

# 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  $10^{18}$   $m^{-2}s^{-1}$  ถึง  $10^{19}$   $m^{-2}s^{-1}$  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/C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> 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 10<sup>18</sup>-10<sup>19</sup> m<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup> 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 sp<sup>2</sup>/sp<sup>3</sup> 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 sp<sup>2</sup>/sp<sup>3</sup> 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 sp<sup>2</sup> และ sp<sup>3</sup> ฟิล์ม DLC แบ่งออกได้หลายชนิดขึ้นอยู่กับสัดส่วนคลัสเตอร์คาร์บอนพันธะ sp<sup>2</sup> ต่อพันธะ sp<sup>3</sup> และปริมาณไฮโดรเจน รวมถึงองค์ประกอบของธาตุที่ถูกเจือเข้าไป โดยพันธะ sp<sup>2</sup> แสดงลักษณะของแกรไฟต์ ในขณะที่พันธะ sp<sup>3</sup> 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

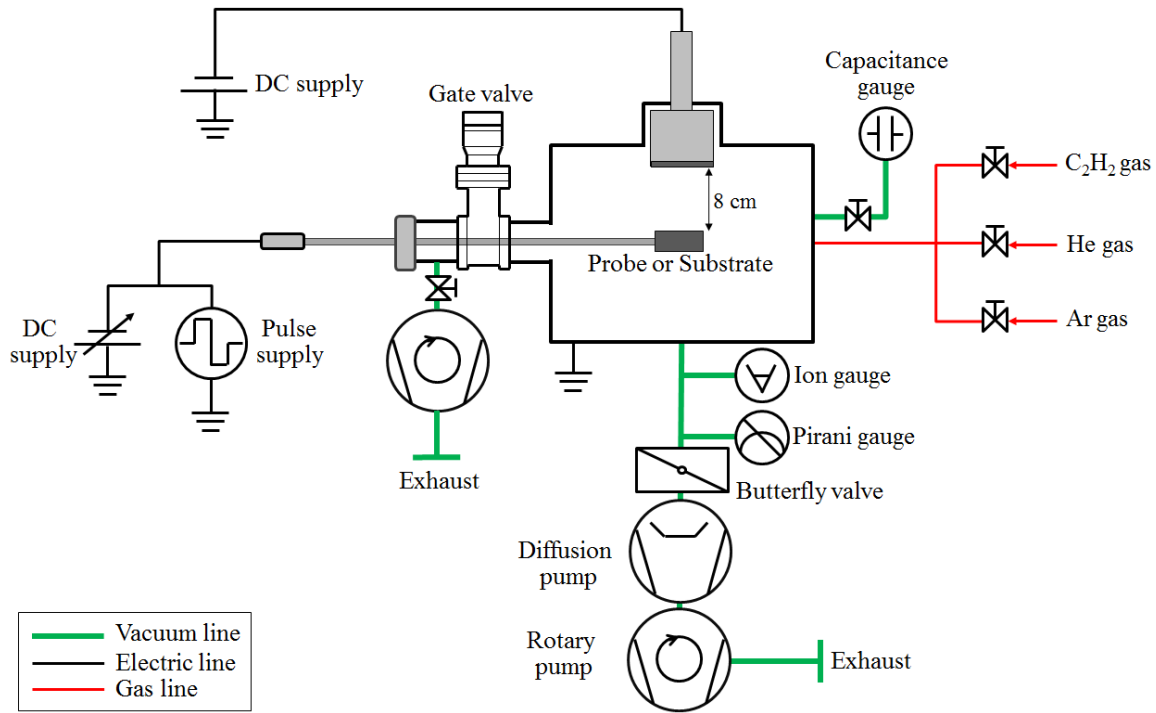
ฟิล์ม a-C:H สามารถสังเคราะห์ได้จากกระบวนการตกสะสมด้วยไอเชิงกายภาพ (physical vapor deposition, PVD) เช่น แมกนีตรอนสปัตเตอริง (magnetron sputtering) การตกสะสมด้วยลำไอออน (ion beam deposition) การตกสะสมด้วยลำพลาสมา (plasma beam source) และการตกสะสมด้วยพลาสมาความถี่วิทยุ (rf plasma deposition) เป็นต้น (Erdemir & 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 และใช้เทคนิครามานสเปกโทรสโกปีศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคของฟิล์ม a-C:H

