



รายงานผลการวิจัย

เรื่อง การพัฒนาเครื่องกัดผิวชิ้นงานภายใต้ความดันสุญญากาศโดยใช้ไมโครเวฟพลาสมาสำหรับ
ผลิตอุปกรณ์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากความร้อนเทอร์โมอิเล็กทริก

Development of surface dry etching system under vacuum pressure by microwave
plasma for fabricating of thermoelectric generator

ได้รับการจัดสรรงบประมาณวิจัย ประจำปี 2559

จำนวน 122,700 บาท

หัวหน้าโครงการ

นายชูพงษ์ ภาคภูมิ

งานวิจัยเสร็จสิ้นสมบูรณ์แล้ว	
เลขที่ของบัญชี	27/ก.ย./2560
	ศาสตราจารย์ ดร. ชูพงษ์ ภาคภูมิ

สารบัญ

	หน้า
สารบัญภาพ	ข
สารบัญตาราง	จ
บทคัดย่อ	1
Abstract	2
คำนิยม	3
บทนำ	4
วัตถุประสงค์	9
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	9
การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	10
อุปกรณ์และวิธีการวิจัย	21
ผลการวิจัย	22
วิจารณ์ผลการวิจัย	41
สรุปผลการวิจัย	42
ข้อเสนอแนะ	42
เอกสารอ้างอิง	43

สารบัญภาพ

	หน้า	
รูปที่ 1	แสดงเทอร์โมอิเล็กทริก โมดูลที่ขายตามท้องตลาด	4
รูปที่ 2	แสดงทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้า เมื่อมีความแตกต่างของ ความร้อนของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก	5
รูปที่ 3	แสดงองค์ประกอบของเครื่องกักแบบ ICP plasma	8
รูปที่ 4	แสดงองค์ประกอบของเครื่องกักที่จะพัฒนาในงานวิจัยนี้	9
รูปที่ 5	(ซ้าย) แผนภาพ และ (ขวา) ภาพถ่ายเครื่องกำเนิดพลาสมาขนาดเล็ก	11
รูปที่ 6	แสดงภาพถ่ายการเกิดพลาสมาของแก๊สออกซิเจนที่ความดัน 0.4 – 6.0 ทอร์	11
รูปที่ 7	(ซ้าย) แผนภาพของเครื่อง MPCVD และ (ขวา) ภาพถ่ายจริงของ เครื่อง MPCVD	12
รูปที่ 8	แสดงตัวอย่าง TEG chip เทียบกับเหรียญ	13
รูปที่ 9	สิ่งประดิษฐ์โมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกทำจากวัสดุซิลิกอน หลังผ่าน การทดสอบ ให้ค่า Seebeck voltage 80 mV ภายใต้ความแตกต่าง ของอุณหภูมิของด้านร้อนและด้านเย็น ที่ 450°C	14
รูปที่ 10	แสดงโมดูล TEG มี 3 หน่วยย่อย มาประกอบกัน ประดิษฐ์จากท่อ นาโนคาร์บอน	14
รูปที่ 11	แสดง ห้องสุญญากาศ (ทำจากวัสดุ borosilicate Glass) แทนวาง ชิ้นงานที่เชื่อมเข้ากับฐานทองแดง ภายในเตาไมโครเวฟ	24
รูปที่ 12	แสดงภายนอกของเครื่องปลูกฟิล์มบางที่ได้พัฒนาขึ้น	25
รูปที่ 13	แสดงพลาสมาของอากาศ (สีชมพูเข้ม) ที่เกิดภายในห้องสุญญากาศ เมื่อจ่ายคลื่นไมโครเวฟที่กำลังสูงสุด 1,200 W	25
รูปที่ 14	แสดงภาพการแตกของห้องสุญญากาศ เมื่อทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้า กระแสตรง -300 V ให้กับฐานวางชิ้นงาน	26
รูปที่ 15	แสดงวงจรไฟฟ้าแปลงกระแสสลับเป็นกระแสตรง	27
รูปที่ 16	แสดงการต่อวงจร เพื่อใช้เป็นแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมที่ขั้ว วางชิ้นงาน ในภาพถ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) 9.2 โวลต์ เข้า (Input) วงจรไฟฟ้า ได้แรงดันขาออก (Output) เป็น แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (DC) 101 โวลต์	28

รูปที่ 17	แสดงประสิทธิภาพของวงจรไฟฟ้า (ในรูปที่ 16) สามารถแปลงไฟฟ้ากระแสสลับขาเข้าจาก 20 โวลต์เป็นไฟฟ้ากระแสตรงได้ถึง 250 โวลต์ ดังนั้นเมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับขาเข้า 230 โวลต์จะได้แรงดันไฟฟ้าออกกระแสตรงสูงถึง 3,105 โวลต์	28
รูปที่ 18	แผนผังของระบบการกัดด้วยไมโครเวฟพลาสมา (Plasma Etching) ที่ความดันต่ำ	30
รูปที่ 19	แสดง CF_4 plasma ที่อัตราการไหลของก๊าซ 30 mL/min ศักย์ไฟฟ้า -100 V จ่ายที่ฐานรองชิ้นงาน	31
รูปที่ 20	แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผิวซิลิกอนที่ถูกกัดโดยเงื่อนไขการทดลองที่ 1 (ในตารางที่ 2) ถ่ายโดยใช้เครื่อง Field Emission Scanning Electron Microscope (SEM, JEOL JSM-6335F)	32
รูปที่ 21	แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผิวซิลิกอนที่ถูกกัดโดยเงื่อนไขการทดลองที่ 2 (ในตารางที่ 2) ถ่ายโดยใช้เครื่อง Field Emission Scanning Electron Microscope (SEM, JEOL JSM-6335F)	33
รูปที่ 22	แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผิวซิลิกอนที่ถูกกัดโดยเงื่อนไขการทดลองที่ 3 (ในตารางที่ 2) ถ่ายโดยใช้เครื่อง Field Emission Scanning Electron Microscope (SEM, JEOL JSM-6335F)	34
รูปที่ 23	แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผิวซิลิกอนที่ถูกกัดโดยเงื่อนไขการทดลองที่ 4 (ในตารางที่ 2) ถ่ายโดยใช้เครื่อง Field Emission Scanning Electron Microscope (SEM, JEOL JSM-6335F)	35
รูปที่ 24	แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผิวซิลิกอนที่ถูกกัดโดยเงื่อนไขการทดลองที่ 5 (ในตารางที่ 2) ถ่ายโดยใช้เครื่อง Field Emission Scanning Electron Microscope (SEM, JEOL JSM-6335F)	36
รูปที่ 25	แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผิวซิลิกอนที่ถูกกัดโดยเงื่อนไขการทดลองที่ 6 (ในตารางที่ 2) ถ่ายโดยใช้	38

ใช้เครื่อง Field Emission Scanning Electron Microscope (SEM,
JEOL JSM-6335F)

รูปที่ 26

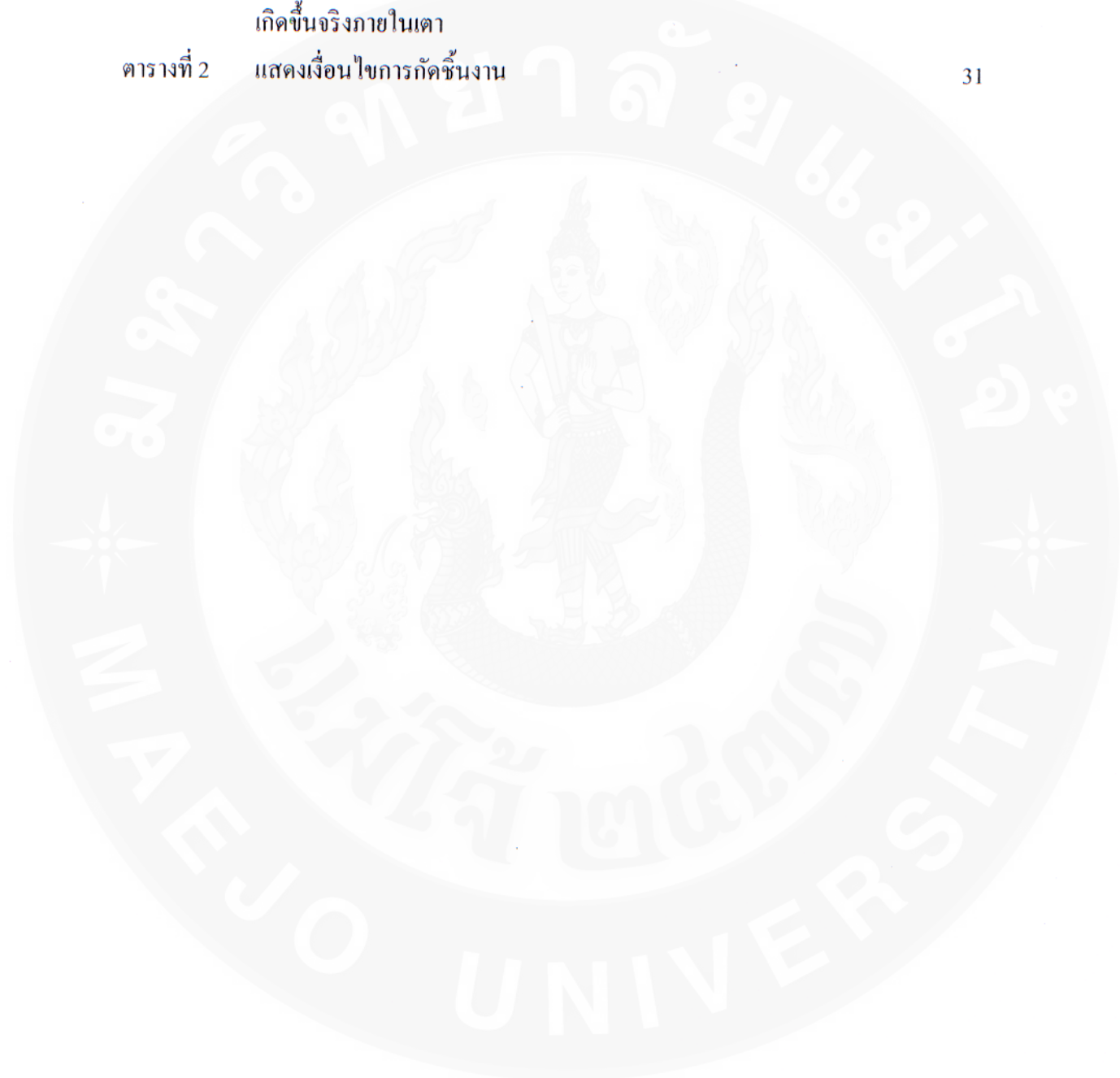
แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผิว
ซัลฟิดอนที่ถูกกัดโดยเงื่อนไขการทดลองที่ 7 (ในตารางที่ 2) ถ่ายโดย
ใช้เครื่อง Field Emission Scanning Electron Microscope (SEM,
JEOL JSM-6335F)

39



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 ผลการสอบเทียบกำลังไมโครเวฟที่ใช้โปรแกรมเครื่องกับที่ เกิดขึ้นจริงภายในเตา	23
ตารางที่ 2 แสดงเงื่อนไขการกักชิ้นงาน	31



การพัฒนาเครื่องกัดผิวชิ้นงานภายใต้ความดันสุญญากาศโดยใช้ไมโครเวฟพลาสมาสำหรับ
ผลิตอุปกรณ์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากความร้อนเทอร์โมอิเล็กทริก

Development of surface dry etching system under vacuum pressure by microwave
plasma for fabricating of thermoelectric generator

ชูพงษ์ ภาคภูมิ

Chupong Pakpum

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จ.เชียงใหม่ 50290

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างเครื่องกัดซิลิกอนด้วยไมโครเวฟพลาสมาภายใต้ความดันสุญญากาศ โดยดัดแปลงเตาไมโครเวฟในเชิงพาณิชย์เป็นแหล่งของคลื่นไมโครเวฟเพื่อสร้างพลาสมา และทดลองหาเงื่อนไขของกระบวนการกัดซิลิกอนจากคาร์บอนเตตระฟลูออไรด์พลาสมาที่ให้อัตราการกัดซิลิกอนสูงสุด ทดลองโดยใช้กำลังไมโครเวฟในช่วง 360 – 1,200 W อัตราการไหลของก๊าซในช่วง 30 – 90 mL/min แรงดันไฟฟ้าจ่ายไปที่ฐานรองชิ้นงานในช่วง -100 V ถึง -300 V เวลาที่ใช้ในการกัด 150 s – 300 s จากการทดลองพบว่าเงื่อนไขที่ให้อัตราการกัดสูงสุดที่ 95.51 nm/s คือเงื่อนไขการกัดโดยใช้ CF_4 plasma ที่อัตราการไหลของก๊าซ 30 mL/min จ่ายกำลังไมโครเวฟที่ 360 W จ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ฐานรองชิ้นงานที่ -100 V ทำการกัดเป็นเวลา 156 s ได้รับความลึกที่ 14.90 μm ทุกเงื่อนไขของการกัดพบว่าการกัดเป็นแบบทุกทิศทาง (isotropic dry etching) และเป็นกระบวนการที่สะอาดโดยไม่พบสารประกอบใหม่ (Re-deposition free) เกาะที่ผนังของร่องที่ถูกกัดของชิ้นงานซิลิกอน

คำสำคัญ: คาร์บอนเตตระฟลูออไรด์, กระบวนการกัด, ไมโครเวฟพลาสมา, ซิลิกอน

Abstract

The purpose of this project are; aim to build microwave plasma etching system operated under vacuum pressure by modifying the commercial microwave oven used it as a microwave generator to excite plasma, and to find the etching recipe from carbon tetrafluoride plasma that provide the maximum etch rate on silicon substrate. Experimental trials were performed under; operating power in the range of 360 – 1,200 W, gas flow rate in the range of 30 – 90 mL/min, voltage bias at the substrate holder -100 V to -300 V and etch time in the range of 150 s – 300 s. Experimental results provided that the maximum etch rate is 95.51 nm/s by using CF_4 plasma operated at gas flow rate 30 mL/min, microwave power 360 W and bias voltage -100 V. Etch depth at 14.90 μm was achieved for etch time 156 s. All etching recipe provide isotropic dry etching feature (etch horizontally as well as vertically into the surface of the substrate) and Re-deposition free process as not found new compound materials stick on etched sidewall.

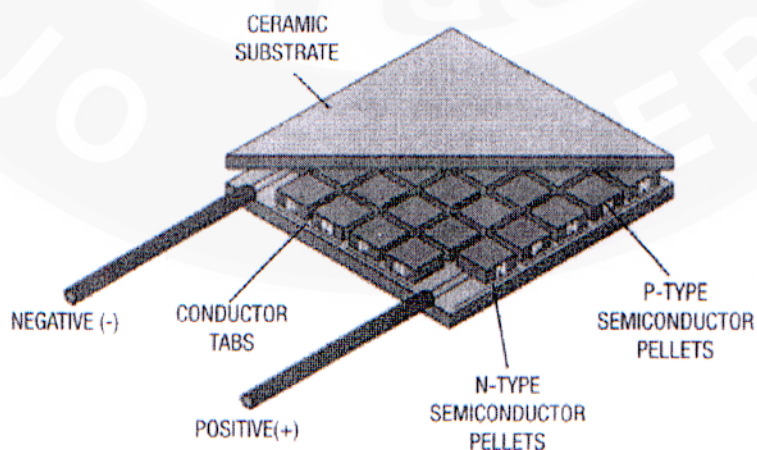
Key words: Carbon tetrafluoride, Etching process, Microwave plasma, Silicon

คำนิยม

โครงการวิจัยเรื่อง การพัฒนาเครื่องกัดผิวชิ้นงานภายใต้ความดันสุญญากาศโดยใช้ไมโครเวฟพลาสมาสำหรับผลิตอุปกรณ์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากความร้อนเทอร์โมอิเล็กทริก (Development of surface dry etching system under vacuum pressure by microwave plasma for fabricating of thermoelectric generator) ได้สำเร็จลุล่วง โดยได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักวิจัยและส่งเสริมวิชาการการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ประจำปีงบประมาณ 2559 ผู้วิจัยขอขอบคุณ สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่อนุเคราะห์เรื่องสถานที่ และอุปกรณ์บางอย่างที่ใช้ในการดำเนินการวิจัยให้เสร็จสิ้นสมบูรณ์ รวมถึงขอขอบพระคุณ รศ.ดร.ธีรพรรณ บุญญวรรณ (ผู้อำนวยการศูนย์วิจัยฟิสิกส์พลาสมาและลำอนุภาค คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่) ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้ก๊าซ คาร์บอนเตตระฟลูออไรด์ (CF_4)

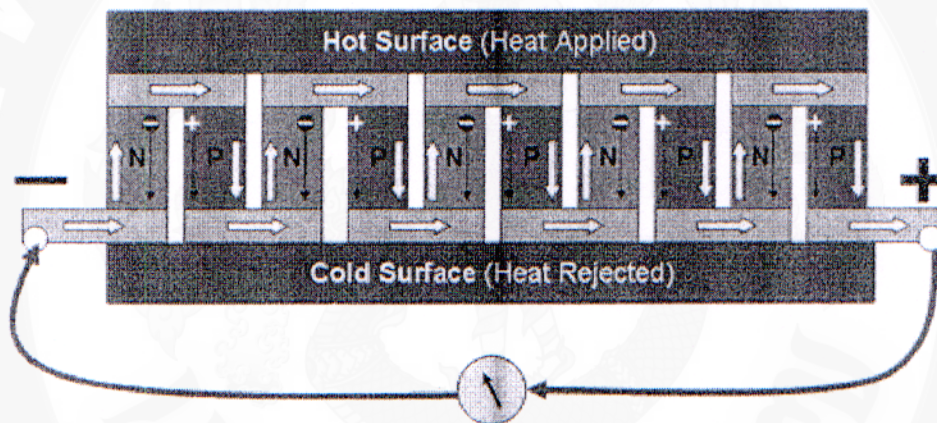
บทนำ

ภาวะโลกร้อน (Global warming) เป็นปัญหาสำคัญในระดับนานาชาติที่ส่งผลกระทบต่อรุนแรงจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศโลก สาเหตุหนึ่งเกิดจากการที่มนุษย์เผาผลาญเชื้อเพลิงฟอสซิล (Fossil) เช่น ถ่านหิน น้ำมัน และก๊าซธรรมชาติ เพื่อผลิตพลังงาน โดยปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก (Greenhouse effect) ออกสู่ชั้นบรรยากาศเป็นจำนวนมาก นอกจากนี้ความต้องการใช้พลังงานที่เพิ่มขึ้นทั้งในภาคอุตสาหกรรมการผลิต และเพื่ออำนวยความสะดวกในชีวิตประจำวัน ล้วนนำมาซึ่งวิกฤตการณ์การขาดแคลนเชื้อเพลิงในอนาคต จึงจำเป็นต้องมีการแสวงหาแหล่งพลังงานใหม่เพื่อทดแทนที่สำคัญต้องไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและภาวะเรือนกระจกด้วย หลายกลุ่มวิจัยจากทั่วโลกได้มุ่งเน้นวิจัยและพัฒนาวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric material) เพื่อประยุกต์ใช้ในการผลิตพลังงาน ซึ่งวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก เป็นสารกึ่งตัวนำที่ผลิตพลังงานไฟฟ้าได้เมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิ จากหลักการดังกล่าว จึงนำวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกมาใช้เป็นวัสดุคืบในการผลิตอุปกรณ์สำหรับผันกลับความร้อนที่เหลือทิ้งจำนวนมากจากภาคอุตสาหกรรม หรือแม้แต่ภายในครัวเรือน ให้กลับมาเป็นกระแสไฟฟ้าใช้งานได้โดยไม่มีมลพิษการประกอบ “วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก” ให้เป็นอุปกรณ์ที่สามารถนำไปใช้งานเป็นแหล่งพลังงานได้ เรียกว่า “เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล (Thermoelectric module)” เริ่มต้นจากการนำวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก ชนิดเอ็น (N type) และชนิดพี (P type) ชิ้นเล็กๆ มาต่อกันเป็นคู่ๆ โดยวางสลับกัน และมีโลหะขนาดเล็กเชื่อมต่อทั้งคู่เข้าด้วยกัน ซึ่งแต่ละคู่ที่ต่อกันจะมีการเชื่อมต่อกันแบบอนุกรมทางไฟฟ้าตั้งแต่ตัวแรกถึงตัวสุดท้าย เมื่อนำมาต่อเข้ากับโหลด (Load) หากมีกระแสไฟฟ้าไหลก็จะครบวงจรพอดี ที่ด้านบนและด้านล่าง ถูกประกบด้วยแผ่นเซรามิก ปริมาณความต่างศักย์ไฟฟ้าที่โมดูลผลิตได้เนื่องจากความต่างของอุณหภูมิระหว่างแผ่นด้านบนและด้านล่างขึ้นอยู่กับจำนวนคู่ของ เอ็น-พี ในโมดูลนั้น



