วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา ปีที่ 27 (ฉบับที่ 1) มกราคม – เมษายน พ.ศ. 2565
BURAPHA SCIENCE JOURNAL Volume 27 (No.1) January – April 2022 บทความวิจัย

อิทธิพลของศักย์แอโนดต่อสมบัติเชิงโครงสร้างระดับจุลภาคของฟิล์มบางไทเทเนียมไดโบไรด์ที่เตรียมด้วยเทคนิคดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

Influence of Anode Bias Voltage on Microstructure Properties of TiB_2 Thin Film Prepared by DC Magnetron Sputtering

อรรถพล ชื่นประโคน[1] และ พิษณุ พูลเจริญศิลป์[2*]

Autthapol Chuenprakhon[1] and Phitsanu Poolcharuansin[2*]

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Department of Physics, Faculty of science, Mahasarakham University

Received : 28 January 2021

Revised : 10 May 2021

Accepted : 2 July 2021

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมไดโบไรด์ (TiB_2) ด้วยเทคนิคดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง จากเป้าไทเทเนียมไดโบไรด์ และเคลือบบนแผ่นซิลิกอน (100) เพื่อศึกษาอิทธิพลของการไบแอสศักย์บวกที่ขั้วแอโนดในช่วง 0 ถึง +125 โวลต์ ที่มีต่อสมบัติของพลาสมา และสมบัติเชิงโครงสร้างของฟิล์มบาง ผลการวัดอัตราการตกสะสมของเป้าไทเทเนียมไดโบไรด์ ด้วยเทคนิคควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์ พบว่าอัตราการตกสะสมของฟิล์มไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อศักย์แอโนดเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าศักย์พลาสมาที่วัดด้วยหัววัดแลงเมียร์ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามศักย์แอโนด ในขณะที่อุณหภูมิของอิเล็กตรอน และความหนาแน่นของอิเล็กตรอนไม่มีการเปลี่ยนแปลง สมบัติเชิงโครงสร้างระดับจุลภาคของฟิล์มบางไทเทเนียมไดโบไรด์ ศึกษาด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ พบโครงสร้างของผลึกแบบหกเหลี่ยมที่ระนาบ (001) ของไทเทเนียมไดโบไรด์ และเทคนิคการสะท้อนของรังสีเอกซ์ ทำให้ทราบค่าความหนา ความขรุขระ และความหนาแน่นของฟิล์มบางไทเทเนียมไดโบไรด์ เมื่อศักย์แอโนดเพิ่มขึ้นผลของค่าความหนา และความขรุขระของฟิล์มมีแนวโน้วที่ลดลง ในขณะที่ความหนาแน่นของฟิล์มบางไทเทเนียมไดโบไรด์ มีค่าเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 4.36 ถึง 4.48 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร การเคลือบฟิล์มด้วยเทคนิคการไบแอสที่ขั้วแอโนด ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของศักย์พลาสมา และส่งผลโดยตรงต่อพลังงานไอออนที่ระดมชนกับพื้นผิวฟิล์ม และเป็นผลทำให้สมบัติเชิงโครงสร้างระดับจุลภาคของฟิล์มเกิดการเปลี่ยนแปลง

คำสำคัญ : ดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง ; แอโนดไบแอส ; สมบัติเชิงโครงสร้างระดับจุลภาค ; สมบัติพลาสมา

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

Abstract

In this research, titanium diboride (TiB_2) thin film was prepared using DC magnetron sputtering technique. From titanium diboride target and deposited on Si wafer (100). To study the influence of positive anode bias voltage (V_a) in the range of 0 to +125 V that affects the plasma properties and structural properties of thin films. The measurement results of TiB_2 target deposition rate using quartz crystal micro-balance technique. It was found that the film deposition rate hasn't changed as the anode bias voltage increased. Furthermore, the plasma potential was measured by the Langmuir probe, the result shows that the plasma potential was increased as the anode bias voltage increased, while the electron temperature (T_e) and electron density (n_e) haven't changed. The microstructure of TiB_2 has been investigated using X-ray diffraction (XRD). It was found that hexagonal TiB_2 structure with (001) preferred orientation and X-ray reflection (XRR) This makes known the thickness, roughness, and density of the TiB_2 thin film. when the anode potential increases Effect of thickness value and the roughness of the film has a lower trend, while the density of TiB_2 thin film increased in the range of 4.36 to 4.48 g/cm^3. The deposited thin film by anode bias voltage technique Causing a change in the plasma potential and this directly affects the ion energy that collides with the film surface. And as a result, the microstructural properties of the film change.

Keywords : DC magnetron sputtering ; anode biasing ; microstructure properties ; plasma properties

บทนำ

ไทเทเนียมไดโบไรด์ (TiB_2) เป็นสารประกอบเซรามิกที่ประกอบด้วยธาตุไทเทเนียม (Ti) และโบรอน (B) ที่มีจุดมีหลอมเหลวสูงถึง 3,226 องศาเซลเซียส ความแข็งของวัสดุประมาณ 30 จิกะปาสคาล และการมีเสถียรภาพทางเคมีที่อุณหภูมิสูง (Mikula *et al*., 2007) ทนทานต่อการสึกหรอและกัดกร่อนได้ดี การนำไฟฟ้าและความร้อนที่สูง (Ronald, 2000) ไทเทเนียมไดโบไรด์มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบหกเหลี่ยม (Hexagonal) ซึ่งอะตอมของโบรอนสร้างพันธะโคเวเลนต์ภายในโครงสร้างของอะตอมไทเทเนียม (Mattias *et al*., 2000) ถึงแม้ว่าไทเทเนียมไดโบไรด์จะมีสมบัติที่โดดเด่นหลายประการ แต่การนำมาประยุกต์ใช้งานในรูปของฟิล์มบางยังถูกจำกัดเฉพาะบางสายงานเท่านั้น เช่น เกาะป้องกันแรงกระแทก อุปกรณ์ตัดเจาะ และสารเคลือบเพื่อป้องกันการสึกหรอ (Xia *et al*., 2013) และยังมีข้อเสียเปรียบของฟิล์มไทเทเนียมไดโบไรด์ เช่น ความเปราะ การยึดติดกับชิ้นงานที่ต่ำเนื่องจากความเค้นตกค้างสูง ปัญหานี้อาจส่งผลต่อการหลุดลอกของฟิล์ม ส่งผลโดยตรงต่ออายุการใช้งานของฟิล์มบาง จากงานวิจัยของ Berger ศึกษาการเคลือบฟิล์มไทเทเนียมไดโบไรด์ จากการปรับค่าศักย์ไบแอสที่ฐานรองชิ้นงานจากช่วง -200 ถึง +50 โวลต์ พบว่าการยึดติดของฟิล์มกับชิ้นงานเพิ่มขึ้น 60% เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มที่ไม่ได้ทำการไบแอส และยังพบว่าการเคลือบฟิล์มด้วยเทคนิคการไบแอสที่ฐานวางชิ้นงาน จะสามารถเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง และสมบัติภายในฟิล์มได้ (Berger *et al*., 2001)

การเตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมไดโบไรด์สามารถทำได้หลากหลายวิธี เช่น กระบวนการเคลือบด้วยไอเชิงเคมี (chemical vapor deposition, CVD) (Nelson & Borders, 1980) การอาร์คด้วยเป้าวัสดุที่เป็นสารประกอบ (cathodic arc deposition) (Zhirkov *et al*., 2015) กระบวนการเคลือบด้วยเทคนิครีแอคทีฟสปัตเตอริงจากการผสมระหว่างแก๊สอาร์กอน (Ar) และแก๊สไดบอร์เรน (B_2H_6) (Larsson *et al*., 1989) กระบวนการเคลือบด้วยเทคนิคพัลส์แมกนีตรอนสปัตเตอริง (pulsed magnetron sputtering, PDC) (Arslan *et al*., 2010) กระบวนการเคลือบด้วยเทคนิคไฮพาวเวอร์อิมพัลส์แมกนีตรอนสปัตเตอริง (high power impulse magnetron sputtering, HiPIMS) (Alexander & Klug, 1950) และ กระบวนการเคลือบด้วยเทคนิคดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง (direct current magnetron sputtering, DCMS) (Petrov *et al*., 2017) เป็นต้น

