



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ: การปลูกฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชรเจือไทเทเนียมแบบไม่ชอบน้ำ
อย่างยิ่งยวดด้วยหัวกำเนิดพลาสมาแบบอาร์คในสุญญากาศชนิด
แคโทดคู่

โดย ดร.อาทิตย์ ฉิ่งสูงเนิน

30 กันยายน 2554

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ: การปลูกฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชรเจือไทเทเนียมแบบไม่ชอบน้ำอย่างยั่งยืนด้วย
หัวกำเนิดพลาสมาแบบอาร์คในสุญญากาศชนิดแคโทดคู่

ดร.อาทิตย์ จิ่งสูงเนิน มหาวิทยาลัยมหาสารคาม หัวหน้าโครงการวิจัย
รศ.ดร.วิทยา อมรกิจบำรุง มหาวิทยาลัยขอนแก่น นักวิจัยที่ปรึกษา
รศ.ดร.สันติ แม่นศิริ มหาวิทยาลัยขอนแก่น นักวิจัยที่ปรึกษา

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา
และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย
(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกอ. และ สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

โครงการ: การปลูกฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชรเจือไทเทเนียมแบบไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดด้วย
หัวกำเนิดพลาสมาแบบอาร์คในสุญญากาศชนิดแคโทดคู่

รหัสโครงการ: MRG52-อาทิตย์ จิ่งสูงเนิน

ดร.อาทิตย์ จึงสูงเนิน¹, รศ.ดร.สันติ แม่นศิริ², รศ.ดร.วิทยา อมรกิจบำรุง³

หัวหน้าโครงการวิจัย

2. มหาวิทยาลัยขอนแก่น นักวิจัยที่ปรึกษา

3. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นักวิจัยที่ปรึกษา

Abstract

The great interest in the use of diamond-like carbon (DLC) films as a coating material is justified by the super wear resistance and hardness, chemical inertness, and high hydrophobic. Cathodic vacuum arc deposition (CVAD) is well suited to prepare superhydrophobic films with high sp^3/sp^2 ratios. This technique is one of the potential ion plating physical vapor deposition methods and a high-voltage, high-current plasma discharge that takes place between two metallic electrodes in vacuum. Titanium doped diamond-like carbon (Ti:DLC) films can be deposited on glass substrate by dual cathode arc plasma sources. The atom of titanium content in the films depended on the relative amount of arc rates in the graphite and titanium electrodes. The films can be characterized by scanning electron microscopy, energy dispersive X-ray and optical measurements. The results are interpreted in terms of hybridization of carbon in these DLC films.

Keywords : diamond-like carbon, cathodic vacuum arc deposition, superhydrophobic

E-mail Address: artit.c@msu.ac.th

(วันที่ 16 มีนาคม 2552 ถึงวันที่ 15 มีนาคม 2554)

รหัสโครงการ: MRG52-อาทิตย์ จิ่งสูงเนิน

1. มหาวิทยาลัยมหาสารคาม หัวหน้าโครงการวิจัย
2. มหาวิทยาลัยขอนแก่น นักวิจัยที่ปรึกษา
3. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นักวิจัยที่ปรึกษา

ในปัจจุบันได้มีการนำฟิล์มคาร์บอนคล้ายเพชรไปเคลือบลงบนผิววัสดุอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีคุณสมบัติที่เด่นหลายประการ คือ มีความแข็ง สามารถต้านทานต่อการกัดกร่อน มีความเฉื่อยทางเคมี และมีความไม่ชอบน้ำสูง การเคลือบฟิล์มดังกล่าวด้วยวิธีการอาร์คในสุญญากาศที่ขั้วแคโทดสามารถทำให้เกิดฟิล์มที่มีสัดส่วนของพันธะของคาร์บอนแบบ sp^3 ต่อ sp^2 ที่สูง ซึ่งจะทำให้ฟิล์มมีความแข็งและความไม่ชอบน้ำอย่างมาก เพื่อเป็นการปรับปรุงคุณภาพของฟิล์มได้มีการเจืออะตอมของไทเทเนียมลงบนฟิล์มคาร์บอนคล้ายเพชรโดยใช้ขั้วแคโทดแบบแคโทดคู่ คือ มีขั้วแกรไฟต์และขั้วไทเทเนียมคู่กันเป็นขั้วแคโทดที่มีความถี่การอาร์คต่าง ๆ กัน คุณสมบัติของเชิงพื้นผิวของฟิล์มสามารถถูกตรวจวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด วิเคราะห์ทางองค์ประกอบของธาตุด้วยเทคนิคการวัดการกระจายพลังงานรังสีเอ็กซ์ และวิเคราะห์สัดส่วนและชนิดของพันธะคาร์บอนด้วยเทคนิครามาน ผลจากการตรวจวิเคราะห์ลักษณะของฟิล์มสามารถยืนยันได้ว่าฟิล์มที่เตรียมได้เป็นฟิล์มคาร์บอนคล้ายเพชรจริง

E-mail Address: artit.c@msu.ac.th

(วันที่ 16 มีนาคม 2552 ถึงวันที่ 15 มีนาคม 2554)

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย (สกว.) และสำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษา (สกอ.) ที่ได้ให้ทุน สนับสนุน งานวิจัยนี้ และขอขอบคุณ ศูนย์วิจัยนาโนเทคโนโลยีบูรณาการ มหาวิทยาลัยขอนแก่น และศูนย์เครื่องมือกลางมหาวิทยาลัยมหาสารคามที่ได้สนับสนุน ทางด้านการใช้เครื่องมือในการตรวจวิเคราะห์

ขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการทั้งสองท่าน คือ รองศาสตราจารย์ ดร. วิทยา อมรกิจ บำรุง และ รองศาสตราจารย์ ดร.สันติ แม่นศิริ ที่คอยให้คำแนะนำและเป็นที่ปรึกษาของโครงการด้วยดีเสมอมา

ขอขอบ ส่วนดีของงานวิจัยนี้ เป็นเครื่องบูชาพระคุณบิดา -มารดา ครู-อาจารย์ ที่มีส่วนให้ชีวิต และปัญญาแก่ผู้วิจัยด้วยดีเสมอมา

ดร.อาทิตย์ ฉิ่งสูงเนิน

บทนำ

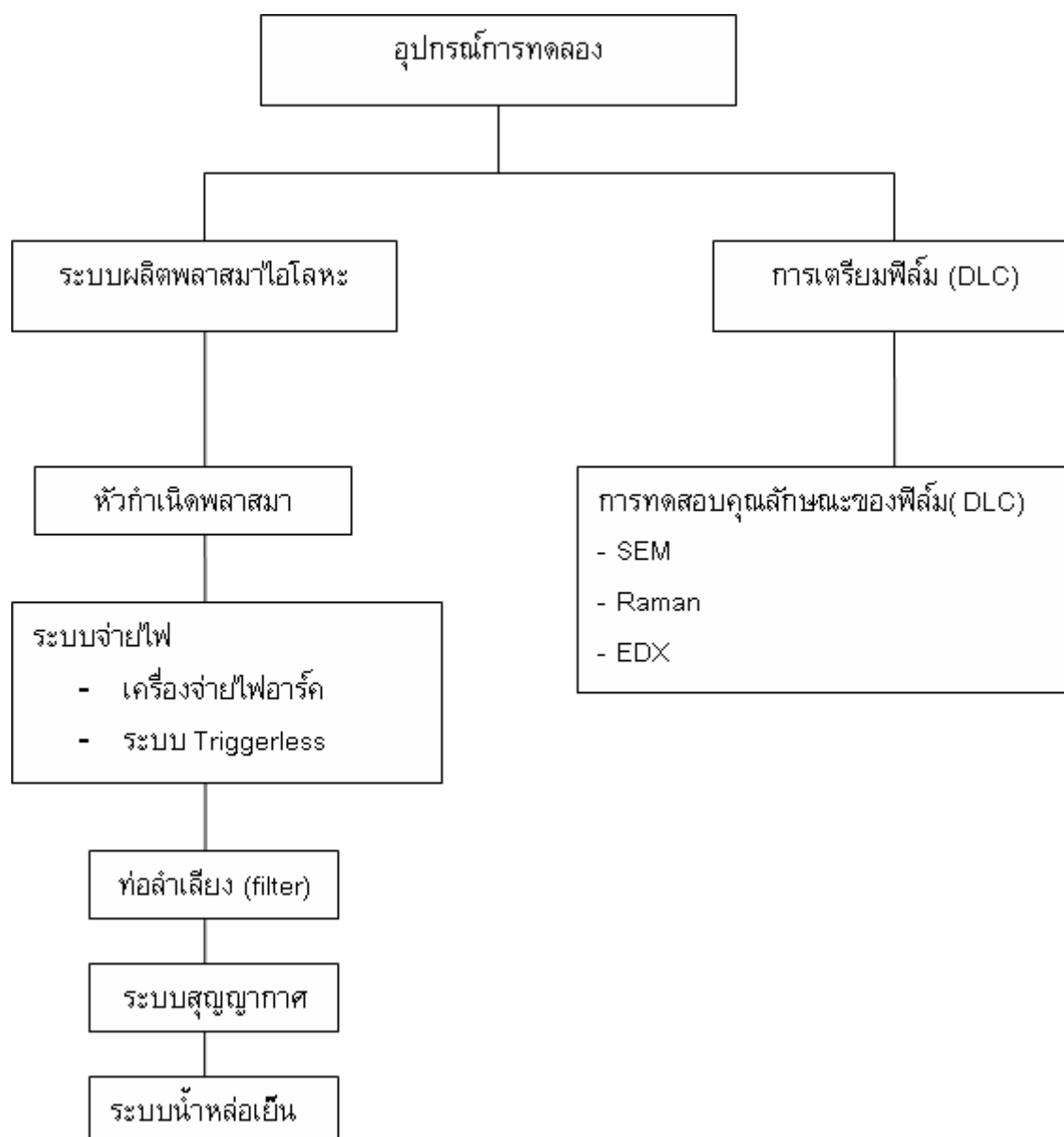
ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชรมีคุณสมบัติเด่นหลายประการเช่น มีความแข็ง (Hardness) ความเสียดทานน้อย (Low friction) โปร่งแสง (Optical transparency) เป็นฉนวนไฟฟ้า (Electrical insulator) มีความเฉื่อยทางเคมี (Chemical inertness) และมีความเรียบสูง (High smoothness) เมื่อนำไปเคลือบลงบนผิววัสดุจะช่วยเพิ่มความแข็งและความทนทานต่อการกัดกร่อนของวัสดุนั้นๆ ได้ ดังนั้นการประยุกต์ใช้ฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชรจึงมีได้หลากหลาย แต่การปลูกฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชรจากวิธีการตกสะสมด้วยไอเคมี (Chemical vapor deposition, CVD) จะประสบปัญหาเกี่ยวกับความสามารถในการยึดเกาะกับพื้นผิวของวัสดุที่ทำการเคลือบ และคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำและการนำไฟฟ้านั้นยังไม่ดีพอ ในงานวิจัยนี้จึงได้พัฒนาระบบการเคลือบฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชรจากวิธีการตกสะสมด้วยไอกายภาพ (Physical vapor deposition, PVD) แบบการอาร์คในสุญญากาศชนิดแคโทดคู่ (ใช้แท่งแกรไฟท์และแท่งไทเทเนียมบริสุทธิ์เป็นขั้วแคโทด) แนวทางหนึ่งที่น่าสนใจของการประยุกต์จากวิธีนี้คือ การเจืออะตอมของไทเทเนียมระหว่างการปลูกฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร เมื่อทำในเงื่อนไขที่เหมาะสมจะทำให้เกิดฟิล์ม DLC:Ti ซึ่งเมื่อนำมาเคลือบลงบนผิววัสดุจะช่วยเพิ่มความแข็ง, ความต้านทานต่อการกัดกร่อน และช่วยให้ผิววัสดุมีความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด (Superhydrophobic) ในกรณีที่นำมาเคลือบลงบนผิวกระจกจะทำให้ผิวกระจกมีความเรียบและแข็งขึ้นกว่าเดิม ดังนั้นเมื่อผิวกระจกดังกล่าวโดนน้ำจะช่วยลดคราบน้ำที่เกาะบนผิวของกระจก อีกทั้งฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชรที่ถูกเจือด้วยอะตอมของไทเทเนียมยังมีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอีกด้วย ดังนั้นองค์ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมการเคลือบเพื่อเพิ่มความคงทน, ความแข็ง, และความเรียบของผิววัสดุต่างๆ จนโมเลกุลของน้ำไม่สามารถยึดติดได้ แต่โมเลกุลของน้ำที่ไหลผ่านผิววัสดุกลับนำพาฝุ่นละอองและสิ่งสกปรกไปด้วย จึงกลายเป็นการทำความสะอาดผิวด้วยตัวเอง (Self cleaning surface) ซึ่งทำให้ง่ายต่อการทำความสะอาดอย่างมาก

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อวิจัยและพัฒนาองค์ความรู้เกี่ยวกับการปลูกฟิล์มด้วยวิธีการอาร์คในสุญญากาศ และเพื่อเพิ่มคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำของฟิล์มมากขึ้นและมีการนำไฟฟ้ามากขึ้นจากการเจือด้วยอะตอมของธาตุไทเทเนียม

วิธีการทดลอง

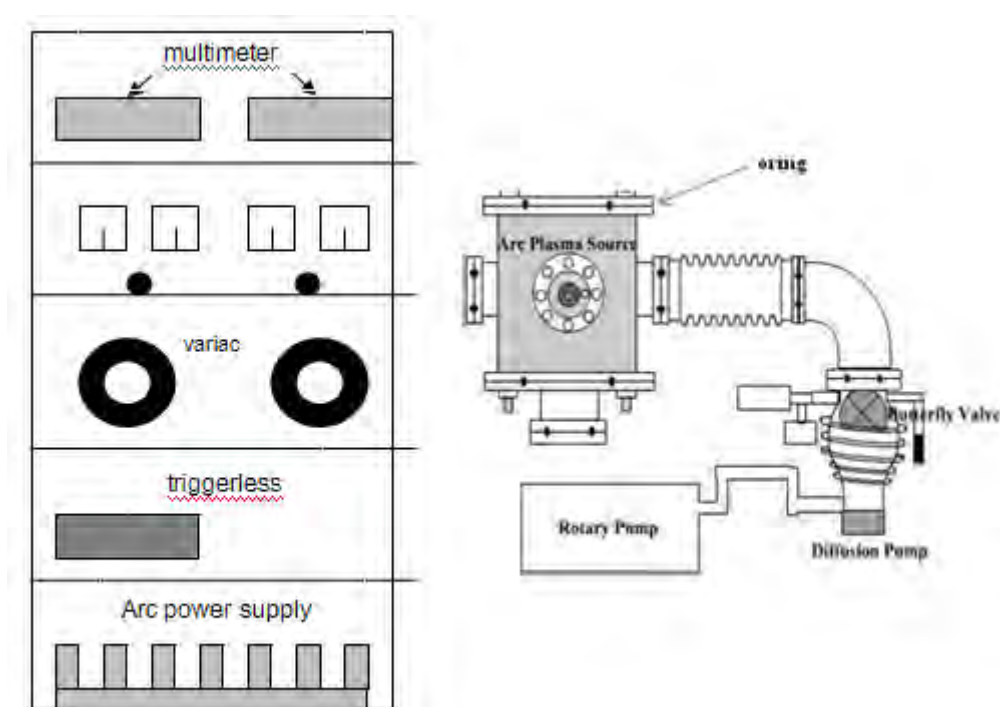
ในการศึกษาการเกิดพลาสมาจากเครื่อง MEVVA หรือพลาสมาไอโโลหะที่เกิดจากการอาร์คในสุญญากาศเพื่อเตรียมฟิล์มคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC) และเพื่อศึกษาคุณลักษณะของฟิล์มคาร์บอนคล้ายเพชร (DLC) ที่ได้จากวิธีแคโทดอาร์คพลาสมานั้นประกอบไปด้วย 2 ระบบ คือ ระบบการผลิตพลาสมาไอโโลหะ และระบบการเตรียมฟิล์มคาร์บอนคล้ายเพชรโดยมีส่วนประกอบและอุปกรณ์ที่สำคัญดังแสดงในแผนภาพในภาพที่ 1 ดังนี้