## วิธีดำเนินการวิจัย

### ระบบเคลือบฟิล์ม a-C:H

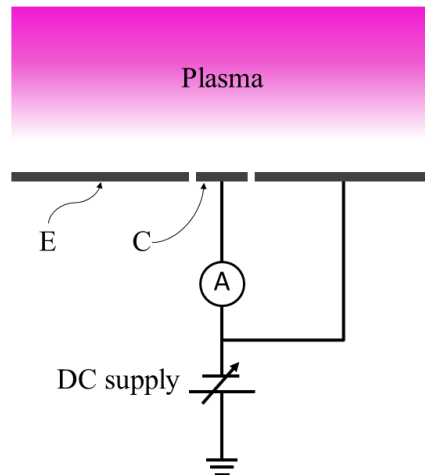
ระบบแมกนีตรอนสปัตเตอริง ตามไดอะแกรมในภาพที่ 1 ประกอบด้วยภาชนะสุญญากาศทรงกระบอกขนาดความจุประมาณ  $6500 \text{ cm}^3$  มีปั๊มโรตารีและปั๊มไอแพร์ทำหน้าที่สูบอากาศออกจากภาชนะสุญญากาศ ทำให้ภายในภาชนะสุญญากาศมีความดันต่ำสุดประมาณ  $10^{-4} \text{ Pa}$  โดยบริเวณระหว่างภาชนะสุญญากาศและปั๊มไอแพร์ได้ติดตั้งวาล์วปีกผีเสื้อ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



