



การวัดพลังงานไอออนคาร์บอนจากแหล่งกำเนิดพลาสมาแบบพัลส์ฟิลเตอร์คาโทดิกอาร์กในระบบสุญญากาศภายใต้การไบอัสศักย์ไฟฟ้าให้ชิ้นงาน

The Carbon Ion Energy Measurement in Pulse Filtered Cathodic Vacuum Arc Plasma Source for Study the Influence of Negative Substrate Bias Voltage

ภัทรเวท บัวระบัดทอง และ นิติศักดิ์ ปาสาจะ

Phatthrawet Buarabadthong and Nitisak Pasaja

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Department of Physics, Faculty of Science, Mahasarakham University

Received : 10 February 2021

Revised : 13 July 2021

Accepted : 2 August 2021

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการวัดพลังงานไอออนจากแหล่งกำเนิดพลาสมาแบบพัลส์ฟิลเตอร์คาโทดิกอาร์กในระบบสุญญากาศที่มีแกรไฟต์เป็นขั้วแคโทดโดยใช้หัววัดพลังงานไอออนแบบสนามหลวง เพื่อศึกษาอิทธิพลของการไบอัสชิ้นงานด้วยศักย์ไฟฟ้าลบที่มีต่อค่าพลังงานคาร์บอนไอออน ได้ทำการวัดพลังงานคาร์บอนไอออนเมื่อชิ้นงานถูกไบอัสด้วยศักย์ไฟฟ้าตั้งแต่ 0 ถึง -80 โวลต์ และเพื่อศึกษาค่าพลังงานคาร์บอนไอออนในแต่ละช่วงเวลาตามความกว้างพัลส์อาร์กด้วยเทคนิคการวัดพลังงานไอออนตามช่วงเวลา ซึ่งกระบวนการวัดพลังงานคาร์บอนไอออนมีความละเอียดช่วงเวลาการวัดพลังงาน 450 ไมโครวินาที และหนึ่งสัญญาณเวลากการวัดพลังงานจาก 0, 200, 400, 600, 800 และ 1000 ไมโครวินาที หลังจากกระบวนการอาร์กเริ่มต้นขึ้น ผลการศึกษา พบว่า อิทธิพลของการไบอัสชิ้นงานด้วยศักย์ไฟฟ้า 0 โวลต์ หรือชิ้นงานถูกต่อลงกราวด์ พลังงานคาร์บอนไอออนมีค่าเฉลี่ย 20 อิเล็กตรอนโวลต์ และจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามค่าศักย์ไฟฟ้าลบที่ไบอัสให้กับชิ้นงานที่เพิ่มขึ้น โดยการไบอัสชิ้นงานด้วยศักย์ไฟฟ้า -80 โวลต์ จะสามารถวัดค่าพลังงานคาร์บอนไอออนได้ประมาณ 100 อิเล็กตรอนโวลต์ จากการวัดพลังงานคาร์บอนไอออนตามช่วงเวลาของความกว้างพัลส์อาร์ก พบว่า ค่าพลังงานคาร์บอนไอออนไม่ได้เปลี่ยนแปลงไปตามช่วงเวลาความกว้างพัลส์อาร์ก ส่วนความหนาแน่นของไอออนมีค่าเปลี่ยนแปลงไป โดยในช่วงเวลา 0 ถึง 450 ไมโครวินาที ซึ่งเป็นช่วงเริ่มต้นของการอาร์ก ความหนาแน่นของไอออนมีค่าประมาณ 2.19×10^{16} ต่อลูกบาศก์เมตร ช่วงเวลา 450 ถึง 1000 ไมโครวินาที ซึ่งเป็นส่วนกลางของความกว้างพัลส์อาร์ก ค่าความหนาแน่นของไอออนจะคงที่โดยมีค่าเท่ากับ 4.65×10^{16} ต่อลูกบาศก์เมตร และหลังจากช่วงเวลา 1000 ไมโครวินาทีของความกว้างพัลส์อาร์ก ความหนาแน่นของไอออนจะมีค่าลดลงจนเป็นศูนย์เมื่อพลาสมาสิ้นสุดลง

คำสำคัญ : เทคนิคพัลส์ฟิลเตอร์คาโทดิกอาร์ก ; หัววัดพลังงานไอออนแบบสนามหลวง ; พลังงานไอออนคาร์บอน



Abstract

This research is concerned with the process of measuring carbon ion energy from the pulse-filtered cathodic vacuum arc plasma source with the graphite as the cathode by using a retarding field ion energy analysis probe. To study the influence of a negative voltage biasing on carbon ion energy. The substrate was applied negative bias voltage from 0 to -80 V. To study the ion energy during the arc pulse plasma. The Time-resolved technique was used to measure carbon ion energy, with a time resolution of the order of 450 microseconds. The delay time for measuring the ion energy was adjusted from 0, 200, 400, 600, 800, and 1000 microseconds after arc ignition. The experimental result was found that the carbon ion energy in the arc plasma was dependent on substrate bias voltage, the carbon ion energy averages 20 eV when the substrate was biased at 0 V or grounded substrate. The carbon ion energy will be increased as the negative voltage bias to the substrate was increasing, where the carbon ion energy is 100 eV when the substrate was biased -80 V. The results show that the ion energy does not change with the arc pulse width and the ion energy is 20 eV at the grounded surface. The ion density changed with the arc pulse width, the ion density increased from $2.19 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$ for the first 450 microseconds up to $4.65 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$ for 450 to 1000 microseconds of the pulse width, and the ion density was decreased to zero for the end of the pulse width.

Keywords : pulsed filtered cathodic vacuum arc ; time-resolved technique ; retarding field analysis ; pulse width

บทนำ

เทคนิคฟิลเตอร์คาโทดิกอาร์กในระบบสุญญากาศ (filtered cathodic vacuum arc, FCVA) เป็นกระบวนการตกสะสมฟิล์มบางด้วยไอเชิงกายภาพ (PVD) ที่มีคุณสมบัติเฉพาะตัว เนื่องจากพลาสมาที่กำเนิดจากเทคนิค FCVA เกือบทั้งหมดจะแตกตัวเป็นไอออนที่มีพลังงานสูงและมีความหลากหลายทางสถานะประจุ (charge state) ซึ่งเป็นจุดเด่นสำคัญแตกต่างจากกระบวนการเคลือบฟิล์มด้วยไอเชิงกายภาพอื่น ๆ กระบวนการกำเนิดพลาสมาด้วยเทคนิค FCVA พลาสมาจะเกิดการแตกตัวเป็นไอออนที่ค่อนข้างสูง ทำให้สามารถควบคุมพลังงานไอออนได้โดยอาศัยสนามไฟฟ้า เช่น การไบอัสคัลย์ไฟฟ้าลบที่ชิ้นงาน หรือการไบอัสคัลย์ไฟฟ้าบวกที่ขั้วแอโนด ซึ่งทั้งสองวิธีการนี้จะทำให้สามารถปรับโครงสร้างและลักษณะทางสัณฐานของฟิล์มบางได้ (Tay *et al.*, 2006) จากการศึกษาของนักวิจัยที่ผ่านมา พบว่า พลังงานไอออนของพลาสมาจากเทคนิค FCVA ตรวจวัดได้มีค่าอยู่ในช่วง 20 - 150 อิเล็กตรอนโวลต์ ขึ้นอยู่กับมวลไอออนของวัสดุที่เป็นขั้วแคโทด (Yushkov *et al.*, 2000) และพลาสมาที่มีขั้วแคโทดเป็นคาร์บอนมีพลังงานไอออนประมาณ 20 อิเล็กตรอนโวลต์ (Kutzner & Craig Miller, 1992; Anders & Yushkov, 2002) เนื่องจากไอออนคาร์บอนถูกนำมาใช้เคลือบฟิล์มคาร์บอนคล้ายเพชร (diamond like carbon, DLC) อย่างแพร่หลายจึงเป็นที่สนใจต่อการศึกษา โดยเฉพาะอย่างยิ่งฟิล์มเตตระฮีดรอลอะมอร์ฟัสคาร์บอน (ta-C) ซึ่งเป็นฟิล์มที่มีคุณสมบัติความแข็งแรงสูง โดยระดับความแข็งแรงของฟิล์มจะขึ้นอยู่กับพลังงานไอออนคาร์บอนระหว่างกระบวนการตกสะสมฟิล์มบาง (Anders & Yushkov, 2004) และพบว่าในกระบวนการตกสะสมฟิล์ม ta-C นั้น ไอออนคาร์บอนที่มีพลังงานประมาณ 100 อิเล็กตรอนโวลต์ จะส่งผลให้ฟิล์ม ta-C มีค่าความหนาแน่นของฟิล์มและความแข็งแรงฟิล์มสูงสุด โดยมีสัดส่วนพันธะ sp^3 ประมาณ 70% - 80% (Ehrhardt, 1995) แสดงถึงการมีคุณสมบัติที่คล้ายเพชรของฟิล์มบาง อีกทั้งไอออนที่มีพลังงานสูงจะส่งผลให้ค่าสภาพการยึดติดระหว่างฟิล์มบางกับชิ้นงานเพิ่มขึ้น (Ehiasarian *et al.*, 2003) ดังนั้นพลังงานของอนุภาคที่ตกกระทบชิ้นงานในกระบวนการตกสะสมฟิล์มบาง มีอิทธิพลอย่างมากต่อการกำหนดโครงสร้าง สมบัติ และคุณภาพของฟิล์ม (Anders, 2010) การเฝ้าสังเกต ตรวจวัด และควบคุมพลังงานของไอออนที่ตกกระทบฟิล์มจึงเป็นความสำคัญอย่างยิ่งในกระบวนการเคลือบและถือเป็นอีกหนึ่งวิธีสำหรับการควบคุมสมบัติของฟิล์มบาง

