สำนักงานวิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีเบื้องต้นที่เกี่ยวข้องกับฟิล์ม DLC ได้แก่ รูปแบบการจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนและเทคนิคต่างๆ ที่ใช้สังเคราะห์ฟิล์ม DLC โดยเฉพาะเทคนิค RF-PECVD ที่ใช้สังเคราะห์ฟิล์ม DLC ในงานวิจัยนี้ รวมถึงเทคนิคการวัดค่าพารามิเตอร์ของพลาสมาที่เกิดขึ้นในระบบด้วยหัววัดลางมัวร์ วิธีการตรวจสอบสมบัติของฟิล์มด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดและรามานสเปกโทรสโกปี รวมทั้งงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์ม DLC

2.1 คาร์บอนในโครงผลึก

ธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบสำคัญในฟิล์ม DLC การจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนมีผลต่อโครงสร้างและสมบัติของฟิล์มโดยตรง ดังนั้นความรู้ความเข้าใจถึงรูปแบบการจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนจึงมีส่วนสำคัญอย่างมากในการศึกษาสมบัติของฟิล์ม DLC

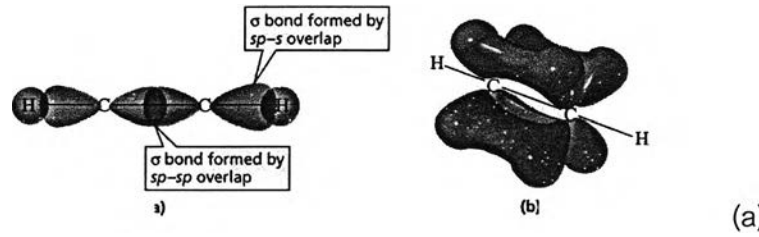
2.1.1 ออร์บิทัลลูกผสมหรือไฮบริดออร์บิทัล

ไฮบริไดเซชัน (Hybridization) เป็นกระบวนการผสมออร์บิทัลต่างๆ ที่มีพลังงานใกล้เคียงกันของอะตอมเดียวกัน เกิดเป็นออร์บิทัลใหม่ที่เหมือนกันและมีพลังงานเท่ากันทั้งหมด เรียกว่า ออร์บิทัลลูกผสมหรือไฮบริดออร์บิทัล (Hybrid orbital) ไฮบริดออร์บิทัลที่ได้จะมีจำนวนเท่ากับออร์บิทัลที่มาผสมกันและมีความแข็งแรงมากกว่าเดิม ไฮบริดออร์บิทัลจะมีทิศทางเฉพาะตัวที่ช่วยทำนายรูปร่างและมุมระหว่างพันธะในโมเลกุล โดยทิศทางของไฮบริดออร์บิทัลขึ้นกับรูปแบบของการเกิดไฮบริไดเซชัน ซึ่งมี 3 แบบ [11] ดังนี้

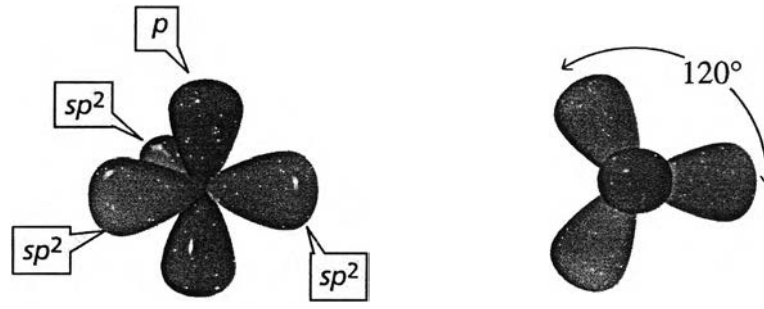
1. sp^1-ไฮบริไดเซชัน (Linear หรือ Diagonal hybridization) เป็นการรวม s และ p อย่างละหนึ่งออร์บิทัล ได้ออร์บิทัลลูกผสม sp^1 – ไฮบริดออร์บิทัล (sp^1 - hybrid orbital) จำนวน 2 ออร์บิทัลและมี p จำนวน 2 ออร์บิทัลที่ไม่ได้ใช้ในการไฮบริด รูปที่ 2.1 (a) แสดง sp^1-ไฮบริไดเซชันซึ่งมีรูปร่างเป็นเส้นตรง (linear) มีมุม 180°

2. sp^2-ไฮบริไดเซชัน (Trigonal hybridization) เป็นการรวม s หนึ่งออร์บิทัล กับ p สองออร์บิทัลเกิดเป็นสาม sp^2 ไฮบริดออร์บิทัลซึ่งอยู่ในระนาบเดียวกัน รูปที่ 2.1 (b) แสดง sp^2-ไฮบริไดเซชัน รูปร่างเป็นทรงสามเหลี่ยมอยู่ในระนาบเดียวกันทำมุม 120°

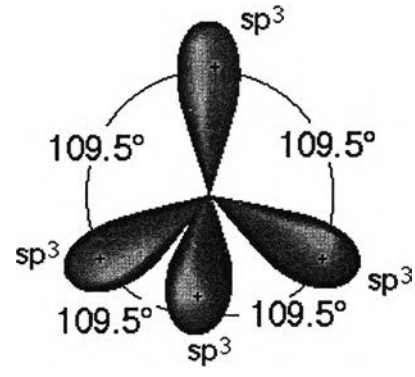
3. sp^3-ไฮบริไดเซชัน (Tetrahedral hybridization) เป็นการรวม s หนึ่งออร์บิทัล กับ p สามออร์บิทัลเกิดเป็นสี่ sp^3 ไฮบริดออร์บิทัลที่ชี้ไปยังมุมทั้งสี่ของรูปทรงสี่หน้า รูปที่ 2.1 (c) แสดง sp^3-ไฮบริไดเซชันซึ่งเป็นรูปทรงสี่หน้ามีมุมภายใน 109.50°



(a)



(b)



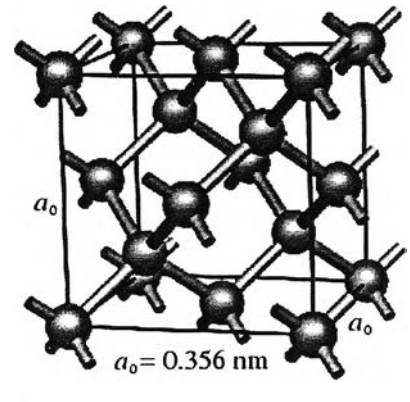
(c)

รูปที่ 2.1 (a) sp^1-ไฮบริไดเซชัน (Linear หรือ Diagonal hybridization) รูปร่างเป็นเส้นตรง (linear) มีมุม 180° (b) sp^2-ไฮบริไดเซชัน (Trigonal hybridization) ทรงสามเหลี่ยมอยู่ในระนาบเดียวกัน ทำมุม 120° (c) sp^3-ไฮบริไดเซชัน (Tetrahedral hybridization) รูปทรงสี่หน้ามุมภายใน 109.50°

คาร์บอน (Carbon) อยู่หมู่ที่ 4 มีโครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic configuration) เป็น $1s^2\ 2s^2\ 2p^2$ มีเวเลนซ์อิเล็กตรอนเท่ากับ 4 ดังนั้น เมื่อคาร์บอนรวมกับธาตุอื่น จะสร้างพันธะโควาเลนซ์โดยใช้เวเลนซ์อิเล็กตรอนร่วมกับอะตอมของธาตุอื่น เพื่อให้มีเวเลนซ์อิเล็กตรอนครบ 8 นอกจากนี้อะตอมของคาร์บอนยังสามารถสร้างพันธะกับคาร์บอนอีกอะตอมหนึ่ง ได้ทั้ง พันธะเดี่ยว (C - C) พันธะคู่ (C = C) หรือพันธะสาม (C ≡ C) เมื่อคาร์บอนเกิดสารประกอบจะจัดตัวใหม่ จะซ้อนกันมากที่สุดเพื่อให้เกิดพันธะที่แข็งแรง จึงทำให้เกิดการไฮบริไดเซชันซึ่งเป็นไปได้ทั้ง sp^1, sp^2 และsp^3 ไฮบริไดเซชัน ขึ้นกับว่าคาร์บอนนั้นจะใช้อิเล็กตรอนเดี่ยวกี่ตัวในการเกิดพันธะโควาเลนส์กับอะตอมอื่น ทำให้คาร์บอนเป็นธาตุอโลหะที่มีหลายอัญรูป อัญรูปที่สำคัญของคาร์บอนได้แก่ เพชรและแกรไฟต์

2.1.2 เพชร

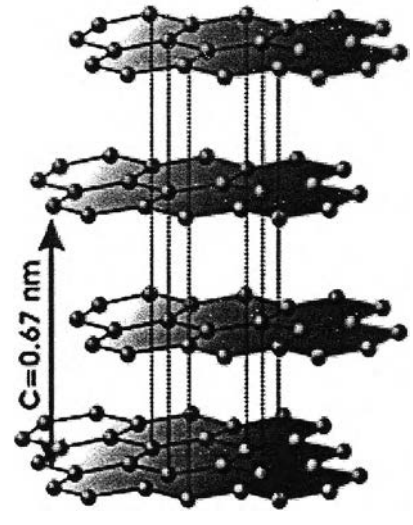
เพชร (Diamond) ประกอบด้วยธาตุคาร์บอน ซึ่งคาร์บอนแต่ละอะตอมสร้างพันธะเคมีแบบทรงสี่หน้า (Tetrahedron) เกิดไฮบริไดเซชันแบบ sp^3 ไฮบริดออร์บิทัล อิเล็กตรอนเวเลนซ์ทั้ง 4 ตัวในอะตอมคาร์บอนสร้างพันธะซิกมา (σ) ซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรงที่สุดกับอะตอมใกล้เคียง รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างของเพชรซึ่งประกอบด้วยอะตอมคาร์บอนที่สร้างพันธะซิกมากับอะตอมใกล้เคียงในทุกทิศทาง มีความยาวพันธะ a_o=0.35 nm [12] เนื่องจากคาร์บอนในเพชรมีการจัดเรียงตัวกันหนาแน่นที่สุด ด้วยพันธะที่มีพลังงานสูง เป็นผลให้เพชรเป็นวัสดุที่มีความแข็งแกร่งมากที่สุด สภาพความนำความร้อนสูงถึง 2000-2500 W/m-K [3] ซึ่งมากกว่าเงิน ซึ่งมีสภาพความนำความร้อนรองลงมาถึง 5 เท่า สภาพต้านทานไฟฟ้าสูงถึง 10^{13}-10^{16} Ω-cm โปร่งแสงในช่วงกว้างตั้งแต่ช่วงแสงที่ตามองเห็นจนถึงช่วงอินฟราเรดย่านไกลและยังเฉื่อยต่อปฏิกิริยาเคมี จึงมีการนำเอาเพชรไปประยุกต์ใช้งานด้านต่างๆ เช่น เคลือบวัสดุเพื่อป้องกันรอยขีดข่วนหรือเพื่อเพิ่มความแข็งแกร่ง ใช้เป็นวัสดุระบายความร้อน ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น



รูปที่ 2.2 โครงสร้างโมเลกุลของเพชร [12]

2.1.3 แกรไฟต์

แกรไฟต์ (Graphite) ประกอบด้วยธาตุคาร์บอนเช่นเดียวกับเพชรแต่อะตอมคาร์บอนมีพันธะเคมีแบบระนาบสามเหลี่ยม (Trigonal planar) อิเล็กตรอนสร้างไฮบริดออร์บิทัลแบบ sp^2 ไฮบริดออร์บิทัล โดยอิเล็กตรอนเวเลนซ์ 3 ตัวแรกจับพันธะ σ กับอะตอมคาร์บอนในระนาบเดียวกัน ส่วนอิเล็กตรอนเวเลนซ์ตัวสุดท้ายจับกับอะตอมที่อยู่ในระนาบติดกันด้วยพันธะไพ (π) ซึ่งเป็นพันธะที่อ่อนมากเมื่อเทียบกับพันธะ σ เป็นผลให้แกรไฟต์อ่อนมากในระหว่างระนาบ รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างโมเลกุลของแกรไฟต์ ซึ่งประกอบด้วยอะตอมคาร์บอนที่สร้างพันธะ σ กับอะตอมในระนาบเดียวกันและพันธะ π ระหว่างระนาบทำให้แกรไฟต์มีลักษณะคล้ายแผ่นกระดาษวางซ้อนกัน [13] จากโครงสร้างโมเลกุลที่แตกต่างกันกับเพชรนี้ทำให้แกรไฟต์มีสมบัติแตกต่างจากเพชรหลายประการ อาทิ เช่น นำไฟฟ้าและนำความร้อนได้สูง มีสมบัติเป็นตัวหล่อลื่นแบบแห้งที่ดี มีเสถียรภาพทางความร้อนสูงและเฉื่อยต่อปฏิกิริยาเคมี เป็นต้น จึงมักใช้ทำเบ้าหลอมโลหะ น้ำมันหล่อลื่นบางชนิด ไส้ถ่านไฟฉาย ใช้เป็นตัวลดความเร็วช่วยควบคุมจำนวนอนุภาคนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ เป็นต้น

