Wu, Teng Qiu, Paul K. Chu
- G-6-PO27 Fabrication of Metal-Gated Carbon Nanotube Emitter Arrays and Investigation of their Electron Field Emission Properties
Jun Jiao, Jianfeng Wu, Lifeng Dong, Chiacheng Pan
- G-6-PO28 Structure and Electrical Properties of N-doped Y-junction Carbon Nanotubes
Leonard Deepak, A. Govindaraj, G.U. Kulkarni, C.N.R. Rao
- G-6-PO29 Carbon Nanotubes Synthesis on Cobalt-containing Amorphous Carbon Composite Films by Biased Thermal Chemical Vapor Deposition
Yuebin Zhang, Lei Huang, Shu Ping Lau
- G-6-PO30 Synthesis of Carbon Nanotube by HFCVD at Atmospheric Pressure
Tsampong Phetchakul, Somsak Cherirsirikul, Somkiat Supadech
- G-6-PO31 Preparation of CaSiO₃ Nanorods Using an Anionic Surfactant as Template in Aqueous Solution
Lin Cao, Zhihua Han
- G-6-PO32 Electrodeposition of Conducting Polymers into the Pores of Mesoporous Titanium Dioxide Films
Young-Uk Kwon, Min-hye Kim
- G-6-PO33 Using of Mesoporous Molecular Sieves for Nanoparticles Separation
A.A. Eliseev, I.V. Kolesnik, A.V. Lukashin, R.B. Vasiliev, Yu.D. Tretyakov
- G-6-PO34 Liquid Flame Spray Synthesis of Zirconia Nano-Particles
Silvia Koningin, Freddy Boey Yin Chiang, Alfred Tok ling Yong
- G-6-PO35 Synthesis & Characterization of Semiconductor Nanostructures
Javed Mazher, R.K. Pandey
- G-6-PO36 Formation of Nanocrystalline Structure in Copper by Accumulative Roll Bonding Process
C.Y. Lin, S.Z. Han, S.H. Lee, B.S. Han
- G-6-PO37 Characterization of Rare Earth-Ceria Co-doped Nanosized Tetragonal Zirconias Prepared by Hydrothermal Techniques
Nabil M. Ghoneim, Manal A. El-Hawary
- G-6-PO38 Raman Spectroscopic Studies of Nanocrystalline Lead (II) Fluoride
S. Ramasamy, P. Thangadurai, R. Kesavamoorthy
- G-6-PO39 Synthesis and Characterisation of Copper Oxide Catalysts Prepared by Precipitation Method
Hooi Hong Lau, Irmawati Ramli, Taufiq Yun Hin Yap
- G-6-PO40 Synthesis of Fullerodendron and its Photocatalytic Activity
Yutaka Takaguchi, Yasushi Yanagimoto, Sadao Tsuboi

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 28

28th Electrical Engineering Conference



Volume II

ไฟฟ้าสื่อสาร (CM)
คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ (CP)
การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DS)
อิเล็กทรอนิกส์ (EL)
งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรม (GN)



ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
20 - 21 ตุลาคม 2548
ณ โรงแรม เพิร์ล วิลเลจ อ.ภูเก็ต

EL013	การวิเคราะห์คุณสมบัติการสะท้อนของโครงสร้างแบรกรี่เฟกเตอร์จากสารประกอบกลุ่ม GaAlAs ในย่าน 1.3 μm หัสนตร์ โสคาบรรลุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	บุณยสิริ บุญเป็ง	สมชัย รัตนธรรมพันธ์	1121
EL014	ผลของควอนตัมคอตชานิคอินเดียมอาร์เซไนด์ที่มีต่อความคล่องตัวของอิเล็กตรอนในแกสเลียมอาร์เซไนด์ ธีรศักดิ์ ปัญญาวานิชกุล ทรงพล กาญจนชูชัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	สุวารี สุรประภาพิชย์ สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว	ศุภโชค ไทยน้อย	1125
EL015	Polarized Photoluminescence of Multi-Stacked Lateral Quantum Dot Molecules by Thin-Capping-and-Regrowth MBE Technique <i>Naparut Siripitakchai</i> <i>Songphol Kanjanachuchai</i> <i>Chulalongkorn University</i>	<i>Suwaree Suraprapapich</i> <i>Somsak Panyakeow</i>	<i>Suphachok Thainoi</i>	1129
EL016	Polarized Photoluminescence of InAs/GaAs Linearly Aligned Quantum Dots <i>Nan Thidar Chit Swe</i> <i>Pornchai Changmoang</i> <i>Chulalongkorn University</i>	<i>Suwaree Suraprapapich</i> <i>Chanin Wissawisthanon</i>	<i>Suphachok Thainoi</i> <i>Somsak Panyakeow</i>	1133
EL017	คุณสมบัติทางไฟฟ้าและการตอบสนองแสงของฟิล์มคาร์บอนกลายเพชร รังสรรค์ เมืองเหลือ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	โยธิน วงศ์ประเสริฐ	วิสุทธิ ฐิติรุ่งเรือง	1137
EL018	การศึกษาคุณสมบัติของฟิล์มบางซิลิกอนไดออกไซด์ที่เตรียมได้จากเทคนิคโซลเจล ศรีธัชชา เรืองเพชร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	สมศักดิ์ เข็ยศิริกุล		1141
EL019	การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธี CVD แบบลดความร้อนสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เต็มพงษ์ เพ็ชรกุล รัฐพงษ์ นาคาไชย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	สมศักดิ์ เข็ยศิริกุล	สมเกียรติ ศุภเศษ	1145

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสังเคราะห์ท่อคาร์บอนด้วยวิธี CVD แบบลดความร้อนสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

Synthesis of Carbon Nanotube by HFCVD for Electronic Devices

เดิมพงษ์ เพ็ชรกุล สมศักดิ์ เชียร์ศิริกุล สมเกียรติ สุขเกษ และ รัฐพงษ์ นาคาไชย
 ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520
 โทร.0-2739-0643 โทรสาร.0-2739-2384
 E-mail: kptoempo@kmitl.ac.th, s7060457@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวิธีการสังเคราะห์ท่อคาร์บอนสำหรับเป็นวัสดุของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ด้วยวิธี CVD แบบลดความร้อน แหล่งจ่ายไอระเหยคือเอทานอลผสมกับก๊าซไฮโดรเจนด้วยอัตราส่วนพอเหมาะ ใต้ลดความร้อนถูกทำให้ร้อนที่อุณหภูมิ 2000°C วัสดุฐานรองสามชนิด ได้แก่ ซิลิกอนที่มีเหล็กเป็นตัวละลายคาร์บอน และ สารประกอบกราไฟต์ อุณหภูมิฐานรองอยู่ในช่วง 550-750°C กระทำที่ความดันบรรยากาศ ผลปรากฏว่าท่อคาร์บอนสามารถสังเคราะห์ได้ และเป็นแบบผนังหลายชั้น นอกจากนี้ผลของสนามไฟฟ้ายังช่วยให้ท่อคาร์บอนสามารถเกิดขึ้นในแนวตั้ง

คำสำคัญ: ท่อคาร์บอน, HFCVD

Abstract

This paper presents the synthesis of carbon nanotubes (CNTs) for electronic devices material. The vapor source is ethanol mixed with hydrogen gas at appropriated ratio. The filament was heated up to around 2000°C. The substrates were silicon with iron catalysis, carbon and composite graphite. Substrate temperature was in the range of 550-750°C. CNTs can be grown and they were multi-walled. The electric field affected the CNTs growth in the vertical direction.

Keywords: carbon nanotube, HFCVD

1. บทนำ

ท่อคาร์บอนเป็นวัสดุที่มีความโดดเด่นของคุณสมบัติทางไฟฟ้าและคุณสมบัติทางกล[1, 2] ตัวอย่างเช่น สามารถเป็นทั้งโลหะและสารกึ่งตัวนำ ขึ้นอยู่กับการเกิดและการจับตัว มีความนำไฟฟ้าได้ดีกว่าทองแดง มีขนาดเล็กมาก นอกจากนี้ยังมีความทนต่อแรงทางกลได้ดีในทางอิเล็กทรอนิกส์พยายามหาสิ่งทดแทนในการลดขนาดของอุปกรณ์

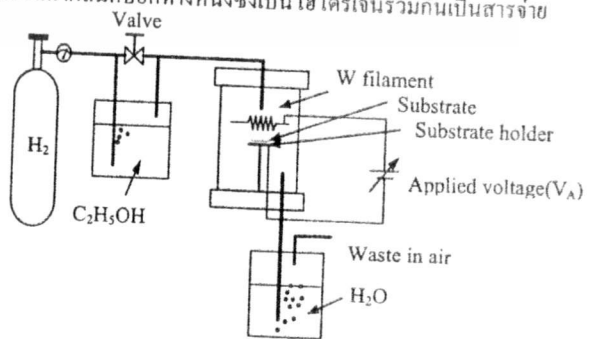
ในวงจรรวม วัสดุท่อคาร์บอนเป็นหนึ่งในสิ่งที่มีการคาดหมายว่าจะมาช่วยทดแทนข้อจำกัดดังกล่าว นอกจากนี้ยังมีการประยุกต์ใช้งานวัสดุนี้ในอุปกรณ์เซ็นเซอร์และอื่นๆ[3-5]

การสังเคราะห์ท่อคาร์บอนมีรายงานครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ. 1991[6] ซึ่งการสังเคราะห์สามารถทำได้หลายวิธีแต่วิธีการหลักๆแบ่งได้ 3 ประเภท วิธีแรกได้แก่ วิธีอาร์คดิซชาร์จ (arc discharge) วิธีที่สองได้แก่ laser ablation vaporization และวิธีที่สามได้แก่วิธีchemical vapor deposition(CVD) ท่อคาร์บอนที่ได้มีทั้งแบบผนังเดี่ยว (single-walled) และผนังหลายชั้น (multi-walled)[7-10]

ในรายงานนี้ได้นำเสนอวิธีการสังเคราะห์ท่อคาร์บอนด้วยวิธี HFCVD ที่ความดันบรรยากาศ ซึ่งเป็นความดันที่สูง ใช้สารแหล่งจ่ายเป็นสารเอทานอลผสมกับก๊าซไฮโดรเจน วิธีนี้จะสิ้นเปลืองสารแหล่งจ่ายเริ่มต้นน้อย ง่ายต่อการสร้างและมีอัตราการเกิดพอลิเมอร์และสามารถใช้สร้างท่อคาร์บอนสำหรับงานทางอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

2. การทดลอง

ระบบ HFCVD แสดงในแผนภาพรูปที่ 1 ประกอบด้วยท่อแก้ว pyrex มีลดทั้งสแกนเป็นลดความร้อนซึ่งถูกให้กระแสเข้าไปจากภายนอกทำให้เกิดความร้อน 2000°C นำวัสดุฐานรองวางบนแท่นจับซึ่งอยู่ใต้ลดความร้อน 3 มิลลิเมตร ก๊าซไฮโดรเจนถูกแบ่งเป็นสองทาง ทางหนึ่งผ่านสารเอทานอล ทำให้เกิดฟองอากาศพัดพาเอาไอระเหยของแอลกอฮอล์มาผสมกับอีกทางหนึ่งซึ่งเป็นไฮโดรเจนรวมกันเป็นสารจ่าย



รูปที่ 1 แผนภาพแสดงระบบ HFCVD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EL019

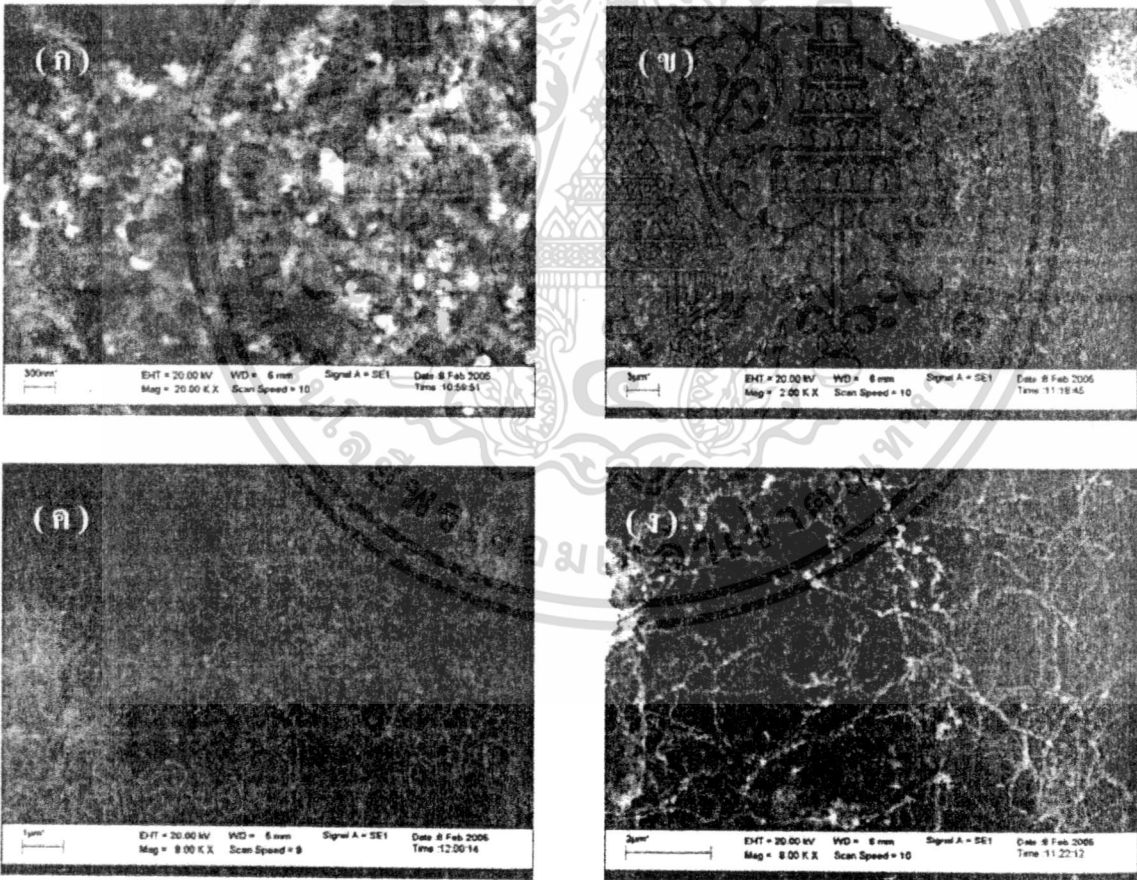
ไอระเหย อัตราส่วนทั้งสองส่วนถูกควบคุมด้วยมิเตอร์การไหลและวาล์ว
สนามไฟฟ้าสามารถให้กระแสบนนี้ที่ระหว่างไส้ลวดความร้อนและ
ฐานรองในขณะที่ทำการสังเคราะห์

ฐานรองซิลิกอนแบ่งเป็นสองกลุ่ม กลุ่มแรกนำไปขัดด้วยผง
เพชรขนาด 2-3 ไมโครเมตร อีกกลุ่มหนึ่งมีผิวหน้ามันวาว จากนั้นนำ
ทั้งหมดมาเคลือบสารละลายระหว่างเหล็กไนเตรด ($Fe(NO_3)_2$) กับ
เอทานอล จากนั้นปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง ฐานรองชนิดที่สอง
ได้แก่การนำเอาผงคาร์บอนมาอัดแน่น และฐานรองชนิดที่สามได้แก่การ
นำสารประกอบกราไฟต์จากไส้ดินสอด่ โดยที่ฐานรองคาร์บอนและ
สารประกอบกราไฟต์ไม่ได้มีการจุ่มลงในสารละลายเหล็กไนเตรดกับ
เอทานอลแต่อย่างใด

เงื่อนไขการสังเคราะห์กระทำที่อุณหภูมิฐานรองในช่วง 550-
750°C อัตราส่วนก๊าซไฮโดรเจนผ่านเอทานอลต่อไฮโดรเจนรวมคือ
8-10% ปริมาณเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์คือ 30 นาที กระทำที่ความดัน
บรรยากาศ นอกจากนี้ยังอาจใส่สนามไฟฟ้าระหว่างไส้ลวดความร้อน
และฐานรองด้วยแหล่งจ่ายแรงดันภายนอก

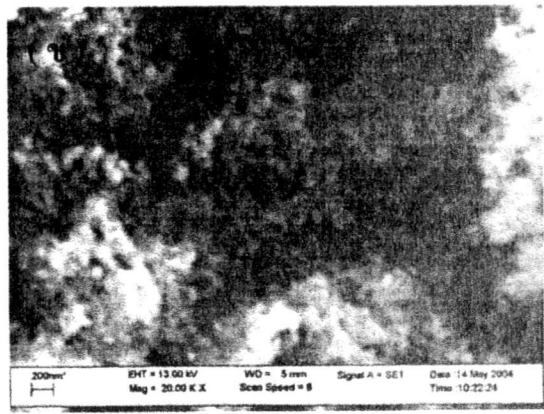
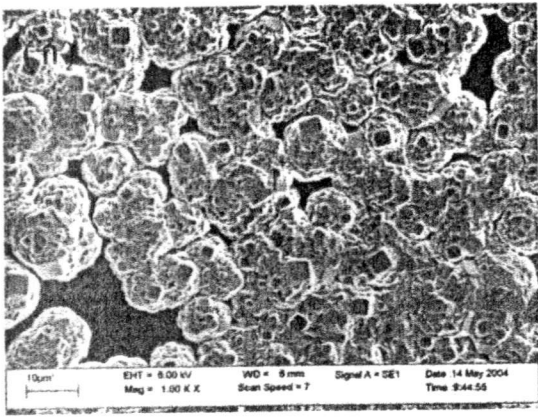
3. ผลการทดลองและการอภิปราย

รูปที่ 2 เป็นภาพถ่าย SEM (scanning electron microscope)
ของท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดขึ้นฐานรองต่างๆ รูปที่ 2(ก) เป็นพื้นผิวของ
ฐานรองซิลิกอนผิวมัน เคลือบด้วยวิธีดังกล่าวมาข้างต้นแล้ว
ซึ่งจะสังเกตเห็นท่อนาโนคาร์บอนปรากฏอยู่ เมื่อดูพื้นผิวรวมดังแสดงใน
รูป 2(ข) จะเห็นว่าท่อนาโนคาร์บอนเกิดขึ้นกระจายทั่วไปทั้งผิวหน้า รูป
ที่ 2(ค) เป็นท่อนาโนคาร์บอนที่เกิดขึ้นฐานรองอะมอร์ฟัสคาร์บอน ส่วน
รูปที่ 2(ง) เป็นภาพถ่ายพื้นผิวของฐานรองสารประกอบกราไฟต์ จะ
สังเกตเห็นท่อนาโนคาร์บอนเกิดขึ้นอย่างหนาแน่น โดยฐานรอง
สารประกอบกราไฟต์จะมีความหนาแน่นของท่อนาโนคาร์บอนมากที่สุด
เมื่อนำฐานรองสารประกอบกราไฟต์มาวิเคราะห์ด้วยวิธี XRF (X-ray
fluorescence spectroscopy) ดังแสดงในตารางที่ 1 จะเห็นองค์ประกอบ
ต่างๆที่มีออกไซด์ของโลหะเป็นสารประกอบนอกเหนือจากคาร์บอน ซึ่ง
ออกไซด์ของโลหะเหล่านี้ น่าจะทำหน้าที่เป็นคะตะไลต์เหมือนในกรณี
ของซิลิกอน



รูปที่ 2 ภาพถ่ายจาก SEM ของท่อนาโนคาร์บอน (ก) ฐานรองซิลิกอนผิวมันวาวถูกเคลือบด้วยคะตะไลต์เหล็ก (ข) ภาพมุมมองข้างของพื้นที่ผิวฐานรอง
ซิลิกอนผิวมันวาวถูกเคลือบด้วยคะตะไลต์เหล็ก (ค) ฐานรองอะมอร์ฟัสคาร์บอน (ง) ฐานรองสารประกอบกราไฟต์ซึ่งกระทำที่อุณหภูมิของ
ฐานรอง 550-750°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3 ภาพถ่ายจาก SEM ที่อัตราส่วนไอระเหยมากกว่า 10% ปริมาตร (ก) ฐานรองซิลิกอนที่ขัดด้วยผงเพชรและเคลือบคตะโลดเหล็ก อุณหภูมิฐานรองมากกว่า 850°C (ข) ฐานรองซิลิกอนที่มีการขัดด้วยผงเพชรและเคลือบคตะโลดเหล็ก อุณหภูมิฐานรองประมาณ 850°C หรือต่ำกว่า