เพื่อศึกษาอิทธิพลของพลังงานไอออนที่มีพลังงานสูงต่อกระบวนการตกสะสมฟิล์มบาง จึงได้มีการศึกษาและวัดพลังงานไอออนด้วยกระบวนการต่าง ๆ หลากหลายวิธี เช่น energy selective mass spectrometry เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ฟังก์ชันการกระจายพลังงานไอออน (ion energy distribution function, IEDF) โดยการดึงเอาไอออนบวกหรือไอออนลบเข้ามาภายในส่วนตรวจวัด และทำการวิเคราะห์ด้วยการใช้อัตราส่วนมวลต่อประจุ (Kaepelin *et al.*, 2002) เทคนิค time-of-flight spectrometers (TOF) เป็นเทคนิคที่สามารถแยกวิเคราะห์พลังงานอย่างละเอียดของไอออนแต่ละสถานะประจุ (Anders and Oks, 2007) จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบปัญหาในการวิเคราะห์ฟังก์ชันการกระจายพลังงานไอออนด้วยเทคนิคเหล่านี้ เช่น ความคลาดเคลื่อนของข้อมูลพลังงานที่เกิดจากการไอออนในเซชันของอนุภาคที่เป็นกลางทางไฟฟ้าภายในส่วนตรวจวัดของ energy selective mass spectrometry (Kaepelin *et al.*, 2002) หรือความจำเป็นในการใช้พื้นที่ขนาดใหญ่และความไม่ชัดเจนของข้อมูลพลังงานไอออนเฉลี่ยในวัสดุที่มีความหลากหลายสถานะประจุของเทคนิค TOF (Anders & Oks, 2007) รวมไปถึงค่าใช้จ่ายที่ค่อนข้างสูงของเทคนิคทั้งสอง วิธีที่สะดวกที่สุดและใช้อย่างแพร่หลาย คือ หัววัดพลังงานไอออนแบบสนามหน่วง (retarding field ion energy analysis, RFA) เนื่องจากมีขนาดเล็ก มีองค์ประกอบไม่ซับซ้อน สามารถสร้างขึ้นเอง

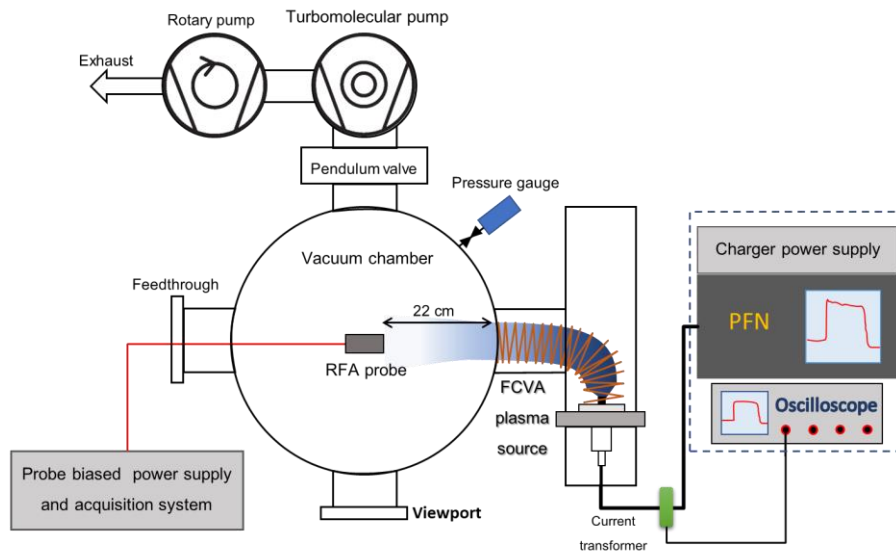


และติดตั้งเข้าไปภายในแหล่งกำเนิดพลาสมาได้ง่าย สามารถวิเคราะห์ฟังก์ชันการกระจายพลังงานไอออนตามช่วงเวลาของความกว้างพัลส์อาร์ก (time-resolved RFA) จากเทคนิค FCVA ได้ อีกทั้งเทคนิค RFA นี้ สามารถวัดพลังงานไอออนในกรณีที่มีการปรับเปลี่ยนพลังงานไอออนด้วยการไบอัสด้วยศักย์ไฟฟ้าลบที่ขึ้นงาน หรือไบอัสด้วยศักย์ไฟฟ้าบวกที่ชั่วแคโทด ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบจากเทคนิคการวัดพลังงานแบบอื่น

ดังนั้น งานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นศึกษากระบวนการวัดพลังงานไอออนคาร์บอนตามช่วงเวลาความกว้างพัลส์อาร์ก และพลังงานไอออนคาร์บอนกรณีที่ขึ้นงานถูกไบอัสด้วยศักย์ไฟฟ้าลบ โดยใช้หัววัดพลังงานไอออนแบบสนามหลวง

