

อิทธิพลของฟลักซ์ไอออนและศักย์ไบแอสต่อโครงสร้างระดับจุลภาคของฟิล์มไฮโดรจิเนท เตดอะมอร์ฟัสคาร์บอนที่เคลือบด้วยเทคนิคแมกนีตรอนสปัตเตอริง

Influence of the Ion Flux and the Bias Voltage on Microstructure of Hydrogenated Amorphous Carbon Films Deposited by DC Magnetron Sputtering

นพพล เสาวเวียง, อาทิตย์ ชิงสูงเนิน และ พิษณุ พูลเจริญศิลป์*

Nopphon Saowiang, Artit Chingsungnoen and Phitsanu Poolcharuansin*

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Department of Physics, Faculty of Science, Mahasarakham University

Received : 8 January 2019

Revised : 16 May 2019

Accepted : 28 May 2019

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เกี่ยวข้องกับกระบวนการตกสะสมของฟิล์มไฮโดรจิเนทเตดอะมอร์ฟัสคาร์บอน (a-C:H) ด้วยเทคนิคดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงภายใต้บรรยากาศแก๊สฮีเลียมผสมกับอะเซทิลีน โดยมุ่งเน้นศึกษาอิทธิพลของปริมาณฟลักซ์ไอออนและศักย์ไบแอสที่มีต่อโครงสร้างของฟิล์ม a-C:H บนแผ่นผลึกซิลิกอน จากการใช้หัววัดแสงเมียร์ทำให้ทราบว่าฟลักซ์ไอออนที่ตกกระทบแผ่นซิลิกอนระหว่างกระบวนการตกสะสม มีค่าอยู่ในย่าน $10^{18} \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ถึง $10^{19} \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ นอกจากนี้ยังพบว่า ปริมาณฟลักซ์ไอออนมีความสัมพันธ์โดยตรงกับกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้หัวแมกนีตรอนสปัตเตอริง แต่เป็นอิสระจากศักย์ไบแอสแผ่นซิลิกอน การศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคของฟิล์ม a-C:H ด้วยเทคนิครามานสเปกโตรสโคปี พบว่าการเพิ่มปริมาณฟลักซ์ไอออน มีผลทำให้สัดส่วน sp^2/sp^3 ภายในฟิล์ม a-C:H เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ในทางตรงข้ามศักย์ไบแอสที่มากกว่า -200 V ทำให้สัดส่วน sp^2/sp^3 มีแนวโน้มลดลง และช่วยให้ฟิล์มมีสมบัติคล้ายเพชรมากขึ้น

คำสำคัญ : ฟิล์มไฮโดรจิเนทเตดอะมอร์ฟัสคาร์บอน, ดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง, ศักย์ไบแอสแผ่นฐาน,
ฟลักซ์ไอออน โครงสร้างระดับจุลภาค

*Corresponding author. E-mail : phitsanu.p@msu.ac.th

Abstract

This research is concerned with the deposition process for hydrogenated amorphous carbon films (a-C:H) by DC magnetron sputtering in He/C₂H₂ gas mixtures. More specifically, the influence of ion flux and substrate bias voltage on the microstructure of a-C:H films has been investigated. It was shown from the Langmuir probe that ion flux at the substrate position is in the range of 10¹⁸-10¹⁹ m⁻²s⁻¹ for the given process conditions. Furthermore, the flux of ions is proportional to the discharge power, however, nearly independent from the substrate bias voltage. The microstructure of a-C:H films has been investigated using Raman spectroscopy. It was found that increasing the amount of ion flux gives rise to an increase sp²/sp³ ratio indicating a larger grain size of the graphite structure in the a-C:H films. However, the substrate bias over -200 V results in a dramatic decrease of sp²/sp³ ratio presenting a higher diamond-like structure in the deposited films.

Keywords: a-C:H films, DC magnetron sputtering, substrate bias, ion flux, microstructure

บทนำ

ฟิล์มคาร์บอนคล้ายเพชร (diamond-like carbon, DLC) มีโครงสร้างเป็นคาร์บอนอะมอร์ฟัส (amorphous carbon, a-C) อยู่ในสถานะกึ่งเสถียร (metastable) ประกอบด้วยคาร์บอนพันธะผสมระหว่าง sp² และ sp³ ฟิล์ม DLC แบ่งออกได้หลายชนิดขึ้นอยู่กับสัดส่วนคลัสเตอร์คาร์บอนพันธะ sp² ต่อพันธะ sp³ และปริมาณไฮโดรเจน รวมถึงองค์ประกอบของธาตุที่ถูกเจือเข้าไป โดยพันธะ sp² แสดงลักษณะของแกรไฟต์ ในขณะที่พันธะ sp³ เป็นลักษณะเฉพาะของเพชร ด้วยสมบัติพิเศษของฟิล์ม DLC เช่น มีความแข็ง มีสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำ และเฉื่อยต่อปฏิกิริยาทางเคมี จึงทำให้ฟิล์ม DLC ถูกนำไปประยุกต์อย่างกว้างขวาง (Wang *et al.*, 2011) โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับการประยุกต์เป็นชั้นเคลือบแข็ง เพื่อป้องกันหัวอ่านเขียนในอุปกรณ์เก็บข้อมูลแบบแม่เหล็ก ประยุกต์เป็นชั้นฟิล์มที่ช่วยลดการสะท้อนอินฟราเรดสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ หรือประยุกต์เป็นชั้นฟิล์มไดอิเล็กตริกในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น (Lettington, 1998)

ฟิล์มไฮโดรเจนเตตอะมอร์ฟัสคาร์บอน (hydrogenated amorphous carbon, a-C:H) จัดเป็นฟิล์มคาร์บอนคล้ายเพชรชนิดหนึ่งที่มีไฮโดรเจนเป็นส่วนประกอบเพิ่มเติมจากคาร์บอน ฟิล์ม a-C:H มีความแข็งอยู่ในช่วง 10-45 GPa มีสัมประสิทธิ์ความเสียดทานอยู่ระหว่าง 0.02-0.3 (Bewilogua & Hofmann, 2014) ซึ่งถูกนำมาใช้ในงานประเภทที่ต้องการลดอัตราการสึกหรอ ป้องกันรอยขีดข่วน และลดแรงเสียดทาน รวมถึงสามารถใช้เป็นชั้นป้องกันการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน (Ray *et al.*, 2017) เป็นต้น

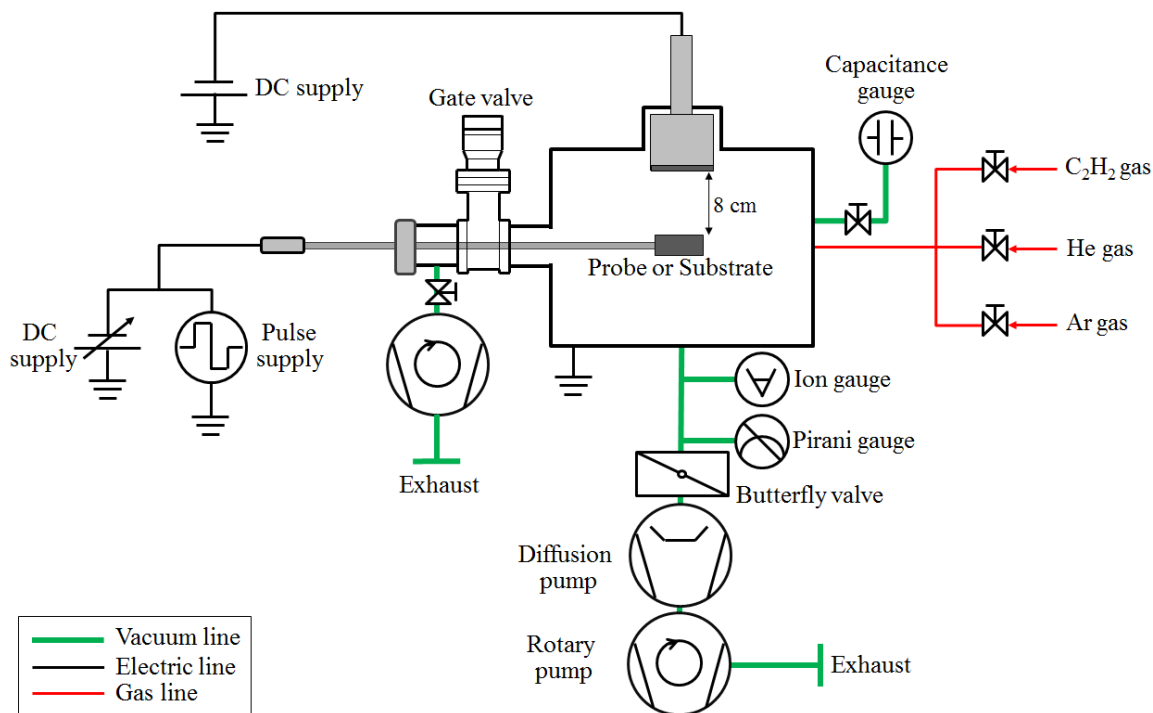
ฟิล์ม a-C:H สามารถสังเคราะห์ได้จากกระบวนการตกสะสมด้วยไอเชิงกายภาพ (physical vapor deposition, PVD) เช่น แมกนีตรอนสปัตเตอริง (magnetron sputtering) การตกสะสมด้วยลำไอออน (ion beam deposition) การตกสะสมด้วยลำพลาสมา (plasma beam source) และการตกสะสมด้วยพลาสมาความถี่วิทยุ (rf plasma deposition) เป็นต้น (Erdemir & Donnet, 2006) กระบวนการตกสะสมด้วยไอเชิงเคมี (chemical vapor deposition, CVD) เช่น การใช้พลาสมาเพิ่มการตกสะสมของไอเชิงเคมี (plasma-enhanced chemical vapor deposition, PECVD) (Furlan, Klein, & Hotza, 2013) โดยใช้แก๊สไฮโดรคาร์บอน เช่น มีเทน อะเซทิลีน และเอทิลีน เป็นสารตั้งต้นสำหรับกำเนิดอะตอมคาร์บอนและไฮโดรเจน

เทคนิคและพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการตกสะสมมีผลโดยตรงกับโครงสร้างและคุณสมบัติของฟิล์ม a-C:H ในปี 1996 ไวลเลอร์และคณะ (Weiler *et al.*, 1996) ได้ชี้ให้เห็นว่าอนุภาคคาร์บอนที่มีพลังงานประมาณ 100 eV/atom จะช่วยให้เกิดฟิล์ม DLC ที่มีปริมาณ sp^3 สูงสุด ส่งผลให้ฟิล์มมีสมบัติของเพชรเพิ่มขึ้น งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาถึงอิทธิพลของพารามิเตอร์ที่อาจเกี่ยวข้องกับการกำหนดพลังงานของอนุภาคคาร์บอน ซึ่งประกอบด้วย ปริมาณพลาสมาไอออนและศักย์ไบแอสที่มีต่อโครงสร้างระดับจุลภาคฟิล์ม a-C:H ที่ตกสะสมบนแผ่นผลึกซิลิกอน ด้วยการใช้เทคนิคดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงภายใต้บรรยากาศของแก๊สอะเซทิลีน (C_2H_2) และผสมแก๊สฮีเลียม (He) เพื่อเพิ่มเสถียรภาพของพลาสมา (Flege *et al.*, 2017) ใช้หัววัดแลงเมียร์ตรวจวัดปริมาณพลาสมาในพลาสมา และใช้เทคนิครามานสเปกโตรสโกปีศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคของฟิล์ม a-C:H

วิธีดำเนินการวิจัย

ระบบเคลือบฟิล์ม a-C:H

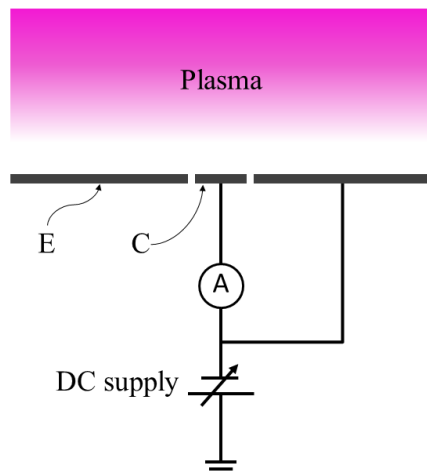
ระบบแมกนีตรอนสปัตเตอริง ตามไดอะแกรมในภาพที่ 1 ประกอบด้วยภาชนะสุญญากาศทรงกระบอกขนาดความจุประมาณ 6500 cm^3 มีปั๊มโรตารีและปั๊มไอแพร์ทำหน้าที่สูบอากาศออกจากภาชนะสุญญากาศ ทำให้ภายในภาชนะสุญญากาศมีความดันต่ำสุดประมาณ 10^{-4} Pa โดยบริเวณระหว่างภาชนะสุญญากาศและปั๊มไอแพร์ได้ติดตั้งวาล์วปีกผีเสื้อ (butterfly valve) เพื่อทำหน้าที่ปรับแต่งอัตราการสูบ เกจพิราณีและเกจไอออนที่ติดตั้งบริเวณเหนือวาล์วปีกผีเสื้อ ทำหน้าที่ตรวจวัดความดันระหว่างกระบวนการสูบอากาศ ในขณะที่คาปาซิแตนซ์เกจ (capacitance gauge) ที่ติดตั้งบริเวณด้านข้างของภาชนะสุญญากาศ ทำหน้าที่ตรวจวัดความดันในระหว่างกระบวนการเคลือบฟิล์ม อัตราการไหลแก๊สอาร์กอน แก๊สอะเซทิลีน และแก๊สฮีเลียมถูกควบคุมจากเครื่องควบคุมอัตราการไหลที่แยกอิสระจากกัน หัวแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่ติดตั้งแผ่นเป้าไทเทเนียมขนาด 2 นิ้ว เป็นขั้วแคโทด ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดพลาสมาของแก๊สผสมสำหรับกระบวนการตกสะสมของฟิล์ม โดยหัวแมกนีตรอนได้รับกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงที่สามารถส่งผ่านกำลังได้สูงสุดประมาณ 200 W ปั๊มโรตารีและเกจวาล์วที่ติดตั้งทางด้านข้างของภาชนะสุญญากาศ ทำหน้าที่นำส่งชิ้นงานหรือหัววัดพลาสมาเข้าสู่ภาชนะสุญญากาศโดยไม่จำเป็นต้องหยุดระบบสุญญากาศหลัก



ภาพที่ 1 ไดอะแกรมระบบแมกนีตรอนสเปดเตอริง

การวัดฟลักซ์ไอออน

ปริมาณฟลักซ์ไอออนที่ตกกระทบบนแผ่นซิลิกอน ถือเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญของกระบวนการตกสะสมฟิล์มและมีความเชื่อมโยงกับโครงสร้างของฟิล์ม a-C:H ในงานวิจัยนี้ได้ใช้หัววัดแสงเมียร์ที่ติดตั้งบริเวณใกล้กับแผ่นซิลิกอน เพื่อประเมินค่าปริมาณฟลักซ์ไอออนในพลาสมา หัววัดแสงเมียร์ตามไดอะแกรมภาคตัดขวางในภาพที่ 2 ประกอบขึ้นจากแหวนนำไฟฟ้า (E) และแผ่นรับไอออน (C) โดยทั้งแหวนและแผ่นรับไอออน ได้รับการไบแอสด้วยศักย์ไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟเดียวกัน วิธีดังกล่าวทำให้ค่าฟลักซ์ไอออนที่คำนวณจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านแผ่นรับไอออนมีความแม่นยำมากขึ้น (Chen, 2003) เมื่อไบแอสหัววัดแสงเมียร์ด้วยศักย์ไบแอสที่เป็นลบ (เทียบจุดอ้างอิง) สนามไฟฟ้าบริเวณผิวหัววัดจะทำให้เกิดแรงผลักกับอิเล็กตรอนในพลาสมาและเกิดแรงดึงไอออนบวกในพลาสมา กระแสไฟฟ้าที่วัดได้จึงเป็นผลจากกระแสไอออนบวกที่เคลื่อนที่จากพลาสมาไปตกกระทบบนแผ่นรับไอออน นำไปสู่การคำนวณฟลักซ์ไอออน (Γ_i) ตามสมการ $\Gamma_i = I_p / q_i A$ เมื่อ I_p คือกระแสไฟฟ้าที่ผ่านแผ่นรับไอออน q_i คือค่าประจุไอออน (1.6×10^{-19} C) และ A คือพื้นที่ของแผ่นรับไอออน ($\approx 1.96 \times 10^{-5}$ m²)