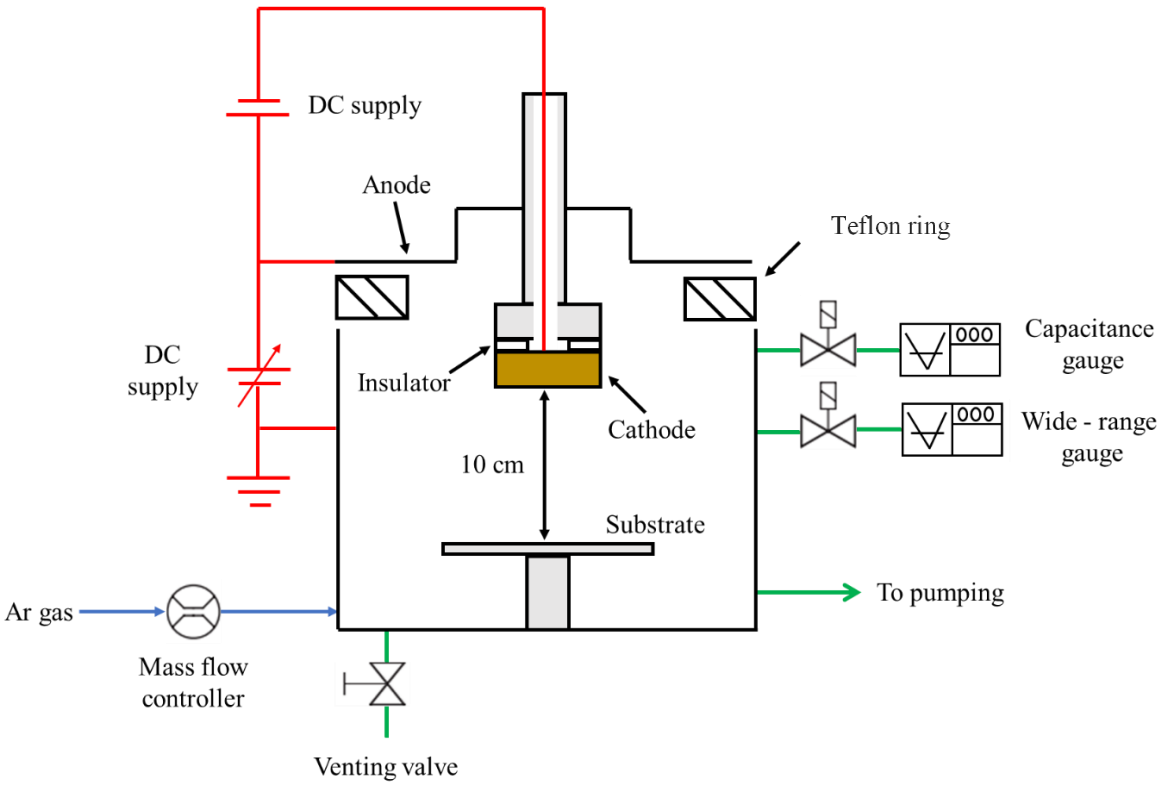
ในงานวิจัยของ Hellgren พบว่าการปรับค่าพารามิเตอร์ ศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้กับฐานวางชิ้นงาน และอุณหภูมิของฐานวางชิ้นงาน สามารถควบคุมสัดส่วนอะตอมของ B/Ti ที่อยู่ในฟิล์มได้ (Hellgren *et al*., 2019) ชั้นไนไตรด์สามารถปรับปรุงสมบัติการยึดเกาะระหว่างฟิล์มไทเทเนียมไดโบไรด์กับชิ้นงานที่เป็น H13 steel (Park *et al*., 2005) การยึดติดของฟิล์มไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) ที่ได้รับการปรับปรุงเป็น Ti/TiN ซึ่งชั้นฟิล์ม Ti (โลหะไทเทเนียม) ถูกพิจารณาว่าเป็นชั้นที่ทำหน้าที่ในการเชื่อมต่อและพยายามที่จะทำการยึดติดระหว่างชิ้นงานกับฟิล์ม (Zhao *et al*., 2011) ในงานวิจัยของ Anders พลังงานไอออน และอุณหภูมิของชิ้นงานเป็นปัจจัยสำคัญต่อโครงสร้างและสมบัติของฟิล์มบาง (Anders, 2010) และในงานวิจัยของ Choi ได้เตรียมฟิล์มทองแดงด้วยเทคนิคการไบแอสศักย์ลบที่ฐานวางชิ้นงาน เพื่อศึกษาสมบัติเชิงโครงสร้าง และสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ได้ทำการไบแอส พบว่าศักย์ไบแอสยิ่งมีค่าลบมาก ความเค้นเฉื่อนภายในฟิล์มยิ่งลดลง และความหนาแน่นของฟิล์มมีค่ามากที่สุดที่ศักย์ไบแอส -100 โวลต์ (Choi *et al*., 2000) โดยปกติการเคลือบฟิล์มด้วยเทคนิคการสปัตเตอริง ที่ใช้การไบแอสฐานวางชิ้นงานเพื่อเพิ่มพลังงานไอออนในการตกสะสม ซึ่งต้องอาศัยการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นมอเตอร์สำหรับหมุนชิ้นงานขณะเคลือบฟิล์ม เพื่อให้ฟิล์มที่ได้มีความสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นงาน แต่ด้วยปัญหาที่พบจากเทคนิคนี้ ขณะที่ฐานวางชิ้นงานมีการหมุน และไบแอสไปพร้อมกันซึ่งอาจเกิดความร้อนสะสมระหว่างฐานวางชิ้นงานกับอุปกรณ์มอเตอร์ และยังอาจเกิดความร้อนระหว่างการเคลือบฟิล์มได้

ในงานวิจัยนี้ ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของการไบแอสศักย์บวกที่ขั้วแอโนด ที่มีผลต่อสมบัติของพลาสมา เช่น ศักย์พลาสมา และความหนาแน่นของไอออน ด้วยหัววัดแลงเมียร์ ในส่วนการวัดอัตราการตกสะสมมีวัตถุประสงค์เพื่อให้สามารถกำหนดความหนาของฟิล์มที่ต้องการเคลือบได้ โดยเทคนิคควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์ สำหรับการเตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมไดโบไรด์ เคลือบด้วยเงื่อนไขการแปลงค่าศักย์แอโนดเป็น 0, +25, +50, +75 +100 และ +125 โวลต์ตามลำดับ โดยที่ฐานวางชิ้นงานต่อลงกราวด์ เพื่อหลีกเลี่ยงข้อจำกัดที่เกิดจากการไบแอสที่ฐานวางชิ้นงาน แต่จะควบคุมกำลังไฟฟ้าและความดันแก๊สขณะเคลือบ เพื่อศึกษาสมบัติเชิงโครงสร้างระดับจุลภาคของฟิล์มบางไทเทเนียมไดโบไรด์ ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ และเทคนิคการสะท้อนของรังสีเอกซ์

วิธีดำเนินการวิจัย

ระบบเคลือบฟิล์มไทเทเนียมไดโบไรด์

การเตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมไดโบไรด์ (TiB_2) ดำเนินการภายใต้ระบบสุญญากาศตามไดอะแกรมในภาพที่ 1 ประกอบด้วยภาชนะสุญญากาศที่ไร้รอยเชื่อม รูปทรงกระบอกขึ้นรูปจากอลูมิเนียมขนาด 15 ลิตร มีการทำงานร่วมกันระหว่างปั๊มโรตารีและปั๊มเทอร์โบโมเลกุลาร์ ทำให้ภายในภาชนะสุญญากาศมีความดันต่ำสุดประมาณ 10^{-6} ทอร์ แก๊สอาร์กอนความบริสุทธิ์ 99.999% ถูกนำเข้าสู่ภาชนะสุญญากาศด้วยเครื่องควบคุม (BROOKS INSTRUMENT) ที่กำหนดอัตราการไหลคงที่ 10 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ที่บริเวณระหว่างภาชนะสุญญากาศและปั๊มเทอร์โบโมเลกุลาร์ได้ติดตั้งวาว์ลปีกผีเสื้อ (butterfly valve) ที่ทำหน้าที่ควบคุมความดันขณะเคลือบฟิล์ม เกจไวด์เรนจ์ (wide-range gauge) และ เกจคาปาซิแตนส์ (capacitance gauge) ติดตั้งบริเวณด้านข้างของภาชนะสุญากาศทำหน้าที่ตรวจวัดความดันของระบบ การควบคุมการดำเนินงานส่วนใหญ่ของระบบควบคุมผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ สำหรับวงแหวนเทปลอนได้ติดตั้งอยู่ระหว่างภาชนะสุญญากาศและฝาภาชนะสุญญากาศ (ขั้วแอโนด) เพื่อทำให้สามารถไบแอสศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วแอโนดได้ ซึ่งต่อกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบปรับค่าได้ (HSPY-400-01, Hanshengpuyuan) หัวแมกนีตรอนสปัตเตอริงติดตั้งกับเป้าวัสดุไทเทเนียมไดโบไรด์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 5 เซนติเมตร หนา 6 มิลลิเมตร ความบริสุทธิ์ 99.5% ต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง (Pinnacle Plus, Advanced Energy) ระยะห่างระหว่างเป้าวัสดุกับแผ่นฐานวางชิ้นงาน 10 เซนติเมตร ทุกเงื่อนไขการเคลือบฟิล์ม ฐานวางชิ้นงานถูกต่อลงกราวด์