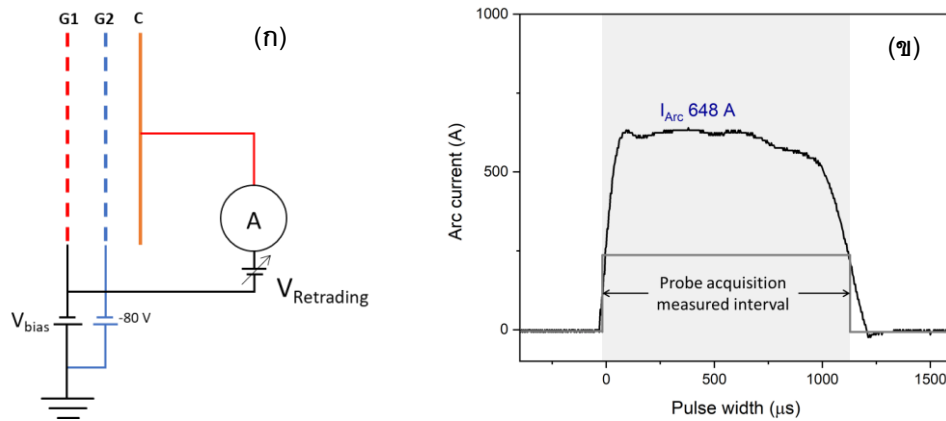
วิธีดำเนินการวิจัย

พลาสมาที่เกิดขึ้นจากเทคนิคพัลส์ฟิลเตอร์คาโทดิกอาร์กในระบบสุญญากาศ (pulse filtered cathodic vacuum arc, pulse FCVA) ถูกออกแบบและพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการวิจัยนี้ โดยใช้แนวคิดการสร้างพลาสมาแบบพัลส์ของ Anders และคณะ (Anders *et al.*, 1998) ระบบ FCVA แสดงดังภาพที่ 1 ประกอบด้วยภาชนะสุญญากาศขึ้นรูปจากท่อสแตนเลส 304 เส้นผ่านศูนย์กลาง 50 เซนติเมตร สูง 50 เซนติเมตร บีมกลโรตารีและเทอร์โบโมเลคูลาร์ปั๊มถูกใช้เพื่อสร้างสภาวะสุญญากาศที่มีความดันฐานเท่ากับ 1×10^{-6} ทอร์ หรือ 1.33×10^{-4} ปาสคัล ความดันบรรยากาศในระหว่างกระบวนการกำเนิดพลาสมาดำเนินอยู่มีค่าประมาณ 9×10^{-6} ทอร์ แท่งแคโทดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.35 มิลลิเมตร ใช้เป็นขั้วแคโทด วงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์กระแสสูง (pulse-forming network, PFN) ทำหน้าที่สร้างสัญญาณพัลส์ที่มีความกว้างพัลส์ 1200 ไมโครวินาที แหล่งไฟฟ้าจ่ายกระแสอาร์ก 648 แอมแปร์ เพื่อกำเนิดพลาสมาของคาร์บอน โดยกำหนดความถี่ของการอาร์ก 1 พัลส์ต่อ 1 วินาที หัววัดพลังงานไอออนแบบสนามหลวง ถูกนำมาใช้ในกระบวนการวัดพลังงานไอออน โดยติดตั้งภายในระบบสุญญากาศ ณ ตำแหน่งแผ่นฐานรองรับชิ้นงาน ห่างจากปลายของขดลวดกรองพลาสมา 22 เซนติเมตร แสดงดังภาพที่ 1



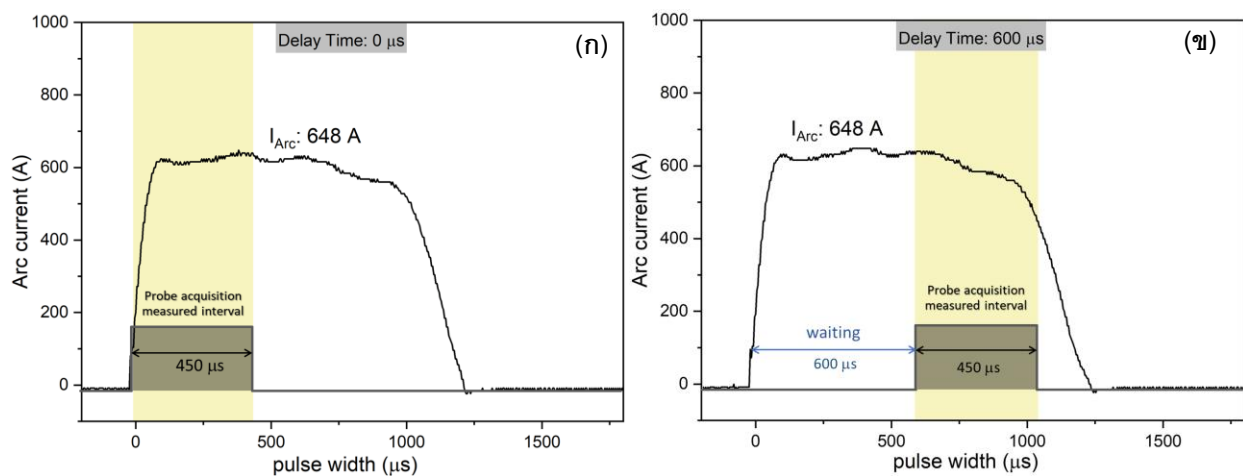
ภาพที่ 1 แผนภาพระบบ FCVA และตำแหน่งการติดตั้งหัววัดพลังงานไอออนแบบสนามหลวง

หัววัดพลังงานไอออนแบบสนามหลวงมีส่วนประกอบหลัก 3 ส่วน ดังภาพที่ 2(ก) คือ ขั้วกริดไฟฟ้าที่ 1(G1) ขั้วกริดไฟฟ้าที่ 2(G2) และขั้วรับไอออน (C) หน้าที่หลักของขั้วกริดไฟฟ้า คือ คัดแยกอิเล็กตรอนออกจากไอออน อิเล็กตรอนจะถูกผลักออกไปจากหัววัดพลังงานไอออนแบบสนามหลวงจากอิทธิพลของศักย์ไฟฟ้า -80 โวลต์ ไอออนประจุบวกสามารถเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปถึงขั้วรับไอออนและถูกตรวจวัดพลังงานจากการกระดาศักย์หนึ่งวง ไอออนที่มีพลังงานมากกว่าค่าศักย์หนึ่งวงเท่านั้นที่สามารถเคลื่อนที่เข้ามาถึงขั้วรับไอออนและตรวจวัดเป็นกระแสไอออน ในการศึกษากระบวนการวัดพลังงานไอออนเมื่อชิ้นงานได้รับการไบอัสศักย์ไฟฟ้า หัววัดพลังงานไอออนแบบสนามหลวงจะถูกไบอัสศักย์ไฟฟ้าลบให้กับขั้วกริดไฟฟ้าที่ 1(G1) ซึ่งเป็นชั้นที่อยู่ด้านหน้า ณ ตำแหน่งเดียวกันกับชิ้นงาน โดยไบอัสศักย์ไฟฟ้า 0, -10, -20, -30, -40, -50, -60, -70 และ -80 โวลต์ ในการทดลองนี้เป็นการวัดพลังงานโดยเฉลี่ยทั้งความกว้างพัลส์ สัญญาณของกระแสอาร์กและช่วงเวลาของการวัดพลังงาน แสดงดังภาพที่ 2(ข)



ภาพที่ 2 (ก) แผนภาพการไบอัสศักย์ไฟฟ้าให้กับขั้วกริดไฟฟ้าที่ 1 และ 2 และการจ่ายศักย์ไฟฟ้าหนึ่งและวัดกระแสไอออนจากขั้วรับไอออน (ข) แสดงสัญญาณกระแสอาร์คในการกำเนิดพลาสมาและสัญญาณช่วงเวลาในการวัดพลังงานไอออน

ในการวัดพลังงานไอออนตามช่วงเวลาภายในสัญญาณพัลส์อาร์ค (time-resolved measurement) แหล่งกำเนิดสัญญาณช่วงเวลา ถูกต่อเข้ากับเครื่องวัดสัญญาณกระแสไอออน เพื่อทำหน้าที่กำหนดตำแหน่งทางเวลาของการวัดพลังงานเทียบสัญญาณอาร์ค สำหรับระบบวัดกระแสที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีช่วงเวลาวัดแคบสุดเท่ากับ 450 ไมโครวินาที สัญญาณช่วงเวลา (t_p) ของการเริ่มต้นบันทึกข้อมูลถูกกำหนดจาก 0, 200, 400, 600, 800 และ 1000 ไมโครวินาที เทียบกับจุดเริ่มต้นของสัญญาณกระแสอาร์ค ตัวอย่างสัญญาณช่วงเวลาของการบันทึกข้อมูลตามความกว้างพัลส์อาร์ค แสดงดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 สัญญาณช่วงเวลาในการวัดพลังงานที่กำหนดด้วยเครื่องกำเนิดสัญญาณช่วงเวลา (ก) สัญญาณช่วงเวลา 0 ไมโครวินาที (ข) สัญญาณช่วงเวลา 600 ไมโครวินาที