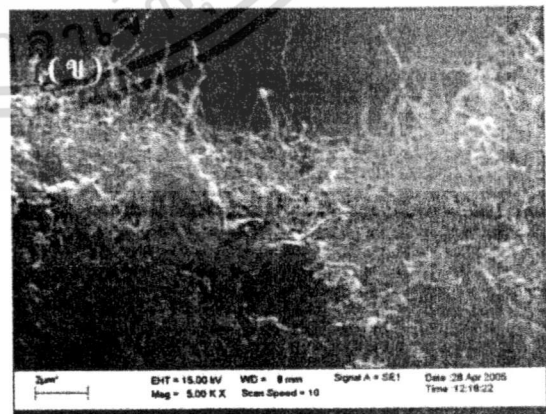
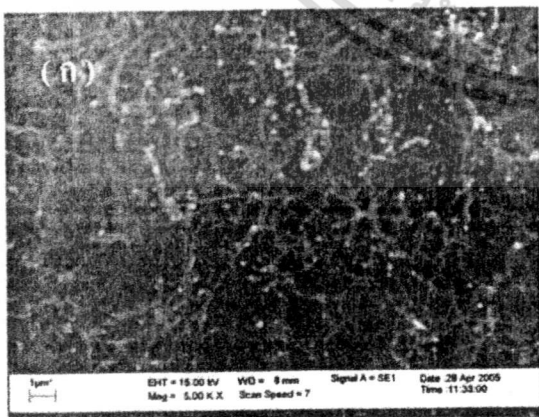
รูปที่ 3 เป็นภาพถ่าย SEM ของฐานรองซิลิกอนที่ขัดด้วยผงเพชรและเคลือบคตะโลดเหล็ก รูปที่ 3(ก) เป็นภาพถ่าย SEM ในกรณีที่อัตราส่วนไอระเหยสูงคือมากกว่า 10% ปริมาตร กระทำที่อุณหภูมิฐานรองสูงกว่า 850°C ซึ่งปรากฏว่า จะเกิดเป็นผลึกเพชรขึ้นแทน แสดงว่าอุณหภูมิสูงเกินช่วงการเกิดท่อนาโนคาร์บอน แต่เป็นช่วงที่เกิดเพชร อัตราส่วนของสารไอระเหยในที่นี้ใช้ค่าเดียวกัน แสดงว่า ที่อุณหภูมิฐานรองมีส่วนกำหนดการเกิดวัสดุบนฐานรอง รูปที่ 3(ข) เป็นกรณีที่ลดอุณหภูมิของฐานรองลงต่ำกว่า 850°C โดยกระทำที่เงื่อนไขเดิม ซึ่งจากรูปจะสังเกตเห็นอะมอร์ฟัสคาร์บอนเกิดปกคลุมที่พื้นผิวของฐานรอง และยังสังเกตเห็นท่อนาโนคาร์บอนบนพื้นผิวอะมอร์ฟัสคาร์บอนเช่นกัน

ซึ่งอัตราส่วนของสารแหล่งจ่ายที่มีค่าสูง ทำให้อะมอร์ฟัสคาร์บอนเกิดได้ง่ายและทำให้ท่อนาโนคาร์บอนเกิดน้อยลง

รูปที่ 4 แสดงภาพถ่าย SEM ของท่อนาโนคาร์บอนบนฐานรองสารประกอบกราไฟต์ เมื่อมีสนามไฟฟ้าในขณะที่ทำการสังเคราะห์ โดยให้แรงดัน 600 โวลต์ไปที่ระหว่างไส้หลอดความร้อนกับฐานรองดัง แสดงในรูปที่ 1 รูปที่ 4(ก) แสดงภาพด้านบน ซึ่งจะสังเกตเห็นลักษณะของท่อตั้งตรงในแนวตั้งมากกว่าในกรณีไม่ให้สนามไฟฟ้าอย่างชัดเจน รูปที่ 4(ข) แสดงภาพตัดขวางของท่อนาโนคาร์บอน ซึ่งจะเห็นว่าลักษณะเส้นในแนวตั้งเพิ่มมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม แม้จะเพิ่มสนามไฟฟ้ามากขึ้น ท่อนาโนคาร์บอนก็ไม่สามารถที่จะเป็นเส้นตรงในแนวตั้ง ได้อย่างสมบูรณ์

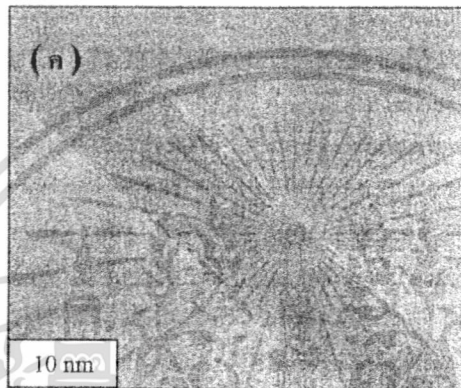
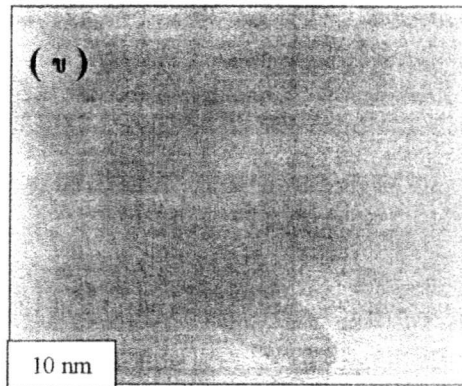
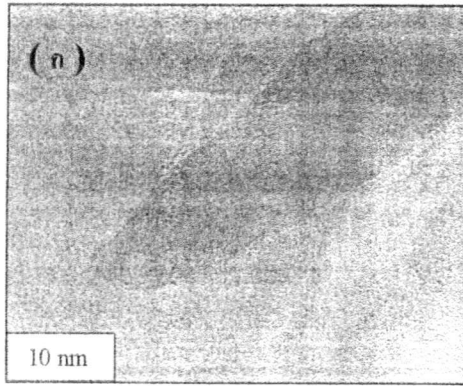
ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบจาก XRF

Oxide composition	MgO	Al ₂ O ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	FeO ₃
Graphite substrate	2.43%	22.5%	1.05%	2.65%	1.33%	8.99%



รูปที่ 4 ภาพถ่ายจาก SEM ของท่อนาโนคาร์บอนบนฐานรอง สารประกอบกราไฟต์ที่ให้แรงดัน 600 โวลต์ระหว่างไส้ของหลอดกับฐานรอง (ก) ภาพด้านบน (ข) ภาพตัดขวาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแต่งลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 28 (EECON-28) 20-21 ตุลาคม 2548 มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์



รูปที่ 5 ภาพถ่าย TEM ของท่อนาโนคาร์บอน (ก) ฐานรองซิลิกอนที่มีกะละไลต์เป็นเหล็ก (ข) ฐานรองอะมอร์ฟิคคาร์บอน (ค) สารประกอบกราฟไฟด์

รูปที่ 5 แสดงภาพถ่ายด้วยเทคนิค TEM (transmission electron microscope) ของท่อนาโนคาร์บอนที่ฐานรองชนิดต่างๆ จากภาพถ่ายสามารถแสดงชนิดของท่อนาโนคาร์บอนได้ว่าเป็นแบบผนังหลายชั้น และมีปลายปิด เส้นผ่านศูนย์กลางมีขนาดเล็กกว่า 10 นาโนเมตร

4. สรุปผลการทดลอง

การสังเคราะห์ฟิล์มนาโนคาร์บอนด้วยเอทานอลผสมไฮโดรเจนที่ความดันบรรยากาศสามารถทำได้ เงื่อนไขการเกิดมีอัตราส่วนของก๊าซไฮโดรเจนที่เงื่อนไขเดียวกับการเกิดเพชร ส่วนอุณหภูมิฐานรองจะอยู่ในช่วงต่ำกว่าการเกิดเพชร การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธีนี้ สามารถสังเคราะห์ลงบนฐานรองลักษณะต่างๆ ได้ ท่อนาโนคาร์บอนที่ได้นี้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 นาโนเมตรหรือน้อยกว่า เป็นแบบผนังหลายชั้นที่มีความยาวในระดับไมโครเมตร การให้สนามไฟฟ้าไปที่ระหว่างไส้หลอดความร้อนกับฐานรองมีผลต่อการเกิดท่อนาโนคาร์บอนในแนวตั้ง วิธีการนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการสร้างวัสดุท่อนาโนคาร์บอนสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ ได้รับเงินสนับสนุนจากสภาวิจัยแห่งชาติ

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] N. Hamada, Mater. Sci. Eng., B 19 (1999) 181.
- [2] R. F. Service, Science 271 (1996) 1232
- [3] A. Badzian, T. Badzian, E. Breval, A. Piotrowski, Thin Solid Films 398 (2001) 170.
- [4] I. Sayago, E. Lafuente, M.C. Horriilo, W.K. Maser, A.m. Benito, R. Navaro, E.P. Urriolabeitia, M.T. Martinez, J. Gutierrez, Synthetic Metal 148 (2005) 15.
- [5] J. Suehiro, G. Hiroshi, W Ding, M. Hara, Sens. Actuators B (2004).
- [6] S. Iijima, Nature (1991) 359, 56
- [7] C. Journet, W.K. Maser, P. Bernier, A. Loiseau, M.R. de la-Chapelle, S. Lefrant, Nature 388, (1997) 756.
- [8] Z.F. Ren, Z.P. Huang, J.H. Wang, M.P. Siegal, P.N. Provencio, Science 282 (1998) 1105.
- [9] A. Thess, Science 273 (1996) 483.
- [10] C.J. Lee, D.W. Kim, Y.H. Lee, J.M. Kim, Chem. Phys. Lett 299 (1999) 97.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	I
การนำเสนอผลงานโครงการวิจัยในการประชุมวิชาการ	II
สารบัญ	III
สารบัญตาราง	V
สารบัญรูป	VI
บทที่ 1 นาโนเทคโนโลยี	1
บทที่ 2 คาร์บอนนาโนทิวส์และนาโนเทคโนโลยี	3
2.1 การค้นพบคาร์บอนนาโนทิวส์	4
2.2 โครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวส์	4
2.3 พื้นฐานเบื้องต้นของคาร์บอนนาโนทิวส์	6
2.3.1 Single Walled Carbon nanotubes (SWCNTs)	6
2.3.2 Multi Walled Carbon nanotubes (MWCNTs)	8
2.4 การนำคาร์บอนนาโนทิวส์ไปใช้งาน	9
2.4.1 ใช้เป็นส่วนผสมในวัสดุอื่นๆ	9
2.4.2 ประยุกต์ใช้เป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน	10
2.4.3 ประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์	10
2.4.4 นำไปสร้างเป็นนาโนโพรบ (probe) เซนเซอร์	10
2.4.5 ใช้ในการกักเก็บพลังงาน	10
บทที่ 3 วิธีการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวส์	12
3.1 กลไกการเกิดของคาร์บอนนาโนทิวส์	12
3.1.1 Base Growth	12
3.1.2 Tip Growth	12
3.2 วิธีการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวส์	13
3.2.1 วิธี Arc discharge	13
3.2.2 วิธี Laser ablation	15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3	วิธี CVD	16
3.2.3.1	Thermal Chemical Vapor Deposition	16
3.2.3.2	Plasma enhanced chemical vapor deposition (PE-CVD)	18
3.2.3.3	Vapor phase growth	18
3.2.3.4	High pressure CO disproportionate process	18
3.2.3.5	Hot filament enhance CVD (HF-CVD)	18
บทที่ 4	กระบวนการสร้างฟิล์มโลหะด้วยวิธีการสเปคเตอร์บนฐานรองซิลิคอน	20
บทที่ 5	การทดลองและผลการทดลองการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ด้วยวิธี CVD แบบ ลวดความร้อน	25
5.1	การสังเคราะห์ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวป์ด้วยวิธีHFCVDที่ความดันบรรยากาศ	25
5.2	การทดลองการสังเคราะห์ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวป์บนฐานรองชนิดต่างๆ	27
5.3	การทดลองการสังเคราะห์ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวป์ให้สม่ำเสมอในบริเวณกว้าง	31
บทที่ 6	บทสรุป	35
	เอกสารอ้างอิง	36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
3.1	สรุปวิธีการสังเคราะห์ CNTs 3 วิธีหลัก	17
4.1	เงื่อนไขการสปีดเตอร์ Ni ในการทดลอง	23
5.1	ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบจาก XRF	28



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	ภาพของเส้นผมมนุษย์จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน	1
2.1	Ijima ผู้ค้นพบ CNTs	4
2.2	การม้วนของแผ่นกราฟไฟต์	5
2.3	การเปรียบเทียบระหว่าง Fullerenes กับ Nanotubes	6
2.4	ลักษณะของSWCNTs ทั้ง 3 ชนิด	7
2.5	โครงสร้างของ SWCNTs	8
2.6	โครงสร้างของ MWCNTs	9
2.7	ใช้คาร์บอนนาโนทิวป์ในการสร้างทรานซิสเตอร์	11
2.8	การนำคาร์บอนนาโนทิวป์ไปประยุกต์ใช้งาน	11
3.1	กลไกการเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์แบบ Base Growth และ Tip Growth	13
3.2	วิธี Arc discharge	14
3.3	วิธี Laser ablation	15
3.4	วิธี Chemical vapor deposition	16
3.5	ระบบของ HF-CVD	19
4.1	Sputtering System Diagram ของเครื่อง SPE-210 Diode Sputtering System	20
4.2	ระบบการสปีดเตอร์แบบอาร์เอฟไดโอด	21
4.3	แผนภาพภายใน chamber ของเครื่องสปีดเตอร์	22
4.4	Panel of RF Generator	24
4.5	Panel of Pump Switch ,Ionizing Gauge and Heater	24
5.1	แผนภาพแสดงระบบ HFCVD	26
5.2	ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	26
5.3	ภาพถ่ายจาก SEM ของท่อคาร์บอน	28
5.4	ภาพถ่ายจาก SEM ที่อัตราส่วนไอระเหยมากกว่า10% ปริมาตร	29
5.5	ภาพถ่ายจาก SEM ของท่อคาร์บอนนาโนทิวป์บนฐานรอง สารประกอบกราฟไฟต์ที่ให้แรงดัน 600 โวลต์ระหว่างที่ใส่ของขดลวดกับฐานรอง	30
5.6	ภาพถ่าย TEM ของคาร์บอนนาโนทิวป์	31
5.7	ภาพถ่าย SEM พื้นผิวฐานรองซิลิกอนที่สปีดติกเกิดเป็นเวลา 90 วินาที	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 5.8 ภาพถ่าย SEM พื้นผิวฟิล์มคาร์บอนนาโนทิว์บนฐานรองซิลิกอนที่สปีดนิกเกิล
90 วินาที 33
- 5.9 ภาพถ่าย SEM พื้นผิวฟิล์มคาร์บอนนาโนทิว์บนฐานรองทองแดงซูปนิกเกิล 34



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

นาโนเทคโนโลยี(Nanotechnology)

อีริก เดร็กซ์เลอร์ (Eric Drexler) ถือได้ว่าเป็นเจ้าพ่อแห่งวงการนาโนฯ และได้เสนอคำว่า นาโนเทคโนโลยี ในปี ค.ศ.1997 ระหว่างที่Drexlerเรียนปริญญาตรีที่มหาวิทยาลัย MIT เขาได้เกิดความคิด จินตนาการขึ้นว่า ในอนาคตอาจจะมีกองทัพหุ่นยนต์จิ๋วที่สามารถนำโมเลกุลและอะตอมของสารธรรมดาทั่วไปมาต่อเรียงกันด้วยความแม่นยำ เพื่อสร้างเป็นสารใหม่ได้ตามที่ต้องการในเวลาเพียงไม่กี่ชั่วโมง ด้วยเครื่องจักรเรียงอะตอมนี้ เราอาจจะเปลี่ยนสารเคมีต่างๆ ไป เป็นสารต่างๆ เช่น น้ำมันเชื้อเพลิง เพชร จรวด อะไรก็ได้ตามที่ต้องการ ในกระแสเลือดเครื่องจักรจิ๋วจะเข้าไปรักษาโรคต่างๆ ได้ ในอากาศพวกมันอาจจะช่วยกำจัดมลพิษได้ ความคิดของDrexlerได้ชักจูงกลุ่มนักเคมี นักคอมพิวเตอร์ วิศวกรจำนวนมากให้หันมาสนใจศึกษาด้านวิทยาศาสตร์ที่ระดับนาโนเมตร

คำว่า นาโน (Nano) แปลว่าคนแคระในภาษากรีก แต่โดยมากจะเป็นคำที่เรียกกันติดปาก และย่อมาจากคำว่า นาโนเมตร (Nanometre) ซึ่งหมายถึง สิบลำดับลบเก้าเมตร หรือ 1 ส่วนพันล้านของ 1 เมตร คำนิยามอย่างคร่าว ๆ ของ นาโนศาสตร์ (Nanoscience) ก็คือการศึกษาปรากฏการณ์ทางธรรมชาติของวัตถุที่มีขนาดในช่วงนาโนเมตร (ประมาณ 1- 1000 นาโนเมตร) ส่วนนาโนเทคโนโลยี (Nanotechnology) ก็จะหมายถึงการสร้างและประยุกต์วัตถุนาโนนี้มาใช้ให้เป็นประโยชน์ จุดมุ่งหมายสูงสุดของนาโนเทคโนโลยีก็คือความสามารถที่จะสร้างและจัดเรียงอนุภาคต่างๆ ได้ตามความต้องการ เพื่อสร้างสารหรือโครงสร้างของสารในแบบใหม่ที่ให้คุณสมบัติพิเศษที่อาจจะไม่เคยมีก่อน



รูปที่ 1.1 ภาพของเส้นผมมนุษย์จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในเชิงเปรียบเทียบ ขนาด 1 นาโนเมตรนี้จะใหญ่กว่าขนาดของอะตอมประมาณสิบเท่าขึ้นไป แต่เล็กกว่าขนาดของชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ในตัวไมโครชิพวงจรร (IC microchip) ในปัจจุบันประมาณร้อยเท่า ถ้าจะอ้างถึงของใกล้ตัว เช่น เส้นผมของคนเราซึ่งขนาดประมาณ 0.1 มิลลิเมตร ขนาด 1 นาโนเมตรก็จะเล็กกว่าเส้นผมประมาณหนึ่งแสนเท่า ที่กล่าวมานี้บางทีก็ยังมีภาพไม่ออกว่านาโนเมตรมันเล็กแค่ไหน โลกของเราที่มีขนาดประมาณ 10,000 กิโลเมตร หรือ 10,000,000 เมตร มีขนาดใหญ่เป็นประมาณหนึ่งแสนเท่าของสนามฟุตบอล (100 เมตร) ถ้าสมมุติว่าเราย่อส่วนโลกใบใหญ่ที่เราอยู่กันนี้ให้มีขนาดเท่าเส้นผม ตัวสนามฟุตบอลก็จะย่อส่วนลงไปในช่วงของ 1 นาโนเมตร ซึ่งน่าจะพอเห็นได้ว่าการไปสร้างวัตถุนาโนในโลกใบจิ๋วขนาดเท่าเส้นผม ไม่ใช่เป็นเรื่องง่าย

นาโนเทคโนโลยี เป็นเทคโนโลยีที่กำลังเริ่มและต้องเข้ามาอย่างแน่นอน เพียงแต่จะออกมาและลงตัวในรูปแบบใด งานวิจัยครั้งนี้ ต้องการที่จะศึกษาวิจัยนาโนเทคโนโลยีในส่วนของวัสดุที่จะนำมาสร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งถือว่าเป็นเพียงส่วนเล็กๆ ในศาสตร์แขนงนี้ โดยจะศึกษาเกี่ยวกับพื้นฐานของเทคโนโลยีการสร้างวัสดุนาโนที่เรียกว่า คาร์บอนนาโนทิวบ์ (Carbon nanotube) โดยเริ่มต้นสังเคราะห์และทำการวิเคราะห์ฟิล์มบางคาร์บอนนาโนทิวบ์ โดยมีจุดประสงค์เพื่อที่จะนำไปประยุกต์ใช้งาน การศึกษาในครั้งนี้ อาศัยศักยภาพภายในประเทศทั้งหมด ซึ่งผู้วิจัยหวังว่างานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อสังคม และเป็นส่วนหนึ่งของสาขานาโนเทคโนโลยี

เนื้อหาของงานวิจัยนี้ จะเริ่มต้นตั้งแต่การสร้างฟิล์มนาโนทิวบ์ลงบนฐานรองชนิดต่างๆ อาทิเช่น สารประกอบกราไฟต์ คาร์บอน ทองแดงและซิลิกอน ต่อจากนั้นทำการหาเงื่อนไขการสร้างฟิล์ม และพัฒนาการสังเคราะห์ฟิล์มให้มีพื้นที่ใหญ่พอเพียง ที่จะนำไปสร้างเป็นอุปกรณ์ต่างๆ ศึกษาความสม่ำเสมอของฟิล์ม รวมถึงผลของสนามไฟฟ้าที่มีผลต่อการสังเคราะห์ฟิล์ม

บทที่ 2

คาร์บอนนาโนทิวบ์และนาโนเทคโนโลยี

นาโนเทคโนโลยี มีผลกระทบและเกี่ยวข้องกับศาสตร์ต่างๆหลายสาขา ทั้งทางด้านเคมี ฟิสิกส์และชีววิทยา โดยเราสามารถจัดกลุ่มเพื่อความสะดวกในการศึกษา ซึ่งสาขาหลักๆที่เกี่ยวข้องกับวัสดุนาโนเทคโนโลยีที่พอจำแนกได้มีประมาณ 5 สาขาดังนี้คือ