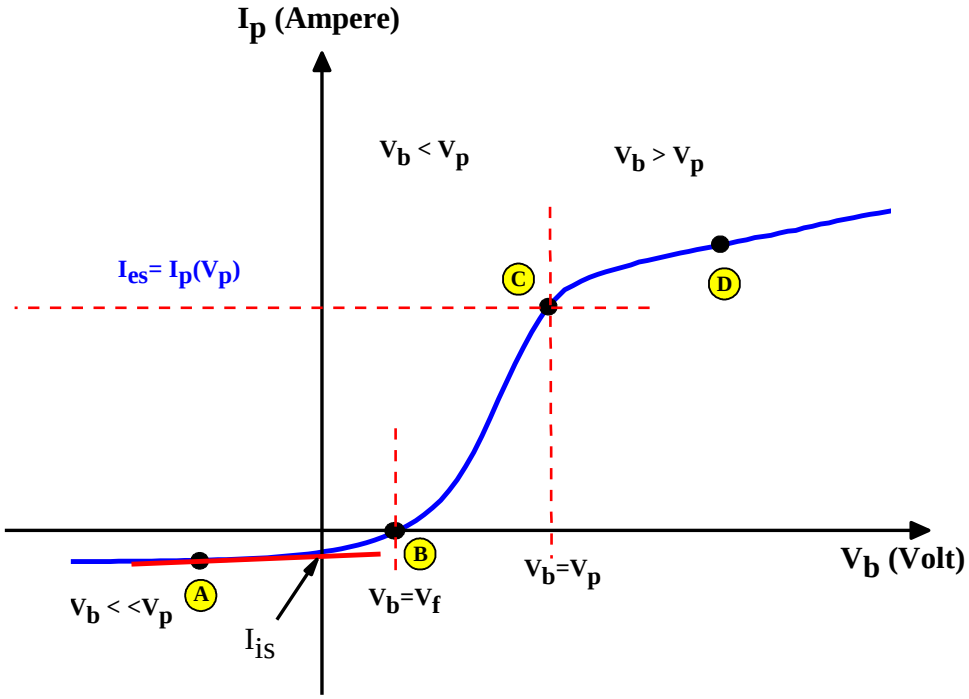


ภาพที่ 1 ไดอะแกรมระบบดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

การวัดสมบัติของพลาสมา

การวัดสมบัติของพลาสมาในงานวิจัยนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพารามิเตอร์ที่ส่งผลกระทบต่อสมบัติของพลาสมา เช่น ศักย์พลาสมา และความหนาแน่นของไอออน (n_i) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากการหาความหนาแน่นของอิเล็กตรอน (n_e) โดยใช้หัววัดแลงเมียร์ ซึ่งเป็นวิธีที่ง่าย องค์ประกอบไม่ซับซ้อน เหมาะสำหรับการวิเคราะห์ในระดับห้องปฏิบัติการ องค์ประกอบของหัววัดแลงเมียร์ประกอบด้วยขั้วรับกระแสที่ต่อกับเครื่อง Source Meter Unit (SMU) ทำหน้าที่ทั้งจ่ายศักย์ไฟฟ้าและวัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขั้วรับกระแส โดยได้แบ่งการทดลองเป็น 3 เงื่อนไข ได้แก่ 1. การแปลงค่าศักย์แอโนดเป็น 0, +25, +50, +75, +100 และ +125 โวลต์ โดยควบคุมกำลังไฟฟ้าและความดันแก๊สขณะเคลือบเป็น 200 วัตต์และ 2 มิลลิทอร์ ตามลำดับ 2. การแปลงค่ากำลังไฟฟ้าเป็น 50, 100, 150, 200 และ 250 วัตต์ โดยควบคุมศักย์แอโนดและความดันแก๊สขณะเคลือบเป็น +50 โวลต์และ 2 มิลลิทอร์ ตามลำดับ 3. การแปลงค่าความดันแก๊สขณะเคลือบเป็น 2, 4, 6, 8 และ 10 มิลลิทอร์ โดยควบคุมศักย์แอโนดและกำลังไฟฟ้าเป็น +50 โวลต์และ 200 วัตต์ ตามลำดับ โดยทั้ง 3 เงื่อนไขการทดลองใช้อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน และระยะห่างจากผิวเป้าไทเทเนียมไดโบไรด์ถึงหัววัดแลงเมียร์เป็น 10 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที และ 10 เซนติเมตร

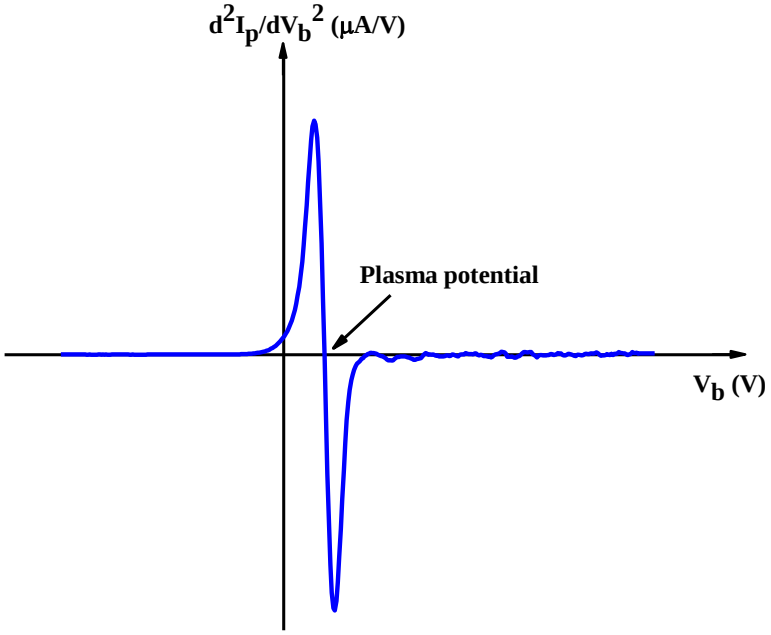
ตามลำดับ สำหรับข้อมูลที่บันทึกได้จะอยู่ในรูปความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขั้วรับกระแส ที่สอดคล้องกับศักย์ไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง (I-V Characteristic) แสดงดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 เส้นโค้งลักษณะเฉพาะของ I-V ที่ได้จากการวัดด้วยหัววัดแลงเมียร์

ในการคำนวณพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากการวัดสมบัติของพลาสมาสามารถอ้างอิงดังภาพที่ 2 เมื่อ I_p คือกระแสไฟฟ้าที่หัววัดแลงเมียร์ V_b คือ ศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหัววัดแลงเมียร์ ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 4 จุด (Conde, 2011) ได้แก่ จุด A (V_b<<V_p) เป็นบริเวณที่มีการจ่ายศักย์ลบทำให้อิเล็กตรอนที่จะเคลื่อนที่มายังหัววัดถูกผลักออกจนหมด เหลือเพียงไอออนอย่างเดียวที่สามารถที่เคลื่อนที่มายังหัววัดแลงเมียร์ได้ จุด B (V_b=V_f) เป็นบริเวณที่กระแสของหัววัดแลงเมียร์ที่วัดได้มีค่าเท่ากับศูนย์ $I_p(V_f)$ = 0 เนื่องจากบริเวณนี้กระแสของอิเล็กตรอนและกระแสของไอออนมีค่าเท่ากันหรือถูกเรียกว่า ศักย์ลอย (V_f, Floating potential) จุด C (V_b=V_p) เป็นบริเวณที่ศักย์ไบแอสมีค่าเป็นบวกมากขึ้นทำให้ไอออนที่มีพลังงานจลน์ต่ำถูกผลักออกจากหัววัดแลงเมียร์ และดึงให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่เข้ามายังหัววัดแลงเมียร์ ซึ่งที่จุด C จะสามารถหาศักย์พลาสมา (V_p, plasma potential) ได้ด้วยกัน 2 วิธีคือ 1.กรณีที่ทราบค่า I_{es} (Electron saturation Current) คือ กระแสอิเล็กตรอนที่อิ่มตัว สามารถลากเส้นตรงตัดผ่านเส้นโค้งที่ขนานกับแกนของ V_b และลากเส้นตรงมาจากจุดตัดเส้นโค้งมายังแกน V_b ก็จะได้ค่าศักย์พลาสมา 2. กรณีที่ไม่ทราบค่า I_{es} สามารถหาได้จากการหาอนุพันธ์อันดับที่สองของ I_p เทียบกับ V_b โดยจะได้กราฟใหม่ที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่างอนุพันธ์อันดับที่สองของ I_p กับ V_b เทียบกับ V_bแสดงตามภาพที่ 3 ซึ่งจุดตัดแกน V_b คือค่าศักย์พลาสมา