ภาพที่ 1 ไดอะแกรมระบบแมกนีตรอนสปัตเตอริง

### การวัดฟลักซ์ไอออน

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



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

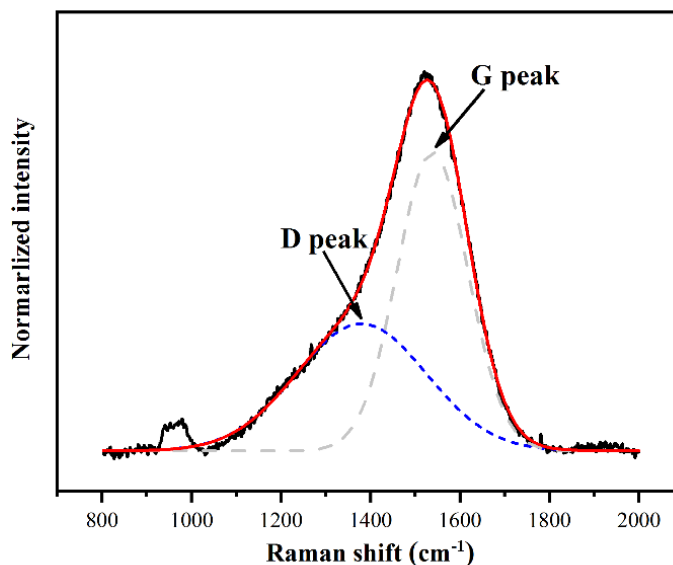
#### การตกสะสมฟิล์ม a-C:H

แผ่นซิลิกอนชนิดพี (p-type) หนา 100  $\mu\text{m}$  เจือด้วยโบรอน (boron) มีค่าสภาพต้านทาน 100 ohm.cm ถูกใช้เป็นชิ้นงานในกระบวนการตกสะสมฟิล์ม a-C:H โดยแผ่นซิลิกอนได้รับการทำความสะอาดจากการใช้ระบบอัลตราโซนิคในอะซิโตน เมทานอล และน้ำปราศจากประจุ 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  $3\text{ cm}^{-1}$  ถึง  $5\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งสัดส่วนปริมาณคลัสเตอร์  $sp^2/sp^3$  หาได้จากการใช้กระบวนการปรับเส้นโค้ง (curve fitting) ของสเปกตรัมรามานด้วยเส้นโค้งเกาส์เซียนที่มีศูนย์กลางที่ตำแหน่ง  $1350\text{ cm}^{-1}$  สำหรับ D-peak และที่ตำแหน่ง  $1580\text{ cm}^{-1}$  สำหรับ G-peak ดังภาพที่ 3 สัดส่วนพื้นที่ใต้เส้นโค้งจะนำไปสู่ค่า  $I_D/I_G$  ซึ่งสามารถใช้บ่งชี้สัดส่วน  $sp^2/sp^3$  ภายในฟิล์ม a-C:H

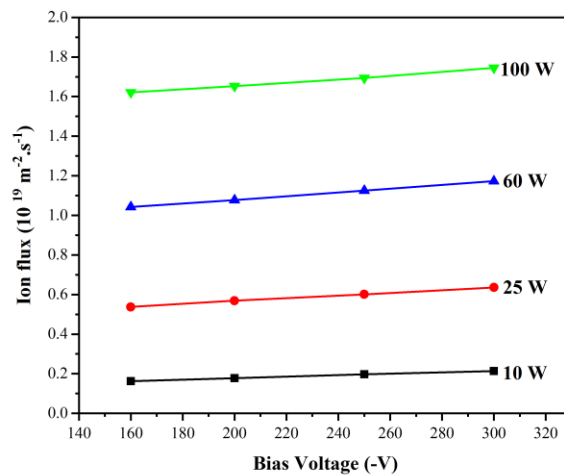
การวิเคราะห์โครงสร้างของคาร์บอนอะมอร์ฟัส สามารถพิจารณาทางอ้อมได้จากการใช้สัดส่วนของปริมาณพันธะของ  $sp^2$  ต่อ  $sp^3$  ไฮบริดไดเซชันของคาร์บอน โดยคำนวณได้จากพื้นที่ใต้เส้นโค้งของสัญญาณยอดพีค G (G peak หรือ G-band) ซึ่งยอดพีคของสเปกตรัมรามานอยู่ที่ประมาณ  $1580\text{ cm}^{-1}$  สอดคล้องกับการสั่นของโซ่คาร์บอน C=C (C=C chains) วงแหวนอะโรมาติก (aromatic rings) รวมถึงคาร์บอนพันธะเดี่ยว C-C หรือ  $sp^3$  และสัญญาณพีค D (D peak หรือ D-band) ซึ่งยอดพีคของสเปกตรัมรามานอยู่ที่ประมาณ  $1350\text{ cm}^{-1}$  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  $1580\text{ cm}^{-1}$  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  $\varepsilon_{iz}$  คือ พลังงานสำหรับการแตกตัว  $\varepsilon_{exc}$  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  $\Gamma_i$  มีความสัมพันธ์โดยตรงกับกำลังไฟฟ้าที่ใช้ขั้วหัวแมงนีตรอนและเป็นอิสระจากศักย์ไบแอส ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองตามกราฟภาพที่ 4



ตารางที่ 1 ค่าเชิงตัวเลขของปริมาณทางฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้องกับสมการที่ 2

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

การวัดฟลักซ์ไอออนด้วยหัววัดแสงเมียร์ภายใต้การดิซชาร์จของแก๊สอาร์กอน ทำให้สามารถใช้สมการที่ 1 และสมการที่ 2 รวมไปถึงพารามิเตอร์ในตารางที่ 1 คำนวณระดับฟลักซ์ไอออน และทำให้เข้าใจอิทธิพลของกำลังไฟฟ้าที่ใช้ขับหัวแมกนีตรอนและอิทธิพลของศักย์ไบแอสที่มีต่อปริมาณฟลักซ์ไอออนในพลาสมา

