บทที่ 2

วิธีการผลิตอะมอร์ฟัสซิลิคอนอัลลอยด้วยวิธี Glow Discnarge Plasma CVD

2.1 บทนำ

วัสดุอะมอร์ฟัส (amorphous) แปลว่าสิ่งซึ่งมีรูปร่างไม่แน่นอนหรือวัสดุอสัณฐาน วัสดุอะมอร์ฟัสมีโครงสร้างของอะตอมที่เรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบในช่วงระยะยาวของอะตอม (ไม่มี long range order) แต่จะมีการเรียงของอะตอมอย่างเป็นระเบียบในช่วงระยะสั้นของอะตอม (มี short range order) คำว่าระยะยาวของอะตอมนั้นหมายถึงช่วงระยะอะตอมหลาย ๆ สิบอะตอม ส่วนในช่วงระยะสั้นของอะตอมนั้นหมายถึงช่วงระยะอะตอมสองสามอะตอม [2] ซึ่งการเรียงตัวของอะตอมในระยะสั้นนี้มีผลสำคัญทำให้วัสดุนั้นมีคุณสมบัติคล้ายผลึกที่เกิดจากธาตุเดียวกัน แต่มีคุณสมบัติแปลกใหม่กว่าผลึก เช่น สามารถออกแบบและผลิตวัสดุที่มีค่าคงที่ทางฟิสิกส์ต่าง ๆ ตามต้องการได้ และคุณสมบัติทางฟิสิกส์จึงเหมือนกันตลอดทุกทิศทุกทางของวัสดุ ในวัสดุอะมอร์ฟัสจึงไม่มีกลุ่มผลึก (grain) และผิวที่แตกของผลึก (cleavage) วัสดุอะมอร์ฟัสสารกึ่งตัวนำที่รู้จักและใช้งานกันแพร่หลายมากที่สุด ได้แก่อะมอร์ฟัสซิลิคอน ซึ่งมีข้อดีหลายอย่างเช่น สามารถผลิตให้เป็นพื้นที่ใหญ่ ๆ ได้ง่าย มีความสามารถดูดกลืนแสงได้สูง และมีความสามารถเปล่งแสงได้ดีนอกจากนั้นยังมีคุณสมบัติที่ไวต่อแสง สามารถเติมสารเจือปนในอะมอร์ฟัสซิลิคอนให้มีคุณสมบัติเป็นชนิดพีหรือเอ็นได้ จึงสามารถนำไปใช้งานเป็นสิ่งประดิษฐ์อิเล็กทรอนิกส์ได้มากมาย เช่น เซลล์แสงอาทิตย์ [7-8] โฟโตไดโอด และเซนเซอร์สีของแสง [9]

วัสดุฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอนอัลลอยสามารถผลิตได้หลายวิธี เช่น sputtering, thermal CVD แต่ปัจจุบันวิธี glow discharge plasma CVD (การแยกสลายก๊าซด้วยประจุเรืองแสง) เป็นวิธีที่จะให้ได้ฟิล์มที่มีคุณภาพเป็นสารกึ่งตัวนำที่ดีที่สุดวิธีหนึ่ง และใช้กันแพร่หลายมากที่สุด (CVD ย่อมาจากคำว่า Chemical Vapor Deposition) ปัจจุบันที่ห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย มีเครื่อง glow discharge plasma CVD 2 ชุด โดยชุดแรกใช้สำหรับผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-Si:H ชุดที่สองใช้สำหรับผลิตฟิล์มสารประกอบ a-SiN:H a-SiC:H และ a-SiO:H และประดิษฐ์ไดโอดเปล่งแสงชนิดฟิล์มบาง อะมอร์ฟัสซิลิคอนอัลลอย

ในบทนี้จะกล่าวถึงโครงสร้างและลักษณะเด่นของระบบ glow discharge plasma CVD ทั้งสองชุด และกล่าวถึงขั้นตอนและเงื่อนไขการผลิตฟิล์มอะมอร์ฟัสซิลิคอนอัลลอย

2.2 โครงสร้างของระบบ Glow Discharge Plasma CVD ชุดที่ 1

ระบบ glow discharge plasma CVD ชุดที่ 1 ใช้ประดิษฐ์ฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอน (a-Si:H) เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ รูปที่ 2.1 แสดงแผนผังของระบบ glow discharge plasma CVD ชุดที่ 1 ซึ่งประกอบส่วนต่าง ๆ ดังนี้