และจุด D (V_b>V_p) เป็นบริเวณที่ศักย์ไฟฟ้าจ่ายให้กับหัววัดแลงเมียร์มากกว่าศักย์พลาสมา กล่าวได้ว่าเป็นจุดที่มีเฉพาะอิเล็กตรอนเท่านั้นที่เคลื่อนที่มายังหัววัดแลงเมียร์ได้



ภาพที่ 3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอนุพันธ์อันดับที่สองของ I_p กับ V_b เทียบกับ V_b

จากภาพที่ 2 และภาพที่ 3 ทำให้ทราบถึงวิธีการในการหาศักย์พลาสมาซึ่งเป็นหนึ่งในพารามิเตอร์ที่ต้องการ และในส่วนของการคำนวณความหนาแน่นของอิเล็กตรอน (n_e) ซึ่งการคำนวณเริ่มจากการใช้ความสัมพันธ์ที่จุด A (V_b<<V_p) ของภาพที่ 2 ซึ่งตัวแปรที่ต้องการทราบค่าในสมการที่ (1) คือ I_{is} (Ion saturation current) หมายถึง กระแสไอออนอิ่มตัว เริ่มจากสร้างเส้นตรงที่ขนานกับเส้นโค้งในส่วนของจุด A ที่ลากตัดกับแกน I_p แสดงดังภาพที่ 2 ทำให้สามารถคำนวณหาค่า I_{is} ได้ตามสมการที่ (1)

$$I_{is} = mV_b + C \quad (1)$$

เมื่อ m คือ ค่าความชันของเส้นตรง V_b คือศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้หัววัดแลงเมียร์ ส่วน C คือ จุดตัดแกน I_p และเมื่อทราบค่า I_{is} แล้วตัวแปรต่อมาที่จะทำการหาคือกระแสของอิเล็กตรอน (I_e) ซึ่งมีค่าเท่ากับผลบวกระหว่างกระแสไฟฟ้าที่หัววัดแลงเมียร์และค่าสัมบูรณ์ของกระแสไอออนอิ่มตัว แสดงดังสมการที่ (2)

$$I_e = I_p + \left|I_{is}\right| \quad (2)$$

เมื่อทราบค่าได้ค่า I_e จากสมการที่ (2) ทำให้สามารถคำนวณหาอีกหนึ่งพารามิเตอร์ได้นั้นคือ อุณหภูมิของอิเล็กตรอน (T_e) โดยเริ่มจากสมการที่ (3) ซึ่งเป็นกรณีที่ $V_b<V_p$

$$I_e(V_b) = I_{es} \exp\left[\frac{e(V_b - V_P)}{k_B T_e}\right] ; V_b < V_p \quad (3)$$

เมื่อ e คือ ค่าประจุของอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ -1.602×10^{-19} คูลอมบ์ และ k_B คือค่าคงที่ของโบลต์ซมันน์มีค่าเท่ากับ 1.38×10^{-23} จูลต่อเคลวิน ซึ่งลักษณะของสมการที่ (3) จะอยู่ในรูปของเอกซ์โพเนนเชียลที่นำมาตีความได้ยาก เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณจึงทำการคูณลอการิทึมฐานธรรมชาติตลอดสมการที่ (3) ทำให้ได้ผลลัพธ์ที่แสดงดังสมการที่ (4)

$$\ln I_e(V_b) = \ln I_{es} + \frac{e(V_b - V_P)}{k_B T_e} \quad (4)$$

จากสมการที่ (4) ได้ทำการคูณ e กระจายเข้าในวงเล็บ จากนั้นพิจารณา $\ln I_{es}$ ซึ่ง I_{es} เป็นค่าคงที่ หมายความว่าลอการิทึมฐานธรรมชาติของค่าคงที่มีค่าเท่ากับค่าคงที่ หรือแทนอยู่ในรูปตัวแปรใหม่คือ C_1 แสดงดังสมการที่ (5)

$$\ln I_e(V_b) = C_1 + \frac{eV_b}{k_B T_e} - \frac{eV_P}{k_B T_e} \quad (5)$$

จากสมการที่ (5) ได้ทำการแยกพจน์ $\frac{eV_b}{k_B T_e}$ และ $\frac{eV_p}{k_B T_e}$ ออกจากกันเนื่องจาก V_p เป็นค่าคงที่ทำให้สามารถแทนพจน์ $\frac{eV_p}{k_B T_e}$ ได้เป็น C_2 จากนั้นทำการรวมพจน์ที่เป็นค่าคงที่เข้าด้วยกันจึงได้พจน์ใหม่เป็น C_3 ที่แสดงดังสมการที่ (6)

$$\ln I_e(V_b) = \left(\frac{e}{k_B T_e}\right) V_b + C_3 \quad (6)$$

จากสมการที่ (6) มีลักษณะเหมือนสมการเส้นตรงคือ y = mx+c โดยที่ $y= \ln I_e(V_b)$ ซึ่งก็คือแกน y หรือแกนที่เป็นกระแสของอิเล็กตรอน $x = V_b$ ซึ่งก็คือแกน x หรือแกนที่เป็นศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้หัววัดแลงเมียร์ $c = C_3$ ซึ่งก็คือค่าคงที่ และ m = slope = $\frac{e}{k_B T_e}$ ซึ่งตัวแปร m ในที่นี้ไม่เกี่ยวข้องกับสมการที่ (1) ทำให้สามารถเขียนสมการที่ใช้ในการคำนวณหาอุณหภูมิของอิเล็กตรอนได้ตามสมการที่ (7)

$$T_e = \frac{e}{k_B(slope)} \tag{7}$$

จากสมการที่ (7) ค่า slope ในที่นี้หาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I_e(V_b)$ และ V_b จึงได้ค่าอุณหภูมิของอิเล็กตรอน ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งในการคำนวณหาความหนาแน่นของอิเล็กตรอน ที่แสดงดังสมการที่ (8) และสมการที่ (9)

$$I_{es} = \frac{1}{4} e\, n_e \langle v_e \rangle A_p \tag{8}$$

จากสมการที่ (8) n_e คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน A_p คือพื้นที่ของหัววัด และ $\langle v_e \rangle$ คือความเร็วเฉลี่ยของอิเล็กตรอน ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\sqrt{\frac{\pi m_e}{8 k_B T_e}}$ เมื่อ m_e คือ มวลของอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ 9.1×10^{-31} กิโลกรัม และทำการจัดสมการใหม่ เพื่อใช้ในการคำนวณหาความหนาแน่นของอิเล็กตรอน ที่แสดงดังสมการที่ (9)

$$n_e = \left(\frac{4}{e\, A_p} \sqrt{\frac{\pi m_e}{8 k_B T_e}} \right) I_{es} \tag{9}$$

จากสมบัติเสมือนเป็นกลางทางไฟฟ้าของพลาสมา (quasi-neutrality) ทำให้พิจารณาได้ว่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในพลาสมามีค่าใกล้เคียงกับความหนาแน่นของไอออน ดังนั้น $n_e \approx n_i$ จึงสามารถแทนความสัมพันธ์ของความหนาแน่นของอิเล็กตรอน เป็นความหนาแน่นของไอออนในการคำนวณได้ ดังสมการที่ (10)

$$n_i = \left(\frac{4}{e\, A_p} \sqrt{\frac{\pi m_e}{8 k_B T_e}} \right) I_{es} \tag{10}$$

จากสมการที่ (9) และสมการที่ (10) สามารถตีความได้ว่าความหนาอิเล็กตรอน (n_e) และความหนาแน่นขอไอออน (n_i) แปรผันตรงกับ I_{es} แต่แปรผกผันกับ $\sqrt{T_e}$ เนื่องจากพจน์ $\frac{4}{eA_p}\sqrt{\frac{\pi m_e}{8k_B}}$ เป็นค่าคงที่

การวัดอัตราการตกสะสม

การวัดอัตราการตกสะสมของเป้าไทเทเนียมไดโบไรด์ มีวัตถุประสงค์เพื่อบ่งบอกความหนาของฟิล์มก่อนการเคลือบจริง เนื่องจากการวิเคราะห์สมบัติเชิงโครงสร้างของฟิล์ม ด้วยเทคนิคการสะท้อนของรังสีเอกซ์ต้องการความหนาของฟิล์มอยู่ในระดับไม่เกิน 200 นาโนเมตร การวัดอัตราการตกสะสมด้วยควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์ (Quartz Crystal Microbalance, QCM) เป็นการวัดมวลที่มีการเปลี่ยนแปลงต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ โดยวัดการเปลี่ยนแปลงความถี่การสั่นพ้องของผลึกควอตซ์ด้วยเครื่องควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์ รุ่น STM – 2XM (Inficon) ซึ่งเครื่องวัดอัตราการตกสะสมต่อกับเครื่องออสซิลโลสโครปเพื่อง่ายต่อการบันทึกข้อมูล โดยรับข้อมูลความหนาที่เปลี่ยนแปลงตามเวลามาคำนวณให้อยู่ในรูปของอัตราการตกสะสม ซึ่งการทดลองวัดอัตราการตกสะสมจากเป้าไทเทเนียมมีเงื่อนไขดังนี้