ภาพที่ 2 โดอะแกรมโครงสร้างภาคตัดขวางของหัววัดแสงเมียร์

การวัดฟลักซ์ไอออนได้ติดตั้งอุปกรณ์ตามภาพที่ 1 ก่อนเริ่มการวัดฟลักซ์ไอออน เป้าไทเทเนียมได้รับสปัตเตอร์เพื่อจัดชั้นออกไซด์ จากนั้นสอดหัววัดแสงเมียร์ไปยังตำแหน่งจุดศูนย์กลางของเป้าไทเทเนียม (ระยะห่างจากผิวเป้าไทเทเนียมถึงหัววัดแสงเมียร์ เท่ากับ 8 cm) และเริ่มทำการวัดฟลักซ์ไอออนที่มีเงื่อนไขดังนี้

- ใช้แก๊สอาร์กอนอัตราการไหล 20 SCCM
- ความดันขณะวัดฟลักซ์ไอออน 0.66 Pa คงที่ตลอดการวัดฟลักซ์ไอออน
- กำลังไฟฟ้าสำหรับขับหัวแมกนีตรอนถูกควบคุมให้อยู่ในย่าน 10 W ถึง 100 W
- เพื่อศึกษาอิทธิพลของศักย์ไบแอส หัววัดจึงได้รับการไบแอสศักย์แบบกระแสตรง -160 V ถึง -300 V

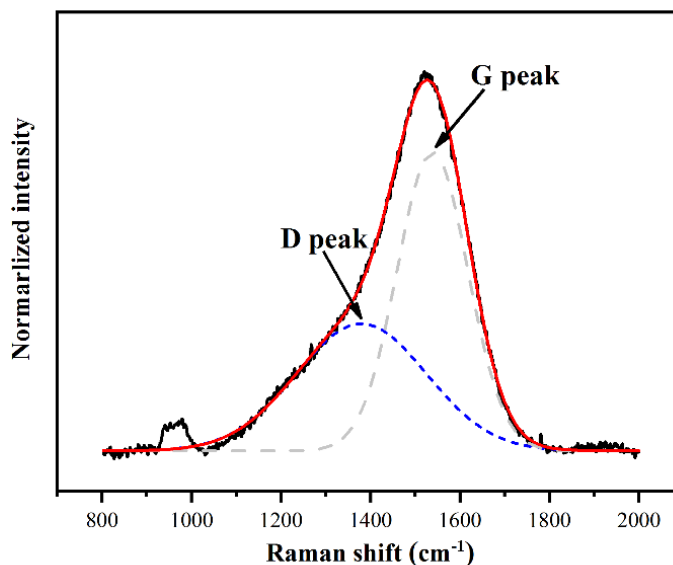
การตกสะสมฟิล์ม a-C:H

แผ่นซิลิกอนชนิดพี (p-type) หนา 100 μm เจือด้วยโบรอน (boron) มีค่าสภาพต้านทาน 100 ohm.cm ถูกใช้เป็นชิ้นงานในกระบวนการตกสะสมฟิล์ม a-C:H โดยแผ่นซิลิกอนได้รับการทำความสะอาดจากการใช้ระบบอัลตราโซนิคในอะซิโตนเมทานอล และนำปราศจากประจุ ตามลำดับ อย่างละ 10 นาที เมื่อนำส่งเข้าสู่ระบบเคลือบแผ่นซิลิกอนจะได้รับการทำความสะอาดด้วยการใช้พลาสมาอาร์กอนเป็นระยะเวลาอีก 10 นาที ก่อนเริ่มกระบวนการตกสะสมที่มีเงื่อนไขดังนี้

- ใช้แก๊สฮีเลียมอัตราการไหล 5 sccm ผสมกับแก๊สอะเซทิลีนอัตราไหล 20 sccm โดยแก๊สอะเซทิลีนเป็นสารตั้งต้นอะตอมคาร์บอนและแก๊สฮีเลียมทำหน้าที่รักษาความเสถียรของพลาสมาและลดการสปัตเตอร์ผิวเป้าไทเทเนียมได้ในระดับหนึ่ง นอกจากนี้ เมื่อดำเนินการเคลือบฟิล์ม a-C:H จะเกิดขึ้นคาร์บอนครอบคลุมผิวเป้าไทเทเนียม (Flege *et al.*, 2017) จึงมั่นใจได้ว่าไม่มีอะตอมไทเทเนียมเจืออยู่ในฟิล์ม a-C:H
- ความดันขณะตกสะสมอยู่ในย่าน 0.9 Pa โดยในการทดลองไม่มีการปรับเปลี่ยนค่าความดัน
- ใช้เวลาตกสะสมฟิล์ม 10 นาที
- กำหนดกำลังไฟฟ้าที่ใช้ขับหัวแมกนีตรอนมีค่าสูงสุดประมาณ 200 W
- ใช้ศักย์ไบแอสแบบไบโพลาร์พัลส์ความถี่ที่ 50 kHz และมีศักย์เฉลี่ยสูงสุด -500 V ในการตกสะสมฟิล์ม

โครงสร้างระดับจุลภาคของฟิล์ม a-C:H ได้รับการตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิครามานสเปกโทรสโคปี ซึ่งเทคนิคนี้อาศัยการกระเจิงของแสงจากวัสดุ โดยโมเลกุลของวัสดุจะดูดกลืนพลังงานหรือความถี่ของแสงที่มาตกกระทบ ทำให้เกิดผลต่างของพลังงานของแสงตกกระทบกับแสงกระเจิง และผลต่างของพลังงานดังกล่าวเรียกว่าสเปกตรัมรามาน (raman shift) ซึ่งจะมีค่าตรงกับค่าพลังงานที่ใช้ในการสั่นของพันธะในโมเลกุลของวัสดุ ในงานวิจัยนี้ได้ใช้เครื่องรามานที่ผลิตจากบริษัท Bruker รุ่น SENTERRA ในการวิเคราะห์ฟิล์ม a-C:H โดยกำหนดใช้ความยาวแสงเลเซอร์ 532 nm กำลังแสง 12.5 mW ความละเอียดในการตรวจวัด 3 cm^{-1} ถึง 5 cm^{-1} ซึ่งสัดส่วนปริมาณคลัสเตอร์ sp^2/sp^3 หาได้จากการใช้กระบวนการปรับเส้นโค้ง (curve fitting) ของสเปกตรัมรามานด้วยเส้นโค้งเกาส์เซียนที่มีศูนย์กลางที่ตำแหน่ง 1350 cm^{-1} สำหรับ D-peak และที่ตำแหน่ง 1580 cm^{-1} สำหรับ G-peak ดังภาพที่ 3 สัดส่วนพื้นที่ใต้เส้นโค้งจะนำไปสู่ค่า I_D/I_G ซึ่งสามารถใช้บ่งชี้สัดส่วน sp^2/sp^3 ภายในฟิล์ม a-C:H

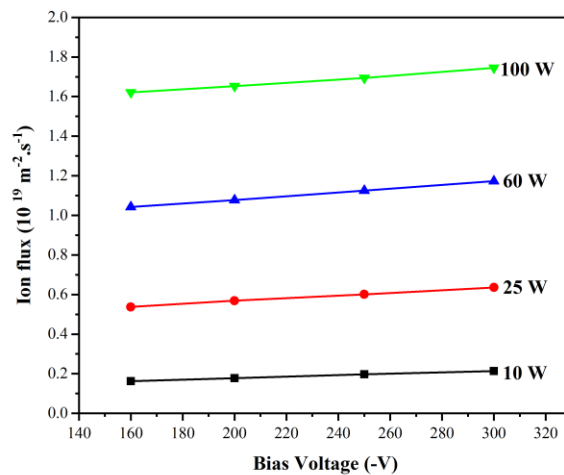
การวิเคราะห์โครงสร้างของคาร์บอนอะมอร์ฟัส สามารถพิจารณาทางอ้อมได้จากการใช้สัดส่วนของปริมาณพันธะของ sp^2 ต่อ sp^3 ไฮบริดไดเซชันของคาร์บอน โดยคำนวณได้จากพื้นที่ใต้เส้นโค้งของสัญญาณยอดพีค G (G peak หรือ G-band) ซึ่งยอดพีคของสเปกตรัมรามานอยู่ที่ประมาณ 1580 cm^{-1} สอดคล้องกับการสั่นของโซ่คาร์บอน C=C (C=C chains) วงแหวนอะโรมาติก (aromatic rings) รวมถึงคาร์บอนพันธะเดี่ยว C-C หรือ sp^3 และสัญญาณพีค D (D peak หรือ D-band) ซึ่งยอดพีคของสเปกตรัมรามานอยู่ที่ประมาณ 1350 cm^{-1} สอดคล้องกับการสั่นของวงแหวนอะโรมาติกเพียงอย่างเดียว