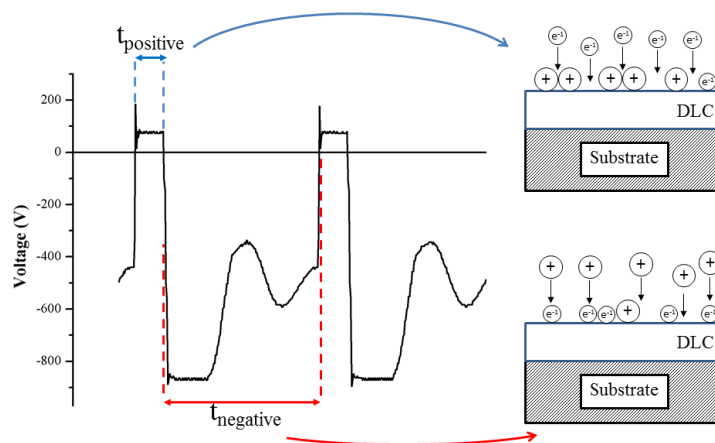
แม้ผลการทดลองและความสัมพันธ์เชิงทฤษฎีได้ชี้ให้เห็นว่าฟลักซ์ไอออนเป็นอิสระจากศักย์ไบแอส แต่อย่างไรก็ตามพลังงานจลน์ของไอออนที่เคลื่อนที่มาตกกระทบพื้นผิววัสดุขึ้นตรงกับความลาดชันของสนามไฟฟ้าในชั้นหุ้มพลาสมาที่ก่อดำเนินผิววัสดุ (Chen, 2003) ตามสมการ

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

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

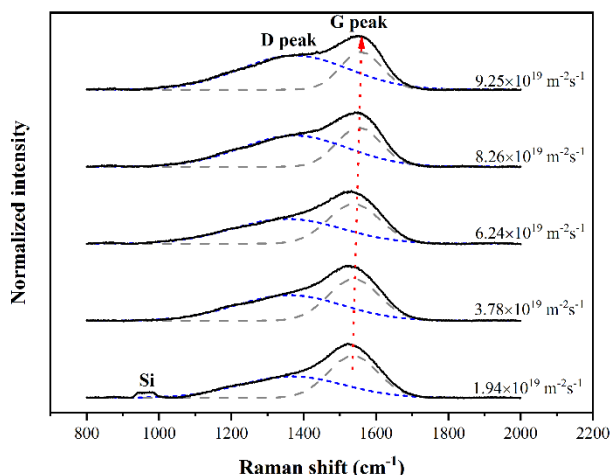
สำหรับกรณีนี้ผิววัสดุมีสภาพความนำไฟฟ้าต่ำหรือสภาพความต้านทานเชิงผิวสูง พลังงานจลน์ของไอออนที่เคลื่อนที่ตกกระทบพื้นผิววัสดุ จะถูกลดทอนลงไปอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากสนามไฟฟ้าจากประจุไฟฟ้าที่เป็นประจุบวกที่สะสมบนผิววัสดุดังกล่าว เหตุการณ์ลักษณะนี้เกิดขึ้นกับการสังเคราะห์ฟิล์มที่เป็นฉนวน เช่นฟิล์ม TiO<sub>2</sub> ฟิล์ม Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Henderson, 2003; Sellers, 1998) และฟิล์ม a-C:H ที่มีคุณสมบัติไม่นำไฟฟ้า ( $\rho \approx 10^2$  ถึง  $10^{16}$  ohm.cm) (Grill, 1999)

เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวจึงมีความจำเป็นต้องลดหรือยับยั้งการสะสมประจุไฟฟ้าบนผิววัสดุ 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