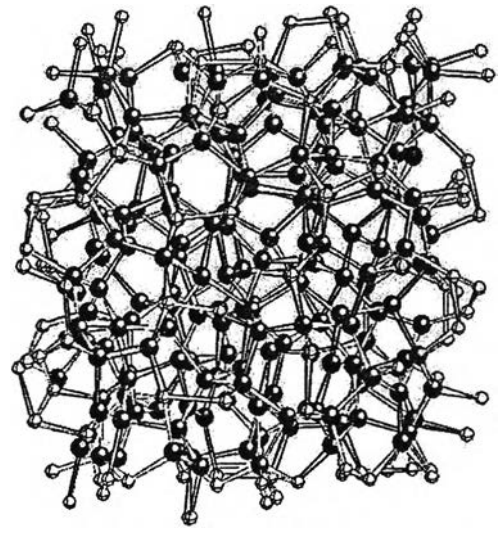


รูปที่ 2.3 โครงสร้างโมเลกุลของแกรไฟต์ [13]

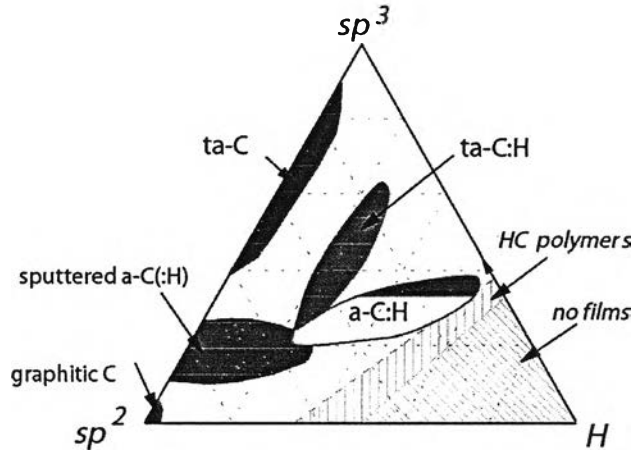
2.2 ฟิล์ม DLC

2.2.1 โครงสร้างและสมบัติของฟิล์ม DLC

ฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (Diamond-Like Carbon; DLC) หรือฟิล์ม DLC เป็นฟิล์มที่มีโครงสร้างแบบอสัณฐาน (Amorphous) [7,14] ประกอบด้วยธาตุคาร์บอนเกาะกันอย่างไร้ระเบียบ (Disorder) ดังรูปที่ 2.4 แต่ยังคงมีส่วนผสมของเฟสที่เป็นผลึกในช่วงสั้น (Short-rang order) โดยมี sp^3 และ sp^2 ไฮบริดออร์บิทัลแสดงลักษณะเฉพาะของเพชรและแกรไฟต์ตามลำดับ สมบัติของฟิล์ม DLC ขึ้นกับอัตราส่วนระหว่าง sp^2/sp^3 และปริมาณไฮโดรเจนในฟิล์ม [7,14] ซึ่งขึ้นกับเงื่อนไขและเทคนิคการสังเคราะห์ โดยสามารถจำแนกฟิล์มที่เกิดจากคาร์บอนออกได้เป็นหลายรูปแบบ รูปที่ 2.5 แสดงถึงองค์ประกอบและขีดจำกัดของการสังเคราะห์ฟิล์มคาร์บอน โดยบริเวณที่มีไฮโดรเจนผสมมากจะไม่ปรากฏฟิล์ม หรืออาจเกิดโพลิเมอร์ของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ได้แก่ พอลิเอทธิลีน (Polyethylene; $(CH_2)_n$) หรือ พอลิอะเซธิลีน (Polyacetylene; $(CH)_n$) ส่วนบริเวณที่มี sp^2 มากจะเป็นฟิล์มคาร์บอนไร้ระเบียบที่มีสมบัติใกล้เคียงกับแกรไฟต์ แต่ส่วนที่มีไฮโดรเจนผสมอยู่น้อยหรือไม่มีอยู่เลยจะมีสัดส่วนของ sp^3 มากฟิล์มที่ได้ในบริเวณนี้จะมีความแข็งแกร่งสูง มีสมบัติใกล้เคียงกับเพชรมากที่สุด [14]



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของฟิล์ม DLC



รูปที่ 2.5 เฟสต่างๆในระบบคาร์บอนโครงสร้างแบบอสัณฐานซึ่งสัมพันธ์กับปริมาณไฮโดรเจน sp^2 และ sp^3 ไฮบริดออร์บิทัล [14]

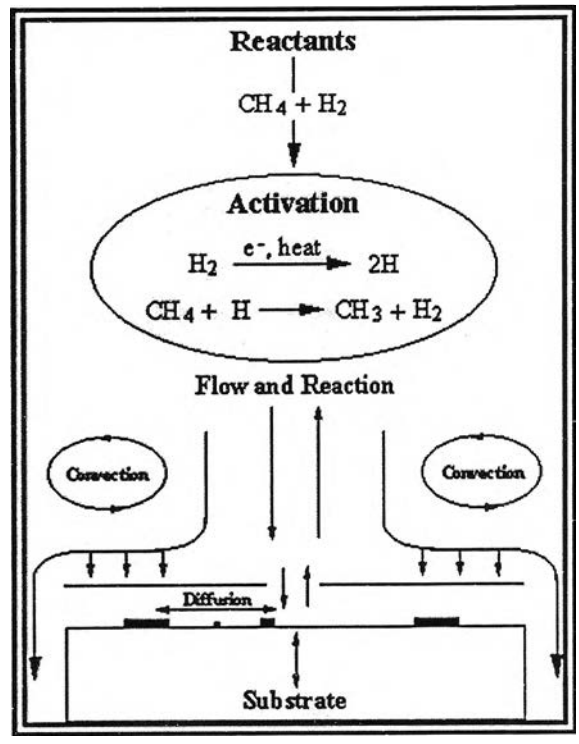
จากสมบัติที่ใกล้เคียงกับเพชร อาทิเช่น สมบัติที่ทนต่อการสึกกร่อน สัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำ เฉื่อยต่อปฏิกิริยาเคมี โปร่งแสงในช่วงอินฟราเรด สภาพความด้านทานไฟฟ้าสูง และค่าคงที่ไดอิเล็กทริกต่ำ [6, 15] ทำให้ฟิล์ม DLC ได้รับความสนใจอย่างมาก โดยส่วนใหญ่จะถูกนำไปประยุกต์ใช้ทางด้านการเคลือบแข็งเพื่อป้องกันการสึกกร่อน ทางด้านทัศนศาสตร์และทางอิเล็กทรอนิกส์ จากสมบัติที่ยึดติดดี ทนต่อการสึกกร่อน สัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำและใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์ต่ำกว่าฟิล์มเพชรจึงเหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้งานทางด้านการเคลือบผิววัสดุเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและอายุการใช้งาน เช่น การเคลือบบนชิ้นส่วนต่างๆที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมที่มีการเสียดสีและใช้งานในสภาพแวดล้อมที่มีความร้อนสูง [4,15] นิยมเคลือบฟิล์ม DLC บนแถบแม่เหล็กหรือแผ่นบันทึกข้อมูล เนื่องจากสมบัติที่เฉื่อยต่อปฏิกิริยาเคมีและเข้ากับชีวภาพได้ (Biocompatible) จึงสามารถใช้เป็นเครื่องมือทางการแพทย์ เช่น เคลือบฟิล์ม DLC บนแสตนเลสเพื่อใช้เป็นลิ้นหัวใจเทียม ใช้เป็นข้อต่อในร่างกาย [7] การใช้งานทางด้านทัศนศาสตร์ เช่น นำเอาฟิล์ม DLC ไปเคลือบบนหน้าต่างทางแสง (Optical window) หรือเลนส์เพื่อป้องกันการขีดข่วนหรือป้องกันการสะท้อนกลับ เคลือบบนแว่นกันแดดเพื่อป้องกันรอยขีดข่วน ส่วนการใช้งานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์นั้นมีการนำฟิล์ม DLC ไปเป็นสิ่งประดิษฐ์สำหรับตัวให้อิเล็กตรอน (Electron emitter devices)

2.2.2 เทคนิคการสังเคราะห์ฟิล์ม DLC

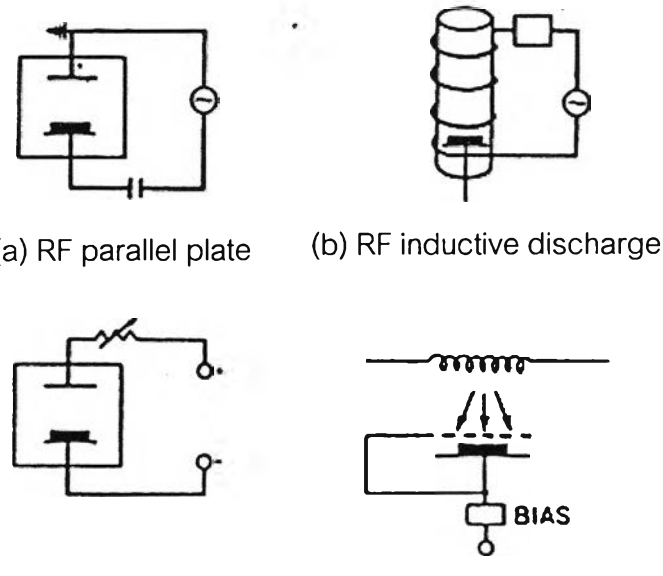
ภายหลังจากที่ S. Aisenberg และ R. Chabot [5] สังเคราะห์ฟิล์ม DLC ขึ้นเป็นครั้งแรกด้วยเทคนิคการยิงลำไอออน C^+ แล้ว ได้มีการคิดค้นและปรับปรุงเทคนิคการสังเคราะห์ฟิล์ม DLC ขึ้นอีกหลากหลายเทคนิค แต่โดยรวมแล้วสามารถจำแนกหลักการพื้นฐานของเทคนิคต่างๆ เหล่านี้ได้เป็น 2 กลุ่ม [16]

กลุ่มแรกได้แก่ กลุ่มการสังเคราะห์เชิงกายภาพ (Physical Vapor Deposition; PVD) ซึ่งกลไกการเกิดฟิล์มนั้นขึ้นกับพลังงานจลน์เพียงอย่างเดียว เช่น การสปัตเทอริงด้วยไฟฟ้ากระแสตรงหรือกระแสสลับที่ความถี่คลื่นวิทยุ (DC/ RF sputtering) และการยิงลำไอออน (Ion beams) เป็นต้น

ส่วนกลุ่มที่ 2 ได้แก่ กลุ่มการตกสะสมไอเชิงเคมี (Chemical Vapor Deposition; CVD) ซึ่งกลไกการสังเคราะห์ฟิล์มในแบบ CVD นี้ ขึ้นกับทั้งพลังงานจลน์ (Kinetic energy) และเทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamic) การสังเคราะห์ฟิล์มแบบ CVD เป็นการกระตุ้นสารตั้งต้นที่อยู่ในสถานะแก๊สให้เกิดการตกสะสมเป็นสารในสถานะของแข็ง รูปที่ 2.6 แสดงกระบวนการเกิดฟิล์มในการสังเคราะห์แบบ CVD โดยเริ่มต้นจาก โมเลกุลแก๊สตั้งต้น (Precursors gas) ซึ่งต้องมีอะตอมของสารที่ต้องการสังเคราะห์รวมอยู่ สำหรับอะตอมที่ต้องการในการสังเคราะห์ฟิล์ม DLC คืออะตอมคาร์บอน ดังนั้นจึงนิยมใช้สารประกอบไฮโดรคาร์บอนผสมกับแก๊สไฮโดรเจนป้อนเข้าสู่ภาชนะสุญญากาศ แล้วกระตุ้นแก๊สด้วยความร้อนหรือกระแสไฟฟ้า เพื่อให้แก๊สตั้งต้นแตกตัวเป็นอะตอม อิเล็กตรอน ไอออนหรืออนุมูล (Radical) ที่เกิดปฏิกิริยาได้ง่ายกว่าโมเลกุลเคลื่อนที่และเกิดปฏิกิริยาบริเวณผิวหน้าแผ่นรองรับ (Substrate) แล้วเกิดการตกสะสมลงบนผิวหน้าแผ่นรองรับ [17] โดยสามารถจำแนกการสังเคราะห์ฟิล์มแบบ CVD ตามวิธีการที่ใช้กระตุ้นแก๊ส อาทิเช่น แบบไส้ความร้อน (Hot Filament; HF) หรือ เสริมด้วยพลาสมา (Plasma Enhanced; PECVD) จากแหล่งกำเนิดพลังงานชนิดต่างๆ ทั้ง กระแสตรง (DC) คลื่นวิทยุ (RF) หรือคลื่นไมโครเวฟ รูปที่ 2.7 แสดงเทคนิค CVD แบบต่างๆที่ใช้ในการสังเคราะห์ฟิล์ม DLC รูปที่ 2.7(a) แสดงการใช้กำลังไฟฟ้าที่ความถี่คลื่นวิทยุแบบ CCP ในการกระตุ้นแก๊สตั้งต้น รูปที่ 2.7(b) แสดงการใช้กำลังไฟฟ้าที่ความถี่คลื่นวิทยุแบบ ICP ที่ขดลวดพันรอบภาชนะสุญญากาศ ในการกระตุ้นแก๊สตั้งต้น รูปที่ 2.7 (c) แสดงการใช้กระแสตรงในการกระตุ้นแก๊สตั้งต้น และรูปที่ 2.7(d) แสดงการใช้ความร้อนจากไส้ความร้อนในการกระตุ้นแก๊สตั้งต้น