1. ระบบจ่ายและควบคุมก๊าซ

ก๊าซดิบที่ใช้มีความบริสุทธิ์สูงมากระดับ 99.9999 % ขึ้นไป ได้แก่

ก๊าซไซเลน (SiH_4) ผสมในไฮโดรเจน (H_2) ด้วยอัตราส่วน SiH_4/H_2 = 10 % ขนาด 40 ลิตร

ก๊าซแอมโมเนีย (NH_3) ผสมในไฮโดรเจน (H_2) ด้วยอัตราส่วน NH_3/H_2 = 10% ขนาด 10 ลิตร

ก๊าซมีเทน (CH_4) ผสมในไฮโดรเจน (H_2) ด้วยอัตราส่วน CH_4/H_2 = 10% ขนาด 40 ลิตร

ก๊าซไดบอเรน (B_2H_6) ผสมในไฮโดรเจน ด้วยอัตรส่วน 500 ppm ขนาด 10 ลิตร ใช้สำหรับการโด๊ปให้สารกึ่งตัวนำเป็นชนิดพี

ก๊าซฟอสฟีน (PH_3) ผสมในไฮโดรเจน ด้วยอัตราส่วน 500 ppm ใช้สำหรับการโด๊ปให้เป็นสารกึ่งตัวนำเป็นชนิดเอ็น

2. ระบบครอบแก้วสุญญากาศ (Vacuum Reactor Chamber) นี้ทำจากหลอดควอร์ทซ์ทรงกระบอกสูง 30 ซม. เส้นผ่าศูนย์กลาง 11 ซม. หนา 5 มม. ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ภายในครอบแก้ว มีแท่นรอง (susceptor) ที่ทำจากผลึกโพลีซิลิคอนคาร์ไบด์ที่สามารถหมุนได้เพื่อให้ฟิล์มมีความหนาสม่ำเสมอ วางอยู่บนฮีตเตอร์ที่ปรับอุณหภูมิได้จากอุณหภูมิห้องถึง 350°C ภายในครอบแก้วถูกทำให้เป็นสุญญากาศด้วยปั๊มชนิดโรตารีได้ถึง 10^{-3} Torr ในขณะปลูกฟิล์มจะปรับความดันให้เป็น 1 Torr

3. ระบบกำเนิดสนามไฟฟ้าความถี่วิทยุเพื่อทำการดีสชาร์จ ภายนอกครอบแก้วมีแผ่นทองแดงรูปทรงกระบอกครึ่งวงกลม 2 แผ่นวางประกบอยู่เพื่อทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าแบบคาปาซิเตอร์ที่จะกระตุ้นก๊าซในครอบแก้วให้เกิดการดีสชาร์จ โดยรับสนามไฟฟ้าความถี่คลื่นวิทยุ (13.56

MHz) จากต้นกำเนิดสัญญาณ RF และระหว่างต้นกำเนิดสัญญาณ RF และขั้วไฟฟ้ามีกล่องแมชชิงค์สำหรับปรับเอาท์พุทอิมพีแดนซ์ให้เข้ากับอิมพีแดนซ์ของโหลด (chamber)

ลักษณะเด่นของระบบ

1. เนื่องจากขั้วไฟฟ้าที่ใช้ทำดิสชาร์จอยู่ภายนอกครอบแก้วจึงไม่มีการปนเปื้อนสารเจือจากขั้วไฟฟ้าเข้าสู่ฟิล์ม a-Si:H
2. สนามไฟฟ้า RF มีทิศทางขนานกับแผ่นฐานจึงลดการกระแทกทางกลศาสตร์จากพลาสมาที่จะมีต่อฟิล์มที่กำลังปลูก
3. สามารถปรับระยะความสูงจากแผ่นฐานถึงขั้วไฟฟ้าสำหรับดีสชาร์จได้ จึงสามารถเลื่อนให้พลาสมาห่างจากแผ่นฐานได้ตามความเหมาะสม ทำให้ได้ฟิล์ม a-Si:H ที่มีคุณภาพสูง

ภาพถ่ายของระบบ glow discharge plasma CVD แสดงในรูปที่ 2.3 และเงื่อนไขการผลิต a-Si:H แสดงในตารางที่ 2.1