อนุภาคนาโน เป็นการศึกษาเกี่ยวกับเรื่องผงและอนุภาคขนาดเล็ก โดยจะมีประโยชน์ในทางด้านที่เราต้องพยายามสร้างมูลค่าเพิ่มจากอนุภาคนาโนเหล่านั้นด้วยการใส่เทคโนโลยีของอุปกรณ์เข้าไป เพื่อให้ทำให้อุปกรณ์เหล่านั้นมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยอุปกรณ์เป้าหมายจะเป็นอุปกรณ์ประเภท เช่น เซอร์ตรวจจับก๊าซ อุปกรณ์ตรวจวินิจฉัย วัสดุดูดซับกลิ่นสารพิษ วัสดุเสริมแรง

วัสดุผสมผสานนาโน เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการผสมผสานที่เกิดขึ้นในระดับเล็ก ทำให้แสดงคุณสมบัติพิเศษในระดับอะตอมออกมา เป้าหมายในการวิจัยทางด้านนี้ คือ แผ่นฟิล์มและบรรจุภัณฑ์ที่ต้านทานการซึมผ่านของก๊าซและความชื้น วัสดุเสริมแรงเพื่อใช้ในการแพทย์ วัสดุสำหรับเครื่องสำอาง เช่น เซอร์ตรวจจับก๊าซ

เส้นใยนาโน เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการนำวัสดุนาโนขึ้นรูปให้เป็นเส้นใยที่มีขนาดนาโนซึ่งจะแสดงคุณสมบัติพิเศษต่างๆหลายอย่างออกมา เป้าหมายของการวิจัยในด้านนี้คือ เช่น เซอร์ตรวจจับก๊าซและสารเคมี วัสดุส่งสารออกฤทธิ์ แผ่นกรองอนุภาค ผิวหนังเทียม

โครงสร้างนาโนของคาร์บอน และโพรขนานาโน เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการวางแผนที่จะพัฒนาให้ได้ผลิตภัณฑ์พวก ท่อนาโนคาร์บอนที่จะนำไปทำอุปกรณ์เช่น เซอร์ วัสดุเสริมความแข็งแรงให้ผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น ถ้วยชามเซรามิก กระฉกเสริมแรง วัสดุโพรขนานาโนเพื่อทำเยื่อเมมเบรน

ฟิล์มบางนาโน เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการวางแผนและพัฒนาที่จะส่งเสริมเรื่องของ การเป็นศูนย์สุขภาพและอาหาร ผลิตภัณฑ์จากวัสดุนาโนในกลุ่มนี้จะมีลักษณะเป็นวัสดุทำหน้าที่ซึ่งใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจวินิจฉัยโรคและวัสดุที่มีขนาดนาโน จะเรียกว่าเป็น เซอร์ก็ได้ แต่จะเป็น เซอร์ที่พัฒนาให้เหมาะกับประเทศไทย ผลิตภัณฑ์ในกลุ่มนี้ก็คือ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จากฟิล์มบางอินทรีย์ เช่น หลอดไฟ แบบแบนเรียบ เซลล์สุริยะแบบอินทรีย์ เป็นต้น

จากสาขาดังกล่าว ผู้วิจัยมีความสนใจในสาขานาโนคาร์บอน และมีจุดประสงค์เพื่อนำวัสดุนี้มาใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ อาทิเช่น อุปกรณ์เซนเซอร์ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1 การค้นพบคาร์บอนนาโนทิวบ์

เป็นความบังเอิญที่ Sumio Iijima (นักอิเล็กทรอนิกส์ ไมโครสโคปของบริษัท NEC) สังเคราะห์ฟูลเลอร์เร็นซ์(fullerene) โดยวิธี arc-evaporation แล้วพบว่าที่ขั้วคาโทดเกิดมีวัสดุโครงสร้างแบบกราฟไฟต์ที่เป็นทั้งอนุภาคขนาดนาโนและท่อนาโน ซึ่งอันหลังนี้ไม่เคยมีผู้ใดสังเกตเห็นมาก่อนต่อมาทีมงานของ Iijima สามารถสังเคราะห์วัสดุดังกล่าวในปริมาณมากได้ โดยปรับสภาวะของการทำ arc-evaporation ท่อนาโนที่เกิดขึ้นนี้มีลักษณะเป็นท่อกราฟไฟต์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3-10 นาโนเมตร (nm) และมีความยาวในช่วงหนึ่งไมโครเมตร และเป็นท่อซ้อนกัน 2-50 ชั้น เรียกว่า multi-walled CNT (MWNT) ต่อมามีการสร้างและทำให้บริสุทธิ์แพร่หลายไปตามห้องปฏิบัติการต่างๆ ทั่วโลก รวมถึงการพัฒนาเป็นท่อเดี่ยวที่เรียกว่า single-walled CNT (SWNT) ในอีกสองปีต่อมา



รูปที่ 2.1 Iijima ผู้ค้นพบ CNTs

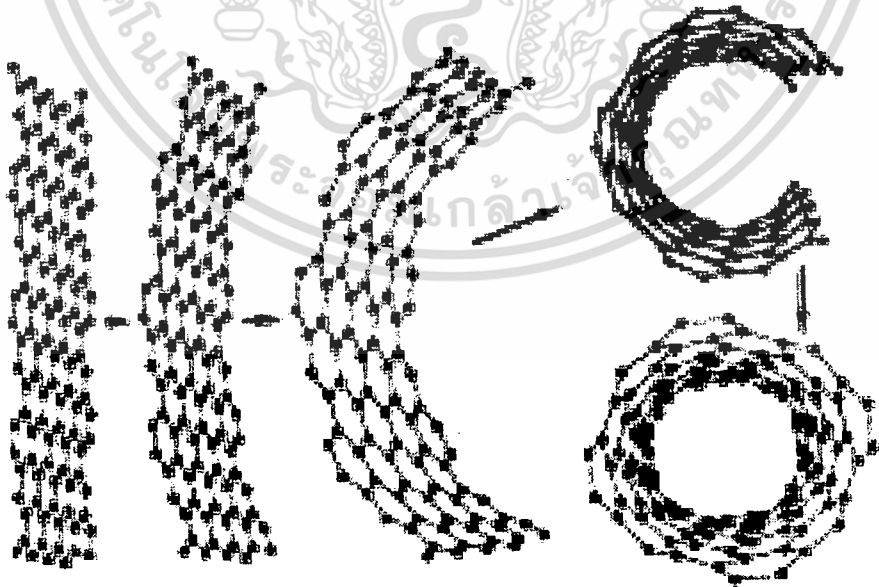
2.2 โครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวบ์

โครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวบ์ สามารถพิจารณาได้จากการห่อแผ่นกราฟไฟต์ (Graphite) ซึ่งปกติคาร์บอนนาโนทิวบ์จะมีเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กมากๆ (ระดับนาโนเมตร) ทำให้สามารถมองเป็นโครงสร้างหนึ่งมิติได้ โดยโครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวบ์ประกอบด้วยสองส่วนที่แยกออกจากกันมีคุณสมบัติแตกต่างกันทางฟิสิกส์และเคมี ส่วนแรกคือส่วนผนังของท่อ และส่วนที่สองคือฝาปิดของท่อ โดยส่วนฝาปิดของท่อมีลักษณะเป็นครึ่งทรงกลมที่ได้มาจากฟูลเลอร์เร็นซ์ เช่น C_{60} หรือ C_{70}

ฟูลเลอร์เร็นซ์(Fullerenes) มีการจัดเรียงอะตอมคาร์บอนอยู่ในรูปหกเหลี่ยมและห้าเหลี่ยม

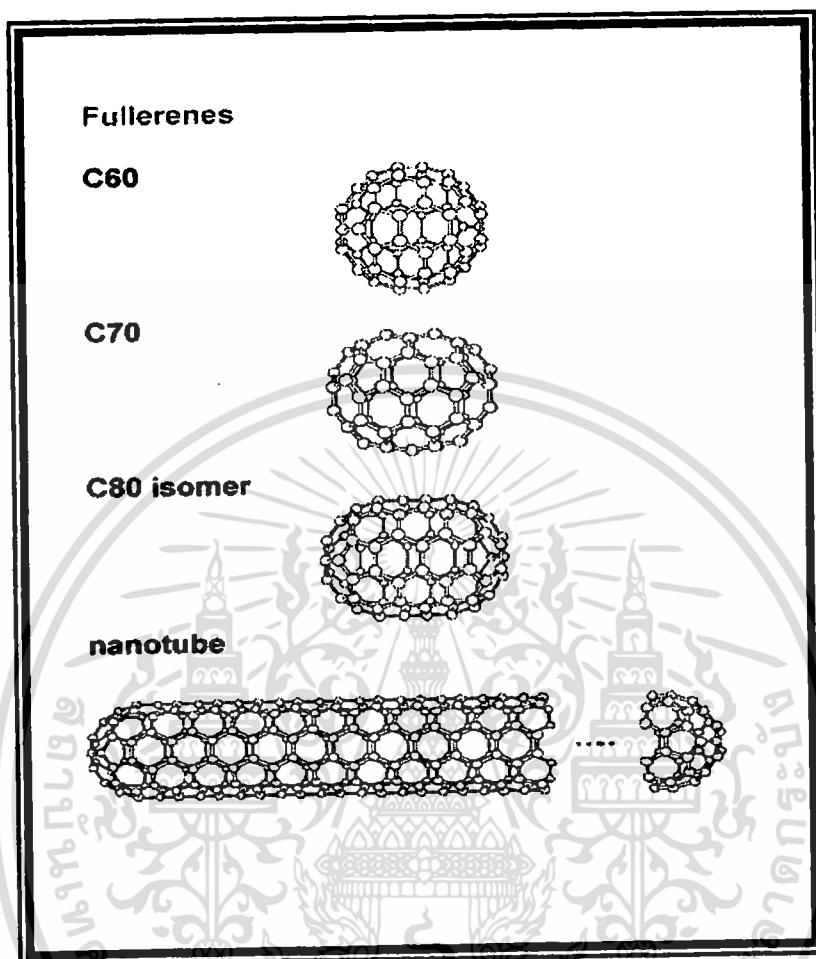
ในรูปแบบทางฟิสิกส์ที่สามารถอธิบายได้โดยใช้ทฤษฎีรูปหลายเหลี่ยมของ Euler ที่ว่ารูปห้าเหลี่ยมเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12 รูป ในรูปของโครงสร้างฟลาปิดที่ประกอบด้วยรูปห้าเหลี่ยมและรูปหกเหลี่ยมเท่ากัน โดยการรวมกันของรูปห้าเหลี่ยม 5 อัน ผลลัพธ์ทำให้เกิดความโค้งของพื้นผิวที่เป็นลักษณะปริมาตรปิด กฏข้อที่ 2 ในการใช้รูปห้าเหลี่ยม จะต้องอยู่ในระยะทางระหว่างห้าเหลี่ยมด้วยกันบนพื้นผิวทรงกลมในระยะทางที่มากที่สุด เพื่อที่จะได้ความโค้งที่มีค่าน้อยที่สุด และความเค้นพื้นผิวน้อยที่สุด ผลลัพธ์ก็คือ โครงสร้างที่มีความเสถียรมากขึ้น และ โครงสร้างที่เสถียรและเล็กที่สุดที่สามารถสร้างได้โดยวิธีนี้ก็คือ C_{60} ส่วนโครงสร้างที่ใหญ่ขึ้นก็คือ C_{70} และอื่นๆ คุณสมบัติอื่นๆ ซึ่งฟูลเลอร์เร็นซ์ ประกอบขึ้นจากคาร์บอนอะตอมที่เป็นเลขคู่ เพราะว่าการเพิ่มรูปหกเหลี่ยมเพื่อให้เป็นโครงสร้างที่เป็นอยู่ได้หมายถึงการเพิ่มอะตอมของคาร์บอนคุณสมบัติของนาโนทิวบ์ จึงคล้ายกับประกอบเป็นรูปทรงกระบอก โดยสร้างขึ้นมาจากแผ่นกราฟไฟต์ที่มีขนาดแน่นอนและห่อขึ้นมาในทิศทางที่แน่นอนทำให้เป็นทรงกระบอกที่สมมาตรกัน โดยได้แสดงการม้วนของแผ่นกราฟไฟต์ในรูปที่ 2.2 ซึ่งสามารถม้วนแผ่นกราฟไฟต์ ได้ในทิศทางที่แตกต่างกันเพื่อสร้างเป็นทรงกระบอก ได้คาร์บอนสองอะตอม แผ่นกราฟไฟต์ จะถูกเลือกตัวที่หนึ่งใช้เป็นจุดเริ่มต้น โดยแผ่นจะหมุนจนกระทั่งอะตอมตัวที่สองมาบรรจบกัน โดยเวกเตอร์จากอะตอมแรกไปอีกอะตอมหนึ่งเรียกว่า chiral เวกเตอร์ และความยาวของมันเท่ากับเส้นรอบวงของนาโนทิวบ์ โดยทิศทางของแกนนาโนทิวบ์จะตั้งฉากกับ chiral เวกเตอร์ คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่มี chiral เวกเตอร์แตกต่างกัน จะมีคุณสมบัติต่างกันด้วย เช่น คุณสมบัติทางแสง คุณสมบัติทางกลศาสตร์และ คุณสมบัติทางไฟฟ้า



รูปที่ 2.2 การม้วนของแผ่นกราฟไฟต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 การเปรียบเทียบระหว่าง Fullerenes กับ Nanotubes

2.3 พื้นฐานเบื้องต้นของคาร์บอนนาโนทิวบ์

โครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวบ์สามารถตรวจสอบได้โดย เครื่อง Transmission Electron Microscopy (TEM) และ Scanning Tunneling Microscopy (STM) ซึ่งสามารถยืนยันได้ว่านาโนทิวบ์มีโครงสร้างเป็นทรงกระบอก ที่เกิดจากแลททิซที่มีลักษณะคล้ายรังผึ้งซึ่งอยู่ในลักษณะของแผ่น Graphite ที่มีลักษณะเป็นชั้นของอะตอมเพียงชั้นเดียว คาร์บอนนาโนทิวบ์ (Carbon Nanotubes) สามารถแบ่งเป็น 2 ชนิดใหญ่ๆคือ

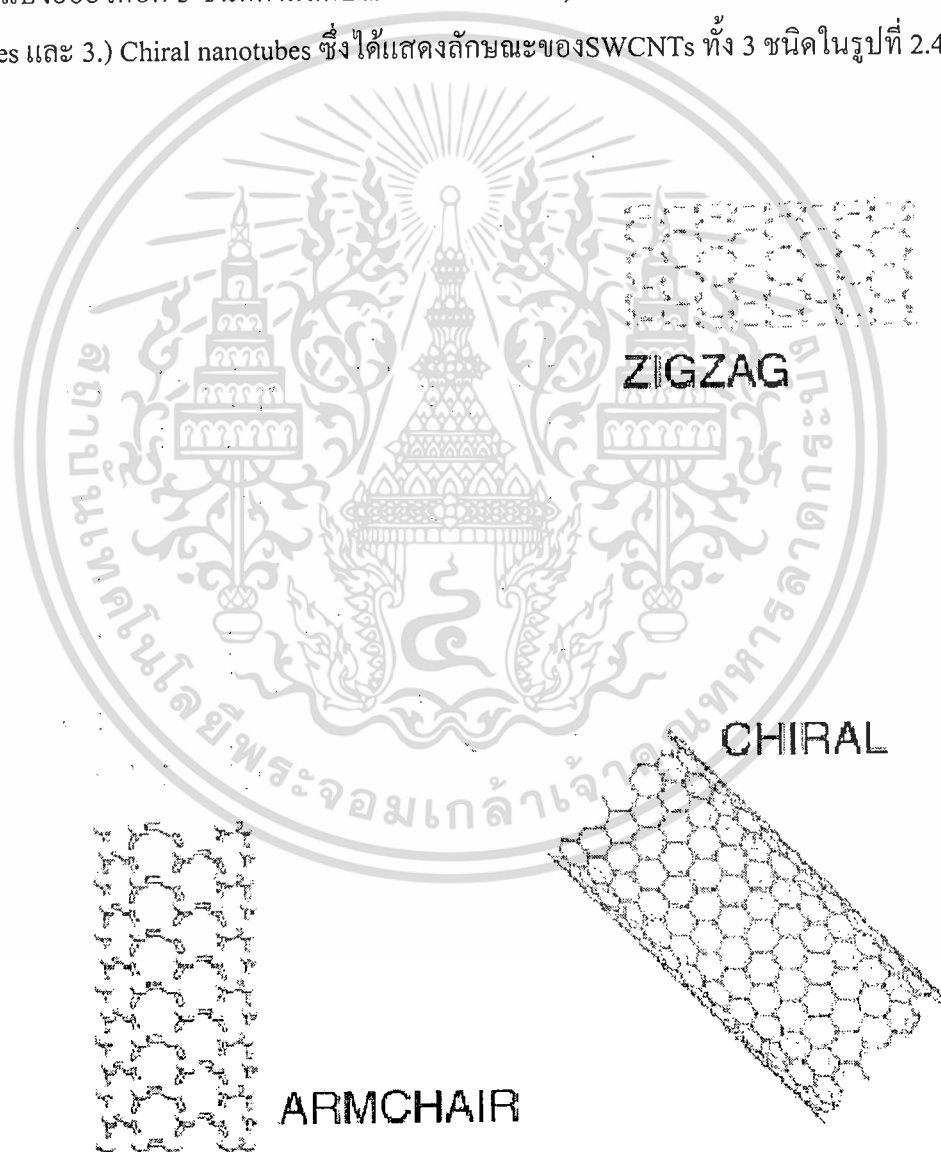
2.3.1 Single Walled Carbon nanotubes (SWCNTs)

SWCNTs นั้นมีลักษณะโครงสร้างเป็นท่อกลวง ซึ่งเหมือนการม้วนแผ่นกราฟไฟต์ (graphene sheet) ให้เป็นท่อทรงกระบอก โครงสร้างของ SWCNTs นั้นยังสามารถแบ่งออกเป็นอีก

3 ชนิดตามลักษณะการม้วน ซึ่งได้แก่ Armchair, Zigzag และ Chiral เส้นผ่าศูนย์กลางนั้นมีขนาด
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

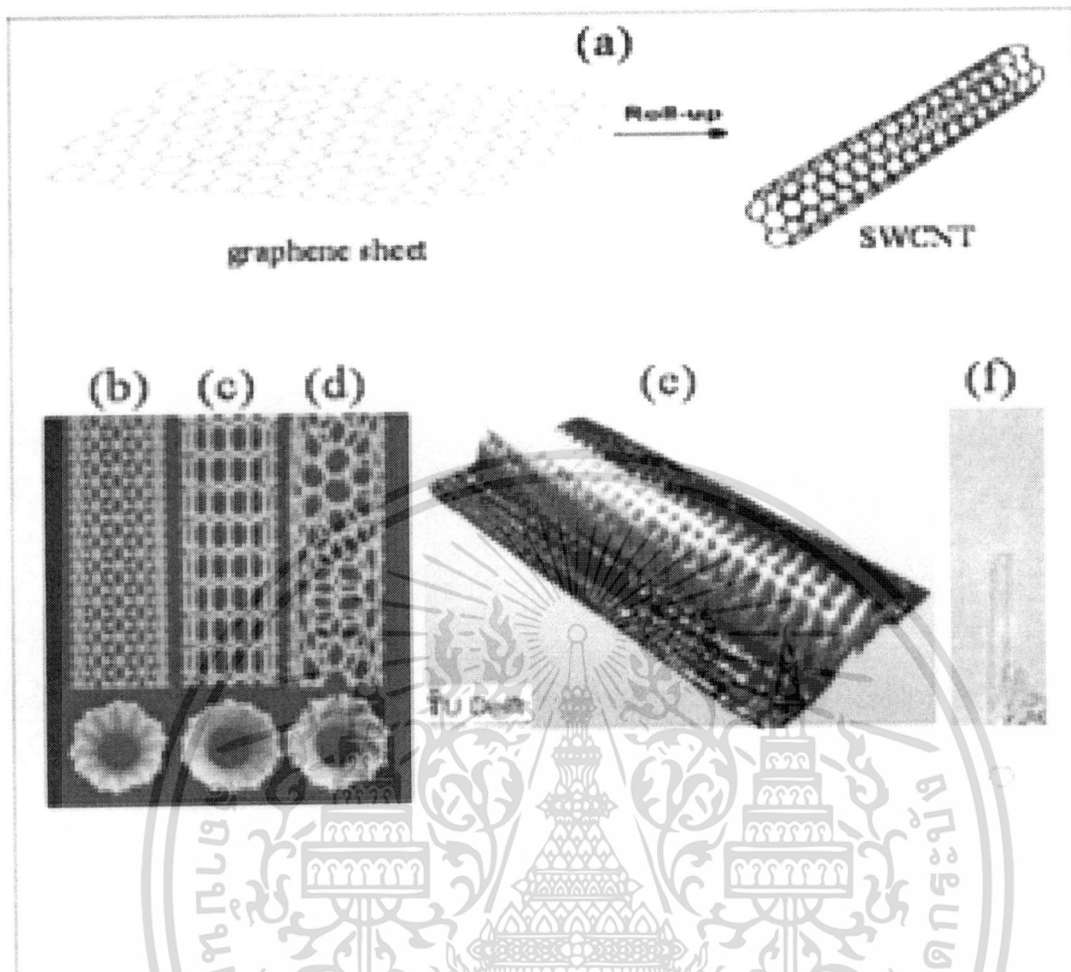
ประมาณ 0.4 -2.0 nm ส่วน MWCNTs นั้น คือการซ้อนกันหลายๆ ชั้นของทิวบ์ โดยที่แต่ละชั้นอยู่ห่างกันประมาณ 0.34 nm เส้นผ่าศูนย์กลางภายในของ MWCNTs นั้นมีขนาดประมาณ 1.5-15 nm ส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกนั้นมีขนาดประมาณ 2.5-30 nm คุณสมบัติของ CNTs ไม่ว่าจะเป็นทางด้านไฟฟ้า กลศาสตร์ หรือทางเคมีนั้น ขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างของทิวบ์ เช่น ชนิด (SWCNTs, MWCNTs) เส้นผ่าศูนย์กลาง และ ลักษณะการม้วนของทิวบ์