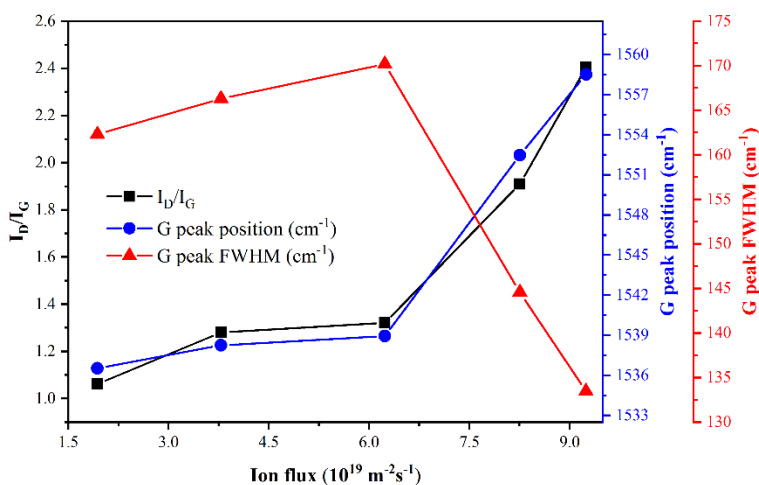


ภาพที่ 5 กราฟตัวอย่างสัญญาณศักย์ไบแอสรูปแบบไบโพลาร์พัลส์และไดอะแกรมแสดงฟลักซ์ไอออนเคลื่อนที่เข้าหาผิวฟิล์ม DLC ในช่วงศักย์ไบแอสเป็นลบ และฟลักซ์อิเล็กตรอนเคลื่อนที่เข้าหาผิวฟิล์ม DLC ในช่วงที่ศักย์ไบแอสเป็นบวก

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  $1360 \text{ cm}^{-1}$  และ  $1550 \text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะตัวที่สำคัญของฟิล์ม a-C:H นอกจากนี้ในกรณีตกสะสมฟิล์ม a-C:H ด้วยฟลักซ์ไอออน  $1.94 \times 10^{19} \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$  ยังตรวจพบสัญญาณที่ตำแหน่งย่าน  $920 \text{ cm}^{-1}$  ถึง  $990 \text{ cm}^{-1}$  ซึ่งบ่งชี้ถึงลักษณะเฉพาะของแผ่นผลึกซิลิกอน (Menegazzo, Kahn, Berghauser, & Mizaikoff, 2011)

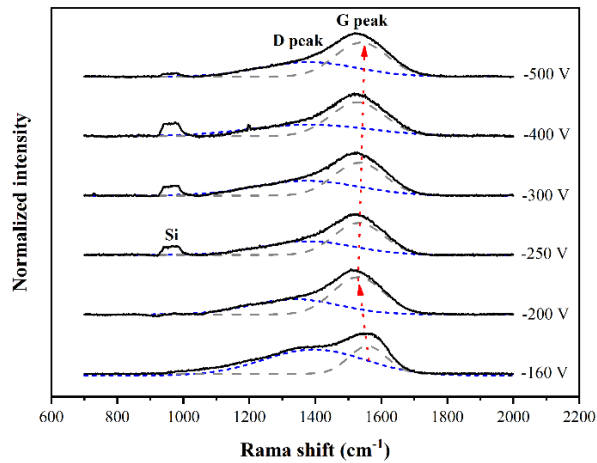


ภาพที่ 6 สเปกตรัมรามานของฟิล์ม a-C:H ที่ตกสะสมภายใต้ปริมาณฟลักซ์ไอออนและอิเล็กตรอนต่างกัน