2.3 โครงสร้างของระบบ Glow Discharge Plasma CVD ชุดที่ 2

ระบบ CVD ชุดที่สองเป็นชนิด vertical direction กล่าวคือสนามไฟฟ้าความถี่วิทยุ RF นั้นอยู่ในทิศทางตั้งฉากกับแผ่นฐาน บริษัทผู้ผลิตคือ SAMCO International ประเทศญี่ปุ่น เป็นรุ่น BP-1

รูปที่ 2.4 และ 2.5 แสดงภาพถ่ายของระบบ CVD ชุด SAMCO และแผนผังแสดงโครงสร้างของระบบ ตามลำดับ ซึ่งประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วนคือ 1) เครื่อง CVD 2) ระบบจ่ายก๊าซ

หลักการทำงานโดยย่อของการผลิตฟิล์มบางด้วยวิธี CVD ชุดที่ 2 คือ ก๊าซดิบ เช่น SiH_4, CH_4, B_2H_6 จะถูกส่งเข้าครอบแก้วที่มีความดันประมาณ 3 Torr และก๊าซดิบเหล่านี้จะถูกสนามไฟฟ้ากระตุ้นให้แตกตัวเป็นพลาสมา และอะตอมของธาตุต่าง ๆ จะถูกแยกให้ไปเกาะติดเป็นฟิล์มบางบนแผ่นฐาน เช่น แผ่นแก้วที่วางบนฮีตเตอร์ เงื่อนไขต่าง ๆ ที่จะต้องควบคุมได้แก่ ปริมาณการไหลของก๊าซ ความดันในครอบแก้ว กำลังไฟฟ้าสำหรับแยกก๊าซ และอุณหภูมิของแผ่นฐาน เครื่อง CVD ชุดที่ 2 นี้ประกอบด้วยส่วนสำคัญดังนี้

1. ครอบแก้วชนิดไพเร็กซ์ (Pyrex Chamber) มีลักษณะเป็นครอบแก้วของวัสดุ Pyrex สูงประมาณ 40 cm เส้นผ่าศูนย์กลางด้านล่าง 22 cm และเส้นผ่าศูนย์กลางส่วนด้านบน 12 cm ทำหน้าที่เป็นหลอดสุญญากาศ โดยวางคว่ำประกบอยู่บนฐานสเตนเลสสตีล โดยมียางรูปตัว L เป็นตัวเก็บสุญญากาศ ภายในครอบแก้วมีฮีตเตอร์ลักษณะจานกลม (susceptor) เส้นผ่าศูนย์กลาง 10 cm และปรับอุณหภูมิได้จากอุณหภูมิห้องถึง 400°C ที่ด้านล่างของ flange มีท่อสเตนเลสต่อไปสู่ปั๊มสุญญากาศ (rotary vacuum pump) ที่ด้านข้างของครอบแก้วมีวาล์วเปิด/ปิดสำหรับควบคุมความดันของก๊าซ

2. เครื่องกำเนิดสนามไฟฟ้าความถี่วิทยุ ที่ด้านข้างของ CVD มีเครื่องกำเนิดสนามไฟฟ้าความถี่วิทยุ (Radio Frequency 13.56 MHz) วางอยู่และต่อไปสู่ครอบแก้วด้วยสายโคแอกเชียล โดยที่ก่อนเข้าครอบแก้วจะมีกล่องปรับให้อิมพีแดนซ์ของต้นกำเนิด RF มีค่าใกล้เคียงกับอิมพีแดนซ์ของโหลด (คือพลาสมา) กล่องปรับนี้ทำจากวงจร L และ C ขั้วไฟฟ้าอาโนดมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 cm ขั้วอาโนดทำจากโลหะสเตนเลสมีลักษณะเป็นจานกลม และมีรูพรุนที่จานเพื่อให้ก๊าซที่ไหลเข้ามาจากภายนอกสามารถแพร่กระจายได้ทั่วและสม่ำเสมอ

รูปที่ 2.6 แสดงภาพถ่ายขณะกำลังดิสชาร์จก๊าซไซเลน (SiH_4) รายละเอียดของเครื่อง CVD ชุดที่ 2 นี้ สรุปในดังตารางที่ 2.2