รูปที่ 2.6 กระบวนการเกิดฟิล์มในแบบ CVD [17]



(a) RF parallel plate (b) RF inductive discharge

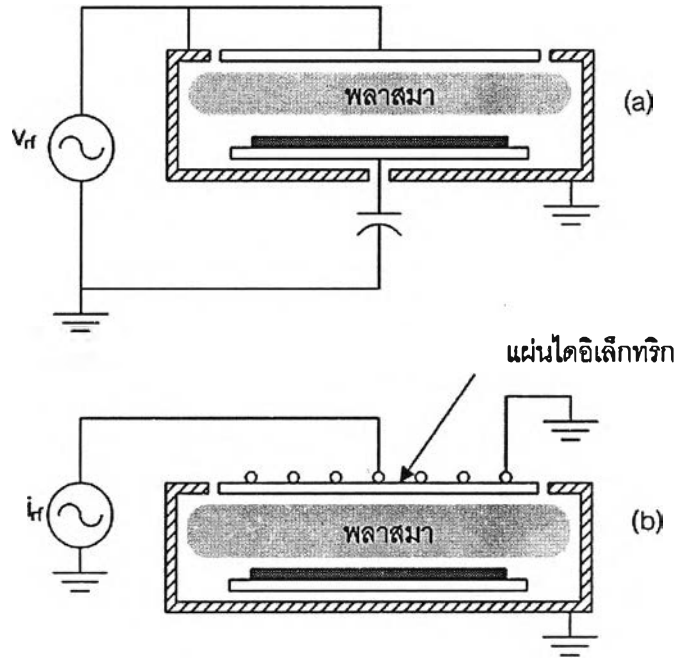
(c) DC glow discharge (e) Hot filament

รูปที่ 2.7 เทคนิคต่างๆที่ใช้ในการสังเคราะห์ฟิล์ม DLC [4, 6]

การเตรียมฟิล์ม DLC ด้วยเทคนิค CVD ในระยะเริ่มต้นนิยมใช้สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีค่าพลังงานการแตกตัวต่ำ [4] เช่น เบนซิน เป็นสารตั้งต้น แต่ฟิล์มที่ได้มีไอปนเปื้อนมากทำให้ใช้ได้เฉพาะในงานเชิงกลที่ไม่ต้องการความบริสุทธิ์ของฟิล์มมากนักเท่านั้น ไม่เหมาะต่อการนำไปใช้เชิงอิเล็กทรอนิกส์เนื่องจากมีผลอย่างมากต่อการนำไฟฟ้า ต่อมามีการใช้แก๊สชนิดอื่นที่ มีอัตราส่วนระหว่าง H/C ต่ำลง เช่น อะเซทิลีน แต่ท้ายสุดนิยมใช้แก๊สมีเทน เนื่องจากแก๊สมีเทนความบริสุทธิ์สูง ซึ่งสามารถขจัดปัญหาการที่มีไนโตรเจนปนเปื้อนในแก๊ส ซึ่งไนโตรเจนจะเข้าไปแทรกในเนื้อฟิล์ม เกิดการโด๊ปฟิล์มทำให้สมบัติการนำไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงอย่างมาก [18]

2.2.3 เทคนิคการตกสะสมไอเชิงเคมีเสริมด้วยพลาสมาที่ความถี่คลื่นวิทยุ

เทคนิคการตกสะสมไอเชิงเคมีเสริมด้วยพลาสมาที่ความถี่คลื่นวิทยุ (Radio Frequency Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition; RF-PECVD) หรือเทคนิคอาร์เอฟ-พีอีซีวีดี (RF-PECVD) เป็นเทคนิคหนึ่งที่นิยมใช้ในการสังเคราะห์ฟิล์ม DLC โดยใช้กำลังไฟฟ้าที่ความถี่คลื่นวิทยุในการกำเนิดพลาสมาภายใต้ความดันต่ำ รูปที่ 2.8 แสดงเทคนิค RF-PECVD ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบตามลักษณะของขั้วไฟฟ้า คือ 1. แบบแผ่นเก็บประจุ (Capacitively Coupled Plasma; CCP) และ 2. แบบเหนี่ยวนำ (Inductively Coupled Plasma; ICP) สำหรับระบบกำเนิดพลาสมาแบบ CCP นั้นกำลังไฟฟ้าที่ความถี่คลื่นวิทยุจะถูกจ่ายให้แก่โมเลกุลแก๊สผ่านขั้วไฟฟ้าที่เป็นแผ่นขนาน ซึ่งส่วนใหญ่แผ่นรองรับจะถูกวางบนขั้วไฟฟ้าที่ต่อกับแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ความถี่คลื่นวิทยุ เมื่อมีกระแสเข้าสู่ขั้วไฟฟ้าจะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าแล้วถ่ายทอดพลังงานแก่โมเลกุลแก๊สที่อยู่ระหว่างขั้วไฟฟ้าทำให้โมเลกุลแก๊สแตกตัวและเปลี่ยนสถานะเป็นพลาสมา เนื่องจากอิเล็กตรอนซึ่งมวลน้อยกว่าไอออนมากจะเคลื่อนที่ไปที่ผนังภาชนะสุญญากาศได้เร็ว คงเหลือเฉพาะไอออนเกิดเป็นชีท (Sheath) หรือบริเวณที่มีศักย์บวกหน้าขั้วไฟฟ้าทั้ง 2 ด้าน ระบบกำเนิดพลาสมาแบบ CCP มีข้อดีในการลังเคราะห์ฟิล์ม คือ สามารถสังเคราะห์ฟิล์มได้บริเวณกว้างและขยายขนาดของระบบได้ง่าย แต่จะต้องสังเคราะห์ที่ความดันต่ำมาก เพื่อเพิ่มอัตราส่วนของไอออนในพลาสมา และลดการชนในบริเวณชีท ซึ่งค่อนข้างยุ่งยากในระบบกำเนิดพลาสมาแบบ CCP [7] สำหรับรายละเอียดของระบบกำเนิดพลาสมาแบบ ICP จะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 2.8 เทคนิคการตกสะสมไอเชิงเคมีเสริมด้วยพลาสมาที่ความถี่คลื่นวิทยุ
(a) แบบ CCP และ (b) แบบ ICP

2.3 ระบบกำเนิดพลาสมาแบบเหนี่ยวนำด้วยกำลังไฟฟ้าที่ความถี่คลื่นวิทยุ

ระบบกำเนิดพลาสมาแบบเหนี่ยวนำด้วยกำลังไฟฟ้าที่ความถี่คลื่นวิทยุ(Radio Frequency Inductively Coupled Plasma; RF ICP) เป็นระบบกำเนิดพลาสมาที่มีความหนาแน่นสูงถึงประมาณ 10^{10}-10^{12} cm^{-3} [8] ในงานวิจัยนี้จะใช้ความถี่มาตรฐาน 13.56 MHz ซึ่งเป็นความถี่ที่องค์การสื่อสารระหว่างประเทศ (International communication authorities) อนุญาตให้ใช้ในงานทางวิทยาศาสตร์ เพื่อไม่รบกวนต่อความถี่ที่ใช้ในการสื่อสาร

2.3.1 องค์ประกอบของระบบกำเนิดพลาสมาแบบ ICP

ในระบบกำเนิดพลาสมาแบบ ICP โดยทั่วไปประกอบด้วย ส่วนประกอบหลัก 3 ส่วนคือ

1. ส่วนของระบบสุญญากาศ ประกอบด้วยปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump) และภาชนะสุญญากาศ (Vacuum chamber) ในกรณีที่เป็นขดลวดตัวนำพันรอบภาชนะ

สุญญากาศ ภาชนะสุญญากาศจะทำจากสารไดอิเล็กทริก อาทิเช่น ควอทซ์ (SiO_2) หรือเซรามิกส์ อะลูมินา (Al_2O_3) ส่วนกรณีที่ใช้ขดลวดแบบระนาบภาชนะสุญญากาศจะทำจากโลหะ ซึ่งสามารถกันการกระจายของคลื่นความถี่สูงออกภายนอกระบบได้ และสามารถปรับแต่งรูปแบบและต่อพอร์ทต่างๆ ได้ง่ายกว่าภาชนะสุญญากาศที่ทำจากสารไดอิเล็กทริก

2. ส่วนจ่ายพลังงาน ประกอบด้วย เครื่องกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุ (RF generator) วงจรปรับค่าความขัด (Matching network) และขดลวดตัวนำ (Induction coil) โดยมีแผ่นไดอิเล็กทริกกั้นระหว่างพลาสมากับขดลวด เครื่องกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุจะจ่ายพลังงานผ่านวงจรปรับค่าความขัด (Matching network) ไปยังขดลวดระนาบ วงจรปรับค่าความขัดทำหน้าที่เพิ่มประสิทธิภาพในการส่งผ่านพลังงานไปยังพลาสมาให้มีประสิทธิภาพมากที่สุด โดยจะปรับให้เกิดกำทอนที่ความถี่คลื่นวิทยุที่ใช้ (13.56 MHz) ที่ค่าความขัด 50 Ω

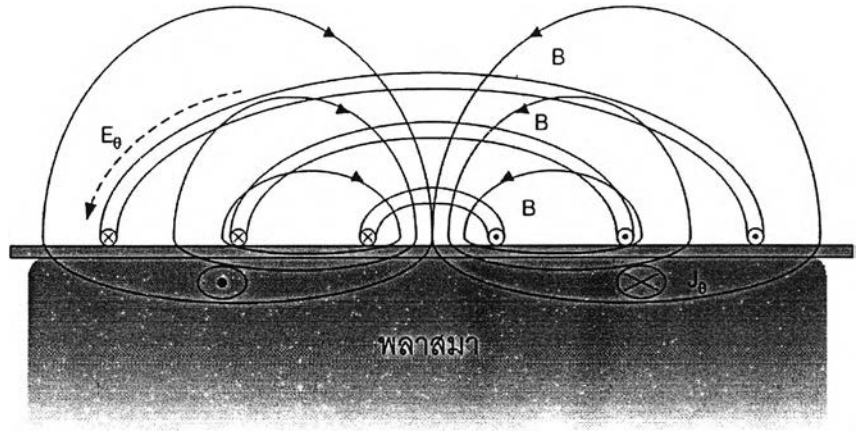
3. ส่วนจ่ายแก๊สหรือสารตั้งต้น ประกอบด้วยแก๊สที่บรรจุอะตอมที่ต้องการในการสังเคราะห์ ป้อนผ่านเครื่องความคุมการไหลเข้าสู่ภาชนะสุญญากาศ

2.3.2 การส่งผ่านพลังงานในระบบกำเนิดพลาสมาแบบเหนี่ยวนำ

ขดลวดระนาบวางอยู่เหนือแผ่นไดอิเล็กทริก เมื่อมีกระแสที่ความถี่คลื่นวิทยุไหลเข้าสู่ขดลวดระนาบ จากกฎของฟาราเดย์ (Faraday law);

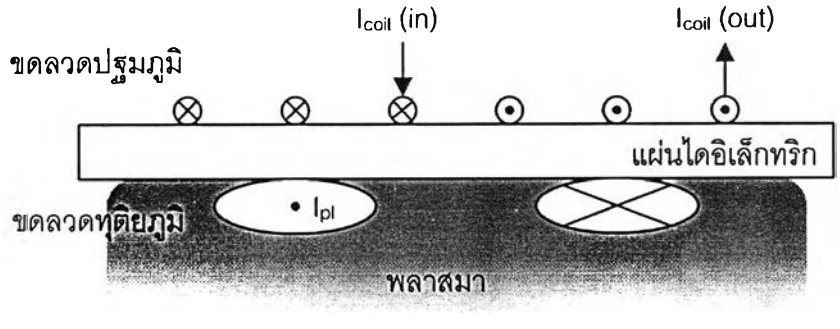
$$\nabla \times E = -\mu_0 \frac{\partial H}{\partial t} \tag{2.1}$$

ในรูปที่ 2.9 แสดงลักษณะของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าแปรผันตามเวลา $E(r,t)$ และ $H(r,t)$ ที่ถูกเหนี่ยวนำขึ้น ($B = \mu_0 H$) ในกรณีของขดลวดระนาบที่สมมาตร สนามไฟฟ้าจะมีองค์ประกอบในทิศ E_θ และสนามแม่เหล็กจะมีองค์ประกอบในทิศ H_r และ H_z รอบขดลวดระนาบ [19, 20] และเมื่อเกิดพลาสมาขึ้นภายใต้ขดลวด สนามแม่เหล็กในขดลวดระนาบจะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามไฟฟ้า E_θ และเกิดกระแส J_θ ขึ้นในพลาสมาในทิศตรงข้ามกับกระแสในขดลวด มีพฤติกรรมเหมือนหม้อแปลงแกนอากาศ (Air core transformer)