ภาพที่ 1 แผนภาพระบบและอุปกรณ์ในการศึกษาพลาสมาไอโโลหะ

ระบบผลิตพลาสมาไอโโลหะ

ระบบผลิตพลาสมานั้นแบ่งออกเป็น 4 ส่วนตามลักษณะหน้าที่ ได้แก่ หัวกำเนิดพลาสมาซึ่งทำหน้าที่สร้างพลาสมาไอโโลหะ ระบบจ่ายไฟทำหน้าที่สะสมและจ่ายพลังงานให้กับหัวกำเนิดและส่วนสนับสนุน ท่อลำเลียงทำหน้าที่ควบคุมทิศทางพลาสมาที่แตกตัวจากหัวกำเนิดพลาสมาและระบบสุญญากาศซึ่งทำหน้าที่กำหนดสภาพแวดล้อมสำหรับการเกิดพลาสมา โดยรายละเอียดในภาพรวมแสดงดังภาพที่ 2 และมีรายละเอียดในแต่ละส่วน



ภาพที่ 2 แผนภาพรวมของระบบในการสร้างพลาสมาไอโโลหะ

หัวกำเนิดพลาสมา

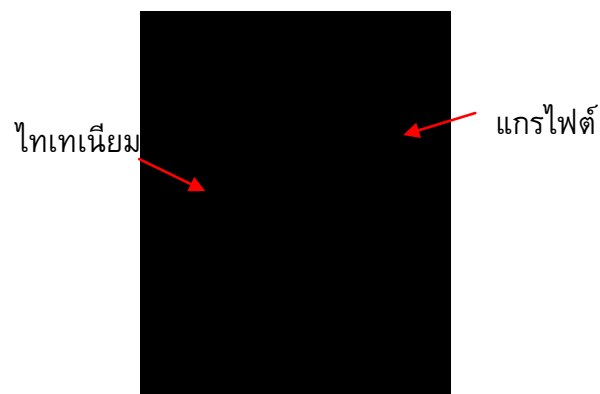
ในส่วนแรกของงานวิจัยได้ทำการสร้างส่วนประกอบย่อยของหัวกำเนิดพลาสมาแบบอาร์คดังนี้

หน้าแปลน ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม เป็นส่วนที่ทำหน้าเชื่อมต่อกับห้องสุญญากาศ มีเส้นผ่านศูนย์กลางวงนอก 168 mm วงใน 56mm หนา 9.50 mm สามารถที่จะใช้งานกับระบบสุญญากาศที่มีอยู่แล้วได้

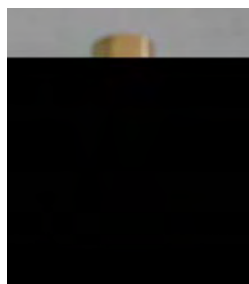


ภาพที่ 3 หน้าแปลนเหล็กกล้าไร้สนิม

ขั้วแคโทด เป็นขั้วไฟฟ้าที่ทำจากแท่งโลหะที่ต้องการผลิตพลาสมา ซึ่งในโครงการนี้ได้ใช้แท่งแกรไฟต์และแท่งไทเทเนียมที่มีความบริสุทธิ์ประมาณ 99.997 เปอร์เซ็นต์เป็นขั้วแคโทด มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.6 cm. ยาว 2.5 cm.



ภาพที่ 4 ขั้วแคโทดที่ทำจากแท่งแกรไฟต์และแท่งไทเทเนียม



ภาพที่ 5 ขั้วแอโนด

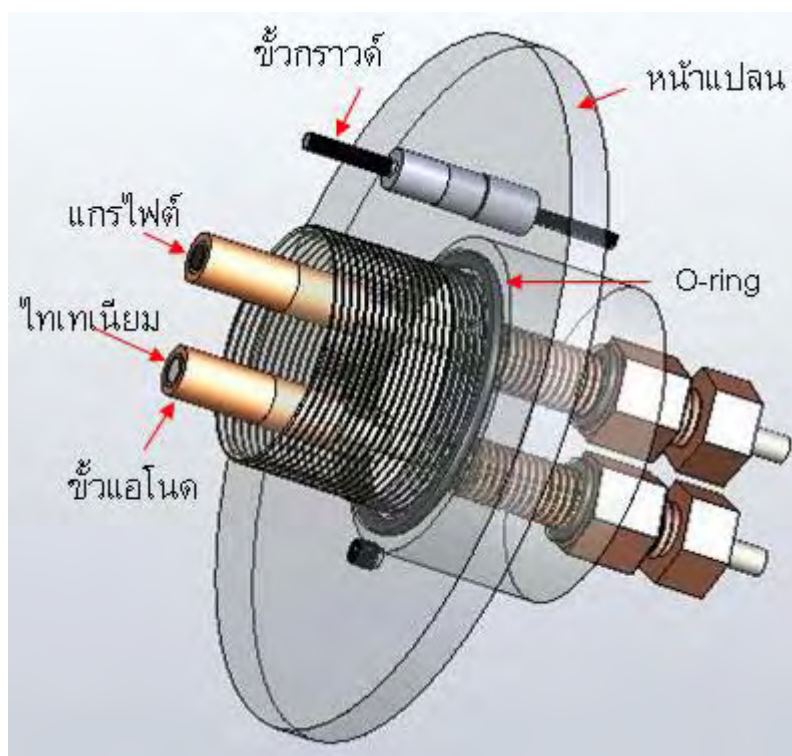


6 เทปลอน (teflon)

ขั้วแอโนด เป็นขั้วไฟฟ้าอีกขั้วหนึ่งที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับกระบวนการอาร์คซึ่งในโครงงานนี้ใช้ท่อทองเหลือง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.8 cm. และภายนอก 1.0 cm. ประกอบเข้ากับท่อแก้วไฟเร็กที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.6 cm. และภายนอก 0.8 cm. ทำหน้าที่เป็นฉนวนกันระหว่างขั้วแคโทดกับขั้วแอโนด

เทพลอน (Teflon) เป็นสารประกอบพอลิเมอร์ มีจุดหลอมเหลวสูงเป็นฉนวนไฟฟ้าทำหน้าที่เป็นตัวหุ้ม (holder) ขั้วไฟฟ้าและเป็นตัวกำหนดระยะห่างระหว่างขั้วแคโทดทั้งสอง อีกทั้งยังทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมต่อกับหน้าแปลนโลหะไร้สนิมอีกด้วย

ในโครงนี้เป็นการสร้างพลาสมาอาร์คในสุญญากาศชนิดแคโทดคู่เริ่มต้นจากการอาศัยสนามไฟฟ้าแรงสูง ระหว่างขั้วแคโทดโลหะบริสุทธิ์กับขั้วแอโนด ที่วางแยกห่างกันด้วยระยะเพียงเล็กน้อยภายใต้สุญญากาศ เป็นกลไกที่ทำให้พื้นที่เล็กๆ ที่ไม่เรียบของแคโทดเกิดการระเบิดด้วยสนามไฟฟ้าความเข้มสูง และเกิดการไอออไนซ์กลายเป็นพลาสมา มีส่วนประกอบต่างๆ ของหัวกำเนิดพลาสมาอาร์คแสดงได้ดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 แผนภาพจำลองส่วนประกอบตามขนาดจริงของหัวกำเนิดพลาสมา

การติดตั้งส่วนประกอบต่าง ๆ



ภาพที่ 8 ส่วนประกอบต่างๆ ของหัวกำเนิดพลาสมา



ภาพที่ 9 โอริงขนาดต่างๆ

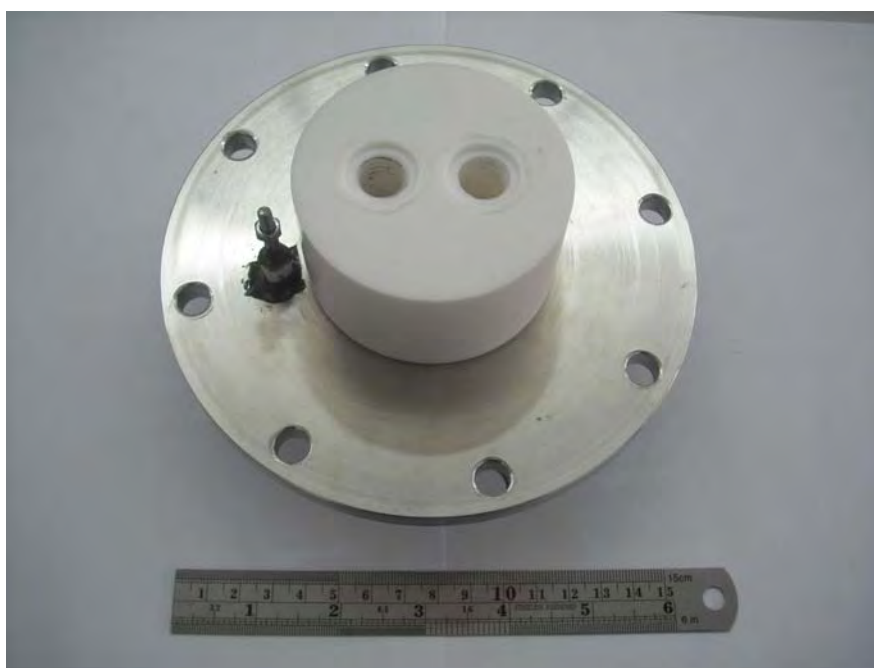
ขั้นตอนการประกอบหัวอาร์ค

1. ติดข้อทริกเกอร์กับแปลนและ O-Ring ขนาด $R_{in} = 61 \text{ mm}$ หน้า 3.5 mm



ภาพที่ 10 การติดตั้งข้อทริกเกอร์กับแปลน

2. ติดตั้ง Teflon กับหน้าแปลน



ภาพที่ 11 การติดตั้ง Teflon กับหน้าแปลน

3. ติดตั้ง O-Ring ขนาด $R_{in} = 14 \text{ mm}$ หน้า 2.5 mm



ภาพที่ 12 การติดตั้ง O-Ring เข้ากับ Teflon

4. ติดตั้งเกลียว screw 1 และขันให้แน่น



ภาพที่ 13 การติดตั้งเกลียว screw เข้ากับ Teflon

5. ติดตั้งขั้วแอโนดเข้ากับ Teflon โดยมีแท่งแก้วอยู่ในแอโนด



ภาพที่ 14 การติดตั้งขั้วแอโนดเข้ากับ Teflon

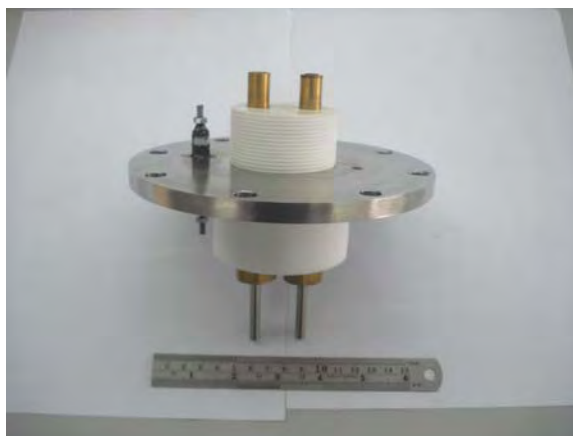
6. ประกอบส่วนของแคโทด

- O-ring ขนาด $R_{in} = 6 \text{ mm}$ หน้า 2 mm
- ไทเทเนียม
- แกรไฟต์
- แท่ง stainless steel



ภาพที่ 15 ส่วนประกอบของแคโทด

7. ประกอบส่วนของแคโทดกับชุดการติดตั้งที่ 5



ภาพที่ 16 การประกอบส่วนของแคโทดกับชุดการติดตั้งที่ 5

8. ติดตั้งเกลียว screw 2 และขันให้แน่น



ภาพที่ 17 การติดตั้งเกลียว screw 2

9. ติดตั้งปลอกแอโนด

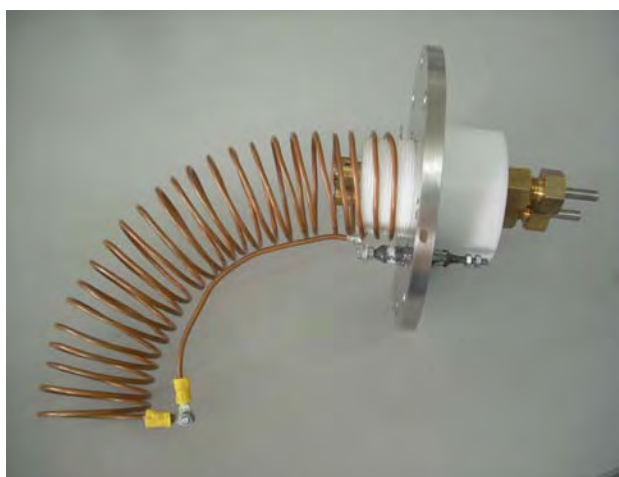


ภาพที่ 18 การติดตั้งปลอกแอโนด

10. สร้างขดลวดโซลินอยด์และติดตั้งเข้ากับหัวอาร์ค



ภาพที่ 19 ขดลวดโซลินอยด์ที่สร้างขึ้น



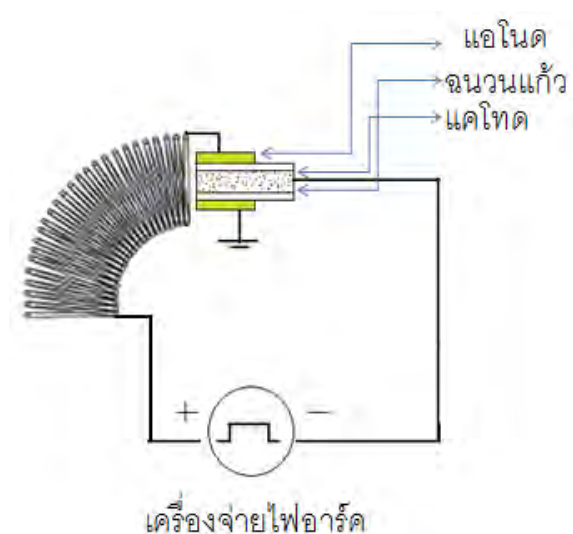
ภาพที่ 20 การติดตั้งขดลวดโซลินอยด์ที่สร้างขึ้นเข้ากับหัวอาร์ค

การใช้ขดลวดโซลินอยด์เป็นท้อลำเลียงพลาสมา

โดยธรรมชาติของพลาสมาที่ผลิตได้จากเครื่องกำเนิดพลาสมาโลหะชนิด MEVVA จะมีอนุภาคนิวตรอนขนาดใหญ่ปะปนออกมาด้วยซึ่งมีข้อจำกัดสำหรับการประยุกต์การใช้งานทำฟิล์มบาง จึงได้มีการใช้ท้อลำเลียงพลาสมาที่ทำจากขดลวดโซลินอยด์ทั้งตรงและโค้งมาทำหน้าที่กรองอนุภาคนิวตรอนขนาดใหญ่เหล่านั้นออกจากพลาสมา [Anders,1993;Anders1994] สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจะไม่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของอนุภาคนิวตรอนขนาดใหญ่ซึ่งค่าประจุต่อมวลน้อยมาก ในขณะที่ไอออนและอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่แบบเกลียวรอบเส้นแรงแม่เหล็กตามแนวแกนของท้อลำเลียงจนออกจากปลายท้อและวิ่งเข้าสู่ชิ้นงานโดยปราศจากอนุภาคนิวตรอนขนาดใหญ่

การสร้างสนามแม่เหล็กในท่อลำเลียงของงานวิจัยนี้ ทำได้โดยการนำท่อลำเลียงที่ทำจาก โซลินอยด์โค้งต่ออนุกรมเข้ากับแอโนด เพื่อใช้กระแสอาร์คเป็นตัวสร้างสนามแม่เหล็ก

ขดลวด



ภาพที่ 21 ภาพจำลองการติดตั้งท่อลำเลียงพลาสมาชนิดโซลินอยด์โค้งโดยต่ออนุกรมเข้ากับกับหัวกำเนิดพลาสมาและเครื่องจ่ายไฟอาร์ค

ภาคจ่ายไฟ

ในการทำงานของระบบผลิตพลาสมาโลหะนั้นระบบจ่ายไฟเป็นระบบที่สำคัญโดยตรง ซึ่งในการทำ การทดลองจะต้องใช้ระบบจ่ายไฟที่ต้องอาศัยการทำงานร่วมกันของ 2 ระบบด้วยกัน คือ ระบบจ่ายไฟทริกเกอร์แบบพัลส์และระบบจ่ายไฟอาร์คแบบพัลส์ โดยระบบจ่ายไฟของทั้งสองระบบมีรายละเอียดในการทำงานดังต่อไปนี้