ซิงเกิลวอลล์ คาร์บอนนาโนทิวบ์ (Single walled carbon nanotubes (SWCNTs)) ยังสามารถแบ่งย่อยได้อีก 3 ชนิดตามลักษณะการม้วนคือ 1.) Armchair nanotubes 2.) Zigzag nanotubes และ 3.) Chiral nanotubes ซึ่งได้แสดงลักษณะของ SWCNTs ทั้ง 3 ชนิดในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ลักษณะของ SWCNTs ทั้ง 3 ชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



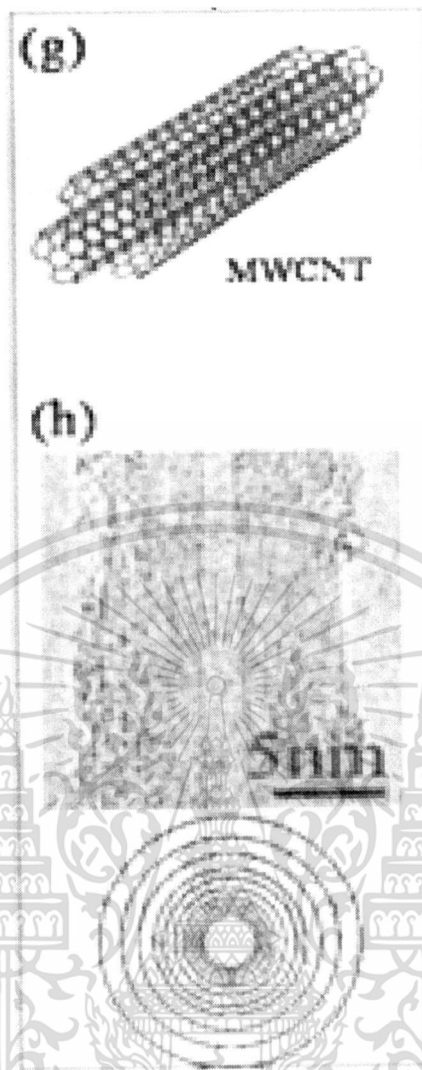
รูปที่ 2.5 โครงสร้างของ SWCNTs

(a) โครงสร้างของ SWCNTs แสดงการม้วนแผ่นกราฟไฟต์ให้เป็น SWCNTs ชนิดของ SWCNTs (จาก Odom et al, J. Phys. Chem. B104) (b) Armchair (c) Zigzag และ (d) Chiral SWCNTs (จาก R. H. Baughman et al. Science 297) (e) ภาพ STM แสดงระดับอะตอมของ SWCNTs (จาก C. Dekker, Delft Univ. of Tech) (f) ภาพ TEM ของ SWCNTs (จาก IPE)

2.3.2 Multi Walled Carbon nanotubes (MWCNTs)

มีลักษณะโครงสร้างคล้ายกับ SWCNTs ที่ซ้อนกันเป็นชั้นๆตั้งแต่ 2 ชั้นขึ้นไป โดยแต่ละชั้นมีระยะห่างกันประมาณ 0.34 nm. ดังแสดงในรูปที่ 2.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 โครงสร้างของ MWCNTs

(g) โครงสร้างของ MWCNTs (h) ภาพ TEM ของ MWCNTs (จาก IPE)

2.4 การนำคาร์บอนนาโนทิวป์ไปประยุกต์ใช้งาน

เนื่องจากคาร์บอนนาโนทิวป์มีคุณสมบัติเด่นหลายประการ คือเป็นได้ทั้งตัวนำและสารกึ่งตัวนำ มีความแข็งแรงสูงแต่เบา ทั้งยังมีความยืดหยุ่นที่ดี มีเสถียรภาพดี ไม่ทำปฏิกิริยากับสารเคมีใดๆ และสามารถจับยึดกับโมเลกุลของก๊าซและดูดซับก๊าซได้เป็นอย่างดี ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวป์ เช่น ชนิดของทิวป์ (ซึ่งเกิดวอลล์และมัดดีวอลล์) ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง และลักษณะการม้วนตัวของทิวป์ ดังนั้นจึงได้มีการนำเอาคาร์บอนนาโนทิวป์ไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ ดังตัวอย่างต่อไปนี้

2.4.1 ใช้เป็นส่วนผสมในวัสดุอื่นๆ

เนื่องจากคาร์บอนนาโนทิวป์มีค่า Young's Modulus สูง สามารถนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี จึงสามารถนำมาผสมในวัสดุอื่นๆ เพื่อให้ได้วัสดุที่เบาและมีคุณสมบัติทางกลศาสตร์ที่ดีหรือมีเอกสารซึ่งมีคุณสมบัติพิเศษเฉพาะตัว เช่น การใช้งานเพื่อการผลิตแบตเตอรี่ที่มีประสิทธิภาพสูง หรือใช้เป็นเซ็นเซอร์ที่มีความไวสูง ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสามารถในการนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี โดยเมื่อไม่นานมานี้ นักวิทยาศาสตร์ขององค์การนาซา(NASA) ประสบความสำเร็จในการผสมคาร์บอนนาโนทิวบ์ลงในโพลีเมอร์ ซึ่งนี้อาจเป็นจุดเริ่มต้นของการก้าวไปสู่การสังเคราะห์พลาสติกที่สามารถนำไฟฟ้าได้ และมีความแข็งแรงมากกว่าเหล็กก็เป็นได้

2.4.2 ประยุกต์ใช้เป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กทรอนิกส์

เนื่องจากคาร์บอนนาโนทิวบ์(CNTs)มีอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางกับความยาวน้อยมากๆ(ค่าAspect-ratio สูง) ทั้งยังสามารถนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดีทำให้CNTs มีเสถียรภาพที่ดี และทำให้CNTs สามารถจ่ายอิเล็กทรอนิกส์ได้โดยใช้แรงขับเคลื่อนไฟฟ้าต่ำจึงเหมาะสมที่จะประยุกต์ใช้เป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กทรอนิกส์ในอุปกรณ์เช่น จอแสดงผล หลอดไฟฟ้าประหยัดพลังงาน แหล่งกำเนิด X-ray ขนาดเล็กและ แหล่งกำเนิดไมโครเวฟขนาดเล็ก เป็นต้น

2.4.3 ประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

เนื่องจากโครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวบ์เทียบเท่ากับ 1 มิติจึงทำให้มีการนำไฟฟ้าแบบ Ballistic คือไม่มีการกระจัดกระจายของอิเล็กตรอนตลอดความยาวของทิวบ์ ทำให้คาร์บอนนาโนทิวบ์เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีเหมาะที่จะใช้ ในวงจรรานาอิเล็กทรอนิกส์ และนอกจากนี้คาร์บอนนาโนทิวบ์ยังมีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำได้อีกด้วย โดยเมื่อไม่นานมานี้ บริษัท ไอบีเอ็ม และกลุ่มของ Prof Dekker ได้ประสบความสำเร็จในการสร้างทรานซิสเตอร์ และลอจิกเกตจากซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์เป็นครั้งแรกของโลก ซึ่งสามารถนำไปใช้ในคอมพิวเตอร์ในอนาคตได้ ทำให้ลดขนาดของอุปกรณ์และปริมาณในการกินกระแสไฟฟ้าลงได้

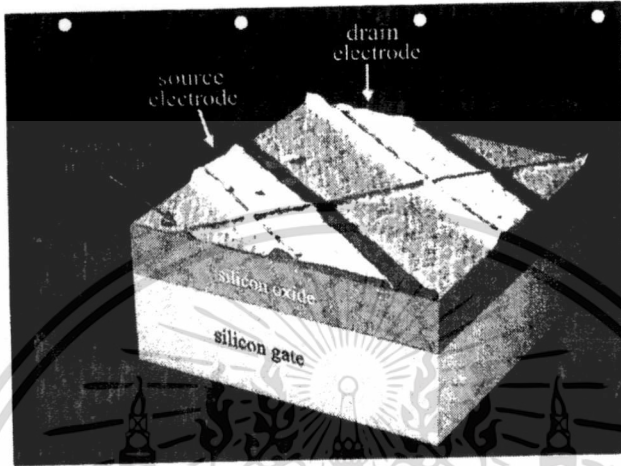
2.4.4 นำไปสร้างเป็นนาโนโพรบ (Probe) และเซนเซอร์

เนื่องจากคาร์บอนนาโนทิวบ์ มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตร มีความยืดหยุ่นสูง จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นโพรบของเครื่องมือวิเคราะห์โครงสร้างของสาร ในระดับอะตอม เช่น Scanning Probe Microscope (SPM) , Atomic Force Microscopy (AFM) และประดิษฐ์เป็นนาโนคีม (Nano-Tweezers) และยังสามารถดัดแปลง โดยนำ Functional group ต่างๆ เช่น $-COOH$ มายึดติดที่ปลายทิวบ์เพื่อนำไปใช้ในด้านชีววิทยาและการแพทย์ได้ นอกจากนี้คาร์บอนนาโนทิวบ์ยังสามารถนำมาสร้างเป็นเซนเซอร์ทางเคมีได้ อีกด้วย เช่นทำเป็นเซนเซอร์ก๊าซเช่น NO_2 , NH_3 , O_2 ได้ โดยตรวจสอบจากค่าความต้านทานของทิวบ์ที่เปลี่ยนไป เป็นต้น

2.4.5 ใช้ในการกักเก็บพลังงาน

เนื่องจากคาร์บอนนาโนทิวบ์มีลักษณะโครงสร้างเป็นท่อกลวง มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กในระดับนาโนเมตรและมีพื้นที่ผิวที่มาก ทำให้เป็นที่สนใจที่จะนำมาใช้ในการเก็บไฮโดรเจน(H) ซึ่งเป็นพลังงานที่มีประสิทธิภาพสูงและไม่เป็นพิษกับสิ่งแวดล้อม โดยมีนักวิทยาศาสตร์ชื่อ Dillon เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงผลการคำนวณว่า SWCNTs จะสามารถกักเก็บไฮโดรเจนได้มากขึ้นเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของทิว์มากขึ้นและมีความเป็นไปได้ที่จะเก็บไฮโดรเจนได้ถึง 6.5% โดยน้ำหนักซึ่งเป็นค่าที่สามารถนำไปใช้ในทางปฏิบัติได้



รูปที่ 2.7 ใช้คาร์บอนนาโนทิว์ในการสร้างทรานซิสเตอร์

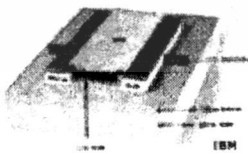
Carbon Nanotubes Applications



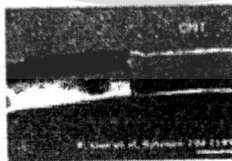
จอสีแบบ Samsung 4.5



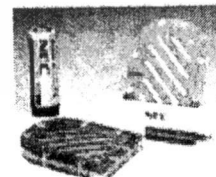
Saito et al. Mic U
หลอดไฟ



CNT-based FET (CNTFET)



นาโนคีม (nano-tweezers)



Fuel cell ชนิด Ethanol ใช้ CNTS เป็นขั้ว

รูปที่ 2.8 การนำคาร์บอนนาโนทิว์ไปประยุกต์ใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์

3.1 กลไกการเกิดของคาร์บอนนาโนทิวบ์

คาร์บอนนาโนทิวบ์สามารถเกิดขึ้นได้ 2 ลักษณะคือ 1) Base Growth 2) Tip Growth

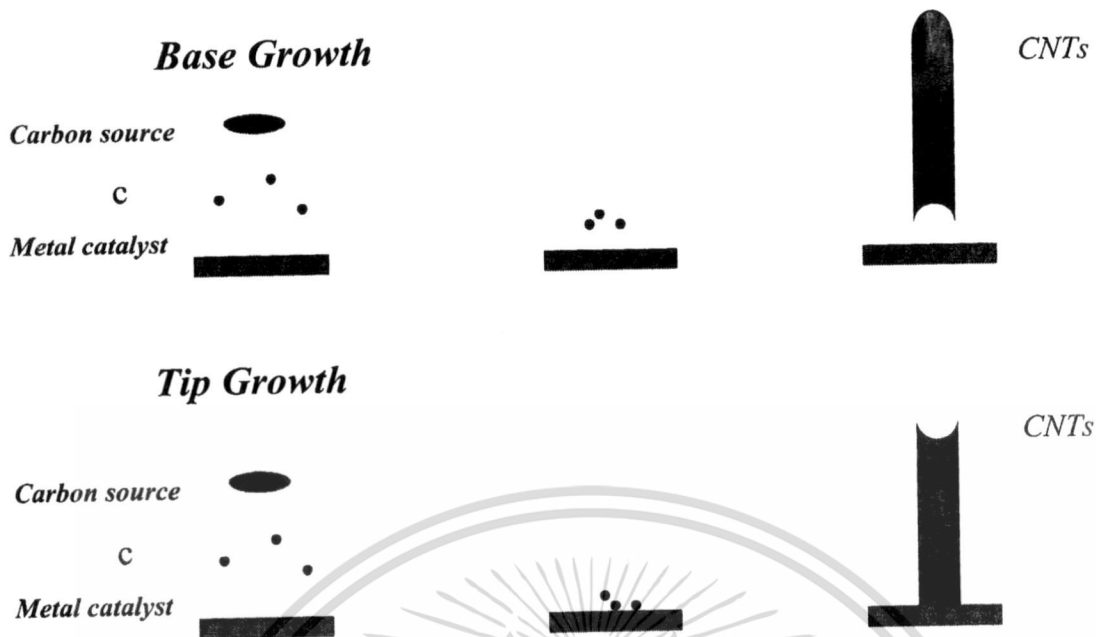
3.1.1) Base Growth

เป็นการเกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์ในลักษณะที่อะตอมคาร์บอนก่อตัวเป็นคาร์บอนนาโนทิวบ์บนโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 3.1 และสามารถอธิบายได้คือ ที่อุณหภูมิสูงมากพอที่จะทำให้อะตอมคาร์บอนแตกตัวออกมาจากแหล่งกำเนิดคาร์บอน (Carbon source) และอุณหภูมิสูงจนทำให้โลหะตัวเร่งอยู่ในสถานะของเหลว อะตอมคาร์บอนที่แตกตัวออกมาจะเข้าไปละลายในโลหะตัวเร่ง และ เนื่องจากอุณหภูมิด้านล่างของโลหะตัวเร่งสูงกว่าอุณหภูมิด้านบน จึงเป็นผลให้อะตอมคาร์บอนที่เข้าไปละลายในโลหะตัวเร่งลอยขึ้นด้านบนของโลหะตัวเร่ง และก่อตัวเป็นคาร์บอนนาโนทิวบ์บนโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา

3.1.2) Tip Growth

เป็นการเกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์ในลักษณะที่อะตอมคาร์บอนก่อตัวเป็นคาร์บอนนาโนทิวบ์ด้านล่างของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ทำให้มีโลหะตัวเร่งอยู่ที่ปลายทิวบ์ ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ซึ่งสามารถอธิบายได้คือ ที่อุณหภูมิสูงมากพอที่จะทำให้อะตอมคาร์บอนแตกตัวออกมาจากแหล่งกำเนิดคาร์บอน และอุณหภูมิสูงจนทำให้โลหะตัวเร่งอยู่ในสถานะของเหลว อะตอมคาร์บอนที่แตกตัวออกมาจะเข้าไปละลายในโลหะตัวเร่ง และเนื่องจากอุณหภูมิด้านบนของโลหะตัวเร่งสูงกว่าอุณหภูมิด้านล่าง จึงเป็นผลให้อะตอมคาร์บอนที่เข้าไปละลายในโลหะตัวเร่งตกลงมาด้านล่างของโลหะตัวเร่ง และก่อตัวเป็นคาร์บอนนาโนทิวบ์ด้านล่างของโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา

จากกลไกการเกิดของคาร์บอนนาโนทิวบ์ทั้ง 2 ลักษณะ จะเห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ควรมีจุดหลอมที่ต่ำ เพื่อให้ไม่หลอมละลายลงเนื่องจากความร้อนในการทำให้โลหะตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ในสถานะของเหลว และโลหะตัวเร่งควรมีความสามารถในการละลายคาร์บอนที่ดี เพื่อให้อะตอมคาร์บอนสามารถละลายในโลหะตัวเร่งได้จำนวนมากๆ



รูปที่ 3.1 กลไกการเกิดคาร์บอนนาโนทิวป์แบบ Base Growth และ Tip Growth

3.2 วิธีการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์

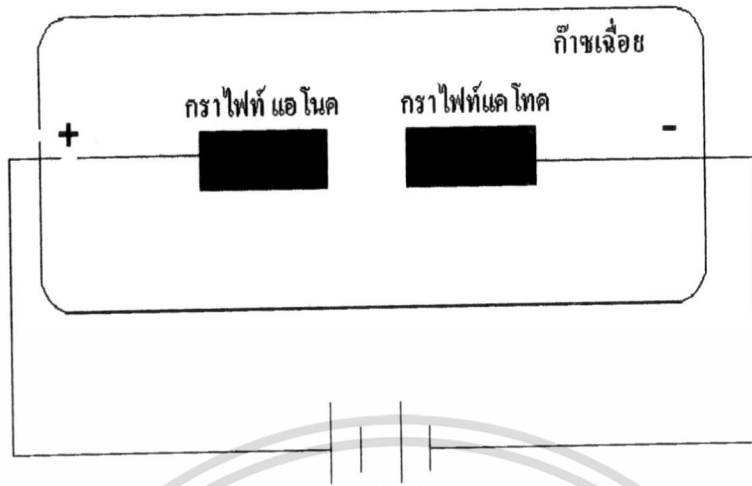
CNTsสามารถสังเคราะห์ได้โดยหลากหลายวิธี แต่วิธีที่มีประสิทธิภาพนั้นมี 3 วิธี แต่ละวิธีมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกัน คาร์บอนนาโนทิวป์สามารถที่จะสังเคราะห์ได้จากสามวิธีการหลักคือ

- 1) วิธี Arc discharge
- 2) วิธี Laser ablation
- 3) วิธี Chemical vapor deposition (CVD)

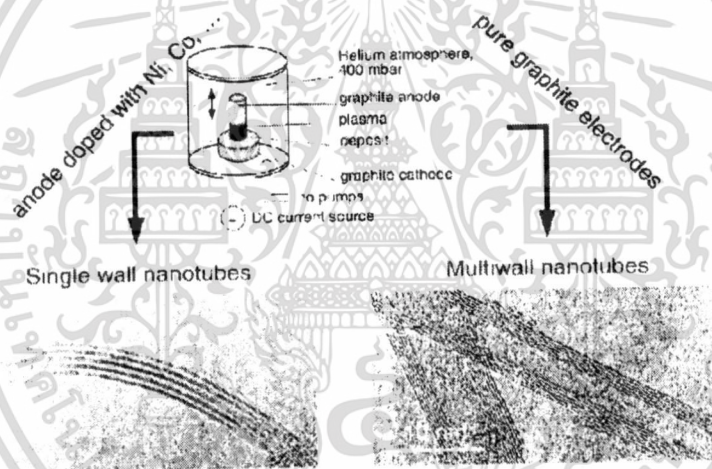
3.2.1 วิธี Arc discharge

วิธี Arc discharge เป็นการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ โดยการอาร์คที่ปลายทั้ง 2 ของแท่งกราไฟต์(หรือแท่งคาร์บอน) 2 แท่ง ภายในระบบซึ่งเป็นห้องทำปฏิกิริยาที่เต็มไปด้วยก๊าซเฉื่อย อาจเป็น ฮีเลียม (helium) ผสมกับ อาร์กอน(argon) หรือ ไนโตรเจนเหลว ที่ความดันต่ำโดยใช้ไฟฟ้ากระแสสูงเพื่อไปอาร์คแท่งกราไฟท์ ทำให้บริเวณที่ถูกอาร์คมีอุณหภูมิสูงมากพอที่จะทำให้อะตอมคาร์บอนแตกตัวออกมาก่อตัวเป็นคาร์บอนนาโนทิวป์ เกาะอยู่บนบางส่วนของแท่ง กราไฟต์ ที่หลุดกระเด็นออกมาและรอบบริเวณแท่งกราไฟต์ที่ถูกอาร์ค ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่ได้จะขึ้นอยู่กับส่วนผสมระหว่าง ก๊าซฮีเลียมกับ ก๊าซอาร์กอน ซึ่งเป็นปัจจัยที่ทำให้สัมประสิทธิ์การแพร่ และการนำความร้อนมีค่าต่างกัน จึงมีผลกระทบกับความเร็วในการแพร่ของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Arc discharge