ภาพที่ 3 ลักษณะสเปกตรัมรามานของฟิล์ม a-C:H หลังการปรับเส้นโค้งแบบเกาส์เซียน

อัตราส่วน I_D/I_G สามารถบ่งบอกถึงสัดส่วนโครงสร้าง sp^3 ได้ กล่าวคือ ถ้าค่า I_D/I_G มีค่าน้อยแสดงว่าสัดส่วนโครงสร้าง sp^3 มีค่ามาก (Gilkes, Praver, Nugent, Robertson, & Sands, 2000) ทั้งนี้เนื่องจาก D-band เกิดจากการสั่นที่เป็นการสั่นแบบหด-ขยายของวงอะโรมาติก (aromatic) ซึ่งเป็นโครงสร้างแบบ sp^2 ที่มีลักษณะเป็นวง ส่วน G-band เกิดจากการสั่นของคู่คาร์บอนโครงสร้างแบบ sp^2 ที่ถูกล้อมรอบด้วยโครงสร้างแบบ sp^3 โดยปกติแล้วถ้าเป็นแกรไฟต์แบบไพโรไลติก (pyrolytic graphite) จะมีโครงสร้างของคาร์บอนซ้อนกันอย่างเป็นระเบียบและพบสเปกตรัมรามานปรากฏที่ตำแหน่ง 1580 cm^{-1} เท่านั้นไม่เป็นแถบและไม่เกิด D-band ยกเว้นเกรน (grain) มีการแตกแยกออกทำให้เกิดความไม่เป็นระเบียบขึ้น เช่น กรณีได้รับการฉายด้วยลำไอออนพลังงานสูงจะเริ่มปรากฏตำแหน่ง D-band (Asari, 2000) ดังนั้นถ้า D-band มีพื้นที่ใต้ยอดฟีกน้อย แสดงว่าโครงสร้าง sp^2 แบบวงอะโรมาติกในแต่ละคลัสเตอร์ (cluster) มีจำนวนลดลง (Ferrari & Robertson, 2000; Robertson, 2002) ด้วยเหตุนี้จึงสามารถหาอัตราส่วน I_D/I_G ในการพิจารณาแนวโน้มของโครงสร้าง sp^3 ภายในฟิล์ม a-C:H ได้

ผลการวิจัย



ภาพที่ 4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไบแอสและฟลักซ์ไอออน ภายใต้กำลังไฟฟ้าที่ใช้ขับหัวแมกนีตรอนที่ต่างกัน

ผลการวัดฟลักซ์ไอออนภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดข้างต้น แสดงในภาพที่ 4 พบว่าปริมาณ ฟลักซ์ไอออนมีค่าอยู่ในย่าน $10^{18}\text{ m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ถึง $10^{19}\text{ m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ นอกจากนี้ยังพบว่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ขับหัวแมกนีตรอนมีอิทธิพลอย่างมากต่อการเปลี่ยนของปริมาณฟลักซ์ไอออน ซึ่งเห็นได้จากค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์ไอออนต่อกำลังไฟฟ้ามี่ค่า $1.65 \times 10^{17}\text{ m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}/\text{W}$ ในขณะที่ฟลักซ์ไอออนมีค่าเกือบคงที่ตลอดย่านการเปลี่ยนค่าศักย์ไบแอส โดยมีอัตราการเปลี่ยนแปลง $5 \times 10^{15}\text{ m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}/\text{V}$ ผลการทดลองดังกล่าวสามารถอธิบายได้ดังนี้

ในกระบวนการกำเนิดและคงสภาวะพลาสมา อิเล็กตรอนเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดการแตกตัวของแก๊ส ซึ่งอิเล็กตรอนได้รับกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า (P_{input}) และสูญเสียกำลัง (P_{loss}) จากกระบวนการชนชั้นพื้นฐานกับอะตอมแก๊ส 3 รูปแบบ ประกอบด้วยการชนแล้วทำให้อะตอมแก๊สแตกตัว (ionization) การชนแล้วทำให้อะตอมแก๊สอยู่ในสภาวะกระตุ้น (excitation) และการชนแบบยืดหยุ่น (elastic) เมื่อพิจารณาเหตุการณ์ชนพื้นฐานในลักษณะที่กำลังไฟฟ้าที่

อิเล็กตรอนได้รับ สูญเสียไปกับกระบวนการชน สามารถเขียนความสัมพันธ์จากแนวคิดโกลบอลโมเดล (global model) ได้ดังนี้ (Chabert & Braithwaite, 2011)

$$\frac{P_{loss, coll}}{V_g} = \bar{n}_e n_g \left[K_{iz} \varepsilon_{iz} + K_{exc} \varepsilon_{exc} + \frac{3m}{M} K_{el} k_B T_e \right] \quad (1)$$

เมื่อ \bar{n}_e คือ ความหนาแน่นเฉลี่ยของอิเล็กตรอน n_g คือ ความหนาแน่นแก๊ส V_g คือ ปริมาตรแก๊ส K_{iz} คือ สัมประสิทธิ์อัตราการชนแบบแตกตัว K_{exc} คือ สัมประสิทธิ์อัตราการชนแบบกระตุ้น K_{el} คือ สัมประสิทธิ์อัตราการชนแบบยืดหยุ่น ε_{iz} คือ พลังงานสำหรับการแตกตัว ε_{exc} คือ พลังงานการกระตุ้น m คือ มวลอิเล็กตรอน M คือ มวลของอะตอมแก๊สที่อิเล็กตรอนเข้าชน k_B คือ ค่าคงที่โบลต์ซมันน์ T_e คือ อุณหภูมิอิเล็กตรอน เราสามารถใช้สมการที่ 1 พิจารณาพลักซ์ไอออนที่ตกกระทบได้จากการพิจารณาร่วมกับความรู้ทางพลาสมาฟิสิกส์อื่น ๆ ดังนี้

- จากสมบัติเสมือนเป็นกลางทางไฟฟ้าของพลาสมา (quasi-neutrality) ทำให้พิจารณาได้ว่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในพลาสมามีค่าใกล้เคียงกับความหนาแน่นของไอออน ดังนั้น $n_e \approx n_i$
- พลักซ์ไอออนที่เคลื่อนที่ออกจากขอบพลาสมาผ่านชั้นหุ้มพลาสมา (plasma sheath) และตกกระทบบที่หัววัดแลงเมียร์เป็นไปตามสมการ $\Gamma_i = n_i u_B$ เมื่อ u_B คือ อัตราเร็วโบห์ม (Bohm speed) โดย $u_B = \sqrt{k_B T_e / M}$ เมื่อ k_B คือ ค่าคงที่โบลต์ซมันน์ T_e คือ อุณหภูมิอิเล็กตรอน และ M คือ มวลของไอออน
- ความหนาแน่นของแก๊ส n_g พิจารณาได้จากกฎของแก๊สอุดมคติตามสมการ $p = n_g k_B T_g$ เมื่อ p คือ ความดันแก๊สในภาชนะสุญญากาศ T_g คือ อุณหภูมิแก๊ส

การพิจารณาข้างต้นทำให้สามารถเขียนสมการพลักซ์ไอออนที่ตกกระทบบที่หัววัดแลงเมียร์ได้ตามสมการ

$$\Gamma_i = \bar{n}_i u_B = \frac{\frac{P_{input}}{V_g} \sqrt{\frac{k_B T_e}{M}}}{\frac{p}{k_B T_g} \left[K_{iz} \varepsilon_{iz} + K_{exc} \varepsilon_{exc} + \frac{3m}{M} K_{el} k_B T_e \right]} \quad (2)$$