รูปที่ 1 แสดงเทอร์โมอิเล็กทริก โมดูลที่ขายตามท้องตลาด

การทำงานของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล(TEG) นั้น สามารถอธิบายได้ดังนี้ เมื่อให้ความต่างของอุณหภูมิบนแผ่นเซรามิคด้านบนและล่างทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลเนื่องจากพาหะเอ็นและพีในสารกึ่งตัวนำเหล่านั้น ในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นซึ่งมีพาหะข้างมากเป็นอิเล็กตรอน (Electron) หรือประจุลบ เมื่อมีความร้อนที่ผิวด้านบนมากกว่าด้านล่าง การไหลของความร้อนจะทำให้เกิดการไหลของพาหะข้างมากเหล่านั้น อิเล็กตรอนจะไหลจากผิวด้านบนไปสู่ด้านล่าง ส่วนในสารกึ่งตัวนำชนิดพี มีพาหะข้างมากเป็นโฮล (Hole) หรือประจุบวก เมื่อมีความร้อนที่ผิวด้านบนมากกว่าด้านล่าง โฮลก็จะไหลจากผิวด้านบนไปด้านล่างเช่นเดียวกัน ดังนั้นทิศทางของกระแสไฟฟ้าในเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลจึงไหลตามกันไปทิศทางเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 แสดงทิศทางกระแสไฟฟ้าเมื่อมีความแตกต่างของความร้อน เมื่อด้านบนของโมดูลได้รับความร้อน และด้านล่างของโมดูลมีอุณหภูมิที่ต่ำกว่า ในโมดูลนี้ประกอบด้วยวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกจำนวน 5 หน่วยย่อย ต่อกันแบบอนุกรม (1 หน่วยย่อยประกอบด้วย วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก ชนิด N-type 1 ชั้น และ P-type 1 ชั้น)

“เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล” ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้แล้วในต่างประเทศที่มีอากาศหนาว เช่น การผลิตกระแสไฟฟ้า สามารถนำเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลด้านหนึ่งมาประกบเข้ากับแหล่งความร้อนที่สูญเสียต่างๆ เช่น เครื่องจักร เครื่องยนต์ประเภทใช้ได้ทั้งไฟฟ้าและน้ำมัน (Hybrid) ท่อไอเสีย คอมเพรสเซอร์แอร์ เตาความร้อน หรือแม้แต่บนดาวเทียม ที่ผิวอีกด้านหนึ่งของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลอากาศเย็นกว่า ก็จะเปลี่ยนรูปพลังงานความร้อนที่เหลือทิ้งนี้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้

เทคโนโลยีพลาสมา (plasma technology) ถือว่าเป็นสิ่งที่ขาดไม่ได้เลยในปัจจุบันสำหรับกระบวนการปรับปรุงพื้นผิวชิ้นงานในระดับอะตอม ไม่ว่าจะเป็นการทำความสะอาด (cleaning) การเคลือบผิว (coating) และการกัดผิว (etching) ล้วนต้องอาศัยพลาสมาเป็นแหล่งของไอออนเพื่อให้เกิดกระบวนการดังกล่าว

พลาสมาจัดเป็นสถานะที่สี่ของสสาร เกิดจากแก๊สที่ถูกกระตุ้นจากพลังงานภายนอกอย่างต่อเนื่อง ทำให้แก๊สดังกล่าวแตกตัวเป็นไอออนและอิเล็กตรอน โดยที่บางส่วนนี้สามารถที่จะกลับมารวมตัวกันกลับเป็นอะตอมเดิมอีกครั้ง (ที่มีสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้า) พร้อมกับคายพลังงานส่วนเกินที่ได้รับออกมาในรูปของพลังงานที่ตาสามารถมองเห็นได้ (แสงสีต่างๆ) หรืออิเล็กตรอนอิสระบางส่วนจะชนเข้ากับอิเล็กตรอนของอะตอมอื่นๆ ทำให้อะตอมเหล่านั้นถูกกระตุ้นหรือแตกตัวเป็นปฏิกิริยาที่ต่อเนื่องกันไป เมื่อนำพลังงานจากภายนอกนี้ออกไป พลาสมาจะกลับมาอยู่ในสถานะแก๊สเช่นเดิม ตัวอย่างของพลาสมาในธรรมชาติ เช่น ในดวงอาทิตย์หรือฟ้าผ่า เป็นต้น พลาสมาที่มนุษย์สร้างขึ้นและพบเห็นในชีวิตประจำวัน ได้แก่ หลอดฟลูออเรสเซนต์ที่บรรจุไอปรอทความดันต่ำ แล้วถูกกระตุ้นด้วยความต่างศักย์สูงที่เหมาะสมทำให้เป็นพลาสมาซึ่งบางส่วนเข้าชนกับสารเรืองแสงที่ฉาบอยู่ด้านในของหลอดเกิดการเรืองแสงขึ้นมา พลาสมาที่สร้างขึ้นในปัจจุบันสำหรับงานวิจัยในห้องทดลองและในโรงงานอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงพื้นผิว (surface modification) การผลิตหัวอ่านเขียนคอมพิวเตอร์ (slider fabrication) รวมถึงการผลิตแผงวงจร โครงสร้างระดับไมโครเมตร ล้วนแล้วแต่ใช้คลื่นวิทยุ ขนาดความถี่ 13.56 MHz เป็นแหล่งพลังงานภายนอกมากระตุ้นแก๊สให้เกิดสถานะพลาสมา เหตุที่นิยมใช้เครื่องส่งคลื่นวิทยุที่ย่านความถี่นี้ก็เนื่องด้วยเหตุผลที่ว่าเป็นความถี่ที่อนุญาตให้ใช้จากหน่วยงานความมั่นคงแห่งชาติเพราะไม่รบกวนกับย่านความถี่ที่ใช้สำหรับการสื่อสารทั้งทางวิทยุและโทรทัศน แต่ทว่าเครื่องส่งคลื่นวิทยุที่ความถี่ 13.56 MHz มีราคาที่สูงในระดับห้าแสนถึงหนึ่งล้านบาท จึงเป็นข้อจำกัดหลักในการที่จะจัดหาไว้เพื่อการวิจัยและทดลองสำหรับหน่วยงานหรือมหาวิทยาลัยที่มีทุนวิจัยน้อย เนื่องจากปัจจุบันประเทศไทยกำลังก้าวเข้าสู่ประชาคมเศรษฐกิจอาเซียน (AEC) การแข่งขันทางเทคโนโลยีจึงเป็นสิ่งที่จะต้องคำนึงถึง เนื่องจากต้องเตรียมบุคลากรให้มีความพร้อมในการแข่งขันกับต่างประเทศ ไม่ใช่ได้เรียนเฉพาะแต่ในตำรา แต่ต้องได้ทำการทดลองด้วย จึงจะเรียกว่ารู้จริง มีประสบการณ์จริง

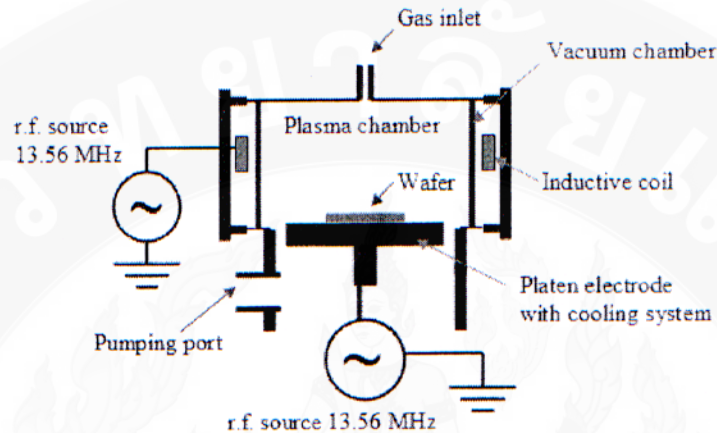
สาขาเทคโนโลยีพลาสติกก็เป็นอีกสาขาหนึ่ง ที่จำเป็นต้องเตรียมบุคลากรให้มีความรู้ ความชำนาญอย่างเพียงพอ เพื่อรองรับอุตสาหกรรมเทคโนโลยีขั้นสูงจากต่างประเทศที่มาสร้างโรงงานผลิตในเมืองไทย ยกตัวอย่างเช่น บริษัท ซีเกท เทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด และบริษัท เวสเทิร์น ดิจิตอล (ประเทศไทย) จำกัด ที่มาสร้างโรงงานผลิตหัวอ่านเขียนคอมพิวเตอร์ ในประเทศไทย ส่งผลให้ประเทศไทยเป็นผู้ส่งออก อุปกรณ์เก็บข้อมูลฮาร์ดดิสก์ (Hard disk) รายใหญ่อันดับหนึ่งของโลกเกิดการจ้างงานในประเทศไทยกว่าสามแสนคนในอุตสาหกรรมนี้ เทคโนโลยีพลาสติกถือว่าเป็นเทคโนโลยีหลักในการผลิตหัวอ่านเขียนคอมพิวเตอร์ในอุตสาหกรรมดังกล่าว ตัวอย่างที่ยกมานี้เป็นเพียงบางส่วนของที่เห็นภาพได้ค่อนข้างชัดเจน แต่ยังมีอีกมากที่สามารถเอาเทคโนโลยีพลาสติกไปประยุกต์ใช้ได้

ทางผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะนำคลื่นพลังงานไมโครเวฟ ความถี่ 2.45 GHz มาใช้เป็นแหล่งพลังงานสำหรับการสร้างพลาสติกซึ่งมีราคาถูกกว่าเครื่องส่งคลื่นวิทยุที่ความถี่ 13.56 MHz อยู่ค่อนข้างมาก เพื่อสร้างเครื่องกักผิวชิ้นงาน ภายใต้ความดันสุญญากาศ เพื่อใช้สำหรับงานวิจัยทางด้านฟิสิกส์ประยุกต์และวัสดุศาสตร์ การทดลอง การเรียนการสอน เพื่อพัฒนาบุคลากรและผลิตบุคลากรในด้านนี้ให้เพียงพอสำหรับการพัฒนาและเติบโตของประเทศไทยในอนาคต

ทฤษฎี สมมุติฐานและกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

เทคนิคการกัดเซาะโดยใช้พลาสติก เป็นกระบวนการสำคัญในการสร้างรูปแบบและความลึกบริเวณผิวหน้าชิ้นงาน ซึ่งรูปแบบและความลึกที่ต้องการสร้างนั้นอาจมีขนาดเล็กในระดับไมโครเมตรถึงนาโนเมตรในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ที่เกี่ยวข้องกับการกัดชิ้นงานที่มีขนาดเล็ก อย่างเช่น การสร้างเลเซอร์ไดโอด การสร้างหัวอ่านเขียนคอมพิวเตอร์ มักนิยมใช้พลาสติกที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของขดลวดนำไฟฟ้าโดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอย่างเช่นคลื่นวิทยุ ในภาษาเทคนิคของสาขาวิชานี้คือ Inductive coupled plasma (ICP) โดยความถี่ของคลื่นวิทยุที่นิยมใช้กันคือ 13.56 MHz เหตุที่ในภาคอุตสาหกรรมนิยมใช้ ICP plasma ก็เพราะว่าเทคนิคนี้สามารถสร้างพลาสติกที่มีปริมาตรที่มีขนาดใหญ่ได้ และเหมาะสำหรับการดำเนินการกับชิ้นงานใหญ่ระดับเวเฟอร์ 6 นิ้ว เพื่อลดต้นทุนในการผลิตให้น้อยที่สุดและผลิตสินค้าให้ได้มากที่สุด รูปที่ 3 แสดงองค์ประกอบของเครื่องกัดแบบ ICP plasma ที่นิยมใช้กันในอุตสาหกรรมเทคโนโลยีขั้นสูง เช่นในบริษัท บริษัท

ซีเกท เทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด และบริษัท เวสเทิร์น ดิจิตอล (ประเทศไทย) จำกัด ซึ่งเป็นผู้ผลิตหน่วยความจำคอมพิวเตอร์ ราคาเครื่องกัดแต่ละเครื่องมีมูลค่าประมาณ 30 ล้านบาท ถึง 60 ล้านบาท เพราะสามารถดำเนินการกับชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

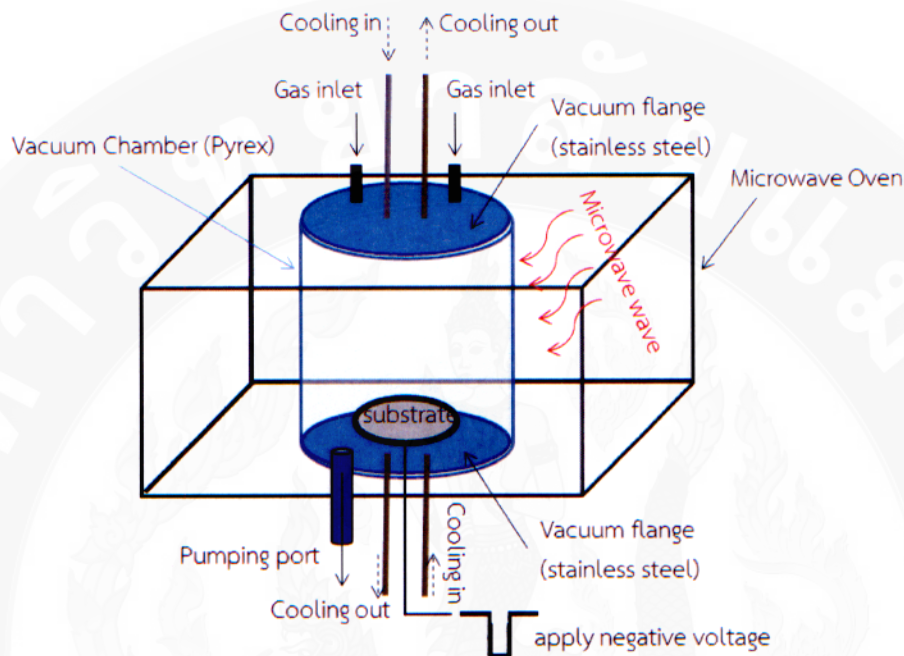


รูปที่ 3 แสดงองค์ประกอบของเครื่องกัดแบบ ICP plasma [1]

ICP plasma มีส่วนประกอบหลักคือ แหล่งให้กำเนิดพลาสมา (plasma source) และตัวจับยึดแผ่นชิ้นงาน (Platen electrode) โดยแหล่งพลังงานเพื่อให้เกิดพลาสมาคือคลื่นวิทยุซึ่งเชื่อมต่อกับขดลวดเหนี่ยวนำ (Inductive coil) ขณะที่ตัวจับยึดชิ้นงานจะเชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายคลื่นวิทยุอีกตัวหนึ่ง เมื่อทำการจ่ายก๊าซที่จะใช้งานเข้าไปในห้องสุญญากาศ (Vacuum chamber) ในระดับความดันที่เราต้องการ พลาสมาจะเกิดขึ้นเต็มห้องสุญญากาศเมื่อทำการจ่ายคลื่นวิทยุไปที่ขดลวดเหนี่ยวนำ หลังจากที่กำลังคลื่นวิทยุถูกจ่ายให้กับ Platen electrode (ขั้วนำไฟฟ้าที่ยึดชิ้นงานไว้) อิเล็กตรอนในพลาสมาซึ่งสามารถเคลื่อนที่ได้ไวกว่าไอออนบวกในพลาสมา จะวิ่งไปยังแผ่น electrode ก่อน จึงทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าลบกระแสตรงบนแผ่น electrode ขึ้น เนื่องจากชิ้นงานวางอยู่บน electrode ทำให้ชิ้นงานถูกไอออนบวกที่มีพลังงานจลน์สูง วิ่งมาชนผิวหน้าชิ้นงานเกิดการกัดเซาะ (etching) ขึ้น ซึ่งพลังงานจลน์ดังกล่าวเกิดจากไอออนบวกในพลาสมา อยู่ในสนามไฟฟ้าลบของ electrode จึงทำให้ไอออนบวกถูกเหนี่ยวนำให้วิ่งมาชนผิวชิ้นงาน

ในงานวิจัยนี้จะสร้างเครื่องกัดที่มีหลักการทำงานคล้ายกับ ICP plasma แต่จะเปลี่ยนแหล่งพลังงานที่สร้างพลาสมาจากคลื่นวิทยุมาเป็นคลื่นไมโครเวฟ และที่ขั้ว Platen electrode ตรงตำแหน่งที่ยึดชิ้นงานจะเชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขั้วลบเข้าไป ไว้สำหรับดึง

ไอออนบวกจากพลาสมาโดยตรง เพื่อลดต้นทุนในการผลิต ทางทีมวิจัยเชื่อมั่นว่าระบบที่เสนอ
ดังกล่าวจะสามารถกักชิ้นงานได้อย่างแน่นอนดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 แสดงองค์ประกอบของเครื่องกักที่จะพัฒนาในงานวิจัยนี้

วัตถุประสงค์

พัฒนาเครื่องกักผิวชิ้นงาน (ชิ้นรูป หรือ เซาะร่องให้มีโครงสร้างต่างๆ) ภายใต้ความดัน
สูญญากาศโดยใช้คลื่นไมโครเวฟเป็นแหล่งพลังงานเพื่อให้เกิดพลาสมา

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เผยแพร่ผลงานการประดิษฐ์ในการประชุมวิชาการ หรือ วารสารวิชาการระดับชาติหรือระดับนานาชาติได้
2. มีเครื่องมือวิจัย ไว้ใช้สำหรับให้นักศึกษาระดับปริญญาตรีและระดับปริญญาโท สำหรับทำวิจัยในวิชาค้นคว้าอิสระหรือวิทยานิพนธ์

3. มีเครื่องมือวิจัย ไว้ใช้สำหรับประกอบการเรียนการสอนทั้งในระดับปริญญาตรีและปริญญาโท ใน หลักสูตรฟิสิกส์ประยุกต์ (ระดับปริญญาตรี) และ หลักสูตรวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนาโน (ระดับปริญญาโท) ด้านไมโครเทคโนโลยีและนาโนเทคโนโลยี
4. เป็นต้นแบบของเครื่องมือวิจัย หากสถาบันอื่นๆในประเทศไทยต้องการที่จะสร้างเพื่อใช้ประกอบการเรียนการสอนในสถาบันของตน

การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ในช่วงเวลาประมาณ 12 ปีที่ผ่านมา มีจำนวนกลุ่มนักวิจัยที่สนใจทำงานวิจัยเกี่ยวกับด้านเทคโนโลยีพลาสมาเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ต่อไปนี้จะสรุปภาพรวมของสถาบันในประเทศไทยที่กำลังทำวิจัยในด้านนี้กันอยู่ แต่จะเน้นเฉพาะพลาสมาประเภท glow discharge ที่มีการสร้างพลาสมาที่มีขนาดใหญ่ ใหญ่พอที่จะสามารถดำเนินการ (process) กับวัสดุขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้วได้ อย่างเช่นเวเฟอร์ซิลิกอนขนาด 3 นิ้ว

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เน้นงานด้าน ปรับปรุงผิววัสดุ ทั้งเคลือบแข็ง (nitride hardening) [2], เคลือบผิวด้วยฟิล์มบางคล้ายเพชร (diamond like-carbon thin film) ด้วยเทคนิคการจุ่มชิ้นงานในพลาสมา หรือเรียกว่า plasma immersion ion implantation technique [3] และ ปรับปรุงคุณภาพภาพผิวของผ้าไหมให้มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ [4] ซึ่งพลาสมาที่ผลิตโดยใช้ คลื่นวิทยุขนาดความถี่ 13.56 MHzอีกทั้งมีการนำคลื่นไมโครเวฟ 2.45 GHz มาสร้างพลาสมาเพื่อนำอิเล็กตรอนจากพลาสมาที่สร้างได้ ไปใช้ในการสะเทิน (ทำให้เป็นกลางทางไฟฟ้ามากขึ้น) ล่าอนุภาคที่มีประจุบวกเพื่อลดการบานออกของลำอนุภาคประจุบวกขณะนำไปใช้งาน [5]

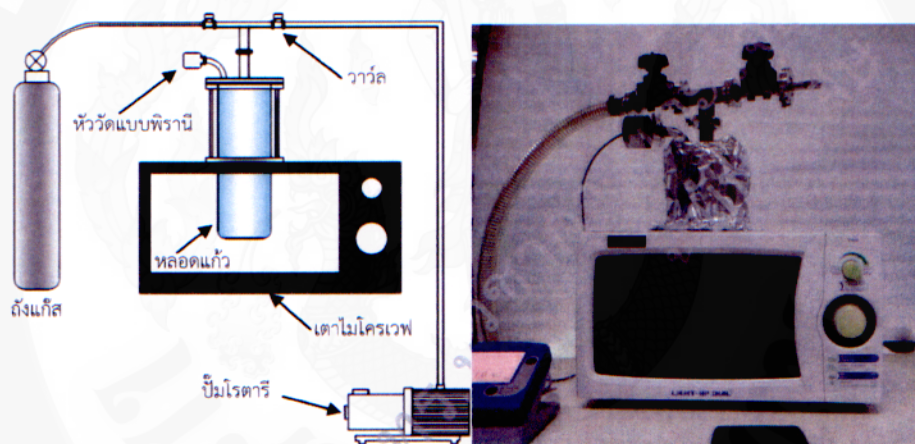
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เน้นงานด้านปรับปรุงคุณภาพผิวของผ้า [6] การสังเคราะห์ฟิล์มบางและสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำความเร็วสูงจากคาร์บอนคล้ายเพชร และพอลิเมอร์นำไฟฟ้า ซึ่งพลาสมาที่ผลิตโดยใช้คลื่นวิทยุขนาดความถี่ 13.56 MHz

สำนักวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ ประยุกต์เทคโนโลยีพลาสมากับงานทางด้านเกษตร [7] มีแหล่งกำเนิดพลาสมาแบบ คลื่นวิทยุขนาดความถี่ 13.56 MHz [8] และคลื่นไมโครเวฟ 2.45 GHz [9]

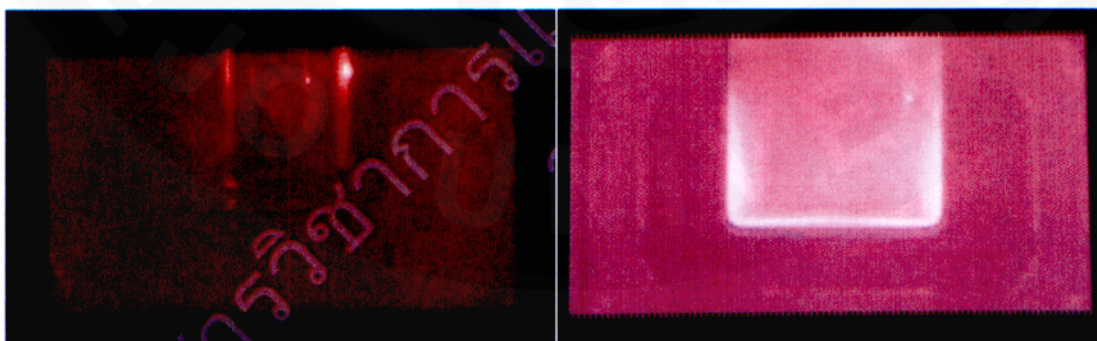
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น เน้นไปทางด้านการเคลือบวัสดุด้วยคาร์บอนคล้ายเพชรด้วยวิธีสปัตเตอร์จากไฟฟ้ากระแสสลับ วิธี Hot-Filament Chemical Vapor Deposition [10] และปัจจุบันกำลังพัฒนาระบบ RFCVD สำหรับวัสดุฟิล์มบางขนาดใหญ่

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา เน้นไปทางด้านการศึกษาเคลือบฟิล์มบางของโลหะอย่างเช่น TiO_2 ด้วยวิธี Dual Cathod DC Unbalanced Magnetron Sputtering [11]

ศราวุธ ใจเย็น และคณะ (2013) ได้พัฒนาชุดกำเนิดพลาสมาขนาดเล็กโดยใช้เตาไมโครเวฟที่ใช้ในครัวเรือนเพื่อประยุกต์ใช้กับกระบวนการปรับสภาพและทำความสะอาดพื้นผิวในงานทางด้านฟิล์มบาง เตาไมโครเวฟมีกำลังไฟฟ้า 800 วัตต์ให้คลื่นไมโครเวฟที่มีความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ ภาชนะสุญญากาศที่ถูกสวมลงไปในเตาไมโครเวฟทางด้านบนของเตาสามารถทำความสะอาดได้ 7×10^{-3} ทอร์ โดยใช้ปั๊มโรตารี ระบบดังกล่าวสามารถทำให้เกิดพลาสมาจากแก๊สอาร์กอนและแก๊สออกซิเจนในช่วงความดัน 0.2-3.0 ทอร์ เมื่อทดสอบโดยการปรับสภาพและทำความสะอาดพื้นผิวของแผ่นกระจกสไลด์ด้วยพลาสมาจากแก๊สอาร์กอนและแก๊สออกซิเจน แล้วพบว่ามุมสัมผัสระหว่างหยดน้ำและพื้นผิวมีค่าลดลงตามเวลาในการอาบพลาสมา [12]

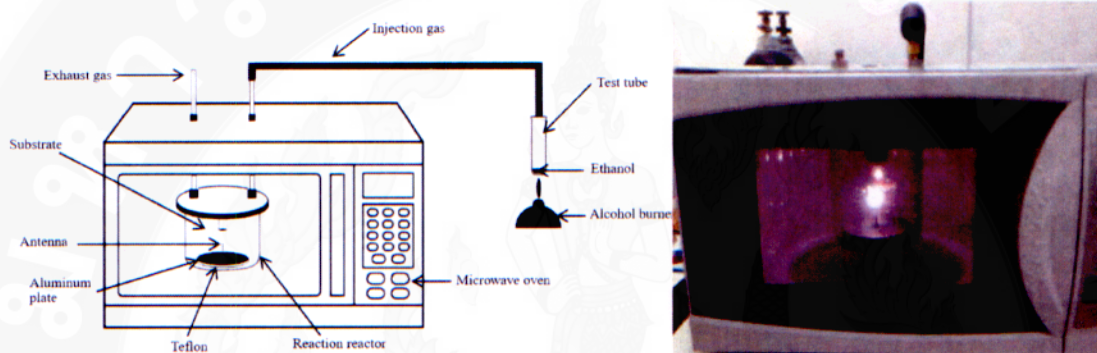


รูปที่ 5 (ซ้าย) แผนภาพ และ (ขวา) ภาพถ่ายเครื่องกำเนิดพลาสมาขนาดเล็ก [12]



รูปที่ 6 แสดงภาพถ่ายการเกิดพลาสมาของแก๊สออกซิเจนที่ความดัน 0.4 – 6.0 ทอร์ [12]

R. Pongsopon และคณะ (2014) ได้ดัดแปลงเตาไมโครเวฟที่ใช้ในครัวเรือนขนาดกำลังไฟฟ้า 700 W ใช้ Pyrex บีกเกอร์ขนาด 800 ml ดัดแปลงเป็นห้องสุญญากาศ โดยมีแท่งโลหะทั้งสแตนดัดติดตั้งบนฝาปิดของห้องสุญญากาศเพื่อทำหน้าที่ช่วยในการสร้างพลาสมา ไมโครเวฟพลาสมาได้ถูกใช้ในกระบวนการตกสะสมด้วยไอเคมีโดยใช้ไมโครเวฟพลาสมา (microwave plasma chemical vapor deposition system, MPCVD) ใช้ไอเคมีของ ethanol เพื่อทำการตกสะสมอนุภาคนาโนของคาร์บอนบนวัสดุที่เป็นแก้ว เพื่อทำการปรับปรุงผิวของแก้วให้มีความชอบน้ำมากขึ้น [13]

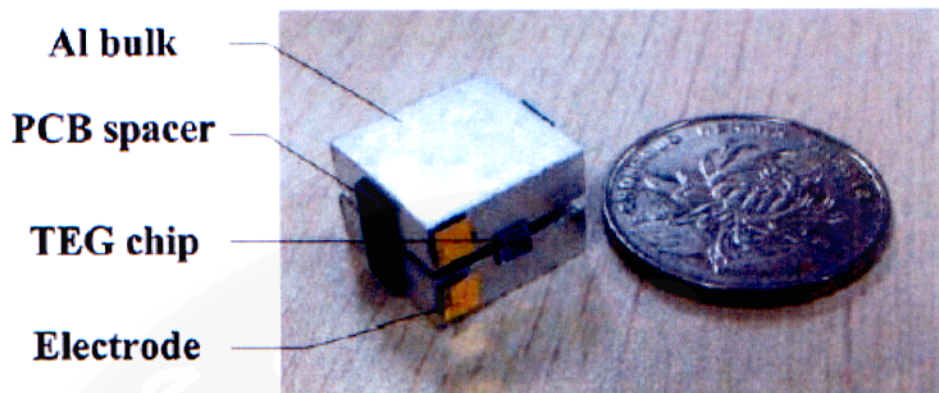


รูปที่ 7 (ซ้าย) แผนภาพของเครื่อง MPCVD และ (ขวา) ภาพถ่ายจริงของเครื่อง MPCVD [13]

โดยภาพรวมจะเห็นชัดว่า ทุกสถาบันเน้นไปที่การเคลือบผิว (coating) และเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงผิว (surface modification) ซึ่งยังไม่มีที่ไหนเน้นไปที่การกัด (etching) เพื่อสร้างโครงสร้างที่ผิว ของวัสดุเลย

งานวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงประยุกต์ เป้าหมายหลักคือการสร้างระบบการกัดด้วยไมโครเวฟพลาสมา เพื่อที่จะนำระบบที่พัฒนาได้แล้วดังกล่าว ไปสร้างโครงสร้างบนผิวของวัสดุ (เช่น ร่องลึก ร่องรูปตัววี) เพื่อสร้างอุปกรณ์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ต่อไป ทิศทางที่ทางทีมวิจัยจะมุ่งเน้นในลำดับต่อไปก็คือ การประดิษฐ์อุปกรณ์ผลิตกระแสไฟฟ้าจากความร้อนที่มีขนาดเล็ก Thermoelectric generator (TEG) ซึ่งเป็นพลังงานที่สะอาด

รูปที่ 8 แสดงตัวอย่างสิ่งประดิษฐ์ จากนักวิจัยต่างประเทศ จะเห็นได้ว่าสิ่งประดิษฐ์มีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับเหรียญที่ใช้ในการซื้อขายแลกเปลี่ยนสินค้า ดังนั้นในการประดิษฐ์สิ่งของที่มีขนาดเล็กจึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีเทคโนโลยีที่สามารถดำเนินการในระดับอะตอมได้ อย่างเช่น พลาสมาเทคโนโลยี

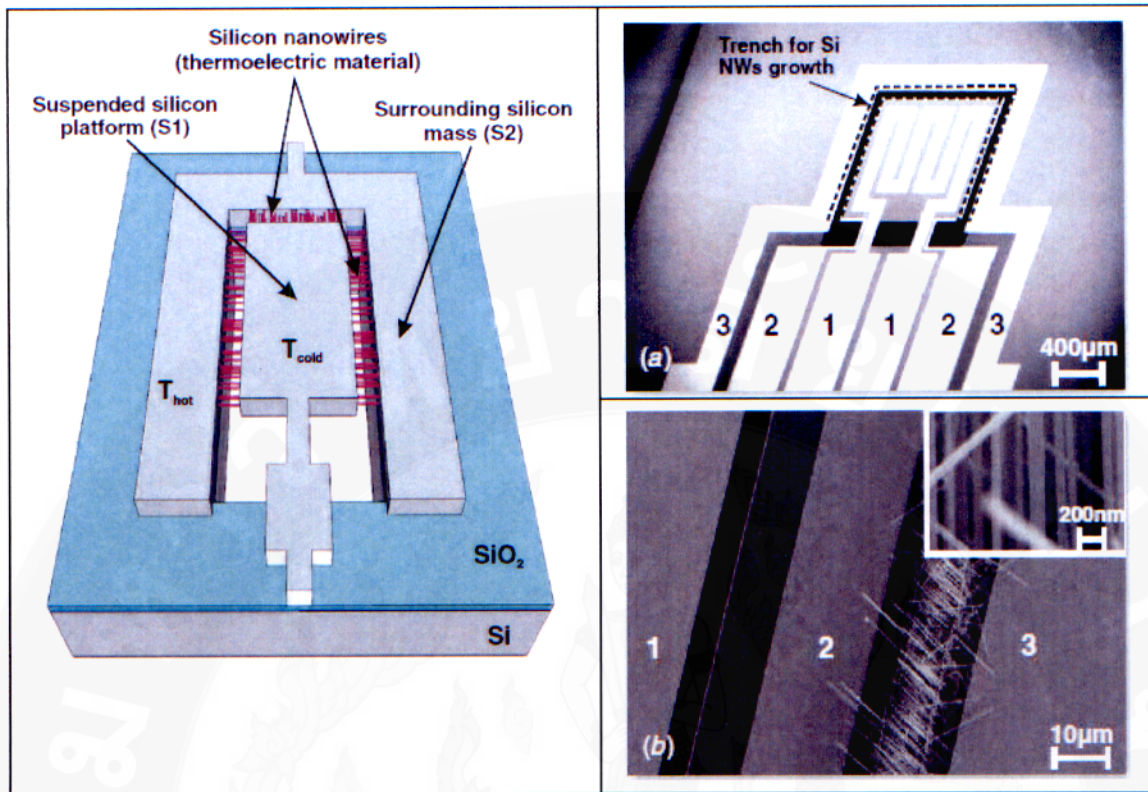


รูปที่ 8 แสดงตัวอย่าง TEG chip เทียบกับเหรียญ [14]

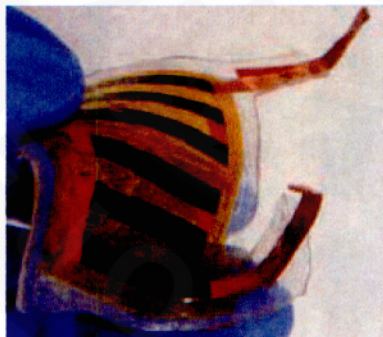
การผลิตวัสดุ เทอร์โมอิเล็กทริกจากซิลิกอนให้มีโครงสร้างแบบเส้นลวดนาโน (silicon nanowire) หรือ ท่อนาโนซิลิกอนเริ่มเป็นที่สนใจจากนักวิจัยทั่วโลก เนื่องจากการทำให้ขนาดของซิลิกอนเล็กลงจนถึงระดับน้อยกว่า 100 นาโนเมตร จะสามารถลดการนำความร้อนผ่านตัวมันได้มาก เนื่องจากขนาดที่เล็กในระดับนี้จะมีผลต่อการส่งผ่านคลื่นความร้อนจากด้านที่ร้อนสู่ด้านที่เย็น แต่คุณสมบัติการนำไฟฟ้ายังคงเดิมอยู่ ซึ่งวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกอุดมคตินั้นต้องการให้มีคุณสมบัติไม่นำความร้อนและเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี รูปที่ 9 แสดงตัวอย่างสิ่งประดิษฐ์เส้นลวดซิลิกอนระดับนาโนเมตร [15]

คาร์บอนนาโนทิวบ์ (carbon nanotube) หรือ ท่อนาโนคาร์บอนซึ่งเป็นเส้นลวดคาร์บอนระดับนาโนเมตร เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติที่โดดเด่นคือ เป็นตัวนำไฟฟ้าและตัวนำความร้อนที่ดี แต่วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกอุดมคตินั้นต้องการให้มีคุณสมบัติ ไม่นำความร้อนและเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะนำคุณสมบัติ การเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีของท่อนาโนคาร์บอนผสมผสานกับการเป็นตัวนำความร้อนที่ไม่ดีของท่อนาโนซิลิกอนมาประดิษฐ์เป็นอุปกรณ์แปลงไฟฟ้า TEG

Yoshiyuki Nonoguchi [16] และทีมงาน ได้แสดงให้เห็นว่า ท่อนาโนคาร์บอนสามารถนำมาประดิษฐ์อุปกรณ์ TEG ได้จริง โดยการสร้างวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก ชนิดเอ็น (N-type) จาก การเจือโมเลกุลของ tppบนท่อนาโนคาร์บอนผนังเดี่ยว (tpp-doped SWNTs) และสร้างวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก ชนิดพี (P-type) จาก การเจือโมเลกุลของ TCNQ บนท่อนาโนคาร์บอนผนังเดี่ยว (TCNQ-doped SWNTs) โดยสร้างวัสดุดังกล่าวเป็นฟิล์มขึ้นมา หลังประกอบเป็นโมดูล (มี 3 หน่วยย่อย ดังแสดงในรูปที่ 10) ทดสอบได้ค่า figure of merit (ZT) ประมาณ 0.073 ณ ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน 20°C ระหว่างหัวร้อนและหัวเย็น TEG ให้แรงดันไฟฟ้า 6mV (thermo-voltage) และกำลัง 110 nW หากทำการนำหลายๆ โมดูลมาเชื่อมต่อกันจะได้กำลังไฟฟ้าที่มากขึ้น



รูปที่ 9 สิ่งประดิษฐ์โมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกทำจากวัสดุซิลิกอน หลังผ่านการทดสอบ ให้ค่า Seebeck voltage 80 mV ภายใต้ความแตกต่างของอุณหภูมิของด้านร้อนและด้านเย็น ที่ 450°C



1 หน่วยย่อย ประกอบด้วยวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก ชนิด พี จำนวน 1 ชั้น และ วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก ชนิด เอ็น จำนวน 1 ชั้น

รูปที่ 10 แสดงโมดูล TEG มี 3 หน่วยย่อย มาประกอบกัน ประดิษฐ์จากท่อนาโนคาร์บอน

การควบคุมความกว้าง (width) ของร่องลึกบนวัสดุซิลิกอนหลังถูกกัดโดยใช้พลาสมา ภายใต้อุณหภูมิสุญญากาศให้มีขนาดที่สม่ำเสมอตามแนวยาวและมีระยะห่าง (space) ระหว่างร่องลึกให้มีขนาดที่คงที่ มีความสำคัญมากในกระบวนการถ่ายโอนลวดลาย (pattern transfer) ซึ่งเป็นขั้นตอนหนึ่งของกระบวนการผลิตอุปกรณ์ไฟฟ้าวงจรรวมขนาดเล็กการถ่ายโอนลวดลายให้เหมือนต้นแบบ (mask pattern) จำเป็นต้องใช้กระบวนการกัดที่ให้อัตราการกัดแบบมีทิศทาง (anisotropic etching) พร้อมทั้งให้อัตราการกัดที่สูง (high etch rates) เพื่อลดเวลาในกระบวนการผลิตและ มีการเลือกกัดสูง (high selectivity) กล่าวคือกัดวัสดุที่ต้องการให้ถูกกัดมากๆ ในขณะที่กัดวัสดุที่ไม่ต้องการให้ถูกกัดน้อยๆ หรือ ไม่กัดเลยยิ่งดี

ในทางปฏิบัติแล้วการพัฒนากระบวนการกัดให้มี การกัดแบบมีทิศทาง อัตราการกัดที่สูง และมีการเลือกกัดที่สูง พร้อมๆกันเป็นไปได้ยาก อย่างเช่น การกัดแบบ reactive ion etching (RIE) เมื่อทำการพัฒนาเงื่อนไขการกัดให้มี การกัดแบบมีทิศทางได้แล้ว การเลือกกัดมักจะเลือกกัดไม่ดี และในบางครั้งพัฒนาให้เลือกกัดดีแต่กลับได้อัตราการกัดที่ต่ำ เหตุการณ์แบบเดียวกันนี้เกิดขึ้น เช่นเดียวกันกับการกัดโดยใช้ ไมโครเวฟพลาสมา (microwave plasma) อิเล็กตรอนไซโคลตรอนเรโซแนนซ์พลาสมา (electron cyclotron resonance plasma, ECR) พลาสมาความหนาแน่นสูง (high plasma densities) และมีจำนวนของอนุภาคนิวตรอน (active species) จะทำให้เงื่อนไขการกัดนี้ ได้อัตราการกัดสูง (high etch rate) แต่การเลือกกัด (selectivity) และการกัดแบบมีทิศทาง (anisotropic) อาจจะไม่ดีก็ได้ ปัญหาพื้นฐานคือการทำที่ไม่สามารถควบคุมปฏิกิริยาเคมีของกระบวนการกัดที่ผิวล่างสุด (bottom surfaces) ของชิ้นงาน กับปฏิกิริยาเคมีของกระบวนการกัดที่ผนังด้านข้าง (sidewall surfaces) ซึ่งควรที่จะต้องสามารถควบคุมแยกออกจากกันได้

Shinichi Tachi และคณะ^๑ [17] ได้แสดงให้เห็นว่าการควบคุมอุณหภูมิที่ผิวของวัสดุที่ถูกกัด ให้มีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าศูนย์องศาเซลเซียส สามารถแก้ปัญหาที่กล่าวมาแล้วข้างต้นและสามารถกัดร่องให้มีขนาดความกว้างของร่องลึกในระดับนาโนเมตรได้ ด้วยแนวคิดที่ว่าทำให้อุณหภูมิที่ผิวชิ้นงานต่ำจะสามารถลดปฏิกิริยาทางเคมีของกระบวนการกัดที่ผนังด้านข้าง (sidewall) ลงได้ ในกระบวนการกัดเชิงปฏิกิริยาเคมีโดยการใช้พลาสมา เกิดขึ้นได้สองแบบ คือ แบบการกัดทันทีทันใด (spontaneous etching) และแบบการกัดโดยใช้อิออนช่วย (ion-assisted reactions) โดยที่กระบวนการกัดอย่างหลังจะเกิดการกัดที่ด้านล่างสุดของผิวชิ้นงาน อนุภาคมีประจุบวกเช่น ไอออนจะถูกเร่งโดยอิทธิพลของศักย์ไฟฟ้าที่มีความแตกต่างกันภายในบริเวณที่เรียกว่า sheath ที่เกิดขึ้นเหนือผิววัสดุและไปสิ้นสุดที่บริเวณที่เป็นพลาสมา ไอออนมีประจุเหล่านี้จะวิ่ง ไปชนที่อะตอมด้านล่างของวัสดุช่วยเร่งให้เกิดปฏิกิริยาการกัดให้เร็วขึ้น ส่วนการกัดแบบ spontaneous etching

เกิดขึ้นระหว่าง อนุมูลอิสระ (ที่มีความไวในการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีสูงแต่ไม่มีประจุไฟฟ้า) กับ อะตอมที่ผิวของวัสดุทั้งด้านล่างสุดและผนังด้านข้าง กระบวนการกัดแบบนี้ทำให้ได้หลุมลึกในแบบที่เรียกว่า isotropic profiles คือการถูกกัดในลักษณะที่วัสดุถูกกัดในแนวตั้งและในแนวระนาบ ในปริมาณที่พอๆกัน เกิดเป็นแอ่งที่ขอบโค้งมน ลักษณะทางกายภาพแบบนี้เกิดขึ้นได้เนื่องจาก การวิ่งเข้าชนกันของอนุมูลอิสระกับอะตอมของวัสดุเกิดขึ้นแบบไร้ทิศทาง (random incidence) และมีการสะท้อนกลับเพียงบางส่วนของอะตอมที่มีความเป็นกลางทางไฟฟ้าหลังเกิดการชนกันแล้ว

การพัฒนาเงื่อนไขการกัดให้ได้ การกัดในแบบที่มีทิศทางการกัดที่สูง (high anisotropic) จะต้องทำการลด spontaneous reaction ที่เกิดขึ้นโดยอนุมูลอิสระให้เกิดขึ้นน้อยที่สุดหรือหมดสิ้นไปเพื่อให้เกิดการกัดทางด้านข้างให้น้อยที่สุด การควบคุมอุณหภูมิที่ผิวชิ้นงานได้เป็นแนวทางหนึ่งที่จะสามารถควบคุมอัตราการกัดทางด้านข้างให้เพิ่มขึ้นหรือลดน้อยลงได้เนื่องด้วยเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจะส่งผลให้อัตราการกัดทางด้านข้างเพิ่มขึ้นในทางกลับกันเมื่อลดอุณหภูมิจะส่งผลให้อัตราการกัดทางด้านข้างลดลง อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงในปริมาณที่ไม่มาก จะส่งผลต่ออัตราการกัดทางด้านข้างของชิ้นงานเพียงเล็กน้อยเท่านั้น [18,19] เนื่องจากการกัดโดยวิธี Reactive Ion Etching และไมโครเวฟพลาสมา กระบวนการแบบ ไอออนช่วยในการกัด (ion-assisted reaction) จะเป็นกลไกหลักและควบคุมอัตราการกัดของเงื่อนไขการกัดนั้นๆ

การทดลองได้ใช้เครื่องกัดแบบ rf cathode-coupled parallel plate และเครื่องกัดแบบไมโครเวฟพลาสมาที่สามารถควบคุมอุณหภูมิของชิ้นงานได้ในช่วง -150 ถึง $+200^{\circ}\text{C}$ อุณหภูมิที่ผิวชิ้นงานเมื่อทำการทดลองจะอยู่ในช่วง -150 ถึง $+30^{\circ}\text{C}$ ชิ้นงานที่ทดลองเป็น Si (100) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 นิ้ว ใช้ photoresist เป็นลวดลายต้นแบบ ก๊าซที่ใช้ทดลองเป็น SF_6 และ fluorocarbon gases [17]

จากการทดลองกัด Si ด้วยก๊าซ SF_6 โดยควบคุมอุณหภูมิที่ผิวชิ้นงานที่ $+30^{\circ}\text{C}$ -30°C -70°C และ -110°C ควบคุมความหนาแน่นของกำลังคลื่นวิทยุที่ 0.2 W/cm^2 ภายใต้ความดันสุญญากาศที่ 8.6 Pa (65 mTorr) จากการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดทางด้านข้างของร่องที่ถูกกัด พบว่า การกัดไปทางด้านข้างสังเกตเห็นได้ชัดที่สุดเมื่อทดลองที่อุณหภูมิ $+30^{\circ}\text{C}$ การกัดทางด้านข้างเริ่มลดลงและยังคงสังเกตเห็นได้จนถึงทดลองที่อุณหภูมิ -70°C และไม่เกิดการกัดด้านข้างเมื่อทดลองที่อุณหภูมิ -110°C ผลการทดลองที่ได้เป็นการยืนยันว่าปฏิกิริยาทางเคมีของการกัดสามารถลดลงได้เมื่อทำการลดอุณหภูมิที่ผิวชิ้นงาน การกัดจะไม่เกิดขึ้นเมื่อทดลองที่อุณหภูมิต่ำกว่า -140°C เนื่องจากอุณหภูมิต่ำกว่านี้ก๊าซ SF_6 จะ

ควมแน่นส่งผลให้การกัดหยุดไป อัตราการกัดทางด้านล่าง (bottom surface) ยังคงสูงที่ประมาณ 500 nm/min ในช่วงอุณหภูมิการทดลองที่ -130°C ถึง -100°C [17]

เมื่อทำการทดลองภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิที่ผิวชิ้นงานในช่วงเดียวกันในช่วง -130°C ถึง -100°C แต่เปลี่ยนจากการใช้คลื่นวิทยุในการสร้างพลาสมา มาเป็นเครื่องกัดโดยใช้คลื่นไมโครเวฟพบว่า อัตราการกัดสูงขึ้นประมาณสองเท่า เป็น 1,000 nm/min และมีการกัดทางด้านข้างน้อยมาก นอกเหนือจากนี้ยังได้ทดลองใช้ก๊าซ CF_4 และ CBrF_3 กัด Si ที่อุณหภูมิ -100°C เทียบกับที่อุณหภูมิ $+30^{\circ}$ ปรากฏว่าอัตราการกัด Si ไม่เปลี่ยนแปลง และได้ผลการทดลองมีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับการใช้ก๊าซ SF_6 เมื่อทดลองด้วยเครื่องกัดแบบใช้คลื่นวิทยุ [17]

Keizo Suzuki และคณะ [20] ได้พัฒนาเครื่องกัดโดยใช้คลื่นไมโครเวฟกระตุ้นให้เกิดพลาสมา ได้ทำการวัดคุณสมบัติพลาสมา เช่น ความหนาแน่นพลาสมา (plasma density, n_p) และอุณหภูมิอิเล็กตรอน (T_e) โดยใช้โพรบทรงกระบอกเดี่ยว วางตำแหน่งโพรบเหนือผิวชิ้นงานที่ระยะ 10 mm ได้ค่า $n_p = 1.7 - 7 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ และ $kT_e = 3 - 5 \text{ eV}$ โดยใช้ก๊าซ Ar จ่ายกำลังไมโครเวฟที่ 180 W และทดลองที่ความดัน 0.04-0.4 Pa เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้คลื่นวิทยุกระตุ้นให้เกิดพลาสมาที่ความดัน 0.67-13 Pa ทำการวัดความหนาแน่นพลาสมาและอุณหภูมิอิเล็กตรอนได้ $n_p = 2 - 7 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$ และ $kT_e = 8 - 12 \text{ eV}$ ตามลำดับ ดังนั้นการกัดโดยใช้คลื่นไมโครเวฟซึ่งโดยทั่วไปกระบวนการดำเนินการที่ความดัน 0.067 Pa ซึ่งต่ำกว่า 10^{-3} เท่า และมีความหนาแน่นของพลาสมามากกว่า 10^2 เท่าเมื่อเทียบกับการกัดโดยใช้คลื่นวิทยุ

จำนวนของ F^+ ให้ออกจากพลาสมาที่ตกกระทบผิวชิ้นงานต่อหน่วยพื้นที่ (หรือ F^+ ฟลักซ์) สามารถหาได้จากการคำนวณโดยใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไอออนอิ่มตัว (ion saturation current density) ที่ได้จากการวัดโดยโพรบทรงกระบอก และ จากอัตราส่วนของกระแสไอออน F^+ ต่อกระแสไอออนทั้งหมดที่หาได้จาก mass spectra ได้ค่า F^+ ฟลักซ์ของ $\text{CF}_4 + \text{O}_2$ พลาสมาเท่ากับ $0.072 - 0.1 \text{ mA cm}^{-2}$ ($4.5 - 6.3 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$) ในช่วงความดัน 0.027-0.27 Pa และลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อความดันห้องสุญญากาศเพิ่มขึ้นมากกว่า 0.27 Pa [20]

ความหนาแน่นของ ฟลูออรีน (F) อะตอม (ที่เป็นกลางทางไฟฟ้า) ในพลาสมาถูกประเมินค่าโดยวิธีการที่ผู้วิจัยได้พัฒนาขึ้น กล่าวคือ โดยการใช้ scavenging reaction ($\text{F} + \text{H}_2 \rightarrow \text{HF} + \text{H}$) และใช้อุปกรณ์ quadrupole mass spectrometer ทำการตรวจจับก๊าซ HF ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเคมีที่แสดงข้างต้น [20]

ความหนาแน่นของ F อะตอมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความดันเพิ่มขึ้น โดยที่ก๊าซ SF_6 จะให้ความหนาแน่นของ F อะตอม มากกว่าก๊าซ CF_4 โดยประมาณ 10 เท่า ที่ความดันเท่ากันจากผลการวัดพบว่า ความหนาแน่นของ F อะตอมของ CF_4 พลาสมามีค่าประมาณ $1.8 - 4 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ ที่ความดันต่ำในช่วง 0.013-0.13 Pa ซึ่งมีปริมาณที่ใกล้เคียงกับความหนาแน่นพลาสมา n_p ที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น สำหรับ F พลั๊กซ์ที่ความดันต่ำนี้มีจำนวน $2.5-5.7 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ซึ่งมีจำนวนมากกว่าไอออน F^+ พลั๊กซ์อยู่ประมาณ 5 เท่า [20]

ในงานวิจัยนี้ฐานรองชิ้นงานไม่ถูกต่อลงกราวด์ดังนั้นจึงไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลมาที่ชิ้นงานได้โดยตรง ดังนั้นชิ้นงานจะมีศักย์ไฟฟ้าลอย (floating potential) อยู่ค่าหนึ่ง และจะเกิดมีศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมที่ผิวของชิ้นงานค่าหนึ่งเนื่องจากผิวชิ้นงานสัมผัสกับพลาสมาส่งผลให้เกิดบริเวณที่เรียกว่า ion sheath ก่อตัวที่ผิวของชิ้นงาน ค่าศักย์ไฟฟ้าลอย (floating potential, V_f) และค่าความกว้างของ ion sheath (d_{is}) หาได้จากการใช้สมการ Langmuir-Child equation ได้ค่า $V_f \geq -20 \text{ V}$ และ $d_{is} = 0.084 \text{ mm}$ สำหรับเงื่อนไขของการสร้างพลาสมาที่ให้รายละเอียดไว้แล้วในข้างต้น ค่า mean free path ของไอออน (λ_i) ซึ่งนิยามจากระยะทางที่อนุภาคเคลื่อนที่ได้ก่อนเกิดการชนกันของอนุภาคที่เป็นกลางทางไฟฟ้า (neutral particles) มีค่าประมาณ 10 cm ที่ความดัน 0.067 Pa และค่า λ_i นี้ แปรผกผันกับค่าความดันของก๊าซ [20]

ไอออนเคลื่อนที่ภายในบริเวณที่เกิดสถานะพลาสมาด้วยพลังงานความร้อน (thermal energy), $kT_i \ll |q_e V_f|$ เมื่อ q_e คือค่าประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน ในกรณีที่ค่าความดันภายในห้องสุญญากาศคือ 0.067 Pa ค่า λ_i จะมากกว่าค่า d_{is} มากๆ ดังนั้นไอออนบวกจะถูกเร่งไปตามทิศทางของสนามไฟฟ้าที่มีทิศตั้งฉากกับผิวชิ้นงาน และเคลื่อนที่ไปถึงผิวชิ้นงานโดยไม่เกิดการชนกับอนุภาคอื่นๆภายในบริเวณ d_{is} นี้ จึงทำให้ไอออนบวกวิ่งตกกระทบในมุมที่ตั้งฉากกับผิวชิ้นงานในทางกลับกันค่า λ_i จะมีค่าใกล้เคียงกับระยะ d_{is} เมื่อความดันเพิ่มขึ้นเป็น 13 Pa ภายใต้เงื่อนไขนี้ ไอออนบวกจะชนกับอนุภาคที่เป็นกลางทางไฟฟ้าที่อยู่ภายในบริเวณ ion sheath นี้และไอออนบวกจะวิ่งชนที่ผิวของชิ้นงานด้วยทิศทางที่ไม่แน่นอน (ไม่ตั้งฉากกับผิวชิ้นงาน) ส่งผลให้เกิดการกัดทางด้านข้าง (side etch or lateral etch) ทำให้ความเป็น anisotropic etch ลดลง [20]

อัตราการกัด (etch rate) ที่ขึ้นกับความดันของก๊าซ (gas pressure) โดยที่มีการกรองพลาสมา (with plasma screening คือ การจำกัดการเดินทางพลาสมาไปที่ผิวชิ้นงาน) กับไม่มีการกรองพลาสมา ทั้งนี้ในการกรองพลาสมา ทำโดยการวางอิเล็กโทรดตาข่าย (mesh electrode) ที่ตำแหน่งเหนือผิวชิ้นงาน จากการทดลอง ที่ความดันต่ำกว่า 0.13 Pa อัตราการกัดด้วยวิธี plasma screening จะมีค่าเกือบเท่ากับศูนย์ (มีการกัดน้อยมากๆ) และอัตราการกัดด้วยวิธี without plasma

screening จะมีค่าอยู่ในช่วง 4.5-8 nm/min สำหรับที่ความดันสูงกว่า 1.3 Pa อัตราการกัดมีค่าใกล้เคียงกันไม่ว่ากระบวนการกัดนั้นจะใช้วิธี plasma screening หรือไม่ใช้ก็ตาม จากข้อมูลการทดลองข้างต้นทำให้สรุปได้ว่าซิลิกอนจะถูกกัดที่ความดันต่ำกว่า 0.13 Pa ได้ก็ต่อเมื่อมีไอออนบวกวิ่งไปตกกระทบที่ผิวชิ้นงานเท่านั้น (ไอออนบวกมีบทบาทสำคัญที่ทำหน้าที่กัดชิ้นงาน) สำหรับที่ความดันสูงกว่า 1.3 Pa ซิลิกอนจะถูกกัดโดยอนุมูลอิสระที่เป็นกลางทางไฟฟ้า (neutral radicals) หรืออาจกล่าวได้อีกอย่างหนึ่งว่า neutral radicals มีบทบาทสำคัญที่ทำหน้าที่กัดซิลิกอนเมื่อกระบวนการดำเนินไปภายใต้ความดันที่สูงกว่า 1.3 Pa [20]

ไอออนบวกจะวิ่งชนผิวชิ้นงานในทิศที่ตั้งฉากกับผิวชิ้นงาน เมื่อความดันห้องสุญญากาศต่ำกว่า 0.13 Pa อีกทั้งไอออนบวกมีบทบาทสำคัญที่ทำหน้าที่ในการกัดที่ความดันต่ำกว่า 0.13 Pa ดังได้อธิบายไว้แล้วข้างต้น ดังนั้นผลที่ได้จากการกัดด้วยเงื่อนไขนี้จึงเป็นแบบ anisotropic และไม่มี undercutting เกิดขึ้น [20]

ไอออนบวกจะวิ่งชนที่ผิวชิ้นงานในทุกทิศทาง (isotropic) ที่ความดันสูงกว่า 1.3 Pa ที่ความดันสูงในระดับนี้ ไม่เฉพาะ ไอออนบวก (F^+) ที่มีบทบาทในการกัดซิลิกอน แต่รวมถึง อนุมูลอิสระ (F อะตอม) ด้วย ที่เคลื่อนที่ ไปที่ผิวและกัดผิวชิ้นงานในแบบทุกทิศทาง (isotropic) เช่นกัน ดังนั้นผลการกัดที่ได้จะมี undercutting เกิดขึ้น [20]

T. Kure และคณะ [21] ใช้คลื่นไมโครเวฟความถี่ 2.45 GHz ทำการกระตุ้นเพื่อสร้าง SF_6 พลาสมาที่ความดันต่ำที่ 0.01 Pa โดยใช้และใช้คลื่นวิทยุที่ความถี่ 2 MHz จ่ายไปที่อิเล็กโทรดที่ทำหน้าที่เป็นฐานรองชิ้นงานเพื่อเป็นแหล่งพลังงานให้กับ ไอออนบวกที่จะวิ่งเข้ามากัดผิวชิ้นงาน และที่ฐานรองชิ้นงานถูกควบคุมให้มีอุณหภูมิ $-130^{\circ}C$ เพื่อป้องกันการเกิดการกัดแบบ isotropic etching และ Cl_2 ถูกใช้โดยควบคุมให้ฐานรองชิ้นงานมีอุณหภูมิที่ $0^{\circ}C$

ภายในบริเวณ ion sheath ไอออนบวกถูกเร่งให้มีทิศตั้งฉากกับพื้นผิวชิ้นงาน ไอออนบางส่วนถูกเปลี่ยนทิศทางเนื่องจากการชน ในการประมาณมุมตกกระทบของไอออน งานวิจัยนี้ได้ใช้การเปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพของผนังของหลุมที่ถูกกัด (etched profile) จากการทดลองจริงกับผลที่ได้จากการจำลอง (simulation) ทางทฤษฎีด้วยคอมพิวเตอร์ ได้การเคลื่อนที่ของไอออนมีมุมตกกระทบประมาณ 2° เมื่อใช้ก๊าซ SF_6 ที่ความดัน 1 Pa จ่ายกำลังไมโครเวฟที่ 1 kW และใช้กำลังคลื่นวิทยุ 5 W จ่ายไปที่อิเล็กโทรดฐานรองชิ้นงานและเพื่อเป็นข้อมูลอ้างอิงใช้สำหรับการเปรียบเทียบได้ทำการวัดผลจากการใช้ก๊าซ Cl_2 ด้วยเครื่องกัด Reactive Ion Etching (RIE) ที่ความดัน 8 Pa ได้มุมตกกระทบของไอออนที่ 5° จากผลที่ได้ทำให้ได้ข้อสรุปว่า ยิ่งความดันต่ำ ไอออนบวกจะยิ่งเคลื่อนที่ด้วยมุมตกกระทบที่น้อย เนื่องจากโอกาสในการชนกันของไอออน

(ion collision probability) ซึ่งนิยามจาก d/l เมื่อ d คือความหนาของ ion sheath และ l คือ mean free path ของไอออน แม้กระทั่งในเงื่อนไขเมื่อ d มีค่าน้อย (thin ion sheath) การกัดแบบ anisotropic etching ก็สามารถเกิดขึ้นได้ซึ่งตัวแปร d แปรผันตรงกับ $V^{3/4} \times n^{-1/2} \times T^{-1/4}$ เมื่อ V คือค่าศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมที่ผิวของชิ้นงาน โดยที่ n คือค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอน และ T คือค่าอุณหภูมิของอิเล็กตรอน ดังนั้นเงื่อนไขการกัดที่จ่ายศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมชิ้นงานต่ำ (low bias) และพลาสมามีความหนาแน่นสูง (high plasma density) จะให้โอกาสในการชนกันต่ำ (low collision probability) จากการทดลองกัด Si โดยใช้ SF_6 ไมโครเวฟพลาสมาที่ความดัน 1 Pa โดยใช้ ชนิดของก้าง (mask) ที่แตกต่างกัน 3 ชนิด ได้แก่ โพลิเมอร์ไวแสง (photo resist) SiO_2 และ Al พบว่า etched profile ที่เกิดขึ้นบนซิลิกอนไม่มีความแตกต่างกัน [21]

H. Schmid และคณะ [22] ใช้ Electron cyclotron resonance (ECR) plasma ชนิด down stream-type reactor ทำการกัดชิ้นงานด้วยก๊าซผสมของ CF_4 (75%)+ O_2 (25%) โดยก๊าซถูกปล่อยผ่านคลื่นไมโครเวฟที่ความถี่ 2.45 GHz ใช้กำลังไฟฟ้าในช่วง 100-500 W ที่อัตราการไหลของก๊าซรวม 40 sccm ที่ความดัน 1 Pa โดยที่ฐานรองชิ้นงานถูกต่อเข้ากับเครื่องจ่ายคลื่นวิทยุความถี่ 13.56 MHz เพื่อจ่ายพลังงานจลน์ให้กับไอออนบวก พบว่า etched profile สามารถควบคุมได้จากการจ่ายกำลังคลื่นวิทยุไปที่ฐานรองชิ้นงาน โดยที่เมื่อไม่จ่ายกำลังคลื่นวิทยุผลที่ได้คือ isotropic etching และเมื่อจ่ายกำลังคลื่นวิทยุไปที่ฐานรองชิ้นงาน ผลที่ได้คือ anisotropic etching อีกทั้งงานวิจัยนี้ยังพบอีกว่า การใช้ ECR ซึ่งสามารถสร้างความหนาแน่นพลาสมาได้สูง เนื่องจากเกิดการแตกหักของโมเลกุลของก๊าซตั้งต้นเป็นโมเลกุลที่มีขนาดเล็กหรือกลายเป็นอะตอมย่อยในปริมาณที่สูง (high fractional dissociation) และมีการทำให้เกิดประจุไฟฟ้าของโมเลกุลหรืออะตอมของก๊าซ (ionization) ในปริมาณที่สูง (สูงได้ถึงระดับ 10%) โดยความหนาแน่นของพลาสมาที่สร้างได้โดยวิธี ECR จะสูงกว่าการใช้คลื่นไมโครเวฟกระตุ้นให้เกิดพลาสมาที่ใช้กันทั่วไป จึงสามารถลดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า “loading effect” คือผลจากการพร่องของอนุภาคอิสระที่ทำหน้าที่กัดชิ้นงาน เนื่องจากความหนาแน่นพลาสมาของ ECR ที่สูง จึงมีปริมาณอนุภาคอิสระที่จะเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการกัดที่ผิวชิ้นงาน สูงตามไปด้วยนั่นเอง

อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

ลำดับขั้นตอนดังต่อไปนี้ แสดงขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

1. ออกแบบเครื่องกัดผิวชิ้นงานโดยใช้ไมโครเวฟพลาสมา
2. จัดหาอุปกรณ์และประกอบเครื่อง
3. สอบเทียบกำลังไมโครเวฟ
4. ทดสอบระบบสุญญากาศ
5. ทดสอบแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมที่ขั้ววางชิ้นงาน
6. ทดสอบสร้างพลาสมา
7. ทดสอบความสามารถของเครื่องกัด ในด้านของอัตราการกัด (etch rate) โดยทำการกัดผิววัสดุซิลิกอน (silicon) และ ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) โดยใช้อาร์กอนพลาสมา (Ar plasma) และพลาสมาที่มีฟลูออรีนเป็นองค์ประกอบหลัก (fluorine-based plasma) เมื่อความดัน (pressure) หรืออัตราการไหลของก๊าซ (gas flow rate) และ พลังงานจลน์ (kinetic energy) ของไอออนที่ใช้ในการกัดมีค่าแตกต่างกัน
8. ความลึกหลังผ่านกระบวนการกัดของชิ้นงาน สามารถหาได้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) และ Atomic Force Microscopy (AFM)
9. องค์ประกอบของสารประกอบใหม่ที่เกิดขึ้นในกระบวนการแล้วพอกอยู่ด้านข้างหรือผนังของร่องกัดเรียกว่า Re-deposition สามารถหาได้โดยการวิเคราะห์ธาตุ เช่น Energy Dispersive X-ray Spectrometer (EDX) หรือ X-ray photoelectron spectroscopy (XPS)

ผลการวิจัย

สอบเทียบกำลังไมโครเวฟที่เกิดขึ้นในเตาไมโครเวฟกับระดับกำลังที่ใช้โปรแกรมเครื่อง

เนื่องจากการใช้งานเครื่องไมโครเวฟ มีชุดคำสั่งระดับการปล่อยกำลังไฟฟ้าไมโครเวฟเป็นระดับ จากระดับ 10P ถึงระดับ 100P โดยที่สัญลักษณ์ 100P คือจ่ายกำลังไฟฟ้า 100% ของเครื่องที่สามารถทำได้ (เท่ากับ 1,200 W) สัญลักษณ์ 90P คือจ่ายกำลังไฟฟ้า 90% ของเครื่องที่สามารถทำได้ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องสอบเทียบระดับกำลังไฟฟ้าที่เครื่องปล่อยออกมาจริงภายในเตาไมโครเวฟกับระดับกำลังไฟฟ้าที่เครื่องถูกโปรแกรมขณะใช้งาน

ในการหาปริมาณกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในตู้ไมโครเวฟ มีขั้นตอนดังนี้

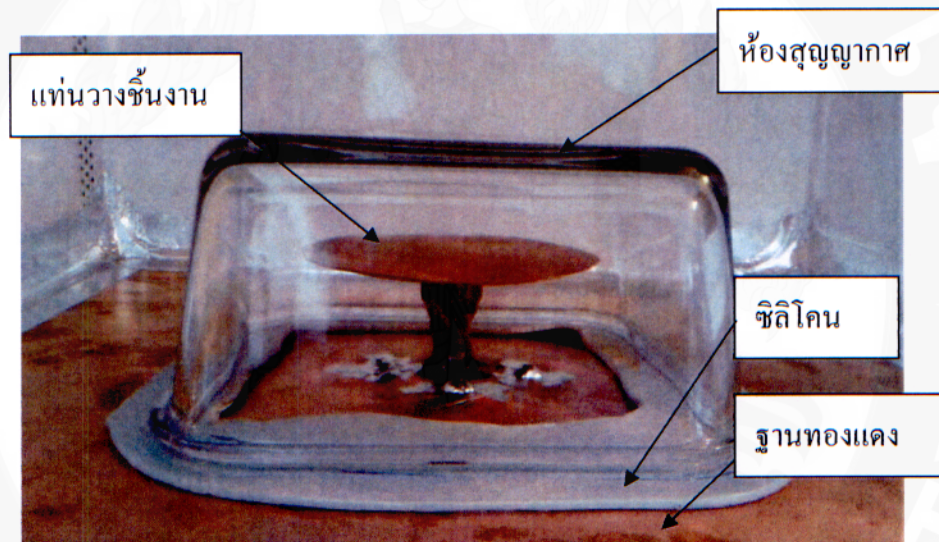
- 1.) เติมน้ำปริมาณ 900 mL (= 0.9 kg) ลงในภาชนะรูปทรงสี่เหลี่ยม (ทำจากบอโรซิลิเกตซึ่งเป็นภาชนะเดียวกันกับที่ใช้ทำห้องสุญญากาศสำหรับกระบวนการกักตังแสดงในรูปที่ 11) และวัดอุณหภูมิของน้ำเริ่มต้น (T_1) โดยวางตรงกลางภายในตู้ไมโครเวฟ
- 2.) จ่ายกำลังไมโครเวฟตามต้องการ สมมุติให้ เป็น 100P (=1,200W) เป็นเวลา $t = 60$ วินาที
- 3.) วัดอุณหภูมิภายหลังจากจ่ายกำลังไมโครเวฟ (T_2)
- 4.) คำนวณหาปริมาณความร้อนที่น้ำปริมาณ 900 mL ได้รับในเวลา 60 วินาที จากสมการ $Q (J) = m (kg) \times c (J/kg \cdot ^\circ C) \times (T_2(^{\circ}C) - T_1(^{\circ}C))$ ให้ $c = 4187 J/kg \cdot ^\circ C$
- 5.) คำนวณหา กำลังไมโครเวฟ จากสมการ $P (W) = Q (J) / t (s)$ พบว่ากำลังไมโครเวฟที่เกิดขึ้นจริงมีความแตกต่างไม่เกิน ± 30 W จากค่าที่ได้โปรแกรมไว้ [23]

ตารางที่ 1 ผลการสอบเทียบกำลังไมโครเวฟที่ใช้โปรแกรมเครื่องกับที่เกิดขึ้นจริงภายในเตา

Program Level	Process time (s)	T ₁ (°C)	T ₂ (°C)	Power Output (W)	Average Power (W)	Delta (W)
100P (1,200 W)	60	25	44	1193	1193	7
100P (1,200 W)	60	43	62	1193		
90P (1,080 W)	60	26	43	1067	1099	-19
90P (1,080 W)	60	42	60	1130		
80P (960 W)	90	25.5	49	984	973	-13
80P (960 W)	90	48	71	963		
70P (840 W)	90	25	44	795	837	3
70P (840 W)	90	43	64	879		
60P (720 W)	90	25.5	42.5	712	712	8
60P (720 W)	90	41.5	58.5	712		
50P (600 W)	90	25.5	39	565	576	24
50P (600 W)	90	38	52	586		

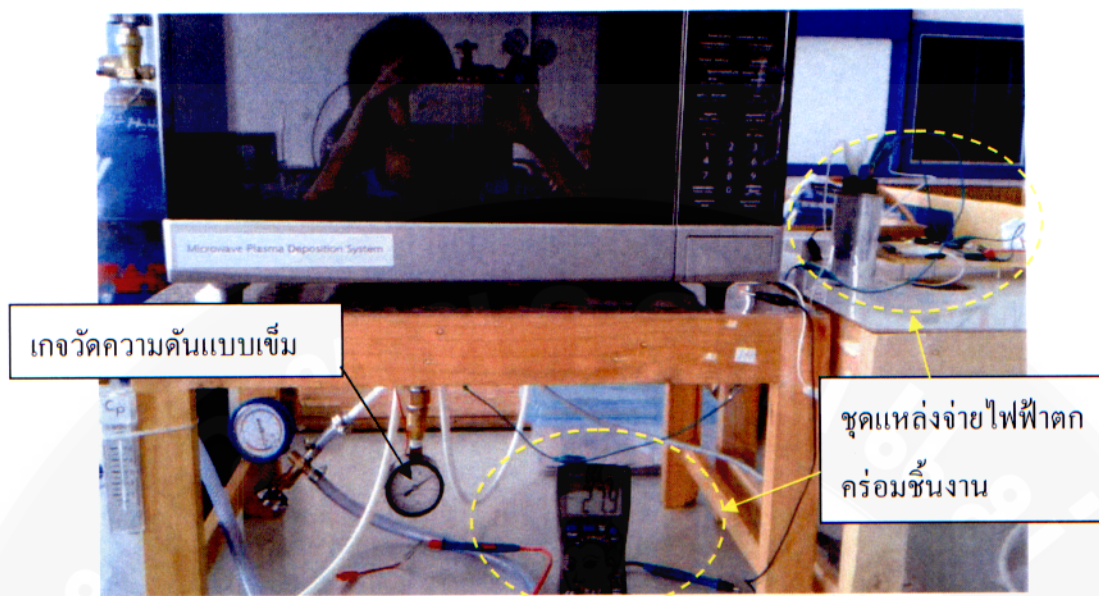
ห้องสุญญากาศและทดสอบการสร้างพลาสมา

ผู้วิจัยได้ออกแบบห้องสุญญากาศให้อยู่ภายในเตาไมโครเวฟ โดยทำการเจาะรูเฉพาะด้านล่างของผนังเตาไมโครเวฟเพื่อทำการสอดฐานเพื่อวางห้องสุญญากาศ โดยฐานนี้ทำจากแผ่นทองแดงซึ่งเชื่อมต่อกับทองแดงอีกสามท่อเข้าไปกับตัวฐาน โดยทั้งสามท่อนี้มีวัตถุประสงค์ใช้สำหรับท่อปล่อยแก๊สเข้า (gas inlet) ที่ต้องการใช้งาน ท่อป้อนอากาศออก (gas outlet) และท่อติดตั้งเกจวัดความดันสุญญากาศชนิดแบบเข็ม อีกทั้งสร้างแท่นวางชิ้นงาน (ทำจากแผ่นทองแดง) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้วและเชื่อมเข้ากับฐานด้วย ดังแสดงในรูปที่ 11

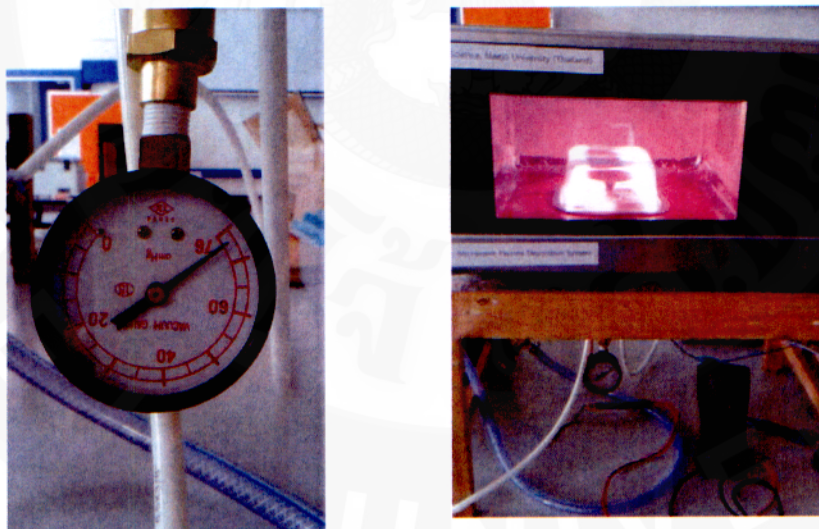


รูปที่ 11 แสดง ห้องสุญญากาศ (ทำจากวัสดุ borosilicate Glass) แท่นวางชิ้นงานที่เชื่อมเข้ากับฐานทองแดง ภายในเตาไมโครเวฟ

เมื่อทำการทดสอบทำสุญญากาศโดยใช้ปั๊มทำสุญญากาศจังหวะเดียว (single-stage) กับห้องสุญญากาศพบว่า สามารถทำสุญญากาศได้ต่ำกว่าความดันบรรยากาศในระดับ 70-75 cmHg เมื่อทำการทดสอบสร้างพลาสมาที่ความดันต่ำกว่า 70 cmHg พบว่า คลื่นไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 240 – 1,200 W (20P-100P) สามารถสร้างพลาสมาของอากาศได้ ดังแสดงในรูปที่ 12 และรูปที่ 13



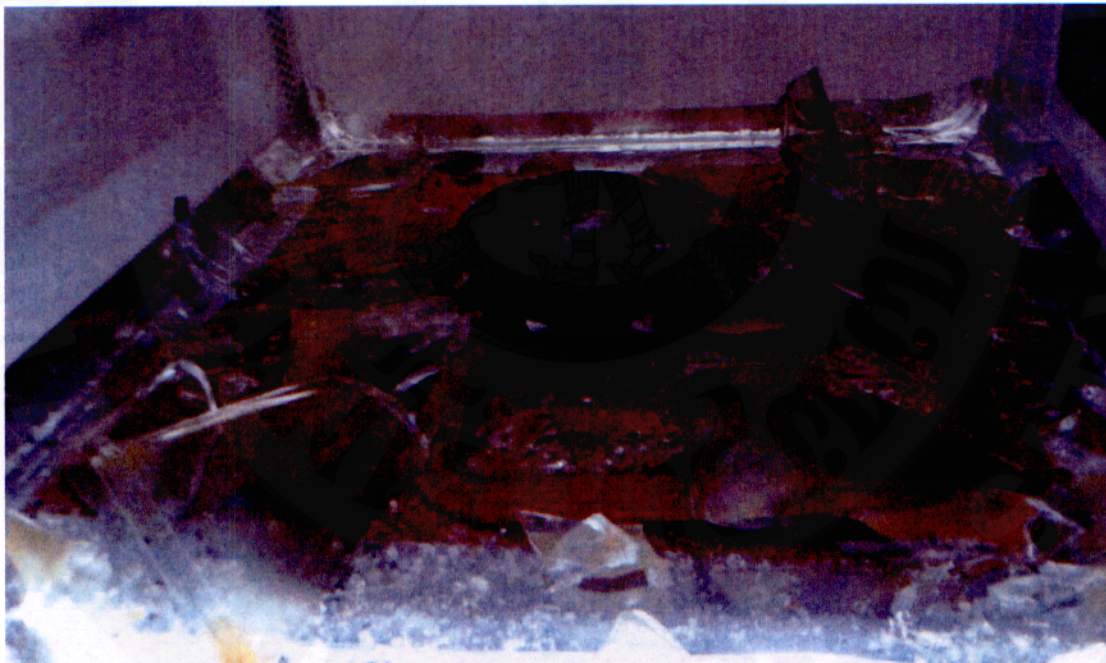
รูปที่ 12 แสดงภายนอกของเครื่องกัดผิวซิลิกอนที่ได้พัฒนาขึ้น ด้านล่างแสดงเกจวัดความดันสุญญากาศ ด้านขวามือแสดงชุดแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมชิ้นงาน หลังติดตั้งแหล่งจ่ายแรงดันเข้ากับแท่นวางชิ้นงานแล้ว พบว่ามีแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมที่แท่นวางชิ้นงานจริง ดังภาพแสดงแรงดันไฟฟ้า -27.9 โวลต์ตกคร่อมที่แท่นวางชิ้นงาน



รูปที่ 13 แสดงพลาสมาของอากาศ (สีชมพูเข้ม) ที่เกิดภายในห้องสุญญากาศ เมื่อจ่ายคลื่นไมโครเวฟที่กำลังสูงสุด 1,200 W หลังจากทำการปั๊มอากาศออกจากห้องสุญญากาศจนเข็มเกจชี้ไปที่เลขเกือบ 76 cmHg ซึ่งเป็นสเกลที่ต่ำที่สุดของเกจวัดความดันสุญญากาศแบบเข็มนี้ โดยปั๊มทำสุญญากาศเป็นปั๊มจังหวะเดียว (single-stage)

ทดสอบจ่ายแรงดันลบบนแท่นวางชิ้นงานในสภาวะมีพลาสมา

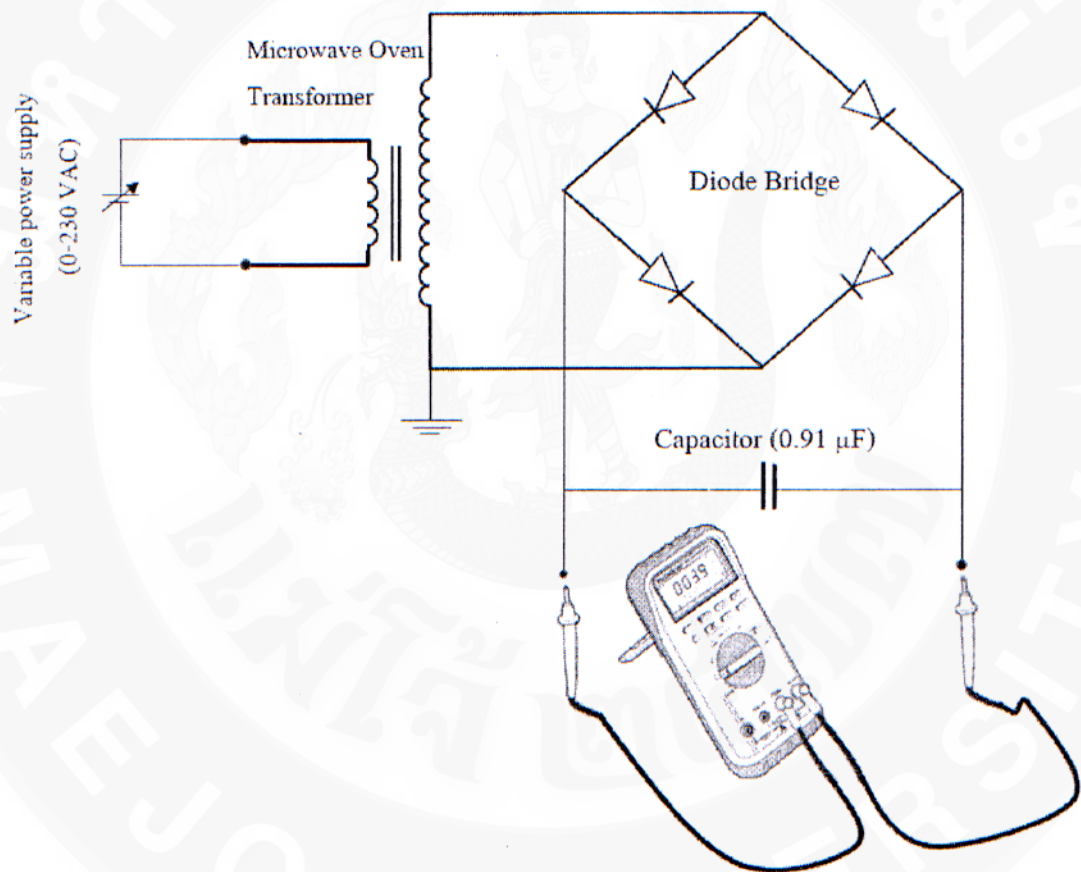
ได้ทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง -300 V (เพื่อเพิ่มพลังงานจลน์ให้กับอนุภาคมีประจุภายในพลาสมาให้มีโมเมนตัมมาตกกระทบบนชิ้นงานให้สูงขึ้นเพื่อเร่งความเร็วในการปลูกฟิล์ม) ที่แท่นวางชิ้นงานขณะที่มีพลาสมาเกิดขึ้นในห้องสุญญากาศ พบว่าเมื่อเวลาผ่านไปเพียง 45 วินาที ห้องสุญญากาศแตก ดังแสดงในรูปที่ 14 คาดว่า ห้องสุญญากาศที่ทำจากแก้วบอโรซิลิเกต (Borosilicate glass) ไม่สามารถทนต่อความแตกต่างของอุณหภูมิของผนังทั้งสองด้านได้ซึ่งผนังด้านในสัมผัสกับพลาสมาที่ความดันสุญญากาศและผนังชั้นนอกเป็นอากาศที่ความดันบรรยากาศ ดังนั้นในการใช้งานไมโครเวฟพลาสมาในการกักผิววัสดุควรจะใช้เวลาในการกักครั้งละไม่เกิน 30 วินาที แนวทางที่จะเพิ่มเวลาในการกักแต่ละครั้งให้นานขึ้นคือ การใช้ห้องสุญญากาศที่ทำจากวัสดุควอตซ์ (quartz) ซึ่งสามารถทนอุณหภูมิได้สูงถึง $1,670^{\circ}\text{C}$



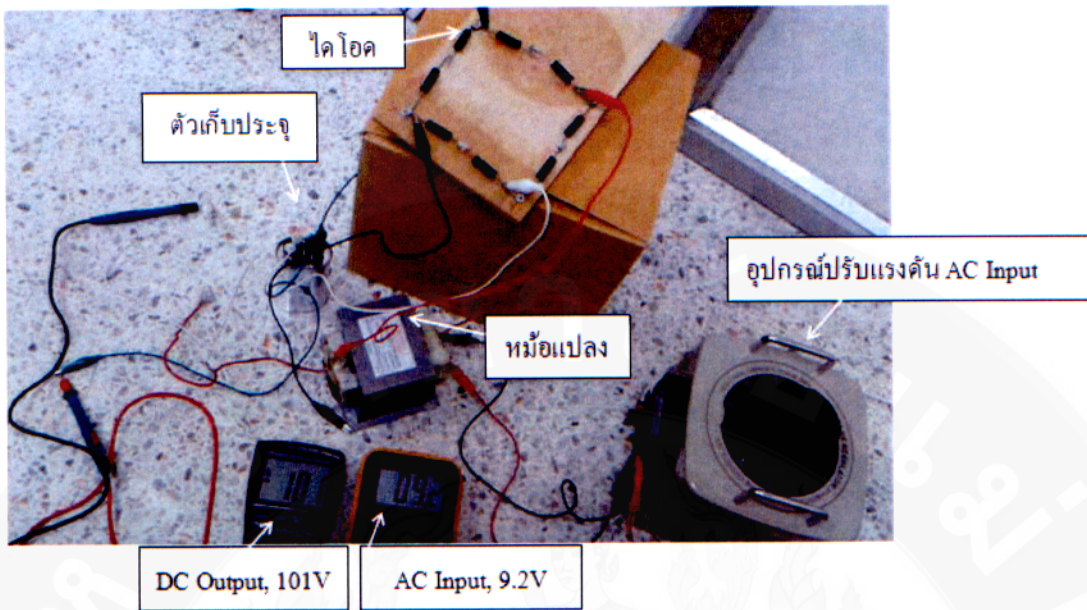
รูปที่ 14 แสดงภาพการแตกของห้องสุญญากาศ เมื่อทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง -300 V ให้กับฐานวางชิ้นงาน (ฐานวางชิ้นงานที่ทำจากวัสดุทองแดงเกิดการบิดเบี้ยวเนื่องจากถูกแรงกระแทกอย่างแรง)

แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

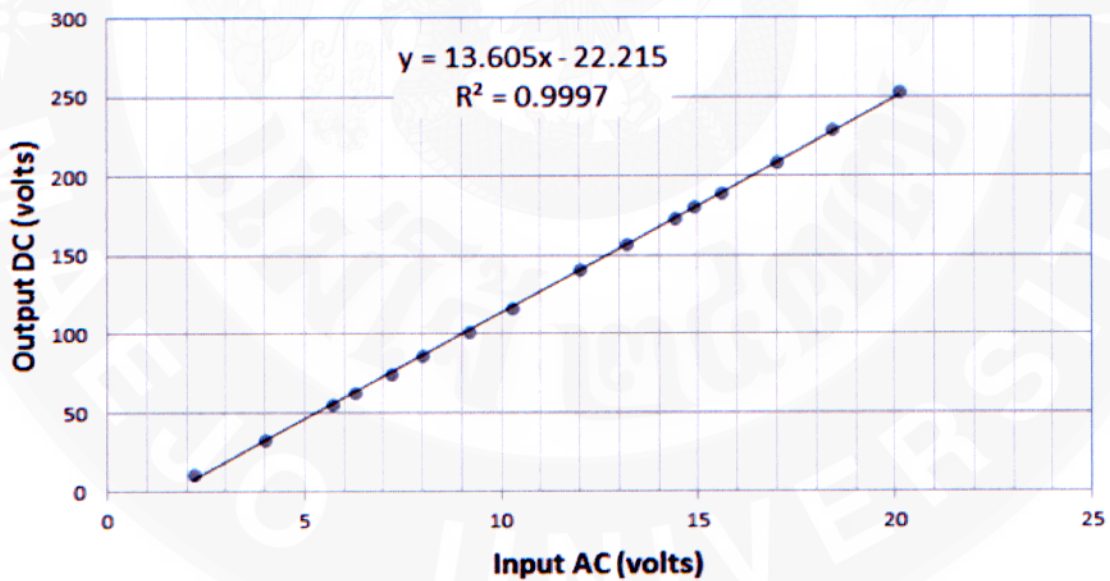
แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงสร้างจากวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ (Bridge Rectifier Circuit) ซึ่งใช้แหล่งจ่ายไฟกระแสสลับที่ปรับค่าได้ (variable power supply) ในช่วง 0-230 V ทำการต่อเข้ากับหม้อแปลงไฟฟ้า (ที่ใช้ทั่วไปในเครื่องไมโครเวฟ) และทำการต่อเข้ากับไดโอดแบบบริดจ์โดยมีตัวเก็บประจุทำหน้าที่ให้แรงดันไฟฟ้าขาออกมีความสม่ำเสมอมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 15



รูปที่ 15 แสดงวงจรไฟฟ้าแปลงกระแสสลับเป็นกระแสตรง



รูปที่ 16 แสดงการต่อวงจร เพื่อใช้เป็นแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าตกรวมที่ขั้ววางชิ้นงาน ในภาพจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) 9.2 โวลต์ เข้า (Input) วงจรไฟฟ้า ได้แรงดันขาออก (Output) เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (DC) 101 โวลต์



รูปที่ 17 แสดงประสิทธิภาพของวงจรไฟฟ้า (ในรูปที่ 16) สามารถแปลงไฟฟ้ากระแสสลับขาเข้าจาก 20 โวลต์เป็นไฟฟ้ากระแสตรงได้ถึง 250 โวลต์ ดังนั้นเมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับขาเข้า 230 โวลต์จะได้แรงดันไฟฟ้าออกกระแสตรงสูงถึง 3,105 โวลต์

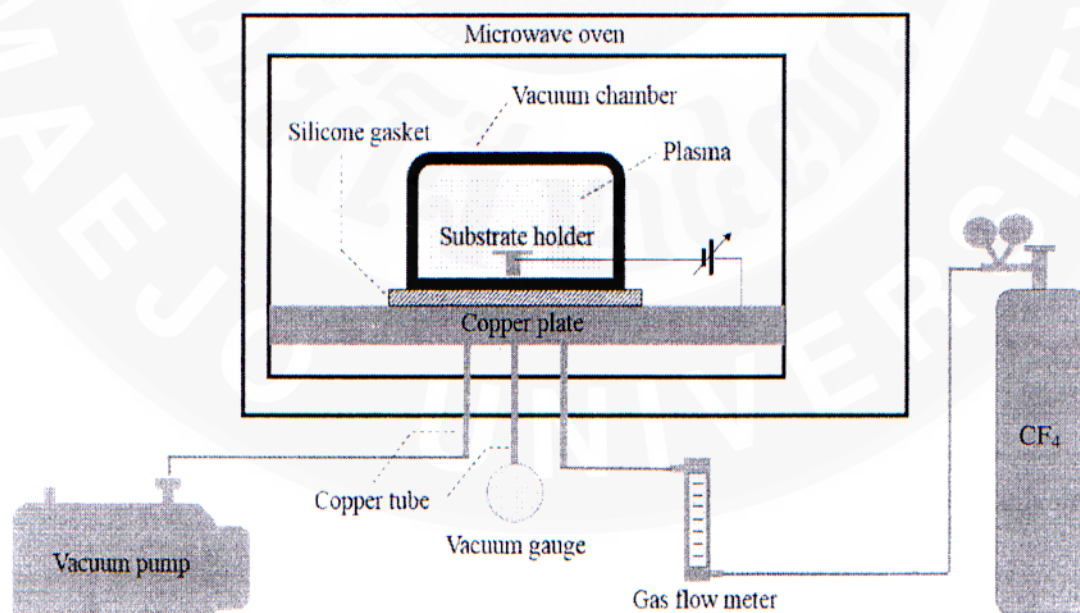
การกัดซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO₂) ด้วยอาร์กอนพลาสมา

ทำการทดสอบกัด SiO₂ บนวัสดุ Si โดยใช้อาร์กอนพลาสมา ก่อนทำการปล่อยก๊าซอาร์กอน (Ar) เข้าห้องสุญญากาศ ได้ทำการลดความดันภายในห้องสุญญากาศด้วยโรตารีปั๊ม จนความดันเหลือ 235 ปาสคาล อ่านค่าความดันโดยใช้เกจวัดความดันสุญญากาศแบบดิจิตอล (SUPCO Digital Vacuum Gauge, Model VG64) แล้วปล่อยก๊าซอาร์กอนที่อัตราการไหล 30-80 มิลลิเมตรต่อนาที ทำให้ความดันภายในห้องสุญญากาศเพิ่มขึ้นเป็น 265-350 ปาสคาล ทำการเพิ่มพลังงานจลน์ให้กับไอออนบวกภายในพลาสมาด้วยการจ่ายศักย์ไฟฟ้าลบกระแสตรงไปที่ฐานรองชิ้นงานทำจากวัสดุทองแดงซึ่งมีคุณสมบัตินำไฟฟ้า ในช่วงแรงดันไฟฟ้า -300 โวลต์ ถึง -230 โวลต์ ทำการกัดชิ้นงานเป็นเวลา 10 นาที พบว่า ผิวของ SiO₂ ไม่ถูกกัดเลย จากการคำนวณค่า ระยะทางเฉลี่ยที่โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ได้ก่อนที่จะชนกับโมเลกุลอื่น (mean free path, สัญลักษณ์ย่อ “λ”) ได้ $\lambda = 27.42 \mu\text{m}$ ที่ความดันสุญญากาศ 265 ปาสคาล และการคำนวณค่า ความหนาของบริเวณที่มีแคไอออนบวก (Ion sheath thickness, สัญลักษณ์ย่อ “d_{is}”) ภายใต้สมมติฐานการเกิด ionization ที่ 10⁻⁶ จะได้ค่า d_{is} = 707.91 μm (ใช้อุณหภูมิอิเล็กตรอนที่ 0.65eV) ส่งผลให้ได้ค่าอัตราส่วน $\frac{d_{is}}{\lambda} = 25.82$ (ตัวเลขนี้ถือว่ามีความค่อนข้างมาก) [24] อัตราส่วนดังกล่าวเมื่อมีค่ามากแสดงว่า ระยะเวลาที่ไอออนบวกถูกเร่งด้วยศักย์ไฟฟ้าที่เป็นลบ (ศักย์ไฟฟ้าถูกจ่ายที่ขั้วไฟฟ้าที่เป็นฐานรองวัสดุ) เพื่อวิ่งเข้าชนผิววัสดุ ไอออนจะชนกับโมเลกุลก๊าซที่เป็นกลางทางไฟฟ้า ทำให้ไอออนบวกที่วิ่งเข้าชนผิววัสดุเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ และถูกลดพลังงานจลน์ลง ยิ่งความดันภายในห้องสุญญากาศยิ่งสูง พลังงานจลน์ของไอออนที่วิ่งไปที่ผิวของวัสดุก็จะยิ่งลดลง จากการทดลองพบว่า การอาศัยพลังงานจลน์เพียงอย่างเดียว จากการใช้ศักย์ไฟฟ้าลบดึง ไอออนบวกของโมเลกุลก๊าซอาร์กอนซึ่งเป็นก๊าซเฉื่อย (ไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับโมเลกุลอื่น) หรือที่เรียกว่า การกัดทางกายภาพ (physical etching) ไม่เพียงพอในการกัดผิวของ SiO₂ หรือ Si จำเป็นต้องใช้ การกัดทางเคมี (chemical etching) เข้ามาช่วย โดยการใส่ก๊าซที่สามารถทำปฏิกิริยาเคมีได้ เข้ามาช่วยนอกเหนือจากการเกิดปรากฏการณ์ physical etching ในกระบวนการกัดที่กำลังพัฒนาขึ้นนี้ และก๊าซที่นิยมใช้ในการกัด SiO₂ หรือ Si คือ ก๊าซ ซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ (Sulfur hexafluoride, SF₆) และ คาร์บอนเตตระฟลูออไรด์ (Carbon tetrafluoride, CF₄)

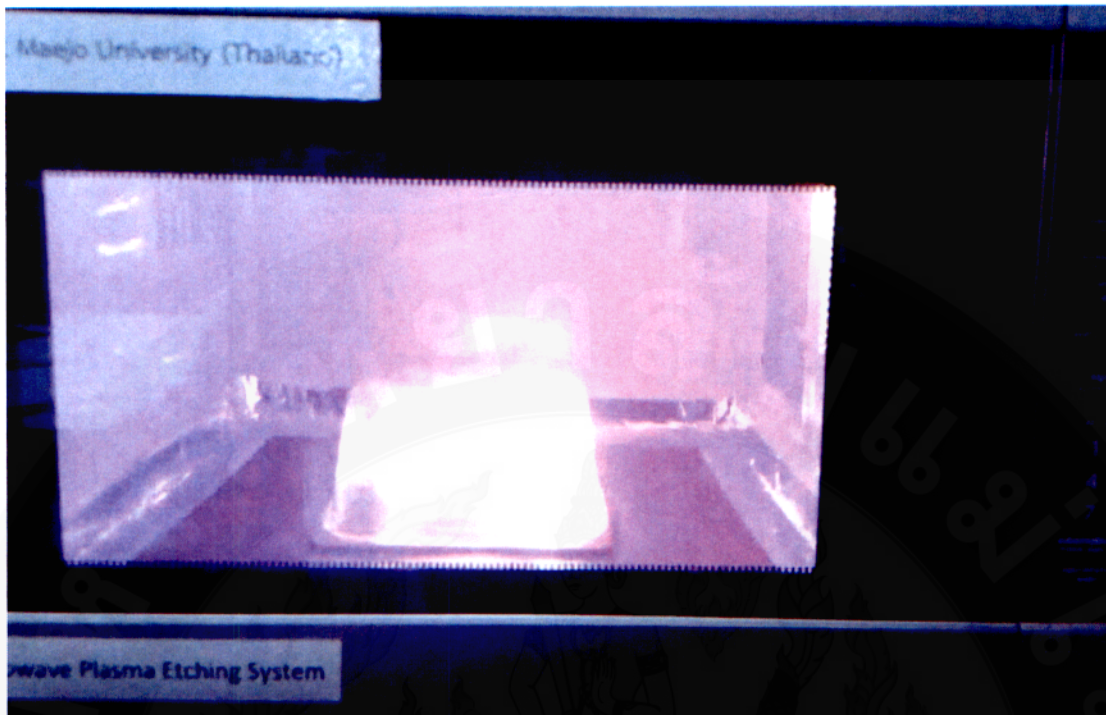
การกัดซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และ ซิลิกอน (Si) ด้วยคาร์บอนเตตระฟลูออไรด์ (CF_4) พลาสมา

ก๊าซคาร์บอนเตตระฟลูออไรด์ (CF_4) ถูกติดตั้งเข้ากับเครื่องไมโครเวฟพลาสมาผ่านเครื่องวัดอัตราการไหลของก๊าซ (gas flow meter) ที่สามารถวัดอัตราการไหลได้สูงสุด 100 mL/min และสามารถควบคุมอัตราการไหลได้ ดังแสดงในรูปที่ 18 ในการทดสอบการกัด SiO_2 และ Si มีลำดับขั้นตอนดังต่อไปนี้ 1.) วางชิ้นงานขนาด 1 ซม. × 1 ซม. ที่เป็น SiO_2 หนาประมาณ 300 nm ซึ่งเคลือบอยู่บนฐานที่เป็น Si ที่มีระนาบ (100) และวาง Si ที่มีระนาบ (100) บนที่วางชิ้นงาน 2.) วางห้องสุญญากาศ (Vacuum chamber) ให้แนบไปกับฐานทองแดงโดยมีซิลิโคนกันระหว่างห้องสุญญากาศกับฐานทองแดง 3.) เปิดปั๊มสุญญากาศจนระดับความดันภายในห้องสุญญากาศอยู่ในระดับ 235 ปาสคาล 4.) ปล่องก๊าซ CF_4 (หรือ CF_4 ผสมกับ Ar) เข้าห้องสุญญากาศโดยควบคุมให้มีอัตราการไหลของก๊าซที่ระดับ 30 - 90 mL/min ปล่องให้ก๊าซไหลเข้าห้องสุญญากาศเป็นเวลา 10 นาที 5.) จ่ายแรงดันไฟฟ้าช่วง -100 V ถึง -300 V ไปที่ฐานรองชิ้นงาน 6.) จ่ายกำลังไมโครเวฟเข้าห้องสุญญากาศที่กำลังไมโครเวฟ 360 W - 1,200 W เป็นเวลา 15 วินาที (เรียก 1 รอบของการกัด) 7.) ทำการกัดซ้ำจนได้เวลาของการกัดฟิล์มรวม 150 - 300 วินาที เงื่อนไขการกัดในการทดลองนี้ ดังแสดงในตารางที่ 2

สาเหตุที่ต้องทำการกัดชิ้นงานเป็นรอบๆ รอบละ 15 วินาที เนื่องจากหากทำการกัดอย่างต่อเนื่องเป็นเวลานานจะทำให้ห้องสุญญากาศร้อนมากและแตกในที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 14



รูปที่ 18 แผนผังของระบบการกัดด้วยไมโครเวฟพลาสมา (Plasma Etching) ที่ความดันต่ำ



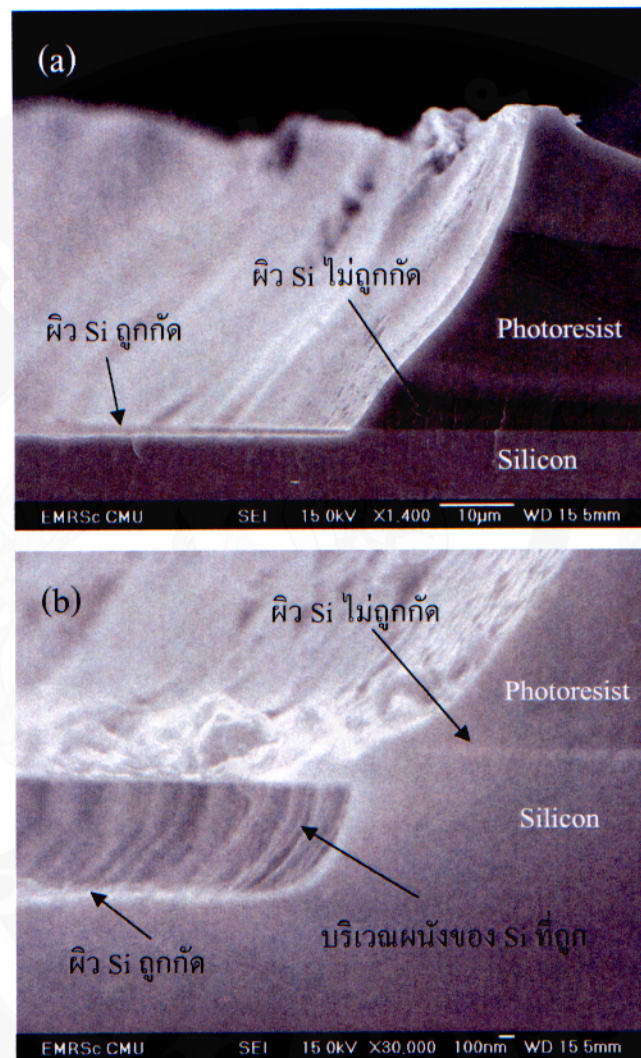
รูปที่ 19 แสดง CF_4 plasma ที่อัตราการไหลของก๊าซ 30 mL/min ศักย์ไฟฟ้า -100 V ถ่ายที่ฐานรองชิ้นงาน

ตารางที่ 2 แสดงเงื่อนไขการกัดชิ้นงาน

ลำดับที่	ชนิดของพลาสมา	กำลังไมโครเวฟ (Watt)	อัตราการไหลของก๊าซ (ml/min)	ศักย์ไฟฟ้าจ่ายที่ฐานรองชิ้นงาน (V)	เวลาที่ใช้ในการกัด (s)	ความลึกหลังถูกกัด (um)	อัตราการกัด (nm/s)
1	CF_4	1,200	30	-100	300	0.68	2.27
2	CF_4	1,200	30	-300	150	2.68	17.87
3	CF_4	1,200	90	-100	300	20.00	66.67
4	CF_4	1,200	90	-300	150	6.43	42.87
5	CF_4/Ar	1,200	45/45	-300	150	0.53	3.53
6	CF_4	360	90	-100	150	5.50	36.67
7	CF_4	360	30	-100	156	14.90	95.51

ผลการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

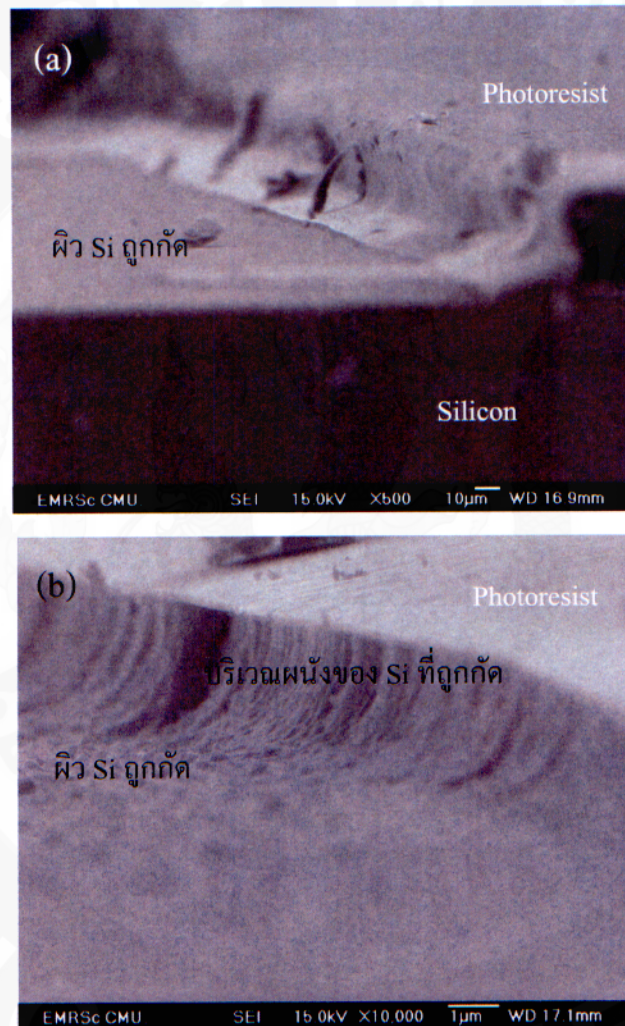
(Scanning Electron Microscope, SEM)



รูปที่ 20 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผิวซิลิกอนที่ถูกกัดด้วยเงื่อนไขการทดลองที่ 1 (ในตารางที่ 2) ถ่ายโดยใช้เครื่อง Field Emission Scanning Electron Microscope (SEM, JEOL JSM-6335F)

รูปที่ 20 แสดงภาพ SEM จากการถ่ายด้านข้าง (cross-sectional view) (a) ที่กำลังขยาย 1,400 เท่า และ (b) ที่กำลังขยาย 30,000 เท่าของชิ้นงานที่เป็น Si มีพอลิเมอร์ฟิล์มหนาประมาณ 30 μm (Photoresist) ทำหน้าที่บังบางส่วนของผิวชิ้นงานเพื่อไม่ให้ถูกกัดด้วยพลาสมา ชิ้นงานถูกกัดด้วยเงื่อนไขการทดลองโดยใช้ CF_4 พลาสมา ให้กำลังไมโครเวฟที่ 1,200 W อัตราการไหลก๊าซ 30 mL/min จ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ฐานรองชิ้นงาน -100 V ใช้เวลากัดรวม 300 s วัดความลึกจากการเทียบสเกลที่ได้จากภาพถ่าย SEM ด้านข้างได้ความลึก 0.68 μm ได้อัตราการกัดที่ 2.27 nm/s สำหรับ

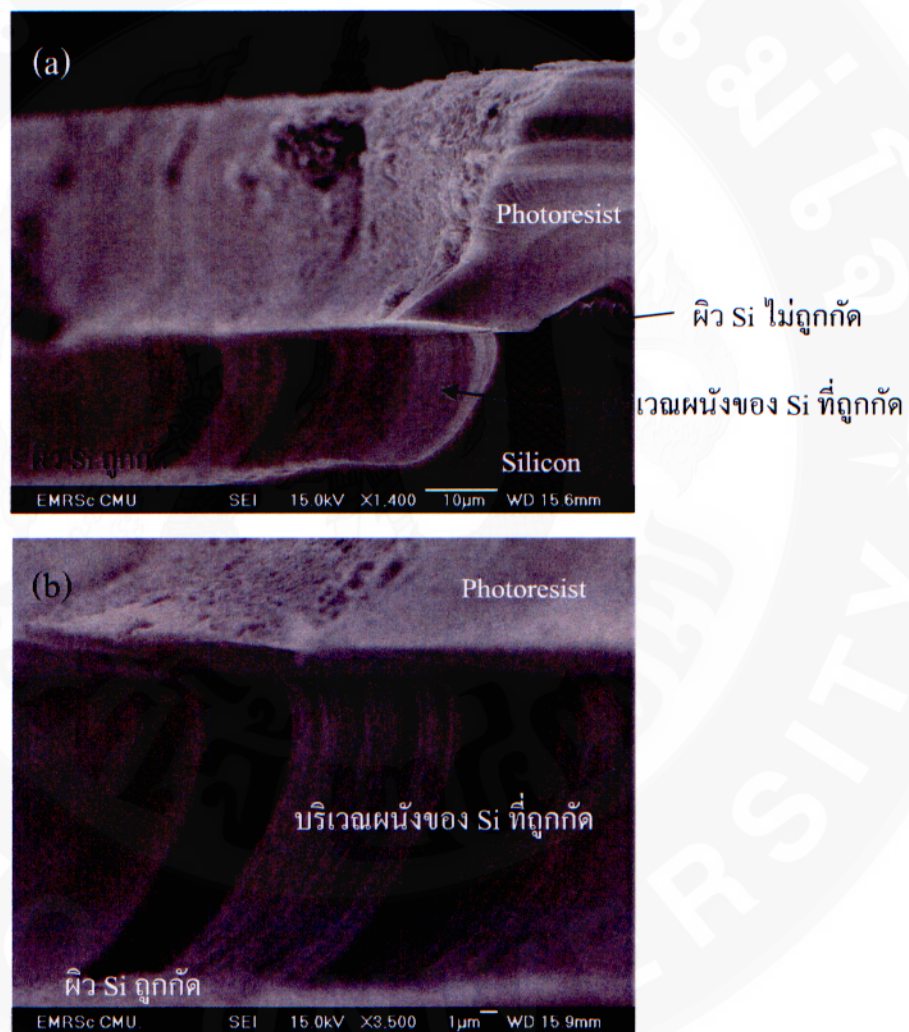
เงื่อนไขการกัดนี้ จะเห็นได้ว่าลักษณะผนัง Si ที่ถูกกัดจะลึกโค้งเข้าไปได้ก้ำกึ่งที่เป็น photoresist ซึ่งเป็นลักษณะการกัดแบบเท่ากันทุกทิศทางเรียก isotropic dry etching และไม่มีสารประกอบใหม่ (Re-deposition free) เกาะที่ผนังที่ถูกกัดของ Si แสดงถึงสารประกอบที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการ มีสถานะเป็นก๊าซและถูกปั๊มสุญญากาศดูดออกไปจากห้องสุญญากาศ



รูปที่ 21 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผิวซิลิกอนที่ถูกกัดโดยเงื่อนไขการทดลองที่ 2 (ในตารางที่ 2) ถ่ายโดยใช้เครื่อง Field Emission Scanning Electron Microscope (SEM, JEOL JSM-6335F)

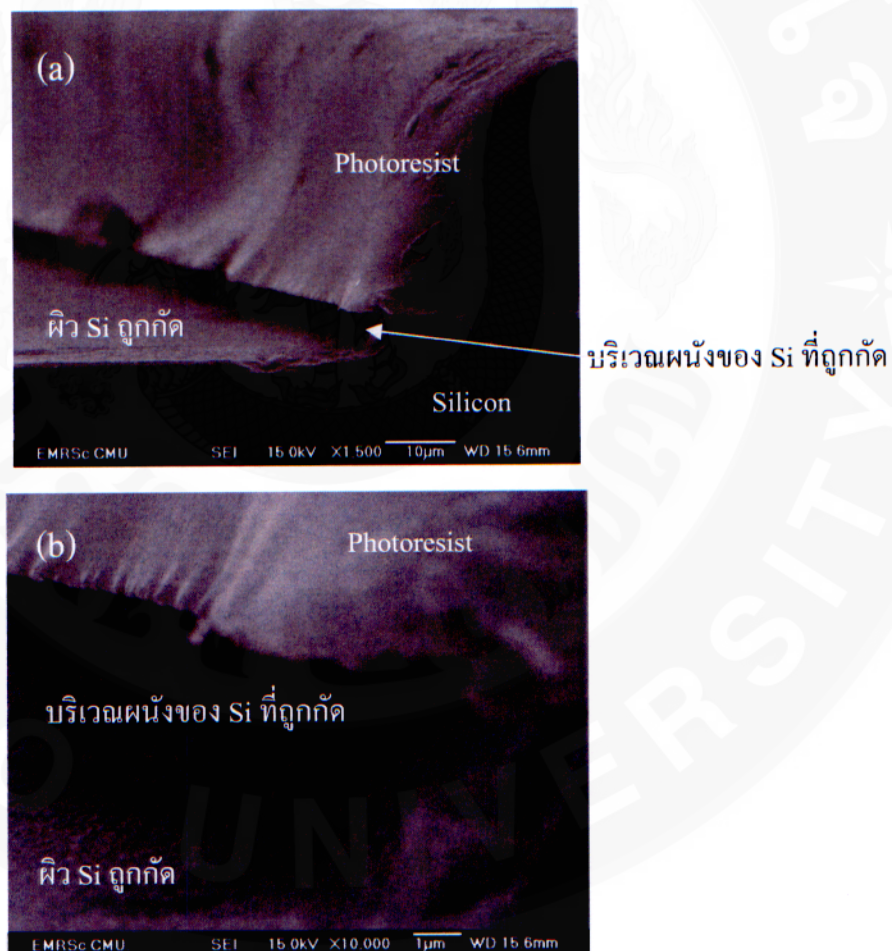
รูปที่ 21 แสดงภาพ SEM จากการถ่ายด้านข้าง (cross-sectional view) (a) ที่กำลังขยาย 500 เท่า และ (b) ที่กำลังขยาย 10,000 เท่าของชิ้นงานที่เป็น Si มีพอลิเมอร์ฟิล์มหนาประมาณ 30 μm (Photoresist) ทำหน้าที่บังบางส่วนของผิวชิ้นงานเพื่อไม่ให้ถูกกัดด้วยพลาสมา ชิ้นงานถูกกัด

ด้วยเงื่อนไขการทดลองโดยใช้ CF_4 พลาสมา ให้กำลังไมโครเวฟที่ 1,200 W อัตราการไหลก๊าซ 30 mL/min จ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ฐานรองชิ้นงาน -300 V ใช้เวลากัดรวม 150 s วัดความลึกจากการเทียบสเกลที่ได้จากภาพถ่าย SEM ด้านข้างได้ความลึก 2.68 μm ได้อัตราการกัดที่ 17.87 nm/s สำหรับเงื่อนไขการกัดนี้ จะเห็นได้ว่าลักษณะผนัง Si ที่ถูกกัดจะลึกโค้งเข้าไปได้ก้ำกึ่งที่เป็น photoresist ซึ่งเป็นลักษณะการกัดแบบเท่ากันทุกทิศทางเรียก isotropic dry etching และไม่มีสารประกอบใหม่ (Re-deposition free) เกาะที่ผนังที่ถูกกัดของ Si แสดงถึงสารประกอบที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการมีสถานะเป็นก๊าซและถูกปั๊มสุญญากาศดูดออกไปจากห้องสุญญากาศ



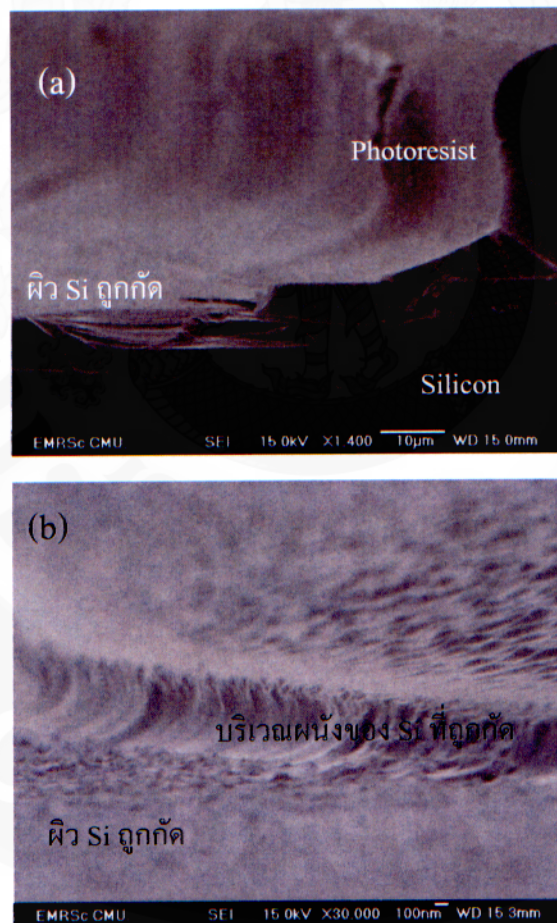
รูปที่ 22 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผิวซิลิกอนที่ถูกกัดโดยเงื่อนไขการทดลองที่ 3 (ในตารางที่ 2) ถ่ายโดยใช้เครื่อง Field Emission Scanning Electron Microscope (SEM, JEOL JSM-6335F)

รูปที่ 22 แสดงภาพ SEM จากการถ่ายด้านข้าง (cross-sectional view) (a) ที่กำลังขยาย 1,400 เท่า และ (b) ที่กำลังขยาย 3,500 เท่าของชิ้นงานที่เป็น Si มีพอลิเมอร์ฟิล์มหนาประมาณ 30 μm (Photoresist) ทำหน้าที่บังบางส่วนของผิวชิ้นงานเพื่อไม่ให้ถูกกัดด้วยพลาสมา ชิ้นงานถูกกัดด้วยเงื่อนไขการทดลองโดยใช้ CF_4 พลาสมา ให้กำลังไมโครเวฟที่ 1,200 W อัตราการไหลก๊าซ 90 mL/min จ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ฐานรองชิ้นงาน -100 V ใช้เวลากัดรวม 300 s วัดความลึกจากการเทียบสเกลที่ได้จากภาพถ่าย SEM ด้านข้างได้ความลึก 20 μm ได้อัตราการกัดที่ 66.67 nm/s สำหรับเงื่อนไขการกัดนี้ จะเห็นได้ว่าลักษณะผนัง Si ที่ถูกกัดจะลึกโค้งเข้าไปได้ก้ำกึ่งที่เป็น photoresist ซึ่งเป็นลักษณะการกัดแบบเท่ากันทุกทิศทางเรียก isotropic dry etching และไม่มีสารประกอบใหม่ (Re-deposition free) เกาะที่ผนังที่ถูกกัดของ Si แสดงถึงสารประกอบที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการมีสถานะเป็นก๊าซและถูกปั๊มสุญญากาศดูดออกไปจากห้องสุญญากาศ



รูปที่ 23 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผิวซิลิกอนที่ถูกกัดโดยเงื่อนไขการทดลองที่ 4 (ในตารางที่ 2) ถ่ายโดยใช้เครื่อง Field Emission Scanning Electron Microscope (SEM, JEOL JSM-6335F)

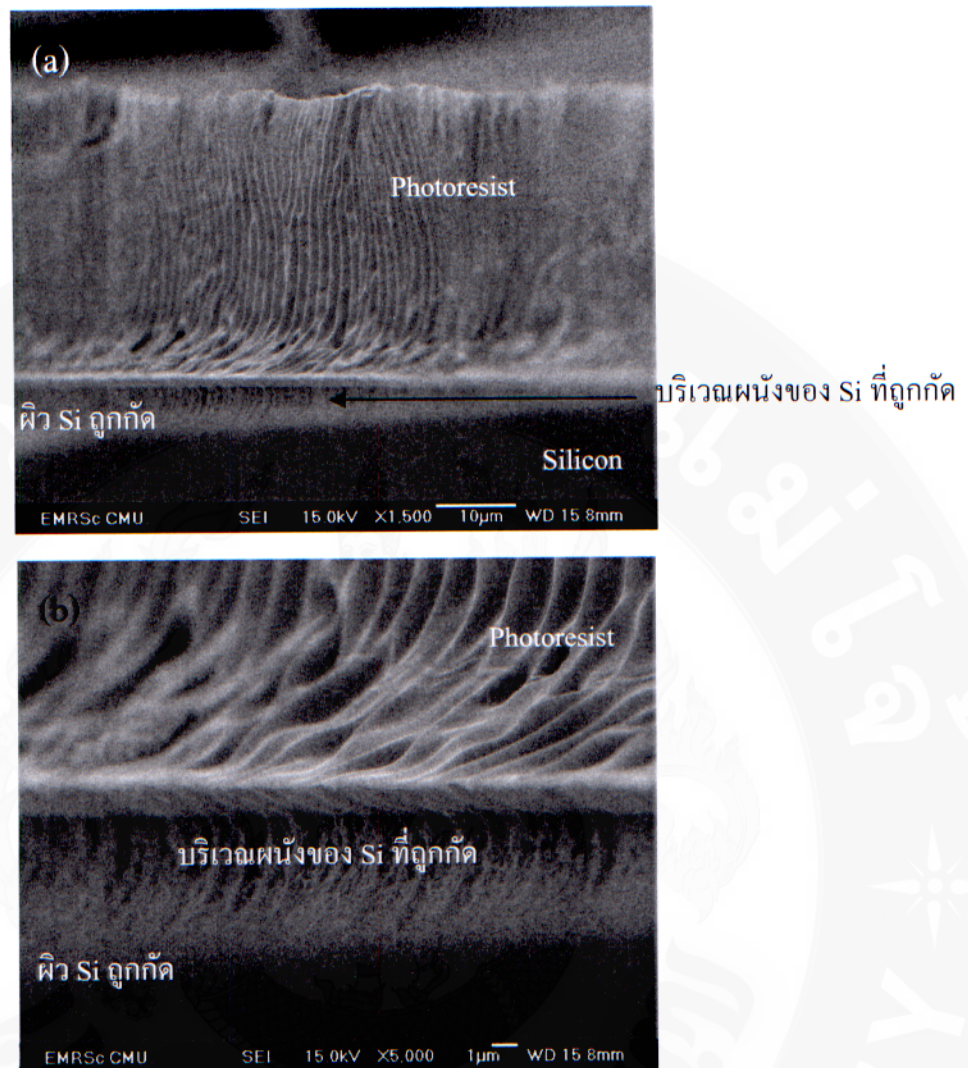
รูปที่ 23 แสดงภาพ SEM จากการถ่ายด้านข้าง (cross-sectional view) (a) ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า และ (b) ที่กำลังขยาย 10,000 เท่าของชิ้นงานที่เป็น Si มีพอลิเมอร์ฟิล์มหนาประมาณ 30 μm (Photoresist) ทำหน้าที่บังบางส่วนของผิวชิ้นงานเพื่อไม่ให้ถูกกัดด้วยพลาสมา ชิ้นงานถูกกัดด้วยเงื่อนไขการทดลองโดยใช้ CF_4 พลาสมา ให้กำลังไมโครเวฟที่ 1,200 W อัตราการไหลก๊าซ 90 mL/min จ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ฐานรองชิ้นงาน -300 V ใช้เวลากัดรวม 150 s วัดความลึกจากการเทียบสเกลที่ได้จากภาพถ่าย SEM ด้านข้างได้ความลึก 6.43 μm ได้อัตราการกัดที่ 42.87 nm/s สำหรับเงื่อนไขการกัดนี้ จะเห็นได้ว่าลักษณะผนัง Si ที่ถูกกัดจะลึกโค้งเข้าไปได้ก้ำกึ่งที่เป็น photoresist ซึ่งเป็นลักษณะการกัดแบบเท่ากันทุกทิศทางเรียก isotropic dry etching และไม่มีสารประกอบใหม่ (Re-deposition free) เกาะที่ผนังที่ถูกกัดของ Si แสดงถึงสารประกอบที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการมีสถานะเป็นก๊าซและถูกปั๊มสุญญากาศดูดออกไปจากห้องสุญญากาศ



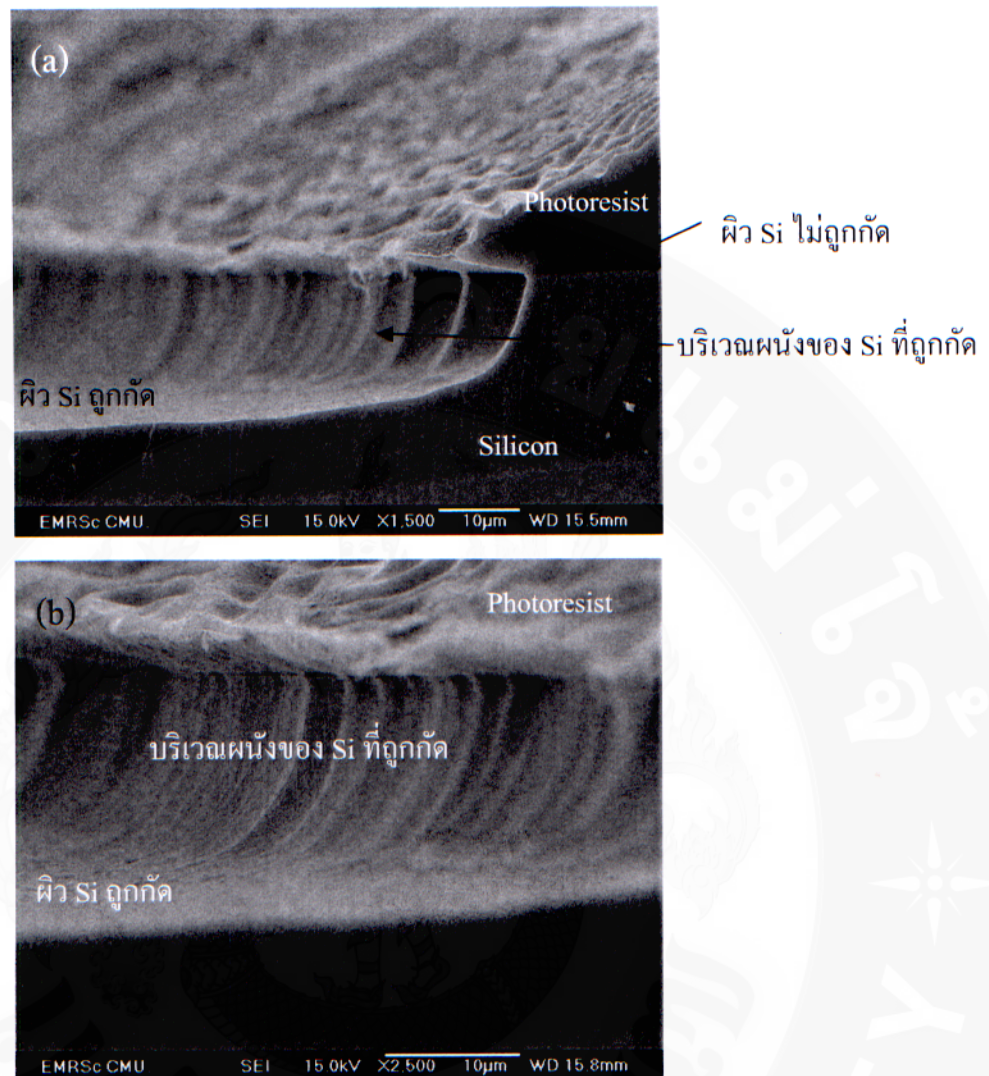
รูปที่ 24 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผิวซิลิกอนที่ถูกกัดโดยเงื่อนไขการทดลองที่ 5 (ในตารางที่ 2) ถ่ายโดยใช้เครื่อง Field Emission Scanning Electron Microscope (SEM, JEOL JSM-6335F)