รูปที่ 3.2 วิธี Arc discharge

โลหะตัวเร่ง การยื่นตัวของแท่งคาร์บอนและอนุภาคของโลหะตัวเร่ง เป็นผลให้คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ได้ มีขนาดต่างกันออกไปไม่สม่ำเสมอ วิธี Arc discharge สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.2 และด้วยวิธีการนี้ ยังสามารถที่จะเลือกให้คาร์บอนนาโนทิวบ์ส่วนมากที่สังเคราะห์ได้ ให้เป็นชนิดซิงเกิลวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ (SWCNTs) หรือมัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวบ์ (MWCNTs) โดยหากต้องการให้คาร์บอนนาโนทิวบ์ ส่วนมากที่สังเคราะห์ได้เป็นชนิด ซิงเกิลวอลล์ ก็สามารถใช้แท่ง กราไฟท์ ที่เจือด้วยอนุภาคของโลหะตัวเร่ง เช่น เหล็ก (Fe), โคบอลต์ (Co), นิกเกิล (Ni) หรือ โมลิบดีนัม (Mo) ที่ขั้วแอโนด และถ้าต้องการให้คาร์บอนนาโนทิวบ์ส่วนมากที่สังเคราะห์ได้ เป็นมัลติวอลล์ ก็สามารถใช้แท่งกราฟไฟท์บริสุทธิ์ เท่านั้นก็พอ ไม่จำเป็นต้องผสมโลหะตัวเร่งก็ได้ ซึ่งเป็นข้อดีของวิธีนี้ ด้วยวิธี Arc discharge นี้ จะทำให้ได้คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ไม่สะอาด ปะปน

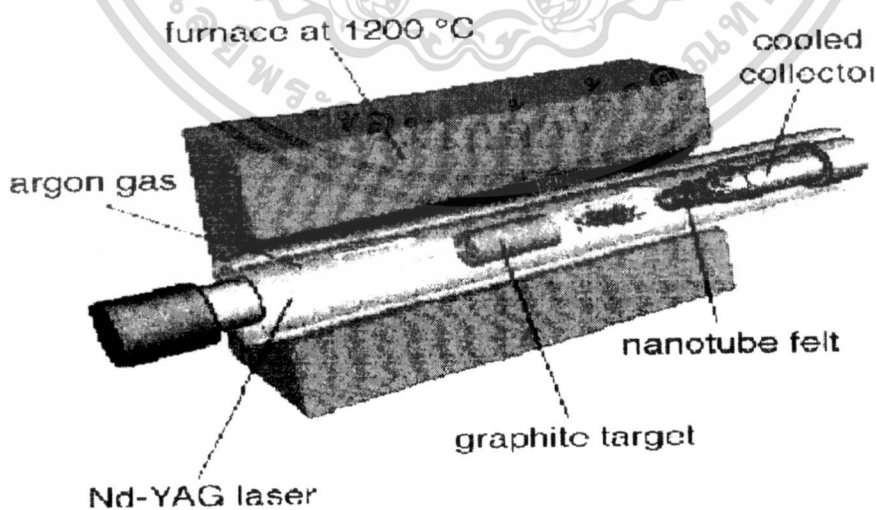
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กับ เขม่า โลหะตัวเร่ง และ อะตอมคาร์บอนที่มีรูปร่างไม่แน่นอน จึงต้องผ่านการแยกให้เหลือ เฉพาะคาร์บอนนาโนทิวป์ ซึ่งจะยุ่งยากและคุณภาพของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่ได้ก็ยังคงต่ำอยู่คือจะมี ขนาดไม่สม่ำเสมอสั้นบ้างยาวบ้าง

3.2.2 วิธี Laser ablation

ในปี 1995 ทีมวิจัยของ Prof. Smalley ได้ทำการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์โดยใช้ แสงเลเซอร์พลังงานสูง หลักการคือใช้แสงเลเซอร์พลังงานสูงยิงไปที่เป้าหมายซึ่งเป็นแท่งกราไฟต์ ที่อยู่ภายในระบบซึ่งเป็นห้องทำปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิประมาณ 1200°C ภายในเต็มไปด้วยก๊าซฮีเลียม หรืออาร์กอน ทำให้แท่งกราไฟต์ระเหยออกเป็นไอของคาร์บอน โดยแสงเลเซอร์ที่ใช้จะมี 2 ชนิดคือ pulsed laser และ continuous laser สิ่งที่แตกต่างกันระหว่าง pulsed laser และ continuous laser คือ pulsed laser ต้องใช้ความเข้มของแสงสูงมากแต่จะยิงเลเซอร์ไปเป้าหมายเป็นจังหวะไม่ต่อเนื่อง ส่วน continuous laser นั้น จะใช้ความเข้มแสงน้อยกว่า แต่จะยิงเลเซอร์ไปเป้าหมายอย่างต่อเนื่อง ปริมาณของคาร์บอนนาโนทิวป์ที่ได้จากวิธีการนี้จะมีมากกว่า 70% และมีความบริสุทธิ์สูงมาก ส่วน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคาร์บอนนาโนทิวป์ ที่ได้จะอยู่ในช่วง 1-2 nm เนื่องจากวิธีนี้เป็นวิธีที่ ต้องใช้ค่าใช้จ่ายสูงจึงนิยมใช้ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ชนิดซิงเกิลวอลล์เท่านั้น วิธี Laser ablation ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 3.3

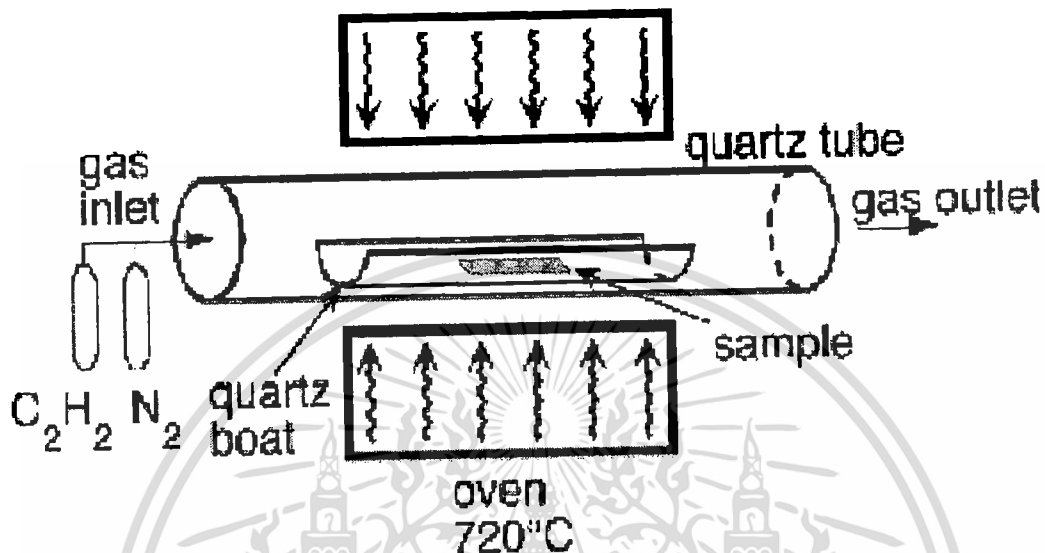
Laser furnace



รูปที่ 3.3 วิธี Laser ablation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

• Chemical vapor deposition (CVD)



รูปที่ 3.4 วิธี Chemical vapor deposition

3.2.3 วิธี CVD

วิธีแบบ CVD (Chemical Vapor Deposition) คือการแยกก๊าซที่มีคาร์บอนเป็นส่วนผสม (เช่น ก๊าซมีเทน) บนโลหะ (เช่น Fe, Ni, Co) โดยใช้ความร้อนหรือ Plasma เข้าช่วย อุณหภูมิอยู่ระหว่าง 400-1200 °C ซึ่งต่ำกว่าวิธีอื่น ข้อดีของวิธีนี้คือสามารถควบคุมขนาดและความยาวของทิวป์ได้ง่าย สามารถสังเคราะห์ทิวป์ให้ขึ้นตรงตำแหน่งที่สนใจบนวัตถุที่สนใจได้ และที่สำคัญที่สุดวิธีนี้สามารถนำมาใช้ในการสังเคราะห์เชิงพาณิชย์ได้ วิธี CVD ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 3.4 วิธี CVD นั้นยังสามารถแยกย่อยตามความแตกต่างของวิธีการแยกก๊าซและวิธีการเตรียมโลหะตัวเร่งออกเป็น 5 วิธีใหญ่คือ

3.2.3.1 วิธี Thermal chemical vapor deposition

วิธี Thermal CVD เป็นวิธีที่ใช้ในการเตรียมชั้นออกไซด์ของซิลิคอน (Si) และเป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากในปัจจุบัน เนื่องจากสามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ได้ทั้งชนิด ซิงเกิลวอลล์ และมัลติวอลล์ ใช้โลหะตัวเร่ง เช่น เหล็ก(Fe) , โคบอลต์(Co) , นิกเกิล(Ni) , โมลิบดีนัม(Mo) หรือ อัลลอย ของโลหะเหล่านี้ คาร์บอนนาโนทิวป์ที่ได้จากวิธีนี้จะมีความยาวอยู่ในช่วง 0.6-4 nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 3.1 สรุปวิธีการสังเคราะห์ CNTs 3 วิธีหลัก

วิธี	Arc Discharge	Laser Ablation	CVD
วิธีการสังเคราะห์	ป้อนกระแสไฟสูงประมาณ 100 A ระหว่างแท่งกราไฟต์ที่อยู่ห่างกันเพียง 2 mm เพื่อให้เกิด hot-plasma ขึ้น CNTs จะก่อตัวขึ้นจากคาร์บอนที่แตกตัว(โดยส่วนมากจะสังเคราะห์ในบรรยากาศของก๊าซ He)	ใช้เลเซอร์พลังสูงยิงใส่แท่งคาร์บอนที่มีโลหะผสม ทำให้เกิดการระเหยของคาร์บอน และ จากนั้น CNTs ก็ก่อรูปขึ้น (โดยส่วนมากสังเคราะห์ใน บรรยากาศของก๊าซ Ar ที่อุณหภูมิประมาณ 1200 °C)	เป็นการแยกก๊าซที่มีคาร์บอนเป็นส่วนผสม (เช่น มีเทน) โดยใช้ความร้อน หรือ Plasma เข้าช่วยมีโลหะเป็นตัวเร่งการสังเคราะห์ (อุณหภูมิประมาณ 400 - 1200 °C)
ประสิทธิภาพของผลผลิต	30-90%	มากกว่า 70%	20-90
SWCNT	- ขนาดสั้น - Ø: 0.6-1.4 nm	- ขนาดสั้น - Ø: 0.6-1.4 nm	- ขนาดยาวมาก - Ø: ขนาดสั้น 0.6-4 nm
MWCNT	- ขนาดสั้น - Ø: (ใน) 1-3 nm (นอก) 10 nm	เนื่องจากวิธีนี้มีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง จึงไม่เป็นที่นิยมใช้ในการสังเคราะห์ MW-CNTs แต่สามารถสังเคราะห์ได้	- ยาวมาก (> 20 nm) - Ø: 10 -200 nm
ข้อดี	- เป็นวิธีที่ง่าย และ ค่าใช้จ่ายถูก - ทิวป์ที่ได้มี Defect น้อย - สามารถสังเคราะห์ MW-CNTs ได้ โดยไม่ต้องใช้ โลหะเป็นตัวเร่ง - สามารถทำได้ในความดันบรรยากาศห้อง	- ผลผลิตที่ได้ส่วนใหญ่เป็น SWCNTs - ความบริสุทธิ์สูง - ทิวป์ที่ได้มี Defect น้อย	- สังเคราะห์ได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าวิธีอื่น - ขนาดของ SWCNT ยาว - สามารถกำหนดทิศทางของ และตำแหน่งของทิวป์ได้ง่าย - ความบริสุทธิ์อยู่ในเกณฑ์ดี - สามารถที่จะสังเคราะห์ในเชิงอุตสาหกรรมได้
ข้อเสีย	- ความยาวของทิวป์สั้น และมีขนาดไม่สม่ำเสมอ - มีสิ่งเจือปนค่อนข้างมาก	- เป็นวิธีที่แพงเนื่องจากต้องใช้เลเซอร์ที่มีกำลังสูง	- เมื่อเทียบกับวิธี Laser ablation ทิวป์ที่ได้มี Defect อยู่บ้าง แต่ไม่มาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา หรือทำซ้ำอย่างอื่นถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3.2 Plasma enhanced chemical vapor deposition (PE-CVD)

วิธี Plasma CVD เป็นวิธีที่สามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 400°C โลหะตัวเร่งที่ใช้คือ เหล็ก (Fe), นิกเกิล (Ni) และ โคบอล (Co) นอกจากนี้วิธีนี้ยังเป็นวิธีที่สามารถกำหนดทิศทางการเกิดของทิวบ์ให้ทิวบ์ตั้งฉากกับฐานรองได้ง่ายอีกด้วย แต่ข้อเสียของวิธีนี้คือโดยส่วนมากจะสังเคราะห์ได้ แต่คาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดมัลติวอลล์ไม่สามารถสังเคราะห์ชนิดซิงเกิลวอลล์ได้ แต่ปัจจุบันมีรายงานว่าสามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดซิงเกิลวอลล์ได้แล้ว

3.2.3.3 Vapor phase growth

เป็นวิธีการสังเคราะห์ที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นก๊าซของโลหะ เช่น Ferrocene ซึ่งเป็นสารประกอบของเหล็ก วิธีนี้เป็นวิธีที่สามารถสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ได้ครั้งละเป็นจำนวนมากๆ และทิวบ์ที่ได้จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางยาวมากๆ (มากกว่า $20\ \mu\text{m}$) และ มีความบริสุทธิ์มากกว่า 80 % แต่เนื่องจากวิธีนี้มักจะใช้ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ซึ่งเป็นอันตรายต่อร่างกายจึงต้องระมัดระวังอย่างมากนอกจากนี้วิธีนี้ยังยากที่จะควบคุมทิศทางและตำแหน่งที่จะเกิดทิวบ์อีกด้วย

3.2.3.4 High pressure CO disproportionate process

วิธีนี้จะคล้ายกับวิธี Vapor phase growth คือใช้ก๊าซของโลหะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและใช้ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์(CO)เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน(Carbon source)จึงต้องระมัดระวังอันตรายจากก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์(CO)ในระหว่างกระบวนการสังเคราะห์ การควบคุมทิศทางและตำแหน่งที่จะเกิดคาร์บอนนาโนทิวบ์นั้นทำได้ยาก แต่คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ได้จะมีปริมาณที่มาก มีความบริสุทธิ์สูงมากประมาณ 80 % และมีสิ่งเจือปนน้อย

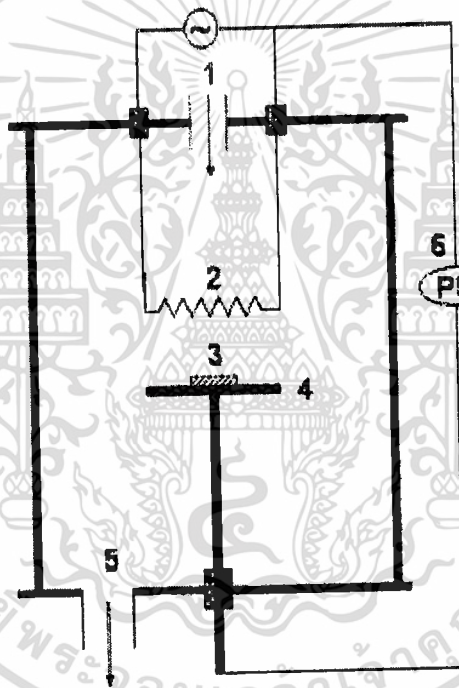
3.2.3.5 Hot filament enhance CVD (HF-CVD)

สำหรับวิธีนี้ จะมีหลักการคล้ายกับวิธี Thermal CVD แต่จะใช้ขดลวดความร้อน (filament) ในการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงแก่ก๊าซ วิธี HF-CVD นี้เป็นวิธีที่ใช้กันอย่างกว้างขวางทั้งในห้องปฏิบัติการและในเชิงพาณิชย์ และเป็นวิธีที่นิยมใช้ในการสร้างฟิล์มเพชร หลักการคือ ใช้ไฟฟ้ากระแสสูงจ่ายให้ขดลวดความร้อน เพื่อให้เกิดความร้อนขึ้น ที่ขดลวด มีฐานรองสำหรับวางโลหะตัวเร่ง เช่น เหล็ก (Fe) และ โคบอล (Co) ภายในระบบซึ่งเป็นห้องทำปฏิกิริยา(Chamber)จะมีท่อนำก๊าซซึ่งเป็นก๊าซที่มีคาร์บอนเป็นส่วนประกอบเช่น ไอของแอลกอฮอล์ หรือมีเทน(CH_4) เป็นต้น เข้ามาภายในระบบ ความร้อนจากขดลวดความร้อน ซึ่งมีอุณหภูมิสูงประมาณ $1600\text{--}2000^{\circ}\text{C}$ จะทำให้โมเลกุลของก๊าซมีอุณหภูมิสูงและถูกเร่งปฏิกิริยาโดยโลหะตัวเร่ง อะตอมคาร์บอนขนาดเล็กๆจะแตกตัวออกจากโมเลกุลของก๊าซและไปจับตัวกันที่โลหะตัวเร่ง เกิดเป็นคาร์บอนนาโนทิวบ์ โดยแสดงระบบของ HF-CVD ในรูปที่ 3.5 แต่ละวิธีมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน วิธี Thermal CVD เป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากในปัจจุบัน เนื่องจากสามารถสังเคราะห์ได้ทั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SWCNTs และ MWCNTs ส่วน PE-CVD นั้นสามารถสังเคราะห์ CNTs ได้ที่อุณหภูมิต่ำ (ต่ำกว่า 400°C) แต่ CNTs ที่ถูกสังเคราะห์โดยวิธีนี้โดยส่วนมากจะเป็นชนิด multi-walled เท่านั้น ส่วนวิธี HF-CVD นั้นมีหลักการเดียวกันกับวิธี Thermal CVD เพียงแต่ใช้ Filament ที่มีอุณหภูมิสูงในการแยกก๊าซออกเท่านั้น ข้อดีของวิธีนี้คือง่ายและค่าใช้จ่ายต่ำ แต่โดยส่วนมากแล้วคุณภาพของ CNTs ที่สังเคราะห์ได้โดยวิธีนี้ยังมีคุณภาพที่ต่ำอยู่ แต่ทว่ายังสามารถพัฒนาได้อีก ส่วนวิธี Vapor phase growth นั้น ใช้ก๊าซของโลหะ เช่น ferrocene, Fe(co) ซึ่งเป็นสารประกอบของเหล็ก สองวิธีหลังนี้สามารถสังเคราะห์ CNTs ที่ละจำนวนมากได้ แต่มีข้อเสียคือไม่สามารถควบคุมทิศทางและตำแหน่งของทิวป์ได้ง่ายนัก และ ก๊าซที่ใช้ส่วนมากมีพิษ (เช่น CO เป็นต้น)



Schematic of the hot filament chemical vapor deposition system. (1) gas inlet, (2) filament, (3) substrate, (4) substrate holder, (5) pumping port and (6) dc power supply. ± 600 V.