เมื่อ P_{input} คือ กำลังไฟฟ้าที่ขั้วหัวแมงนีตรอน และเมื่อพิจารณาค่าเชิงตัวเลขของปริมาณทางฟิสิกส์ในสมการที่ 2 ตามที่ระบุไว้ในตารางที่ 1 พบว่าหากแทนค่า P_{input} เป็น 100 W สามารถคำนวณพลักซ์ไอออนได้ประมาณ $6.2 \times 10^{19} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ซึ่งเป็นค่าระดับเดียวกับค่าพลักซ์ไอออนที่วัดได้จากหัววัดแลงเมียร์ จากสมการข้างต้น แสดงให้เห็นว่าพลักซ์ไอออน Γ_i มีความสัมพันธ์โดยตรงกับกำลังไฟฟ้าที่ใช้ขั้วหัวแมงนีตรอนและเป็นอิสระจากศักย์ไบแอส ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองตามกราฟภาพที่ 4

ตารางที่ 1 ค่าเชิงตัวเลขของปริมาณทางฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้องกับสมการที่ 2

Parameters	Value	Unit
Gas volume (V_g)	0.0065	m ³
Boltzmann constant (k_B)	1.38×10^{-23}	J/K
Electron temperature (T_e)	3 to 5	eV
Argon ion mass (M)	6.67×10^{-26}	kg
Electron mass (m)	9.1×10^{-31}	kg
Operating pressure (p)	0.66	Pa
Gas temperature (T_g)	300	K
Rate coefficient of the ionizations (K_{iz})	1.5×10^{-15}	m ³ /s
Rate coefficient of the excitations (K_{exc})	2×10^{-15}	m ³ /s
Rate coefficient of the elastics (K_{el})	1×10^{-13}	m ³ /s
Ionization energy (ε_{iz})	15.76×10^{-19}	J
Excitation energy (ε_{exc})	12.14×10^{-19}	J

การวัดฟลักซ์ไอออนด้วยหัววัดแสงเมียร์ภายใต้การดิซชาร์จของแก๊สอาร์กอน ทำให้สามารถใช้สมการที่ 1 และสมการที่ 2 รวมไปถึงพารามิเตอร์ในตารางที่ 1 คำนวณระดับฟลักซ์ไอออน และทำให้เข้าใจอิทธิพลของกำลังไฟฟ้าที่ใช้ขับหัวแมกนีตรอนและอิทธิพลของศักย์ไบแอสที่มีต่อปริมาณฟลักซ์ไอออนในพลาสมา

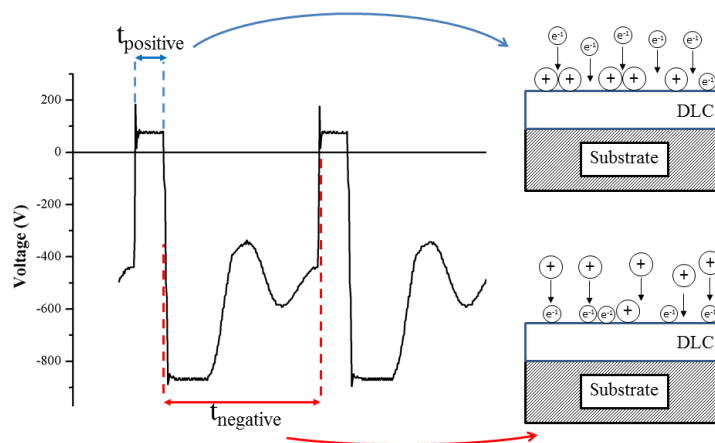
แม้ผลการทดลองและความสัมพันธ์เชิงทฤษฎีได้ชี้ให้เห็นว่าฟลักซ์ไอออนเป็นอิสระจากศักย์ไบแอส แต่อย่างไรก็ตามพลังงานจลน์ของไอออนที่เคลื่อนที่มาตกกระทบพื้นผิววัสดุขึ้นตรงกับความลาดชันของสนามไฟฟ้าในชั้นหุ้มพลาสมาที่ก่อดำเนินผิววัสดุ (Chen, 2003) ตามสมการ

$$\varepsilon_i \approx q_i (\nabla \cdot E_{ps}) \quad (3)$$

เมื่อ ε_i คือ พลังงานจลน์ของไอออน q_i คือ ประจุไอออน และ $\nabla \cdot E_{ps}$ คือ ความลาดชันของสนามไฟฟ้าในชั้นหุ้มพลาสมาที่ก่อดำเนินผิววัสดุ ในกรณีนี้ผิววัสดุมีสภาพความต้านทานต่ำ ความลาดชันของสนามไฟฟ้าประมาณได้จากค่าศักย์ไฟฟ้าที่ไบแอส V_{bias} ให้กับวัสดุ ในกรณีนี้พลังงานจลน์ของไอออนที่เคลื่อนที่ตกกระทบผิวดำเนินผิววัสดุได้จาก $\varepsilon_i \approx q_i V_{bias}$

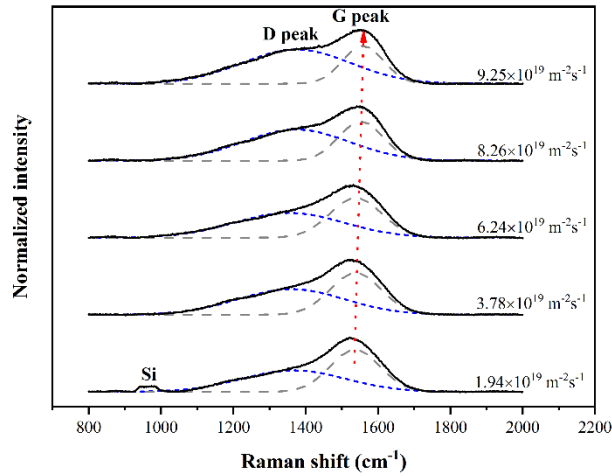
สำหรับกรณีนี้ผิววัสดุมีสภาพความนำไฟฟ้าต่ำหรือสภาพความต้านทานเชิงผิวสูง พลังงานจลน์ของไอออนที่เคลื่อนที่ตกกระทบพื้นผิววัสดุ จะถูกลดทอนลงไปอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากสนามไฟฟ้าจากประจุไฟฟ้าที่เป็นประจุบวกที่สะสมบนผิววัสดุดังกล่าว เหตุการณ์ลักษณะนี้เกิดขึ้นกับการสังเคราะห์ฟิล์มที่เป็นฉนวน เช่นฟิล์ม TiO₂ ฟิล์ม Al₂O₃ (Henderson, 2003; Sellers, 1998) และฟิล์ม a-C:H ที่มีคุณสมบัติไม่นำไฟฟ้า ($\rho \approx 10^2$ ถึง 10^{16} ohm.cm) (Grill, 1999)

เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวจึงมีความจำเป็นที่ต้องลดหรือยับยั้งการสะสมประจุไฟฟ้าบนผิววัสดุ ด้วยการใช้อิเล็กตรอนซึ่งได้จากการไบแอสชิ้นงานด้วยศักย์ไฟฟ้าที่มีรูปแบบไฟกระแสถลับความถี่ย่านสัญญาณวิทยุ (Corbella, Bailuch, Kleinschmidt, & Bewilogua, 2008; Peng, Barber, & Clyne, 2001) หรือรูปแบบไบโพลาร์พัลส์ชนิดไม่สมมาตร ตามภาพที่ 5 โดยในหนึ่งรอบของสัญญาณแบบไบโพลาร์พัลส์ถูกแบ่งเป็น ช่วงเวลาที่ศักย์ไฟฟ้าไบแอสมีค่าเป็นลบ (t_{neg}) และช่วงเวลาที่ศักย์ไฟฟ้าไบแอสมีค่าเป็นบวก (t_{pos}) โดยช่วง t_{neg} เป็นช่วงที่ทำให้เกิดการสะสมตัวของชั้นฟิล์มพร้อม ๆ กับการสะสมของประจุบวกบนผิวฟิล์ม ในทางตรงข้าม ช่วง t_{pos} จะเป็นช่วงที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ตกกระทบผิวฟิล์มเพื่อล้างประจุไฟฟ้าที่มีก่อนหน้านี้