3. ระบบการจ่ายและควบคุมก๊าซ ใช้ระบบเช่นเดียวกับชุด CVD ชุดที่ 1

2.4 ขั้นตอนการผลิตฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอนอัลลอย

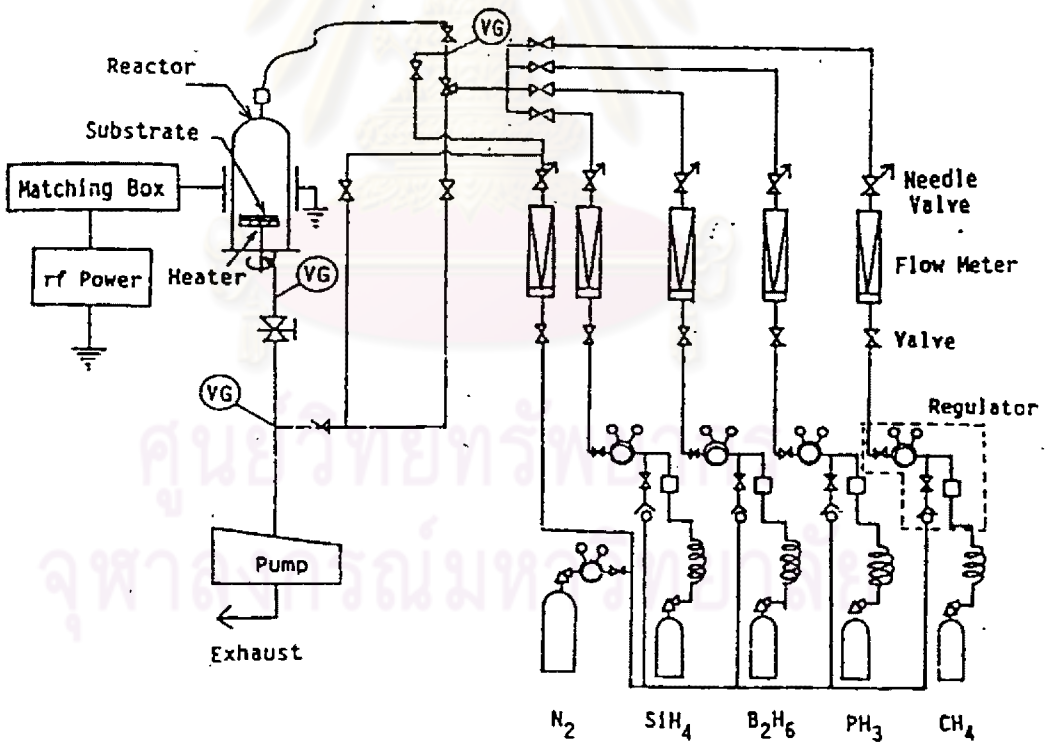
ขั้นตอนการผลิตอะมอร์ฟัสซิลิคอนอัลลอยด้วยวิธี glow discharge plasma มี 3 ขั้นตอนดังนี้

1. การเตรียมตัว ได้แก่ การเริ่มเตรียมแผ่นฐานที่ใช้ปลูกฟิล์ม ก่อนการปลูกฟิล์มจะต้องล้างแผ่นฐานให้สะอาดด้วยกระบวนดังนี้

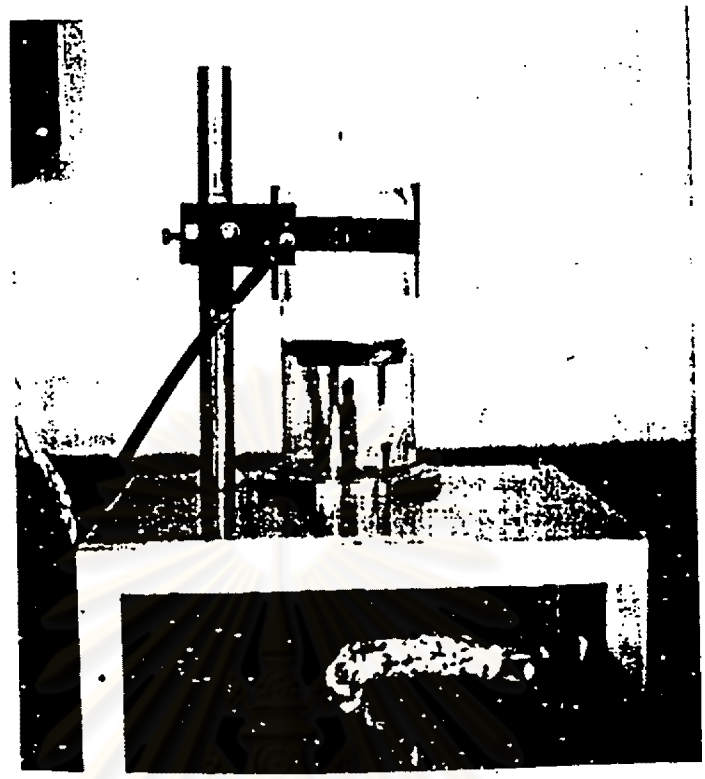
Trichloroethylene	Ultrasound	20 นาที
Acetone	Ultrasound	20 นาที
Methylalcohol	Ultrasound	20 นาที