รูปที่ 3.5 ระบบของ HF-CVD

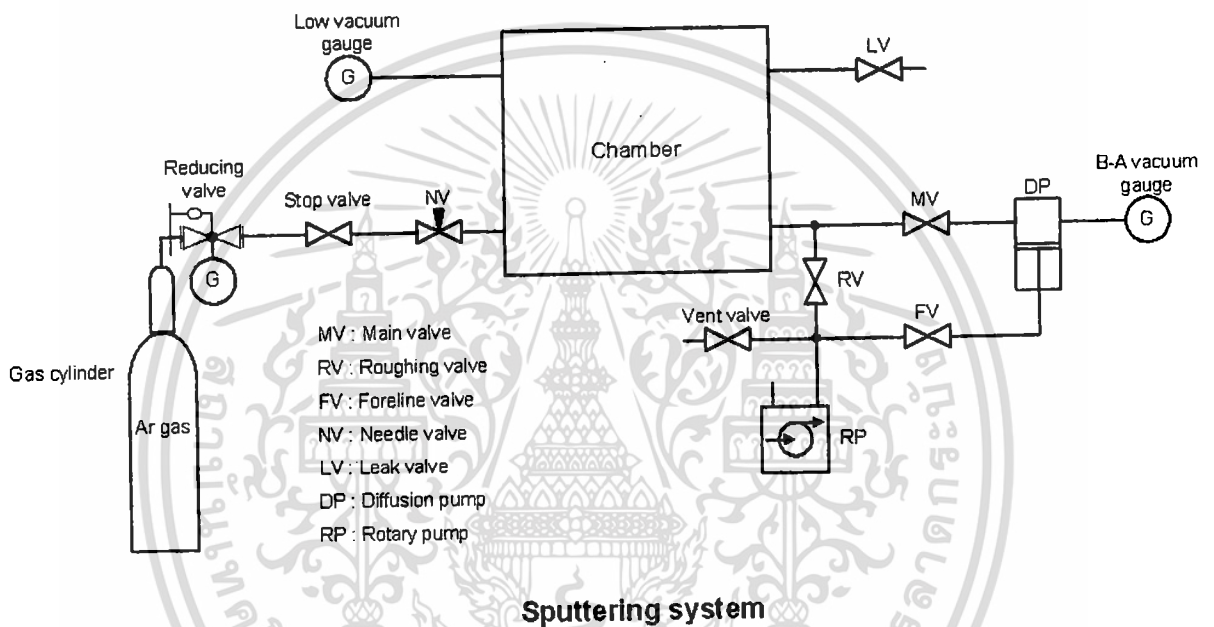
โดยในการวิจัยของเรานั้นจะเลือกใช้วิธี CVD แบบลดความร้อน (HFCVD) เป็นวิธีในการสังเคราะห์ CNTs โดยใช้เอทานอลผสมก๊าซไฮโดรเจนด้วยอัตราส่วนพอเหมาะแหล่งจ่ายไอระเหยคือ ไล่ลดความร้อนถูกทำให้ร้อนที่อุณหภูมิ 2000°C อุณหภูมิฐานรองอยู่ในช่วง 550-750°C โดยกระทำที่ความดันบรรยากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

กระบวนการสร้างฟิล์มโลหะด้วยวิธีการสปัตเตอร์บนฐานรองซิลิคอน

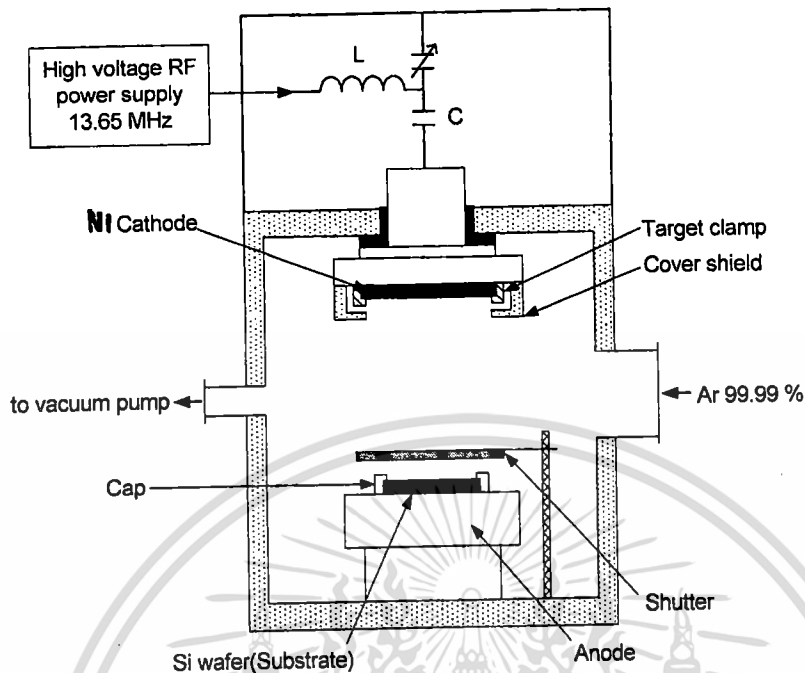
หัวข้อนี้จะกล่าวถึงกระบวนการสร้างฟิล์มโลหะด้วยวิธีการสปัตเตอร์โดยใช้เครื่องมือที่เรียกว่า " อาร์เอฟ ไดโอด สปัตเตอร์" ซึ่งจะมีส่วนนำมาใช้ในการเคลือบสารคะตะไลต์ลงบนฐานรอง เพื่อใช้สร้างฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่มีความสม่ำเสมอและได้พื้นที่ขนาดใหญ่



รูปที่ 4.1 Sputtering System Diagram ของเครื่อง SPE-210 Diode Sputtering System

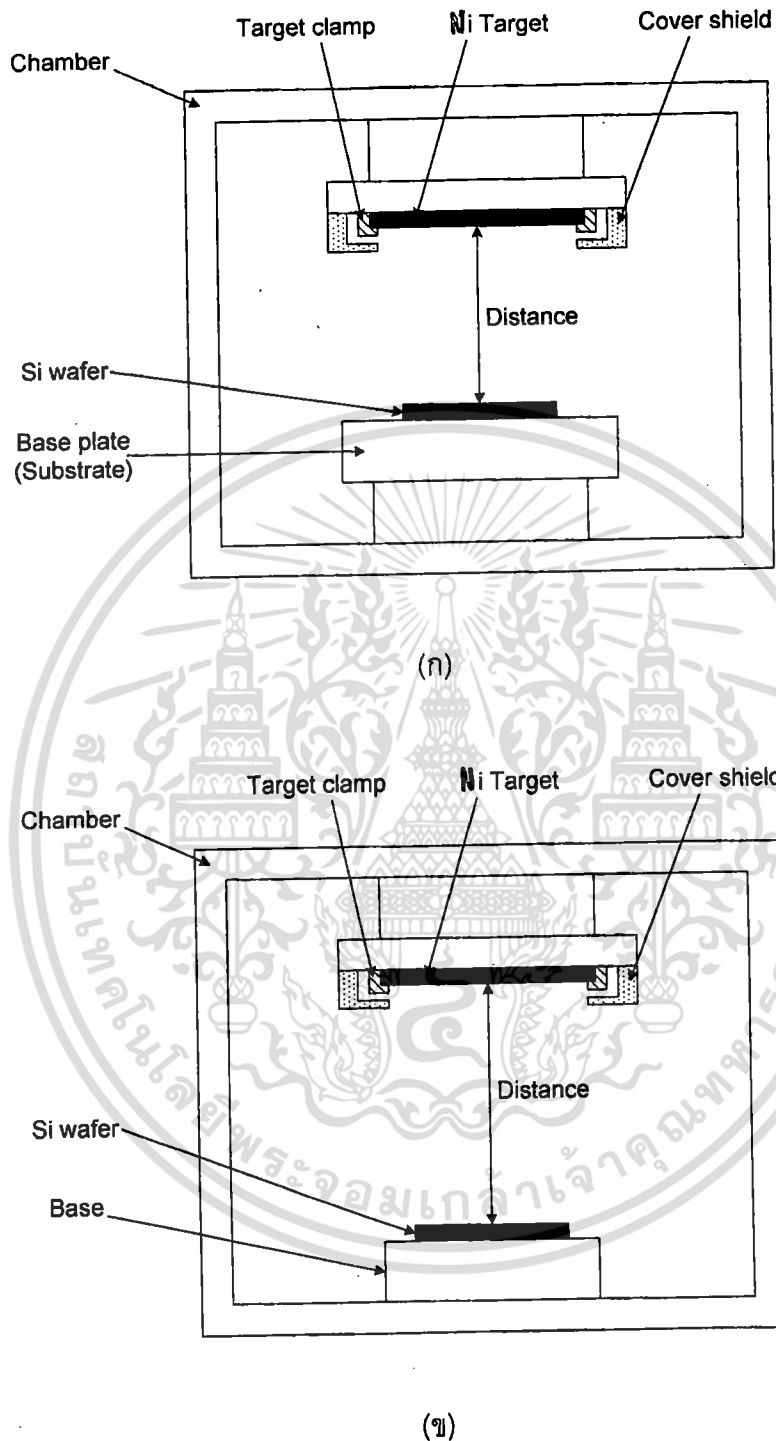
จากไดอะแกรมในรูปที่ 4.1 แสดงส่วนสำคัญต่างๆของเครื่อง SPE-210 ไดโอดสปัตเตอร์ ประกอบไปด้วย แหล่งกำเนิดแรงดันสูง ซึ่งมีความถี่อยู่ในย่านความถี่วิทยุ (13.65 MHz) , แหล่งจ่ายแก๊ส , ห้องสปัตเตอร์(sputtering chamber), และปั๊มสุญญากาศ(rotary and diffusion pump) ภายในห้องสปัตเตอร์ประกอบด้วย ขั้วคาโทด (cathode) ขั้วแอโนด (anode) และชัตเตอร์ (shutter) โดยแผ่นนิคเกิล (Ni) เป็นเป้าถูกติดไว้กับขั้วคาโทด ดังแสดงในรูปที่ 4.2 การสปัตเตอร์เกิดจากการป้อนกำลัง RF ผ่านวงจรแมทซ์เข้าสู่ห้องสปัตเตอร์ซึ่งอยู่ในบรรยากาศของแก๊สอาร์กอน (Ar) ทำให้แก๊สแตกตัวเป็นไอออน เกิดเป็นพลาสมาขึ้นมาในบริเวณระหว่างขั้วคาโทดและขั้วแอโนด เนื่องจากขั้วแอโนดต่ออยู่กับผนังห้องสปัตเตอร์ ทำให้พื้นที่ของขั้วแอโนดมากกว่าขั้วคาโทด จึงเกิดการเหนี่ยวนำขั้วคาโทดให้มีศักย์เป็นลบ และดึงดูดไอออนบวกในพลาสมาให้พุ่งเข้าชน โดย Ni ที่ขั้วคาโทด ทำให้อะตอมของ Ni กระเด็นออกมาและสะสมบนผิวฐานรองแผ่นซิลิคอนซึ่งวางที่ขั้วแอโนด

ไนต์เกิดเป็นฟิล์มโลหะ Ni ทรัพยากรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 ระบบการสปัตเตอร์แบบ อาร์เอฟไดโอด

ขั้นตอนการสปัตเตอร์ เริ่มด้วยการนำแผ่นซิลิคอน หนา 100 ไมครอน วางลงบนขั้วแอโนด แล้วดูดอากาศออกจากห้องสปัตเตอร์จนกระทั่งเหลือความดันต่ำกว่า 5×10^{-7} บาร์ เพื่อทำความสะอาดห้องสปัตเตอร์ จากนั้นปล่อยแก๊สอาร์กอนเข้าไปในห้องสปัตเตอร์จนกระทั่งถึงความดัน 2×10^{-1} bar โดยค่อยๆ เพิ่มกำลัง RF ขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งเกิดพลาสมาขึ้นในห้องสปัตเตอร์ จากนั้นปรับความดันให้ได้ 2×10^{-3} bar [13,10] ปรับกำลัง RF จนได้ค่าที่จะทำการสปัตเตอร์ ทำการพรี-สปัตเตอร์ (pre-sputter) โดยปล่อยให้ระบบอยู่ในเงื่อนไขที่จะทำการสปัตเตอร์เป็นเวลา 5 นาที เพื่อทำความสะอาดผิวหน้าของ Ni จึงเปิดชัตเตอร์ออกเพื่อเริ่มทำการสปัตเตอร์ ดังแสดงตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.3 แผนภาพภายใน chamber ของเครื่องสเปคเตอร์

(ก) ระยะห่างระหว่างขั้วคาโทดกับขั้วแอโนด ที่ 27 cm

(ข) ระยะห่างระหว่างขั้วคาโทดกับขั้วแอโนด ที่ 37 cm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

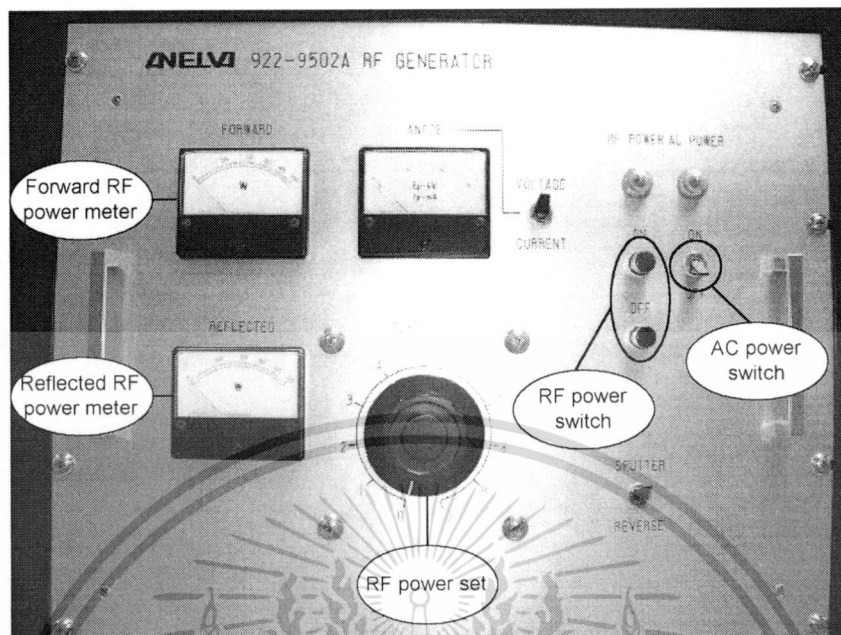
กระบวนการสร้างฟิล์มโลหะเริ่มด้วยการปรับระยะห่างระหว่างขั้วคาโทดและขั้วแอโนด ซึ่งมีสองระยะคือ 27 และ 37 mm ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ซึ่งระยะความห่างที่ 27 mm จะมีขีดจำกัดเรื่องความดันที่ให้อ่างฟิล์ม ซึ่งจะมีช่วงการใช้งานได้ที่ความดันต่ำสุดที่ 2×10^{-2} bar [13] ผลของฟิล์มโลหะที่ได้มีสีเทาดำและมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าเป็นฉนวน ดังนั้นจึงต้องมีการปรับระยะห่างระหว่างขั้วให้มากขึ้นไปที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 37 mm จะทำให้ช่วงความดันในการสเปกตรัมลดลงอยู่ในช่วง $2-5 \times 10^{-3}$ bar ทำให้ได้ฟิล์มโลหะที่มีคุณภาพดีขึ้น ในระหว่างกระบวนการสร้างฟิล์มโลหะจะเกิดความร้อนทั้งขั้วคาโทดและขั้วแอโนดเนื่องจากอะตอมของอาร์กอนวิ่งไปชนขั้วคาโทดซึ่งมีโลหะ Ni ทำให้อะตอมของโลหะกระเด็นตกลงมาที่แผ่นซิลิคอนและคลายความร้อนลงบนแผ่นซิลิคอน ซึ่งความร้อนนี้จะมีผลการเรียงตัวอะตอมโลหะ Ni ดังนั้นต้องควบคุมอุณหภูมิที่ขั้วแอโนดไม่ให้เกิน 40°C จะได้ฟิล์มโลหะที่มีคุณภาพดีขึ้น

ตารางที่ 4.1 เงื่อนไขการสเปกตรัม Ni ในการทดลอง

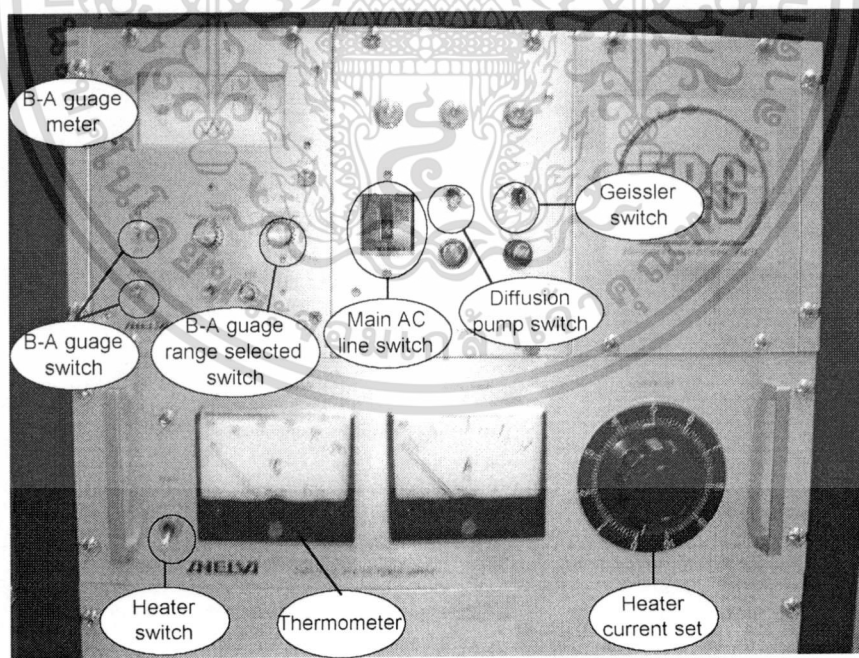
เงื่อนไข	รายละเอียด
ขั้ว คาโทด	เป้าโลหะ Ni ขนาด \varnothing 80 mm. ความบริสุทธิ์ 99.999%
บรรยากาศ	อาร์กอน 99.99 %
ความดัน	$2-5 \times 10^{-3}$ bar
ระยะห่างของขั้วคาโทดและขั้วแอโนด	37 mm
กำลังงาน RF	100 - 150 วัตต์
อุณหภูมิของแอโนด	25 - 30 $^{\circ}\text{C}$
ฐานรอง	ซิลิคอน ระบาย(100) ปกคลุมด้วยซิลิคอนไดออกไซด์
	0.3 ไมครอน

จากเงื่อนไขของการสเปกตรัมทั้งหมดสามารถอธิบายเป็นขั้นตอนการทำงานในระบบของเครื่อง SPE-210 ไดโอดสเปกตรัมได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 Panel of RF Generator



รูปที่ 4.5 Panel of Pump Switch ,Ionizing Gauge and Heater

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การทดลองและผลการทดลองของการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธี CVD แบบลวดความร้อน

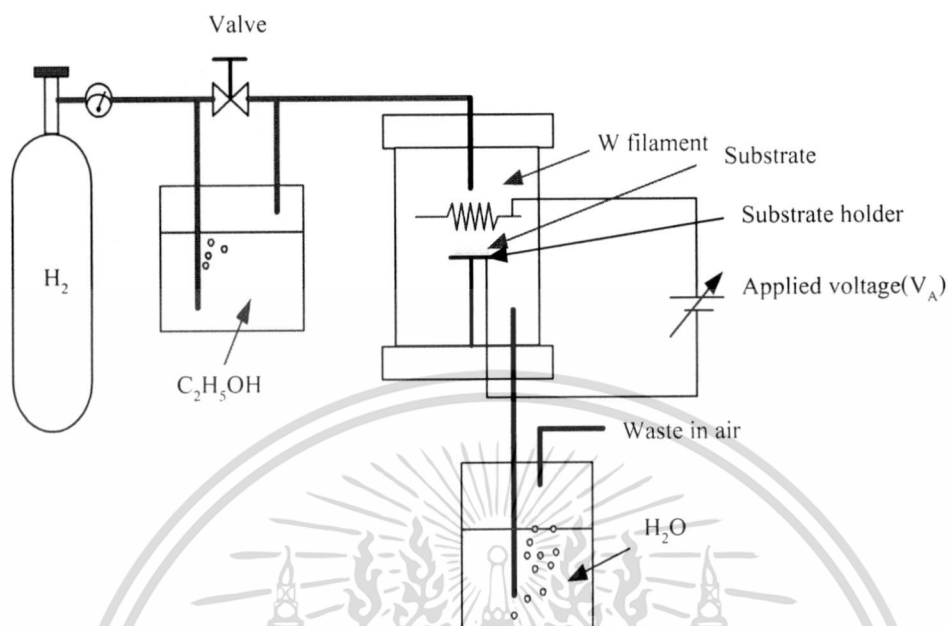
ในบทนี้ จะกล่าวถึงการทดลองและผลการทดลอง ซึ่งจะประกอบด้วยระบบ CVD แบบลวดความร้อน เงื่อนไขการสร้างฟิล์มบนฐานรองชนิดต่างๆ และการวิเคราะห์ฟิล์มที่ได้ โดยจะมีเนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับระบบการสร้าง HFCVD การเตรียมฐานรองชนิดต่างๆ เงื่อนไขการสร้าง ผลของสนามไฟฟ้า การวิเคราะห์ฟิล์มที่ได้ด้วย SEM และ TEM รวมถึงความสม่ำเสมอของฟิล์ม

5.1 การสังเคราะห์ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยวิธี HFCVD ที่ความดันบรรยากาศ

ระบบ HFCVD แสดงในแผนภาพรูปที่ 5.1 ประกอบด้วยท่อแก้ว pyrex มีลวดทั้งสแตนเป็นลวดความร้อนซึ่งถูกให้กระแสเข้าไปจากภายนอกทำให้เกิดความร้อน 2000°C นำวัสดุฐานรองวางลงบนแท่นจับ ซึ่งอยู่ใต้ลวดความร้อน 3 มิลลิเมตร ก๊าซไฮโดรเจนถูกแบ่งเป็นสองทาง ทางหนึ่งผ่านสารเอทานอล ทำให้เกิดฟองอากาศพัดพาเอาไอระเหยของแอลกอฮอล์มาผสมกับอีกทางหนึ่งซึ่งเป็นไฮโดรเจนรวมกันเป็นสารจ่ายไอระเหย อัตราส่วนทั้งสองส่วนถูกควบคุมด้วยมิเตอร์การไหลและวาล์ว สนามไฟฟ้าสามารถให้แก่ระบบนี้ที่ระหว่างไส้ลวดความร้อนและฐานรองในขณะที่ทำการสังเคราะห์ ระบบนี้จะทำงานที่ความดันบรรยากาศ เป็นระบบที่ประหยัด ไม่สิ้นเปลืองสารตั้งต้น คือ เอทิลแอลกอฮอล์ ซึ่งต่างจากระบบใช้ก๊าซ จะต้องสิ้นเปลืองและมีอันตราย การควบคุมอัตราไหลของสารไฮโดรคาร์บอน ใช้ flow meter โดยการควบคุมความละเอียดในระดับนี้มีความเพียงพอในการสังเคราะห์ฟิล์มนาโนทิวบ์