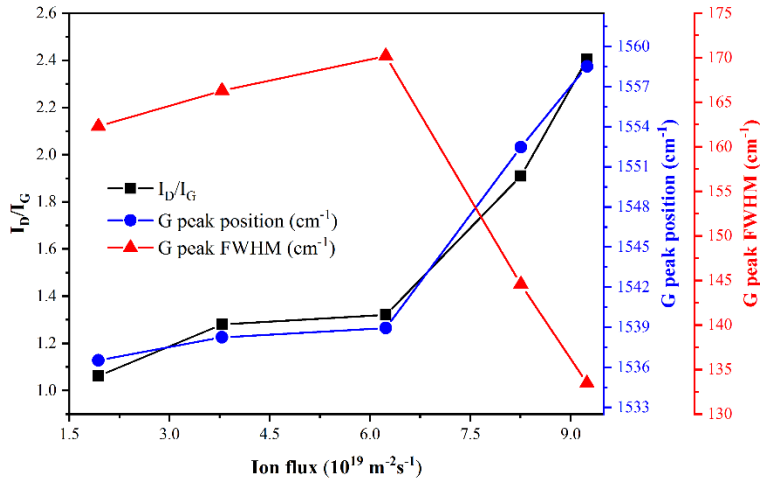


ภาพที่ 5 กราฟตัวอย่างสัญญาณศักย์ไบแอสรูปแบบไบโพลาร์พัลส์และไดอะแกรมแสดงฟลักซ์ไอออนเคลื่อนที่เข้าหาผิวฟิล์ม DLC ในช่วงศักย์ไบแอสเป็นลบ และฟลักซ์อิเล็กตรอนเคลื่อนที่เข้าหาผิวฟิล์ม DLC ในช่วงที่ศักย์ไบแอสเป็นบวก

เพื่อศึกษาผลกระทบของฟลักซ์ไอออนและอิทธิพลของพลังงานไอออนต่อโครงสร้างฟิล์ม a-C:H จึงได้ดำเนินการสังเคราะห์ฟิล์ม a-C:H บนแผ่นซิลิกอนภายใต้กำลังไฟฟ้าที่ใช้ขั้วหัวแมกนีตรอนและศักย์ไบแอสที่กำหนด สเปกตรัมรามานของฟิล์ม a-C:H ที่ตกสะสมภายใต้ฟลักซ์ไอออนย่าน $10^{18} \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ถึง $10^{19} \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ซึ่งกำหนดจากกำลังไฟฟ้าที่ขั้วหัวแมกนีตรอนแสดงในภาพที่ 6 โดยได้ปรับความเข้มสูงสุดของเส้นสเปกตรัมรามานให้มีค่าเท่ากัน (normalization) พบว่าสเปกตรัมรามานทุกเส้นประกอบจากเส้นโค้งเกาส์เซียนสองเส้นที่มีตำแหน่งกลางประมาณ 1360 cm^{-1} และ 1550 cm^{-1} ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะตัวที่สำคัญของฟิล์ม a-C:H นอกจากนี้ในกรณีตกสะสมฟิล์ม a-C:H ด้วยฟลักซ์ไอออน $1.94 \times 10^{19} \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ยังตรวจพบสัญญาณที่ตำแหน่งย่าน 920 cm^{-1} ถึง 990 cm^{-1} ซึ่งบ่งชี้ถึงลักษณะเฉพาะของแผ่นผลึกซิลิกอน (Menegazzo, Kahn, Berghauser, & Mizaikoff, 2011)

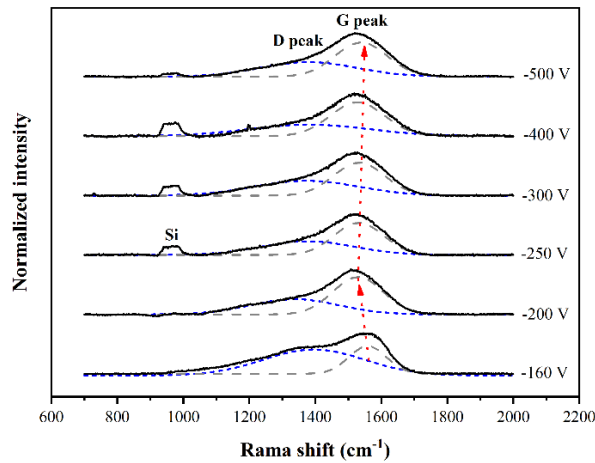


ภาพที่ 6 สเปกตรัมรามานของฟิล์ม a-C:H ที่ตกสะสมภายใต้ปริมาณฟลักซ์ไอออนและอิเล็กตรอนต่างกัน



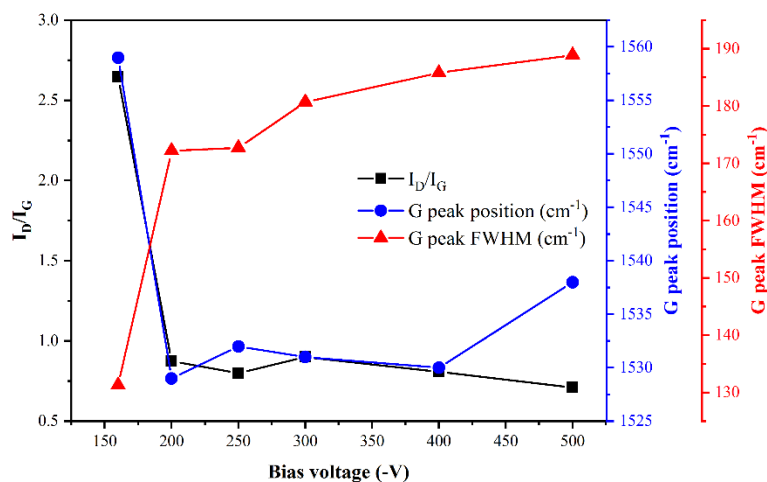
ภาพที่ 7 อัตราส่วน I_D/I_G ตำแหน่งยอดพีค G และความกว้างครึ่งความสูงของยอดพีค G (G peak FWHM) ของฟิล์ม a-C:H ที่ตกสะสมภายใต้ปริมาณฟลักซ์ไอออนที่แตกต่างกัน

อัตราส่วนของ I_D/I_G ซึ่งประเมินจากสัดส่วนพื้นที่ใต้เส้นโค้งแก๊สเซียน ตำแหน่ง และความกว้างครึ่งความสูงของยอดพีค G ที่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณฟลักซ์ไอออนแสดงได้ตามภาพที่ 7 พบว่า I_D/I_G มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณฟลักซ์ไอออนที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณฟลักซ์ไอออนจาก $6.3 \times 10^{19} \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ไปเป็น $9.3 \times 10^{19} \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ยอดพีค G มีการเลื่อนตำแหน่งจาก 1539 cm^{-1} ไปยังตำแหน่ง 1558 cm^{-1} ในขณะที่ความกว้างครึ่งความสูงของยอดพีค G มีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจน โดยสัดส่วน I_D/I_G ที่เพิ่มขึ้นบ่งชี้ว่าคาร์บอน sp^3 ในฟิล์ม a-C:H มีปริมาณลดลงหรือบ่งชี้ว่าเกิดการขยายตัวของคลัสเตอร์ sp^2 ซึ่งเป็นโครงสร้างพันธะของแกรไฟต์ภายในฟิล์ม a-C:H นั้นหมายความว่า การเพิ่มฟลักซ์ไอออน เมื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้าที่ใช้ขับหัวแมกนีตรอน ทำให้ฟิล์ม a-C:H แสดงสมบัติแกรไฟต์มากกว่าสมบัติของเพชร ซึ่งฟิล์มลักษณะเช่นนี้ถูกจัดอยู่ในกลุ่มฟิล์มคาร์บอนคล้ายแกรไฟต์ (graphite-like carbon, GLC)



ภาพที่ 8 สเปกตรัมรามานของฟิล์ม a-C:H ที่ตกสะสมภายใต้ศักย์ไบแอสแผ่นฐานที่แตกต่างกัน โดยกำหนดกำลังไฟฟ้าที่ขับหัวแมกนีตรอนเป็น 100 W