จากภาพที่ 3(ก) แสดงช่วงเวลาวัดพลังงานเทียบสัญญาณกระแสอาร์ก เมื่อกำหนด t_0 เท่ากับ 0 ไมโครวินาที การวัดพลังงานไอออนจะเริ่มขึ้นพร้อมกับกระบวนการอาร์กและวัดพลังงานไปตามความกว้างพัลส์อาร์ก 450 ไมโครวินาที ภาพที่ 3(ข) แสดงสัญญาณช่วงการวัดพลังงานไอออนเมื่อกำหนด t_0 เท่ากับ 600 ไมโครวินาที การวัดพลังงานไอออนจะเกิดขึ้นหลังจากการเริ่มการอาร์กเป็นเวลา 600 ไมโครวินาที ข้อมูลของการวัดพลังงานไอออนจะอยู่ในช่วงเวลาประมาณ 600 – 1050 ไมโครวินาทีของความกว้างพัลส์อาร์ก

โดยที่ข้อมูลเบื้องต้นที่ได้จากห้วงวัดพลังงานไอออนแบบสนามหลวงจะอยู่ในรูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์หน่วย (V_d) ในแนวแกนนอน และค่ากระแสไอออนจากขั้วรับไอออน (I_c) ในแนวแกนตั้ง (P. Chabert, 2011) ซึ่งข้อมูลที่ได้จากห้วงวัดพลังงานไอออนแบบสนามหลวงนั้น จะมีความสัมพันธ์กับฟังก์ชันการแจกแจงความเร็วของไอออน ($f(v)$) ดังสมการที่ 1

$$f(v) = \frac{M_i}{\chi e^2 A} \frac{dI_c}{dV_d} \quad (1)$$

เมื่อ M_i คือ มวลของไอออนคาร์บอน (1.99×10^{-26} kg) χ คือ ผลรวมอัตราการใช้พลังงานของขั้วกริดไฟฟ้า (21%) e คือ ประจุไอออน (1.66×10^{-19} C) และ A คือ พื้นที่รับไอออน (3.14×10^{-6} m²)

ความเร็วของไอออน (v) มีความสัมพันธ์กับค่าศักย์หน่วย (V_d) ตามสมการที่ 2 และสามารถนำไปหาค่าความหนาแน่นของไอออนจากความสัมพันธ์ของฟังก์ชันการแจกแจงความเร็ว ($f(v)$) และความเร็วไอออน (v) ดังสมการที่ 3

$$v = \sqrt{\frac{2eV_d}{M_i}} \quad (2)$$

$$n_i = \int_0^\infty f(v) dv \quad (3)$$

เมื่อ n_i คือ ความหนาแน่นของไอออน จากข้อมูลความหนาแน่นของไอออนในสมการที่ 3 สามารถหาความเร็วเฉลี่ยของไอออน $\langle v \rangle$ จากสมการที่ 4

$$\langle v \rangle = \frac{1}{n_i} \int_0^\infty v f(v) dv \quad (4)$$

ฟลักซ์ของไอออน (Γ_i) ซึ่งสัมพันธ์กับความหนาแน่นของไอออนและความเร็วเฉลี่ยของไอออน หาได้จากสมการที่ 5

$$\Gamma_i = \langle v \rangle n_i \quad (5)$$

ฟังก์ชันการแจกแจงพลังงานจลน์ของไอออน $f(\epsilon)$ มีความสัมพันธ์กับฟังก์ชันการแจกแจงความเร็วไอออน $f(v)$ ดังสมการที่ 6 โดยค่าพลังงานจลน์ของไอออน (ϵ) มีความสัมพันธ์กับค่าศักย์หน่วง (V_d) ดังสมการที่ 7

$$f(\epsilon) = \frac{1}{\sqrt{2M_i \epsilon}} f(v) \quad (6)$$

$$\epsilon = eV_d \quad (7)$$

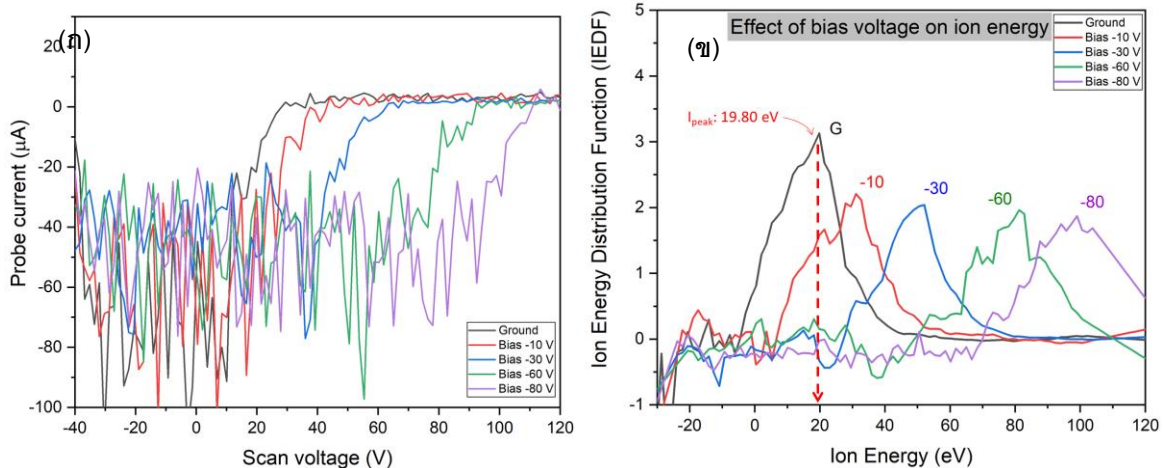
พลังงานจลน์เฉลี่ยของไอออน $\langle \epsilon \rangle$ สัมพันธ์กับฟังก์ชันการแจกแจงพลังงานจลน์ของไอออน $f(\epsilon)$ ดังสมการที่ 8

$$\langle \epsilon \rangle = \frac{1}{n_i} \int_0^\infty \epsilon f(\epsilon) d\epsilon \quad (8)$$

ผลการวิจัย

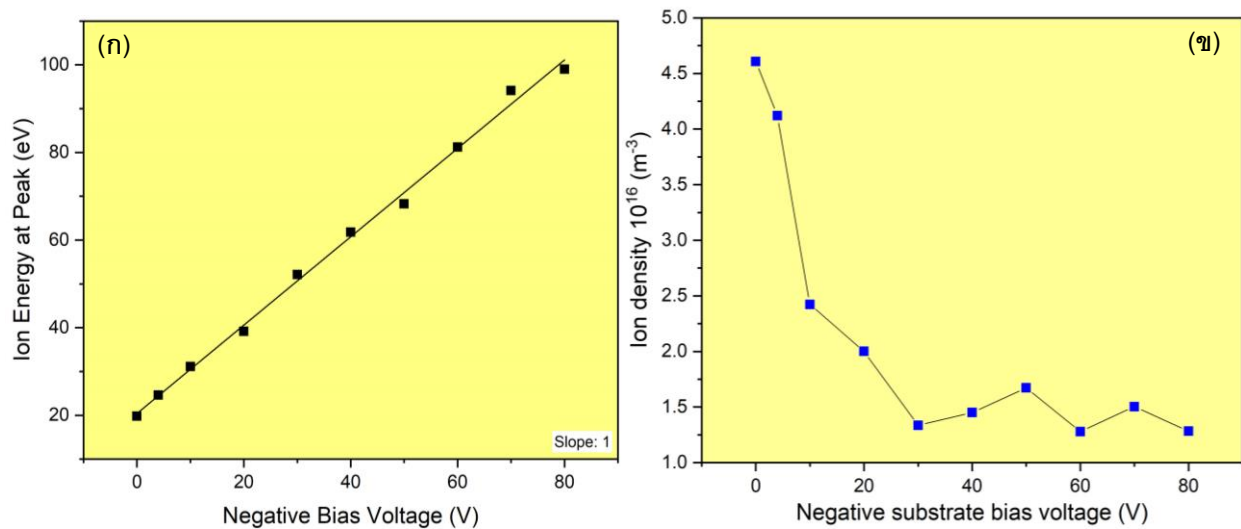
อิทธิพลของการไบอัสศักย์ไฟฟ้าให้กับชิ้นงาน