รูปที่ 5.2 เป็นรูปถ่ายของระบบ HFCVD ที่ความดันบรรยากาศ โดยใช้เอทิลแอลกอฮอล์และก๊าซไฮโดรเจนเป็นสารไฮโดรคาร์บอน ระบบ HFCVD นี้ สามารถทำการประกอบได้ง่าย

สำหรับเงื่อนไขในการสร้าง อุณหภูมิฐานรองจะอยู่ในช่วงระหว่าง 550 – 750 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนที่ไหลผ่านสารเอทานอลต่อก๊าซไฮโดรเจนรวมทั้งหมด อยู่ในช่วง 8 – 10 % โดยปริมาตร เวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ฟิล์มอยู่ในช่วง 30 – 60 นาที และอาจจะให้สนามไฟฟ้าระหว่างไส้ลวดความร้อนและฐานรองในระหว่างการสังเคราะห์ฟิล์มเงื่อนไขที่กล่าวมาข้างต้นนั้น เป็นเงื่อนไขโดยรวมของการทดลองทั้งหมด ซึ่งรายละเอียดของการทดลองย่อย อาจจะมีแตกต่างบ้างเล็กน้อย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับผลการศึกษาในเรื่องนั้นๆ



รูปที่ 5.1 แผนภาพแสดงระบบ HFCVD



รูปที่ 5.2 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 การทดลองการสังเคราะห์ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์บนฐานรองชนิดต่างๆ

การทดลองในหัวข้อนี้ ต้องการที่จะสร้างฟิล์มนาโนทิวบ์ให้เกิดขึ้นจากชุด HFCVD ที่ประกอบขึ้นมา เพื่อที่จะพิสูจน์ยืนยันว่าสามารถสังเคราะห์ฟิล์มนาโนทิวบ์ได้จากระบบ HFCVD ที่ประกอบขึ้นที่ความดันบรรยากาศและยืนยันว่าระบบที่ประหยัดและสะดวกก็สามารถสังเคราะห์ฟิล์มเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆได้ เหมือนกับระบบความดันต่ำ

การทดลองเริ่มต้นจากฐานรองชนิดต่างๆ จากรายงานการวิจัย ยืนยันว่าการสร้างคาร์บอนนาโนทิวบ์ต้องใช้ตัวค้ำตะไลต์ ซึ่งมักจะเป็นโลหะเช่น Fe, Ni, Co หรือโลหะอื่นๆ ดังนั้นเพื่อที่จะทำการสังเคราะห์ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ จึงทำการเตรียมฐานรองดังต่อไปนี้คือ

1. ฐานรองสารประกอบกราไฟต์ที่ได้จากไส้ดินสอ
2. ฐานรองจากผงคาร์บอนอัดแน่น
3. ฐานรองซิลิกอนที่มีตัวค้ำตะไลต์เหล็ก โดยแบ่งออกเป็น
 - 3.1 ฐานรองซิลิกอนผิวมันวาวจุ่มลงในสารละลายเอทานอลผสมผงเหล็ก
 - 3.2 ฐานรองซิลิกอนพื้นผิวถูกขัดเป็นรอยขีดข่วนและนำมาจุ่มลงในสารละลาย

เอทานอลผสมผงเหล็ก

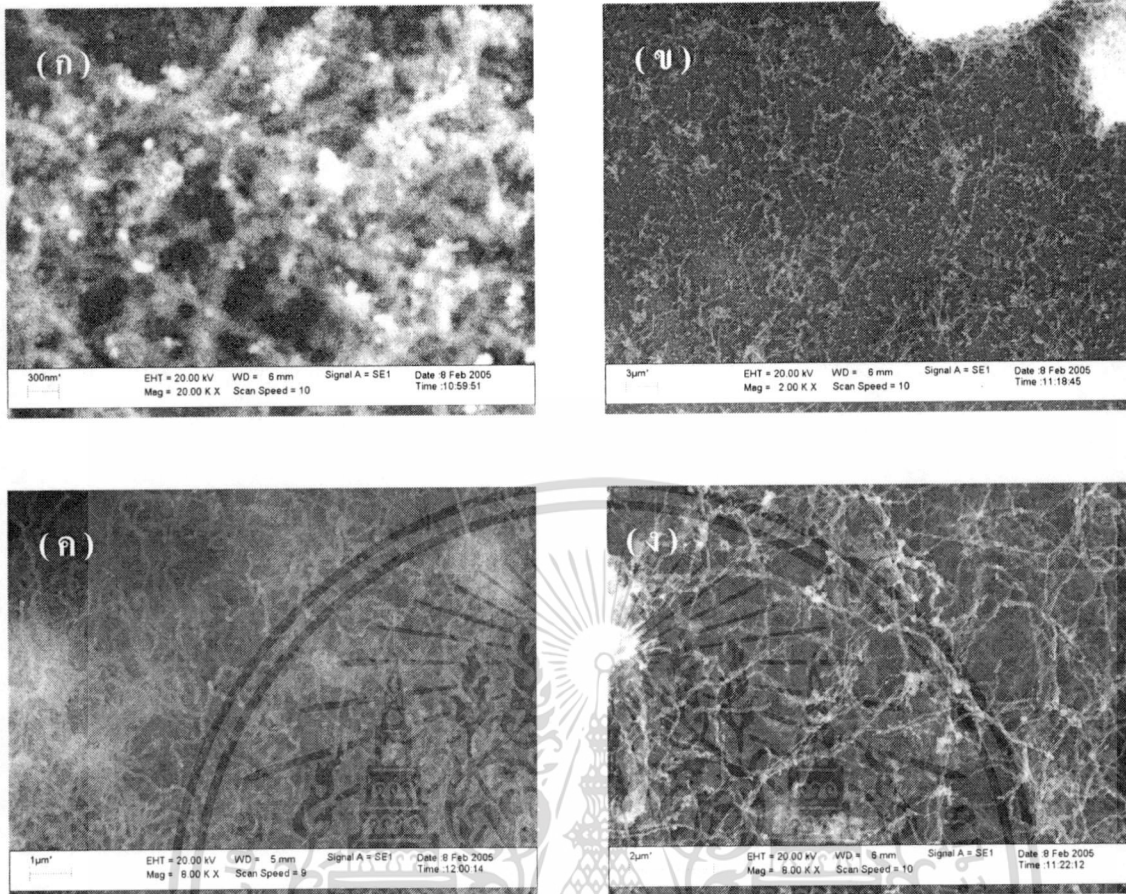
เหตุผลที่ทำการเตรียมผิวหน้าซิลิกอนที่มีความแตกต่างกันดังกล่าว เพื่อต้องการหาเงื่อนไขอุณหภูมิพื้นผิววัสดุฐานรองที่ทำการสร้างฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์กับฟิล์มเพชร เพราะวาระบบ HFCVD นี้ สามารถทำการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรได้เช่นกัน

การเคลือบค้ำตะไลต์ผงเหล็กลงบนผิวซิลิกอนกระทำได้โดยนำสารประกอบเหล็กในเตรตมาผสมกับเอทิลแอลกอฮอล์และคนให้ละลายเท่ากัน จากนั้นนำแผ่นซิลิกอนทั้งผิวมันวาวและที่มีรอยขีดข่วนมาจุ่มลงในสารละลายดังกล่าว แล้วปล่อยให้ที่อุณหภูมิห้อง การเตรียมด้วยวิธีนี้เป็นวิธีอย่างง่าย เพื่อนำไปใช้ในการสังเคราะห์ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์เบื้องต้น ซึ่งการเตรียมด้วยวิธีนี้ การกระจายตัวของผงเหล็กจะไม่สม่ำเสมอ

การทดลองสังเคราะห์ฟิล์ม เราทำการสังเคราะห์ลงบนฐานรองที่กล่าวมาแล้ว ได้แก่ ฐานรองสารประกอบกราไฟต์อัดแน่น ฐานรองซิลิกอนผิวมันวาว โดยเงื่อนไขการสังเคราะห์ฟิล์มเป็นไปตามเงื่อนไขที่กล่าวมาข้างต้น

ผลของฟิล์มที่สังเคราะห์ได้ แสดงได้ดังรูป 5.3 ซึ่งเป็นภาพถ่าย SEM จะเห็นได้ว่าสามารถสังเคราะห์ฟิล์มลงบน ฐานรองทุกชนิดได้ทั้งหมด เพียงแต่ว่าความหนาแน่นของฟิล์มจะแตกต่างกัน จากผลการทดลอง ฐานรองสารประกอบกราไฟต์จะเกิดฟิล์มนาโนทิวบ์ได้ดีที่สุด เมื่อนำสารประกอบกราไฟต์ไปทำการวิเคราะห์หาองค์ประกอบ ดังแสดงในตารางที่ 5.1 จะพบว่า มีโลหะออกไซด์ชนิดต่างๆเป็นส่วนประกอบ ซึ่งโลหะออกไซด์เหล่านี้ จะทำหน้าที่เป็นตัวค้ำตะไลต์ที่ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



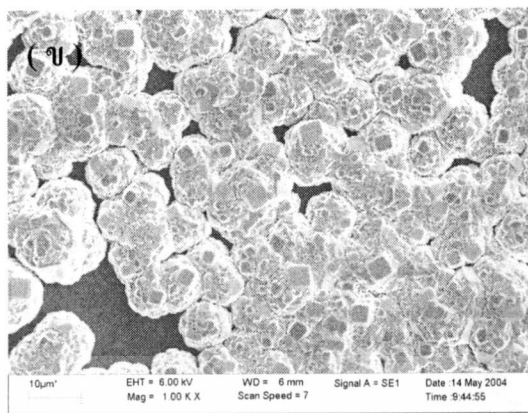
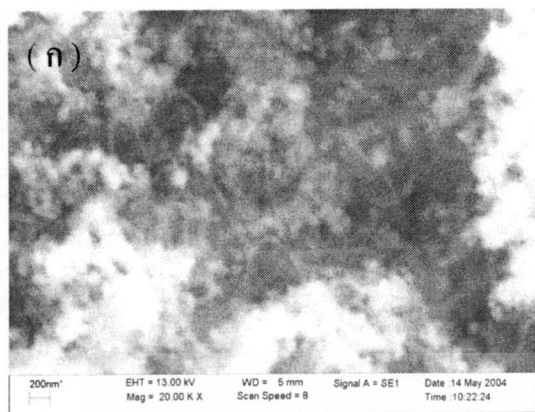
รูปที่ 5.3 ภาพถ่ายจาก SEM ของท่อนาโนคาร์บอน (ก) ฐานรองซิลิกอนฟิวมันวาวถูกเคลือบด้วย คะตะไลต์เหล็ก (ข) ภาพมุมกว้างของพื้นที่ผิวฐานรองซิลิกอนฟิวมันวาวถูกเคลือบด้วย คะตะไลต์เหล็ก (ค) ฐานรองอะมอร์ฟัสคาร์บอน (ง) ฐานรองสารประกอบกราไฟต์ซึ่ง กระทำที่อุณหภูมิของฐานรอง 550-750°C.

และทำให้ฟิล์มนาโนทิวป์เกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอ ส่วนฐานรองคาร์บอนอัดแน่น สามารถเกิดฟิล์ม คาร์บอนนาโนทิวป์ได้ดีเช่นกัน ส่วนซิลิกอนฟิวมันวาวที่ชุบผงเหล็ก จะเกิดฟิล์ม แต่มีความหนาแน่นน้อยกว่าและไม่สม่ำเสมอทั่วทั้งผิวหน้า ดังแสดงในรูปที่ 5.3(ข)

ตารางที่ 5.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบจาก XRF

Oxide composition	MgO	Al ₂ O ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	FeO ₃
Graphite substrate	2.43%	22.5%	1.05%	2.65%	1.33%	8.99%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.4 ภาพถ่ายจาก SEM ที่อัตราส่วนไอระเหยมากกว่า 10% ปริมาตร

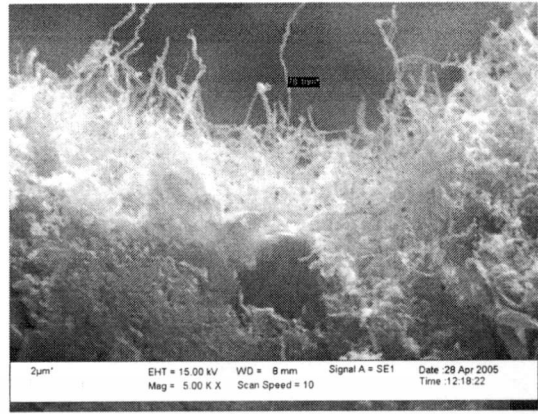
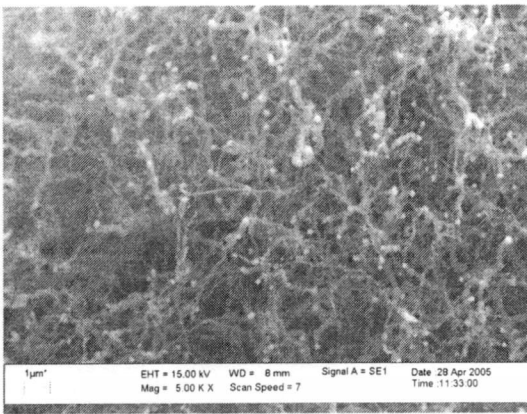
(ก) ฐานรองซิลิกอนที่มีการขัดด้วยผงเพชรและเคลือบคะตะไลต์เหล็ก อุณหภูมิฐานรองประมาณ 850°C หรือต่ำกว่า

(ข) ฐานรองซิลิกอนที่ขัดด้วยผงเพชรและเคลือบคะตะไลต์เหล็ก อุณหภูมิฐานรองมากกว่า 850°C

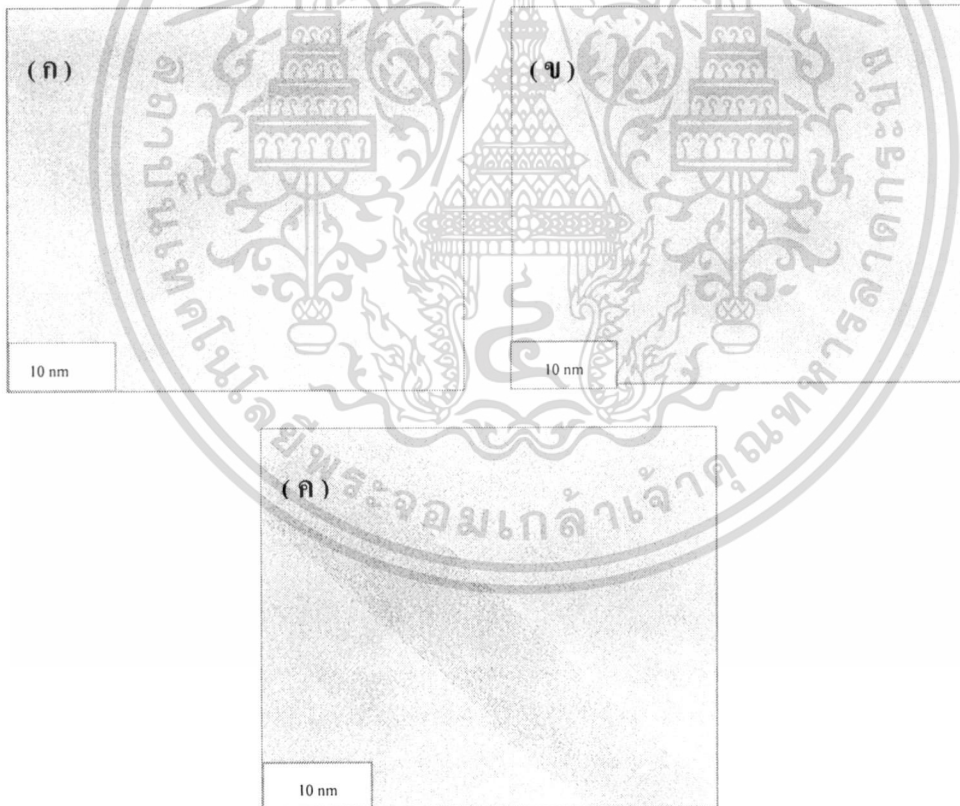
การทดลอง ผลของอุณหภูมิพื้นผิวของฐานรอง ที่ทำให้เกิดฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวส์และฟิล์มเพชร ซึ่งทำการทดลองบนฐานรองซิลิกอนที่บนพื้นผิวมีรอยขีดข่วนแล้วนำไปชุบสารละลายที่มีผงเหล็ก ปรากฏว่า อุณหภูมิที่สูงราว 850 องศาเซลเซียสขึ้นไป จะทำให้เกิดฟิล์มเพชรขึ้นแทนคาร์บอนนาโนทิวส์ ดังแสดงในรูป 5.4 รูป 5.4(ก) เป็นอุณหภูมิ $550 - 750$ องศาเซลเซียส จะเกิดฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวส์ ส่วนในรูป 5.4(ข) อุณหภูมิฐานรองจะอยู่ในช่วงมากกว่า 850 องศาเซลเซียส จะเกิดฟิล์มเพชรขึ้นแทน แม้จะมีคะตะไลต์ผงเหล็กบนพื้นผิวก็ตาม จากผลการทดลองแสดงให้เห็นช่วงอุณหภูมิพื้นผิวฐานรองที่ผลต่อการเกิดฟิล์มทั้งสอง

การศึกษาผลของสนามไฟฟ้า ที่มีผลต่อการเกิดฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวส์ กระทำโดยให้สนามไฟฟ้าเข้าไประหว่างไส้ลวดทั้งสแตนกับฐานรอง โดยให้ไส้ลวดทั้งสแตนเป็นขั้วแอโนด และฐานรองเป็นขั้วคาโทด โดยแรงดันไฟฟ้าที่ให้จากภายนอกมีค่า 600 โวลต์ ระยะห่างระหว่างลวดทั้งสแตนและฐานรองมีค่า $2 - 3$ mm. ผลการทดลองแสดงได้ดังรูป 5.5 รูปที่ 5.5(ก) แสดงภาพด้านบนของแผ่นฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวส์ ส่วนรูป 5.5(ข) แสดงภาพตัดขวางของฟิล์ม จะสังเกตเห็นว่าเส้นคาร์บอนนาโนทิวส์มีทิศทางชี้ไปในแนวตั้งมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ได้ให้สนามไฟฟ้า แต่เส้นคาร์บอนนาโนทิวส์ไม่ได้ตั้งตรงเป็นเส้นตรงในแนวตั้งอย่างสมบูรณ์ มีลักษณะเลี้ยวพุ่งตรงไปในแนวตั้ง ทั้งนี้เพราะว่า ระบบ HFCVD กระทำที่ความดันบรรยากาศ จึงทำให้การเรียงตัวในแนวตั้ง ไม่เป็นเส้นตรงที่สมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.5 ภาพถ่ายจาก SEM ของท่อคาร์บอนนาโนทิวป์บนฐานรอง สารประกอบกราไฟต์ที่ให้แรงดัน 600 โวลต์ระหว่างที่ใส่ของขดลวดกับฐานรอง
(ก) ภาพด้านบน (ข) ภาพตัดขวาง



รูปที่ 5.6 ภาพถ่าย TEM ของคาร์บอนนาโนทิวป์

(ก) ฐานรองซิลิกอนที่มีคะตะไลต์เป็นหลัก

(ข) ฐานรองคาร์บอน และ (ค) ฐานรองสารประกอบกราไฟต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์ฟิล์มด้วยภาพถ่าย TEM แสดงได้ดังรูปที่ 5.6 ซึ่งเป็นการวิเคราะห์จำแนกชนิดของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่สังเคราะห์ได้จากแบบซิงเกิลวอลล์หรือมัลติวอลล์ ซึ่งจากภาพถ่ายแสดงให้เห็นว่า ฟิล์มที่เกิดบนทุกฐานรองเป็นคาร์บอนนาโนทิวบ์แบบมัลติวอลล์ทั้งหมด มีเส้นผ่าศูนย์กลางภายในน้อยกว่า 10 nm.