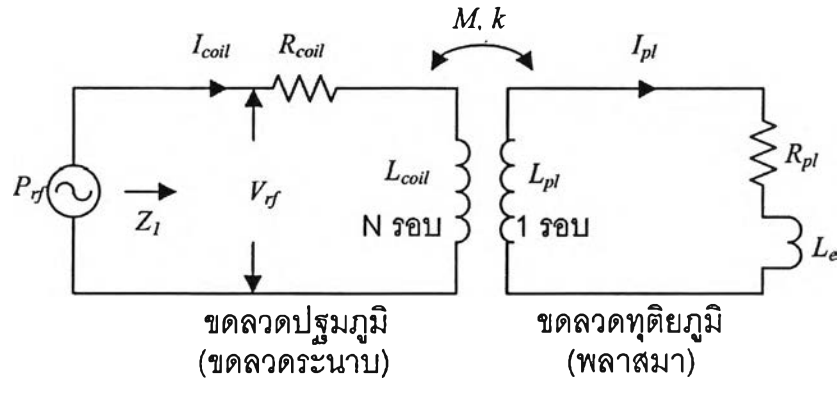


รูปที่ 2.9 สนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นรอบขดลวดระนาบ
ที่วางในบริเวณที่เกิดพลาสมาด้านบนของแผ่นไดอิเล็กทริก

รูปที่ 2.10 แสดงกระแสที่ความถี่คลื่นวิทยุไหลในขดลวดระนาบจะเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสขึ้นในพลาสมาในทิศตรงกันข้ามกับกระแสในขดลวด พฤติกรรมของกระแสในขดลวดและกระแสที่เกิดขึ้นในพลาสมานี้อธิบายได้ด้วยแบบจำลองหม้อแปลงแกนอากาศ (Air Core Transformer model) [19, 20] รูปที่ 2.11 แสดงวงจรของแบบจำลองหม้อแปลงแกนอากาศ โดยขดลวดระนาบเป็นเสมือนขดลวดปฐมภูมิจำนวน N รอบและพลาสมาเป็นเสมือนขดลวดทุติยภูมิจำนวน 1 รอบ



รูปที่ 2.10 หม้อแปลงแกนอากาศในระบบกำเนิดพลาสมาแบบ ICP



รูปที่ 2.11 วงจรของแบบจำลองหม้อแปลงแกนอากาศในระบบกำเนิดพลาสมาแบบ ICP

เมื่อค่าความขัดรวมของวงจรปฐมภูมิ (Z_1) เป็นผลรวมของค่าความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด R_{coil} และ L_{coil} ตามลำดับ

$$Z_1 = R_{coil} + j\omega L_{coil} \tag{2.2}$$

ค่าความขัดของขดลวดทุติยภูมิ (Z_2) เป็นผลรวมของค่าความต้านทานของพลาสมา (R_{pl}) และความเหนี่ยวนำในพลาสมา $(L_{pl} + L_e)$

$$Z_2 = R_{pl} + j\omega(L_{pl} + L_e) \tag{2.3}$$

จากกฎของเคอร์ชอฟ

$$V_{rf} = Z_1 I_{coil} - j\omega M I_{pl} \tag{2.4}$$

$$0 = Z_2 I_{pl} - j\omega M I_{coil} \tag{2.5}$$

โดยที่ค่าความเหนี่ยวนำร่วม $M^2 = k^2 L_{coil} L_{pl}$

$$I_{pl} = \frac{j\omega M I_{coil}}{Z_2} \tag{2.6}$$

$$V_{rf} = Z_1 I_{coil} + \frac{\omega^2 M^2 I_{coil}}{Z_2} \tag{2.7}$$

$$\frac{V_{rf}}{I_{coil}} = Z_1 + \frac{\omega^2 M^2}{Z_2} \tag{2.8}$$

$$Z_{in} = \frac{V_{rf}}{I_{coil}} = Z_1 + \frac{\omega^2 M^2}{Z_2} \tag{2.9}$$

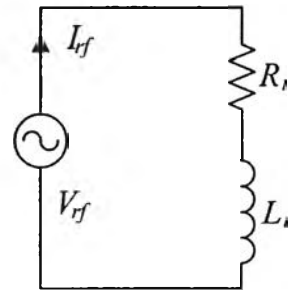
เมื่อแทนค่า Z_1 และ Z_2 จากสมการที่ 2.2 และ 2.3 ลงในสมการที่ 2.9 และจัดรูปใหม่จะได้เป็นสมการที่ 2.10 [21]

$$Z_{in} = \left(R_{coil} + \frac{\omega^2 M R_{pl}}{|Z_2|^2} \right) + j\omega \left(L_{coil} - \frac{\omega^2 M^2 (L_{pl} + L_e)}{|Z_2|^2} \right) \tag{2.10}$$

หากพิจารณาให้ Z_{in} มีค่าที่เทียบเท่ากับค่าที่เกิดจากวงจรสมมูล ดังรูปที่ 2.12 หรือเขียนได้เป็น $Z_{in} = R_1 + j\omega L_1$ ดังนั้น จะได้ค่าความต้านทาน R_1 และค่าความเหนี่ยวนำ L_1 ที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเกิดพลาสมาขึ้นในระบบดังสมการที่ 2.11 และสมการที่ 2.12 ตามลำดับ

$$R_1 = \left(R_{coil} + \frac{\omega^2 M R_{pl}}{|Z_2|^2} \right) \tag{2.11}$$

$$L_1 = \left(L_{coil} - \frac{\omega^2 M^2 (L_{pl} + L_e)}{|Z_2|^2} \right) \tag{2.12}$$



รูปที่ 2.12 วงจรสมมูลแบบจำลองหม้อแปลงแกนอากาศ
ในระบบกำเนิดพลาสมาแบบ ICP [21]

2.4 การสังเคราะห์ฟิล์ม DLC ด้วยเทคนิค RF-PECVD

ในปัจจุบันมีการสังเคราะห์ฟิล์ม DLC ด้วยเทคนิคต่างดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 2.2.2 สำหรับเทคนิค RF-PECVD นั้นเป็นอีกเทคนิคหนึ่งที่นิยมใช้ในการสังเคราะห์ฟิล์ม DLC ในหัวข้อนี้ขอยกตัวอย่างงานวิจัยที่ใช้เทคนิค RF-PECVD ในการสังเคราะห์ฟิล์ม DLC พอสังเขปดังนี้

S. Kumar และ P. N. Dixit [22] ได้ทำการสังเคราะห์ฟิล์ม DLC ด้วยเทคนิค RF-PECVD ด้วยกำลังไฟฟ้าที่ความถี่ 2 ค่า คือ 13.56 MHz และ 100 MHz เพื่อศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดฟิล์ม DLC และสมบัติของฟิล์มที่เปลี่ยนไป จากรายงานผลการวิจัยพบว่าเมื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้าที่ความถี่ 13.56 MHz จาก 100 W/cm^2 ถึง 420 W/cm^2 อัตราการเกิดฟิล์ม DLC เพิ่มขึ้นจาก 3.6 Å/s เป็น 6.7 Å/s เนื่องจากการเพิ่มกำลังไฟฟ้าจะเป็นการเพิ่มอัตราการแตกตัวของแก๊สตั้งต้นและเพิ่มความหนาแน่นของพลาสมาในระบบ

S. C. Won และคณะ [23] ได้ทำการสังเคราะห์ฟิล์ม DLC ในระบบกำเนิดพลาสมาแบบ ICP ลงบนแผ่นรองรับซิลิกอน p-type (100) ขนาด 2 × 2 cm^2 ด้วยกำลังไฟฟ้าที่ความถี่คลื่นวิทยุระหว่าง 25 - 200 W และความดัน 1.0 torr เพื่อศึกษาถึงผลของกำลังไฟฟ้าที่ความถี่คลื่นวิทยุต่อสมบัติของฟิล์ม DLC โดยได้ตรวจสอบลักษณะโครงสร้างของฟิล์มด้วยรามานสเปกโทรสโกปีและศึกษาลักษณะพื้นผิวฟิล์มด้วย Atomic Force Microscopy (AFM) จากรายงานการวิจัยที่ศึกษาลักษณะพื้นผิวฟิล์มด้วย AFM พบว่าพื้นผิวฟิล์มมีความขรุขระเปลี่ยนแปลงไปตามกำลังไฟฟ้าที่ความถี่คลื่นวิทยุ และสเปกตรัมรามานปรากฏพีค D ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1368 cm^{-1} และปรากฏพีค G ที่ตำแหน่งเลขคลื่นระหว่าง 1534 - 1573 cm^{-1} ซึ่งความสำคัญและเหตุผลของการเกิดพีค D และ G จะได้กล่าวถึงในหัวข้อ 2.7.2 ต่อไป

Y.T. Kim [24] ได้สังเคราะห์ฟิล์ม DLC ลงบนแผ่นรองรับซิลิกอน p-type (100) ด้วยเทคนิค RF-PECVD ด้วยกำลังไฟฟ้าที่ความถี่คลื่นวิทยุระหว่าง 200 - 400 W ความดันที่ใช้มีค่าระหว่าง 0.4 - 6.0 torr (53.3 - 800 Pa) และอัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สมีเทนคงที่ โดยตรวจสอบลักษณะโครงสร้างของฟิล์มด้วยรามานสเปกโทรสโกปีและศึกษาลักษณะพื้นผิวฟิล์มด้วย Atomic Force Microscopy (AFM) จากรายงานการวิจัยพบว่าความดันและกำลังไฟฟ้าที่ความถี่คลื่นวิทยุมีผลต่อโครงสร้างและสมบัติของฟิล์ม DLC ลักษณะพื้นผิวฟิล์มที่ศึกษาด้วย AFM มีความขรุขระเปลี่ยนแปลงไปเมื่อแปรค่าความดัน สเปกตรัมรามานปรากฏพีค D ที่ตำแหน่งเลขคลื่นประมาณ 1350 cm^{-1} และปรากฏพีค G ที่ตำแหน่งเลขคลื่นระหว่าง 1575 - 1600 cm^{-1} ตามความดันและกำลังไฟฟ้าที่ความถี่คลื่นวิทยุที่เปลี่ยนไป

W.S.Liew และคณะ [25] ได้สังเคราะห์ฟิล์ม DLC ด้วยเทคนิค RF-PECVD ด้วยระบบกำเนิดพลาสมาแบบ ICP ที่กำลังไฟฟ้าที่ความถี่ 13.56 MHz 500 W ลงบนแผ่นรองรับซิลิกอนขนาด 2×1.5 cm^2 ก่อนการสังเคราะห์มีการขัดผิวหน้าแผ่นรองรับด้วยผงเพชรขนาด 0.1 μm อัตราส่วนของแก๊สมีเทนต่อแก๊สไฮโดรเจนที่ใช้สังเคราะห์เท่ากับ 0.8% 1.0% 3.0% และ5.0% สังเคราะห์เป็นเวลานาน 15 ชั่วโมง หลังจากนั้นตรวจสอบลักษณะโครงสร้างของฟิล์มด้วยรามานสเปกโทรสโกปีและศึกษาลักษณะพื้นผิวฟิล์มด้วย SEM จากรายงานผลการวิจัยพบว่าอัตราส่วนของแก๊สมีเทนต่อแก๊สไฮโดรเจนมีผลต่อโครงสร้างและสมบัติของฟิล์ม DLC จากลักษณะพื้นผิวฟิล์มที่ศึกษาด้วย SEM พบว่าพื้นผิวฟิล์มมีลักษณะเป็นดอกกะหล่ำ (Cauliflower) และพหุผลึก (Polycrystalline) สำหรับสเปกตรัมรามานปรากฏพีค D ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1350 - 1360 cm^{-1} และปรากฏพีค G ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1580 - 1590 cm^{-1} ตามอัตราส่วนของแก๊สมีเทนต่อแก๊สไฮโดรเจนที่เปลี่ยนแปลงไป

T. Shimizu และคณะ [26] ได้ลังเคราะห์ฟิล์ม DLC ลงบนแผ่นรองรับ Ni ด้วยเทคนิค RF-PECVD ที่มีวงแหวนแม่เหล็กและมีตะแกรงกั้นระหว่างบริเวณที่กำเนิดพลาสมากับบริเวณที่เกิดฟิล์มเพื่อควบคุมพลาสมาในระบบ เมื่อแปรค่าระยะห่างระหว่างตะแกรงกับบริเวณที่เกิดพลาสมาแล้วจะสามารถควบคุมอุณหภูมิอิเล็กตรอนในบริเวณที่เกิดฟิล์มได้ การลังเคราะห์ฟิล์มใช้อัตราส่วนของแก๊สมีเทนต่อแก๊สไฮโดรเจนคงที่ด้วยความดัน 0.1 torr กำลังไฟฟ้าที่ความถี่คลื่นวิทยุ 300 W และวัดอุณหภูมิอิเล็กตรอนด้วยหัววัดลางมัวร์ อุณหภูมิอิเล็กตรอนถูกแปรค่าระหว่าง 0.52 - 2.46 eV โดยตรวจสอบลักษณะโครงสร้างของฟิล์มด้วยรามานสเปกโทรสโกปีและศึกษาลักษณะพื้นผิวฟิล์มด้วย SEM จากรายงานการวิจัยพบว่าอุณหภูมิอิเล็กตรอนมีผลต่อโครงสร้างและสมบัติของฟิล์ม DLC ลักษณะพื้นผิวฟิล์มที่ศึกษาด้วย SEM มีลักษณะเป็นผลึก (Crystalline) กระจายบนผิวหน้าและบางส่วนมีลักษณะเป็นพื้นผิวเรียบ สำหรับสเปกตรัมรามานปรากฏพีค D ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1332 cm^{-1} และปรากฏพีค G ที่ตำแหน่งเลขคลื่นประมาณ 1590 cm^{-1} ตามอุณหภูมิอิเล็กตรอนที่เปลี่ยนไป