อิทธิพลของการไบอัสศักย์ไฟฟ้าให้กับชิ้นงานต่อพลังงานไอออนคาร์บอน แสดงด้วยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์หน่วงกับกระแสไอออนจากขั้วรับไอออน ดังภาพที่ 4(ก) พลังงานไอออนถูกแสดงในรูปแบบความสัมพันธ์กับฟังก์ชันการกระจายพลังงานไอออน ดังภาพที่ 4(ข)



ภาพที่ 4 (ก) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์หน่วงกับกระแสไอออนจากขั้วรับไอออน (ข) ฟังก์ชันการกระจายพลังงานไอออนเมื่อมีการไบอัสศักย์ไฟฟ้าให้กับขั้วกริดไฟฟ้าที่ 1

พิจารณารูปภาพความสัมพันธ์ของฟังก์ชันการกระจายพลังงานไอออนในภาพที่ 4(ข) เมื่อใช้กริดไฟฟ้าที่ 1 หัววัดพลังงานไอออนแบบสนามหลวงถูกไบอัสด้วยศักย์ไฟฟ้าจาก 0 ถึง -80 โวลต์ ผลจากการรวบรวมการวัดพลังงานไอออนด้วยหัววัดพลังงานไอออนแบบสนามหลวงเห็นได้อย่างชัดเจนว่าตำแหน่งพีคของการกระจายพลังงานมีการเลื่อนไปตำแหน่งที่มีค่าสูงขึ้นตามค่าศักย์ไฟฟ้าไบอัสที่เพิ่มขึ้น โดยที่การไบอัสศักย์ไฟฟ้า 0 โวลต์ หรือใช้กริดไฟฟ้าที่ 1 ถูกต่อลงกราวด์ สามารถวัดพลังงานไอออนที่เป็นไปได้มากที่สุด(จุดสูงสุดของพีค) เท่ากับ 19.80 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา (Anders and Yushkov, 2002) และค่าพลังงานไอออนที่จุดสูงสุดของพีคที่สามารถวัดได้เปลี่ยนแปลงอยู่ในย่าน 20 - 100 อิเล็กตรอนโวลต์ ตามการเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ไฟฟ้าไบอัสที่กริดไฟฟ้าที่ 1



ภาพที่ 5 (ก) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานไอออนที่ตำแหน่งสูงสุดของยอดพีคกับค่าศักย์ไฟฟ้าไบอัส

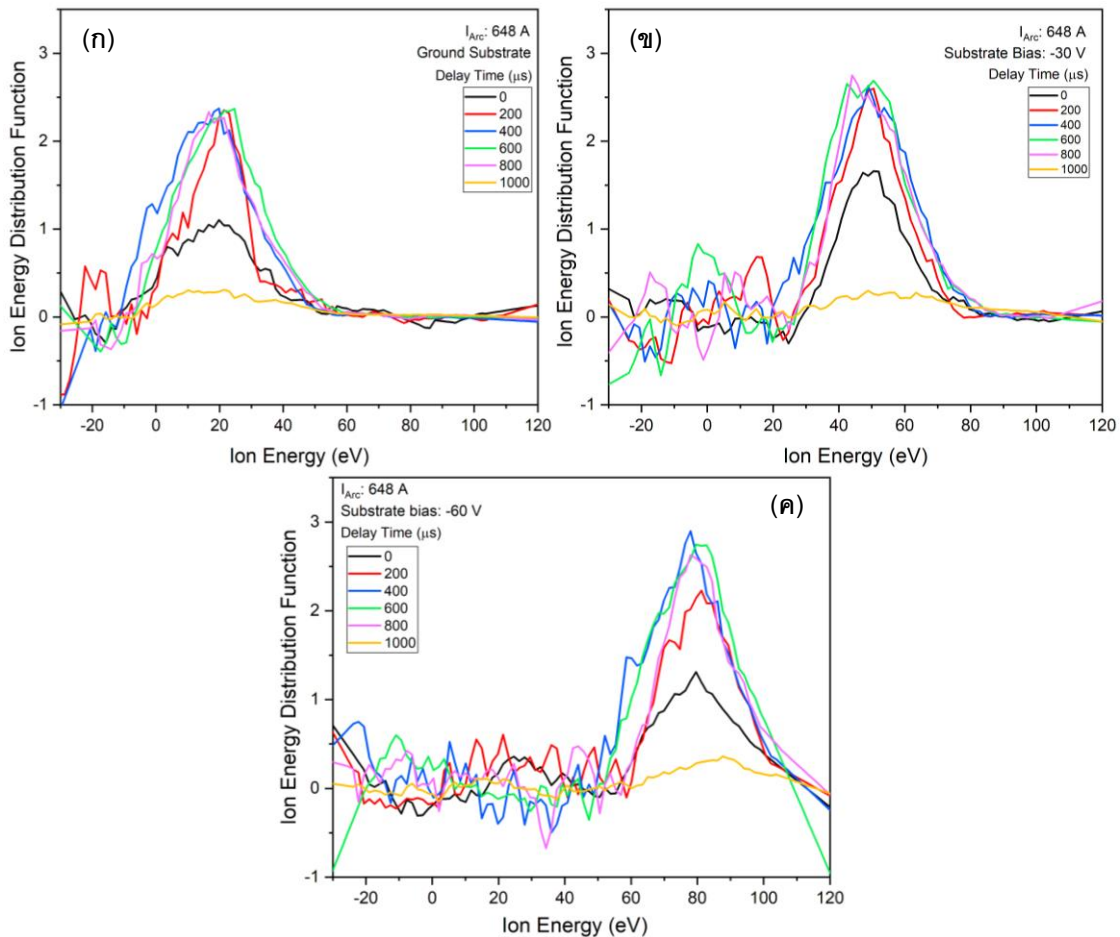
(ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นไอออนกับค่าศักย์ไฟฟ้าไบอัส

ภาพที่ 5 (ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานไอออนที่เป็นได้มากที่สุดกับศักย์ไฟฟ้าที่ไบอัสให้กับขั้วกริดไฟฟ้าที่ 1 ของหัววัดพลังงานไอออนแบบสนามหลวง จากกราฟความสัมพันธ์พบว่าพลังงานไอออนที่ตรวจวัดได้จะมีค่า 19.80 อิเล็กตรอนโวลต์ ในกรณีที่ศักย์ไฟฟ้าไบอัสเท่ากับ 0 โวลต์หรือขึ้นงานถูกต่อลงกราวด์ และพลังงานไอออนจะเพิ่มขึ้นตามศักย์ไฟฟ้าที่ไบอัสให้กับขั้วกริดไฟฟ้าที่ 1 เช่น ไบอัสศักย์ไฟฟ้า -20 โวลต์ พลังงานไอออนที่วัดได้มีค่าประมาณ 39 อิเล็กตรอนโวลต์ ไบอัสศักย์ไฟฟ้า -40 โวลต์ พลังงานไอออนที่วัดได้มีค่าประมาณ 61 อิเล็กตรอนโวลต์ หรือไบอัสศักย์ไฟฟ้า -80 โวลต์ พลังงานไอออนที่วัดได้มีค่าประมาณ 100 อิเล็กตรอนโวลต์ ดังนั้น จากแนวโน้มของพลังงานไอออนที่วัดได้จากการไบอัสศักย์ไฟฟ้าค่าต่าง ๆ จึงสามารถอธิบายได้ว่าพลังงานไอออนขณะตกกระทบชิ้นงาน คือผลรวมของพลังงานไอออนเริ่มต้นกับค่าศักย์ไฟฟ้าไบอัส (Van De Ven *et al.*, 2018) ภาพที่ 5(ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของไอออนที่ตรวจวัดได้จากการปรับค่าศักย์ไฟฟ้าไบอัสให้กับขั้วกริดไฟฟ้าที่ 1 พบว่า ค่าความหนาแน่นไอออนที่ตรวจวัดได้อยู่ในย่าน 10^{16}