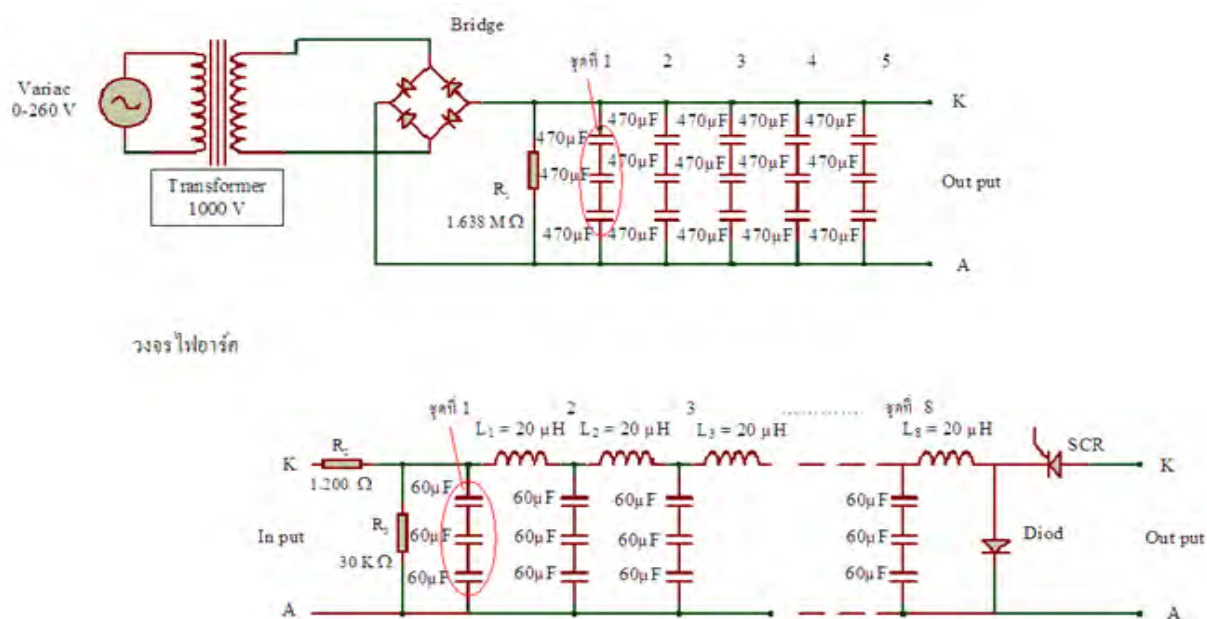
$$T=2N\sqrt{LC} \quad \dots (1)$$

$$Z=\sqrt{\frac{L}{C}} \quad \dots (2)$$

$$I=\frac{U_0}{Z+R_{(load)}} \quad \dots (3)$$

โดยที่

N คือ	จำนวนชุดของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ
L คือ	ค่าความเหนี่ยวนำ (เฮนรี) $L=L_1=L_2=...=L_n$
C คือ	ค่าตัวเก็บประจุ (ฟารัด) $C=C_1=C_2=...=C_n$
U_0 คือ	ค่าแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟตรง (โวลต์)



ภาพที่ 22 แสดงแผนผังวงจรเครื่องจ่ายไฟอาร์ค

ตารางที่ 1 ทดสอบแหล่งจ่ายไฟอาร์ค เมื่อปรับค่าที่หม้อแปลงปรับค่าได้ (Variac) กับแรงดันเอาต์พุต (V_{output}) ของแหล่งจ่ายไฟอาร์ค

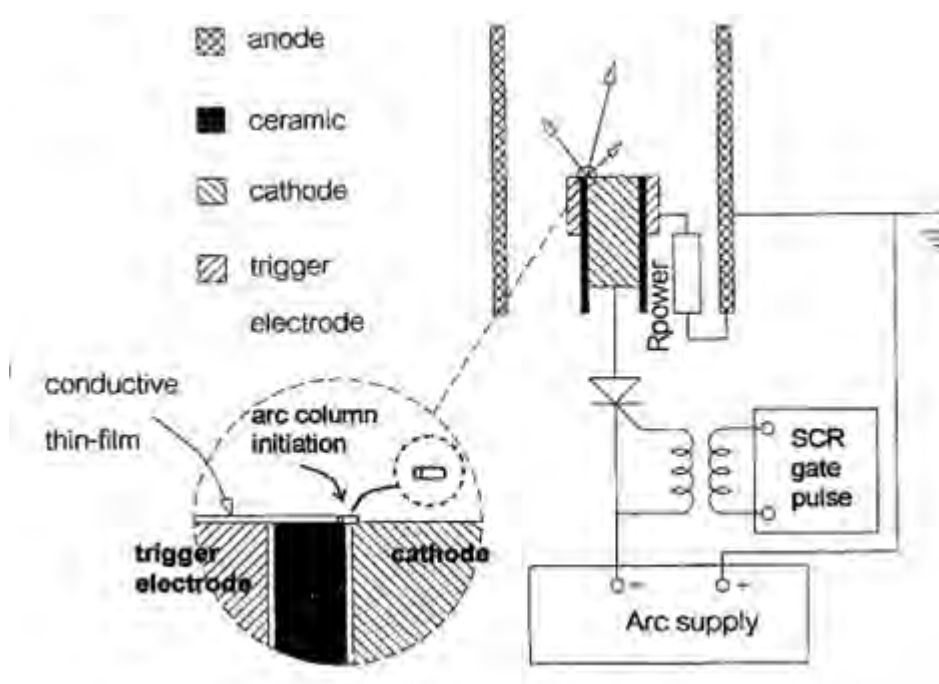
แรงดัน Variac (V)	แรงดันเอาต์พุต (V_{peak})
10	61
20	126
30	188
40	250
50	312
60	375
70	441
80	498
90	562
100	620

การจุดอาร์คโดยไม่ใช้เครื่องทริกเกอร์

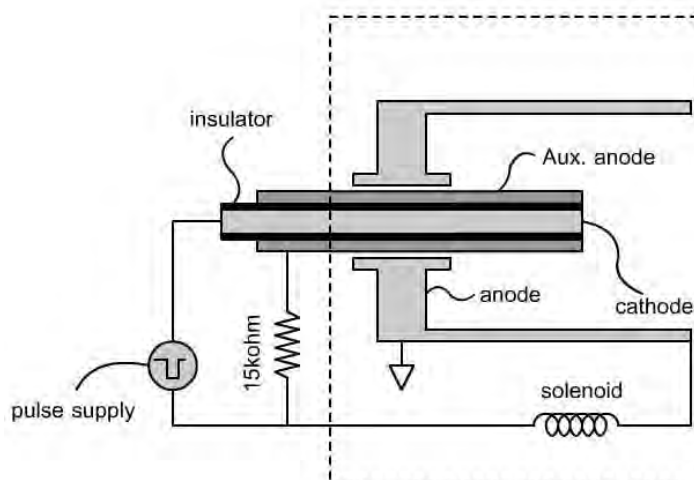
การจุดอาร์คโดยไม่ใช้ทริกเกอร์นี้ จะอาศัยกระแสจากเครื่องจ่ายไฟอาร์คในการจุดอาร์ค ทำให้ภาคจ่ายไฟของโครงงานนี้มีความกะทัดรัดมากขึ้นและไม่ต้องจ่ายไฟถึง 2 ตัว ซึ่งเป็นเหตุผลที่นำการจุดอาร์คโดยไม่ใช้เครื่องทริกเกอร์มาใช้ในโครงงานในครั้งนี้

เพื่อให้สามารถใช้การจุดอาร์คด้วยวิธีนี้ได้ จึงต้องมีการปรับเปลี่ยนเครื่องจ่ายไฟอาร์คเพิ่มเติม ดังภาพที่ 22 ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลักๆ ดังนี้

1. High-current silicon controlled rectifier (SCR) thyristor switch ทำหน้าที่เป็นสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ควบคุมการไหลของกระแสอาร์ค ติดตั้งระหว่างแคโทด กับเครื่องจ่ายไฟอาร์ค
2. ตัวต้านทาน 22 ทนกำลัง 10 ต่อระหว่างขั้วแอโนดกับขั้วทริกเกอร์ มีหน้าที่จำกัดกระแสอาร์ค เริ่มต้นไหลผ่านขั้วทริกเกอร์ไม่มาก เพื่อให้กระแสอาร์คส่วนใหญ่ไหลผ่านพลาสมาไปยังกระบอกแอโนด
3. การเคลือบผิวฉนวนระหว่างแคโทดและขั้วทริกเกอร์ด้วยฟิล์มนำไฟฟ้า สำหรับโครงการนี้ใช้วิธีอย่างง่าย โดยการใช้ดินสอฝนบริเวณผิวหน้าตัดของแท่งแก้วระหว่างหัวแคโทดและขั้วทริกเกอร์ให้มีความต้านทานระหว่างขั้วประมาณ 1-10 ซึ่งก่อให้เกิดการปนเปื้อนพลาสมา ทำให้ต้องมีการจุดอาร์คทิ้งไปอย่างน้อย 200 นัด เพื่อให้ฟิล์มคาร์บอนออกไป ในขณะเดียวกันจะเกิดฟิล์มของแคโทดมาแทนที่ ฟิล์มแคโทดนี้จะอยู่ในสมดุลได้ก็ต่อเมื่ออัตราการกัดกร่อนจากการอาร์คเท่ากับ อัตราการเคลือบของอนุภาคขนาดใหญ่ขณะอาร์ค



ภาพที่ 23 แสดงแผนผังอย่างง่ายของภาคจ่ายไฟที่ไม่ใช้เครื่องทริกเกอร์



ภาพที่ 24 แบบจำลองโครงสร้างหัวเคลือบฟิล์มแบบอาร์คในสุญญากาศโดยไม่ใช้เครื่องทริกเกอร์

ขั้นตอนการเกิดพลาสมาสำหรับการจุดอาร์คโดยไม่ใช้เครื่องทริกเกอร์

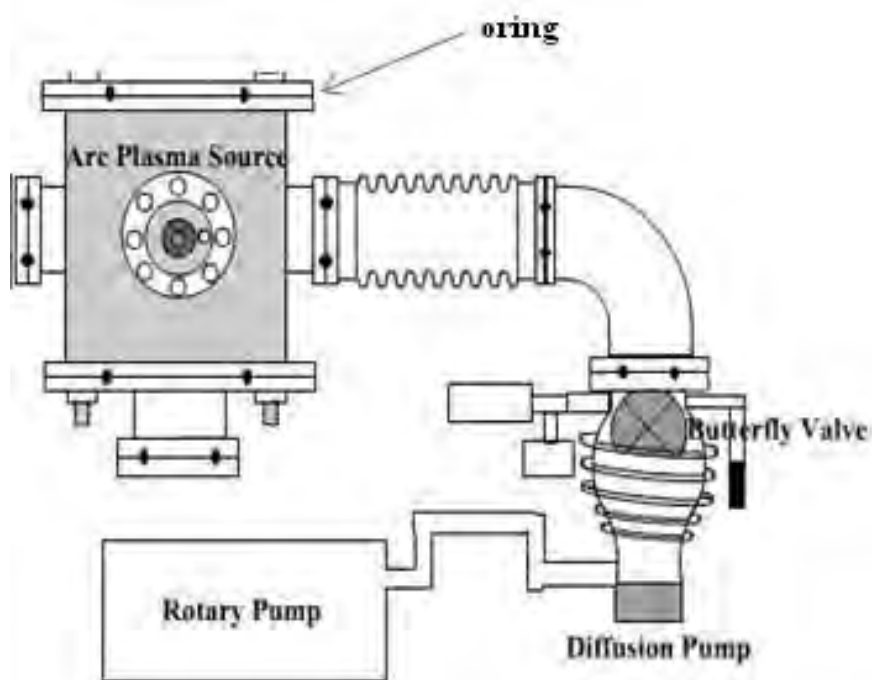
- 1) เริ่มแรกยังไม่มีกระแสไหลผ่านระหว่างขั้วแอโนดและแคโทด และยังไม่มีสัญญาณพัลส์จากเครื่องจ่ายไฟอาร์ค
- 2) SCR gate pulse ส่งสัญญาณให้ SCR เปิด ทำให้กระแสเริ่มต้นสามารถไหลผ่านฟิล์มแกรไฟต์ระหว่างขั้วทริกเกอร์กับขั้วแคโทดได้ โดยจะยังไม่มีกระแสไหลผ่านระหว่างขั้วแอโนดและแคโทด
- 3) ถึงแม้แรงดันจากเครื่องจ่ายไฟอาร์คจะไม่สูงมาก แต่ระยะห่างระหว่างขั้วทริกเกอร์กับแคโทดแคบมาก ฉะนั้น กระแสเริ่มต้นสามารถทำให้เกิดแคโทดสปอทเริ่มต้นบริเวณรอยต่อของฟิล์มแกรไฟต์กับผิวหน้าแคโทดได้ ดังภาพที่.....
- 4) หลังจากที่พลาสมาเริ่มต้นแล้ว จะเริ่มมีกระแสไหลผ่านระหว่างขั้วแอโนดและแคโทดซึ่งเป็นกระแสส่วนมาก ในขณะที่กระแสที่ไหลผ่านขั้วทริกเกอร์จะเป็นกระแสส่วนน้อย เนื่องจากขั้วทริกเกอร์จากมีความต้านทานของตัวต้านทาน 22 และของฟิล์มแกรไฟต์อีกประมาณ 1-10 ทำให้กระแสส่วนมากเลือกไหลผ่านขั้วแอโนด
- 5) เมื่อหมดสัญญาณพัลส์ จาก SCR gate pulse ตัว SCR จะยังไม่ปิดโดยทันที โดยจะยังมีกระแสไหลอยู่ และจะปิดไม่ให้เกิดกระแสไหลในเวลาต่อมา(คุณสมบัติเฉพาะของ SCR)
- 6) กลับเข้าสู่ขั้นตอนการเกิดพลาสมา ขั้นตอนที่หนึ่ง ซึ่งถือว่าเป็นการยิงพลาสมาออกไปหนึ่งนัด

สำหรับข้อดีของการจุดอาร์คแบบไม่ใช้เครื่องทริกเกอร์ เทียบกับการใช้เครื่องทริกเกอร์คือ ไม่ต้องใช้เครื่องจ่ายไฟถึง 2 ตัว ในภาคจ่ายไฟ แต่จะสามารถทำให้เกิดการอาร์คได้ที่ระดับแรงดันต่ำ เพราะว่าการต้องอาศัยกระแสเริ่มต้นจากเครื่องจ่ายไฟอาร์ค ในการจุดอาร์ค แรงดันจึงต้องมีค่าสูงพอในระดับหนึ่ง

ภาคสนับสนุน

เป็นระบบพื้นฐานทั่วไปที่มีความจำเป็นในการทดลอง ซึ่งมีหน้าที่ในการสร้างสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมในการทดลองเพื่อทำการผลิตพลาสมาและทำการวิเคราะห์สมบัติต่างๆ โดยระบบสนับสนุนได้แก่

ก) ระบบสุญญากาศ ถือว่าเป็นระบบที่มีความสำคัญอย่างมากในการทำโครงการนี้เนื่องจากว่าเป็นระบบตั้งต้นที่จะใช้ในการทำการทดลองต่างๆ โดยในระบบสุญญากาศจะประกอบไปด้วย



ภาพที่ 25 แสดงส่วนประกอบของระบบสุญญากาศ



ภาพที่ 26 ห้องสุญญากาศหรือแชมเบอร์สำหรับใส่หัวกำเนิดพลาสมา



ภาพที่ 27 ปั๊มกลโรตารี (rotary pump)



ภาพที่ 28 ปั๊มไอแพร่ (diffusion pump)

ข) ระบบน้ำหล่อเย็นได้มีการดัดแปลงเครื่องปรับอากาศให้สามารถผลิตน้ำอุณหภูมิ $\approx 10^{\circ}\text{C}$ โดยการปั้มน้ำในถึงเก็บให้มีการไหลผ่านสัมผัสต่อความเย็นทำให้กระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนมีประสิทธิภาพสูงขึ้น

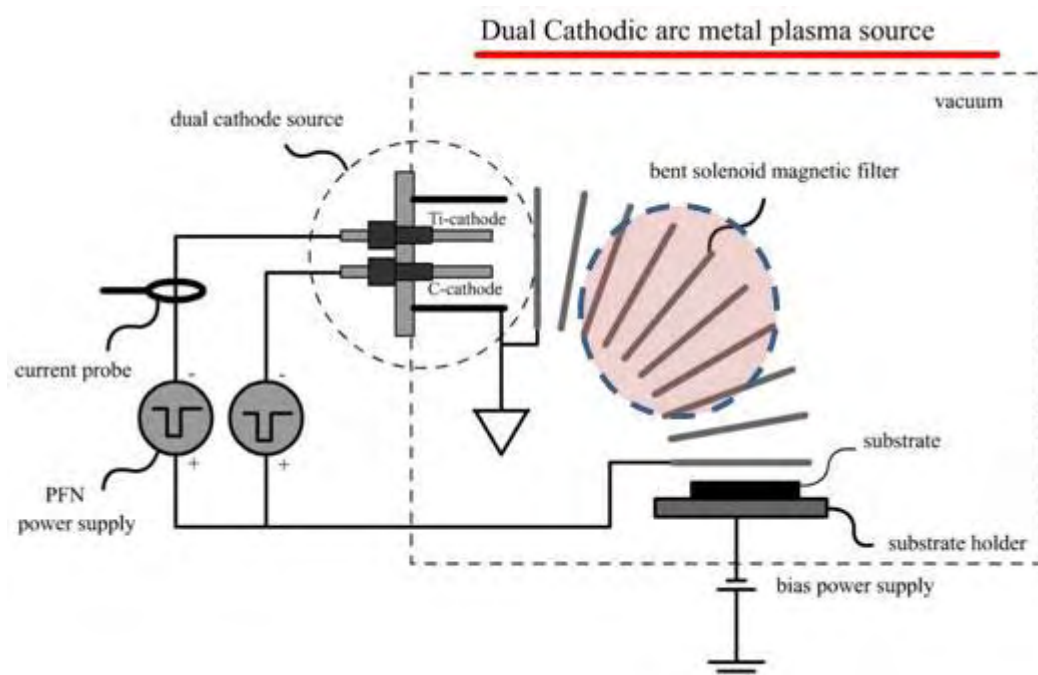
ค) ระบบแก๊สใช้ในการทดลองที่ต้องการสร้างพลาสมาโลหะในบรรยากาศของแก๊ส มีถึงเก็บแก๊สขนาดเล็กไว้ใช้เพื่อสะดวกในการเติมและเปลี่ยนแก๊สที่ต้องการศึกษา นอกจากนี้ยังต้องมีวาล์วรูเข็มสำหรับควบคุมการไหลของแก๊สดังกล่าวด้วย

ผลการทดลอง

ผลการทดสอบการทำงานของหัวอาร์ค

จากการทดสอบการทำงานของหัวอาร์คสูญญากาศ พบว่าการอาร์คต้องเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องอย่างน้อยเป็นเวลา 10-20 นาที และสังเกตเห็นลำพลาสมาพุ่งออกมาจากขั้วแคโทดในลักษณะที่โค้งงอตามขดลวดโซลินอยด์ ซึ่งได้บันทึกผลการอาร์ค 2 เทคนิค คือ

จากภาพถ่าย วิธีนี้ได้ใช้กล้องดิจิตอลบันทึกภาพอย่างต่อเนื่องตามจังหวะการอาร์คของหัวอาร์ค ซึ่งได้จัดตั้งอุปกรณ์ตามภาพที่ 29



ภาพที่ 29 การสังเกตการอาร์คโดยใช้กล้องดิจิตอล (ตามตำแหน่งเส้นประเงา)

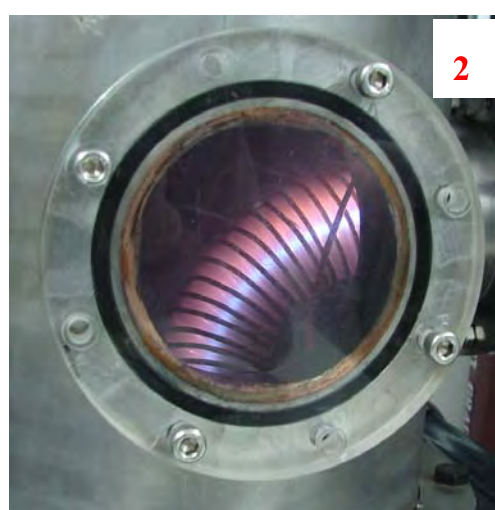
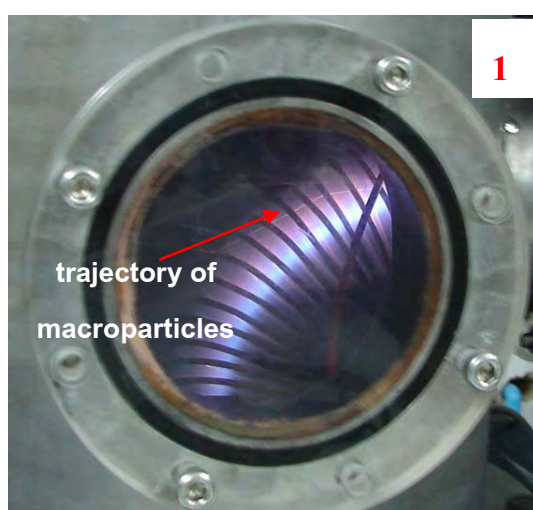
โดยในการทดลองจะทำการเก็บภาพ โดยเงื่อนไขในการทดลองนั้นคือ แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขั้วแคโทด 600 โวลต์ ที่ความดัน 10^{-5} mbar จำนวนรอบของขดลวดโซลินอยด์ 24 รอบ ความถี่การอาร์ค 2 Hz ซึ่งภาพถ่ายก่อน การอาร์คแสดงได้ในภาพที่ 30 และหลังจากการอาร์คโดยไม่มีขดลวดโซลินอยด์แสดงได้ในภาพที่ 31 ซึ่งจะสังเกตเห็นการฟุ้งกระจายของพลาสมาที่เกิดจากการอาร์คเนื่องจากพลังงานจลน์ที่เหลืออยู่หลังการระเบิดที่จุดแคโทดสปีท แต่เมื่อเราใช้สนามแม่เหล็กที่อยู่ในแนวแกนของขดลวดโซลินอยด์ช่วยเบี่ยงเบนพลาสมา พบว่าส่วนใหญ่ของพลาสมาถูกกักอยู่ในแนวแกนของขดลวดดังแสดงได้ในภาพที่ 32 (ก) แท่งแกรไฟต์เป็นขั้วแคโทดและ 32 (ข) แท่งไทเทเนียมเป็นขั้วแคโทด จะเห็นว่าสีที่เปล่งออกมาจากพลาสมาที่เกิดจากขั้วแคโทดชนิดต่างกันจะแตกต่างกัน ซึ่งจำเป็นจะต้องใช้เครื่องมือวิเคราะห์สเปกตรัมช่วยในการระบุชนิดของธาตุอีกทีหนึ่ง



ภาพที่ 30 ภาพถ่ายก่อนการอาร์ค



ภาพที่ 31 ภาพถ่ายพลาสมาอาร์คในสถานะที่ไม่มีขดลวดโซลินอยด์



(ก) แท่งแกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด (ข) แท่งไทเทเนียมเป็นขั้วแคโทด

ภาพที่ 32 ลักษณะลำพลาสมาที่มีการโค้งงอตามแนวสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของขดลวดโซลินอยด์

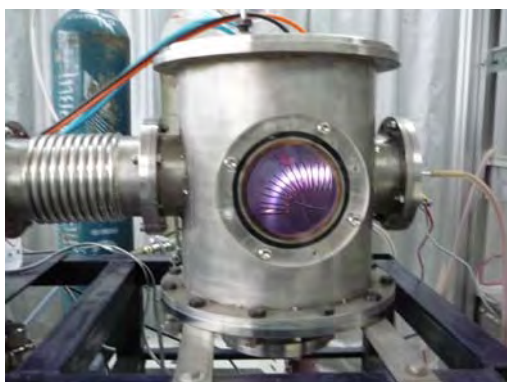
การทดสอบการอาร์คทดสอบหัวกำเนิดพลาสมาอาร์คในสุญญากาศชนิดแคโทดคู่

การทดสอบหัวกำเนิดพลาสมาอาร์คที่ขั้วแกรไฟต์

- ความต่างศักย์ที่จ่ายให้กับขั้วแคโทด 600 โวลต์
- ความดันที่ใช้ 3.47×10^{-5} mbar
- ระยะห่างระหว่าง Substrate กับ โซลินอยด์ฟิเลเตอร์ 10 cm ความถี่ 2 Hz เวลา 5 นาที

การทดสอบหัวกำเนิดพลาสมาอาร์คที่ขั้วไทเทเนียม

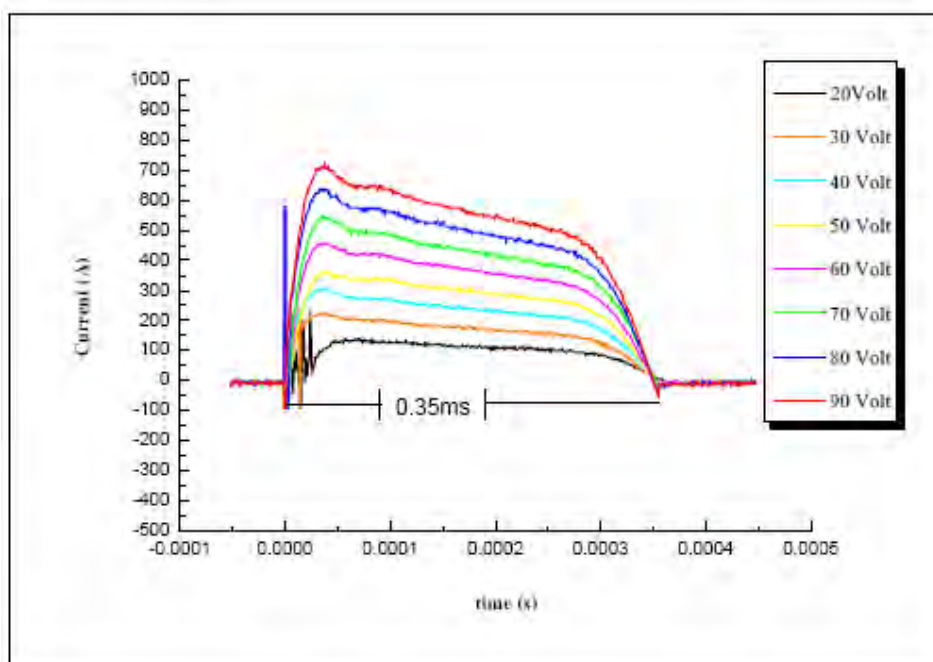
- ความต่างศักย์ที่จ่ายให้กับขั้วแคโทด 600 โวลต์
- ความดันที่ใช้ 4.40×10^{-5} mbar
- ระยะห่างระหว่าง แผ่นฐานกับขดลวดโซลินอยด์ฟิเลเตอร์ เท่ากับ 10 cm ความถี่ 2 Hz เวลา 5 นาที



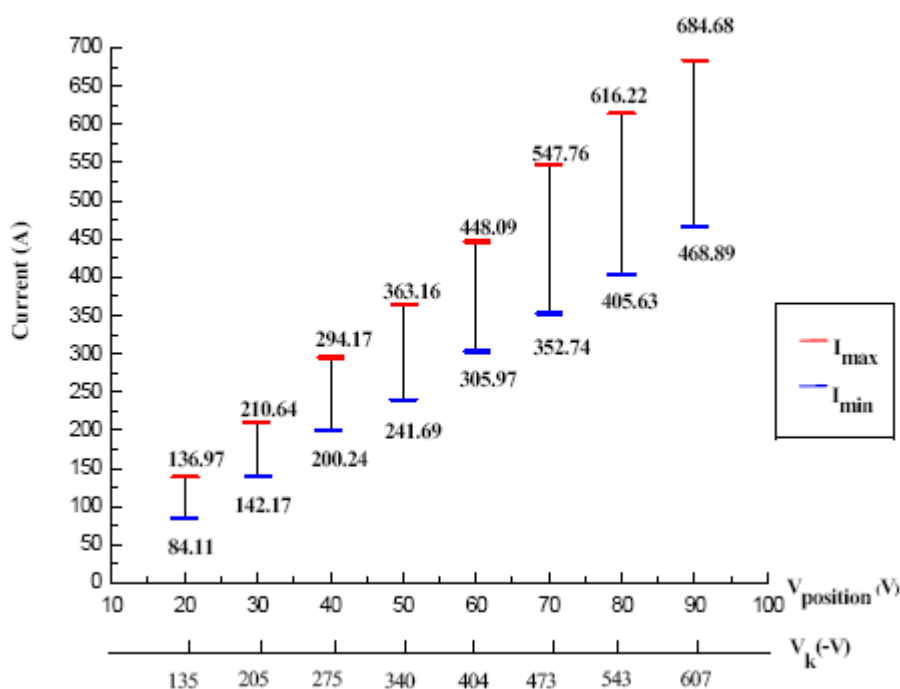
ภาพที่ 33 แสดงการเกิดพลาสมาอาร์คจากการทดสอบหัวกำเนิดพลาสมาอาร์ค

การวัดกระแสในการอาร์ค

การทดลองวัดค่ากระแสอาร์คที่ใช้ในการผลิตพลาสมาไอโลหะจากการอาร์คในสุญญากาศ ภายใต้ความดัน 10^{-5} mbar จากการทดลองพบว่าความกว้างของพัลส์อยู่ที่ประมาณ 0.35 ms กระแสสูงสุด มีค่าประมาณ 684.7 A



ภาพที่ 34 แสดงกราฟการทดลองวัดค่าของกระแสอาร์คกับเวลา

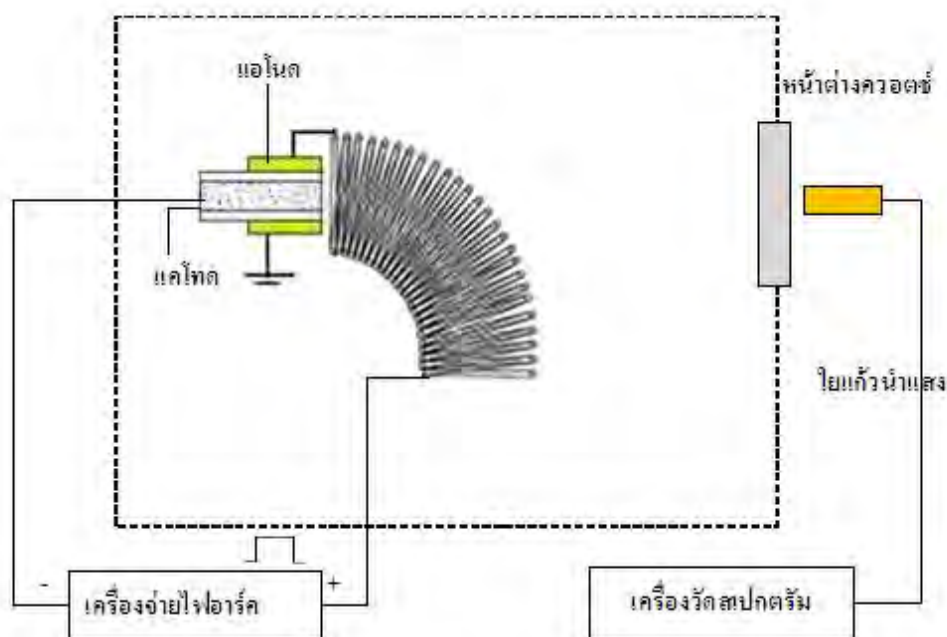


ภาพที่ 35 แสดงค่าต่ำสุด-สูงสุดของกระแสอาร์คจากการปรับแรงดันช่วง 20 -90 V

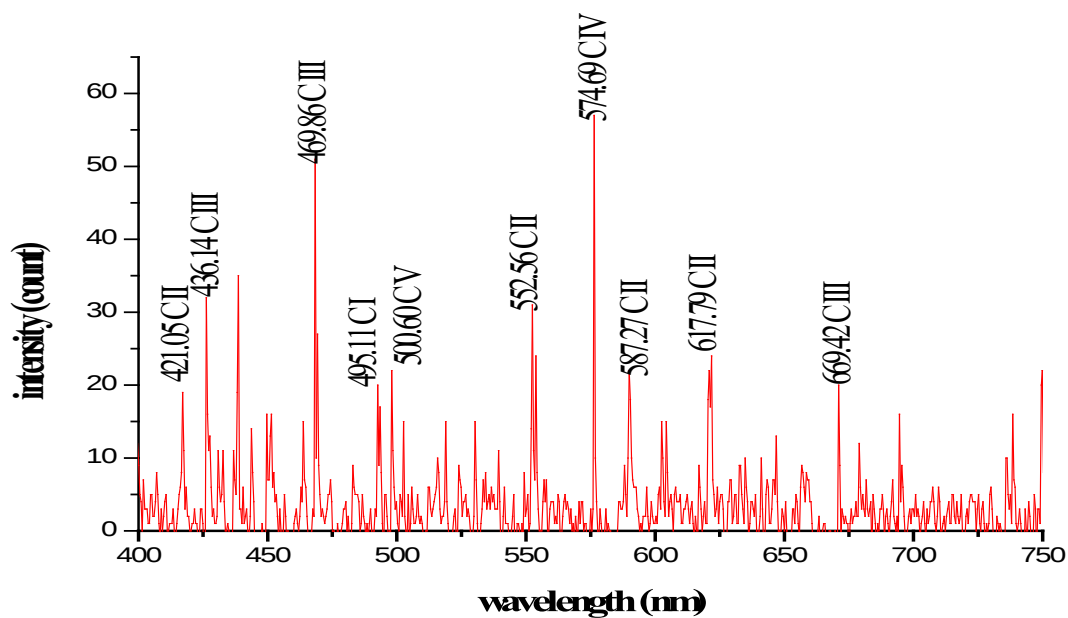
ผลการวิเคราะห์สเปกตรัมทางแสง (optical emission spectroscopy)