ตารางที่ 2.1 เงื่อนไขโดยสรุปในการปลูกฟิล์ม a-Si:H

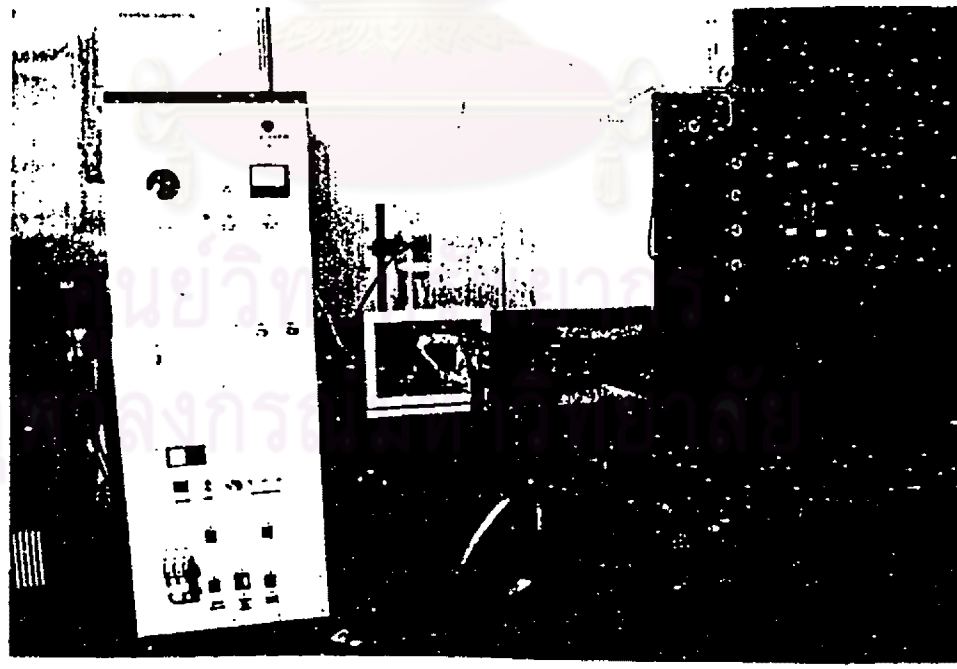
การทำดิสชาร์จ	แบบคาปาซิเตอร์ ที่ความถี่ RF 13.56 MHz
อุหณภูมิแผ่นฐาน	100 - 300°C
กำลังไฟฟ้า RF	30 - 250 Watt
ความดันขณะปลูกฟิล์ม	1 Torr
ความสูงของขั้ว	10 cm
ปริมาณการไหลของก๊าซ	15 - 60 cc/min
ชนิดของก๊าซในถัง	SiH_4/H_2 = 10 %
	CH_4/H_2 = 10 %
	B_2H_6/H_2 = 500 ppm
	PH_3/H_2 = 500 ppm