ต่อลูกบาศก์เมตร โดยค่าความหนาแน่นที่สูงที่สุดที่ตรวจวัดได้มีค่า 4.61×10^{16} ต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งตรวจวัดได้ในกรณีที่ขั้วกริดไฟฟ้าที่ 1 ถูกต่อลงกราวด์ และความหนาแน่นไอออนจะมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อศักย์ไฟฟ้าไบอัสมีค่าเพิ่มขึ้น

ผลการวัดพลังงานไอออนตามช่วงเวลาของความกว้างพัลส์อาร์ก

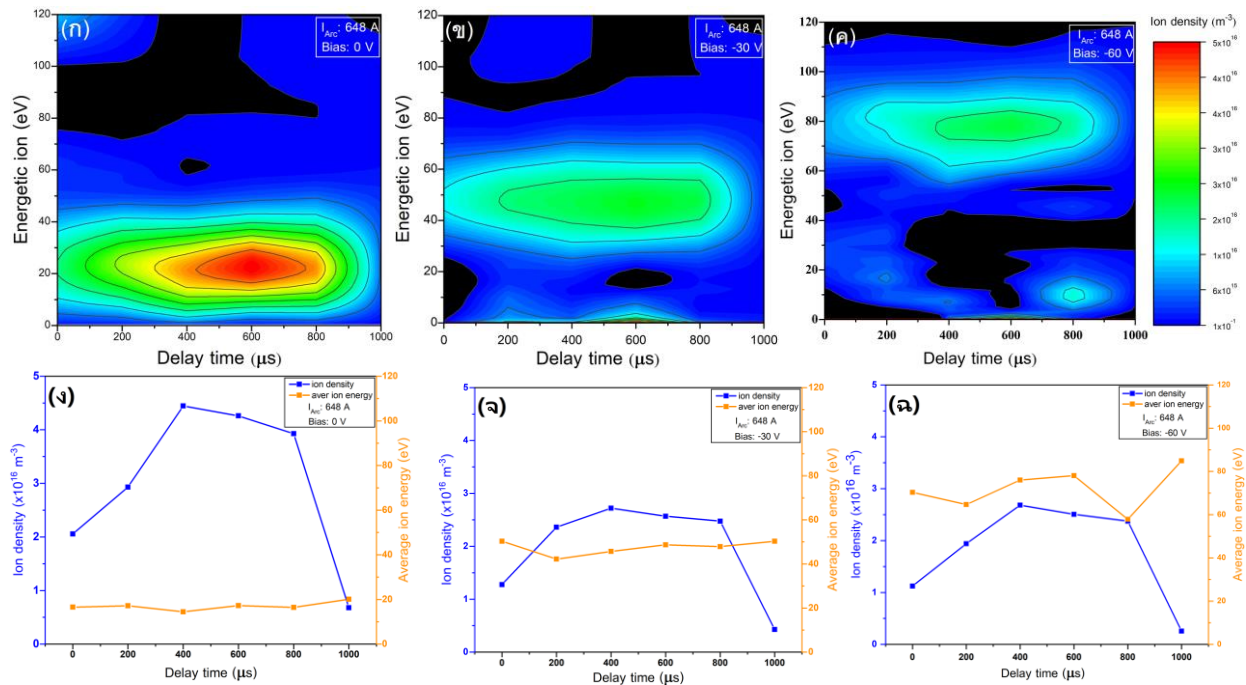
ผลของกระบวนการวัดพลังงานไอออนตามช่วงเวลาความกว้างพัลส์อาร์ก แสดงดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์หน่วงกับกระแสไอออนที่วัดได้จากหัววัดพลังงานไอออนแบบสนามหน่วงและกราฟการกระจายพลังงานไอออน เมื่อขั้วกริดไฟฟ้าที่ 1 (ก) ต่อลงกราวด์ (ข) ไบอัสศักย์ไฟฟ้า -30 โวลต์ (ค) ไบอัสศักย์ไฟฟ้า -60 โวลต์

จากภาพที่ 6(ก) กราฟฟังก์ชันการกระจายพลังงานไอออนที่ตรวจวัดได้เมื่อขั้วกริดไฟฟ้าที่ 1 ของหัววัดพลังงานไอออนแบบสนามหน่วงถูกต่อลงกราวด์ พลังงานไอออนที่ตำแหน่งสูงสุดของพีกซึ่งแสดงถึงพลังงานไอออนส่วนใหญ่ที่เป็นไปได้มากที่สุด เมื่อพิจารณาตามความกว้างพัลส์อาร์กโดยการกำหนด t_d เท่ากับ 0 ไมโครวินาที ซึ่งแสดงถึงการวัดพลังงานไอออน

ช่วงเวลา 0 - 450 ไมโครวินาที ของความกว้างพัลส์อาร์ก คาร์บอนไอออนมีพลังงานเท่ากับ 19.80 อิเล็กตรอนโวลต์ เมื่อปรับค่า t_d ให้เปลี่ยนแปลงไปตามที่กำหนด ค่าพลังงานคาร์บอนไอออนที่จุดสูงสุดของพีคมีค่าอยู่ในช่วง 16.57 – 24.64 อิเล็กตรอนโวลต์ ภาพที่ 6(ข) กราฟฟังก์ชันการกระจายพลังงานไอออนเมื่อชักริดไฟฟ้าที่ 1 ถูกไบอัสด้วยศักย์ไฟฟ้า -30 โวลต์ เมื่อกำหนด t_d เท่ากับ 0 ไมโครวินาที พลังงานคาร์บอนไอออนที่จุดสูงสุดของพีคคือ 50.50 อิเล็กตรอนโวลต์ และพลังงานคาร์บอนไอออนเมื่อกำหนดค่า t_d เปลี่ยนแปลงไป มีค่าอยู่ในช่วง 44.04 – 50.50 อิเล็กตรอนโวลต์ ภาพที่ 6(ค) กราฟการกระจายพลังงานไอออนเมื่อชักริดไฟฟ้าที่ 1 ถูกไบอัสด้วยศักย์ไฟฟ้า -60 โวลต์ เมื่อกำหนด t_d เท่ากับ 0 ไมโครวินาที พลังงานคาร์บอนไอออนที่จุดสูงสุดของพีคคือ 79.60 อิเล็กตรอนโวลต์ และพลังงานคาร์บอนไอออนเมื่อกำหนดค่า t_d เปลี่ยนแปลงไปมีค่าอยู่ในช่วง 77.98 – 81.21 อิเล็กตรอนโวลต์



ภาพที่ 7 (ก - ค) กราฟคอนทัวร์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานไอออนกับความหนาแน่นของไอออนที่เปลี่ยนแปลงตามช่วงเวลาภายในสัณฐานพัลส์อาร์ก (ง – ฉ) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของไอออนและพลังงานไอออนเฉลี่ยภายในสัณฐานพัลส์อาร์ก

จากภาพที่ 7 (ก - ค) ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานไอออน ความหนาแน่นไอออนที่แทนด้วยสีที่แตกต่างกันกับสัณฐานหน่วงเวลาตามความกว้างพัลส์อาร์ก เมื่อชักริดไฟฟ้าที่ 1 ถูกต่อลงกราวด์ และเมื่อชักริดไฟฟ้าที่ 1 ถูกไบอัสด้วยศักย์ไฟฟ้า -30 โวลต์ และ -60 โวลต์ ตามลำดับ พบว่า พลังงานไอออนและความหนาแน่นไอออนสอดคล้องกับกราฟการกระจายพลังงานไอออนในภาพที่ 6 บริเวณที่ไอออนมีความหนาแน่นแตกต่างกันจะถูกแทนด้วยระดับของแถบสี ความ