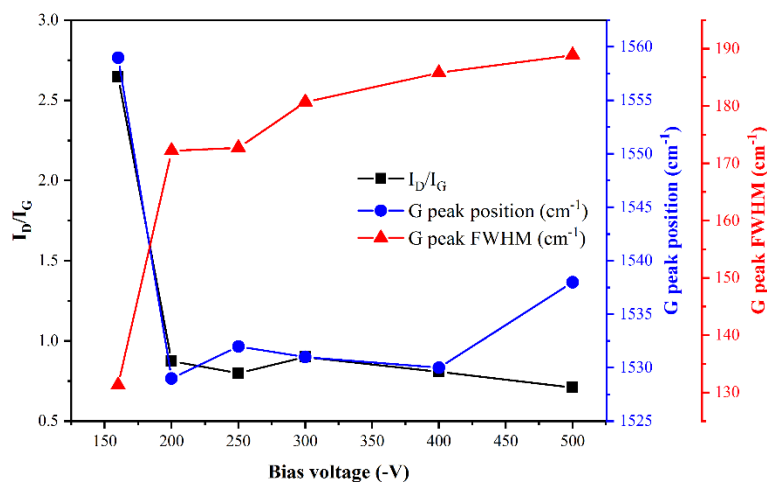
ภาพที่ 7 อัตราส่วน  $I_D/I_G$  ตำแหน่งยอดพีค G และความกว้างครึ่งความสูงของยอดพีค G (G peak FWHM) ของฟิล์ม a-C:H ที่ตกสะสมภายใต้ปริมาณฟลักซ์ไอออนที่แตกต่างกัน

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  $1539 \text{ cm}^{-1}$  ไปยังตำแหน่ง  $1558 \text{ cm}^{-1}$  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 ยอดพีกที่ตำแหน่ง  $1377 \text{ cm}^{-1}$  มีความเด่นชัดมากกว่า ในขณะที่สเปกตรัมรามานของฟิล์มที่ตกสะสมภายใต้ศักย์ไบแอสตั้งแต่ -200 V ถึง -500 V มีลักษณะใกล้เคียงกัน สอดคล้องกับค่าอัตราส่วนของ  $I_D/I_G$  ตำแหน่งยอดพีก G และค่าความกว้างครึ่งความสูงของยอดพีก G ที่แสดงในภาพที่ 9 โดยค่า  $I_D/I_G$  และตำแหน่งยอดพีก G มีค่าสูงสุดในกรณีใช้ศักย์ไบแอส -160 V และลดลงอย่างฉับพลันเมื่อใช้ศักย์ไบแอสตั้งแต่ -200 V สำหรับตำแหน่งยอดพีก G ตรงกันข้ามกับค่าความกว้างครึ่งความสูงของยอดพีก G ที่มีค่าต่ำสุดเมื่อใช้ศักย์ไบแอส -160 V และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมาก เมื่อใช้ศักย์ไบแอสมากกว่า -200 V กล่าวคือฟิล์ม a-C:H ที่เติบโตภายใต้การให้ศักย์ไบแอสแผ่นฐานมากกว่า -200 V ปริมาณ  $sp^3$  จะมีแนวโน้มสูงขึ้น และมีสมบัติคล้ายเพชรมากขึ้น



**ภาพที่ 9** อัตราส่วน  $I_D/I_G$  ตำแหน่งยอดพีก G และความกว้างครึ่งความสูงของยอดพีก 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 เนื่องจากพลาสมาที่ไอออนคือปริมาณไอออนที่ระดมชนผิวฟิล์มต่อพื้นที่ต่อเวลา 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  $1520\text{ cm}^{-1}$  ไปยัง  $1600\text{ cm}^{-1}$  จะหมายถึงการมีแนวโน้มที่จะเกิดผลึกแกรไฟต์ขนาดนาโนภายในฟิล์ม นอกจากนี้ความกว้างของยอดพีค G ณ ตำแหน่งครึ่งความสูง สามารถเชื่อมโยงกับขนาดของแกรไฟต์ เมื่อความกว้างของยอดพีค G มาก ขนาดเกรนของกลุ่มแกรไฟต์จะมีขนาดเล็ก โดยค่าความกว้างครึ่งความสูงของยอดพีค G ย่าน  $100\text{ cm}^{-1}$  ถึง  $200\text{ cm}^{-1}$  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 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.