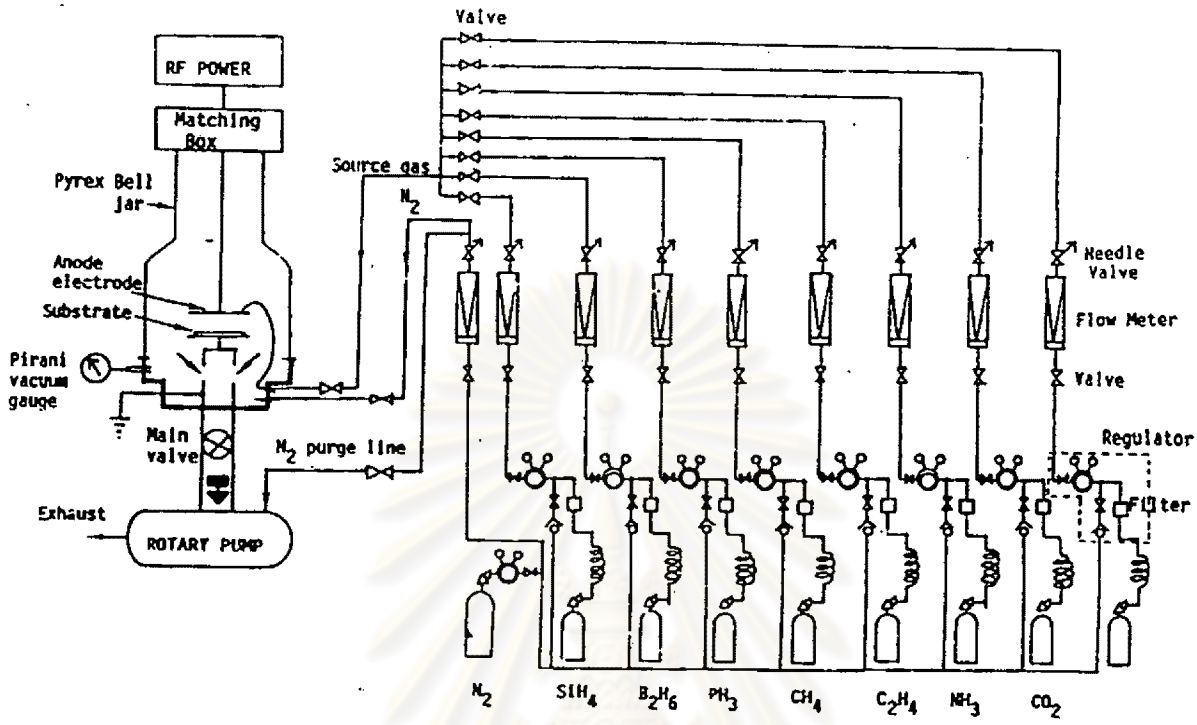
รูปที่ 2.1 แผนผังระบบ glow discharge plasma CVD ชุดที่ 1



รูปที่ 2.2 ครอบแก้วสุญญากาศสำหรับปลูก a-Si:H



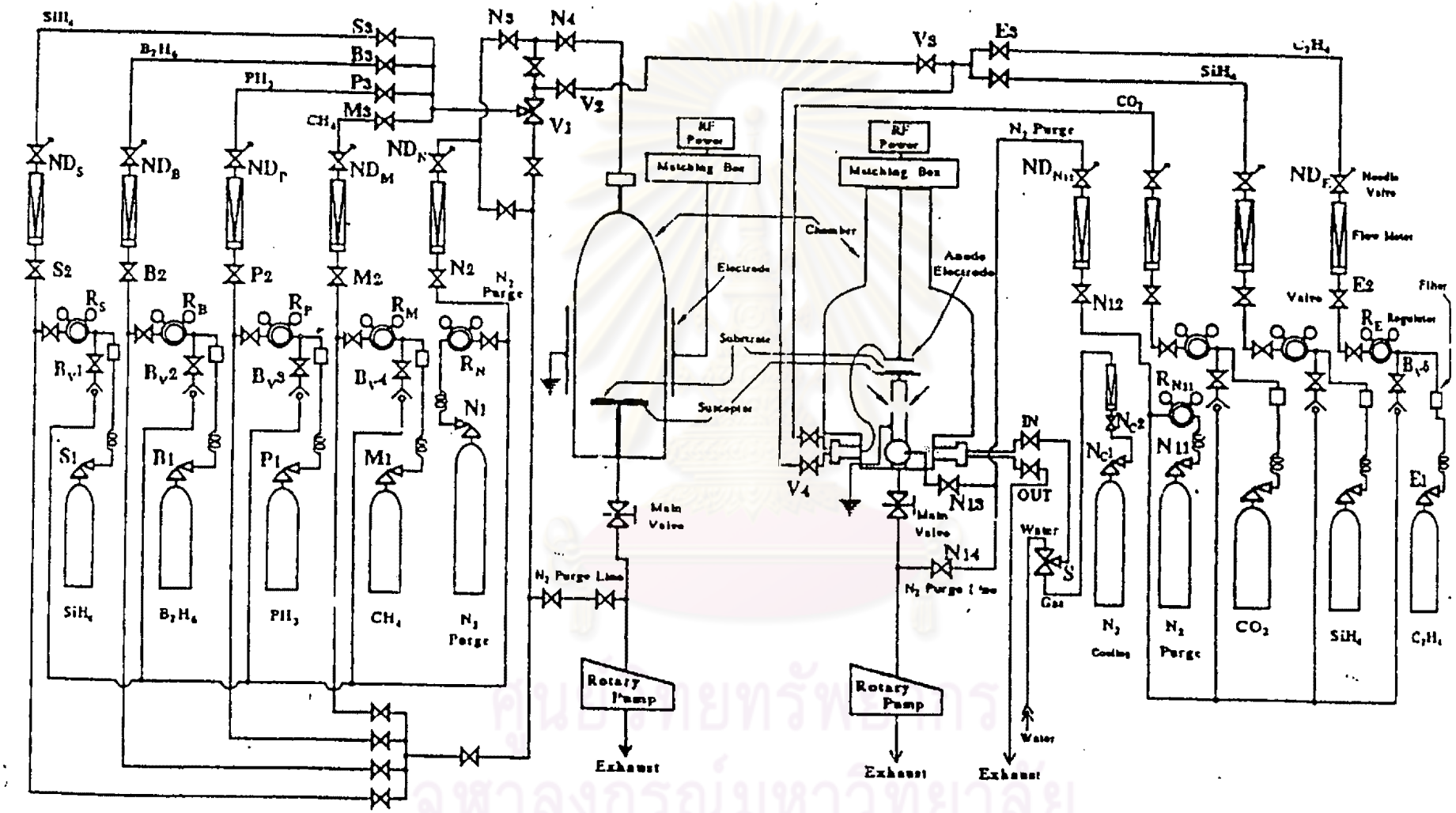
รูปที่ 2.3 ภาพถ่ายระบบ glow discharge plasma CVD ชุดที่ 1