- ระยะห่างจากเป้าไทเทเนียมไดโบไรด์ถึงหัววัดอัตราการตกสะสม 10 เซนติเมตร
- อัตราการไหลแก๊สอาร์กอน 10 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที
- ความดันขณะเคลือบ 2 มิลลิทอร์
- กำลังไฟฟ้า 50, 100, 150 และ 200 วัตต์
- ศักย์แอโนดไบแอส 0, +25, +50,+75, +100 และ +125 โวลต์

การเตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมไดโบไรด์

เมื่อทราบข้อมูลอัตราการตกสะสมของเป้าไทเทเนียมไดโบไรด์ จึงสามารถทำการเคลือบฟิล์มบนแผ่นซิลิกอนระนาบ (100) ที่ถูกใช้ในงานวิจัยนี้ โดยแผ่นซิลิกอนได้รับการทำความสะอาดด้วยการสั่นในเครื่องอัลตร้าโซนิคในอะซิโตน 1 ครั้ง เมทานอล 2 ครั้ง และน้ำปราศจากประจุ 3 ครั้ง ตามลำดับ อย่างละ 10 นาที เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการล้างชิ้นงานแล้ว นำชิ้นงานมาเป่าด้วยลมไนโตรเจนให้แห้ง และเป่าลมร้อนเป็นลำดับสุดท้ายเพื่อไล่ความชื้นบนพื้นผิวชิ้นงาน จากนั้นนำชิ้นงานเข้าสู่ระบบสุญญากาศ โดยความดันของระบบก่อนการเคลือบเป็น $3x10^{-5}$ ทอร์ และเงื่อนไขสำหรับการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไดโบไรด์มีดังนี้

- อัตราการไหลแก๊สอาร์กอน 10 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที
- ความดันขณะเคลือบ 2 มิลลิทอร์
- กำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่ให้กับเป้าสารเคลือบ 200 วัตต์
- เวลาที่ใช้ในการเคลือบ 6 นาที
- ศักย์แอโนดไบแอส 0, +25, +50,+75, +100 และ +125 โวลต์

การวิเคราะห์สมบัติเชิงโครงสร้าง

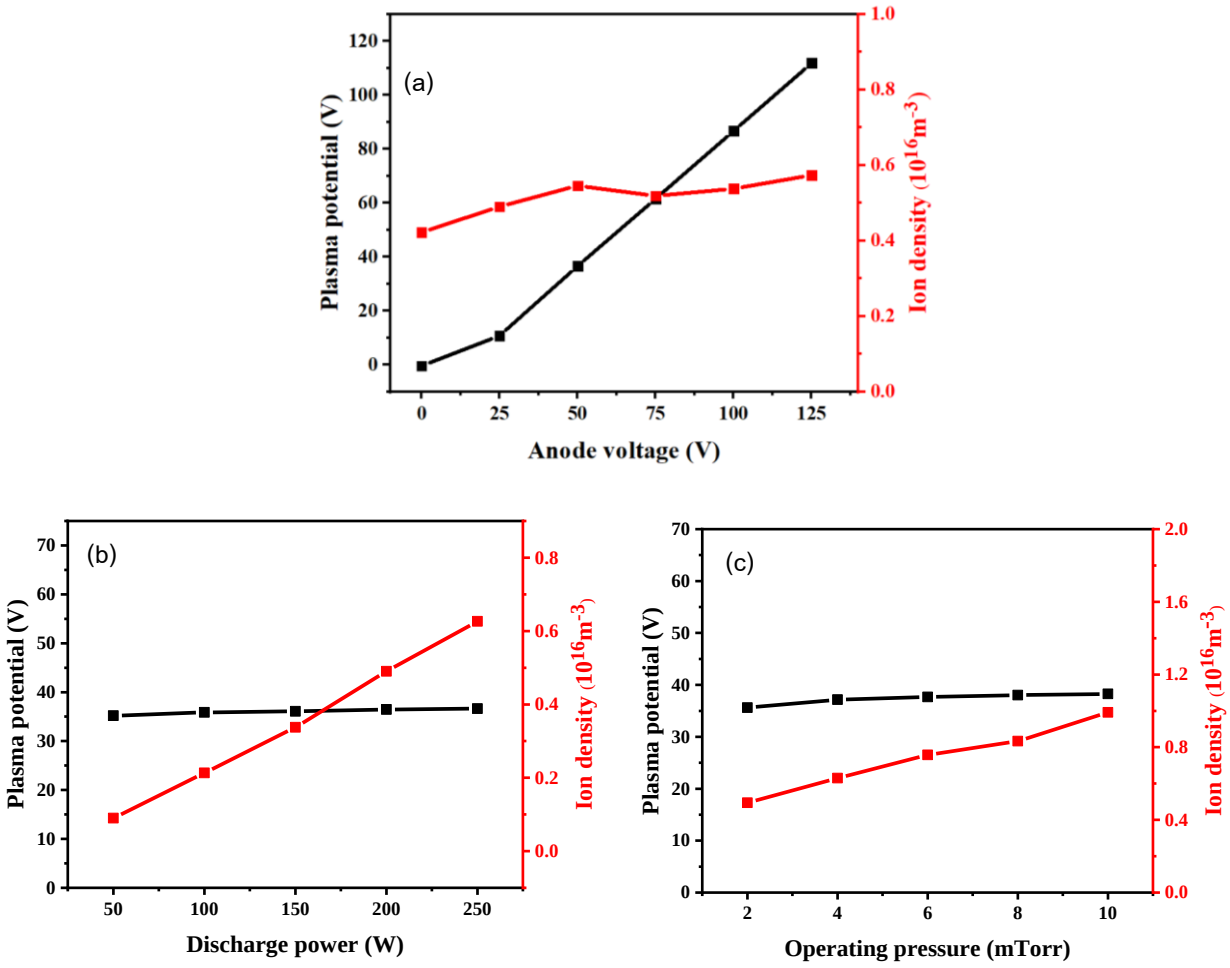
ฟิล์มบางไทเทเนียมไดโบไรด์ ที่เตรียมได้นำมาศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคโดยเครื่อง X-ray Diffraction ของ Bruker รุ่น D8 โดยใช้ Cu-Kα (λ = 1.54056 อังสตรอม) ช่วงของมุมที่ใช้ในการวัดเป็น 21 ถึง 54 องศา โดยมุมที่ใช้วัดเพิ่มขึ้น 1.32 องศาต่อนาที สำหรับขนาดของผลึกของฟิล์มสามารถหาได้จากสมการของ Scherrer (Alexander & Klug, 1950)

$$L = \frac{k\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (10)$$

เมื่อ L คือ ขนาดผลึก k คือ ค่าคงที่เท่ากับ 0.94 λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ (Cu-Kα = 1.5406 Å) β คือ ความกว้างครึ่งหนึ่งของพีคการเลี้ยวเบนที่มีค่าความเข้มสูงสุด θ คือ ครึ่งหนึ่งของมุมของพีค เทคนิคการสะท้อนของรังสีเอกซ์ (X-ray reflection) เป็นอีกหนึ่งโหมดของเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ช่วงของมุมที่ใช้ในการวัดเป็น 0 ถึง 4 องศา โดยมุมที่ใช้วัดเพิ่มขึ้นประมาณ 1 องศาต่อนาที และความหนาของฟิล์มต้องไม่เกิน 200 นาโนเมตร (Yasaka, 2010)

ผลการวิจัย

ผลการวัดศักย์พลาสมา และความหนาแน่นของไอออนภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดข้างต้น พบว่าที่เงื่อนไขการแปลงศักย์แอโนดดังภาพที่ 4 (a) ศักย์พลาสมามีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น เมื่อศักย์แอโนดเพิ่มขึ้น ซึ่งมีค่าสูงสุดเป็น 111.88 โวลต์ ที่ศักย์แอโนดเป็น +125 โวลต์ และมีค่าความหนาแน่นของไอออนอยู่ในช่วง 4.22×10^{15} ถึง 5.73×10^{15} ต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งแนวโน้มของความหนาแน่นของไอออนมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อเทียบกับศักย์พลาสมา สำหรับภาพที่ 4 (b) เป็นเงื่อนไขการแปลงค่ากำลังไฟฟ้า โดยกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองสูงสุดเป็น 250 วัตต์ ซึ่งสูงกว่าการทดลองวัดอัตราการตกสะสม และการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไดโบไรด์ เนื่องจากต้องการทราบถึงแนวโน้มของศักย์พลาสมา และความหนาแน่นของไอออนที่กำลังไฟฟ้าสูงขึ้น และเนื่องด้วยการทดลองวัดสมบัติของพลาสมาใช้เวลาในการทดลองที่น้อยกว่าการวัดอัตราการตกสะสม และการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไดโบไรด์ จึงไม่ส่งผลกระทบต่อหัวแมกนีตรอน จากภาพที่ 4 (b) พบว่าการเพิ่มกำลังไฟฟ้าไม่ได้ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงศักย์พลาสมา แต่ทำให้ความหนาแน่นของไอออนเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วง 8.98×10^{14} ถึง 6.26×10^{15} ต่อลูกบาศก์เมตร และภาพที่ 4 (c) เงื่อนไขการแปลงค่าความดันแก๊สขณะเคลือบ พบว่าผลการทดลองที่ได้จะคล้ายกับการแปลงค่ากำลังไฟฟ้าคือ ศักย์พลาสมาไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่ช่วงของความหนาแน่นของไอออนจะมีค่าสูงขึ้นอยู่ในช่วง 4.93×10^{15} ถึง 9.92×10^{15} ต่อลูกบาศก์เมตร



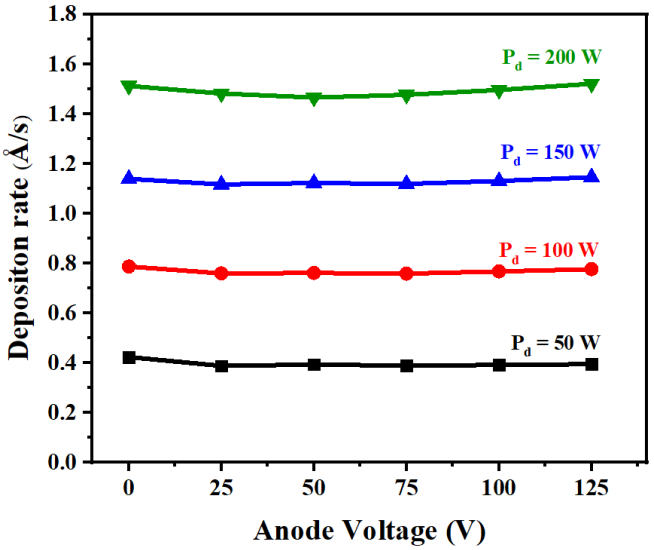
ภาพที่ 4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างศักย์พลาสมา และความหนาแน่นของอิเล็กตรอน เทียบกับการแปลงค่า (a) ศักย์แอโนด (b) กำลังไฟฟ้า และ (c) ความดันแก๊สขณะเคลือบ

ผลการทดลองข้างต้นแสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของศักย์แอโนด กำลังไฟฟ้า และความดันแก๊สขณะเคลือบ ที่มีผลต่อศักย์พลาสมา และความหนาแน่นของไอออน จากการเพิ่มศักย์แอโนดทำให้ศักย์พลาสมามีค่าที่เพิ่มขึ้นซึ่งส่งผลต่อพลังงานของไอออน (ε_i) แสดงดังสมการที่ (11)

$$\varepsilon_i = V_p - V_s \tag{11}$$

เมื่อ V_s คือศักย์ไฟฟ้าที่ฐานวางชิ้นงาน ซึ่งทุกเงื่อนไขในการทดลองนี้ที่ฐานวางชิ้นงานต่อลงกราวด์ ทำให้ศักย์ไฟฟ้าที่ฐานวางชิ้นงานมีค่าเท่ากับศูนย์ ($V_s = 0$) แสดงว่าพลังงานไอออนมีค่าเท่ากับศักย์พลาสมา สามารถเขียนสมการใหม่ได้ว่า $\varepsilon_i = V_p$

สำหรับภาพที่ 4 (b) และภาพที่ 4 (c) สามารถวิเคราะห์ได้ว่าการเพิ่มกำลังไฟฟ้า และความดันแก๊สขณะเคลือบ ไม่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของพลังงานไอออน



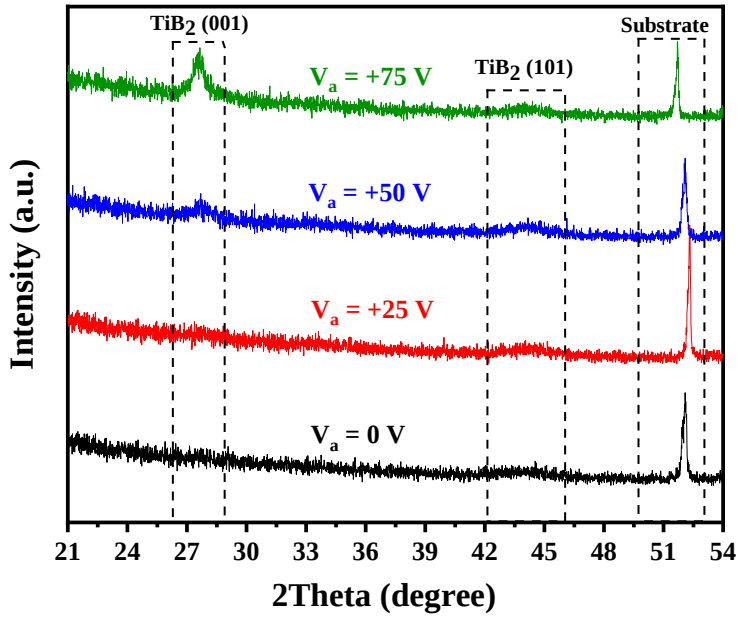
ภาพที่ 5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการตกสะสมฟิล์มไทเทเนียมไดโบไรด์ เทียบกับศักย์แอโนด ที่กำลังไฟฟ้า 50 100 150 และ 200 วัตต์

จากภาพที่ 5 อัตราการตกสะสมของฟิล์มไทเทเนียมไดโบไรด์ มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจากกำลังไฟฟ้า 50 ถึง 200 วัตต์ ซึ่งมีอัตราการตกสะสมอยู่ในช่วง 0.4 ถึง 1.54 อังสตรอมต่อวินาที โดยที่การเพิ่มศักย์แอโนดไม่ได้ส่งผลโดยตรงต่ออัตราการตกสะสมอย่างมีนัยสำคัญ ทำให้สามารถตีความได้ว่า ถ้าใช้กำลังไฟฟ้าเดียวกัน ฟิล์มบางไทเทเนียมไดโบไรด์ที่ได้เมื่อใช้ศักย์แอโนดต่ำ จะมีความหนาของฟิล์มที่ใกล้เคียงกับศักย์แอโนดที่สูง และยังตีความได้อีกว่าถ้าเพิ่มกำลังไฟฟ้าสูงขึ้นมากกว่า 200 วัตต์ จะทำให้อัตราการตกสะสมสูงขึ้นตามไปด้วย แต่เนื่องจากข้อจำกัดของน้ำหล่อเย็นที่ไม่สามารถระบายความร้อนได้เมื่อกำลังไฟฟ้าสูงกว่า 200 วัตต์ เพื่อไม่ให้เกิดการสูญเสียสภาพความเป็นแม่เหล็กที่ติดตั้งอยู่ในหัวแมกนีตรอนสปัตเตอริง ในงานวิจัยนี้จึงใช้กำลังไฟฟ้าสูงสุดในการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไดโบไรด์ทุกเงื่อนไขเป็น 200 วัตต์

จากผลการทดลองการวัดอัตราการตกสะสม นำมาคำนวณเพื่อกำหนดความหนาของฟิล์มที่จะใช้ในการวิเคราะห์สมบัติเชิงโครงสร้าง โดยเวลาที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มเป็น 6 นาที จะทำให้ฟิล์มที่ได้มีความหนาไม่เกิน 100 นาโนเมตร

การวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาคของฟิล์มไทเทเนียมไดโบไรด์ด้วยเทคนิค XRD ทำให้สามารถระบุโครงสร้างและองค์ประกอบภายในฟิล์มได้ ซึ่งการทดลองนี้ได้ทำการเคลือบฟิล์มทั้งหมด 6 เงื่อนไขคือการเปลี่ยนแปลงศักย์แอโนดเป็น 0 +25 +50 +75 +100 และ +125 โวลต์ แต่เนื่องจากระหว่างพักชิ้นงานเพื่อนำไปวิเคราะห์ ฟิล์มที่เงื่อนไข +100 และ +125 โวลต์เกิดการหลุดลอกของฟิล์มออกจากชิ้นงาน ทำให้เหลือชิ้นงานในการวิเคราะห์เพียง 4 ชิ้นเท่านั้น

รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางไทเทเนียมไดโบไรด์ที่เคลือบบนชิ้นงานเป็นซิลิกอน แสดงดังภาพที่ 6 พบว่าที่มุม 2Theta ประมาณ 27.56 ซึ่งเป็นมุมที่เกิดจากระนาบ (001) ซึ่งตรงกับไทเทเนียมไดโบไรด์ ตามฐานข้อมูล COD 2002799 B2 Ti จะปรากฏพีคการเลี้ยวเบนเฉพาะที่เงื่อนไขศักย์แอโนดเป็น +50 และ +75 โวลต์เท่านั้น ซึ่งมีลักษณะพีคการเลี้ยวเบนที่สูงแต่ฐานแคบ ในส่วนของมุม 2Theta ประมาณ 44.23 เป็นมุมที่ระนาบ (101) ซึ่งตรงกับไทเทเนียมไดโบไรด์ ตามฐานข้อมูล COD 2002799 B2 Ti มีลักษณะพีคการเลี้ยวเบนที่ต่ำมากแต่ฐานกว้าง ซึ่งมีรูปแบบเหมือนกันทุกเงื่อนไข และที่มุม 2Theta ประมาณ 52.19 ซึ่งตรงกับซิลิกอน ตามฐานข้อมูล COD 9011056 Si Silicon เนื่องจากฟิล์มไทเทเนียมไดโบไรด์ที่ทำการเคลือบมีความหนาที่ต่ำ ทำให้พีคการเลี้ยวเบนของซิลิกอนปรากฏอย่างเด่นชัด เมื่อเทียบกับพีคการเลี้ยวเบนของไทเทเนียมไดโบไรด์

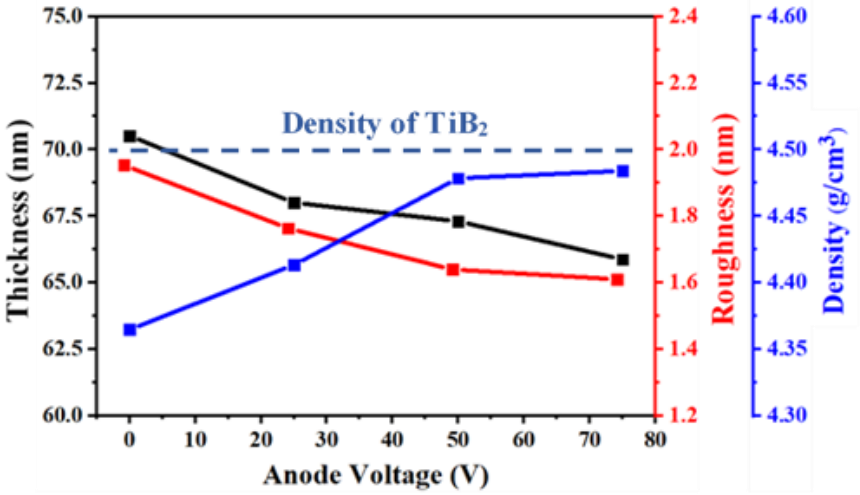


ภาพที่ 6 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางไทเทเนียมไดโบไรด์ เมื่อแปลงค่าศักย์แอโนดเป็น 0 +25 +50 และ +75 โวลต์

จากผลการทดลองการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ที่เงื่อนไขการไบแอส 0 และ +25 โวลต์ ไม่ปรากฏพีคการเลี้ยวเบนที่ระนาบ 001 อาจเป็นผลมาจากไอออนของแก๊สอาร์กอนพลังงานต่ำที่ระดมชนกับผิวฟิล์ม ซึ่งไม่ทำให้ฟิล์มบางไทเทเนียมไดโบไรด์เกิดการจัดเรียงตัวเป็นผลึกได้ดีเมื่อเทียบกับการไบแอสศักย์แอโนดเป็น +50 และ +75 โวลต์ จากผลงานวิจัยของ Mikula ที่เตรียมฟิล์ม บางไทเทเนียมไดโบไรด์ ด้วยการไบแอสศักย์ลบที่ฐานวางชิ้นงาน ซึ่งอุณหภูมิของฐานวางชิ้นงานมีค่าเท่ากับอุณหภูมิห้อง พบว่าที่ศักย์ไบแอส 0 โวลต์ ไม่ปรากฏพีคการเลี้ยวเบนที่ระนาบ (001) แต่เมื่อศักย์ไบแอสที่ชิ้นงานมีค่าติดลบมากขึ้น แนวโน้มของพีคการเลี้ยวเบนที่ระนาบ (001) สูงขึ้นและมีค่าสูงที่สุดเมื่อศักย์ไบแอสมีค่าเป็น -100 โวลต์ (Mikula *et al.*, 2007) ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลการทดลองดังภาพที่ 6 เมื่อนำข้อมูลของพีคการเลี้ยวเบนมาคำนวณขนาดของผลึก

ซึ่งมีพีคการเลี้ยวเบนของระนาบ 001 ที่เงื่อนไขการไบแอส +75 โวลต์โดดเด่นที่สุดมีค่าเป็น 13.18 นาโนเมตร ซึ่งในงานวิจัยของ Zhang ได้ทำการเตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมไดโบไรด์ ด้วยเทคนิค HiPIMS จากการปรับค่าศักย์ไฟฟ้าลบที่ฐานวางชิ้นงานในช่วง 0 ถึง -200 โวลต์ และอุณหภูมิของฐานวางชิ้นงานเป็น 200 และ 300 องศาเซลเซียส ขนาดของผลึกเฉลี่ยอยู่ในช่วง 5 ถึง 30 นาโนเมตร (Zhang *et al.*, 2014)

การวิเคราะห์โครงสร้างของฟิล์มด้วยเทคนิคการสะท้อนของรังสีเอกซ์ จะใช้ฟิล์มที่ได้จากการวิเคราะห์จากเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ เนื่องจากการวิเคราะห์ฟิล์มด้วยเทคนิคนี้ไม่ได้ทำลายชิ้นงาน ซึ่งฟิล์มที่นำมาวิเคราะห์มีทั้งหมด 4 เงื่อนไขจากการแปลงค่าศักย์แอโนด ได้แก่ 0 +25 +50 และ +75 โวลต์ เมื่อได้ข้อมูลจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการสะท้อนของรังสีเอกซ์ที่มีความสำคัญในการนำมาจำลองด้วยโปรแกรม Leptos 7.8 เพื่อตีความลักษะของเส้นโค้ง ซึ่งบ่งบอกความหนา ความขรุขระ และความหนาแน่นของฟิล์มได้ โดยที่ผลการวิเคราะห์ฟิล์มแสดงดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนา ความขรุขระ และความหนาแน่นของฟิล์มบางไทเทเนียมไดโบไรด์เทียบกับศักย์แอโนด

จากภาพที่ 7 เมื่อศักย์แอโนดเพิ่มขึ้นความหนา และความขรุขระของฟิล์มมีแนวโน้มที่ลดลงจาก 70.51 ถึง 65.86 นาโนเมตร และ 1.95 ถึง 1.6 นาโนเมตรตามลำดับ ซึ่งต่างจากความหนาแน่นของฟิล์มที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามศักย์แอโนดในช่วง 4.36 ถึง 4.48 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร โดยที่ความหนาแน่นทางทฤษฎีของไทเทเนียมไดโบไรด์มีค่าเป็น 4.5 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (Ronald, 2000) ซึ่งสอดคล้องกับความหนา และความขรุขระของฟิล์มที่ลดลง เมื่อศักย์แอโนดเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถอธิบายเหตุการนี้ ได้จากหลักการในการใช้ไอออนช่วยตกสะสม (Ion assisted deposition) กล่าวได้ว่าในระหว่างกระบวนการเคลือบฟิล์ม มีไอออนของแก๊สอาร์กอนระดมชนกับฟิล์มอยู่ตลอด และเกิดการถ่ายโอนพลังงานและโมเมนตัมจากไอออนไปสู่อะตอมฟิล์มบาง ทำให้อะตอมเหล่านั้นเกิดการสั่น และเคลื่อนตัวไปยังตำแหน่งที่ว่างภายในเนื้อฟิล์ม (Bronsgeest, 2016) โดยที่ไอออนของแก๊สอาร์กอนที่วิ่งเข้าชนกับผิวฟิล์มสามารถที่จะควบคุมพลังงานได้ด้วยการแปลงค่าศักย์แอโนด

ระหว่างการเคลือบฟิล์ม ในกรณีที่ศักย์แอโนดที่ใช้มีค่าต่ำ พลังงานไอออนระหว่างการเคลือบฟิล์มก็อาจไม่ส่งผลต่อสมบัติของฟิล์มอย่างชัดเจน ส่วนในกรณีที่ศักย์แอโนดมีค่าสูงมากๆ ส่งผลให้ไอออนที่วิ่งเข้าชนผิวฟิล์มมีพลังงานที่มากขึ้นไปด้วย ซึ่งอาจทำให้เกิดการแทรกตัวของไอออนภายในเนื้อฟิล์มหรือเกิดการสปัตเตอร์ที่ผิวของฟิล์มทำให้ได้ฟิล์มที่มีความหนาน้อยลง รวมถึงพื้นผิวที่มีความเรียบจากการระดมชนของไอออนพลังงานสูงได้ด้วย สำหรับการเคลือบฟิล์มด้วยเทคนิคการไบแอสบวกที่ขั้วแอโนดที่เสนอในงานนี้ มีหลักการเดียวกับการเคลือบฟิล์มที่มีการไบแอสศักย์ลบที่ฐานวางชิ้นงาน ซึ่งเป็นการเพิ่มพลังงานไอออนในกระบวนการตกสะสมของฟิล์มบาง