หนาแน่นไอออนแสดงด้วยกราฟความสัมพันธ์ดังภาพที่ 7 (ง - ฉ) ความหนาแน่นไอออนแสดงด้วยกราฟเส้นสีน้ำเงิน ซึ่งพิจารณาจากฟังก์ชันการกระจายพลังงานไอออน พบว่า ความหนาแน่นไอออนทั้ง 3 เจือปน คือ ซัลเฟอร์ไอออนที่ 1 ถูกต่อลง กราวด์ ซัลเฟอร์ไอออนที่ 1 ถูกไบอัสด้วยศักย์ไฟฟ้า -30 โวลต์ และ -60 โวลต์ มีค่าอยู่ในช่วง 10^{16} ต่อลูกบาศก์เมตร โดยค่าความหนาแน่นที่สูงที่สุดอยู่ที่การกำหนดสัญญาณช่วงเวลาเท่ากับ 400 ไมโครวินาที มีค่า 4.16×10^{16} , 2.55×10^{16} และ 2.05×10^{16} ต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ เมื่อพิจารณาความหนาแน่นไอออนตามสัญญาณช่วงเวลาดังภาพที่ 7 (ง - ฉ) ค่าความหนาแน่นไอออนมีแนวโน้มเช่นเดียวกันทั้ง 3 เจือปน การทดลอง กล่าวคือ เมื่อกำหนด t_0 เท่ากับ 0 ไมโครวินาที ค่าความหนาแน่นไอออนจะมีค่าต่ำกว่าค่าความหนาแน่นไอออนสูงสุด ซึ่งแสดงถึงพลาสมากำลังกำเนิดขึ้นในช่วงแรกของความกว้างพัลส์อาร์ก จากนั้นค่าความหนาแน่นจะเพิ่มขึ้นและมีค่ามากที่สุดเมื่อ t_0 เท่ากับ 400 ไมโครวินาที แสดงถึงพลาสมาที่มีความเข้มสูงสุดในช่วงเวลานี้ จากนั้นค่าความหนาแน่นไอออนจะลดลงเข้าสู่ศูนย์ในช่วงท้ายของความกว้างพัลส์อาร์ก จากกราฟความสัมพันธ์ความหนาแน่นไอออนสอดคล้องกับสัญญาณกระแสอาร์กดังภาพที่ 2 (ข) ความสัมพันธ์ของค่าพลังงานไอออนเฉลี่ยกับสัญญาณช่วงเวลาตามความกว้างพัลส์อาร์กแสดงด้วยกราฟเส้นสีส้มดังภาพที่ 7 (ง - ฉ) พบว่า ที่ศักย์ไฟฟ้าไบอัส 0 โวลต์ คาร์บอนไอออนมีพลังงานไอออนเฉลี่ย 19 อิเล็กตรอนโวลต์ ที่ศักย์ไฟฟ้าไบอัส -30 โวลต์ ค่าพลังงานไอออนเฉลี่ย 51 อิเล็กตรอนโวลต์ และที่ศักย์ไฟฟ้าไบอัส -60 โวลต์ ค่าพลังงานไอออนเฉลี่ย 82 อิเล็กตรอนโวลต์ พลังงานไอออนเฉลี่ยของการวัดพลังงานตามความกว้างพัลส์อาร์กมีช่วงการเปลี่ยนแปลงแคบ บ่งชี้ว่าพลังงานไอออนไม่ได้เปลี่ยนแปลงตามช่วงเวลาของความกว้างพัลส์อาร์ก

วิจารณ์ผลการวิจัย

พารามิเตอร์ที่สำคัญในกระบวนการตกสะสมฟิล์มบางด้วยพลาสมา ได้แก่ ศักย์พลาสมา (V_p) ความหนาแน่นไอออน (n_i) และอุณหภูมิอิเล็กตรอน (T_e) พารามิเตอร์เหล่านี้มีความสัมพันธ์โดยตรงกับฟังก์ชันการกระจายพลังงานไอออน (IEDF) (Anders, 2010) งานวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า ความหนาแน่นของเนื้อฟิล์มที่มากขึ้นเกิดจากพลังงานของไอออนระหว่างกระบวนการตกสะสมลงบนพื้นผิวฟิล์มมีความเหมาะสม (Tay, Zhao and Chua, 2006) อีกทั้งพลังงานไอออนที่สูงเกินไปส่งผลให้พื้นผิวของชิ้นงานมีสมบัติเปลี่ยนไปด้วย (Goohpattader *et al.*, 2015) กระบวนการวัดพลังงานไอออนจึงถือเป็นอีกกระบวนการหนึ่งที่สำคัญในการควบคุมและวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มที่เกิดขึ้น

ในกรณีการวัดพลังงานไอออนเมื่อชิ้นงานถูกไบอัสด้วยศักย์ไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ฟังก์ชันการกระจายพลังงานไอออนแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนถึงค่าพลังงานไอออนที่เพิ่มขึ้นตามค่าศักย์ไฟฟ้าที่ไบอัสให้กับชิ้นงานตามกราฟการกระจายพลังงานในภาพที่ 4 สอดคล้องกับการศึกษาของ บาโลนิค และคณะ (Baloniak & Keudell, 2010) ซึ่งให้เห็นว่าฟังก์ชันการกระจายพลังงานไอออนขณะตกกระทบชิ้นงานสามารถควบคุมได้โดยการให้ศักย์ไฟฟ้าไบอัสกับชิ้นงาน และพลังงานไอออนที่ตกกระทบผิวชิ้นงานจะขึ้นอยู่กับค่าของศักย์ไฟฟ้าที่ให้กับชิ้นงาน ซึ่งอิทธิพลของศักย์ไฟฟ้าไบอัสที่ส่งผลให้พลังงานไอออนมีค่าเพิ่มขึ้นนั้น สามารถอธิบายได้ว่า พลังงานไอออนที่เคลื่อนที่มาตกกระทบที่ผิวชิ้นงานขึ้นตรงกับสนามไฟฟ้าที่ก่อตัวบริเวณเหนือผิวชิ้นงานจากอิทธิพลของศักย์ไฟฟ้าไบอัส (Chen, 2003) ดังนั้น ค่าพลังงานไอออนคาร์บอนในพลาสมาที่เกิดจากเทคนิค



FCVA เป็นผลรวมระหว่างพลังงานไอออนคาร์บอนเริ่มต้นกับค่าศักย์ไฟฟ้าที่ไบอัสให้กับชิ้นงาน (Van De Ven *et al.*, 2018) ตามสมการ

$$\varepsilon_i \approx q_i (\varepsilon_{initial} + \Delta V) \quad (9)$$

เมื่อ ΔV คือ ผลต่างระหว่างศักย์พลาสมา (v_p) ซึ่งมีค่าคงที่ประมาณ 0 โวลต์ กับศักย์ไฟฟ้าไบอัส จากสมการความสัมพันธ์ชี้ให้เห็นว่า เมื่อขั้วกริดไฟฟ้าที่ 1 ของหัววัดพลังงานไอออนแบบสนามหลวงซึ่งเปรียบเสมือนชิ้นงาน ถูกไบอัสด้วยศักย์ไฟฟ้าค่าต่าง ๆ พลังงานไอออนที่ตรวจวัดได้จึงมีค่าเพิ่มขึ้น เช่น เมื่อให้ศักย์ไฟฟ้าไบอัส -30 โวลต์ พลังงานไอออนคาร์บอนจะมีค่าเท่ากับค่าของพลังงานไอออนคาร์บอนเริ่มต้นประมาณ 20 อิเล็กตรอนโวลต์ รวมกับผลต่างของค่าศักย์พลาสมาและศักย์ไฟฟ้าไบอัสเท่ากับ 30 โวลต์ พลังงานไอออนที่ตรวจวัดได้จึงมีค่าประมาณ 50 อิเล็กตรอนโวลต์

ในกรณีความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นไอออนกับพลังงานไอออนเฉลี่ยในภาพที่ 7 จะเห็นว่า เมื่อพลังงานไอออนเฉลี่ยเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นของไอออนจะมีค่าลดลง อธิบายได้จากความสัมพันธ์ของฟลักซ์ไอออนที่ตกกระทบหัววัดพลังงานไอออนแบบสนามหลวงตามสมการที่ 5 เมื่อความเร็วไอออนเฉลี่ยแปรผันตรงกับพลังงานไอออน แสดงว่า ฟลักซ์ไอออนแปรผันตรงกับความหนาแน่นไอออนและพลังงานไอออน เมื่อกระบวนการอาร์กเกิดขึ้นจากการให้กระแสอาร์กที่คงที่ส่งผลให้ฟลักซ์ไอออนที่ตกกระทบหัววัดพลังงานไอออนแบบสนามหลวงมีค่าคงที่ ดังสมการ

$$\Gamma_i \propto n_i \sqrt{\varepsilon_i} = \text{constant} \quad (10)$$

พิจารณาฟลักซ์ไอออนกรณีหัววัดพลังงานไอออนแบบสนามหลวงถูกต่อลงกราวด์ ($\Gamma_{i,0}$) และกรณีให้ศักย์ไฟฟ้าไบอัส ($\Gamma_{i,bias}$) เมื่อฟลักซ์ไอออนไม่ขึ้นกับศักย์ไฟฟ้าไบอัส จะได้ว่า

$$(n_i \sqrt{\varepsilon})_0 = (n_i \sqrt{\varepsilon})_{bias} \quad (11)$$

$$\frac{n_{i,0}}{n_{i,bias}} = \frac{\sqrt{\Gamma_{i,bias}}}{\sqrt{\Gamma_{i,0}}} \quad (12)$$

เมื่อให้ศักย์ไฟฟ้าไบอัสกับหัววัดพลังงานไอออนแบบสนามหลวงส่งผลให้พลังงานไอออนมีค่าสูงขึ้น $\varepsilon_{i,bias} > \varepsilon_{i,0}$ และ $\sqrt{\varepsilon_{i,bias}} > \sqrt{\varepsilon_{i,0}}$ จะได้ว่า

$$\frac{\sqrt{\varepsilon_{i,bias}}}{\sqrt{\varepsilon_{i,0}}} > 1 \quad (13)$$



และ
$$\frac{n_{i,0}}{n_{i,bias}} > 1 \tag{14}$$

$$n_{i,0} > n_{i,bias} \tag{15}$$

ดังนั้น เมื่อมีการให้ศักย์ไฟฟ้าไบอัสกับหัววัดพลังงานไอออนแบบสนามหลวงจึงส่งผลให้พลังงานไอออนเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความหนาแน่นไอออนมีค่าลดลง

สรุปผลการวิจัย

อิทธิพลของการไบอัสศักย์ไฟฟ้าให้กับชิ้นงานได้ถูกศึกษาจากกระบวนการวัดพลังงานไอออนด้วยการไบอัสศักย์ไฟฟ้าลบให้กับหัววัดไฟฟ้าที่ 1 ของหัววัดพลังงานไอออนแบบสนามหลวง พบว่า ไอออนคาร์บอนของพลาสมาที่กำเนิดจากเทคนิค pulse-FCVA มีพลังงาน 19.80 อิเล็กตรอนโวลต์ และค่าพลังงานไอออนจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าศักย์ไฟฟ้าที่ไบอัสให้กับชิ้นงาน เพื่อศึกษาค่าพลังงานไอออนตามช่วงเวลาของความกว้างพัลส์อาร์ค พลังงานไอออนถูกวัดด้วยเทคนิค time-resolved RFA ซึ่งทำการกำหนดค่าสัญญาณช่วงเวลาในการวัดพลังงานตามความกว้างพัลส์อาร์ค พบว่า ค่าพลังงานคาร์บอนไอออนไม่เปลี่ยนแปลงตามช่วงเวลาความกว้างพัลส์อาร์ค แต่ความหนาแน่นของไอออนจะเปลี่ยนแปลงไป โดยมีค่าสูงสุดในส่วนกลางของพัลส์อาร์คและค่อย ๆ ลดลงตามสัญญาณกระแสอาร์ค

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณศูนย์ความเป็นเลิศทางฟิสิกส์ที่ได้สนับสนุนค่าใช้จ่ายในการดำเนินการวิจัยภายใต้สัญญาเลขที่ “ThEP-61-EQP-MSU2”

เอกสารอ้างอิง

Anders, A., Brown, G. I., MacGill, A. R., & Dickinson R. M. (1998). “Triggerless” triggering of vacuum arcs. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 31(5), pp. 584–587.

Anders, A. (2010). A structure zone diagram including plasma-based deposition and ion etching. *Thin Solid Films*, 518(15), pp. 4087–4090.

Anders, A., & Oks, E. (2007). Charge-state-resolved ion energy distribution functions of cathodic vacuum arcs: A study involving the plasma potential and biased plasmas. *Journal of Applied Physics*, 101(4), pp. 043304(1-6)



- Anders, A., & Yushkov, G. Y. (2002). Ion flux from vacuum arc cathode spots in the absence and presence of a magnetic field. *Journal of Applied Physics*, 91(8), pp. 4824–4832.
- Anders, A., & Yushkov, G. Y. (2004). The kinetic energy of carbon ions in vacuum arc plasmas: A comparison of measuring techniques. *Journal of Applied Physics*, 96(2), pp. 970–974.
- Baloniak, T., Reuter, R., & Keudell, A. V. (2010). Fundamental aspects of substrate biasing: ion velocity distributions and nonlinear. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 43, 335201(1-13).
- Chabert, P., & Braithwaite N. St. J. (2011). A retarding field analyser (RFA). *Physics of Radio-Frequency Plasmas*, Cambridge: Cambridge University Press, p.348.
- Chen, F. F. (2003). Lecture Notes on Langmuir Probe Diagnostics. *Mini-Course on Plasma Diagnostics, IEEE-ICOPS Meeting*, (23-35). Electrical Engineering Department, University of California, Los Angeles
- Ehiasarian, A. P., Munz, W.-D., Hultman, L., Helmersson, U., & Petrov, I. (2003). High power pulsed magnetron sputtered CrNx films. *Surface and Coatings Technology*, 94(6), pp. 267-272.
- Ehrhardt, H. (1995). New developments in the field of superhard coatings. *Surface and Coatings Technology*, 74–75(PART 1), pp. 29–35.



Goohpattader, P. S., Dwivedi, N., Rismani-Yazdi, E., Satyanarayana, N., Yeo, R. J., Kundu, S., & Bhatia, C.S.

(2015). Probing the role of C^+ ion energy, thickness and graded structure on the functional and microstructural characteristics of ultrathin carbon films (<2 nm). *Tribology International*, 81, pp. 73–88.

Kaepfelin, V., Carrère, M., & Layet, J-M. (2002). Ion energy distribution functions and Langmuir probe

measurements in low pressure argon discharges. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 20(2), pp. 526–529.

Kutzner, J., & Miller, H. C. (1992). Integrated ion flux emitted from the cathode spot region of a diffuse vacuum

arc. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 25(4), pp. 687–693.

Tay, B. K., Zhao, Z. W., & Chua, D. H. C. (2006). Review of metal oxide films deposited by filtered cathodic

vacuum arc technique. *Materials Science and Engineering R: Reports*, 52(1–3), pp. 1–48.

Van De Ven, T. H. M., Meijere, C. A. de, Horst, R. M. van der, Kampen, M. van, Banine, V. Y., & Beckers, J. (2018).

Analysis of retarding field energy analyzer transmission by simulation of ion trajectories. *Review of Scientific Instruments*, 89(4). pp. 043501-(1-11)

Yushkov, G. Y., Anders, A., Oks, E. M., & Brown, I. G. (2000). Ion velocities in vacuum arc plasmas. *Journal of*

Applied Physics, 88(10), pp. 5618–5622.