รูปที่ 24 แสดงภาพ SEM จากการถ่ายด้านข้าง (cross-sectional view) (a) ที่กำลังขยาย 1,400 เท่า และ (b) ที่กำลังขยาย 30,000 เท่าของชั้นงานที่เป็น Si มีพอลิเมอร์ฟิล์มหนาประมาณ 30 μm (Photoresist) ทำหน้าที่บังบางส่วนของผิวชั้นงานเพื่อไม่ให้ถูกกัดด้วยพลาสมา ชั้นงานถูกกัดด้วยเงื่อนไขการทดลองโดยใช้ CF_4/Ar พลาสมา ให้กำลังไมโครเวฟที่ 1,200 W อัตราการไหลก๊าซ CF_4 45 mL/min และ Ar 45 mL/min โดยอัตราการไหลก๊าซรวม 90 mL/min จ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ฐานรองชั้นงาน -300 V ใช้เวลากัดรวม 150 s วัดความลึกจากการเทียบสเกลที่ได้จากภาพถ่าย SEM ด้านข้างได้ความลึก 0.53 μm ได้อัตราการกัดที่ 3.53 nm/s สำหรับเงื่อนไขการกัดนี้ จะเห็นได้ว่าลักษณะผนัง Si ที่ถูกกัดจะลึกโค้งเข้าไปได้ก้ำกึ่งที่เป็น photoresist ซึ่งเป็นลักษณะการกัดแบบเท่ากันทุกทิศทางเรียก isotropic dry etching และไม่มีสารประกอบใหม่ (Re-deposition free) เกาะที่ผนังที่ถูกกัดของ Si แสดงถึงสารประกอบที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการมีสถานะเป็นก๊าซและถูกปั๊มสุญญากาศดูดออกไปจากห้องสุญญากาศ

รูปที่ 25 แสดงภาพ SEM จากการถ่ายด้านข้าง (cross-sectional view) (a) ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า และ (b) ที่กำลังขยาย 5,000 เท่าของชั้นงานที่เป็น Si มีพอลิเมอร์ฟิล์มหนาประมาณ 30 μm (Photoresist) ทำหน้าที่บังบางส่วนของผิวชั้นงานเพื่อไม่ให้ถูกกัดด้วยพลาสมา ชั้นงานถูกกัดด้วยเงื่อนไขการทดลองโดยใช้ CF_4 พลาสมา ให้กำลังไมโครเวฟที่ 360 W อัตราการไหลก๊าซ 90 mL/min จ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ฐานรองชั้นงาน -100 V ใช้เวลากัดรวม 150 s วัดความลึกจากการเทียบสเกลที่ได้จากภาพถ่าย SEM ด้านข้างได้ความลึก 5.50 μm ได้อัตราการกัดที่ 36.67 nm/s สำหรับเงื่อนไขการกัดนี้ จะเห็นได้ว่าลักษณะผนัง Si ที่ถูกกัดจะลึกโค้งเข้าไปได้ก้ำกึ่งที่เป็น photoresist ซึ่งเป็นลักษณะการกัดแบบเท่ากันทุกทิศทางเรียก isotropic dry etching และไม่มีสารประกอบใหม่ (Re-deposition free) เกาะที่ผนังที่ถูกกัดของ Si แสดงถึงสารประกอบที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการมีสถานะเป็นก๊าซและถูกปั๊มสุญญากาศดูดออกไปจากห้องสุญญากาศ



รูปที่ 25 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผิวซิลิกอนที่ถูกกัดโดยเงื่อนไขการทดลองที่ 6 (ในตารางที่ 2) ถ่ายโดยใช้เครื่อง Field Emission Scanning Electron Microscope (SEM, JEOL JSM-6335F)



รูปที่ 26 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของผิวซิลิกอนที่ถูกกัดโดยเงื่อนไขการทดลองที่ 7 (ในตารางที่ 2) ถ่ายโดยใช้เครื่อง Field Emission Scanning Electron Microscope (SEM, JEOL JSM-6335F)

รูปที่ 26 แสดงภาพ SEM จากการถ่ายด้านข้าง (cross-sectional view) (a) ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า และ (b) ที่กำลังขยาย 2,500 เท่าของชิ้นงานที่เป็น Si มีพอลิเมอร์ฟิล์มหนาประมาณ 30 μm (Photoresist) ทำหน้าที่บังบางส่วนของผิวชิ้นงานเพื่อไม่ให้ถูกกัดด้วยพลาสมา ชิ้นงานถูกกัดด้วยเงื่อนไขการทดลองโดยใช้ CF_4 พลาสมา ให้กำลังไมโครเวฟที่ 360 W อัตราการไหลก๊าซ 30 mL/min จ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ฐานรองชิ้นงาน -100 V ใช้เวลากัดรวม 156 s วัดความลึกจากการเทียบสเกลที่ได้จากภาพถ่าย SEM ด้านข้างได้ความลึก 14.90 μm ได้อัตราการกัดที่ 95.51 nm/s สำหรับเงื่อนไขการกัดนี้ จะเห็นได้ว่าลักษณะผนัง Si ที่ถูกกัดจะลึกโค้งเข้าไปใต้กำบังที่เป็น photoresist ซึ่งเป็นลักษณะการกัดแบบเท่ากันทุกทิศทางเรียก isotropic dry etching และไม่มีสารประกอบใหม่

(Re-deposition free) เกาะที่ผนังที่ถูกกัดของ Si แสดงถึงสารประกอบที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการ มีสถานะเป็นก๊าซและถูกปั๊มสุญญากาศดูดออกไปจากห้องสุญญากาศ

ทั้งนี้ชั้นงานที่เป็น SiO_2 ได้ถูกเตรียมเช่นเดียวกับชั้นงานที่เป็น Si และได้เข้ากระบวนการกัดพร้อมกัน แต่เนื่องด้วย SiO_2 มีความหนาเพียง 300 nm จึงถูกกัดไปจนหมดและลึกลงไปในชั้นของ Si จึงไม่ได้หาอัตราการกัดของ SiO_2

ผลการวิเคราะห์ความลึกของหลุมที่ถูกกัดด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม

(Atomic Force Microscope, AFM)

ชั้นงานส่วนใหญ่มีความลึกเกิน 5 μm (ซึ่งเป็นความลึกสูงสุดที่เครื่อง AFM จะสามารถวัดได้) จึงไม่สามารถวัดความลึกของหลุมด้วยเครื่อง AFM ได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงไม่สามารถนำข้อมูลของ AFM มาใช้ในการหาความลึกหลังการกัดของชั้นงานได้

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของสารประกอบใหม่ที่เกิดขึ้นในกระบวนการ (Re-deposition)

แล้วพอกอยู่ด้านข้างหรือผนังของร่องกัด โดยการใช้รังสีเอกซ์

Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDX) หรือ X-ray photoelectron spectroscopy (XPS)

ทั้งนี้เนื่องจากการกัดทุกเงื่อนไขการทดลองได้ผลการกัดที่เป็นแบบไม่มีสารประกอบใหม่ (Re-deposition free) เกาะที่ผนังที่ถูกกัดของ Si แสดงถึงสารประกอบใหม่ที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการมีสถานะเป็นก๊าซและถูกปั๊มสุญญากาศดูดออกไปจากห้องสุญญากาศ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงไม่ต้องวิเคราะห์องค์ประกอบของ Re-deposition

วิจารณ์ผลการวิจัย

จากการที่งานวิจัยนี้ได้ผลการกัดเป็นแบบ isotropic etching ทุกเงื่อนไขการทดลอง เนื่องมาจากความสามารถในการทำสุญญากาศภายในห้องสุญญากาศทำได้ดีที่สุดในระดับ 235 Pa (โดยใช้ปั๊มกลโรตารีขนาดเล็ก) ซึ่งความดันในระดับนี้การเคลื่อนที่ของอนุภาคลิเธเร (ฟลูออรีนอะตอม) ที่ทำหน้าที่ในการกัดซิลิกอนจะเคลื่อนที่เป็นแบบ laminar flow ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่ของอะตอมของก๊าซที่เกิดการชนกันอย่างมากกับอะตอมข้างเคียง ก่อนที่จะเคลื่อนที่ไปถึงบริเวณที่เกิดการกัด การชนกันของอะตอมดังกล่าวทำให้อะตอมเคลื่อนที่ไปทางด้านข้างและสามารถกัดผิวชิ้นงานบริเวณด้านข้างจนเกิดเป็นการกัดลักษณะ undercutting เกิดขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการคำนวณค่าอัตราส่วนของ ค่าความหนาของบริเวณที่มีแต่ไอออน (Ion sheath thickness, d_{is}) กับค่าระยะทางเฉลี่ยที่อะตอมสามารถเคลื่อนที่ได้ก่อนที่จะชนกับโมเลกุลอื่น (mean free path, λ) ได้เท่ากับ $\frac{d_{is}}{\lambda} = 25.82$ ($d_{is} \gg \lambda$) ซึ่งตีความได้ว่าเมื่ออัตราส่วนนี้มีค่ามากแสดงว่า ระหว่างที่ไอออนบวกถูกเร่งด้วยศักย์ไฟฟ้าที่เป็นลบเมื่อจ่ายศักย์ไฟฟ้าไปที่ฐานรองชิ้นงานซึ่งเป็นการจ่ายพลังงานจลน์ให้กับไอออนบวกเพื่อมีโมเมนตัม วิ่งเข้าชนผิววัสดุเพื่อเกิดการกัด ไอออนบวกจะชนกับโมเลกุลก๊าซที่เป็นกลางทางไฟฟ้า ทำให้ไอออนบวกที่กำลังวิ่งเข้าชนผิววัสดุเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่และถูกลดพลังงานจลน์ลงเนื่องจากการชนกับโมเลกุลอื่นดังกล่าว ดังนั้นการกัดที่เกิดขึ้นจากเงื่อนไขการกัดในงานวิจัยนี้ทุกเงื่อนไข จึงเกิดการกัดแบบเชิงเคมี (chemical etching) จากปฏิกิริยาเคมี $\text{Si (s)} + 4\text{F (g)} \rightarrow \text{SiF}_4\text{(g)}$ ซึ่งหนึ่งอะตอมของซิลิกอนที่เป็นของแข็งจะเกิดพันธะทางเคมีกับอะตอมของฟลูออรีนที่มีสถานะเป็นก๊าซจำนวน 4 อะตอมเกิดเป็นสารประกอบใหม่ $\text{SiF}_4\text{(g)}$ ซึ่งมีสถานะเป็นก๊าซและหลุดออกจากตำแหน่งที่ถูกกัดได้ จึงส่งผลให้ไม่มีสารประกอบใหม่ที่มีสถานะของแข็งเกาะติดผนัง (Re-deposition) ซิลิกอนที่เกิดการกัดเลยแม้กระทั่งบริเวณที่อยู่ใต้ mask photoresist

ดังนั้นหากต้องการให้ผลการกัดเป็นแบบ anisotropic etching จำเป็นจะต้องลดความดันสุญญากาศให้ต่ำลงถึงระดับที่ $\lambda \gg d_{is}$ โดยประมาณ 0.13 Pa [20] หรือต่ำกว่า การที่จะลดความดันได้ถึงระดับนี้จำเป็นต้องใช้ diffusion pump หรือ turbo pump ซึ่งจัดเป็นปั๊มสุญญากาศที่มีราคาแพงมาก

สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ดัดแปลงเตาไมโครเวฟที่ใช้ในครัวเรือนมาเป็นแหล่งจ่ายพลังงานเพื่อสร้างพลาสมาและทดลองหาเงื่อนไขของกระบวนการกัดซิลิกอนจากคาร์บอนเตตระฟลูออไรด์พลาสมากระตุ้นด้วยไมโครเวฟภายใต้ความดันสุญญากาศที่ให้อัตราการกัดซิลิกอนที่อัตราการกัดสูงที่สุดทำการทดลองโดยใช้กำลังไมโครเวฟในช่วง 360 – 1,200 W อัตราการไหลของก๊าซในช่วง 30– 90 mL/min แรงดันไฟฟ้าจ่ายไปที่ฐานรองชิ้นงานในช่วง -100 V ถึง -300 V เวลาที่ใช้ในการกัด 150 s – 300 s จากการทดลองพบว่าซิลิกอนไม่ถูกกัดเลยเมื่อใช้อาร์กอนพลาสมา (Ar plasma) ซึ่งเป็นกระบวนการที่อาศัยพลังงานจลน์เพียงอย่างเดียวในการกัดชิ้นงาน (กระบวนการแบบ physical etching) ซิลิกอนเริ่มถูกกัดเมื่อมีอะตอมฟลูออรีนผสมเข้าไปในระบบ คือการใช้ Ar/CF₄ plasma (กระบวนการผสมระหว่าง physical etching และ chemical etching) และจะยิ่งถูกกัดมากขึ้นเมื่อใช้คาร์บอนเตตระฟลูออไรด์พลาสมา (CF₄ plasma) เพียงอย่างเดียวซึ่งเป็นกระบวนการกัดเชิงเคมี (chemical etching) โดยอนุมูลอิสระที่ไวในการทำปฏิกิริยาเคมี เช่น อะตอมของฟลูออรีน (F)

ทุกเงื่อนไขของการกัดพบว่าการกัดเป็นแบบทุกทิศทาง (isotropic dry etching) ซึ่งลักษณะผนัง Si ที่ถูกกัดจะลึกโค้งเข้าไปได้ก้ำกึ่งที่เป็น photo-resist และไม่มีสารประกอบใหม่ (Re-deposition free) เกาะที่ผนังที่ถูกกัดของ Si แสดงถึงสารประกอบที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการมีสถานะเป็นก๊าซและถูกบีบสุญญากาศดูดออกไปจากห้องสุญญากาศ เงื่อนไขที่ให้อัตราการกัดสูงที่สุดที่ 95.51 nm/s คือเงื่อนไขการกัดโดยใช้ CF₄ plasma ที่อัตราการไหลของก๊าซ 30 mL/min จ่ายกำลังไมโครเวฟที่ 360 W จ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ฐานรองชิ้นงานที่ -100 V ทำการกัดเป็นเวลา 156 s ได้ความลึกที่ 14.90 μm

ข้อเสนอแนะ

เนื่องด้วยระบบไมโครเวฟพลาสมาปัจจุบันมีข้อจำกัดในเรื่องของช่วงเวลาในการเดินเครื่อง คือ ครั้งละไม่เกิน 30 วินาที จากสาเหตุที่ห้องสุญญากาศที่ทำจากแก้ว borosilicate ไม่สามารถทนอุณหภูมิสูงได้ทั้งๆที่โดยทั่วไปแล้วแก้ว borosilicate สามารถทนอุณหภูมิได้สูงเพียง 400°C ดังนั้นเพื่อให้ระบบดังกล่าวมีความสะดวกในการใช้งานมากขึ้น จึงควรหาห้องสุญญากาศที่ทำจากควอตซ์ (quartz) ซึ่งสามารถทนอุณหภูมิได้สูงกว่ามาทดแทน

เอกสารอ้างอิง

- [1] C. Pakpum and P. Limsuwan, "A deep AlTiC dry etching for fabrication of Burnish and Glide slider head", *Procedia Engineering* 32 (2012) 1037-1042
- [2] C. Silawatshananai, N. Matan, C. Pakpum, N. Pussadee, P. Srisantitam, S. Davynov, T. Vilaithong, "DC Plasma Ion Implantation in an Inductively Coupled RF Plasma", Poster paper : The First Cairo Conference on Plasma Physics and Applications 11-15 October 2003, Cairo-Egypt.
- [3] C. Pakpum, N. Pasaja, D. Boonyawan, P. Suanpoot, P. Srisantithum, C. Silawatshananai and T. Vilaithong, "Diamond-Like Carbon formed by Plasma Immersion Ion Implantation and Deposition Technique on 304 Stainless Steel", *Solid State Phenomena* Vol.107 (2005) pp.129-132,
- [4] P. Chaivan, N. Pasaja, D. Boonyawan, P. Suanpoot and T. Vilaithong, "Low-temperature plasma treatment for hydrophobicity improvement of silk" *Surface & Coating Technology* 193 (2005) 356-360
- [5] มิณช์ เมธิ์สุวกุล, "แหล่งกำเนิดพลาสมาไมโครเวฟ 2.45 กิกะเฮิร์ตซ์ในสุญญากาศสำหรับการสะสมเงินล่อนุภาคประจุพลังงานต่ำ" *วิทยานิพนธ์ ปริญญา วิทยาศาสตร์คุณวุฒิปบัณฑิต (ฟิสิกส์) มหาวิทยาลัยเชียงใหม่* 2549
- [6] Satreerat K. Hodak , T. Supasai, B. Paosawatyanong, K. Kamlangkla and V. Pavarajarn, "Enhancement of the hydrophobicity of silk fabrics by SF₆ plasma", *Applied Surface Science* 254 (2008) 4744-4749
- [7] KitiyaSuhem, NarumolMatan, MudtorlepNisoa and nirundornMatan, "International Journal of Food Microbiology, Volume 161, Number 2, Page 107-111, 2013
- [8] KitiyaSuhem, NarumolMatan, MudtorlepNisoa and NirundornMatan, "Low pressure radio frequency plasma effects on the mould control, physical quality, nutritional value, mineral content and trace element content of brown rice snack bars", *Journal of Food and Nutrition Research*, Volume 52, Number 2, Page 87-94, 2013
- [9] P. Kerdtongmee, D. Srinoum and M. Nisoa, "Development of compact high voltage switched mode power supply for microwave plasma sources supply for low pressure plasma", *Journal of Instrumentation*, Vol. 6, no. 08, pp. P08014-P08014, 2011

- [10] Ong-On Topon, VittayaAmornkitbamrung and ThanusitBurinprakhon, “X-ray diffraction Studies on Grain Size of Nanocrystalline Diamond and Residual Stress on Silicon Substrate Prepared by Hot-Filament Chemical Vapor Deposition”, *New Diamond and Frontier Carbon Technology*, Vol.17 (2007), 221-229
- [11] PrasertsakKasemanankul, NirunWitit-Anun, SurasingChaiyakun and PichetLimsuwan, “Apatite Formation on Rutile TiO₂ Film Deposited Using Dual Cathode DC Unbalanced Magnetron Sputtering” *Engineering Journal*, Volume 16, Issue 3, 2011
- [12] ศราวุธ ใจเย็น, จันทน์ อุทธิสินธุ์, นริศร์ บาลทิพย์, อันชัย หมวกงาม, ศตวรรษ รักมาก และ ชลภิกวิญ์ ศรีบุศยกุล, “การพัฒนาชุดกำเนิดพลาสมาขนาดเล็กเพื่อใช้ปรับสภาพและทำความสะอาดพื้นผิว”, *RMUTP Research Journal Special Issue, The 5th Rajamangala University of Technology National Conference*
- [13] R. Pongsopon, T. Chim-Oye and M. Fuangfoong, “Microwave Plasma Reactor on Microwave Oven”, *Progress In Electromagnetics Research Symposium Proceedings, Guangzhou, China, Aug.25-28, 2014*
- [14] Xiao Yu, Yuchen Wang, Yanxiang Liu, Tie Li, Hong Zhou, XiuliGao, FeiFeng, TomiRoinila and Yuelin Wang, “CMOS MEMS-based thermoelectric generator with an efficient heat dissipation path”, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol.22 , (2012), 7 pages
- [15] นฤทธิ์ ฝ่ายบุตร และ วิทยา อมรกิจบำรุง, “ผลของอัตราส่วนผสมระหว่างก๊าซมีเทนกับก๊าซไฮโดรเจนต่อปริมาณธาตุไฮโดรเจนในฟิล์มไฮโดรเจนที่เคลือบ อะมอร์ฟัสคาร์บอน”, *SDU Res. J.* 5(2): Jul –Dec 2012, pp.53-63
- [16] Yoshiyuki Nonoguchi, Kenji Ohashi, Rui Kanazawa, Koji Ashiba, Kenji Hata, Tetsuya Nakagawa, Chihaya Adachi, Tomoaki Tanase and Tsuyoshi Kawai, “Systematic Conversion of Single Walled Carbon Nanotubes into n-type Thermoelectric Materials by Molecular Dopants”, *Scientific Reports* 3, Article number: 3344 (2013)
- [17] Shinichi Tachi, Kazunori Tsujimoto, and Sadayuki Okudaira, “Low-temperature reactive ion etching and microwave plasma etching of silicon”, *Applied Physics Letters*, 52, 616-618 (1988)

- [18] S. Tachi and S. Okudaira, "Chemical Sputtering of Silicon by F^+ , Cl^+ , and Br^+ ions-reactive spot model for reactive ion etching", *J. Vac. Sci. Technol. B4*, 459-467 (1986)
- [19] A. Bensaoula, A. Ignatiev, J. Strozier, and J.C. Wolfe, "Low-temperature ion beam enhanced etching of tungsten films with xenon difluoride", *Appl. Phys. Lett.* 49, 1663 (1986)
- [20] Keizo Suzuki, Ken Ninomiya and Shigeru Nishimatsu, "Microwave plasma etching", *Vacuum*, Volume 34, number 10/11, 953-957 (1984)
- [21] T. Kure, Y. Gotoh, H. Kawakami, and S. Tachi, "Highly Anisotropic Microwave Plasma Etching for High Packing Density Silicon Patterns", *Symposium on VLSI Technology Digest of Technical Papers*, 48-49 (1992)
- [22] H. Schmid, "Microwave etching device for reactive ion etching", *Material Science and Engineering*, A139, 408-411(1991)
- [23] JIŘINA HOUŠOVÁ and KAREL HOKE, "Microwave Heating – the Influence of Oven and Load Parameters on the Power Absorbed in the Heated Load", *Czech J. Food Sci.*, Vol.20, No.3: 117-124 (2002)
- [24] Nojira, K. "Dry Etching Technology for Semiconductors", Chapter 2, ISBN: 978-3-319-10294-8, <http://www.springer.com/978-3-319-10294-8>