5.3 การทดลองการสังเคราะห์ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ให้สม่ำเสมอในบริเวณกว้าง

การทดลองในตอนที 5.2 เราทำการศึกษาการสังเคราะห์ฟิล์มจากระบบ HFCVD ที่ประกอบขึ้น ลงบนฐานรองชนิดต่างๆ แต่ลักษณะฟิล์มที่ได้ ยังมีลักษณะของฟิล์มที่ได้ ยังไม่สม่ำเสมอทั้งทั้งแผ่นและยังไม่หนาแน่น การจุ่มฐานรองลงในสารละลายผงเหล็กแล้วปล่อยให้แห้งในอากาศ ทำให้การกระจายตัวของคะตะไลต์ไม่สม่ำเสมอ ดังนั้น ในการทดลองตอนนี้เราจะทำการสังเคราะห์ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ในบริเวณกว้าง

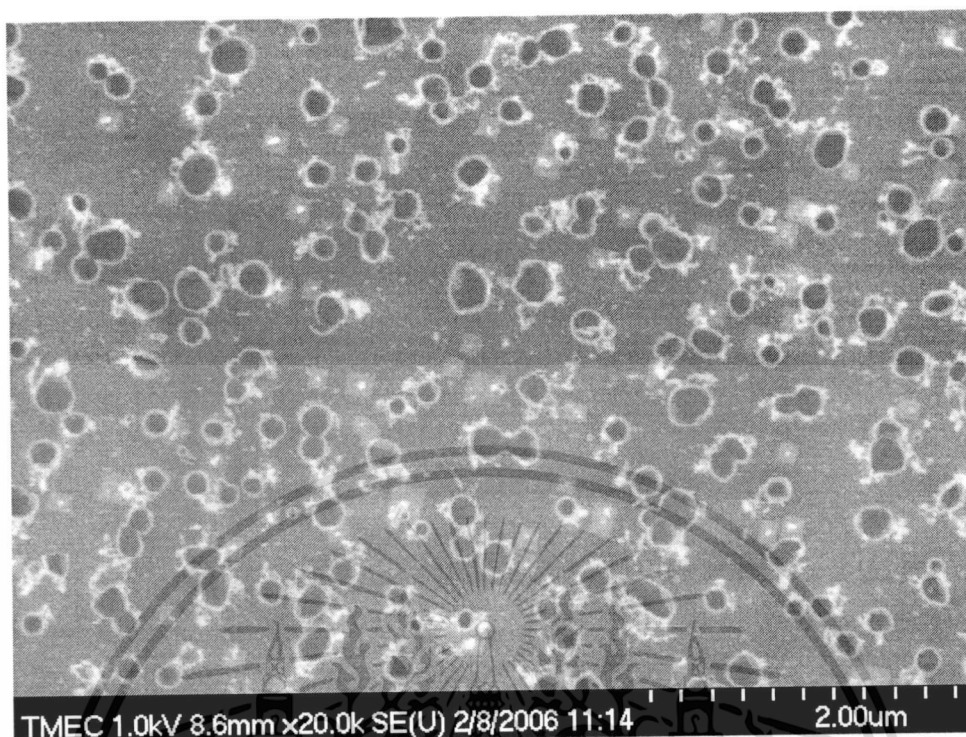
เพื่อให้ได้บรรจุวัตถุตั้งกล่าว เราเปลี่ยนวิธีการเตรียมฐานรอง โดยใช้วิธีการสปัตเตอร์คะตะไลต์ ซึ่งเทคนิคการสปัตเตอร์นี้ เป็นเทคนิคที่ใช้ในการทำขั้วโลหะสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทั่วไป สำหรับโลหะคะตะไลต์ เราจะใช้นิกเกิล(Nickel) แทนอลูมิเนียม วิธีการสปัตเตอร์หรือเคลือบโลหะลงบนฐานรองนั้น ได้แสดงรายละเอียดไว้แล้วในบทที่ 4 ระยะเวลาในการสปัต จะทำให้ความหนาแน่นแตกต่างกัน ในการทดลองนี้ เราจะใช้ค่าเวลาแตกต่างกัน 2 ค่า

5.3.1 เวลาในการสปัตเตอร์ 90 วินาที วิธีนี้จะทำให้นิกเกิล ไม่เชื่อมต่อกันเป็นแผ่นฟิล์ม แต่จะทำให้เกิดเป็นก้อนกระจายบนฐานรองสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น

5.3.2 เวลาในการสปัตเตอร์ 45 นาที วิธีนี้จะได้ฟิล์มนิกเกิลเคลือบบนฐานรองซีลิกอน มีความหนาประมาณ 1 ไมโครเมตร

ฐานรองซีลิกอนที่ใช้ดังกล่าว มีผิวหน้ามันวาว ในกรณีเวลาการสปัต 90 วินาที ไม่สามารถสังเกตเห็นฟิล์มนิกเกิลบนฐานรองได้ด้วยตาเปล่า แต่เมื่อทำการส่งด้วยเครื่อง SEM จะแสดงให้เห็นนิกเกิลกระจายตัวเป็นกลุ่มก้อนบนฐานรองซีลิกอน ดังแสดงในรูป 5.7 สำหรับฐานรองที่ใช้เวลาในการสปัต 45 นาที จะไม่สามารถสังเกตเห็นผิวมันของซีลิกอน แต่จะเห็นผิวของนิกเกิลปกคลุมผิวของฐานรอง

นอกจากฐานรองซีลิกอนที่สปัตด้วยนิกเกิลแล้ว ได้ทำการศึกษาฐานรองแผ่นทองแดงชุบโลหะนิกเกิล ซึ่งโลหะนิกเกิลจะปกคลุมพื้นผิวทองแดงทั้งหมด ฐานรองแผ่นทองแดงนี้ เนื่องจากมีความบางมาก สามารถม้วนเป็นรูปร่างต่างๆได้ เราจะนำทองแดงนี้มาทำการสังเคราะห์เคลือบฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ในฐานรองที่สามารถอ่อนตัวได้

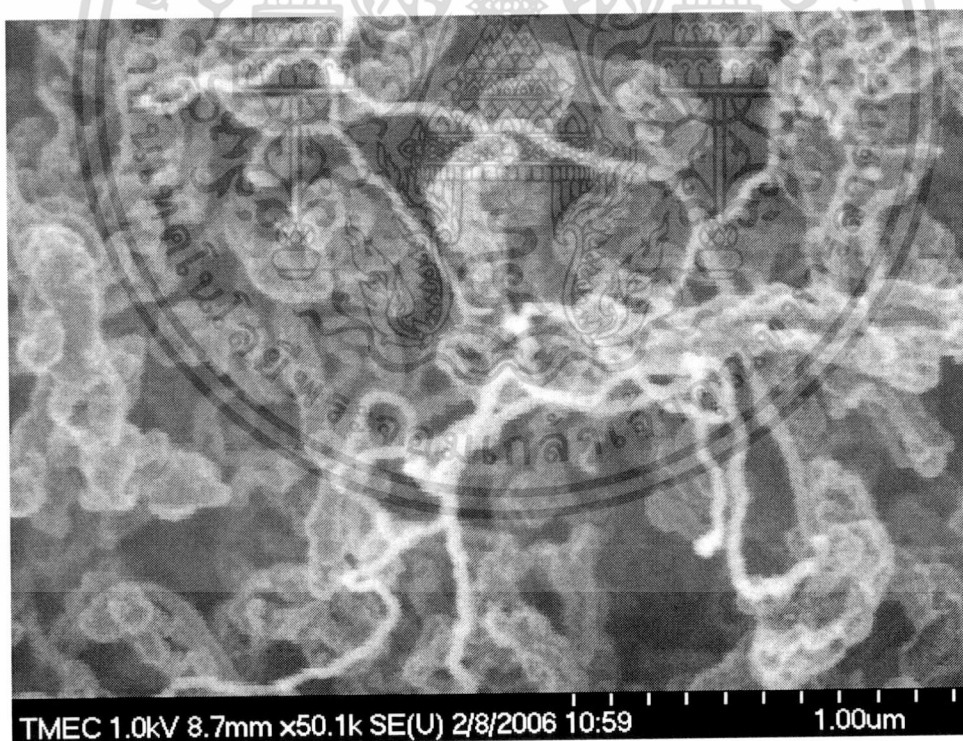
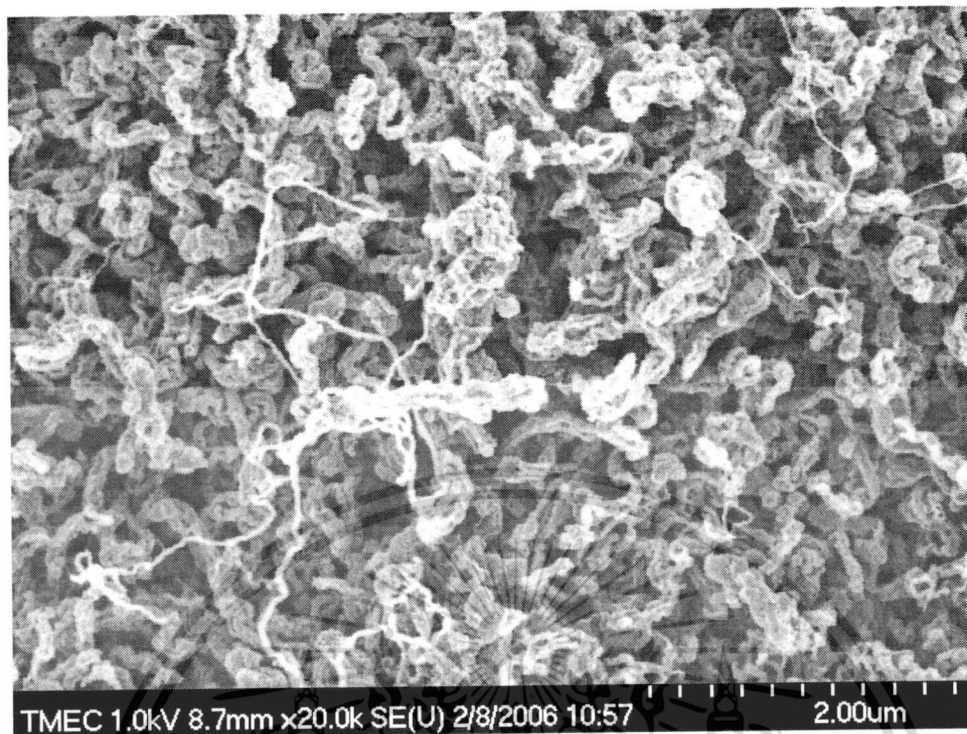


รูปที่ 5.7 ภาพถ่าย SEM พื้นผิวฐานรองซลิกอนที่สปีดนิคเกิดเป็นเวลา 90 วินาที

เวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ในการทดลองนี้ จะใช้เวลา 45 นาที สาเหตุเพราะต้องการให้ฟิล์มมีความหนาแน่น และแน่ใจว่าใช้เวลานานพอเพียงสำหรับกระบวนการสังเคราะห์ อุณหภูมิที่พื้นผิวของฐานรองทั้งสองชนิด มีค่าโดยประมาณอยู่ในช่วง 500 – 700 องศาเซลเซียส

รูปที่ 5.8 แสดงภาพถ่าย SEM ของฟิล์มคาร์บอนนาโนทิว์บนฐานรองที่สปีดด้วยนิคเกิด 90 วินาที จะสังเกตเห็นว่ามีเส้นใยคาร์บอนนาโนทิว์มากมายและหนาแน่น ทั้งนี้เป็นเพราะเวลาในการสังเคราะห์ที่นาน คือ 45 นาที สำหรับฐานรองที่สปีดนิคเกิดเป็นเวลา 45 นาที ที่ความหนาฟิล์มนิคเกิด 1 ไมโครเมตรนั้น เมื่อนำมาสังเคราะห์ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิว์ ฟิล์มนิคเกิดที่เคลือบบนผิวซลิกอนมันวาวจะลอกออก จึงไม่สามารถทำการสังเคราะห์ได้ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าฟิล์มนิคเกิดกับผิวซลิกอนที่มันวาว มีการยึดติดระหว่างกันไม่ดีพอ รูปที่ 5.9 เป็นรูปที่แสดงภาพถ่าย SEM ของฟิล์มคาร์บอนนาโนทิว์บนฐานรองทองแดงซูปนิคเกิด ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าฟิล์มคาร์บอนนาโนทิว์จะเกิดอย่างหนาแน่นเช่นเดียวกัน ทั้งนี้เป็นเพราะเวลาในการสร้างที่นาน คือ 45 นาที ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิว์ที่เกิดขึ้นบนฐานรองทั้งสองนั้น เกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอเต็มพื้นผิวทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



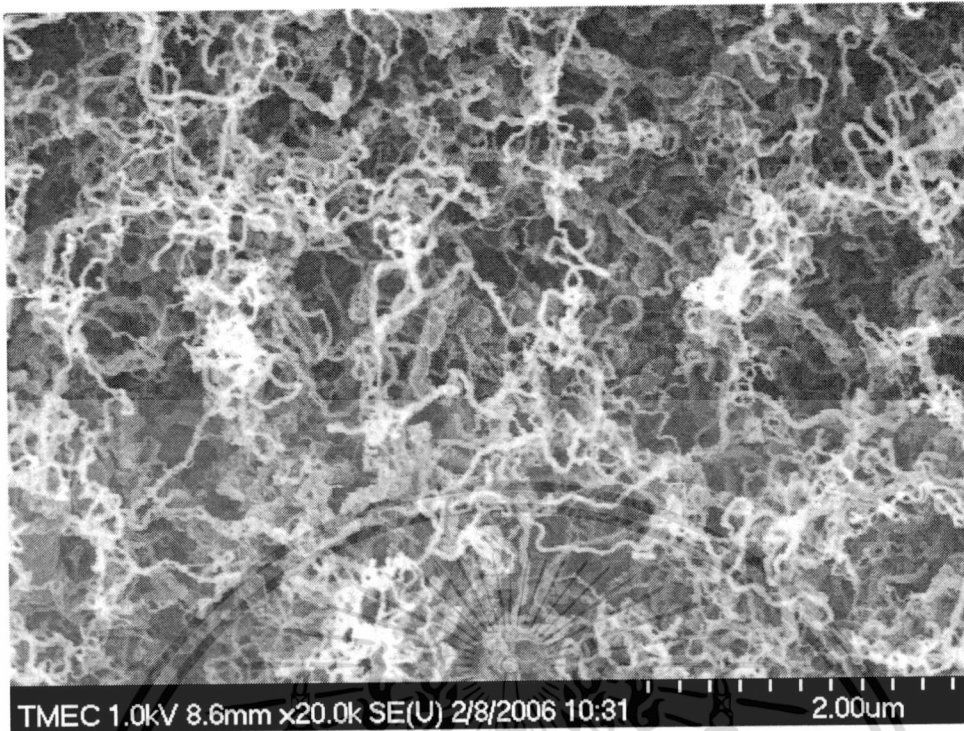
(ข)

รูปที่ 5.8 ภาพถ่าย SEM พื้นผิวฟิล์มคาร์บอนนาโนทิว์บนฐานรองซิลิกอนที่สปีดนิคเกิด 90 วินาที

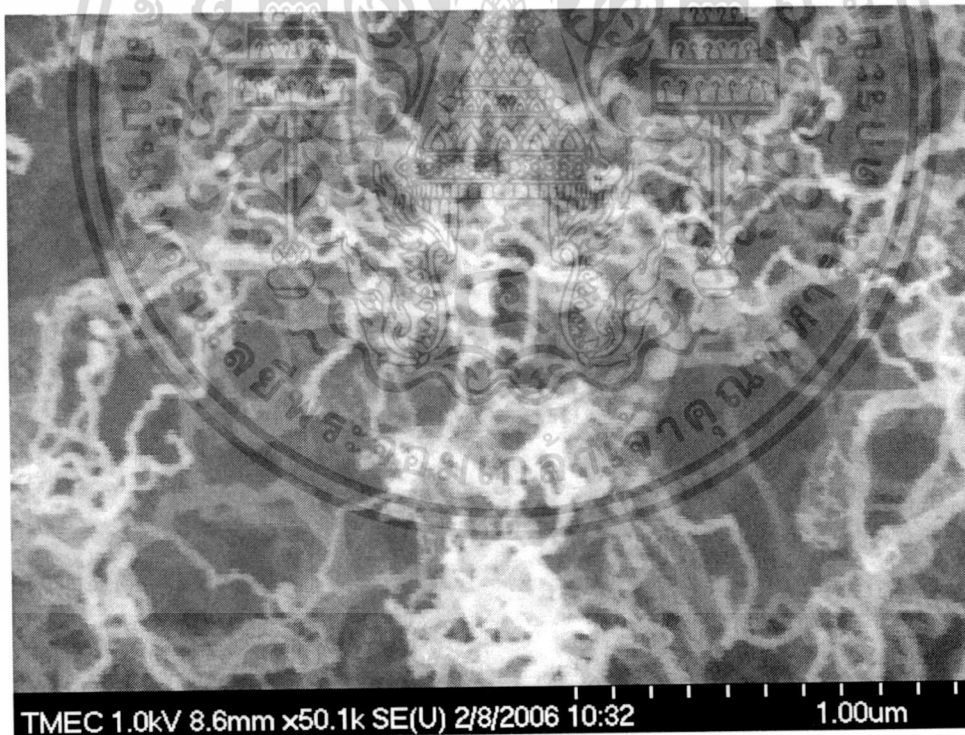
(ก) ที่กำลังขยายต่ำ

(ข) ที่กำลังขยายสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูปที่ 5.9 ภาพถ่าย SEM พื้นผิวฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์บนฐานรองทองแดงชุบนิกเกิล

(ก) ที่กำลังขยายต่ำ

(ข) ที่กำลังขยายสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

บทสรุป

จากที่กล่าวมาทั้งหมด จะเห็นได้ว่าคาร์บอนนาโนทิวบ์มีความสำคัญ และเป็นที่ยอมรับอย่างยิ่งในการประยุกต์ใช้งาน โดยเฉพาะนำมาใช้เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งในสาขาการศึกษานาโนเทคโนโลยี

การสังเคราะห์ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ทำได้หลายวิธี วิธีที่ใช้ศึกษาในงานวิจัยนี้ เป็นวิธีการสังเคราะห์อย่างง่าย กระทำที่ความดันบรรยากาศ ใช้เอทานอลเป็นแหล่งจ่ายสารคาร์บอน ซึ่งไม่เป็นอันตรายและไม่สิ้นเปลืองวัตถุดิบในการสร้าง ผลของงานวิจัยยืนยันว่า ระบบ HFCVD ที่ความดันบรรยากาศ สามารถสร้างฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ได้ มีความสม่ำเสมอในบริเวณกว้างมีความหนาแน่นสูง และสามารถสังเคราะห์ฟิล์มลงบนฐานรองและใช้ตัวคะตะไลต์ได้หลายชนิด

เงื่อนไขการเกิดฟิล์ม เป็นช่วงของอุณหภูมิพื้นผิวฐานรอง อัตราส่วนของแหล่งจ่ายคาร์บอน ก็เป็นช่วงของเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ซึ่งเงื่อนไขดังกล่าว ไม่เป็นเงื่อนไขที่เป็นจุดวิกฤต ดังนั้นเมื่อกระทำอยู่ในช่วงเงื่อนไขดังกล่าว จะสามารถสังเคราะห์ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ได้ ฐานรองที่มีความแตกต่างกัน อาจจะต้องมีการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขการสังเคราะห์ได้เล็กน้อย

ลักษณะของฟิล์มที่ได้ทั้งหมดเป็นแบบมัลติวอลล์ มีความหนาแน่นสม่ำเสมอตลอดพื้นผิวของฐานรอง ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นวัสดุสร้างเป็นอุปกรณ์ทางไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางคาร์บอนนาโนทิวบ์และความหนาแน่นของฟิล์ม มีความสัมพันธ์กับระยะเวลาในการสังเคราะห์

จากงานวิจัยทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่า การสังเคราะห์ฟิล์มคาร์บอนนาโนทิวบ์ประสบผลสำเร็จตามจุดมุ่งหมายในการเตรียมฟิล์มสำหรับเป็นวัสดุในการสร้างอุปกรณ์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ต่อไป เทคโนโลยีที่ใช้ในการสังเคราะห์ฟิล์ม เป็นการใช้ศักยภาพภายในประเทศทั้งหมด ผลของการวิจัยได้ทำการตีพิมพ์เผยแพร่ในรูปแบบบทความวิชาการทั้งในและต่างประเทศ ความรู้ในการสังเคราะห์ฟิล์ม จะเป็นประโยชน์และเป็นส่วนหนึ่งขององค์ความรู้ในสาขานาโนเทคโนโลยี

ผู้วิจัยหวังว่า คงจะได้รับการสนับสนุนงานวิจัยในลักษณะนี้ต่อไป และขอขอบคุณสภาวิจัยแห่งชาติ ที่ได้ให้การสนับสนุนงานวิจัยนี้จนสำเร็จลุล่วง

เอกสารอ้างอิง

- [1] N. Hamada, Mater. Sci. Eng., B 19 (1993) 181.
- [2] R. F. Service, Science 271 (1996) 1232
- [3] A. Badzian, T. Badzian, E. Breval, A. Piotrowski, Thin Solid Films 398 (2001) 170..
- [4] I. Sayago, E. Lafuente, M.C. Horrillo, W.K. Maser, A.m. Benito, R. Navaro, E.P. Urriolabeitia, M.T. Martinez, J. Gutierrez, Synthetic Metal 148 (2005) 15.
- [5] J. Suehiro, G. Hiroshi, W Ding, M. Hara, Sens. Actuators B (2004).
- [6] S. Iijima, Nature (1991) 359, 56
- [7] C. Journet, W.K. Maser, P. Bernier, A. Loiseau, M.R. de la-Chapelle, S. Lefrant, Nature 388, (1997) 756.
- [8] Z.F. Ren, Z.P. Huang, J.H. Wang, M.P. Siegal, P.N. Provencio, Science 282 (1998) 1105.
- [9] A. Thess, Science 273 (1996) 483.
- [10] C.J. Lee, D.W. Kim, Y.H. Lee, J.M. Kim, Chem. Phys. Lett. 299 (1999) 97.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้