สำหรับผลการวิจัยดังกล่าวข้างต้น จะกล่าวถึงในรายละเอียดอีกครั้งในหัวข้อที่ 2.6.1 และ 2.7.3 และจะนำไปเปรียบเทียบกับผลงานวิจัยนี้โดยละเอียดอีกครั้งในบทที่ 4

หอสมุดกลาง สำนักงานวิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.5 สมบัติของพลาสมา

2.5.1 การวัดพารามิเตอร์ของพลาสมาด้วยหัววัดทางไฟฟ้า

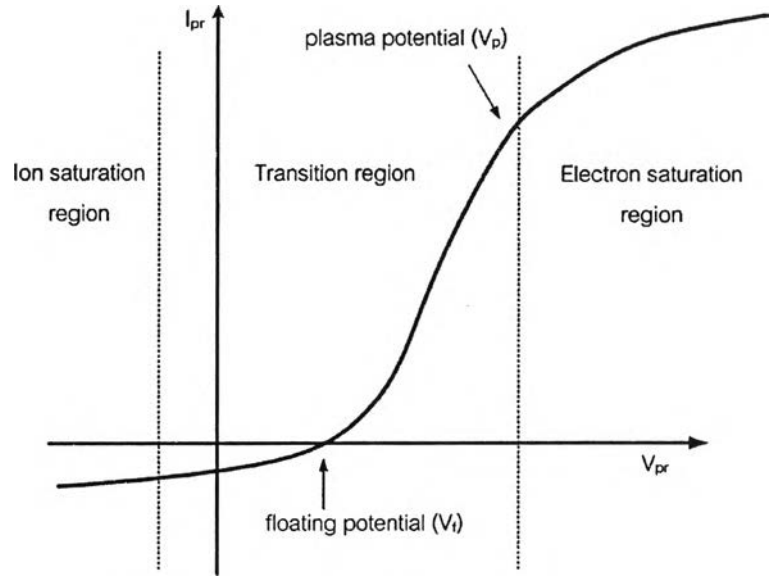
วิธีที่ใช้วัดพารามิเตอร์ของพลาสมามีด้วยกันหลายวิธี เช่น การใช้เครื่องวิเคราะห์โดยมวล (Mass spectroscopy) และ Optical Emission Spectroscopy (OES) [21] เป็นต้น หัววัดทางไฟฟ้าหรือหัววัดลางมัวร์ (Langmuir probe) เป็นอีกวิธีหนึ่งที่นิยมใช้วัดพารามิเตอร์ของพลาสมา ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายและราคาถูกกว่าเมื่อเทียบกับเทคนิคอื่นที่กล่าวมาข้างต้น นอกจากนี้ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากเทคนิคหัววัดลางมัวร์ยังเป็นค่าพารามิเตอร์ ณ ตำแหน่งที่วัดโดยตรง (Local parameters) [27]

การวัดพารามิเตอร์ของพลาสมาด้วยหัววัดลางมัวร์ ทำได้โดยการสอดเส้นลวดตัวนำขนาดเล็กเข้าไปในพลาสมา แล้ววัดค่ากระแสที่ไหลเข้าสู่หัววัดเมื่อแปรค่าความต่างศักย์ที่จ่ายให้แก่หัววัด ในรูปที่ 2.13 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่เปลี่ยนตามความต่างศักย์ที่ป้อนให้แก่หัววัด ลักษณะเฉพาะของกระแสกับความต่างศักย์ (I-V characteristics) ของหัววัดลางมัวร์นี้มักถูกแบ่งพิจารณาออกเป็น 3 บริเวณตามชนิดของกระแสที่ไหลเข้าสู่หัววัด [21, 27, 28] ดังต่อไปนี้

บริเวณที่ 1. เป็นบริเวณไอออนอิ่มตัว (Ion saturation region): ความต่างศักย์ที่ป้อนให้แก่หัววัด (V_{pr}) มีค่าเป็นลบเมื่อเทียบกับศักย์พลาสมา (Plasma potential; V_p) ที่ล้อมรอบหัววัด กำแพงศักย์ต่ออิเล็กตรอน (Electron potential barrier) สูงมากในบริเวณนี้ ทำให้อิเล็กตรอนไม่สามารถผ่านเข้าสู่หัววัดได้ ตรงกันข้ามกับไอออนที่ไหลเข้าสู่หัววัดจำนวนมาก จึงเกิดชีทไอออน (Ion sheath) ล้อมรอบหัววัด

บริเวณที่ 2. เป็นบริเวณการเปลี่ยนแปลง (Transition region): เมื่อค่าความต่างศักย์ที่ป้อนให้แก่หัววัดเป็นบวกเพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับศักย์พลาสมา กำแพงศักย์ต่ออิเล็กตรอนลดลงทำให้มีอิเล็กตรอนไหลเข้าสู่หัววัดเพิ่มมากขึ้น ตรงกันข้ามกับไอออนที่ไหลเข้าสู่หัววัดลดลงจนกระทั่งเมื่อถึงความต่างศักย์ค่าหนึ่ง กระแสไอออนเท่ากับกระแสอิเล็กตรอน ทำให้กระแสรวมที่ไหลเข้าสู่หัววัดเท่ากับศูนย์ ศักย์ที่ตำแหน่งนี้เรียกว่า "ศักย์ลอย" (Floating potential; V_f) อิเล็กตรอนไหลเข้าสู่หัววัดเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่ง ค่าความต่างศักย์ที่จ่ายให้แก่หัววัดเท่ากับศักย์พลาสมา ทำให้ทั้งอิเล็กตรอนและไอออนที่ตำแหน่งนี้ ต่างเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเนื่องจากอุณหภูมิของตัวมันเอง (Thermal velocity) แต่เนื่องจากอิเล็กตรอนมวลน้อยกว่าไอออนมาก ทำให้เคลื่อนที่เข้าสู่หัววัดได้มากกว่าไอออน

บริเวณที่ 3. เป็นบริเวณอิเล็กตรอนอิ่มตัว (Electron saturation region): เมื่อเพิ่มความต่างศักย์ให้แก่หัววัดจนกระทั่งมากกว่าศักย์พลาสมา ไอออนที่พลังงานน้อยจะถูกผลักออกไป อิเล็กตรอนจำนวนมากไหลเข้าสู่หัววัด เกิดชีทอิเล็กตรอน (Electron sheath) ล้อมรอบหัววัดและอิ่มตัวในที่สุด



รูปที่ 2.13 ลักษณะเฉพาะของกระแสกับความต่างศักย์ [28]

2.5.2 อุณหภูมิอิเล็กตรอน (Electron temperature; T_e)

ในการวิเคราะห์ข้อมูลจากลักษณะเฉพาะของกระแสกับความต่างศักย์ จะพิจารณาจากข้อมูลในช่วงการเปลี่ยนแปลง เมื่อชีทที่ล้อมรอบหัววัดบางมากและไม่มีการชนกันของอนุภาคในชีท [27] พลาสมามีการแจกแจงอิเล็กตรอนแบบแมกซ์เวล (Maxwellian distribution) กระแสอิเล็กตรอน (I_e) เป็นดังสมการที่ 2.13

$$I_e = I_{es} \exp\left(\frac{e(V_p - V_s)}{kT_e}\right) \tag{2.13}$$

โดยที่กระแสอิเล็กตรอนอิ่มตัว I_{es} เท่ากับ

$$I_{es} = en_e A_p \left(\frac{kT_e}{2\pi m_e}\right)^{1/2} \tag{2.14}$$

เมื่อ A_p เป็นพื้นที่ผิวทั้งหมดของหัววัดที่สัมผัสกับพลาสมา

T_e เป็นอุณหภูมิอิเล็กตรอนในหน่วย K

n_e เป็นความหนาแน่นของอิเล็กตรอน

m_e เป็นมวลของอิเล็กตรอน

k เป็นค่าคงที่โบลซ์มานน์

เมื่อหาอัตราการเปลี่ยนแปลงของลอการิทึมของกระแสอิเล็กตรอนในสมการที่ 2.13 จะสามารถหาอุณหภูมิอิเล็กตรอน จากสมการที่ 2.15

$$\frac{kT_e}{e} = \frac{\Delta V}{\Delta \ln I_e} \tag{2.15}$$

ซึ่งจะนำไปคำนวณหาค่าอุณหภูมิอิเล็กตรอนใน

2.5.3 **ความหนาแน่นของพลาสมา** (Plasma density; n_p)

จากนิยามของพลาสมาที่มีสมบัติประหนึ่งเป็นกลางทางไฟฟ้า (quasi-neutral) ดังนั้นจึงสามารถอนุมานได้ว่า ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน (n_e) และความหนาแน่นของไอออน (n_i) เท่ากับความหนาแน่นของพลาสมา (n_p) นั่นคือ $n_e \approx n_i \approx n_p$ พิจารณากระแสไอออนอิ่มตัว (I_{is}) [29] ดังสมการที่ 2.16

$$I_{is} = 0.61 e n_i A_p \left(\frac{kT_e}{M_i}\right)^{1/2} \tag{2.16}$$

ดังนั้นความหนาแน่นของพลาสมา [29] เท่ากับ

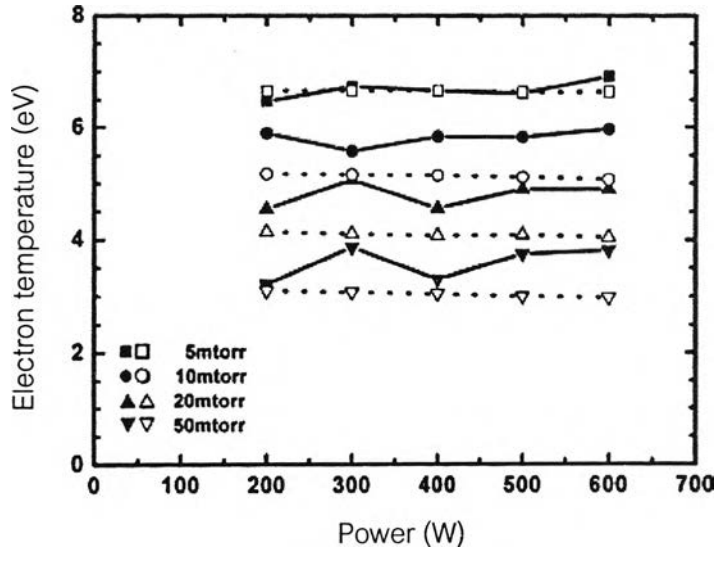
$$n_p = \frac{I_{is}}{0.61 A_p e}\left(\frac{M}{kT_e}\right)^{1/2} \tag{2.17}$$

สมการที่ 2.15 และสมการที่ 2.17 นี้จะถูกนำไปใช้ในการคำนวณเพื่อหาค่าอุณหภูมิอิเล็กตรอนและความหนาแน่นของพลาสมาในระบบกำเนิดพลาสมาแบบ ICP ในหัวข้อที่ 3.2 และแสดงผลการวัดที่ได้ในหัวข้อที่ 4.1

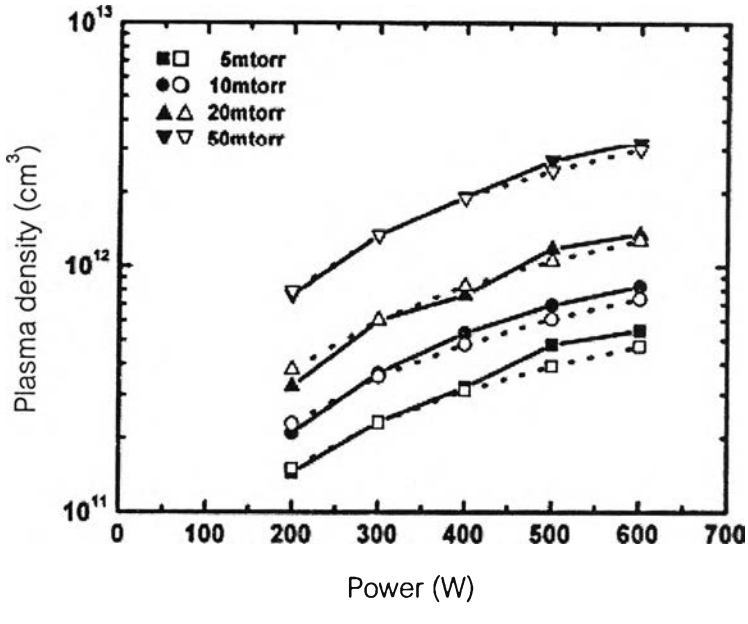
2.5.4 พารามิเตอร์ของพลาสมาในระบบ ICP

สมบัติของพลาสมาที่เกิดขึ้นในระบบ RF-PECVD นั้นมีลักษณะเปลี่ยนไปตามภาวะที่ใช้ในระบบ ในหัวข้อนี้จะเป็นการศึกษาผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวัดพารามิเตอร์ของพลาสมาในระบบ ICP