โดยใช้เครื่อง HR2000 (Ocean optics company) เพื่อบ่งชี้ชนิดของธาตุหรือชนิดของอะตอมที่เกิดขึ้นเนื่องจากการอาร์คในสุญญากาศ ในงานวิจัยนี้เราสนใจอะตอมของธาตุที่เปล่งแสงออกมาในช่วงความยาวคลื่น 400 – 750 nm โดยเงื่อนไขในการอาร์คยังคงเหมือนเดิมกับตอนที่ 1 คือ แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขั้วแคโทด 600 โวลต์ ที่ความดัน 10^{-5} mbar และความถี่ 2 Hz ทำการทดลองวัดสเปกตรัมของ

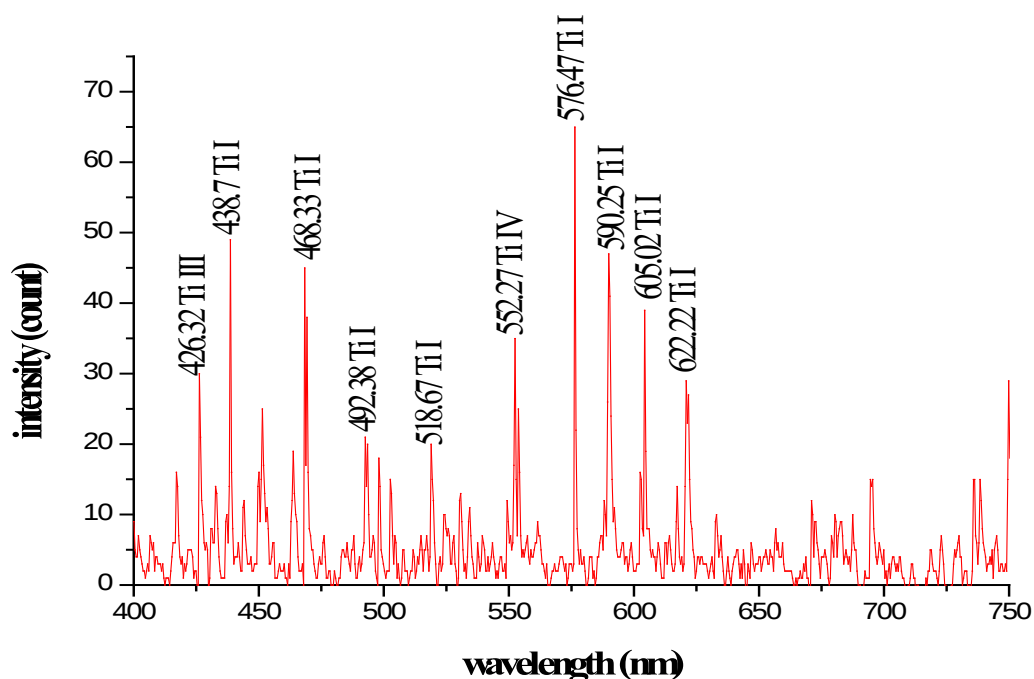
พลาสมาจากขั้ว 2 ชนิด คือ แกรไฟต์ และไทเทเนียมโดยใช้ขดลวดโซลินอยด์ ในการบังคับทิศทางของลำพลาสมา



ภาพที่ 36 แสดงการติดตั้งหัววัดสเปกตรัมทางแสงที่เปล่งออกมาจากพลาสมา



ภาพที่ 37 สเปกตรัมของแสงที่เปล่งออกมาจากพลาสมาของขั้วแคโทดที่ทำจากแท่งแกรไฟต์



ภาพที่ 38 สเปกตรัมของแสงที่เปล่งออกมาจากพลาสมาของข้าวแคโทดที่ทำจากแท่งไทเทเนียม

จากการทดลองวัดสเปกตรัมของแสงที่เปล่งออกมาจากพลาสมาของข้าวแคโทดที่ทำจากแท่งแกรไฟต์และไทเทเนียม พบว่าในช่วงความยาวคลื่น 400-750 nm ได้ลักษณะเส้นสเปกตรัมเป็นตามภาพที่ 36 และ 37 ซึ่งเมื่อนำข้อมูลตำแหน่งของยอดสเปกตรัมไปเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานที่นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองไปเปรียบเทียบกับค่าความยาวของอะตอมคาร์บอนและอะตอมไทเทเนียม จาก NIST spectral database [www.physics.nist.gov/physRefData/ASD/Lines_forn.html] ซึ่งสามารถสรุปได้ตามตารางที่ 2 ดังนี้

ตารางที่ 2 สรุปชนิดของสปีชีส์และค่าพลังงานเปลี่ยนสถานะของอะตอมคาร์บอนและอะตอมแกรไฟต์จากการอาร์คในสุญญากาศ

สเปกตรัมจากการวัดของลำพลาสมา				
ชนิด	ความยาวคลื่น (nm)		ระดับชั้นพลังงานต่ำ	ระดับชั้นพลังงานสูง
	ค่าทดลอง	ค่ามาตรฐาน	Ei (eV)	Ek (eV)
C II	421.05	426.70	18.045808	20.950643
C III	469.86	466.586	38.226470	40.882990
C I	495.11	493.205	7.684766	10.19791
C II	552.56	564.807	20.704210	22.898762
C IV	574.69	580.113	37.54849	39.68507
C II	587.27	589.159	18.045808	20.149649
C II	617.39	601.484	8.643020	10.70376
C III	669.42	674.438	38.226470	40.064292
Ti III	426.32	426.2441	18.252056	21.160002
Ti I	468.33	468.192	0.0479663	2.6953807
Ti IV	552.27	551.772	34.080924	36.327311
Ti I	590.25	589.932	1.052926	3.1540212
Ti I	605.02	606.467	1.046007	3.0898237

หมายเหตุ I ใช้แทนสเปกตรัมจากอะตอม,
 II แทนสเปกตรัมจากไอออนประจุบวกหนึ่ง
 III แทนสเปกตรัมจากไอออนประจุบวกสอง
 IV แทนสเปกตรัมจากไอออนประจุบวกสาม

เช่น Ti I แทนเส้นสเปกตรัมจากอะตอมของไทเทเนียม Ti II แทนสเปกตรัมไอออนประจุบวกหนึ่งของไทเทเนียม เป็นต้น และตัวเลขที่ได้จากการทดลองเป็นตัวเลขของความยาวคลื่นที่ได้จากระบบที่สร้างขึ้นเอง จึงสามารถระบุชนิดของอะตอมหรือไอออนได้

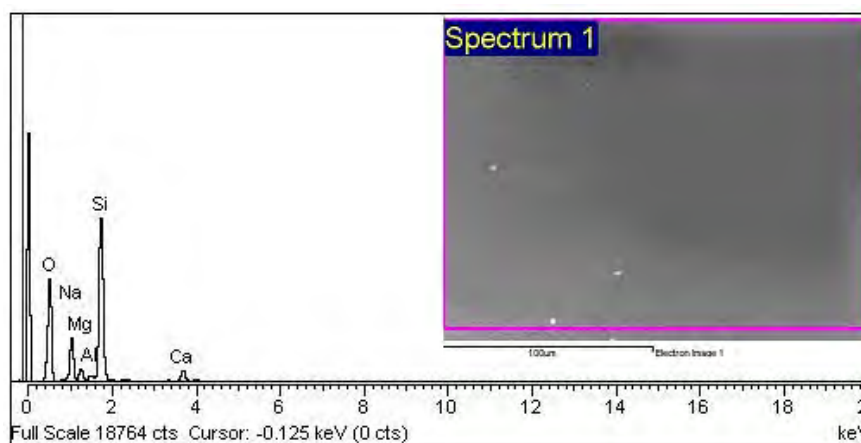
จากการทดลองวัดค่าสเปกตรัมของ แกรไฟต์และไทเทเนียม ซึ่งจะทำให้การเปรียบเทียบค่า เมื่อพิจารณาจากภาพที่ 37 และ 38 ซึ่งสเปกตรัมที่สังเกตได้ชัดเจนที่สุดคือ C IV มีความยาวคลื่น 574.69 nm, C III ที่ความยาวคลื่น 496.86 nm ส่วนในไทเทเนียมสเปกตรัมที่สังเกตได้ชัดเจนที่สุดคือ Ti I มีความยาวคลื่น 576.47 nm, Ti I ที่ความยาวคลื่น 438.60 nm, Ti I ที่ความยาวคลื่น 590.25 nm ตามลำดับ

ผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของฟิล์มคาร์บอนคล้ายเพชรด้วยเทคนิค EDX

ในการทดลองนี้ได้ทำการเตรียมฟิล์มคาร์บอนคล้ายเพชรโดยวิธีการอาร์คในสุญญากาศ เพื่อศึกษาคุณสมบัติเชิงพื้นผิวของฟิล์มคาร์บอนคล้ายเพชรที่ได้จากผลของการให้ความต่างศักย์ลบกับ แผ่นฐานและทดสอบ คุณสมบัติเชิงพื้นผิวของฟิล์มคาร์บอนคล้ายเพชร 2 ส่วน คือ ส่วนแรกทดสอบด้วยใช้

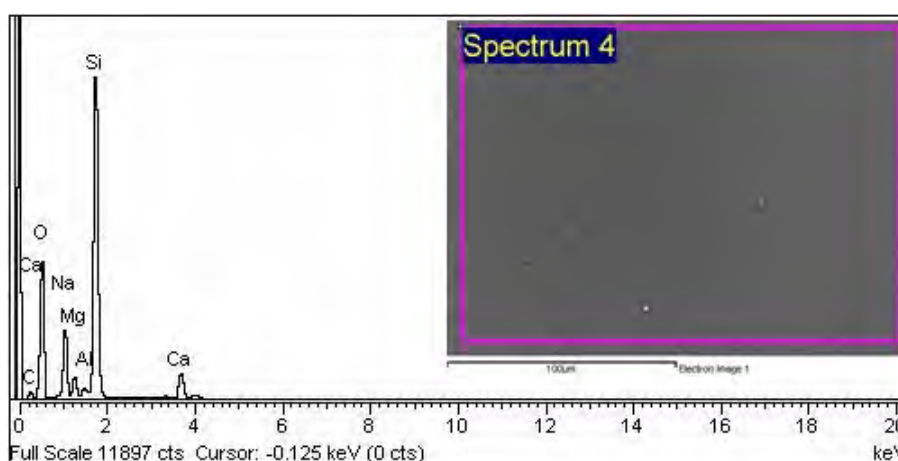
เครื่องอีดีเอกซ์ (Energy Dispersive X-ray, EDX) เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของฟิล์มคาร์บอนคล้ายเพชร ส่วนที่สองทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) เพื่อศึกษาภาพลักษณะโครงสร้างพื้นผิวของฟิล์มคาร์บอนคล้ายเพชรซึ่งมีผลดังต่อไปนี้

ภาพถ่ายและเส้นสเปกตรัมของธาตุต่างๆ เป็นภาพที่ได้จากการทดสอบด้วยเทคนิค EDX ของกระจกสไลด์เปล่า ซึ่งผลที่ได้จากเทคนิค EDX พบว่ามีธาตุ C, O, Si, Mg, Al, Na และ Ca ที่มีความเข้มข้นแตกต่างกันของแต่ละจุดดังภาพที่แสดงต่อไปนี้



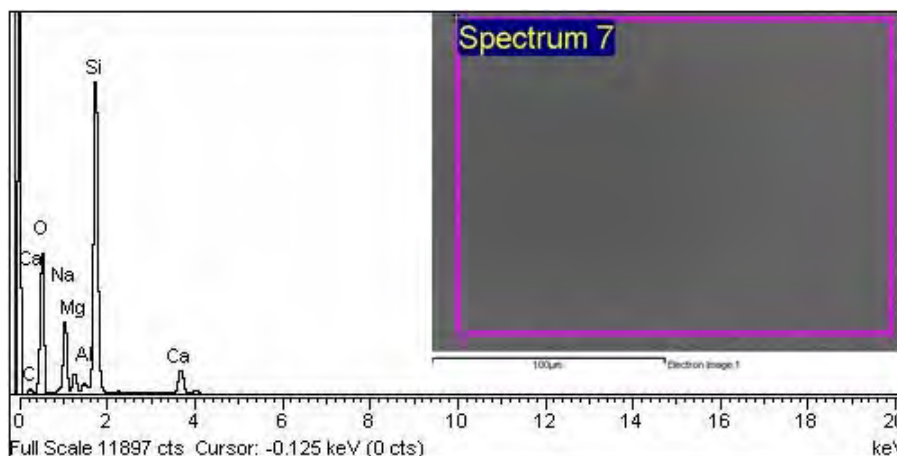
ภาพที่ 39 สเปกตรัมจากจุดบนกระจกสไลด์เปล่า

ภาพที่ 40 คือภาพถ่ายและเส้นสเปกตรัมของธาตุต่างๆ เป็นภาพที่ได้จากการทดสอบด้วยเทคนิค EDX ของฟิล์มคาร์บอนคล้ายเพชรที่ $V_B = 0$ V ซึ่งผลที่ได้จากเทคนิค EDX พบว่ามีธาตุ C, O, Si, Mg, Al, Na และ Ca ที่มีความเข้มข้นแตกต่างกันของแต่ละจุดดังภาพที่แสดงต่อไปนี้



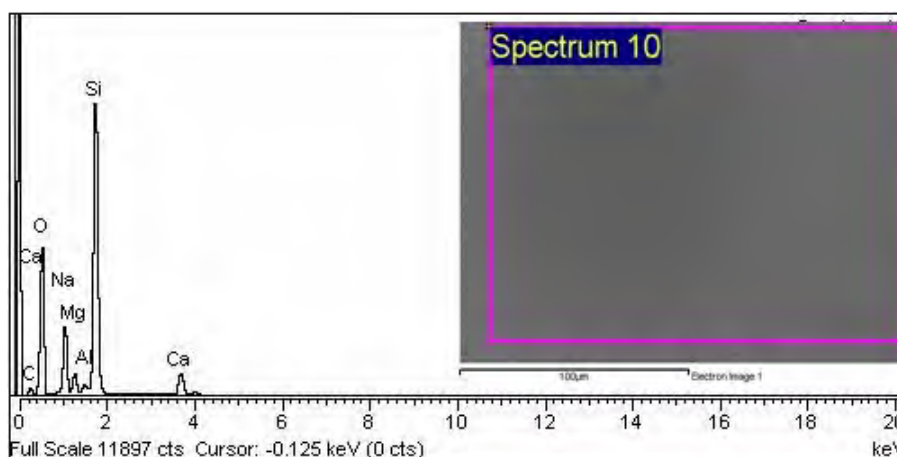
ภาพที่ 40 สเปกตรัมจากจุดบนฟิล์มคาร์บอนคล้ายเพชรที่ $V_B = 0$ V

ภาพที่ 41 ภาพถ่ายและเส้นสเปกตรัมของธาตุต่างๆ เป็นภาพที่ได้จากการทดสอบด้วยเทคนิค EDX ของฟิล์มคาร์บอนคล้ายเพชรที่ $V_B = -50$ V ซึ่งผลที่ได้จากเทคนิค EDX พบว่ามีธาตุ C, O, Si, Mg, Al, Na และ Ca ที่มีความเข้มแตกต่างกันของแต่ละจุดดังภาพที่แสดงต่อไปนี้