สเปกตรัมรามานของฟิล์ม a-C:H ที่ตกสะสมภายใต้ศักย์ไบแอสแตกต่างกันแสดงตามภาพที่ 8 พบว่า สเปกตรัมรามานทุกเส้นแสดงลักษณะเฉพาะของฟิล์ม a-C:H สเปกตรัมรามานภายใต้ศักย์ไบแอสแผ่นฐาน -160 V ปรากฏคุณลักษณะต่างไปจากเงื่อนไขอื่น ๆ คือ ยอดพีคที่ตำแหน่ง 1377 cm^{-1} มีความเด่นชัดมากกว่า ในขณะที่สเปกตรัมรามานของฟิล์มที่ตกสะสมภายใต้ศักย์ไบแอสตั้งแต่ -200 V ถึง -500 V มีลักษณะใกล้เคียงกัน สอดคล้องกับค่าอัตราส่วนของ I_D/I_G ตำแหน่งยอดพีค G และค่าความกว้างครึ่งความสูงของยอดพีค G ที่แสดงในภาพที่ 9 โดยค่า I_D/I_G และตำแหน่งยอดพีค G มีค่าสูงสุดในกรณีใช้ศักย์ไบแอส -160 V และลดลงอย่างฉับพลันเมื่อใช้ศักย์ไบแอสตั้งแต่ -200 V สำหรับตำแหน่งยอดพีค G ตรงกันข้ามกับค่าความกว้างครึ่งความสูงของยอดพีค G ที่มีค่าต่ำสุดเมื่อใช้ศักย์ไบแอส -160 V และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมาก เมื่อใช้ศักย์ไบแอสมากกว่า -200 V กล่าวคือฟิล์ม a-C:H ที่เติบโตภายใต้การให้ศักย์ไบแอสแผ่นฐานมากกว่า -200 V ปริมาณ sp^3 จะมีแนวโน้มสูงขึ้น และมีสมบัติคล้ายเพชรมากขึ้น



ภาพที่ 9 อัตราส่วน I_D/I_G ตำแหน่งยอดพีค G และความกว้างครึ่งความสูงของยอดพีค G (G peak FWHM) ของฟิล์ม a-C:H ที่ตกสะสมภายใต้ศักย์ไบแอสที่แตกต่างกัน

วิจารณ์ผลการวิจัย

โดยปกติแล้วโครงสร้างของฟิล์ม DLC มักจะถูกควบคุมด้วยสมบัติของอะตอมคาร์บอนและคาร์บอนไอออนที่กำลังระดมชนและปกคลุมแผ่นฐานขณะฟิล์มกำลังเติบโต เช่น พลังค์ของอนุภาค พลังงานของอนุภาค เป็นต้น สำหรับฟิล์ม a-C:H ที่ตกสะสมภายใต้พลาสมาที่ไอออนที่สูงขึ้น มีปริมาณ sp^3 ลดลงและปริมาณ sp^2 สูงขึ้น เนื่องจากพลาสมาคือปริมาณไอออนที่ระดมชนผิวฟิล์มต่อพื้นที่ต่อเวลา ซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นกับผิวฟิล์ม ภายใต้กลไกการถ่ายเทโมเมนตัมและพลังงานให้กับอนุภาคฟิล์ม การระดมชนด้วยปริมาณไอออนที่มากขึ้นนั้น ทำให้ความร้อนที่บริเวณผิวฟิล์มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง นำไปสู่การสูญเสียไฮโดรเจนภายในฟิล์ม (Robertson, 2002) การสูญเสียไฮโดรเจนทำให้อะตอมคาร์บอนพยายามจับพันธะใหม่กับอะตอมคาร์บอนรอบข้างในรูปแบบ sp^2 ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ผิวฟิล์ม จึงเป็นการเพิ่มโอกาสในการเกิดคาร์บอนในรูปแบบ sp^2 ซึ่งทำให้ฟิล์มสูญเสียโครงสร้างแบบ DLC และเปลี่ยนเป็นโครงสร้างแบบแกรไฟต์ GLC (Tai, Lee, Wei, Tyan, 2006; Choi & Hong, 2008) นอกจากนี้ จากรายงานของเฟอร์รารีและคณะ (Ferrari *et al.*, 2000) ได้อธิบายถึงการเลื่อนตำแหน่งของยอดพีค G ว่า สำหรับฟิล์มอะมอร์ฟัสคาร์บอน ถ้าหากยอดพีค G มีการเลื่อนตำแหน่งจาก 1520 cm^{-1} ไปยัง 1600 cm^{-1} จะหมายถึงการมีแนวโน้มที่จะเกิดผลึกแกรไฟต์ขนาดนาโนภายในฟิล์ม นอกจากนี้ความกว้างของยอดพีค G ณ ตำแหน่งครึ่งความสูง สามารถเชื่อมโยงกับขนาดของแกรไฟต์ เมื่อความกว้างของยอดพีค G มาก ขนาดเกรนของกลุ่มแกรไฟต์จะมีขนาดเล็ก โดยค่าความกว้างครึ่งความสูงของยอดพีค G ย่าน 100 cm^{-1} ถึง 200 cm^{-1} แสดงถึงกลุ่มแกรไฟต์ที่มีขนาดประมาณ 1 nm ถึง 20 nm (Lespade, Al-Jishi, Dresselhaus, 1982; Schwan, Ulrich, Bathori, Erhardt, Silva, 1996) ดังนั้น จะเห็นได้ว่าการเพิ่มพลาสมาสำหรับการเตรียมฟิล์ม a-C:H ทำให้เกิดกลุ่มของแกรไฟต์ขนาดนาโนภายในฟิล์ม ซึ่งส่งผลให้ปริมาณ sp^3 ภายในฟิล์มลดลง และทำให้ฟิล์มมีสมบัติคล้ายแกรไฟต์มากขึ้น

เป็นที่ทราบดีว่าพลังงานของอนุภาคที่เคลื่อนที่ตกกระทบฟิล์มมีอิทธิพลอย่างมากต่อโครงสร้างระดับจุลภาคของฟิล์ม a-C:H (Adhikari, Chandra, Ram, Kalita, & Umeno, 2008) ซึ่งโรเบิร์ตสัน (Robertson, 2002) ให้คำอธิบายไว้ดังนี้ ศักย์ไบแอสสามารถเร่งไอออนบวกในพลาสมาให้เคลื่อนที่กระทบพื้นผิวฟิล์มด้วยพลังงานที่ผันตรงกับค่าศักย์ไบแอส ไอออนดังกล่าวจะสามารถแยกพันธะ C-H และเข้าแทนที่ให้เกิดพันธะ C-C นำไปสู่การเพิ่มขึ้นของสัดส่วนพันธะ sp^3 ภายในฟิล์ม a-C:H แต่เมื่อศักย์ไบแอสมีค่าสูงเกินจะเป็นการทำลายพันธะ C-C ซึ่งส่งผลให้ปริมาณพันธะ sp^3 ในเนื้อฟิล์มมีแนวโน้มลดลงแต่อย่างไรก็ตาม สมบัติของฟิล์ม DLC ขึ้นกับพลังงานต่ออะตอมของคาร์บอน หากต้องการฟิล์ม DLC ที่ดี คาร์บอนไอออนควรได้รับการเร่งโดยศักย์ 100 V ต่ออะตอม เพื่อให้มีพลังงาน 100 eV ซึ่งจะทำได้ฟิล์มที่มีปริมาณ sp^3 ความแข็ง และความเครียดภายในฟิล์มสูง โดยไอออนของอะเซทิลีน (C_2H_n^+) มีคาร์บอน 2 อะตอม เพราะฉะนั้นสำหรับอะเซทิลีนไอออนหรือโมเลกุลอะเซทิลีนจำเป็นต้องการศักย์ไบแอสขั้นต่ำ -200 V สำหรับการก่อตัวเป็นฟิล์ม a-C:H ที่มีปริมาณ sp^2/sp^3 ต่ำ (Weiler, Lang, Li, & Robertson, 1998) ดังนั้นจึงเห็นได้ว่าเมื่อใช้ศักย์ไบแอสมากกว่า -200 V แนวโน้มสัดส่วน sp^2/sp^3 ลดลงขึ้นอย่างชัดเจน