C. K. Kim [30] ได้ทำการวัดพารามิเตอร์ของพลาสมาในระบบ ICP ด้วยหัววัดลางมัวร์ ที่กำลังไฟฟ้าที่ความถี่คลื่นวิทยุระหว่าง 200 - 600 W ความดัน 0.005 - 0.05 torr จากรายงานการวิจัยพบว่าอุณหภูมิของอิเล็กตรอนมีค่าอยู่ในช่วง 3 - 7 eV รูปที่ 2.14 แสดงอุณหภูมิอิเล็กตรอนซึ่งไม่ขึ้นกับกำลังไฟฟ้าอย่างชัดเจน แต่อุณหภูมิอิเล็กตรอนมีค่าลดลงเมื่อความดันแก๊สเพิ่มขึ้น ซึ่ง C. K. Kim ได้อธิบายว่าที่ความดันต่ำอัตราการชนกันระหว่างอิเล็กตรอนกับอนุภาคต่ำทำให้พลังงานเฉลี่ยของอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้น รูปที่ 2.15 แสดงผลการวัดความหนาแน่นของพลาสมาซึ่งมีค่าอยู่ในระดับ 10^{11}- 10^{13} cm^{-3} ความหนาแน่นของพลาสมามีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อกำลังไฟฟ้าที่ความถี่คลื่นวิทยุและความดันเพิ่มขึ้น เขาได้อธิบายว่าเป็นผลจากที่ความดันสูงอัตราการการแตกตัวจากการชนของอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นและการสูญเสียไอออนกับผนังภาชนะสุญญากาศลดลง



รูปที่ 2.14 อุณหภูมิอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นเมื่อความดันแก๊สลดลง
จากการทดลองของ C. K. Kim [30]



รูปที่ 2.15 ความหนาแน่นของพลาสมาเพิ่มขึ้นเมื่อความดันแก๊สและกำลังไฟฟ้าที่ความถี่คลื่นวิทยุเพิ่มขึ้น จากการทดลองของ C. K. Kim [30]

C. W. Chung และคณะ [31] ได้วัดพารามิเตอร์ของพลาสมา ด้วยหัววัดลางมัวร์ในระบบ ICP ที่กำลังไฟฟ้าที่ความถี่คลื่นวิทยุ 100 - 300 W ที่ความดัน 0.001 torr จากรายงานการวิจัยพบว่าอุณหภูมิของอิเล็กตรอนมีค่าอยู่ในช่วง 5.5 - 6.7 eV โดยอุณหภูมิอิเล็กตรอนไม่ขึ้นกับกำลังไฟฟ้าที่ความถี่คลื่นวิทยุ และความหนาแน่นพลาสมามีค่าอยู่ในระดับ 10^{10} cm^{-3} ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อกำลังไฟฟ้าที่ความถี่คลื่นวิทยุเพิ่มขึ้น

2.6 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด หรือ SEM เป็นเครื่องมือวิทยาศาสตร์ประเภทกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ลำอิเล็กตรอนฉายหรือส่องกวาดไปบนผิวตัวอย่างที่ต้องการตรวจสอบเพื่อให้ได้ข้อมูลของลักษณะพื้นผิว [32]

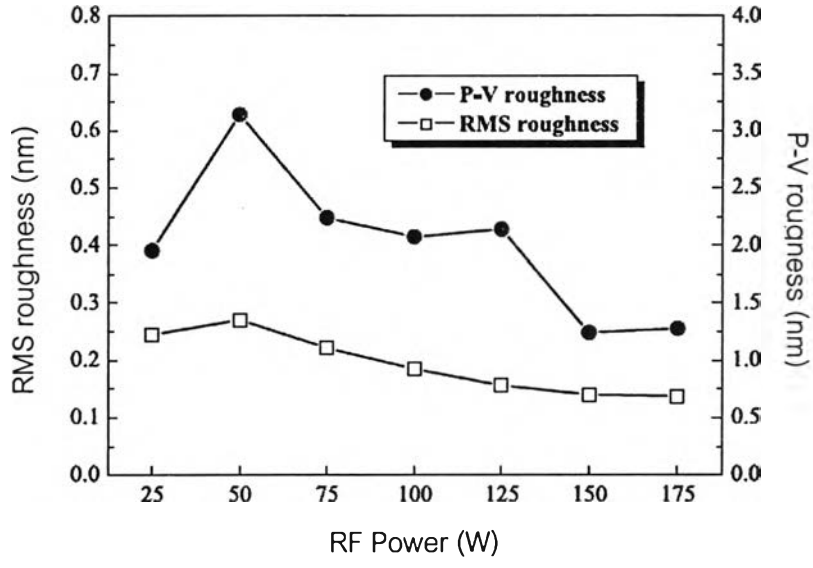
หลักการทำงานของ SEM เริ่มจากกลุ่มอิเล็กตรอนปฐมภูมิที่เกิดจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (Electron gun) ถูกรวบรวมและบีบให้เล็กลงโดยระบบเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าให้เป็นลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิตกลงและกวาดไปบนพื้นผิวของตัวอย่างที่ต้องการตรวจสอบ เมื่อลำอิเล็กตรอนตกกระทบผิวตัวอย่างจะเกิดอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับผิวตัวอย่าง ทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ ซึ่งอิเล็กตรอนบางส่วนกระเจิงออกมาจากผิวตัวอย่างจะถูกรวบรวมเป็นสัญญาณโดยชุดรวมสัญญาณ (Collector) สัญญาณนี้จะถูกเปลี่ยนไปเป็นโฟตอนและส่งผ่านไป

ยังเครื่องขยายแสง (Photo multiplier) ซึ่งจะเปลี่ยนโฟตอนเป็นอิเล็กตรอนและถูกขยายให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า ปรากฏเป็นสัญญาณภาพบนจอรับภาพแสดงลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างในที่สุด

2.6.1 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของฟิล์ม DLC

ในหัวข้อนี้เป็นการศึกษาลักษณะพื้นผิวของฟิล์ม DLC จากตัวอย่างงานวิจัยที่สังเคราะห์ฟิล์ม DLC ด้วยเทคนิค RF-PECVD ดังที่กล่าวไว้แล้วในหัวข้อ 2.4

จากการศึกษาผลงานวิจัยของ S. C. Won และคณะ [23] ที่ได้ทำการสังเคราะห์ฟิล์ม DLC ด้วยกำลังไฟฟ้าที่ความถี่คลื่นวิทยุระหว่าง 25 - 200 W รูปที่ 2.16 แสดงผลการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวฟิล์มด้วย AFM ซึ่งพบว่าที่กำลังไฟฟ้าที่ความถี่คลื่นวิทยุ 25 - 50 W พื้นผิวฟิล์มมีความขรุขระ แต่เมื่อกำลังไฟฟ้าที่ความถี่คลื่นวิทยุเพิ่มขึ้นผิวฟิล์มจะเรียบขึ้น ค่าความขรุขระลดลงจาก 0.28 nm เป็น 0.15 nm

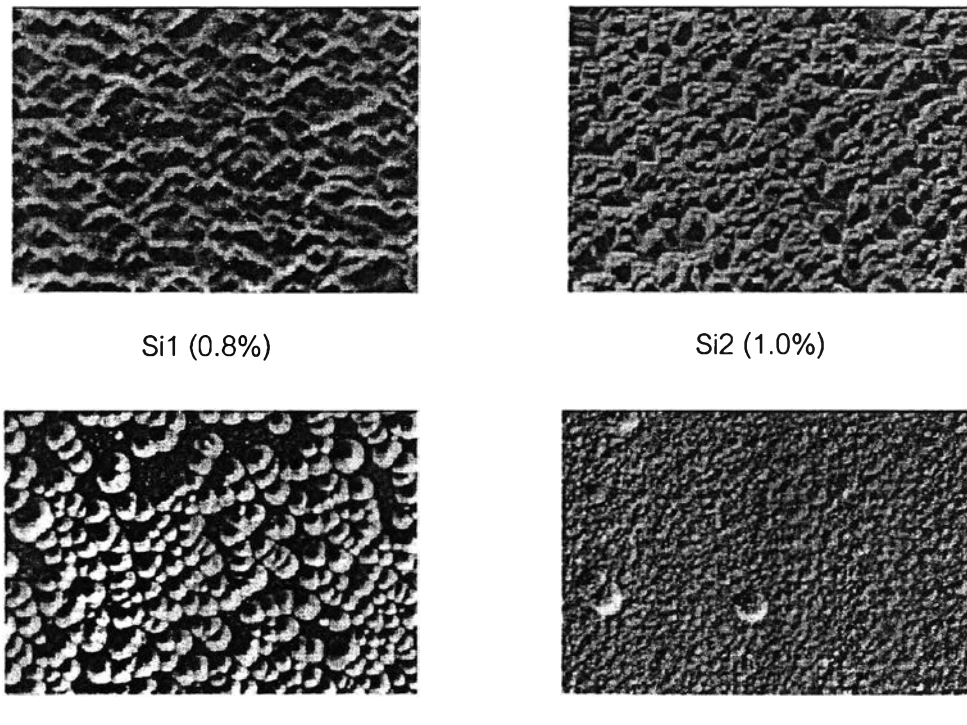


รูปที่ 2.16 ความขรุขระของพื้นผิวฟิล์ม DLC ที่วัดด้วย AFM
จากการทดลองของ S. C. Won และคณะ [23]

จากการศึกษาผลงานวิจัยของ Y.T. Kim [24] สังเคราะห์ฟิล์ม DLC ด้วยกำลังไฟฟ้าที่ความถี่คลื่นวิทยุระหว่าง 200 - 400 W ที่ความดัน 0.4 - 6.0 torr (53.3 - 800 Pa) ลักษณะพื้นผิวฟิล์มที่ศึกษาด้วย AFM มีค่าความขรุขระที่วัดได้จาก AFM ลดลง จาก 10 $\mathring{A}$ เป็น 1.2 Å แต่เมื่อเพิ่มความดันต่อไปจนถึง 6.0 torr (800 Pa) พื้นผิวของฟิล์มมีค่าความขรุขระเพิ่มมากขึ้น Y.T. Kim ได้อธิบายว่าเนื่องจากที่ความดันต่ำ ไม่มีการชนกันของอนุภาคต่างๆ พลังงาน

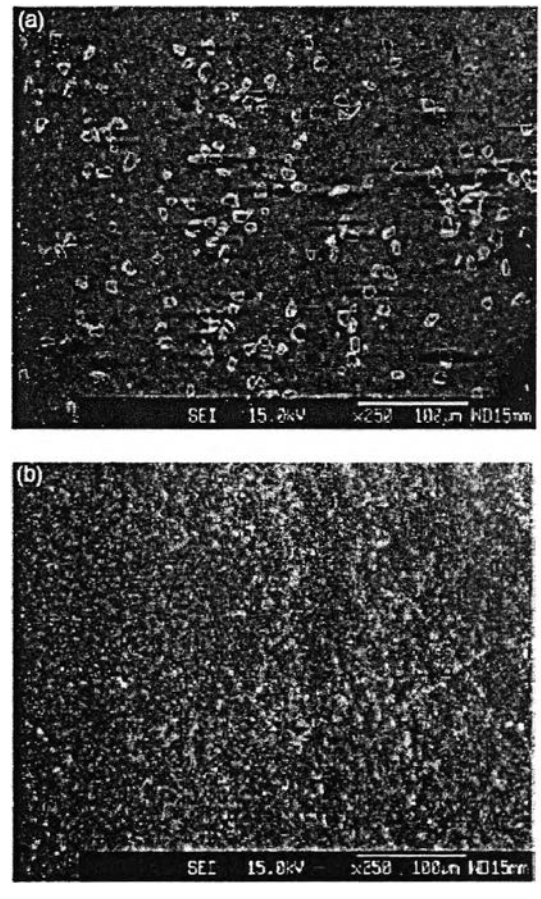
ของไอออนจึงขึ้นกับกำลังไฟฟ้าและมีพลังงานสูงกว่าไอออนที่ความดันสูง กลไกที่ควบคุมการเกิดฟิล์มในช่วงนี้เป็นการสปัตเทอร์ของไอออนที่มีพลังงานสูง เมื่อความดันสูงขึ้นพลังงานไอออนลดลงเนื่องจากการชนในบริเวณซีททำให้เกิดการตกสะสมของไอออนพลังงานต่ำ ทำให้ผิวฟิล์มมีความขรุขระขึ้น

จากการศึกษาผลงานวิจัยของ W.S. Liew และคณะ [25] ที่สังเคราะห์ฟิล์ม DLC ที่อัตราส่วนของแก๊สมีเทนต่อแก๊สไฮโดรเจนเท่ากับ 0.8% 1.0% 3.0% และ5.0% รูปที่ 2.17 แสดงผลการศึกษาลักษณะผิวหน้าฟิล์มด้วย SEM พบว่าลักษณะพื้นผิวของฟิล์มที่อัตราส่วน 0.8% และ1.0% มีลักษณะเป็นพหุผลึก (Polycrystalline) ส่วนที่อัตราส่วนของแก๊สมีเทนต่อแก๊สไฮโดรเจน 3.0% ผิวหน้าฟิล์มมีลักษณะคล้ายลูกบอล (Ball-like structure) ขนาด 3 - 4 μm และที่ 5.0% ผิวหน้าฟิล์มมีสักษณะเป็นดอกกะหล่ำ (Cauliflower-like structure) ขนาด 8 - 10 μm และมีเกรนขนาดเล็กผสม เนื่องจาก sp^3 แสดงลักษณะเป็นผลึกมากกว่า sp^2 ดังนั้นจึงเชื่อว่าตัวอย่าง Si1 ที่ 0.8% และ Si2 ที่ 1.0% มีพันธะ sp^3 มากกว่า Si3 ที่ 2.0% และ Si4 ที่ 5.0% ซึ่งแสดงลักษณะของอสัณฐานมากกว่า



รูปที่ 2.17 แสดงผลลักษณะผิวหน้าฟิล์มที่ได้จากการทดลองของ W.S. Liew และคณะ [25]

จากการศึกษาผลงานวิจัยของ T. Shimizu และคณะ [26] ที่ทำการสังเคราะห์ฟิล์ม DLC ด้วยแก๊สผสมระหว่างแก๊สมีเทนกับแก๊สไฮโดรเจน กำลังไฟฟ้าที่ความถี่คลื่นวิทยุ 300 W อุณหภูมิอิเล็กตรอนมีค่าระหว่าง 0.52 - 2.46 eV รูปที่ 2.18 แสดงลักษณะพื้นผิวฟิล์มที่อุณหภูมิอิเล็กตรอน 0.52 และ 2.46 eV ที่อุณหภูมิอิเล็กตรอนเท่ากับ 0.52 eV จะปรากฏผลึกเพชร (Crystalline diamond) กระจายบนผิวหน้ามีขนาดประมาณ 20 μm แต่เมื่ออุณหภูมิอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นเป็น 2.46 eV ฟิล์มมีพื้นผิวเรียบขึ้น T. Shimizu อธิบายว่าเป็นผลเนื่องมาจากที่อุณหภูมิอิเล็กตรอนต่ำอนุมูลที่แตกตัวมากคือ CH_3 ปฏิกิริยาสำคัญที่เกิดขึ้นในระบบคือ $CH_4 \longrightarrow CH_3+H$ ในขณะที่การแตกตัวของ CH_4 เป็นอนุมูล CH_2 ถูกจำกัด ซึ่งเชื่อว่าอนุมูล CH_3 เป็นอนุมูลสำคัญที่เสริมให้เกิดเพชรขึ้น ในขณะที่อนุมูล CH_2 เป็นอนุมูลที่เสริมให้เกิดแกรไฟต์ขึ้น [1,17]



(a) Te = 0.52 eV

(b) Te = 2.46 eV

รูปที่ 2.18 พื้นผิวของฟิล์ม DLC จากการทดลองของ T. Shimizu และคณะ [26]

2.7 รามานสเปกโทรสโกปี

2.7.1 หลักการกระเจิงของรามาน

รามานสเปกโทรสโกปี (Raman spectroscopy) ใช้หลักการกระเจิงของรามาน (Raman scattering) เพื่อจำแนกโมเลกุลและโครงสร้างของสาร การกระเจิงของรามานเกิดจากการชนกันแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic scattering) ของโฟตอนกับโมเลกุลของสารตัวอย่าง [33] ความถี่ของโฟตอนที่กระเจิงออกมานั้นมีการเปลี่ยนแปลงจากโฟตอนตกกระทบเล็กน้อย ในกรณีที่โมเลกุลที่ได้รับพลังงานจากโฟตอน ขึ้นไปอยู่ที่สภาวะเร้าและกลับลงมาสู่สภาวะพื้น แสงที่กระเจิงออกมามีความถี่สูงกว่าแสงตกกระทบเรียกการกระเจิงแบบนี้ว่า แบบสโตกส์ (Stokes) ส่วนในกรณีที่แสงที่กระเจิงออกมามีความถี่ต่ำกว่าแสงตกกระทบเรียกการกระเจิงแบบนี้ว่า แบบแอนตี้สโตกส์ (Anti-Stokes)

โมเลกุลที่ให้เส้นสเปกตรัมรามานได้นั้น โมเลกุลจะเกิดการบิดเบี้ยว (Distortion) อันเนื่องมาจากการกระจายของกลุ่มหมอกอิเล็กตรอนรอบพันธะในโมเลกุลตามด้วยการกระเจิงแสงขณะกลับสู่สภาวะพื้น โมเลกุลจะอยู่ในสภาพบิดเบี้ยวได้เป็นผลจากการที่โมเลกุลถูกโพลาไรซ์และเกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดสภาพขั้วขึ้นชั่วคราว ประสิทธิภาพของการเกิดอันตรกิริยานี้ขึ้นกับสภาพโพลาไรซ์ (Polarizability; α) ของโมเลกุล ซึ่งมีผลอย่างมากต่อการเกิดการกระเจิงและการเลื่อน รามาน (Raman shift) นอกจากนี้การบิดเบี้ยวของโมเลกุลจะเหนี่ยวนำให้เกิดโมเมนต์ขั้วคู่ (dipole moment; μ) ซึ่งแปรผันโดยตรงกับความเข้มสนามไฟฟ้า (E) และสภาพโพลาไรซ์ของพันธะ

$$\mu = \alpha E \tag{2.18}$$

ที่ตำแหน่งสมดุลของนิวเคลียส สภาพโพลาไรซ์มีค่า α_0 ที่ระยะห่างจากตำแหน่งสมดุล Δr สภาพโพลาไรซ์จะเป็น

$$\alpha = \alpha_0 + \left(\frac{\partial \alpha}{\partial r}\right)\Delta r \tag{2.19}$$

เมื่อพจน์ $\left(\frac{\partial \alpha}{\partial r}\right)$ แสดงการเปลี่ยนแปลงสภาพโพลาไรซ์เมื่อเปลี่ยนแปลงตำแหน่ง ในกรณีที่โมเลกุลหมุนหรือสั่น สามารถเขียน Δr เป็นฟังก์ชันของความถี่ของการสั่น ω_v ของโมเลกุลและเวลา t

$$\Delta r = r_0 \cos(\omega_v t) \tag{2.20}$$

เมื่อ r_0 เป็นอัมปลิจูดสูงสุดของการสั่น เมื่อโฟตอนของแสงตกกระทบมีความถี่ ω_{ex} จะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามไฟฟ้า E ที่เป็นฟังก์ชัน

$$E = E_0 \cos(\omega_{ex} t) \tag{2.21}$$

เมื่อ E_0 คือ อัมปลิจูดของการสั่น เมื่อแทนสมการที่ 2.19, 2.20 และ 2.21 ลงในสมการที่ 2.18 จะได้ว่า

$$\mu = \alpha_0 E_0 \cos(\omega_{ex} t) + E_0 r_0 \left(\frac{\partial \alpha}{\partial r}\right) \cos(\omega_v t) \cos(\omega_{ex} t) \tag{2.22}$$

จัดรูปสมการที่ 2.19 ใหม่เป็น

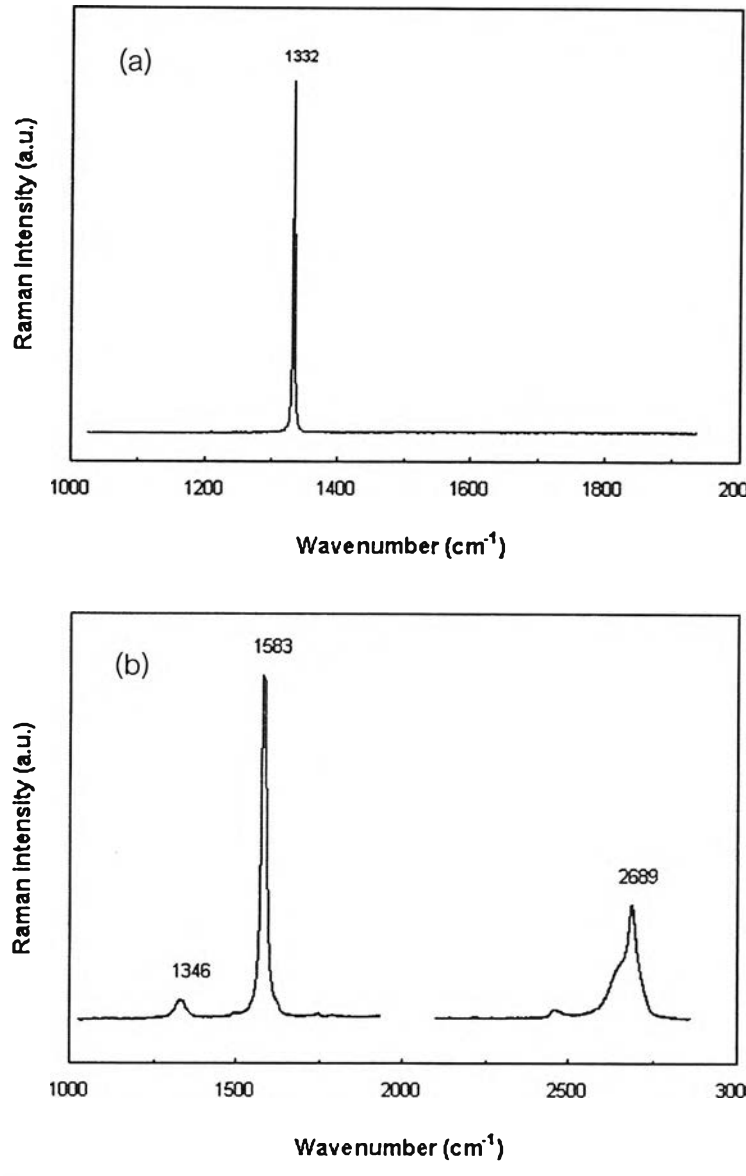
$$\begin{aligned} \mu = {} & \alpha_0 E_0 \cos(\omega_{ex} t) + \frac{E_0}{2} r_0 \left(\frac{\partial \alpha}{\partial r}\right) \cos\left((\omega_{ex} - \omega_v)t\right) \\ & + \frac{E_0}{2} r_0 \left(\frac{\partial \alpha}{\partial r}\right) \cos\left((\omega_{ex} + \omega_v)t\right) \end{aligned} \tag{2.23}$$

พิจารณาพจน์แรกในสมการที่ 2.23 ความถี่ของโฟตอนตกกระทบเท่ากับความถี่ของโฟตอนที่กระเจิงออกมา แสดงถึงการกระเจิงแบบยืดหยุ่น ส่วนในพจน์ที่ 2 โฟตอนที่กระเจิงออกมามีความถี่ลดลง $(\omega_{ex} - \omega_v)$ แสดงถึงมีการปลดปล่อยของโฟนอน (Emission phonon) ที่ความถี่ ω_v เรียกว่า Stokes lines ในพจน์สุดท้ายโฟตอนที่กระเจิงออกมามีความถี่สูงขึ้น $(\omega_{ex} + \omega_v)$ แสดงถึงมีการดูดกลืนของโฟนอน (Absorbsion phonon) ที่ความถี่ ω_v เรียกว่า Anti-Stokes lines ทั้งพจน์ที่ 2 และ3 แสดงว่า โฟนอนมีการเปลี่ยนแปลงความถี่มากขึ้นหรือลดลง ผลต่างนี้เรียกว่าการเลื่อนของรามาน (Raman shift) มักแสดงผลในรูปของเลขคลื่น (Wave number; cm^{-1}) เห็นได้ว่าโมเลกุลที่ตอบสนองต่อการกระเจิงแบบรามานนั้น สภาพโพลาไรซ์ของโมเลกุลดังกล่าวจะเป็นฟังก์ชันของระยะทาง นั่นคือ เทอม $\frac{\partial \alpha}{\partial r}$ ไม่เป็นศูนย์ [32, 33]

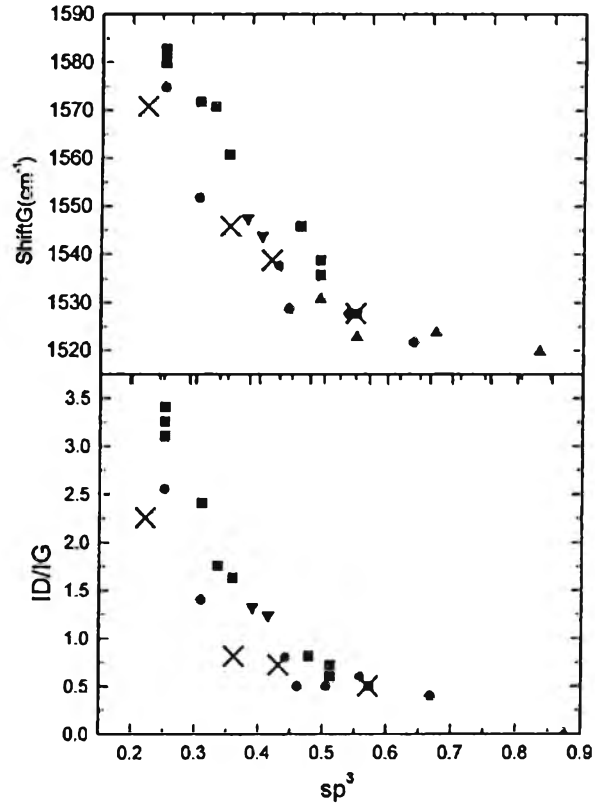
2.7.2 รามานสเปกโทรสโกปีของฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC)

รามานสเปกโทรสโกปี เป็นเทคนิคที่มีประโยชน์อย่างมากในการวิเคราะห์โครงสร้างและพันธะของฟิล์มคาร์บอนชนิดต่างๆ สเปกตรัมรามานของคาร์บอนในโครงสร้างของเพชรปรากฏพีคเดี่ยว (Single sharp peak) ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1332 cm^{-1} ส่วนสเปกตรัมรามานของแกรไฟต์ที่มีโครงสร้างเป็นผลึก (Crystalline graphite) ปรากฏพีคที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1580 cm^{-1} กำหนดให้เป็นพีค 'G' (Graphite) ส่วนแกรไฟต์ที่มีโครงสร้างแบบอสัณฐาน (Disordered graphite) ปรากฏพีคที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1350 cm^{-1} กำหนดเป็นพีค 'D' (Disordered) [34] รูปที่ 2.19 แสดงลักษณะของสเปกตรัมของรามานของคาร์บอนโครงสร้างต่างๆ

A.C.Ferrari และคณะ [35] ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างของฟิล์มคาร์บอนแบบอสัณฐานกับสเปกตรัมรามานในช่วงคลื่นแสงที่ตามองเห็น (Visible light; 514.5 nm) พบว่าพันธะ sp^2 เป็นตัวแปรสำคัญในการกระเจิงแบบรามานเนื่องจากพันธะ π มีพลังงานพันธะต่ำกว่าพันธะ σ ใน sp^3 จึงตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าจากแสงตกกระทบได้มากกว่า พื้นที่หน้าตัดรามาน (Raman cross-section) ของ sp^2 มากกว่า sp^3 ประมาณ 50-250 เท่า ดังนั้นสเปกตรัมของรามานจึงขึ้นกับคุณภาพและการจัดเรียงตัวของ sp^2 สเปกตรัมของรามานของคาร์บอนจะขึ้นกับความยาวและมุมพันธะที่คาร์บอนจับกัน การจัดเรียงตัวของคาร์บอนในแบบสายโซ่ หรือวงแหวนอโรมาติก และรวมถึงอัตราส่วนของ sp^2/sp^3 ด้วย พีค G เกิดจากการสั่นแบบยืดของ sp^2 ทั้งในรูปของ C=C หรือในวงแหวนอโรมาติก ส่วนพีค D นั้นเกิดจาการสั่นแบบยืดขยายของวงแหวนอโรมาติก [14,33,35] แต่ sp^2 และ sp^3 ใน DLC มีอัตราส่วนสัมพันธ์กัน ความสัมพันธ์ระหว่าง sp^3 ที่วัดได้โดยตรงจากเทคนิค Electron Energy Loss Spectroscopy (EELS) กับตำแหน่งพีค G และสัดส่วน I_D/I_G ในสเปกตรัมรามาน มีความสัมพันธ์ดังรูปที่ 2.20 ตำแหน่งพีค G เลื่อนลงเมื่อ sp^3 เพิ่มขึ้น สอดคล้องกับสัดส่วน I_D/I_G ที่ลดลง จาก 2.0 เป็น 0.2 เมื่อสัดส่วน sp^3 เพิ่มขึ้นจาก 0 เป็น 0.7%



รูปที่ 2.19 สเปกตรัมรามานของ (a) เพชรธรรมชาติ (b) ผลึกแกรไฟต์ [36]

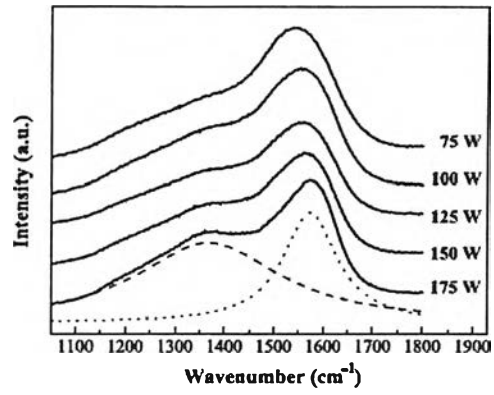


รูปที่ 2.20 ความสัมพันธ์ของตำแหน่งพีค G และสัดส่วน I_D/I_G กับ sp^3 [35]

2.7.3 การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างของฟิล์ม DLC

ในหัวข้อนี้เป็นการศึกษาลักษณะโครงสร้างของฟิล์ม DLC จากตัวอย่างงานวิจัยที่สังเคราะห์ฟิล์ม DLC ด้วยเทคนิค RF-PECVD ที่กล่าวไว้แล้วในหัวข้อ 2.4

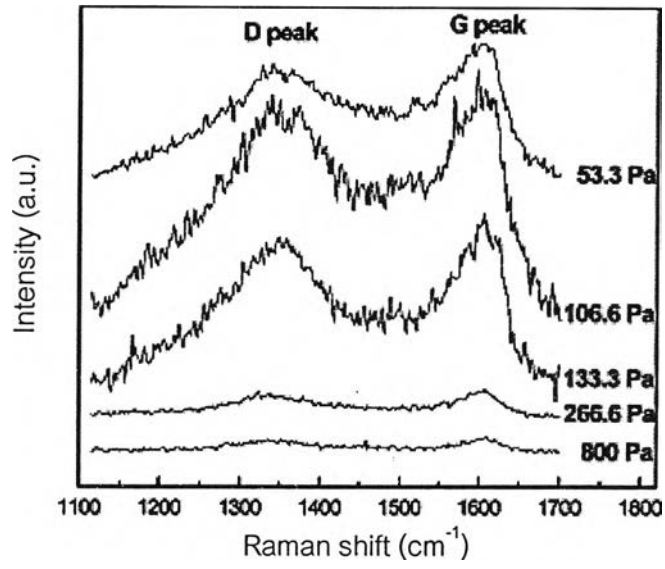
S. C. Won และคณะ [23] สังเคราะห์ฟิล์มด้วยกำลังไฟฟ้าที่ความถี่คลื่นวิทยุระหว่าง 25-200 W รูปที่ 2.22 แสดงสเปกตรัมรามานที่ปรากฏพีค D และพีค G ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1368 และ 1573 cm^{-1} ตามลำดับ ตำแหน่งพีค G เพิ่มขึ้นจาก 1534 ไป 1573 cm^{-1} และอัตราส่วน I_D/I_G เพิ่มขึ้นจาก 0.34 ไป 1.94 แสดงถึงปริมาณ sp^3 ในฟิล์มลดลงบ่งชี้ถึงความเป็นแกรไฟต์ (Graphitization) ของฟิล์ม DLC และเมื่อทำการวัดสัมประสิทธิ์ความเสียดทานด้วยเครื่อง AFM ในโหมดที่วัดสัมประสิทธิ์ความเสียดทานพบว่า สัมประสิทธิ์ความเสียดทานลดลงเมื่อกำลังไฟฟ้าที่ความถี่คลื่นวิทยุเพิ่มขึ้น



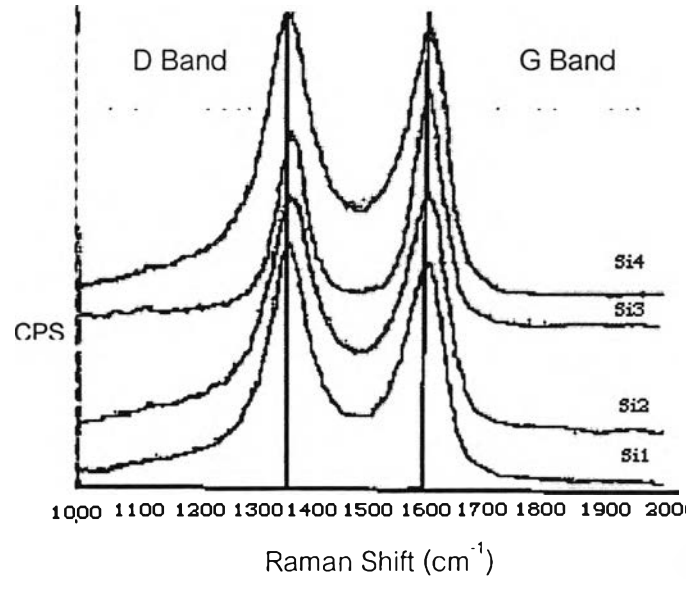
รูปที่ 2.21 สเปกตรัมรามานของฟิล์ม DLC จากการทดลอง
ของ S. C. Won และคณะ [23]

Y.T. Kim [24] สังเคราะห์ฟิล์ม DLC ด้วยกำลังไฟฟ้าที่ความถี่คลื่นวิทยุระหว่าง 200 - 400 W ที่ความดัน 0.4 - 6.0 torr (53.3 - 800 Pa) ด้วยอัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สมีเทนคงที่ รูปที่ 2.22 แสดงสเปกตรัมรามาน พบว่าเมื่อความดันเพิ่มขึ้นจาก 0.4 - 0.8 torr (53.3 - 106.6 Pa) อัตราส่วน I_D/I_G ลดลงจากประมาณ 1.00 เป็น 0.85 และ ตำแหน่งพีค G เลื่อนจากเลขคลื่น 1602 cm^{-1} ลงไปที่เลขคลื่น 1592 cm^{-1} บ่งบอกถึงพันธะ sp^3 ที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มความดันขึ้นอีก อัตราส่วน I_D/I_G เพิ่มขึ้นเป็น 0.95 และ ตำแหน่งพีค G เลื่อนขึ้นไปที่เลขคลื่น 1606 cm^{-1} บ่งบอกถึงพันธะ sp^3 ที่ลดลง เป็นผลมาจากที่ความดันสูงขึ้น อะตอมไฮโดรเจนที่มากขึ้นจะเข้าไปซนเอาส่วนที่เป็นแกรไฟต์ หรือ sp^2 ซึ่งมีพลังงานพันธะต่ำกว่า [33] ให้หลุดออกจากผิวฟิล์ม

รูปที่ 2.23 แสดงผลการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างของฟิล์ม DLC จากการทดลองของ W.S.Liew และคณะ [25] อัตราส่วนของแก๊สมีเทนต่อแก๊สไฮโดรเจนเท่ากับ 0.8% 1.0% 3.0% และ5.0% สเปกตรัมรามานของฟิล์ม DLC ปรากฏพีค D ระหว่างเลขคลื่น 1355 cm^{-1} ถึง 1360 cm^{-1} และพีค G ระหว่างเลขคลื่น 1580 cm^{-1} ถึง 1590 cm^{-1}



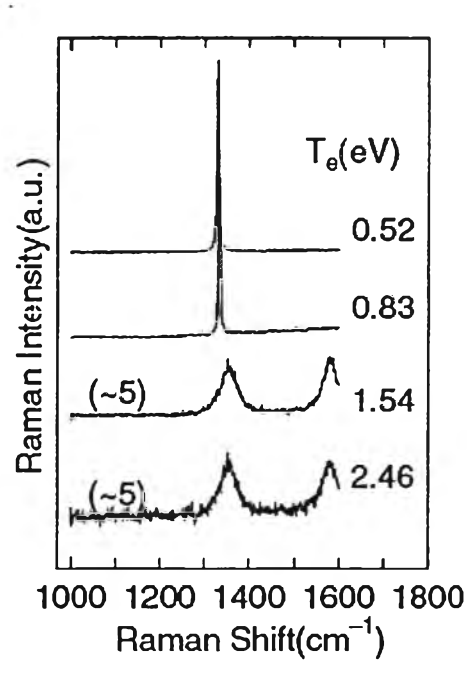
รูปที่ 2.22 สเปกตรัมรามานจากการทดลองของ Y.T. Kim [36]



รูปที่ 2.23 สเปกตรัมรามานที่ได้จากการทดลองของ W.S. Liew และคณะ [25]

I 25193259

รูปที่ 2.23 แสดงผลการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างของฟิล์ม DLC จากการทดลองของ T. Shimizu และคณะ [26] เขาพบว่าสเปกตรัมรามานของฟิล์มที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิอิเล็กตรอน 0.52 eV ปรากฏพีคเดี่ยวแหลมที่เลขคลื่น 1332 cm^{-1} เมื่ออุณหภูมิอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้น 2.46 eV มีพีคฐานกว้างปรากฏที่เลขคลื่นประมาณ 1332 cm^{-1} และ 1590 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึงความเป็นแกรไฟต์ในฟิล์ม ลักษณะของแกรไฟต์ที่ปรากฏในสเปกตรัมรามาน เป็นผลเนื่องมาจากที่อุณหภูมิอิเล็กตรอนต่ำ อนุมูลที่แตกตัวมากคือ CH_3 ปฏิกิริยาสำคัญที่เกิดขึ้นคือ $CH_4 \longrightarrow CH_3+H$ การแตกตัวของ CH_4 เป็นอนุมูล CH_2 ถูกจำกัด ซึ่งเชื่อว่าอนุมูล CH_3 เป็นอนุมูลสำคัญที่เสริมให้เกิดเพชรขึ้น ในขณะที่อนุมูล CH_2 เป็นอนุมูลที่เสริมให้เกิดแกรไฟต์ขึ้น [1,17]



รูปที่ 2.24 สเปกตรัมรามานจากการทดลองของ T. Shimizu และคณะ [26]