วิจารณ์ผลการวิจัย

จากผลการทดลองที่เป็นการวัดสมบัติของพลาสมา ที่เงื่อนไขการแปลงค่ากำลังไฟฟ้า และความดันแก๊สขณะเคลือบ พบว่าจะส่งผลโดยตรงต่อการเพิ่มปริมาณไอออน ซึ่งมีผลต่อการเพิ่มความหนาของฟิล์ม สอดคล้องกับผลของการวัดอัตราการตกสะสม เมื่อกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้น และสมบัติเชิงโครงสร้างของฟิล์มบาง เช่น ผลึกมีขนาดใหญ่ขึ้น พื้นผิวมีความขรุขระเพิ่มขึ้น ที่กล่าวในงานของ Kavitha *et al.* ได้ทำการศึกษาผลกระทบของกำลังไฟฟ้าที่มีต่อสมบัติของฟิล์มไทเทเนียม เตรียมด้วยเทคนิคดีซีแมกนี ตรอนสปัตเตอริง พบว่าความหนาของฟิล์ม ความขรุขระ มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามกำลังไฟฟ้า ต่างจากค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามีค่าลดลง (Kavitha, Kannan, & Rajashabala, 2017) สำหรับเงื่อนไขการแปลงศักย์แอโนด จะเป็นการเพิ่มศักย์พลาสมาส่งผลทำให้พลังงานไอออนในการระดมชนกับพื้นผิวของฟิล์มมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งคล้ายกับการไบแอสศักย์ลบที่ฐานวางชิ้นงาน แสดงความสัมพันธ์ได้ตามสมการที่ (11) ได้ว่า $\varepsilon_i = V_p - (-V_s)$ ดังนั้นพลังงานไอออนมีค่าเท่ากับผลรวมของศักย์พลาสมากับศักย์ลบที่ฐานวางชิ้นงาน ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อศักย์ลบมีค่าเพิ่มขึ้น

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมฟิล์มบางไทเทเนียมไดโบไรด์ บนแผ่นผลึกซิลิกอน โดยใช้เทคนิคดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงภายใต้บรรยากาศของแก๊สอาร์กอน เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของการไบแอสศักย์แอโนด ต่อสมบัติของพลาสมา และโครงสร้างระดับจุลภาคของฟิล์มบางไทเทเนียมไดโบไรด์ ศักย์แอโนดมีอิทธิพลโดยตรงต่อศักย์พลาสมา และพลังงานไอออนที่ระดมชนฟิล์มบาง ซึ่งการใช้ศักย์แอโนดไบแอสในค่าที่มีความเหมาะสม จะทำให้ฟิล์มบางไทเทเนียมไดโบไรด์ที่เตรียมได้มีการจัดเรียงตัวเป็นผลึกที่ดี ส่งผลโดยตรงถึงความหนาแน่นของฟิล์มที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับความขรุขระที่มีแนวโน้มลดลงเมื่อศักย์แอโนดเพิ่มขึ้น แสดงว่าการเคลือบฟิล์มบางด้วยการไบแอสศักย์บวกที่ขั้วแอโนด สามารถเพิ่มพลังงานของไอออนระหว่างการเคลือบฟิล์มได้เช่นเดียวกับการไบแอสศักย์ลบที่ฐานวางชิ้นงาน

กิตติกรรมประกาศ

ขอบคุณศูนย์ความเป็นเลิศทางฟิสิกส์ ที่ได้สนับสนุนค่าใช้จ่ายในการดำเนินการวิจัยภายใต้สัญญาเลขที่ “ThEP-61-EQP-MSU2”

เอกสารอ้างอิง

Alexander, L., & Klug, H. P. J. J. o. A. P. 1950. Determination of crystallite size with the X-Ray spectrometer. *Journal of Applied Physics*, *21*(2), 137-142.

Anders, A. J. T. S. F. 2010. A structure zone diagram including plasma-based deposition and ion etching. *Journal of Applied Physics*, *518*(15), 4087-4090.

Arslan, E., Totik, Y., Celik, A., & Efeoglu, I. J. S. e. 2010. Effect of annealing on adhesion of TiB_2 films deposited by pulsed magnetron sputtering. *Surface engineering*, *26*(8), 567-570.

Berger, M., Karlsson, L., Larsson, M., & Hogmark, S. J. T. S. F. 2001. Low stress TiB_2 coatings with improved tribological properties. *Thin Solid Films*, *401*(1-2), 179-186.

Bronsgeest, M. 2016. Ion beam sputter deposition. *Nov 7, 2016*, https://polygonphysics.com/.

Choi, H., Choi, S.-K., Anderson, O., & Bange, K. J. T. S. F. 2000. Influence of film density on residual stress and resistivity for Cu thin films deposited by bias sputtering. *Thin Solid Films*, *358*(1-2), 202-205.

Conde, 2011. An introduction to Langmuir probe diagnostics of plasmas. 1-28.

Hellgren, N., Thörnberg, J., Zhirkov, I., Sortica, M. A., Petrov, I., Greene, J. E., Hultman, L., & Rosen, J. J. V. 2019. High-power impulse magnetron sputter deposition of TiB_x thin films: Effects of pressure and growth temperature. *Vacuum*, *169,* 108884.

Kavitha, A., Kannan, R., & Rajashabala, S. J. M. S.-P. 2017. Effect of target power on the physical properties of Ti thin films prepared by DC magnetron sputtering with supported discharge. *Materials Science-Poland*, *35*(1), 173-180.

Larsson, T., Blom, H.-O., Berg, S., & Östling, M. J. T. S. F. 1989. Reactive sputtering of titanium boride. *Thin Solid Films*, *172*(1), 133-140.

Mattias, B., Mats, L., Surface, H. S. J., & Technology, C. 2000. Evaluation of magnetron-sputtered TiB_2 intended for tribological applications. *Surface and Coatings Technology*, *124*(2-3), 253-261.

Mikula, M., GranČiČ, B., Buršíková, V., Csuba, A., Držík, M., Kavecký, Š., Plecenik, A., & Kúš, P. J. V. 2007. Mechanical properties of superhard TiB_2 coatings prepared by DC magnetron sputtering. *Vacuum*, *82*(2), 278-281.

Nelson, G., & Borders, J. 1980. Surface composition and erosion yields for CVD TiB/sub 2/films subjected to low energy deuterium ion bombardment. *Journal of Nuclear Materials*

Park, B., Jung, D.-H., Kim, H., Yoo, K.-C., Lee, J.-J., Joo, J. J. S., & Technology, C. 2005. Adhesion properties of TiB2 coatings on nitrided AISI H13 steel. *Surface and Coatings Technology*, *200*(1-4), 726-729.

Petrov, I., Hall, A., Mei, A. B., Nedfors, N., Zhirkov, I., Rosen, J., Reed, A., Howe, B., Greczynski, G., Birch, J. J. J. o. V. S., Technology A: Vacuum, S., & Films. 2017. Controlling the boron-to-titanium ratio in magnetron-sputter-deposited TiB_x thin films. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, Films* *35*(5), 050601.

Ronald, M. 2000. Material properties of titanium diboride. *Journal of Research of the National institute of standards and Technology*, *105*(5), 709.

Xia, M.-j., Ding, H.-y., Zhou, G.-h., & Zhang, Y. J. T. o. N. M. S. o. C. 2013. Improvement of adhesion properties of TiB_2 films on 316L stainless steel by Ti interlayer films. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* *23*(10), 2957-2961.

Yasaka, M. J. T. R. J. 2010. X-ray thin-film measurement techniques. *The Rigaku Journal 26*(2), 1-9.

Zhang, T. F., Gan, B., Park, S.-m., Wang, Q. M., Kim, K. H. J. S., & Technology, C. 2014. Influence of negative bias voltage and deposition temperature on microstructure and properties of superhard TiB_2 coatings deposited by high power impulse magnetron sputtering. *Surface and Coatings Technology*, *253*, 115-122.

Zhao, Y., Lin, G., Xiao, J., Du, H., Dong, C., & Gao, L. J. A. S. S. 2011. Ti/TiN multilayer thin films deposited by pulse biased arc ion plating. *Applied Surface Science 257*(7), 2683-2688.

Zhirkov, I., Petruhins, A., Naslund, L.-A., Kolozsvári, S., Polcik, P., & Rosen, J. J. A. P. L. 2015. Vacuum arc plasma generation and thin film deposition from a TiB2 cathode. *Applied Physics Letters*, *107*(18), 184103.