รูปที่ 2.4 แผนผังระบบ glow discharge plasma CVD ชุดที่ 2

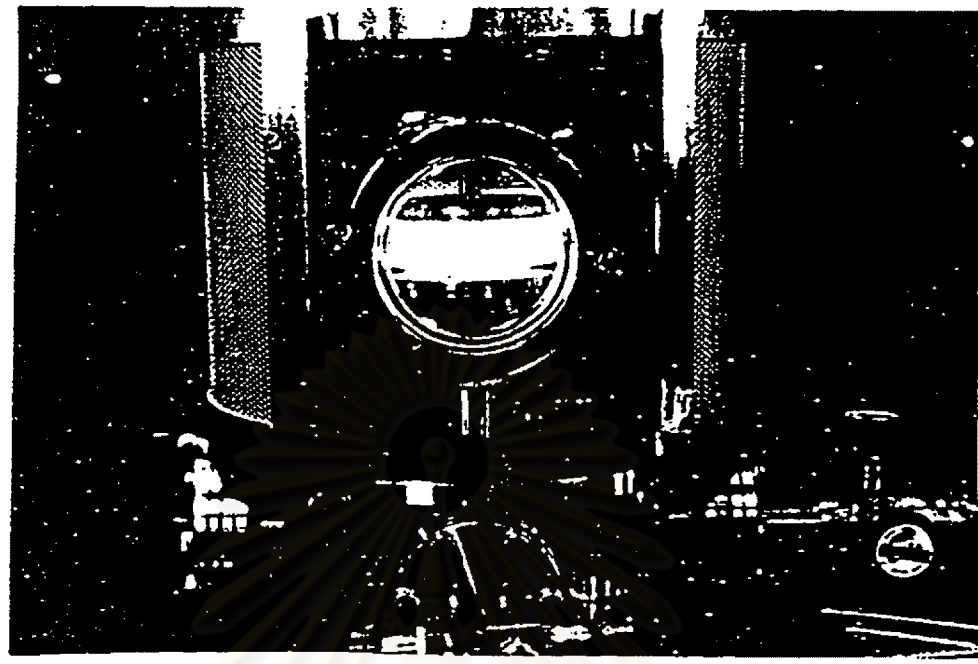
ตารางที่ 2.2 รายละเอียดของเครื่อง CVD ชุดที่ 2

ครอบแก้ว	เส้นผ่าศูนย์กลาง 22 cm วัสดุไพเร็กซ์
ซัสเซปเตอร์	เส้นผ่าศูนย์กลาง 10 cm ปรับอุณหภูมิช่วง RT- 400°C
ขั้วไฟฟ้า RF	ลักษณะจานกลมขนานกัน 2 แผ่น
ต้นกำเนิด RF	13.5 MHz กำลังเอาท์พุทสูงสุด 150 Watt
ความดัน	1~10 Torr