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการสังเคราะห์ฟิล์ม a-C:H บนแผ่นผลึกซิลิกอน โดยใช้ดีซีเทคนิคแมกนีตรอนสปัตเตอริงภายใต้บรรยากาศของแก๊สไฮโดรเจนผสมกับอะเซทิลีน เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของปริมาณพลาสมาที่ไอออนและศักย์ไบแอสที่มีผลต่อสัดส่วนของพันธะ sp^2 และ sp^3 สำหรับระบบแมกนีตรอนสปัตเตอริง พลาสมาที่ไอออนวัดได้จากหัววัดแลงเมียร์มีค่าอยู่ในย่าน $10^{18}\text{ m}^{-2}\text{ s}^{-1}$

ถึง $10^{19} \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ โดยปริมาณฟลักซ์ไอออนขึ้นตรงกับกำลังไฟฟ้าที่ใช้ขับหัวแมกนีตรอนและเป็นอิสระจากศักย์ไบแอสผลการทดลองวัดปริมาณฟลักซ์ไอออนมีความสอดคล้องกับแบบจำลองชั้นพื้นฐานที่พิจารณาจากเหตุการณ์การชนกันระหว่างอิเล็กตรอนและอนุภาคแก๊สในพลาสมา และจากเทคนิครามานสเปกโตรสโคปีแสดงให้เห็นถึงโครงสร้างระดับจุลภาคของฟิล์ม a-C:H พบว่าปริมาณคาร์บอนพันธะ sp^3 ซึ่งเป็นโครงสร้างพื้นฐานของเพชร มีแนวโน้มลดลงสำหรับฟิล์มที่ตกสะสมด้วยปริมาณฟลักซ์ไอออนที่สูง เนื่องจากอิทธิพลของอุณหภูมิผิวที่เพิ่มขึ้นตามกำลังที่ผิวฟิล์ม ในทางตรงข้ามปริมาณคาร์บอนพันธะ sp^3 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น สำหรับฟิล์มที่ใช้ศักย์ไบแอสตั้งแต่ -200 V ดังนั้นการกำหนดปริมาณฟลักซ์ไอออนและศักย์ไบแอสที่เหมาะสม จึงมีความสำคัญอย่างยิ่งในการสังเคราะห์ฟิล์ม a-C:H

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ ดร.ศรายุทธ ตันมี และ นายอุกฤษฏ์ ฤทธิหงส์ สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์และให้คำปรึกษาด้านการตรวจวัดและวิเคราะห์ฟิล์มด้วยเทคนิครามานสเปกโตรสโคปี และขอบคุณศูนย์ความเป็นเลิศทางฟิสิกส์ ที่ได้สนับสนุนค่าใช้จ่ายในการดำเนินการวิจัยภายใต้สัญญาเลขที่ “ThEP-61-EQP-MSU2”

เอกสารอ้างอิง

- Adhikari, S., Chandra, D., Ram, H., Kalita, G., & Umeno, M. (2008). Effect of substrate bias voltage on the properties of diamond-like carbon thin films deposited by microwave surface wave plasma CVD. *Diamond & Related Materials*, 17, 696–699.
- Asari E. (2000). An effect of the extended cascade on the Raman spectra of ion-irradiated graphite. *Carbon*, 38, 1857–1861.
- Bewilogua, K., & Hofmann, D. (2014). History of diamond-like carbon films - From first experiments to worldwide applications. *Surface and Coatings Technology*, 242, 214–225.
- Chabert, P., & Braithwaite, N. (2011). *Physics of radio-frequency plasmas. Physics of Radio-Frequency Plasmas* (Vol. 9780521763).
- Chen, F. (2003). Langmuir probe diagnostics. *Mini-Course on Plasma Diagnostics, IEEE-ICOPS Meeting*, 42.
- Choi, W. S., & Honga, B. (2008). The effect of annealing on the properties of diamond-like carbon protective antireflection coatings. *Renewable Energy*, 33, 226–231.
- Corbella, C., Bialuch, I., Kleinschmidt, M., & Bewilogua, K. (2008). Modified DLC coatings prepared in a large-scale reactor by dual microwave/pulsed-DC plasma-activated chemical vapour deposition. *Thin Solid Films*, 517(3), 1125–1130.
- Erdemir, A., & Donnet, C. (2006). Tribology of diamond-like carbon films: Recent progress and future prospects. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 39(18), 311–327.

- Ferrari A. C., LiBassi A., Tanner B. K., Stolojan V., Yuan J., Brown L. M., Rodil S. E., Kleinsorge B., & Robertson J. (2000). Density, sp^3 fraction, and cross-sectional structure of amorphous carbon films determined by x-ray reflectivity and electron energy-loss spectroscopy. *Physical Review B*, 62, 11089-11103.
- Ferrari, A. C., Robertson, J. (2000). Interpretation of Raman spectra of disordered and amorphous carbon. *Physical Review B*, 61, 14095-14107.
- Flege, S., Hatada, R., Hanauer, A., Ensinger, W., Morimura, T., & Baba, K. (2017). Preparation of Metal-Containing Diamond-Like Carbon Films by Magnetron Sputtering and Plasma Source Ion Implantation and Their Properties. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2017.
- Furlan, K. P., Klein, A. N., & Hotza, D. (2013). Diamond-like carbon films deposited by hydrocarbon plasma sources. *Reviews on Advanced Materials Science*, 34, 165–172.
- Gilkes, K. W. R., Prawer, S., Nugent, K. W., Robertson, J., & Sands, H. S. (2000). Direct quantitative detection of the sp^3 bonding in diamond-like carbon films using ultraviolet and visible Raman spectroscopy, *Journal of Applied Physics*, 7283.
- Grill, A. (1999). Electrical and optical properties of diamond-like carbon, *Thin Solid Films*, 356, 189–193.
- Henderson, P. S., Kelly, P. J., Arnell, R. D., Backer, H., & Bradley, J. W. (2003). Investigation into the properties of titanium based films deposited using pulsed magnetron sputtering. *Surface and Coatings Technology*, 174–175, 720–724.
- Lespade, P., Al-Jishi, R., Dresselhaus, M. S., (1982). Model for Raman scattering from incompletely graphitized carbons. *Carbon*, 20, 427-431.
- Lettington, A. H. (1998). Applications of diamond-like carbon thin films. *Carbon*, 36(5–6), 555–560.
- Menegazzo, N., Kahn, M., Berghauser, R., & Mizaikoff, B. (2011). Nitrogen-doped diamond-like carbon as optically transparent electrode for infrared attenuated total reflection spectroelectrochemistry, 1831–1839.
- Peng, X., Barber, Z., & Clyne, T. (2001). Surface roughness of diamond-like carbon films prepared using various techniques. *Surface and Coatings Technology*, 138(1), 23–32.
- Ray, S. C., Mukherjee, D., Sarma, S., Bhattacharya, G., Mathur, A., Roy, S. S., & McLaughlin, J. A. (2017). Functional diamond like carbon (DLC) coatings on polymer for improved gas barrier performance. *Diamond and Related Materials*, 80(September), 59–63.
- Robertson, J. (2002). Diamond-like amorphous carbon, 37, 129–281.
- Schwan, J., Ulrich, S., Bathori, V., Erhardt, H., & Silva, S. R. P. (1996). Raman spectroscopy on amorphous carbon films. *Journal of Applied Physics*, 80, 440.
- Sellers, J. (1998). Asymmetric bipolar pulsed DC: The enabling technology for reactive PVD. *Surface and Coatings Technology*, 98(1–3), 1245–1250.

- Tai, F. C., Lee, S. C., Wei, C. H., & Tyan, S. L. (2006). Correlation between I_D/I_G Ratio from Visible Raman Spectra and sp^2/sp^3 Ratio from XPS Spectra of Annealed Hydrogenated DLC Film. *Materials Transactions*, 47, 1847-1852.
- Wang, Y., Ye, Y., Li, H., Ji, L., Chen, J., & Zhou, H. (2011). A magnetron sputtering technique to prepare a-C:H films: Effect of substrate bias. *Applied Surface Science*, 257(6), 1990–1995.
- Weiler, M., Sattel, S., Giessen, T., Jung, K., Ehrhardt, H., Veerasamy, V., & Robertson, J. (1996). Preparation and properties of highly tetrahedral hydrogenated amorphous carbon.
- Weiler, M., Lang, K., Li, E., & Robertson, J. (1998). Deposition of tetrahedral hydrogenated amorphous carbon using a novel electron cyclotron wave resonance reactor. *Applied Physics Letters*, 72, 1314.