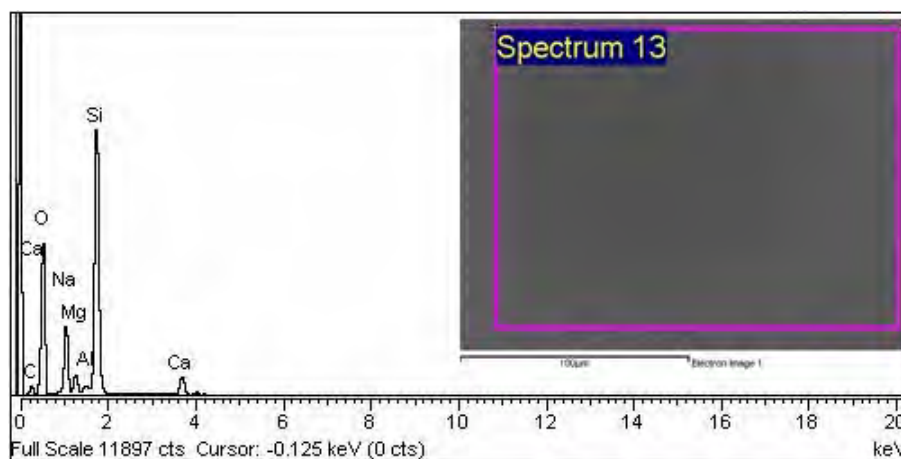
ภาพที่ 41 สเปกตรัมจากจุดบนฟิล์มคาร์บอนคล้ายเพชรที่ $V_B = -50$ V

ภาพที่ 42 ภาพถ่ายและเส้นสเปกตรัมของธาตุต่างๆ เป็นภาพที่ได้จากการทดสอบด้วยเทคนิค EDX ของฟิล์มคาร์บอนคล้ายเพชรที่ $V_B = -100$ V ซึ่งผลที่ได้จากเทคนิค EDX พบว่ามีธาตุ C, O, Si, Mg, Al, Na และ Ca ที่มีความเข้มแตกต่างกันของแต่ละจุดดังภาพที่แสดงต่อไปนี้



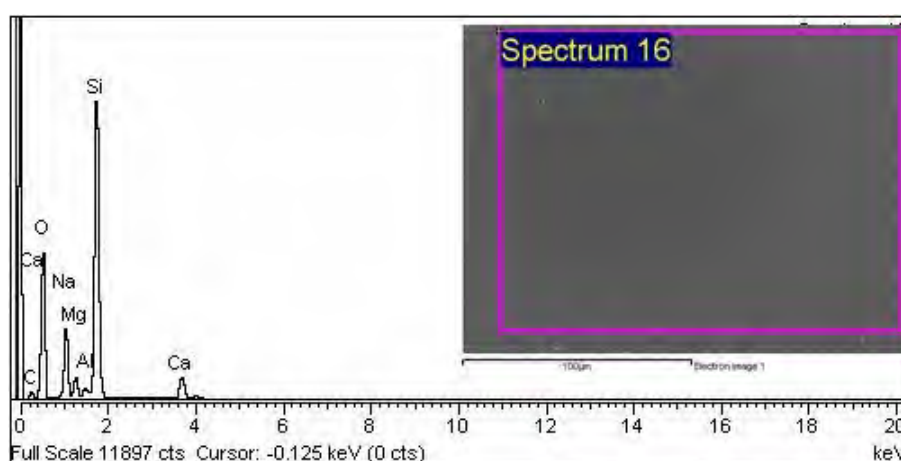
ภาพที่ 42 สเปกตรัมจากจุดบนฟิล์มคาร์บอนคล้ายเพชรที่ $V_B = -100$ V

ภาพที่ 43 ภาพถ่ายและเส้นสเปกตรัมของธาตุต่างๆ เป็นภาพที่ได้จากการทดสอบด้วยเทคนิค EDX ของฟิล์มคาร์บอนคล้ายเพชรที่ $V_B = -150$ V ซึ่งผลที่ได้จากเทคนิค EDX พบว่ามีธาตุ C, O, Si, Mg, Al, Na และ Ca ที่มีความเข้มแตกต่างกันของแต่ละจุดดังภาพที่แสดงต่อไปนี้



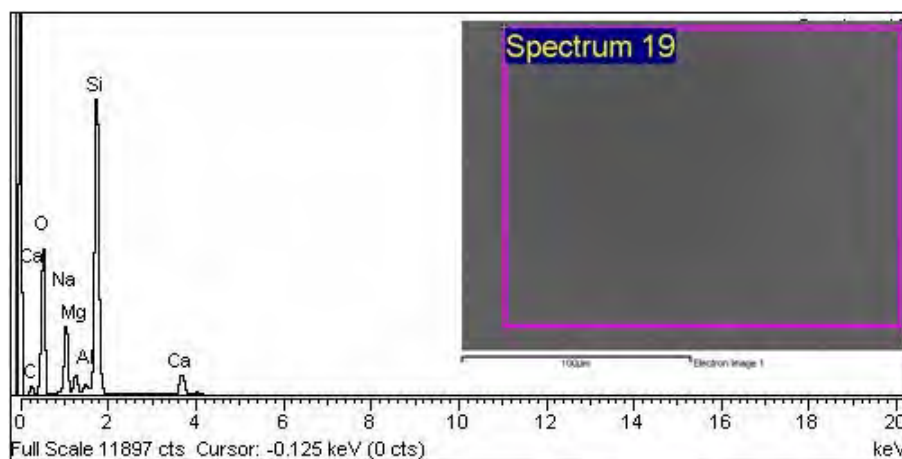
ภาพที่ 43 สเปกตรัมจากจุดบนฟิล์มคาร์บอนคล้ายเพชรที่ $V_B = -150$ V

ภาพที่ 44 ภาพถ่ายและเส้นสเปกตรัมของธาตุต่างๆ เป็นภาพที่ได้จากการทดสอบด้วยเทคนิค EDX ของฟิล์มคาร์บอนคล้ายเพชรที่ $V_B = -200$ V ซึ่งผลที่ได้จากเทคนิค EDX พบว่ามีธาตุ C, O, Si, Mg, Al, Na และ Ca ที่มีความเข้มแตกต่างกันของแต่ละจุดดังภาพที่แสดงต่อไปนี้



ภาพที่ 44 สเปกตรัมจากจุดบนฟิล์มคาร์บอนคล้ายเพชรที่ $V_B = -200$ V

ภาพที่ 45 ภาพถ่ายและเส้นสเปกตรัมของธาตุต่างๆ เป็นภาพที่ได้จากการทดสอบด้วยเทคนิค EDX ของฟิล์มคาร์บอนคล้ายเพชรที่ $V_B = -250$ V ซึ่งผลที่ได้จากเทคนิค EDX พบว่ามีธาตุ C, O, Si, Mg, Al, Na และ Ca ที่มีความเข้มแตกต่างกันของแต่ละจุดดังภาพที่แสดงต่อไปนี้



ภาพที่ 45 สเปกตรัมจากจุดบนฟิล์มคาร์บอนคล้ายเพชรที่ $V_B = -250$ V

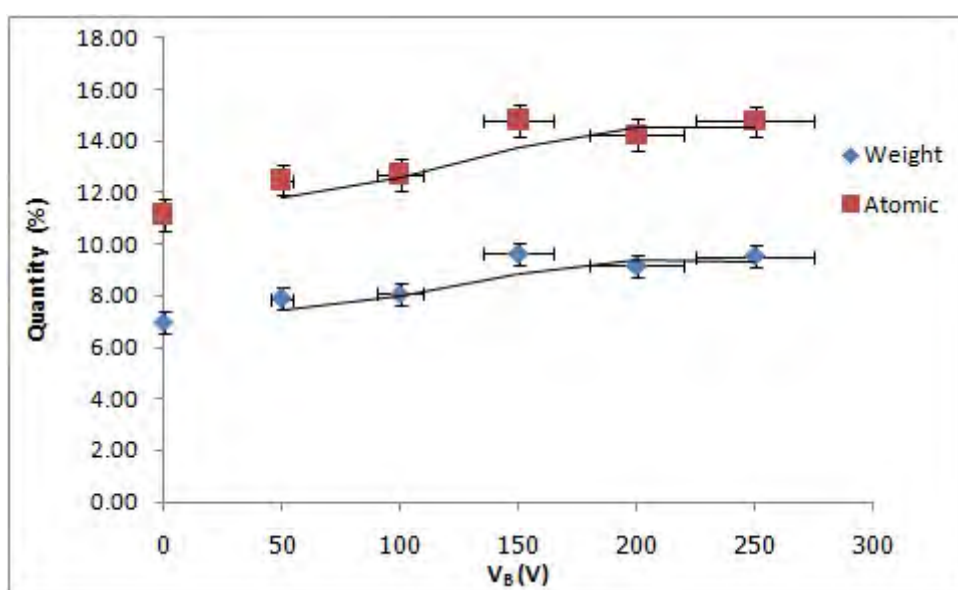
จากภาพถ่ายและภาพแสดงเส้นสเปกตรัมของธาตุต่างๆ เป็นผลที่ได้จากเทคนิค EDX โดยมีการทดสอบบนฟิล์มคาร์บอนคล้ายเพชร เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากเทคนิค EDX มาหาค่าเฉลี่ยที่แสดงในตารางที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าค่าเฉลี่ยของธาตุที่เป็นองค์ประกอบต่างๆ ของฟิล์มคาร์บอนคล้ายเพชร ได้แก่ C, O, Si, Mg, Al, Na และ Ca เนื่องจากธาตุ C, O, Si, Mg, Al, Na และ Ca ที่พบเป็นองค์ประกอบของแผ่นฐาน (กระจกสไลด์) ซึ่งปริมาณของธาตุเหล่านี้มีค่าแตกต่างกัน ในโครงงานนี้เป็นการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของฟิล์มคาร์บอนคล้ายเพชร คือ คาร์บอน (แกรไฟต์)

ตารางที่ 3 แสดงค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำหนักและองค์ประกอบทางเคมี (%) ของฟิล์มคาร์บอนคล้ายเพชรที่ได้จากเทคนิค EDX

Elements V_B (v)	C		O		Si		Mg		Al		Na		Ca	
	Weight (%)	Atomic (%)	Weight (%)	Atomic (%)	Weight (%)	Atomic (%)	Weight (%)	Atomic (%)	Weight (%)	Atomic (%)	Weight (%)	Atomic (%)	Weight (%)	Atomic (%)
สไลด์เปล่า	3.36	5.39	52.93	64.97	29.04	20.31	2.37	1.92	0.58	0.42	10.71	9.15	3.00	1.47
0	7.00	11.15	47.88	57.24	29.32	19.96	2.08	1.63	0.51	0.36	9.44	7.85	3.77	1.80
-50	7.87	12.48	47.29	56.28	29.18	19.78	2.13	1.67	0.52	0.37	9.17	7.59	3.83	1.82
-100	8.08	12.70	48.46	57.18	28.21	18.96	2.05	1.59	0.53	0.37	9.24	7.58	3.43	1.62
-150	9.63	14.81	49.80	57.50	25.92	17.05	2.02	1.53	0.42	0.29	9.34	7.50	2.87	1.32
-200	9.16	14.24	48.76	56.89	27.29	18.14	2.04	1.57	0.48	0.33	9.04	7.34	3.22	1.50
-250	9.53	14.77	48.61	56.55	27.07	17.94	2.03	1.55	0.49	0.34	9.12	7.39	3.16	1.46

ในโครงงานนี้ใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทด โดยจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับขั้วแคโทด 650 V ปรับความถี่ในการอาร์ค 2 ครั้งต่อวินาที ที่ความดัน 5×10^{-5} mbar จำนวนขดลวดโซลินอยด์ 24 รอบ และเวลาในการเคลือบ 5 นาทีเท่ากัน ซึ่งให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าลบกับแผ่นฐานแตกต่างกันดังนี้ 0 V, -50 V, -100 V, -150 V, -200 V และ -250 V จะเห็นได้ว่าค่าเฉลี่ยปริมาณอะตอมของคาร์บอน (%) กระจกสไลด์เปล่ามีปริมาณอะตอมของคาร์บอนนั้นมีค่าประมาณ 5.4 % เมื่อเตรียมฟิล์มคาร์บอนคล้ายเพชรแล้วพบว่าที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 0 V มีปริมาณอะตอมของคาร์บอนโดยเฉลี่ยที่มายึดเกาะบนแผ่นฐานมีค่าประมาณ

11.2 % และเมื่อเราให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าลบกับแผ่นฐานเท่ากับ -50 V, -100 V, -150 V, -200 V และ -250 V ตามลำดับ พบว่าค่าเฉลี่ยปริมาณอะตอมของคาร์บอนมีค่าเพิ่มมากขึ้นมีค่าดังนี้ 12.5 %, 12.7 %, 14.8 %, 14.2 % และ 14.8 % ตามลำดับที่เราให้ความต่างศักย์ไฟฟ้า ซึ่งค่าเฉลี่ยปริมาณอะตอมของคาร์บอนดังที่กล่าวมามีค่าเพิ่มมากขึ้นแล้วมีค่าลดลงแล้วเพิ่มขึ้นอีกก็เพราะว่าค่าเฉลี่ยปริมาณอะตอมของคาร์บอนที่วัดได้แสดงให้เห็นถึงความขรุขระ ความไม่เรียบและความเป็นกลุ่มก้อนของฟิล์มคาร์บอนคล้ายเพชร การที่เราให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าลบให้กับแผ่นฐาน เพื่อเพิ่มแรงดึงดูดคาร์บอนไอออนหรือเพิ่มปริมาณคาร์บอนที่ตกตัวเป็นไอออนบวก ซึ่งแสดงให้เห็นถึงปริมาณของคาร์บอนไอออนมายึดเกาะกับแผ่นฐานและยังเพิ่มความราบเรียบให้กับเนื้อฟิล์มอีกด้วย ดังนั้นเมื่อให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าลบเพิ่มมากขึ้นก็จะทำให้ฟิล์มมีความราบเรียบมากขึ้นและจากเส้นแนวโน้มแสดงปริมาณอะตอมของคาร์บอนในฟิล์มมากขึ้นด้วยดังภาพที่ 45



ภาพที่ 46 แสดงค่าเฉลี่ยปริมาณอะตอมของคาร์บอนที่ได้จากเทคนิค EDX กับการไบแอสความต่างศักย์ไฟฟ้าลบให้กับแผ่นฐาน

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างของฟิล์ม Ti:DLC ด้วยเทคนิครามาน

เนื่องจากการดูดกลืนพลังงานของพันธะคาร์บอนที่โครงสร้างแบบ sp^1 sp^2 และ sp^3 นั้น จะทำให้เกิดการเลื่อนไปของพลังงานสเปกตรัม (Raman shift spectra) ที่กระเจิงออกมาในช่วงพลังงานที่ 800 ต่อเซนติเมตร ถึง 2000 ต่อเซนติเมตร ในช่วงพลังงานนี้โครงสร้างพันธะดังกล่าวจะทำให้เกิดพีคได้ 3 พีค คือ

1. จี-พีค (graphitic peak หรือ G-peak) ซึ่งจะอยู่ที่ความยาวคลื่นประมาณ 1560 ต่อเซนติเมตร โดยพีคนี้เกิดจากการดูดกลืนพลังงานของพันธะคาร์บอนที่โครงสร้างแบบ sp^2 และเกิดการสั่นแบบยืดหด

(stretching vibration) ทั้งในระหว่างชั้นและภายในชั้นเดียวกันของพันธะแบบแกรไฟต์ โดยพีกนี้จะตรวจพบได้จากการกระตุ้นด้วยเลเซอร์รามานที่ตามองเห็นได้ (VIS Raman)

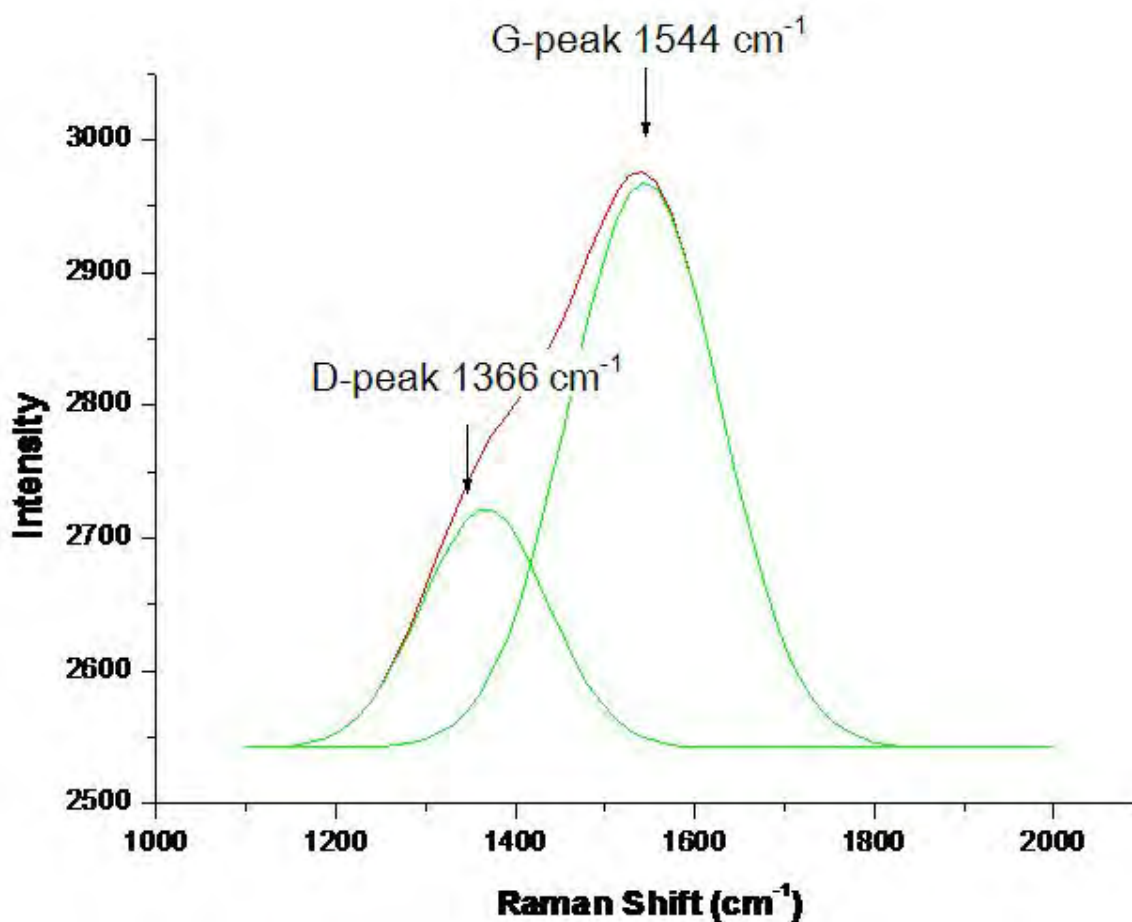
2. ดี-พีก (disorder peak หรือ D-peak) ซึ่งจะอยู่ที่ความยาวคลื่นประมาณ 1360 ต่อเซนติเมตร โดยพีกนี้เกิดจากการดุดกลืนพลังงานของพันธะคาร์บอนที่โครงสร้างแบบ sp^2 เช่นเดียวกัน แต่ทำให้เกิดการสั่นแบบบริททิง (breathing vibration) ในระหว่างชั้นของพันธะแบบแกรไฟต์ โดยพีกนี้จะตรวจพบได้จากการกระตุ้นด้วยเลเซอร์รามานที่ตามองเห็นได้เช่นเดียวกัน

3. ที-พีก (tetragonal peak หรือ T-peak) ซึ่งจะอยู่ที่ความยาวคลื่นประมาณ 1060 ต่อเซนติเมตร โดยพีกนี้เกิดจากการดุดกลืนพลังงานของพันธะคาร์บอนที่โครงสร้างแบบ sp^3 แล้วทำให้เกิดการสั่นของพันธะระหว่างอะตอมของคาร์บอน (C-C sp^3 vibration) โดยพีกนี้จะตรวจพบได้จากการกระตุ้นด้วยเลเซอร์รามานในช่วงรังสีอัลตราไวโอเลต (UV Raman)

ในงานวิจัยนี้โครงสร้างของฟิล์มคาร์บอนคล้ายเพชรที่เตรียมได้ถูกวิเคราะห์โดยใช้เทคนิครามาน (ยี่ห้อ Renishaw micro-Raman รุ่น RA100) โดยแสงเลเซอร์สีเขียว (argon laser) ที่ความยาวคลื่น 514 นาโนเมตร กำลังไฟฟ้า 30 มิลลิวัตต์ ยังเข้าไปที่ฟิล์ม และวัดสเปกตรัมของแสงเลเซอร์ที่กระเจิงออกมา ดังนั้นฟิล์มจึงถูกกระตุ้นด้วยแสงเลเซอร์สีเขียว ซึ่งเป็นเลเซอร์รามานที่ตามองเห็นได้ จึงตรวจพบสเปกตรัมรามานได้เพียง 2 พีก เท่านั้น ตามภาพที่ 47 ซึ่งแสดงได้ด้วยเส้นกราฟเส้นสีแดง ส่วนเส้นกราฟสีเขียวเกิดจากการใช้โปรแกรม Origin (version 6.0) สร้างเส้นกราฟที่มีการกระจายตัวแบบเกาส์เซียน (Gaussian distribution) 2 เส้น โดยการระบุตำแหน่งของพีกและตัวแปรความกว้างของพีกให้เหมาะสม จะได้พีก 2 พีก ที่สอดคล้องกับกราฟเส้นสีแดง คือ

1. จี-พีก อยู่ที่ 1544 ต่อเซนติเมตร โดยปกติแล้วผลึกแกรไฟต์ที่สมบูรณ์อะตอมของคาร์บอนจะสร้างพันธะกันแบบ sp^2 เท่านั้น และรูปร่างของจี-พีก จะมีลักษณะแหลมและแคบ พบอยู่ที่ตำแหน่ง 1580 ต่อเซนติเมตร แต่ฟิล์มคาร์บอนคล้ายเพชรเกิดจากอะตอมคาร์บอนมีโครงสร้างได้ทั้งแบบ sp^2 และ sp^3 เป็นโดเมนเล็กๆ เชื่อมต่อกันไปแบบสุ่ม (randomly linked microdomains) จึงทำให้ลักษณะของจี-พีก นั้นกว้าง (broad peak) และเลื่อนไปในตำแหน่งที่มีเลขคลื่นต่ำลง (lower wavenumber)

2. ดี-พีก อยู่ที่ 1366 ต่อเซนติเมตร โดยพีกนี้เกิดจากความไม่เป็นระเบียบของมุมพันธะ (bond-angle disorder) ในโครงสร้างแบบแกรไฟต์ ซึ่งเป็นผลจากรอยต่อของพันธะแบบ sp^2 กับ sp^3 และผลจากความไม่เป็นระเบียบเองของพันธะแบบ sp^2 โดยปกติแล้วตำแหน่งของดี-พีก จะพบอยู่ที่ 1360 ต่อเซนติเมตร แต่เกิดความไม่เป็นระเบียบของโดเมนเล็กๆ จึงมีผลทำให้เกิดการเลื่อนไปในตำแหน่งที่มีเลขคลื่นต่ำลง



ภาพที่ 47 สเปกตรัมรามานของฟิล์ม Ti:DLC ที่เปอร์เซ็นต์การอาร์คที่ 1:4

เมื่อพิจารณาลักษณะรูปร่างและตำแหน่งของจี-พีค และดี-พีค ของฟิล์มคาร์บอนคล้ายเพชรที่เจือด้วยไทเทเนียม พบว่าโครงสร้างพันธะระหว่างอะตอมคาร์บอนกับคาร์บอน (C-C bonding) มีความไม่เป็นระเบียบของมุมพันธะ sp^2 น้อยลง หรือความหนาแน่นพันธะของ sp^3 มีค่าลดลงเนื่องจากการเข้าไปแทรกตัวของอะตอมนั่นเอง

สรุปผลการทดลอง

จากการทดสอบหัวกำเนิดพลาสมาอาร์คในสุญญากาศชนิดแคโทดคู่สำหรับเคลือบฟิล์ม Ti:DLC จากการทดสอบการอาร์คที่ชั่ว โดยทำการทดสอบชั่วแกรไฟต์ก่อนตามด้วยชั่วไทเทเนียม ซึ่งการทดสอบการอาร์คสามารถเกิดขึ้นที่ความดัน 10^{-5} mbar ความต่างศักย์ 600 V ความถี่ 2 Hz จากการทดลองพบว่าความกว้างของพัลส์อยู่ที่ประมาณ 350 ไมโครวินาที และกระแสอาร์คสูงสุดมีค่าประมาณ 685 A

ในการทดลองได้มีการศึกษา คุณสมบัติเชิงพื้นผิวของฟิล์มคาร์บอนคล้ายเพชรที่ได้จากผลของการให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าลบกับแผ่นฐานโดยวิธีการอาร์คในสุญญากาศ จากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมี ที่ได้จาก EDX ของฟิล์มคาร์บอนคล้ายเพชร พบว่าเส้นแนวโน้มค่าเฉลี่ยปริมาณความเข้มข้นของคาร์บอนอะตอมมีค่าเพิ่มมากขึ้นจาก 8% ถึง 14% เมื่อให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าลบที่แผ่นฐานเพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง -250 V ซึ่งเกิดจากการที่ไอออนบวกของคาร์บอนถูกเร่งให้ไปยึดเกาะกับแผ่นฐานได้มากขึ้นและดีขึ้นจึงก่อตัวเป็นเฟสคาร์บอนคล้ายเพชรได้มากขึ้นตามไปด้วย และจากการศึกษาภาพถ่ายพื้นผิวของฟิล์มคาร์บอนคล้ายเพชรที่ได้จากการ SEM พบว่าความขรุขระของฟิล์มคาร์บอนคล้ายเพชรลดน้อยลงเมื่อให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าลบเพิ่มมากขึ้น ซึ่งแสดงถึงการยึดเกาะที่ดีขึ้นระหว่างฟิล์มกับแผ่นฐานนั่นเอง โดยเงื่อนไขที่ใช้เตรียมฟิล์มคาร์บอนคล้ายเพชรที่มีความราบเรียบมากที่สุดคือเมื่อให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าลบเท่ากับ -250 V

ข้อเสนอแนะ

ถ้าสามารถออกแบบระบบสุญญากาศที่สามารถลดระดับความดันให้ต่ำมากกว่านี้ ได้ จะช่วยเพิ่มปริมาณของคาร์บอนไอออนที่มาตกบนแผ่นฐานได้มากขึ้น และพลังงานของไอออนจะมีค่ามากขึ้นด้วย และควรมีการให้ความร้อนกับแผ่นฐานพร้อมๆ กับการไบแอสแผ่นฐานเพื่อช่วยการก่อตัวของเฟส sp^3 ซึ่งจะทำให้ฟิล์ม Ti:DLC ที่ได้มีความแข็งและคงทนมากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

1. Wright A W. On the production of transparent metallic films by the electrical discharge in exhausted tubes. **Am. J. Sci. Arts** 1887; **13**: 49-55.
2. Edison T A. Process of duplicating phonograms. **U.S. Patent** 1892; **484,582**.
3. Holland L. Evaporation from an electric arc in vacuum. **Nature** 1956; **178**: 328.
4. Kikuchi M, Nagakura S, Ohmura H, and Oketani S. Structure of the metal films produced by vacuum-arc evaporation method. **Japan. J. Appl. Phys.** 1965; **4**: 940.
5. Boxman R L and Goldsmith S. Principles and applications of vacuum arc coating. **IEEE Trans. Plasma Sci.** 1989; **PS-17**: 750-712.
6. Boxman R L and Goldsmith S. Momentum interchange between cathode spot plasma jets and background gases and vapors and its application on vacuum arc anode spot development. **IEEE Trans. Plasma Sci.** 1990; **PS-18**: 2310-236.
7. Beilis I I. State of the theory of cathode spot phenomena in vacuum arcs. **Proc. 17th Int. Symp. On Discharge and Electrical Insulation in Vacuum, Berkeley.** 1996: 188-93.
8. Brown I G. Cathodic arc deposition of films. **Annu. Rev. Mater. Sci.** 1998; **28**: 243-69.
9. Aksenov I I and Andreev A A. Vacuum-arc coating technologies at NSC KIPT, **Problem of atomic science and technology series. Plasma Physics.** 1999; **3(3), 4(4)**: 242-6.
10. Beilis I I, Keidar M, Boxman R L, and Goldsmith S. Macroparticle separation and plasma collimation in positively biased duct in filtered vacuum arc deposition systems. **J. Appl. Phys.** 1999; **85**: 1358-65.
11. Alterkop B, Gidalevich E, Goldsmith S and Boxman R L. Numerical calculation of plasma beam propagation in toroidal duct with magnetized electrons and unmagnetized ions. **J. Phys. D: Appl. Phys.** 1996; **29**: 1-7.
12. Baldwin D A, Fallabella S. Deposition processes utilizing a new filtered cathodic arc source. **Proc. of the 38th Annual Techn. Conf., Society of Vacuum Coaters, Chicago.** 1995: 309-16.
13. Fong W, Fabrication and evaluation of 5 nm cathodic-arc carbon films for disk drive applications. **Ph.D. Thesis, University of California at Berkeley, Department of Mechanical Engineering, Berkeley, CA.** 1999.

14. Randhawa H and Johnson P C. Technical Note: A review of cathodic arc plasma deposition processes and their applications. **Surface and Coatings Technology**. 1987; **31**: 301-18.
15. Martin P J, Bendavid A and Kinder T J. The deposition of TiN Thin films by filtered cathodic arc techniques. **IEEE Trans. Plasma Sci.** 1997; **25(4)**: 675-9.
16. Helmersson Ulf, Lattemann M, Bohlmark J, Ehasarian A P and Gudmundsson J T. Ionized physical vapor deposition (IPVD): A review of technological and applications. **Thin Solid Films**. 2006; **513**: 1-24.
17. Sanders D M and Anders A. Review of cathodic arc deposition technology at the start of the new milenium. **Surface and Coatings Technology**. 2000; **133-134**: 78-90.
18. Montiero O R and Delplancke-Ogletree M P. Vacuum arc deposited DLC based coatings. 2002 **LBNL-52251**.
19. Takikava H, Izumi K, Miyano R and Sakakibara T. DLC thin film preparation by cathodic arc deposition with a super droplet-free system. **Surface and Coatings Technology**. 2003; **163-164**: 368-73.
20. Scheibe H.-J, Schultrich B, Ziegele H and Siemroth P. Deposition of Superhard amorphous carbon films by pulsed arc sources. **IEEE Trans. Plasma Sci.** 1997; **25(4)**: 685-8.
21. Pasaja N. Mo-containing tetrahedral amorphous carbon deposited by dual filtered cathodic vacuum arc with selective pulsed bias voltage. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B**. 2007; **259**: 867-70.
22. Schulz H, Leonhardt M, Scheibe H.-J and Schultrich B. Ultra hydrophobic wetting of amorphous carbon films. **Surface and Coatings Technology**. 2005; **200**: 1123-26.

การปลูกฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชรเจือไทเทเนียมแบบไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด

ด้วยหัวกำเนิดพลาสมาแบบอาร์คในสุญญากาศชนิดแคโทดคู่

A. Chingsungnoen¹, S. Maensiri², V. Amornkitbamrung²

¹ Department of Physics, Faculty of Science, Mahasarakham University, Thailand, 44150

² Department of Physics, Faculty of Science, Khon Kaen University, Thailand, 40002



The Thailand
Research Fund



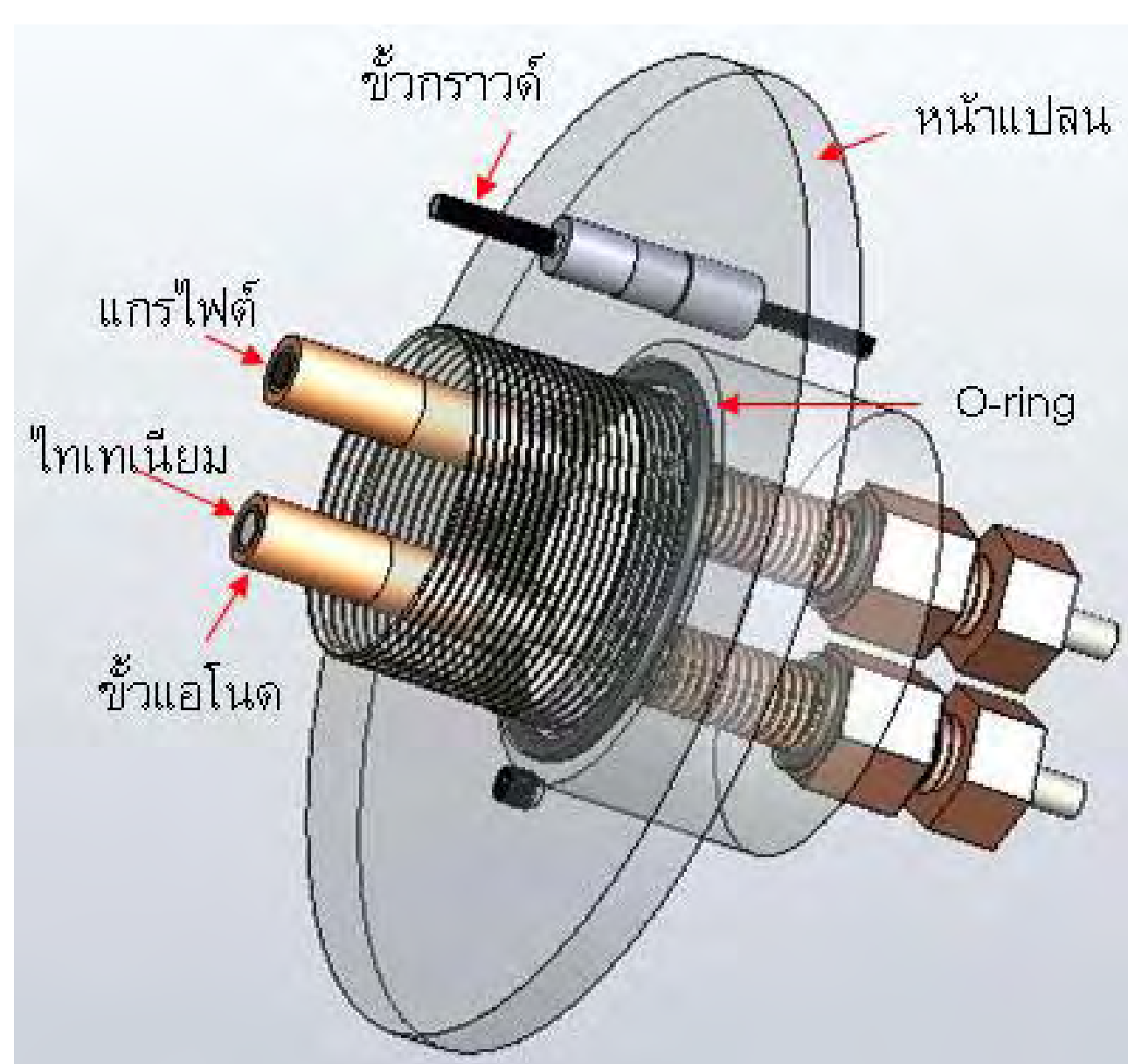
Commission on
Higher Education

วัตถุประสงค์งานวิจัย

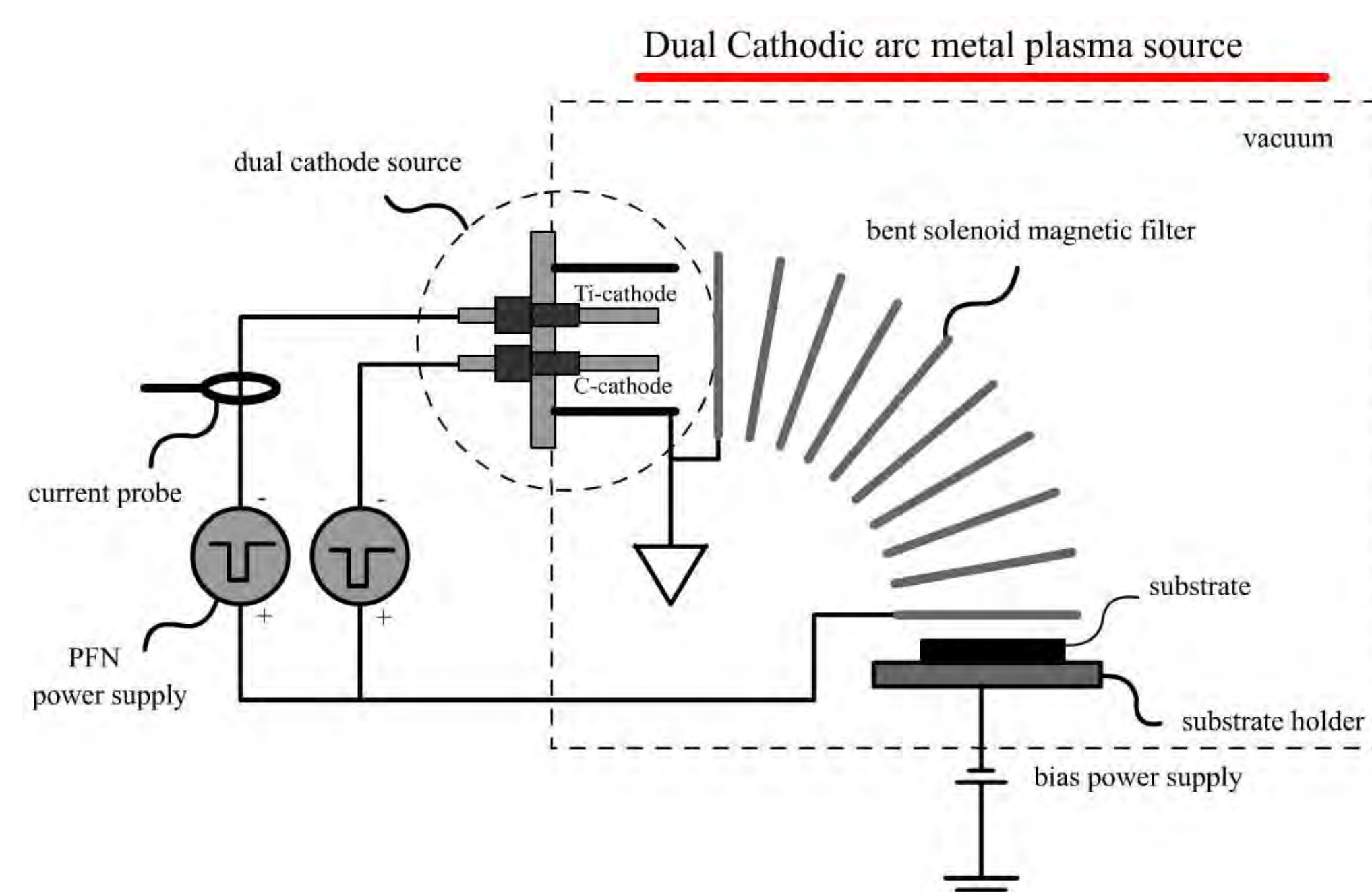
ฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชรมีคุณสมบัติเด่นหลายประการเช่น มีความแข็งแรงสูง มีความเสียดทานน้อย เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี มีความเหนียวทางเคมี เมื่อนำไปเคลือบลงบนผิววัสดุจะช่วยเพิ่มความแข็งแรงและความทนทานต่อการกัดกร่อนของวัสดุนั้นๆ ได้ ดังนั้นการประยุกต์ใช้ฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชรจึงมีได้หลากหลาย ในงานวิจัยนี้จึงได้พัฒนาระบบการเคลือบฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชรจากวิธีการอาร์คในสุญญากาศชนิดแคโทดคู่ (ใช้แท่งแกรไฟต์และแท่งไทเทเนียมบริสุทธิ์เป็นขั้วแคโทด) เมื่อทำในเงื่อนไขที่เหมาะสมจะทำให้เกิดฟิล์ม DLC:Ti ที่มีคุณสมบัติเพิ่มความแข็งแรง, ความต้านทานต่อการกัดกร่อน และความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด

ระเบียบวิธีวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้สร้างหัวกำเนิดพลาสมาแบบอาร์คชนิดแคโทดคู่ (ไทเทเนียม และคาร์บอน) พบว่าสามารถทำงานได้กับแหล่งจ่ายไฟแบบพัลส์ ที่ความต่างศักย์ 500-800 V และกระแสพัลส์อยู่ในช่วง 500-700 A โดยมีความกว้างพัลส์ประมาณ 350 μ s และความถี่ในการอาร์ค 1-5 Hz ที่ความดัน 10^{-4} - 10^{-6} mbar

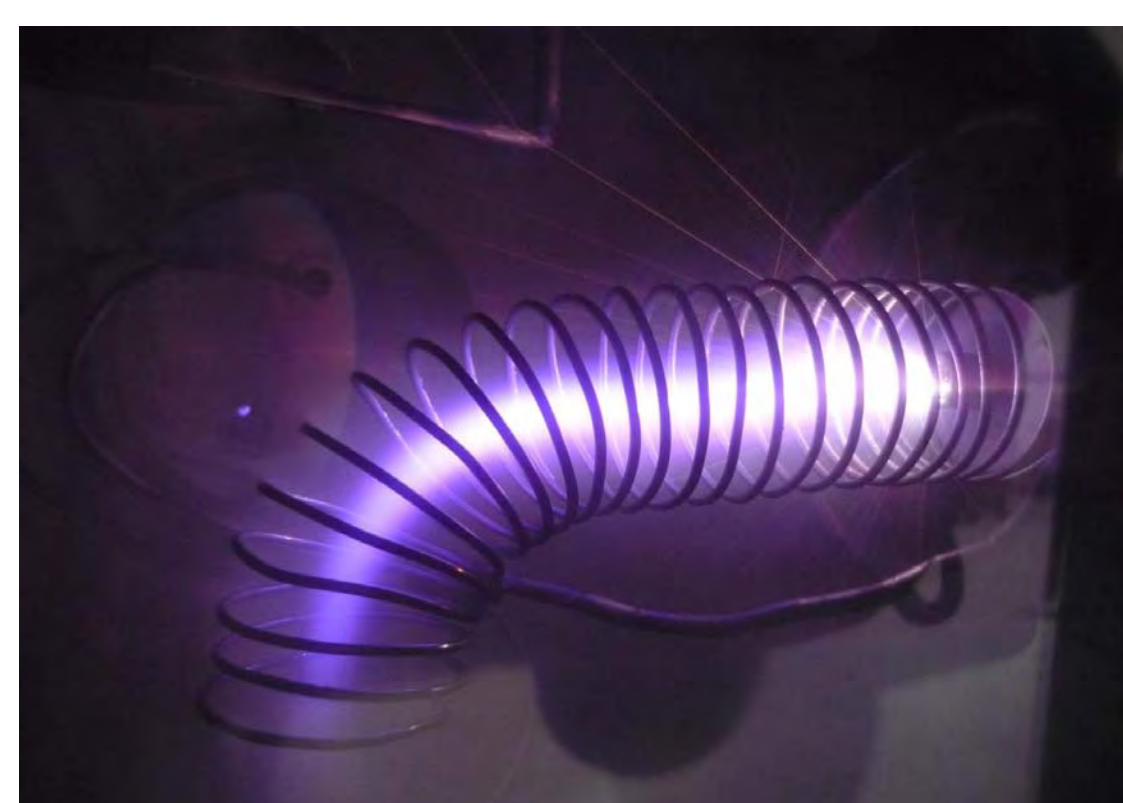


ภาพที่ 1 หัวกำเนิดพลาสมาแบบอาร์คชนิดแคโทดคู่

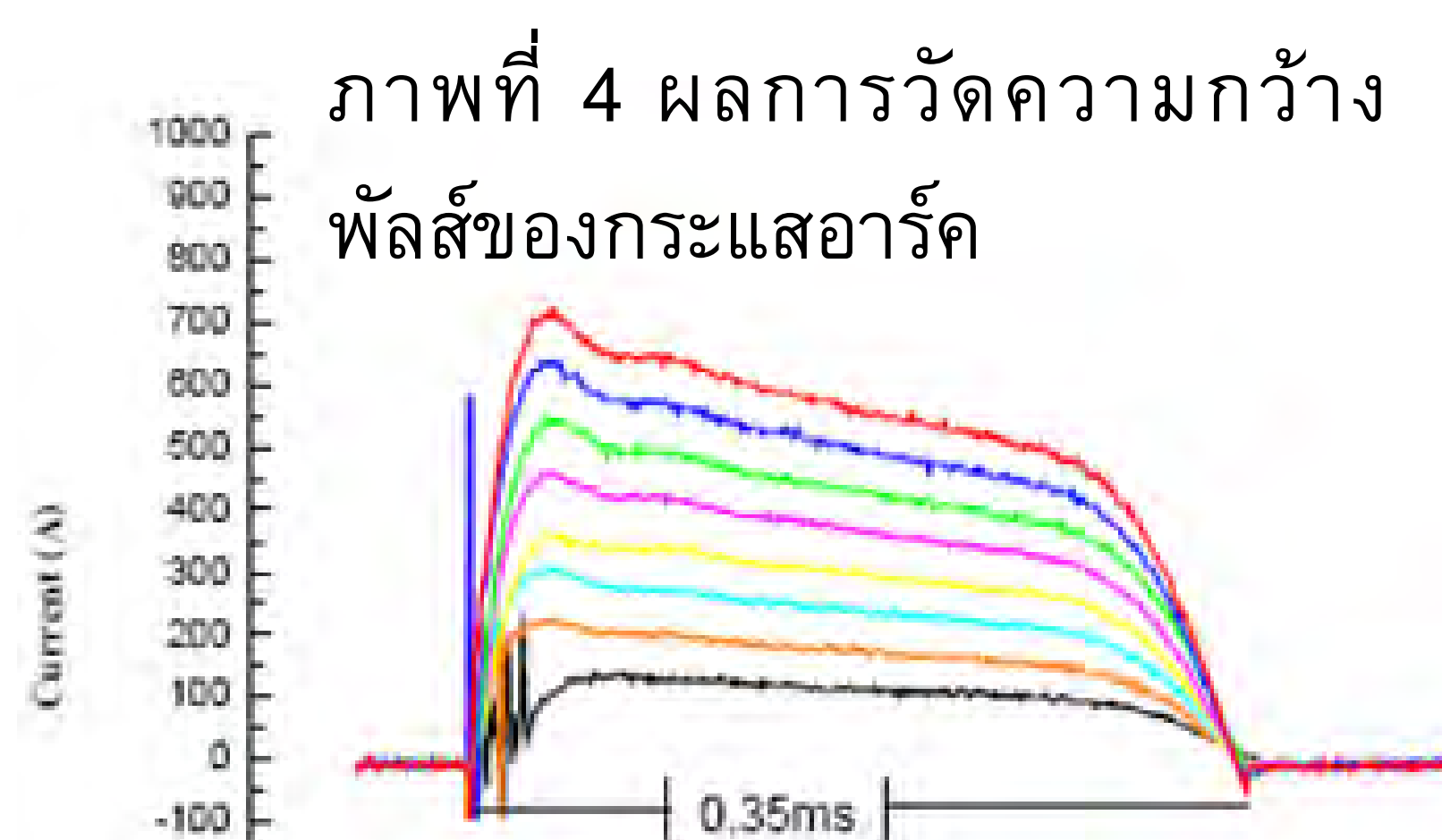


ภาพที่ 2 แบบจำลองโครงสร้างระบบการปลูกฟิล์ม DLC:Ti

ผลการทดลองและการวิเคราะห์



ภาพที่ 3 ขณะเกิดการอาร์ค



ภาพที่ 4 ผลการวัดความกว้างพัลส์ของกระแสอาร์ค

การทดลองวัดค่ากระแสอาร์คที่ใช้ในการผลิตพลาสมาจากการอาร์คในสุญญากาศ ภายใต้ความดัน 10^{-5} mbar จากการทดลองพบว่าความกว้างของพัลส์อยู่ที่ประมาณ 350 μ s กระแสสูงสุด มีค่าประมาณ 685 A

สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ส่วนแรก คือ ออกแบบและสร้างหัวกำเนิดพลาสมาแบบการอาร์คในสุญญากาศชนิดแคโทดคู่ ส่วนที่สอง คือ สร้างแหล่งจ่ายไฟแบบพัลส์สำหรับการอาร์ค 2 ชุด และส่วนสุดท้าย คือ การพัฒนาคุณสมบัติของฟิล์ม DLC:Ti ซึ่งในขณะนี้อยู่ในช่วงการปรับปรุงแหล่งจ่ายไฟควบคู่ไปกับการปลูกฟิล์ม DLC:Ti เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษา และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

1. NITISAK PASAJA, **DEPOSITION OF METAL-DOPED DIAMOND-LIKE CARBON FILM USING DUAL CATHODIC ARC PLASMA SOURCES.** Chiang Mai University, 2008.
2. Brown I G. Cathodic arc deposition of films. **Annu. Rev. Mater. Sci.** 1998; **28**: 243-69.