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของระบบ glow discharge plasma CVD สำหรับการปลูกฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอนอัลลอย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.6 ภาพถ่ายขณะปลูกฟิล์ม a-Si:H ด้วยระบบ glow discharge plasma CVD

ตารางที่ 2.3 เงื่อนไขการปลูกฟิล์มอะมอร์ฟัสซิลิคอนอัลลอย

การทำดิสชาร์จ	แบบคาปาซิเตอร์ ที่ความถี่ RF 13.56 MHz
อุณหภูมิแผ่นฐาน	100 - 300°C
กำลังไฟฟ้า RF	2 - 4 Watt
ความดันขณะปลูกฟิล์ม	1 Torr
ปริมาณการไหลรวมของก๊าซ	40 - 100 cc/min
ชนิดของก๊าซ	
a-Si:H	SiH_4
a-SiN:H	$SiH_4 + NH_4$
a-SiC:H	$SiH_4 + CH_4$ (หรือ C_2H_4)

เมื่อได้แผ่นฐานที่สะอาดแล้วนำไปวางในครอบแก้วแล้วทำให้เป็นสุญญากาศด้วยปั๊มสุญญากาศ จนกระทั่งความดันเหลือ 0.01 Torr จึงปล่อยกระแสไฟฟ้าเข้าฮีตเตอร์เพื่อให้ได้อุณหภูมิที่ต้องการ และใช้เวลาในการเพิ่มความร้อนประมาณครึ่งชั่วโมง

2. การปลูกฟิล์ม เมื่อได้อุณหภูมิแผ่นฐานตามต้องการแล้ว จึงเริ่มปล่อยก๊าซดิบต่าง ๆ ให้ไหลตามปริมาณที่กำหนดเข้าสู่ครอบแก้ว และควบคุมความดันภายในครอบแก้วให้คงที่ตามกำหนด (ปกติ 1 Torr) ด้วยวาล์วหลัก ต่อจากนั้นเริ่มเพิ่มกำลังไฟฟ้า RF จนก๊าซเกิดการดีสชาร์จ ซึ่งปกติใช้ประมาณ 2-4 Watt เริ่มจับเวลาการปลูกฟิล์ม และควบคุมเงื่อนไขต่าง ๆ ให้คงที่ ตารางที่ 2.3 แสดงเงื่อนไขการปลูกฟิล์มอะมอร์ฟัสซิลิคอนอัลลอย

3. การหยุดเครื่อง เมื่อปลูกฟิล์มได้ความหนาตามต้องการแล้ว ปิดกำลังไฟฟ้า RF แล้วจึงลดอุณหภูมิให้ถึงอุณหภูมิห้อง ปิดถังก๊าซ ส่วนก๊าซดิบที่เหลือในท่อสเตนเลสต้องระบายทิ้งให้หมด หลังจากนั้นล้างท่อสเตนเลสด้วยก๊าซไนโตรเจนประมาณ 5 นาที และเพิ่มความดันในครอบแก้วด้วยก๊าซไนโตรเจนจนถึงความดันบรรยากาศแล้วจึงนำชิ้นงานออกมา และทำความสะอาดภายในครอบแก้ว การหยุดปั๊มสุญญากาศทำโดยการปล่อยก๊าซไนโตรเจนเข้าสู่ปั๊ม

2.5 สรุป

ได้ศึกษาวิธีการปลูกฟิล์มบาง a-Si:H, a-SiN:H และ a-SiC:H ด้วยวิธี glow discharge plasma CVD ได้ฟิล์มที่มีความหนาสม่ำเสมอดีพอสมควร อัตราการเติบโตของฟิล์มประมาณ 0.5 ~ 2 Å/sec การปลูกฟิล์มที่มีความหนาที่ต้องการนั้น สามารถทำได้โดยการพิจารณาจากอัตราการเติบโตของฟิล์มและระยะเวลาในการปลูกฟิล์ม การกำหนดขนาดช่องว่างพลังงานของฟิล์มสามารถทำได้โดยการเปลี่ยนอัตราส่วนผสมของก๊าซซึ่งจะกล่าวถึงในรายละเอียดในบทที่ 3

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย