



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัย

การวิจัยและพัฒนากลือบฟิล์มบางไททาเนียมไนไตรด์ด้วยวิธีสปัตเตอริงสำหรับอุตสาหกรรมเครื่องประดับ
Research and Development of Titanium Nitride Films by Sputtering Method for Decorative Industrial.

โดย

นายสุรสิงห์ ไชยคุณ และคณะ

กรกฎาคม 2544

รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัย

การวิจัยและพัฒนาการเคลือบฟิล์มบางไททาเนียมไนไตรด์ด้วยวิธีสปัตเตอริงสำหรับอุตสาหกรรมเครื่องประดับ

Research and Development of Titanium Nitride Films by Sputtering Method for Decorative Industrial.

โดย

นายสุรสิงห์	ไชยคุณ
นายนิรันดร์	วิฑิตอนันต์
นายสกุล	ศรีญาณลักษณ์
นายจักรพันธ์	ถาวรธิดา

ห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีสุญญากาศและฟิล์มบาง

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

มหาวิทยาลัยบูรพา

ชุดโครงการพัฒนาอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับ

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทสรุปผู้บริหาร

การปรับปรุงผิววัสดุให้มีความคงทน ทนทานและสวยงามนั้น ทำได้หลายวิธีและวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายคือ “การชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า (electroplating)” แต่วิธีนี้มีปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมมาก ทำให้มีการวิจัยและพัฒนาการเคลือบใหม่ขึ้นมาทดแทน คือ “การเคลือบในสุญญากาศ (vacuum deposition)” ซึ่งเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นภายในภาชนะสุญญากาศเท่านั้น จึงไม่ก่อให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้การเคลือบในสุญญากาศยังให้ผิวเคลือบที่มีคุณภาพสูงกว่าการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้าอีกด้วย ปัจจุบันได้มีการนำการเคลือบในสุญญากาศมาใช้งานอย่างกว้างขวาง

อุตสาหกรรมเครื่องประดับและอัญมณีเป็นอุตสาหกรรมสำคัญอย่างหนึ่งของประเทศไทยที่มีการเคลือบเป็นขั้นตอนหนึ่งของกระบวนการผลิต โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเคลือบเพื่อความสวยงาม แต่จากปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากกระบวนการเคลือบเดิม ทำให้ผู้ประกอบการในประเทศไทยต้องหาวิธีการเคลือบใหม่ขึ้นมาทดแทน ปัจจุบันได้มีผู้ประกอบการหลายรายได้มีการนำเทคโนโลยีการเคลือบในสุญญากาศมาใช้แล้ว ซึ่งแต่ส่วนใหญ่มักจะเป็นการนำเข้าเครื่องเคลือบในสุญญากาศที่มีราคาสูงจากต่างประเทศทั้งสิ้น

ในส่วนของผิวเคลือบ (ฟิล์มบาง) ที่ผู้ประกอบการอุตสาหกรรมเครื่องประดับและอัญมณีให้ความสนใจ ได้แก่ ฟิล์มบางไททาเนียมไนไตรด์ เนื่องจากเป็นเซรามิกที่มีความเสถียรทางเคมีสูง ทนอุณหภูมิสูง มีสัมประสิทธิ์ความเสียดทานผิวต่ำ มีความแข็งสูง และที่สำคัญมีสีทอง ซึ่งถ้าหากนำไปเคลือบบนเครื่องประดับก็จะทำให้เครื่องประดับมีความสวยงามที่คงทน ไม่เกิดรอยขีดข่วนได้ง่าย

จากการสำรวจในเบื้องต้นของคณะผู้วิจัยพบว่า การศึกษา วิจัยและพัฒนา เกี่ยวกับเทคโนโลยีการเคลือบในสุญญากาศของประเทศไทยยังมีน้อยมาก ประกอบกับคณะผู้วิจัยได้เล็งเห็นความสำคัญของเทคโนโลยีนี้ที่มีต่อการพัฒนาประเทศ จึงเริ่มทำการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีนี้โดยมีเป้าหมายหลักที่จะพัฒนาเทคโนโลยีการเคลือบในสุญญากาศนี้ขึ้นใช้เองภายในประเทศเพื่อทดแทนการนำเข้าจนสามารถพัฒนาเครื่องเคลือบในสุญญากาศระดับวิจัยขึ้นใช้เองได้เป็นผลสำเร็จ

ต่อมาคณะผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะนำเทคโนโลยีที่ได้ศึกษามาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม จึงได้เสนอโครงการ “การวิจัยและพัฒนาการเคลือบฟิล์มบางไททาเนียมไนไตรด์ด้วยวิธีสปัตเตอริงสำหรับอุตสาหกรรมเครื่องประดับ” ต่อสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) (ฝ่าย 5) โดยมี บริษัท บางกอก แอสเสย์ ออฟฟิส จำกัด เป็นผู้ร่วมให้ทุนวิจัย ตามสัญญาเลขที่ RDG5/0004/2543 ซึ่งมีระยะเวลาดำเนินงาน 18 เดือน งบประมาณ 4,118,000 บาท แบ่งเป็นส่วนที่ขอรับการสนับสนุนจาก สกว. จำนวน 2,918,000 บาท (70.86%) และสมทบจาก บริษัท บางกอกแอสเสย์ ออฟฟิส จำกัด จำนวน 1,200,000 บาท (29.14%) วัตถุประสงค์หลักของโครงการคือ เพื่อสร้างต้นแบบเครื่องเคลือบฟิล์มบางไททาเนียมไนไตรด์ด้วยวิธีสปัตเตอริง และศึกษาการเคลือบและสมบัติของฟิล์มบางที่ได้

จากการศึกษา คณะผู้วิจัยสามารถสร้างต้นแบบเครื่องเคลือบฟิล์มบางไททาเนียมไนไตรด์ ด้วยวิธีสปีดเทอริง ตลอดจนศึกษาเทคนิคการเคลือบและสมบัติของฟิล์มบาง ตามวัตถุประสงค์ ซึ่งมี ผลการศึกษาโดยสรุปดังนี้คือ

1. ต้นแบบเครื่องเคลือบที่สร้างขึ้นในโครงการนี้ใช้วัสดุส่วนใหญ่ที่มีในประเทศเป็นหลัก ซึ่งมีส่วนประกอบสำคัญ 7 ส่วน คือ (1) ภาชนะสุญญากาศ (2) ระบบเครื่องสูบลสุญญากาศ (3) คาโทด/ เป้าสารเคลือบ (4) ระบบน้ำหล่อเย็น (5) ระบบจ่ายไฟฟ้า (6) ระบบป้อนแก๊ส และ (7) ชุดควบคุมการทำงานของเครื่องเคลือบ โดยภาชนะสุญญากาศทำจากเหล็กกล้าสเตนเลส ทรงกระบอก มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 30.0 cm สูง 31.0 cm (ปริมาตรประมาณ 22.0 ลิตร) ระบบเครื่องสูบลสุญญากาศประกอบด้วยเครื่องแบบแพร้อและเครื่องสูบลโรตารี คาโทดของเครื่องเคลือบสามารถติดตั้งได้ 2 ชุด เป็นแบบอับบาลานซ์ แมกนีตรอน มีพื้นที่เป้าสารเคลือบแบบแผ่นกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 7.6 cm ติดตั้งแม่เหล็กชนิด NdFeB ไว้ด้านหลังเป้าสารเคลือบ มีความเข้มข้นแม่เหล็กบริเวณผิวเป้าสารเคลือบที่ขอบและกลางคาโทดประมาณ 1,000 gauss และ 490 gauss ตามลำดับ ระบบน้ำหล่อเย็นใช้สำหรับหล่อเย็นคาโทด เป้าสารเคลือบและเพ็ดควาล์วของเครื่องสูบลแพร้อ ระบบจ่ายไฟฟ้าเป็นระบบแปลงไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูง แบบฟูลเวฟ ขนาดอินพุต 220 V เอาท์พุทไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 1-3 A มีความต่างศักย์ในช่วง 0-1,000 V มีชุดควบคุมการไหลแก๊สอย่างละเอียดสำหรับป้อนแก๊ส ชุดควบคุมการทำงานของเครื่องเคลือบเป็นระบบนิวเมติกส์ทั้งหมด เครื่องเคลือบต้นแบบที่สร้างขึ้นสามารถลดความดันภายในภาชนะสุญญากาศได้ต่ำสุด 8.0×10^{-6} mbar ในเวลา 60 นาที และสามารถเคลือบฟิล์มโลหะชนิดต่างๆ ได้ตามวัตถุประสงค์

2. การเคลือบฟิล์มบางไททาเนียมไนไตรด์ในโครงการนี้ใช้วิธี รีแอคทีฟ สปีดเทอริง ใช้ไททาเนียมเป็นเป้าสารเคลือบ มีแก๊สอาร์กอนเป็นสปีดเตอร์แก๊สและแก๊สไนโตรเจนเป็นรีแอคทีฟแก๊ส เครื่องเคลือบต้นแบบที่สร้างขึ้นในโครงการสามารถเคลือบฟิล์มไททาเนียมไนไตรด์ที่มีสัทของสวองามบนวัสดุรองรับชนิดต่างๆ ได้ตามวัตถุประสงค์ ทั้งนี้พบเฟสของฟิล์มบางไททาเนียมไนไตรด์ 2 เฟส คือ TiN(111) ที่มุม $2\theta \approx 36.71^\circ$ และ TiN(200) ที่มุม $2\theta \approx 42.65^\circ$ และมีความแข็งประมาณ 3.23-5.27 GPa โดยในส่วนของการยึดติดของฟิล์มบางไททาเนียมไนไตรด์บนวัสดุรองรับชนิดต่างๆ จะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของวัสดุรองรับก่อนเคลือบ เมื่ออุณหภูมิของวัสดุรองรับสูงขึ้น การยึดติดของฟิล์มบางที่เคลือบได้จะมีการยึดติดดีขึ้น

Executive Summary

Surface improvement techniques have various methods. Many industries use electroplating technique to deposit thin film onto the surface in aqueous solution that has toxic problems in the environments. From this problems the research of the new technology is occurred.

The researchers are interested in vacuum deposition technologies especially, sputter deposition technique. Because this process is non-toxic process that produces higher quality of thin film than one obtains from the electroplating technique. Nowadays, this technique is widely used in many industries around the world.

Gem and jewelry industries are one of the most important industries of Thailand that use the surface improvement processes in their line of production for decorative products. All of them use the electroplating technique that has the environmental problems then they are searching for the new technology to solve these problems. Some of them import vacuum coating technologies from foreign countries that have expensive costs.

The jewelers are interested in thin film of titanium nitride. Because it has high chemical stability, high temperature stability, low surface friction, high hardness, non tarnishing and gold color film. If we coat this film onto the jewelry we obtain all advantage properties on the surface of this jewelry.

From our first investigation we find that the research and development on the vacuum technology of coating in Thailand is at least. And our vision is focus on the important of this technology for the development of our country. We have done the research of this technology for the main point to reduce importing this technology from abroad. Now we success in the development of the research scale coating system from our own technologies.

The next concept of us is the application of this process from research scale develops to industrial scale we propose the research project “Research and Development of Titanium Nitride Films by Sputtering Method for Decorative Industrial” to the Thailand Research Fund (TRF) for the main funding. And we have co-funding from the Bangkok Assay Office limited (BAO). We have contract number RDG5/0004/2543 of the project for 18 months in 4,118,000 bahts (from the TRF 2,918,000 bahts (70.86%) and from the BAO 1,200,000 bahts (29.14%)). The main objective of this research is the prototype of the industrial scale coating system that can deposit titanium-nitride thin film by reactive sputtering technique and study in know-how and properties of the film that we obtain from this coating system.

The results of this research are the prototype of the industrial scale coating system and the know-how of this method and the properties of titanium-nitride film that can summarize below.

1. The prototype is made from material in Thailand that has 7 main parts are (1) vacuum vessel (2) vacuum pumping system (3) cathode and target system (4) water cooling system (5) DC power regulator system (6) gas flow controller system and (7) main controller coating system. The vacuum vessel is made from cylindrical stainless steel that has 30.0 cm in diameter and 31.0 cm in height (volume approximate 22.0 litres). The vacuum pumping system is an accessory to oil diffusion pump and rotary pump. In this system we can install 2 unbalanced magnetron sputtering cathode that has 7.6 cm diameter target. We enter NdFeB permanent magnets within the backing plate of the cathode. The magnetic field intensity is measured about 1000 gauss at the center of the target and 490 gauss at the edge of the target. The cooling system is cooled the cathode and vapor trap between plate valve and diffusion pump. The DC regulator is full-wave system that transforms 220 voltage input into 1-3 A 0-1000 volts output. The gas flow controller system can adjust the rate of flow of gas precisely. The main controller controls the process automatically by pneumatic system. The prototype can reduce the pressure within the vacuum vessel from atmosphere to 8.0×10^{-6} mibar in 60 minutes and can deposit all kinds of metal films.

2. In this research we deposit the titanium-nitride thin film by reactive magnetron sputtering method. We use pure solid titanium as a target, argon gas as sputter gas and nitrogen gas as reactive gas. From our system with suitable conditions we obtain gold color film onto various kinds of substrates. From X-ray diffractometer we find 2 phase of TiN that TiN(111) at diffraction angle 36.71° and TiN(200) at diffraction angle 42.65° . From nano-indenter we find the film nano-hardness at 3.23-5.27 GPa. And from the scratched proof experiments we find that the adhesion of the film to substrate depend on the substrate temperature as deposition. If we deposit at high substrate temperature the film is better adhesive than at low substrate temperature.

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยและพัฒนามีวัตถุประสงค์หลัก เพื่อสร้างต้นแบบเครื่องเคลือบฟิล์มบางไททาเนียมไนไตรด์ด้วยวิธี สปีดเทอริง ตลอดจนศึกษากระบวนการเคลือบและสมบัติของฟิล์มบางที่เคลือบได้ ผลการศึกษาแบ่งเป็น 2 ส่วนดังนี้คือ

ต้นแบบเครื่องเคลือบที่สร้างขึ้นมีส่วนประกอบสำคัญ 7 ส่วน คือ (1) ภาชนะสุญญากาศ (2) ระบบเครื่องสูบลำแสงสุญญากาศ (3) คาโทด/เป้าสารเคลือบ (4) ระบบน้ำหล่อเย็น (5) ระบบจ่ายไฟฟ้า (6) ระบบป้องกันแก๊ส และ (7) ชุดควบคุมการทำงานของเครื่องเคลือบ โดยภาชนะสุญญากาศ ทำจากเหล็กกล้าสเตนเลส ทรงกระบอก มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 30.0 cm สูง 31.0 cm (ปริมาตร 22.0 ลิตร) ระบบเครื่องสูบลำแสงสุญญากาศประกอบด้วยเครื่องแบบแฟรไอและเครื่องสูบลูกโรตารี คาโทดของเครื่องเคลือบติดตั้งได้ 2 ชุด เป็นแบบอานาลานซ์ แมกนีตรอน มีพื้นที่เป้าสารเคลือบแบบแผ่นกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 7.6 cm ติดตั้งแม่เหล็กชนิด NdFeB ไว้ด้านหลังเป้าสารเคลือบ มีความเข้มสนามแม่เหล็กบริเวณผิวเป้าสารเคลือบที่ขอบและกลางคาโทดประมาณ 1,000 gauss และ 490 gauss ตามลำดับ ระบบน้ำหล่อเย็นใช้สำหรับหล่อเย็นคาโทด เป้าสารเคลือบและเพลตวาล์วของเครื่องสูบลำแสงสุญญากาศ ระบบจ่ายไฟฟ้าเป็นระบบแปลงไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูง แบบฟูลเวฟ ขนาดอินพุต 220 V เอาท์พุทไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 1-3 A มีความต่างศักย์ในช่วง 0-1,000 V มีชุดควบคุมการไหลแก๊สอย่างละเอียดสำหรับป้องกันแก๊ส ชุดควบคุมการทำงานของเครื่องเป็นระบบนิวเมติกส์ทั้งหมด เครื่องเคลือบต้นแบบที่สร้างขึ้นสามารถลดความดันภายในภาชนะสุญญากาศได้ต่ำสุด 8.0×10^{-6} mbar ในเวลา 60 นาที และสามารถเคลือบฟิล์มบางโลหะชนิดต่างๆ ได้ตามวัตถุประสงค์

การเคลือบฟิล์มบางไททาเนียมไนไตรด์ในโครงการนี้ใช้วิธี รีแอคทีฟ สปีดเทอริง โดยใช้ไททาเนียมเป็นเป้าสารเคลือบ มีแก๊สอาร์กอนเป็นสปีดเตอร์แก๊สและแก๊สไนโตรเจนเป็นรีแอคทีฟแก๊ส เครื่องเคลือบต้นแบบที่สร้างขึ้นในโครงการสามารถเคลือบฟิล์มไททาเนียมไนไตรด์ที่มีสัณฐานของผลึกแบบต่างๆ ได้ด้วยวัตถุประสงค์ ทั้งนี้พบเฟสของฟิล์มบางไททาเนียมไนไตรด์ 2 เฟส คือ TiN(111) ที่มุม $2\theta \approx 36.71^\circ$ และ TiN(200) ที่มุม $2\theta \approx 42.65^\circ$ และมีความแข็งประมาณ 3.23-5.27 GPa โดยในส่วนของการยึดติดของฟิล์มบางไททาเนียมไนไตรด์บนวัสดุรองรับชนิดต่างๆ จะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของวัสดุรองรับก่อนเคลือบ เมื่ออุณหภูมิของวัสดุรองรับสูงขึ้น การยึดติดของฟิล์มบางที่เคลือบได้จะมีการยึดติดดีขึ้น

ABSTRACT

The main objective of this research is the prototype of the industrial scale coating system that can deposit titanium-nitride thin film by reactive sputtering technique and study in know-how and properties of the film that we obtain from this coating system. The results of this research are the prototype of the industrial scale coating system and the know-how of this method and the properties of titanium-nitride film that can summarize below.

The prototype is made from material in Thailand that has 7 main parts are (1) vacuum vessel (2) vacuum pumping system (3) cathode and target system (4) water cooling system (5) DC power regulator system (6) gas flow controller system and (7) main controller coating system. The vacuum vessel is made from cylindrical stainless steel that has 30.0 cm in diameter and 31.0 cm in height (volume approximate 22.0 litres). The vacuum pumping system is an accessory to oil diffusion pump and rotary pump. In this system we can install 2 unbalanced magnetron sputtering cathode that has 7.6 cm diameter target. We enter NdFeB permanent magnets within the backing plate of the cathode. The magnetic field intensity is measured about 1000 gauss at the center of the target and 490 gauss at the edge of the target. The cooling system is cooled the cathode and vapor trap between plate valve and diffusion pump. The DC regulator is full-wave system that transforms 220 voltage input into 1-3 A 0-1000 volts output. The gas flow controller system can adjust the rate of flow of gas precisely. The main controller controls the process automatically by pneumatic system. The prototype can reduce the pressure within the vacuum vessel from atmosphere to 8.0×10^{-6} mibar in 60 minutes and can deposit all kinds of metal films.

In this research we deposit the titanium-nitride thin film by reactive magnetron sputtering method. We use pure solid titanium as a target, argon gas as sputter gas and nitrogen gas as reactive gas. From our system with suitable conditions we obtain gold color film onto various kinds of substrates. From X-ray diffractometer we find 2 phase of TiN that TiN(111) at diffraction angle 36.71° and TiN(200) at diffraction angle 42.65° . From nano-indenter we find the film nano-hardness at 3.23-5.27 GPa. And from the scratched proof experiments we find that the adhesion of the film to substrate depend on the substrate temperature as deposition. If we deposit at high substrate temperature the film is better adhesive than at low substrate temperature.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการ “การวิจัยและพัฒนาการเคลือบฟิล์มบางไททาเนียมไนไตรด์ด้วยวิธีสปัตเตอริง สำหรับอุตสาหกรรมเครื่องประดับ : **Research and Development of Titanium Nitride Films by Sputtering Method for Decorative Industrial.**” เป็นโครงการวิจัยที่ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจาก ฝ่ายสนับสนุนการวิจัยในภาคอุตสาหกรรม (ฝ่าย 5) สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ตามสัญญาเลขที่ RDG5/0004/2543 ในชุดโครงการพัฒนาอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับ โดยมี บริษัท บางกอก แอสเสย์ ออฟฟิส จำกัด เป็นผู้ร่วมให้ทุนวิจัย มีระยะเวลาดำเนินงาน 18 เดือน และมีวัตถุประสงค์หลักคือ เพื่อสร้างต้นแบบเครื่องเคลือบฟิล์มไททาเนียมไนไตรด์ด้วยวิธี สปัตเตอริง ตลอดจนศึกษากระบวนการเคลือบฟิล์มบางและสมบัติของฟิล์มบางที่ได้

โครงการวิจัยและพัฒนานี้คงไม่สามารถดำเนินการจนสำเร็จได้ หากไม่ได้รับความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์หน่วยงานต่างๆ ซึ่งคณะผู้วิจัยขอขอบคุณทุกท่านไว้ ณ ที่นี้ ได้แก่ รศ.ดร.นรินทร์ สิริกุลรัตน์ หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, อ.เอกชัย หุ่นนิวัฒน์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, รศ.อรุณีย์ อินทสร และ อ.มานิชญ์ เสงวัฒนะ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ สำหรับการให้ความอนุเคราะห์วิเคราะห์ฟิล์มบางด้วยเทคนิค XRD และ อ.สุรียา โชคสวัสดิ์ รองคณบดีฝ่ายวิจัยและบริการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี สำหรับการให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องวัดความแข็งระดับนาโน

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณผู้ทรงคุณวุฒิทั้ง 2 ท่าน คือ รศ.ดร.ณสรณ์ ผลโกล ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ และ ผศ.ดร.ประสงค์ ศรีเจริญชัย หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สละเวลาในการตรวจเยี่ยมและให้คำแนะนำที่มีประโยชน์ต่างๆ เกี่ยวกับการดำเนินโครงการแก่คณะผู้วิจัยตลอดโครงการ

โครงการนี้คงไม่สามารถเกิดขึ้นได้หากไม่ได้รับการสนับสนุนด้านทุนการวิจัย คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย และ คุณพิเชษฐ พะลานุกูล ประธานกรรมการบริหาร บริษัท บางกอก แอสเสย์ ออฟฟิส จำกัด ที่ร่วมให้ทุนสนับสนุนการวิจัยนี้แก่คณะผู้วิจัย จนสามารถทำงานได้ตามวัตถุประสงค์ของโครงการ พร้อมกันนี้คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ดร.จรูญ คำนวนดา (ผู้อำนวยการฝ่าย 5) และ รศ.ดร.ทวีป สิริรัชมี (ผู้ประสานงานโครงการ) สำหรับความช่วยเหลือในการประสานงานและคำแนะนำต่างๆ ท้ายที่สุดคณะผู้วิจัยขอขอบคุณ รศ.ดร.พิเชษฐ ถิรมสุวรรณ สำหรับการให้คำปรึกษา คำแนะนำด้านเทคนิคต่างๆ เกี่ยวกับเทคนิคการเคลือบ ตลอดจนคำแนะนำต่างๆ ที่เป็นประโยชน์แก่คณะผู้วิจัยตลอดมา

สารบัญ

	หน้า
บทสรุปผู้บริหาร	i
Executive Summary	ii
บทคัดย่อ	v
ABSTRACT	vi
กิตติกรรมประกาศ	vii
สารบัญ	viii
สารบัญตาราง	xii
สารบัญรูป	xiii
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	6
1.3 แนวทางและวิธีดำเนินงานโดยย่อ	6
1.4 ขอบเขตของโครงการ	8
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการ	8
บทที่ 2 ทฤษฎี	9
2.1 ระบบสุญญากาศ	9
2.1.1 ธรรมชาติของสุญญากาศ	9
2.1.2 หน่วยวัดความดัน	11
2.1.3 ระยะปลอดการชน (Mean Free Path)	12
2.1.4 ส่วนประกอบของระบบสุญญากาศ	12
2.1.5 ปริมาณของแก๊สและแรงขับ	14
2.1.6 การวัดความดันในระบบสุญญากาศ	15
2.2 เทคโนโลยีฟิล์มบาง	16
2.2.1 กระบวนการเคลือบฟิล์มบาง	16
2.2.2 การก่อเกิดฟิล์มบาง	17
2.2.3 ประเภทของการเคลือบฟิล์มบางในสุญญากาศ	18
2.2.4 การเคลือบฟิล์มบางด้วยกระบวนการทางฟิสิกส์	19

	หน้า
2.3 การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปีดเตอริง	20
2.3.1 แนวคิดเบื้องต้นเกี่ยวกับสปีดเตอริง	20
2.3.2 โกลว์ดิสชาร์จ	27
2.3.3 ระบบเคลือบแบบ ดีซี สปีดเตอริง	32
2.3.4 ระบบเคลือบแบบ ดีซี แมกนีตรอน สปีดเตอริง	34
2.3.5 ระบบเคลือบแบบ อันบาลานซ์ แมกนีตรอน สปีดเตอริง	38
2.4 อุปกรณ์ในระบบ แมกนีตรอน สปีดเตอริง	40
2.4.1 คาโทดและเป้าสารเคลือบ	40
2.4.2 ที่วางชิ้นงาน	43
2.4.3 ระบบสุญญากาศ (vacuum system)	45
2.4.4 แหล่งกำเนิดไฟฟ้า (power supply)	46
2.4.5 ระบบป้อนแก๊ส	47
2.5 ลักษณะเฉพาะตัวของระบบสปีดเตอริง	48
2.5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส ความต่างศักย์ดิสชาร์จและความดัน	48
2.5.2 อัตราเคลือบและประสิทธิภาพการเคลือบ	49
2.5.3 ชีตจำกัดของอัตราเคลือบ	50
2.6 การเคลือบแบบ รีแอคทีฟ สปีดเตอริง (reactive sputtering method)	50
2.6.1 แนวคิดเกี่ยวกับการเคลือบด้วยวิธี รีแอคทีฟ สปีดเตอริง	50
2.6.2 ปัญหาที่พบบ่อยของการเคลือบด้วยวิธี รีแอคทีฟ สปีดเตอริง	52
2.6.3 การแก้ปัญหาของการเคลือบด้วยวิธี รีแอคทีฟ สปีดเตอริง	55
2.7 สมบัติ โครงสร้าง และการใช้งานของไททานเนียมไนไตรด์	60
2.7.1 สีและโครงสร้างสารประกอบของไททานเนียมไนไตรด์	60
2.7.2 ความต้านทานและโครงสร้างของไททานเนียมไนไตรด์	62
2.7.3 ความแข็งและทนต่อการสึกหรอของไททานเนียมไนไตรด์	62
2.7.4 สมบัติอื่นๆ ของไททานเนียมไนไตรด์และการประยุกต์ใช้งาน	63
2.8 การหาลักษณะเฉพาะของฟิล์มบาง	65
2.8.1 เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction)	66
2.8.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy)	68
2.8.3 เทคนิคการกดระดับนาโนเมตร (Nanoindentation Technique)	70

	หน้า
บทที่ 3 การออกแบบสร้างและทดสอบเครื่องเคลื่อน	73
3.1 เครื่องเคลื่อนฟิล์มบางที่สร้างขึ้นในช่วงแรก	73
3.2 การออกแบบและสร้างเครื่องเคลื่อน	75
3.2.1 ภาชนะสุญญากาศ	76
3.2.2 ระบบเครื่องสูบลำสุญญากาศ	79
3.2.3 คาโทดและเป้าสารเคลื่อน	81
3.2.4 ระบบน้ำหล่อเย็น	83
3.2.5 ระบบจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง	84
3.2.6 ระบบป้อนแก๊ส	85
3.2.7 ชุดควบคุมการทำงานของเครื่องเคลื่อน	86
3.3 การทดสอบระบบสุญญากาศของเครื่องเคลื่อน	89
3.3.1 ความดันต่ำสุดของเครื่องเคลื่อนเมื่อใช้เฉพาะเครื่องสูบลำกลโรตารี	90
3.3.2 ความดันต่ำสุดของเครื่องเคลื่อนเมื่อใช้เครื่องสูบลำแบบแฟรไอ	91
3.4 การทดสอบการเคลื่อนฟิล์มบาง	92
3.5 การทดสอบ แมกนีตรอน คาโทดของเครื่องเคลื่อน	94
3.5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์แมกนีตรอน คาโทด	94
3.5.2 การทดสอบหาระยะที่มีการกระจายตัวของสารเคลื่อนดีที่สุด	97
3.5.3 การทดสอบการกระจายตัวของสารเคลื่อน	100
3.5.4 การหาอัตราเคลื่อนของเครื่องเคลื่อน	102
บทที่ 4 การศึกษาการเคลื่อนฟิล์มบางไททาเนียมไนไตรด์	104
4.1 แนวคิดเกี่ยวกับการเคลื่อนฟิล์มบางไททาเนียมไนไตรด์	104
4.2 การทดลองการเคลื่อนฟิล์มบางไททาเนียมไนไตรด์นาร่อง	105
4.2.1 การศึกษาการเตรียมฟิล์มบางไททาเนียมไนไตรด์ 106	
4.2.2 การศึกษาความสัมพันธ์ของอัตราไหลของแก๊สไนโตรเจนต่อสีของฟิล์มบางไททาเนียมไนไตรด์	109
4.2.3 การทดลองเคลื่อนฟิล์มบางไททาเนียมไนไตรด์บนวัสดุรองรับชนิดต่างๆ	111
4.3 การศึกษาการเคลื่อนฟิล์มบางไททาเนียมไนไตรด์ด้วยเครื่องเคลื่อนดันแบบ	112
4.3.1 การศึกษาการเตรียมฟิล์มบางไททาเนียมไนไตรด์	113
4.3.2 การศึกษาสีของฟิล์มบางไททาเนียมไนไตรด์กับอัตราไหลของแก๊สไนโตรเจน	114

	หน้า
4.3.3 การทดลองเคลือบฟิล์มบางไททาเนียมไนไตรด์บนวัสดุรองรับชนิดต่างๆ	116
4.3.4 การทดลองเคลือบฟิล์มบางไททาเนียมไนไตรด์บนเครื่องประดับ	117
4.4 การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางไททาเนียมไนไตรด์	119
4.4.1 การศึกษาเฟสของฟิล์มบางไททาเนียมไนไตรด์	120
4.4.2 การศึกษาความแข็งระดับนาโนของฟิล์มบางไททาเนียมไนไตรด์	123
4.4.3 การศึกษาผลของอุณหภูมิวัสดุรองรับต่อการยึดติด ของฟิล์มบางไททาเนียมไนไตรด์	125
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	127
5.1 สรุปผลการศึกษา	127
5.1.1 การออกแบบและสร้างเครื่องเคลือบต้นแบบ	127
5.1.2 ผลการทดสอบเครื่องเคลือบต้นแบบ	128
5.1.3 แนวคิดเกี่ยวกับการเคลือบฟิล์มบางไททาเนียมไนไตรด์	129
5.1.4 การศึกษาการเคลือบฟิล์มบางไททาเนียมไนไตรด์	130
5.1.5 การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางไททาเนียมไนไตรด์	131
5.2 ข้อเสนอแนะ	131
5.2.1 ข้อเสนอแนะในส่วนเครื่องเคลือบฟิล์มบางต้นแบบ	131
5.2.2 ข้อเสนอแนะในส่วนการเคลือบฟิล์มบางไททาเนียมไนไตรด์	132
เอกสารอ้างอิง	133
ภาคผนวก	
ก. การสร้างภาวะสุญญากาศในภาชนะสุญญากาศ	138
ข. ขั้นตอนการเคลือบฟิล์มบาง	142
ค. รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของไททาเนียมไนไตรด์	145
ง. ประวัตินักวิจัย	148

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 องค์ประกอบของอากาศที่ระดับน้ำทะเล	10
2.2 การจำแนกองศาแห่งสูญญากาศ ตามความดันภายในระบบ	11
2.3 พลังงานจีเดเริ่มของเป่าสารเคลือบชนิดต่างๆ	23
2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นเมื่อใช้กำลังไฟฟ้าค่าต่างๆ ที่ความแตกต่างอุณหภูมิน้ำเข้าและน้ำออกของระบบหล่อเย็นไม่เกิน 10°C	41
2.5 เทคนิคสำหรับการวิเคราะห์ลักษณะทางโครงสร้างของฟิล์มบาง	66
3.1 ผลการเคลือบฟิล์มบางที่เคลือบได้จากเครื่องดันแบบ	93
3.2 ค่า k และ ค่า n ของเครื่องเคลือบที่ความดันต่างๆ	95
3.3 ความหนาของฟิล์มทองและไททาเนียมที่ตำแหน่งต่างๆ	101
4.1 สีของฟิล์มไททาเนียมในไดรด์ที่อัตราไหลของแก๊สอาร์กอน และแก๊สไนโตรเจนต่างกัน	108
4.2 สีของฟิล์มไททาเนียมในไดรด์ที่อัตราไหลของแก๊สไนโตรเจนต่างๆ	110
4.3 ผลการเคลือบฟิล์มบางไททาเนียมในไดรด์ที่อัตราไหลของแก๊สไนโตรเจนต่างกัน	114
4.4 สีของฟิล์มบางไททาเนียมในไดรด์ที่อัตราไหลของแก๊สไนโตรเจนต่างกัน	115
4.5 ความแข็งของฟิล์มบางไททาเนียมในไดรด์ที่เคลือบบนสแตนเลส	124
4.6 การยึดติดของฟิล์มบางไททาเนียมในไดรด์บนวัสดุรองรับชนิดต่างๆ ที่อุณหภูมิวัสดุรองรับต่างกัน	126

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การเคลื่อนที่ของโมเลกุลแก๊สในภาชนะปิด	10
2.2 ผังการทำงานของระบบสุญญากาศที่มีความดัน 10^{-3} - 10^{-7} mbar	13
2.3 การไหลของแก๊สในระบบสุญญากาศ	14
2.4 การก่อเกิดฟิล์มบาง	17
2.5 ประเภทของกระบวนการเคลือบฟิล์มบางในสุญญากาศ	19
2.6 อันตรกิริยาระหว่างไอออนและผิวเป้าสารเคลือบ	21
2.7 ยิลด์ของทองแดงที่ถูกชนด้วยไอออนจากแก๊สอาร์กอนที่พลังงานต่างๆ	23
2.8 การเปลี่ยนแปลงค่ายิลด์ของเป้าทองแดง (Cu) , เงิน (Ag) และแทนทาลัม (Ta) เมื่อใช้ไอออนพลังงาน 45 keV จากธาตุที่มีเลขอะตอมค่าต่างๆ	24
2.9 การเปลี่ยนแปลงของยิลด์เมื่อใช้ไอออนของปรอทพลังงาน 200 eV ชนเป้านิกเกิล (Ni), โมลิบดีนัม (Mo) , ทังสเตน (W) และทองคำขาว (Pt) ที่มุมการตกกระทบค่าต่างๆ (วัดเทียบกับแนวขนานตั้งฉากบนเป้า)	25
2.10 (a) การกระจายค่าพลังงานของอะตอมทองแดงที่ถูกสปีดเตอร์จากไอออนของแก๊ส Kr ที่พลังงานต่างๆ (b) เปรียบเทียบการกระจายค่าความเร็วของอะตอมทองแดงที่ได้จากการระเหยสารและการสปีดเตอร์ริง	26
2.11 (a) พลังงานเฉลี่ยของอะตอมสารเคลือบที่มีค่าเลขอะตอมต่างๆ เมื่อถูกชนด้วยไอออนของไอออนของ Kr พลังงาน 1200 eV ที่พลังงานต่างๆ (b) ความเร็วเฉลี่ยของอะตอมสารเคลือบที่มีค่าเลขอะตอมต่างๆ เมื่อถูกชนด้วยไอออน Kr พลังงาน 1200 eV	26
2.12 ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นกระแสและแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโตรดของกระบวนการเกิด ดีซี โกลว์ดิสชาร์จ ในหลอดสุญญากาศบรรจุแก๊สนีออน	28
2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าทะลายและผลคูณระหว่างความดัน (p) และระยะระหว่างอิเล็กโตรด (d)	29
2.14 โกลว์ดิสชาร์จ ของหลอดแก๊สนีออนยาว 50 cm ที่ความดัน 1.33 mbar	30
2.15 ระบบสปีดเตอร์ริงแบบ ดีซี สปีดเตอร์ริง	32
2.16 ผลของความดันในระบบที่มีผลต่ออัตราเคลือบ ค่ายิลด์และกระแสไฟฟ้าในระบบสปีดเตอร์ริงของนิกเกิลที่ใช้แรงดันไฟฟ้า 3,000 V ระหว่างขั้วอิเล็กโตรดที่วางห่างกัน 4.5 cm	33

รูปที่	หน้า
2.17 การเคลื่อนที่ของอนุภาคอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็ก	34
2.18 การเคลื่อนที่ของอนุภาคในสนามต่างๆ โดยที่ a , b , c เป็นการเคลื่อนที่ของอนุภาคประจุในสนามแม่เหล็กอย่างเดียว ส่วน d และ e เป็นการเคลื่อนที่ของอนุภาคประจุในสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า ร่วมกันในลักษณะต่างๆ	36
2.19 การจัดสนามแม่เหล็กและแนวการกักตร้อนของเป่าสารเคลือบ ในระบบพลาสมาแมกนีตรอน สปีดเตอริง	37
2.20 ลักษณะเส้นแรงแม่เหล็กของระบบอเนกบาลานซ์ แมกนีตรอน สปีดเตอริง	38
2.21 ลักษณะพลาสมาของระบบสปีดเตอริง (a) ระบบบาลานซ์แมกนีตรอน สปีดเตอริง (b) ระบบอเนกบาลานซ์แมกนีตรอน สปีดเตอริง	39
2.22 โครงสร้างอาโนดหรือที่วางชิ้นงาน ที่ควบคุมอุณหภูมิได้	44
2.23 (a) ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์ดิสชาร์จของพลาสมา แมกนีตรอนคาโทดรูบี่ที่เหลี่ยม ที่ความดันค่าต่างๆ (b) ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ดิสชาร์จ และความดันเมื่อกระแสคงที่	49
2.24 ระบบการเคลือบฟิล์มบางโดยวิธี รีแอคทีฟ สปีดเตอริง	50
2.25 เทคนิคการป้องกันแก๊สไปปฏิกิริยาเพื่อลดปัญหา target poisoning ในระบบการเคลือบโดยวิธี รีแอคทีฟ สปีดเตอริง	52
2.26 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จ และอัตราเคลือบที่ค่ากำลังไฟฟ้า และความดันแก๊สผสมคงที่ เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของรีแอคทีฟแก๊ส	53
2.27 ฮิสเตอร์ซิสของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราไหลของแก๊สไนโตรเจน และ ค่าความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจนในระบบ จากการทำรีแอคทีฟ สปีดเตอริง ของสารประกอบไนไตรด์ เมื่อค่าของกำลังไฟฟ้าและความดันรวมคงที่	54
2.28 กราฟฮิสเตอร์ซิสของการเคลือบสารประกอบของไททาเนียม (a) ขณะไม่มีการควบคุมความดันย่อยของรีแอคทีฟแก๊ส (b) ขณะที่มีการควบคุมความดันย่อยของรีแอคทีฟแก๊ส	56
2.29 ลักษณะแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบพัลส์สมมาตร	58
2.30 ลักษณะการทำงานของระบบเคลือบแบบ 2 คาโทด เมื่อต่อกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบพัลส์สมมาตร	58
2.31 ลักษณะแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบพัลส์สมมาตร	59

รูปที่	หน้า
2.32 ลักษณะการทำงานของระบบเมื่อต่อกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง แบบพัลส์อสมมาตร	59
2.33 อันตรกิริยาของอนุภาคกับวัสดุ	65
2.34 (a) เอกซ์เรย์ ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ (X-ray diffractometer) (b) Intensity peak ที่แสดงถึงระนาบผลึกของวัสดุในตำแหน่งที่มีการหักเหรังสี	67
2.35 เส้นทางการเคลื่อนที่ของลำอิเล็กตรอนบนผิวชิ้นงานในกล้อง SEM	69
2.36 กราฟของภาระที่เป็นฟังก์ชันของความลึกในการกด	71
2.37 ลักษณะทางกายภาพของการกดภายในฟิล์มบาง	72
3.1 เครื่องเคลื่อนที่สร้างเสร็จในช่วงแรก (ก่อนปรับปรุง)	74
3.2 เครื่องเคลื่อนที่สร้างเสร็จในตอนแรกขณะติดตั้งอุปกรณ์และทดสอบสุญญากาศ	74
3.3 ชุดควบคุมและภาคจ่ายไฟฟ้าแรงสูงของเครื่องเคลื่อนที่สร้างในตอนแรก	75
3.4 เครื่องเคลื่อนที่ทั้งระบบที่ออกแบบและสร้างขึ้นในโครงการนี้	75
3.5 ภาชนะสุญญากาศของเครื่องเคลื่อนที่	76
3.6 ภายในภาชนะสุญญากาศของเครื่องเคลื่อนที่	77
3.7 ด้านบนของแผ่นฐานของเครื่องเคลื่อนที่	77
3.8 ด้านล่างของแผ่นฐานของเครื่องเคลื่อนที่ ซึ่งมีชุดหมุนที่วางชิ้นงานสำหรับเคลื่อนที่	77
3.9 แผ่นวางชิ้นงานและที่จับชิ้นพร้อมแกนสำหรับหมุน	78
3.10 ชุดให้ความร้อนแบบอินฟราเรด	78
3.11 ชุดให้ความร้อนแบบอินฟราเรดเมื่อติดตั้งภายในภาชนะสุญญากาศ	78
3.12 เครื่องสูบบแบบแพร่ไอของระบบสุญญากาศของเครื่องเคลื่อนที่	79
3.13 เครื่องสูบกกลโรตารีของระบบสุญญากาศของเครื่องเคลื่อนที่	80
3.14 การติดตั้งเครื่องสูบบแบบแพร่ไอและเครื่องสูบกกลโรตารีของเครื่องเคลื่อนที่	80
3.15 วาล์วที่ออกแบบและสร้างขึ้นใช้เองในโครงการ (a) เฟลตวาล์วที่ต่อไปยังเครื่องสูบบแบบแพร่ไอของเครื่องเคลื่อนที่ (b) วาล์วปล่อยอากาศเข้าสู่ภาชนะสุญญากาศ	80
3.16 (a) ส่วนประกอบและชิ้นส่วนต่างๆ ของคาโทด (b) คาโทดที่ประกอบเรียบร้อยแล้ว	82
3.17 (a) การติดตั้งคาโทดเมื่อมองจากด้านในภาชนะสุญญากาศ (b) การติดตั้งคาโทดเมื่อมองจากด้านหลังเครื่องเคลื่อนที่	82
3.18 โกลด์ดีสซาร์จบริเวณหน้าคาโทด ขณะสปีดเตอริง	82
3.19 ระบบนำหล่อเย็นของเครื่องเคลื่อนที่	83

รูปที่	หน้า
3.20 ระบบจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงของเครื่องเคลือบ	84
3.21 หม้อแปลงไฟฟ้าของระบบจ่ายไฟฟ้าแรงสูงของเครื่องเคลือบ	84
3.22 ถังแก๊สและระบบป้อนแก๊สของเครื่องเคลือบ	85
3.23 ชุดควบคุมการปล่อยแก๊ส ชุดมาตรวัดความดันและวัดอุณหภูมิ	85
3.24 ชุดควบคุมระบบการทำงานของเครื่องเคลือบ	86
3.25 ชุดควบคุมการทำงานของระบบสุญญากาศของเครื่องเคลือบ	86
3.26 ชุดควบคุมการเคลือบของเครื่องเคลือบ	87
3.27 การติดตั้งชุดควบคุมการทำงานของเครื่องเคลือบ	87
3.28 การติดตั้งชุดควบคุมอุณหภูมิของเครื่องเคลือบ	87
3.29 ตัวอย่างอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นใช้เองในโครงการ	88
3.30 ขั้วไฟฟ้าสุญญากาศที่สร้างขึ้นใช้เองในโครงการ	88
3.31 ฟรีดรูปลักที่สร้างขึ้นใช้เองในโครงการ	88
3.32 แผนภาพของระบบสุญญากาศของเครื่องเคลือบ	89
3.33 ผลการทดสอบระบบสุญญากาศของเครื่องเคลือบเมื่อใช้เฉพาะเครื่องสูบลูกโรตารี	90
3.34 ผลการทดสอบความดันต่ำสุดของเครื่องเคลือบเมื่อใช้เครื่องสูบบแบบแพร่ไอ	92
3.35 ฟิล์มบางทองและฟิล์มบางไททานเนียมที่เคลือบได้	93
3.36 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์ ที่ความดันต่างๆ เมื่อใช้ทองแดงเป็นเป้าสารเคลือบ	96
3.37 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์ ที่ความดันต่างๆ เมื่อใช้ไททานเนียมเป็นเป้าสารเคลือบ	96
3.38 แผนภาพภาชนะสุญญากาศของเครื่องเคลือบและการวางวัสดุรองรับ	97
3.39 การวางกระจกปิดสไลด์เพื่อหาการกระจายตัวของสารเคลือบ	97
3.40 ลักษณะการกระจายตัวของสารเคลือบที่ระยะ ระหว่างเป้าสารเคลือบกับวัสดุรองรับต่างๆ	99
3.41 ลักษณะการกระจายตัวของสารเคลือบที่ตำแหน่งต่างๆ	101
3.42 การวางกระจกปิดสไลด์เพื่อทดลองหาอัตราเคลือบ	102
3.43 อัตราเคลือบของฟิล์มทองแดงและไททานเนียมที่ระยะ 10.0 cm จากเป้าสารเคลือบ	103
4.1 เครื่องเคลือบระดับวิจัยที่ใช้ในการศึกษานำร่อง	105
4.2 ฟิล์มไททานเนียมไนไตรด์ที่เคลือบได้	
(a) ฟิล์มที่เคลือบด้วยอัตราไหลของแก๊สอาร์กอนและไนโตรเจนต่างกัน	
(b) สีสันของฟิล์มที่เคลือบบนกระจกสไลด์ (แถวบนด้านหน้า/แถวล่างด้านหลัง)	108

รูปที่	หน้า
4.3 สีของฟิล์มบางไททานเนียมไนไตรด์ที่เคลือบด้วยอัตราไหล ของแก๊สไนโตรเจนต่างกัน	110
4.4 ผลการเคลือบฟิล์มบางไททานเนียมไนไตรด์บนวัสดุต่างๆ	111
4.5 เครื่องเคลือบต้นแบบที่ใช้ในการทดลองการเคลือบฟิล์มบาง	112
4.6 ฟิล์มบางไททานเนียมไนไตรด์ที่เคลือบด้วยอัตราไหลของแก๊สไนโตรเจนต่างกัน	114
4.7 ฟิล์มบางไททานเนียมไนไตรด์ที่เคลือบด้วยอัตราไหลของแก๊สไนโตรเจนต่างกัน	115
4.8 ผลการเคลือบฟิล์มบางไททานเนียมไนไตรด์บนวัสดุต่างๆ	116
4.9 ผลการเคลือบฟิล์มบางไททานเนียมไนไตรด์บนเครื่องประดับที่มีผิวเรียบ	117
4.10 ผลการเคลือบฟิล์มบางไททานเนียมไนไตรด์บนเครื่องประดับที่มีผิวโค้ง	118
4.11 ผลการเคลือบฟิล์มบางไททานเนียมไนไตรด์บนเครื่องประดับที่ผิวไม่เรียบ	118
4.12 ผลการเคลือบฟิล์มบางไททานเนียมไนไตรด์บนเครื่องประดับที่ผิวมีซอกมุม	118
4.13 เครื่องเคลือบต้นแบบที่ใช้ในการทดลองการเคลือบฟิล์มบาง	119
4.14 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางไททานเนียมไนไตรด์ ที่เคลือบบนกระจกใสได้ จากมหาวิทยาลัยเชียงใหม่	121
4.15 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางไททานเนียมไนไตรด์ ที่เคลือบบนกระจกใสได้ จากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	121
4.16 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางไททานเนียมไนไตรด์ ที่เคลือบบนกระจกใสได้ จากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร	122
4.17 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มไททานเนียมไนไตรด์ จากการศึกษาของ Volvada	122
4.18 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางไททานเนียมไนไตรด์ ที่เคลือบบนแผ่นอะลูมิเนียม	122
4.19 รอยกดของเครื่อง Nano Indenter บนฟิล์มบาง	124
4.20 การทดสอบการยึดติดของฟิล์มบางไททานเนียมไนไตรด์ที่อุณหภูมิวัสดุรองรับต่างกัน (a) ก่อนการทดสอบ (b) หลังการทดสอบ	126
ก.1 แผนภาพของระบบสุญญากาศของเครื่องเคลือบ	139
ค.1 Power diffraction standard card for stoichiometric titanium nitride (TiN)	146
ค.2 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของผงไททานเนียมไนไตรด์	147
ค.3 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มไททานเนียมไนไตรด์	147

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย

ปัจจุบันอุตสาหกรรมเครื่องประดับจัดเป็นอุตสาหกรรมส่งออกสำคัญอย่างหนึ่งของประเทศไทยซึ่งต้องใช้การชุบเคลือบผิวเป็นส่วนหนึ่งของขั้นตอนการผลิต และเมื่อพิจารณาในแง่ของสิ่งแวดล้อมพบว่าการชุบเคลือบที่ทำอยู่ในปัจจุบัน ส่วนใหญ่จะใช้วิธีชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า (electroplating) ซึ่งต้องใช้สารละลายเคมีในกระบวนการและมักจะมีสารละลายเคมีเหลือใช้จำนวนมากที่ยากต่อการกำจัดอีกทั้งยังก่อให้เกิดปัญหามลพิษต่อสิ่งแวดล้อมด้วย จึงอาจกล่าวได้ว่าสิ่งเหล่านี้เป็นข้อเสียอย่างหนึ่งของอุตสาหกรรมประเภทนี้ นอกจากนี้สำหรับประเด็นปัญหาสิ่งแวดล้อมซึ่งกำลังได้รับความสนใจอย่างมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งในต่างประเทศ ทำให้มีการกำหนดมาตรการป้องกันในหลายรูปแบบ เช่น การกำหนดมาตรฐานอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับสิ่งแวดล้อมโดยตรงเช่น ISO14000 นอกจากนี้บางประเทศในทวีปยุโรปมีการสั่งห้ามนำเข้าเครื่องประดับที่มีนิเกิล (nickel) เป็นชั้นรองพื้น (ซึ่งก็คือการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้านั่นเอง) จะเห็นได้ว่ามาตรการเหล่านี้ล้วนแต่มีผลกระทบโดยตรงต่ออุตสาหกรรมเครื่องประดับในประเทศไทยทั้งสิ้น ทำให้อุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการชุบเคลือบในประเทศไทยจำเป็นต้องหาวิธีการชุบเคลือบใหม่ที่ไม่ก่อให้เกิดมลพิษ สำหรับในต่างประเทศได้มีการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีการเคลือบใหม่เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวอย่างต่อเนื่องจนประสบความสำเร็จและสามารถนำมาใช้จริงเชิงอุตสาหกรรมแล้วคือ “การเคลือบในสุญญากาศ” เนื่องจากการเคลือบด้วยวิธีนี้จะทำภายในภาชนะสุญญากาศเท่านั้นจึงไม่ก่อให้เกิดปัญหามลพิษต่อสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ชั้นเคลือบ (หรือที่เรียกว่าฟิล์มบาง) ที่ได้ยังมีคุณภาพสูงกว่าการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้าอีกด้วย ดังนั้นการเคลือบในสุญญากาศจึงเป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับอุตสาหกรรมเครื่องประดับซึ่งจะสามารถแก้ไขปัญหาต่างๆ ของการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้าได้เป็นอย่างดี

ในส่วนของอุตสาหกรรมการเคลือบผิววัสดุในประเทศไทยนั้นพบว่ามีการมีมาตั้งแต่สมัยหลังสงครามโลกครั้งที่ 2 โดยขนาดของกิจการมีตั้งแต่อุตสาหกรรมในครัวเรือนไปจนถึงอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ ขนาดการลงทุนตั้งแต่หลักพันจนถึงหลักล้านบาท โดยเทคโนโลยีที่ใช้กันแพร่หลายภายในประเทศตั้งแต่ดั้งเดิมจนถึงปัจจุบันคือการชุบเคลือบในสารละลายด้วยไฟฟ้า จากการสำรวจเกี่ยวกับ อุตสาหกรรมชุบเคลือบผิวโลหะและพลาสติก ของกองแผนงานและพัฒนา สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมการลงทุน ในปี พ.ศ.2538^[1] พบว่าช่วงที่ผ่านมาเทคโนโลยีการชุบเคลือบในประเทศไทยมีการพัฒนาขึ้นมาก เนื่องจากการลงทุนของต่างประเทศซึ่งได้นำเทคนิคการชุบเคลือบใหม่ๆ เช่น

ระบบการเคลือบในสุญญากาศ เข้ามาใช้ในอุตสาหกรรมบางประเภท เช่น อุตสาหกรรมเคลือบเลนส์ แว่นตา เลนส์กล้องถ่ายรูป กระจก บรรจุภัณฑ์ เป็นต้น และจากการขยายตัวของอุตสาหกรรมโดยทั่วไป เช่น เครื่องใช้ไฟฟ้า อุตสาหกรรมรถยนต์ เครื่องจักรกล อุปกรณ์การก่อสร้าง และการส่งออกสินค้า เช่น ของเด็กเล่น อัญมณี ทำให้โรงงานรับจ้างชุบเคลือบต้นตัวลงทุนในเครื่องจักรและอุปกรณ์ราคาสูงขึ้น เช่น เริ่มนำเทคโนโลยีสุญญากาศมาใช้ แต่ยังไม่เป็นที่แพร่หลายนักเนื่องจากเครื่องจักรใหม่ส่วนใหญ่มีราคาแพง และเทคนิคการเคลือบในระบบสุญญากาศเป็นเรื่องใหม่สำหรับอุตสาหกรรมในประเทศ และที่สำคัญยังขาดแคลนบุคลากรและผู้มีความเชี่ยวชาญในเทคโนโลยีสุญญากาศ และการเคลือบในสุญญากาศ

นอกจากนี้ในรายงานฉบับดังกล่าว^[1] ยังได้อธิบายความเป็นไปได้ที่ระบบการเคลือบในสุญญากาศนั้นจะเข้ามาแทนที่ระบบการเคลือบเดิมเนื่องจากอุตสาหกรรมชุบเคลือบเดิมนั้นจะสัมพันธ์กับปัญหาสิ่งแวดล้อมอย่างมาก เนื่องจากของเสียจากกระบวนการชุบเคลือบที่ใช้กันในปัจจุบันส่วนใหญ่มีอันตรายสูงและมีปริมาณมากทำให้มีแนวโน้มที่จะมีการเปลี่ยนมาใช้เทคโนโลยีการเคลือบที่ก่อให้เกิดมลภาวะน้อยที่สุดมากขึ้น ซึ่งหมายความว่าในอนาคตอาจจะมีการนำระบบการเคลือบในสุญญากาศมาใช้แทนระบบการเคลือบเดิมเป็นการก้าวเข้าสู่ยุคอุตสาหกรรมใหม่มากขึ้นด้วย ซึ่งจะนำไปสู่การพัฒนาการเคลือบขั้นสูงต่อไป ตลอดจนเป็นที่ต้องการของการพัฒนาอุตสาหกรรมในประเทศได้แก่ การเคลือบฟิล์มบางชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ การเคลือบฟิล์มบางบนถุงพลาสติก การเคลือบกระจกเลเซอร์ การเคลือบกระจกที่ใช้เป็นส่วนประกอบของคอมพิวเตอร์ในทางการแพทย์ รวมถึงการเคลือบชิ้นส่วนอากาศยาน เป็นต้น ซึ่งในรายงานฉบับดังกล่าวยังได้เสนอแนะให้มีการเร่งพัฒนาความรู้เกี่ยวกับการเคลือบในสุญญากาศเพื่อรองรับความต้องการและการพัฒนาของประเทศในอนาคตต่อไป

ในส่วนของชั้นเคลือบที่ได้จากการเคลือบในระบบสุญญากาศนั้นจะบางมาก (อยู่ในระดับไมครอน) จึงเรียกชั้นเคลือบที่ได้นี้ว่า ฟิล์มบาง (thin film) ซึ่ง Bunshah (1994) ได้ให้ความหมายของฟิล์มบางว่า “ฟิล์มบาง หมายถึง ชั้นของอะตอมหรือกลุ่มของอะตอมที่จับรวมกันเป็นชั้นบางๆ” ทั้งนี้การที่จะระบุว่าฟิล์มใดเป็น “ฟิล์มบาง” อาจพิจารณาจากลักษณะการใช้งานว่าใช้สมบัติด้านใดของฟิล์มนั้น กล่าวคือถ้าเป็นการใช้ สมบัติเชิงผิว (surface properties) จะเรียกฟิล์มนั้นว่า “ฟิล์มบาง” แต่ถ้าเป็นการใช้ สมบัติเชิงปริมาตร (bulk properties) จะเรียกฟิล์มนั้นว่า “ฟิล์มหนา” จะเห็นว่าฟิล์มเดียวกันนั้นอาจเป็น “ฟิล์มบาง” หรือ “ฟิล์มหนา” ก็ได้ขึ้นกับลักษณะการใช้เป็นสำคัญ อย่างไรก็ตามการเคลือบฟิล์มบางนั้นมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อเปลี่ยนแปลง/ปรับปรุงสมบัติของวัสดุที่เคลือบให้ดีขึ้น เช่น ให้มีความคงทน ทนทาน หรือสวยงามมากขึ้น ฯลฯ โดยการเคลือบฟิล์มบางจะเป็นกระบวนการทำให้สารเคลือบตกเคลือบบนผิวของวัสดุที่ต้องการ เริ่มจากการสร้างสารเคลือบในรูปของอะตอม โมเลกุลหรืออนุภาค จากนั้นเป็นการเคลื่อนย้ายสารเคลือบมายังวัสดุรองรับ เมื่อสารเคลือบตกกระทบบนผิววัสดุรองรับก็เกิดการควบแน่นและพอกพูนเป็นชั้นของฟิล์มบางบนวัสดุรองรับในที่สุด^[2]

การเคลือบในสุญญากาศสามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มคือ การเคลือบแบบ Chemical Vapor Deposition : CVD ซึ่งอาศัยการแตกตัวของสารเคมีในสภาพแก๊สและเกิดปฏิกิริยาเคมีเป็นสารใหม่ตกเคลือบบนวัสดุรองรับ เช่น วิธี plasma CVD และ วิธี laser CVD เป็นต้น และการเคลือบแบบ Physical Vapor Deposition : PVD ซึ่งอาศัยการทำให้อะตอมของสารเคลือบหลุดออกจากผิวแล้วฟุ้งกระจายเข้าจับและยึดติดกับผิวของวัสดุรองรับ เช่น วิธีระเหยสาร และ วิธีสปัตเตอริง เป็นต้น อย่างไรก็ตาม การเคลือบในสุญญากาศที่น่าสนใจวิธีหนึ่งคือ การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปัตเตอริง เนื่องจากเป็นกระบวนการเคลือบที่มีประสิทธิภาพและฟิล์มที่ได้ก็มีคุณภาพดี การเคลือบด้วยวิธีสปัตเตอริงนี้จะเป็นจะเกิดขึ้นภายใต้ความดันต่ำประมาณ 10^{-3} - 10^{-1} mbar โดยอาศัยการคิสซาร์จไฟฟ้าของแก๊สทำให้แตกตัวเป็นไอออน จากนั้นไอออนเหล่านี้จะถูกเร่งให้วิ่งเข้าชนแผ่นเป้าสารเคลือบ (target) ซึ่งต่ออยู่กับขั้วลบของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงสูง ทั้งนี้อนุภาคของเป้าสารเคลือบที่ถูกชนด้วยไอออนของแก๊สจะหลุดออกมาและวิ่งด้วยความเร็วสูงเข้าชนและพอกพูน (deposition) เป็นชั้นของฟิล์มบางเคลือบบนวัสดุรองรับ (substrate) ในทุกทิศทาง และเนื่องจากพลังงานของอนุภาคสารเคลือบจากกระบวนการสปัตเตอริงนี้สูงมาก ดังนั้นเมื่อตกกระทบบนวัสดุรองรับก็จะมีการฝังตัวลงในเนื้อของวัสดุรองรับทำให้การยึดเกาะของฟิล์มที่ต้องการเคลือบดีมาก นอกจากนี้สารเคลือบ (เป้าสารเคลือบ) และวัสดุที่ต้องการเคลือบ (วัสดุรองรับ) ในระบบสปัตเตอริงอาจเป็นโลหะหรือโลหะก็ได้ สำหรับวงการอุตสาหกรรมมีการนำวิธีการเคลือบแบบสปัตเตอริงไปใช้ในกระบวนการผลิตอุปกรณ์ เครื่องมือและวัสดุต่างๆ โดยฟิล์มบางที่ใช้นั้นมีทั้งแบบชั้นเดียวหรือแบบหลายชั้น อาจเป็นฟิล์มของสารชนิดเดียว อัลลอยด์หรือสารประกอบ และอาจมีลักษณะหรือขนาดแตกต่างกันไป ส่วนสมบัติของฟิล์มบางแต่ละชนิดจะขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานเป็นสำคัญ^[3]

ปัจจุบันมีการนำฟิล์มบางมาประยุกต์ใช้งานหลายด้านเช่น^[4]

1. การเคลือบฟิล์มบางสำหรับอุปกรณ์ทางแสง เช่น การเคลือบกระจกจนทึบความร้อน โดยเคลือบสารที่สะท้อนรังสีความร้อนเป็นชั้นบางๆ และเนื่องจากวัสดุนี้บางมากจึงยังคงยอมให้แสงผ่านไปได้เช่น การเคลือบทองคำหรือไททาเนียมในไครด์บางๆ บนแผ่นกระจก ทำให้มีสมบัติสะท้อนรังสีความร้อนได้ หรือการเคลือบกระจกเพื่อลดการสะท้อนที่ผิวเพื่อให้ปริมาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ส่งผ่านมีค่าสูงสุด เช่น การเคลือบซิลิกอนมอนอกไซด์ลงบนผิวเคลือบบนเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นต้น
2. การเคลือบฟิล์มบางสำหรับอุปกรณ์ทางไฟฟ้า เช่น การเคลือบฟิล์มตัวต้านทาน ได้แก่ ฟิล์มของนิเกิล โครเมียม แทนทาลัม หรือไททาเนียมในไครด์ ซึ่งเป็นฟิล์มความต้านทานที่มีเสถียรภาพสูง หรือการเคลือบฟิล์มตัวเก็บประจุ ได้แก่การเคลือบสารไดอิเล็กตริกของแทนทาลัมออกไซด์ หรือแบเรียมไททาเนตซึ่งมีค่าไดอิเล็กตริกสูง ทำให้ตัวเก็บประจุมีขนาดเล็กและราคาถูก หรือการเคลือบฟิล์มแม่เหล็กซึ่งใช้ในอุปกรณ์บันทึกความจำ เช่น เทป หรือจานบันทึกข้อมูล หรือ การเคลือบผิวโฟโตคอนดักเตอร์ (photoconductor) เช่น วัสดุที่ใช้ตรวจวัดรังสีอินฟราเรดมักเคลือบผิวด้วยตะกั่วซัลไฟด์ ตะกั่วเทลลูไรด์ ตะกั่วเทลลูไรด์ เป็นต้น

3. การเคลือบฟิล์มบางสำหรับอุปกรณ์เครื่องจักรกล เช่น การเคลือบแข็งทนทานต่อการสึกหรอ อุปกรณ์บางชิ้นของเครื่องจักรกลที่มีอัตราการใช้พลังงานสูงและใช้งานที่อุณหภูมิสูง เช่น ใบพัดใบมีดกังหัน คอกสว่าน เมื่อนำมาเคลือบด้วยวัสดุที่มีความแข็งและทนต่ออุณหภูมิสูง เช่น โลหะไนไตรด์ โลหะคาร์ไบด์ หรือเซอโรโคเนียมออกไซด์ ก็จะสามารถยืดอายุการใช้งานได้ เช่น ไททาเนียมไนไตรด์ มีสมบัติแข็ง ทนอุณหภูมิสูง และมีสัมประสิทธิ์การเสียดทานต่ำจึงเหมาะกับการเคลือบแบบแข็ง มีดกังหัน คอกสว่าน เซอโรโคเนียมออกไซด์แข็งทนอุณหภูมิสูง ยึดเกาะกับเนื้อเหล็กได้ดีทุกช่วงอุณหภูมิ เป็นต้น

4. การเคลือบฟิล์มบางสำหรับอุปกรณ์ทางเคมี เช่น การเคลือบผิวอุปกรณ์ที่ใช้ในทะเล (marine equipment) การเคลือบผิวทนทานต่อการกัดกร่อนของสารเคมี (corrosion resistance coatings) หรือ การเคลือบผิวด้วยสารตัวเร่งปฏิกิริยา (catalytic coatings) เป็นต้น

5. การเคลือบฟิล์มบางสำหรับเครื่องประดับ เช่น การเคลือบไททาเนียมไนไตรด์ที่มีสีทองหรือไททาเนียมคาร์ไบด์ที่มีสีเงินลงบนสายและตัวเรือนนาฬิกา กรอบแว่นตา คัมพู สร้อย ซึ่งให้ทั้งความสวยงามและผิวที่แข็งทนทานต่อการขีดข่วน เป็นต้น

ฟิล์มบางที่เคลือบในสุญญากาศมีหลายชนิด ซึ่งมีสมบัติแตกต่างกันไป แต่มีฟิล์มชนิดหนึ่ง ที่ได้รับความสนใจมากทั้งในแง่ของการวิจัยและประยุกต์ใช้งาน คือ ฟิล์มบางของไททาเนียมไนไตรด์ เนื่องจากไททาเนียมไนไตรด์เป็นวัสดุเซรามิกที่มีสมบัติสำคัญหลายด้านเช่น มีความเสถียรทางเคมีสูง ทนอุณหภูมิสูง มีความแข็งสูง มีสัมประสิทธิ์การเสียดทานของผิวสัมผัสต่ำ สามารถนำไฟฟ้าได้และมีสีทอง ซึ่งสมบัติเหล่านี้เป็นที่น่าสนใจในการนำมาประยุกต์ใช้งานเชิงอุตสาหกรรม เช่น สมบัติด้านความแข็งอาจนำมาใช้เคลือบบนมีดกังหันและคอกสว่าน เพื่อลดการสึกหรอและอุณหภูมิของคอกสว่านทำให้สามารถยืดอายุการใช้งานได้หลายเท่าตัว ที่สำคัญฟิล์มบางไททาเนียมไนไตรด์มีสีทองสวยงามจึงอาจนำไปเคลือบบนเครื่องประดับ เช่น เข็มกลัด คัมพู สร้อย สายนาฬิกาและกรอบแว่นตา ฯลฯ ซึ่งทำเครื่องประดับเหล่านั้นมีความสวยที่คงทนไม่ทำให้เกิดรอยขีดข่วนง่าย

ปัจจุบันอุตสาหกรรมเครื่องประดับในประเทศไทยส่วนใหญ่ใช้วิธีการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า ซึ่งมีข้อเสียด้านปัญหาสีแวดล้อม ทำให้อุตสาหกรรมการชุบเคลือบเครื่องประดับในประเทศต้องหาวิธีการชุบเคลือบใหม่ที่ไม่ก่อให้เกิดมลพิษ ทั้งนี้จะเห็นว่าการเคลือบในสุญญากาศโดยเฉพาะอย่างยิ่งการเคลือบด้วยวิธีสปัตเตอริงนั้นเหมาะสมอย่างยิ่งที่จะเป็นการเคลือบใหม่สำหรับอุตสาหกรรมเครื่องประดับที่จะช่วยแก้ไขปัญหาต่างๆ ดังกล่าวข้างต้นได้เป็นอย่างดี เนื่องจากการเคลือบด้วยวิธีนี้เกิดขึ้นเฉพาะภายในภาชนะสุญญากาศเท่านั้นจึงไม่ก่อให้เกิดปัญหาสีแวดล้อม นอกจากนี้ชั้นเคลือบที่ได้ยังมีคุณภาพสูงกว่าวิธีการชุบเคลือบด้วยไฟฟ้าอีกด้วย ดังนั้นการเคลือบในสุญญากาศจึงเป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับอุตสาหกรรมเครื่องประดับซึ่งสามารถแก้ปัญหาข้างต้นได้เป็นอย่างดี และในส่วนของฟิล์มบางที่น่าสนใจสำหรับนำมาเคลือบชิ้นงานประเภทเครื่องประดับคือ ฟิล์มบางไททาเนียมไนไตรด์ ซึ่งมีสมบัติที่เหมาะสมหลายอย่าง เช่น มีสีทอง และมีความแข็งทนต่อการขีดข่วน จึงเหมาะสมอย่างยิ่งที่จะนำมาเคลือบเครื่องประดับ

ปัจจุบันพบว่ามิโรงงานอุตสาหกรรมในประเทศไทยหลายแห่งได้นำเทคโนโลยี
สูญญากาศเข้ามาใช้ในกระบวนการผลิตเป็นจำนวนมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเคลือบในสูญญากาศ
แต่ส่วนใหญ่เป็นการจัดซื้ออุปกรณ์และเครื่องมือสำเร็จรูปซึ่งมีราคาสูงมากเข้ามาทั้งหมดเพื่อเร่งการ
ผลิตเป็นสำคัญ (จากการสอบถามตัวแทนจำหน่ายเครื่องเคลือบชนิดนี้พบว่าส่วนใหญ่จะมีราคาสูง
มาก เช่น เครื่องเคลือบในสูญญากาศที่ใช้ในระดับวิจัยจะมีราคาทั้งระบบประมาณ 8 ล้านบาทต่อชุด
ส่วนเครื่องเคลือบที่ใช้ในระดับอุตสาหกรรมจะมีราคาทั้งระบบประมาณ 16 ล้านบาทต่อชุดขึ้นไป)
แต่เมื่อพิจารณาความพร้อมของประเทศไทยเกี่ยวกับเทคโนโลยีนี้ กลับพบว่ายังอยู่ในเกณฑ์ต่ำมาก
เนื่องจากการศึกษาวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีนี้ในประเทศไทยยังมีน้อย ดังนั้นเพื่อรองรับเทคโนโลยี
นี้ในอนาคตจึงจำเป็นต้องทำให้อย่างยิ่งที่ประเทศไทยต้องเร่งพัฒนาและเตรียมความพร้อมในทุกด้าน

คณะผู้วิจัยได้ตระหนักถึงความสำคัญของเทคโนโลยีนี้ ที่มีความสำคัญต่อการพัฒนา
ประเทศ จึงเริ่มศึกษาวิจัยและเตรียมความพร้อมทั้งด้านเทคโนโลยีสูญญากาศและเทคโนโลยีฟิล์มบาง
มาตั้งแต่ปี พ.ศ.2536 การดำเนินการในระยะแรก (ปีงบประมาณ 2536-2539) เป็นการเตรียมความ
พร้อมด้านต่างๆ (บุคลากร อุปกรณ์และเครื่องมือวิจัย) ต่อมาคณะผู้วิจัยได้เริ่มทำการศึกษาวิจัยเพื่อ
สร้างเครื่องเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปีดเทอริง ตลอดจนศึกษาถึงสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเคลือบ
ฟิล์มบางด้วยเครื่องเคลือบที่สร้างขึ้นจนเป็นที่สำเร็จ (งบประมาณแผ่นดิน ปีงบประมาณ 2540-2541)
และจากการดำเนินงานอย่างต่อเนื่องทำให้คณะผู้วิจัยสามารถพัฒนาหน่วยวิจัยที่ดำเนินการมาเป็น
“ห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีสูญญากาศและฟิล์มบาง” (ในปี พ.ศ.2541)

จากเหตุผลข้างต้นประกอบกับความพร้อมของคณะผู้วิจัยทุกด้าน ทั้งด้านบุคลากร
อุปกรณ์ เครื่องมือวิจัย ตลอดจนประสบการณ์ด้านเทคโนโลยีสูญญากาศและฟิล์มบาง ทำให้คณะผู้
วิจัยสนใจที่จะทำการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีนี้เพื่อประยุกต์ในอุตสาหกรรมเครื่องประดับ โดยมัน
ใจว่าสามารถนำผลการวิจัยที่ได้ศึกษามาพัฒนาต่อเพื่อใช้จริงเชิงอุตสาหกรรม จึงขอเสนอโครงการ
“การวิจัยและพัฒนาการเคลือบฟิล์มบางไททานเนียมในไตรด์ด้วยวิธีสปีดเทอริง สำหรับอุตสาหกรรม
เครื่องประดับ” เพื่อขอรับทุนอุดหนุนจาก สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (ฝ่าย 5) ซึ่งได้รับการ
อนุมัติให้ดำเนินโครงการเมื่อวันที่ 1 ธันวาคม พ.ศ.2542 โดยมีบริษัท บางกอก แอสเสย์ ออฟฟิส
จำกัด เป็นผู้ร่วมสนับสนุนทุนวิจัย สำหรับวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาต้นแบบเครื่องเคลือบฟิล์มบาง
ระบบสปีดเทอริงสำหรับเคลือบฟิล์มบางไททานเนียมในไตรด์บนเครื่องประดับ ศึกษาเทคนิคและ
กระบวนการเคลือบฟิล์มบาง ตลอดจนศึกษาสมบัติของฟิล์มบางที่เคลือบบนเครื่องประดับเพื่อ
ประยุกต์ใช้ในเชิงอุตสาหกรรมต่อไป ซึ่งนอกจากจะเป็นการช่วยลดการนำเข้าอุปกรณ์และเครื่องมือ
เหล่านี้จากต่างประเทศแล้ว ยังเป็นอีกโครงการหนึ่งที่เป็นจุดเริ่มต้นของการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยี
แบบพึ่งตนเองซึ่งทำให้เราเป็นเจ้าของเทคโนโลยีในที่สุด

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อออกแบบและสร้างต้นแบบเครื่องเคลือบฟิล์มบางด้วยระบบสปีดเทอริงสำหรับเคลือบฟิล์มบางไททานเนียมไนไตรด์บนเครื่องประดับ
2. เพื่อศึกษาเทคนิคและกระบวนการเคลือบฟิล์มบางไททานเนียมไนไตรด์บนเครื่องประดับ
3. เพื่อศึกษาสมบัติของฟิล์มบางไททานเนียมไนไตรด์ที่เคลือบบนเครื่องประดับ

1.3 แนวทางและวิธีดำเนินงานโดยย่อ

โครงการวิจัยและพัฒนานี้มีวัตถุประสงค์หลัก เพื่อพัฒนาต้นแบบเครื่องเคลือบฟิล์มบางระบบสปีดเทอริงสำหรับเคลือบฟิล์มบางไททานเนียมไนไตรด์บนเครื่องประดับ เพื่อศึกษาเทคนิคและกระบวนการเคลือบฟิล์มบางไททานเนียมไนไตรด์ เพื่อศึกษาสมบัติของฟิล์มบางที่เคลือบบนเครื่องประดับ เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในเชิงอุตสาหกรรม ซึ่งนอกจากจะเป็นการช่วยลดการนำเข้าอุปกรณ์และเครื่องมือเหล่านี้จากต่างประเทศแล้วยังเป็นจุดเริ่มต้นของการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีแบบพึ่งตนเองซึ่งจะทำให้เราเป็นเจ้าของเทคโนโลยีเองในที่สุด และเพื่อให้บรรลุตามวัตถุประสงค์หลักของโครงการ คณะผู้วิจัยได้แบ่งวิธีดำเนินงานเป็น 3 ส่วนใหญ่ คือ (1) การออกแบบและสร้างต้นแบบเครื่องเคลือบฟิล์มบางแบบสปีดเทอริง (2) การศึกษาเทคนิคและกระบวนการเคลือบฟิล์มบางไททานเนียมไนไตรด์ และ (3) การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางไททานเนียมไนไตรด์ที่ได้ มีแนวทางการดำเนินงานโดยย่อดังนี้

1. การออกแบบและสร้างต้นแบบเครื่องเคลือบฟิล์มบางแบบสปีดเทอริง ขั้นนี้จะเป็นการออกแบบระบบของเครื่องเคลือบ ซึ่งประกอบด้วย ระบบสุญญากาศ ระบบเคลือบ และระบบควบคุม เพื่อจัดหาวัสดุและอุปกรณ์ที่จะนำมาประกอบเป็นเครื่องเคลือบ โดยเน้นการออกแบบและสร้างขึ้นด้วยวัสดุที่มีในประเทศ ขั้นตอนนี้แบ่งเป็น

1.1 การสร้างต้นแบบเครื่องเคลือบตามที่กำหนดไว้ ประกอบด้วยระบบสุญญากาศ ระบบเคลือบ และระบบควบคุม

1.2 การทดสอบระบบสุญญากาศของเครื่อง เพื่อหาความดันต่ำสุดของเครื่องเคลือบ

1.3 การทดสอบการเคลือบฟิล์มบาง เพื่อทดสอบว่าเครื่องเคลือบทำงานได้หรือไม่

1.4 การทดสอบแมกนีตรอน คาโทดของเครื่องเคลือบ เพื่อหาข้อมูลต่างๆ ได้แก่ ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์ของคาโทด การทดสอบหาระยะที่มีการกระจายตัวของสารเคลือบดีที่สุด การทดสอบการกระจายตัวของสารเคลือบ

1.5 การหาอัตราเคลือบของเครื่องเคลือบ

2. การศึกษาการเคลือบฟิล์มบางไททาเนียมไนไตรด์นำร่อง เนื่องจากความยุ่งยากในการเคลือบด้วยวิธีรีแอคทีฟ สปีดเตอริง เพื่อให้ได้ฟิล์มบางไททาเนียมไนไตรด์ที่มีสีทอง คณะผู้วิจัยจึงได้ศึกษานำร่องบนเครื่องเคลือบระดับวิจัย (ขนาดเล็ก) เพื่อทำความเข้าใจกับปรากฏการณ์ต่างๆ ที่จะเกิดขึ้น ก่อนที่จะทำการทดลองจริงบนเครื่องต้นแบบที่สร้างขึ้นในโครงการนี้ ขั้นตอนนี้จะแบ่งเป็น

2.1 การศึกษาการเตรียมฟิล์มบางไททาเนียมไนไตรด์

2.2 การศึกษาความสัมพันธ์ของอัตราไหลของแก๊สไนโตรเจนต่อสีของฟิล์มบางไททาเนียมไนไตรด์

2.3 การทดลองเคลือบฟิล์มบางไททาเนียมไนไตรด์บนวัสดุรองรับชนิดต่างๆ

3. การศึกษาการเคลือบฟิล์มบางไททาเนียมไนไตรด์ด้วยเครื่องต้นแบบ จากการศึกษาถึงเทคนิค ขั้นตอน และกระบวนการต่างๆ ที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มบางไททาเนียมไนไตรด์จากการศึกษานำร่อง ทำให้คณะผู้วิจัยเข้าใจปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้น ตลอดจนเงื่อนไขและความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง เพื่อนำมาเป็นแนวทางในการทดลองด้วยเครื่องเคลือบต้นแบบที่สร้างขึ้น โดยขั้นตอนนี้จะแบ่งเป็น

3.1 การศึกษาการเตรียมฟิล์มบางไททาเนียมไนไตรด์

3.2 การศึกษาความสัมพันธ์ของอัตราไหลของแก๊สไนโตรเจนต่อสีของฟิล์มบางไททาเนียมไนไตรด์

3.3 การทดลองเคลือบฟิล์มบางไททาเนียมไนไตรด์บนวัสดุรองรับชนิดต่างๆ

3.4 การทดลองเคลือบฟิล์มบางไททาเนียมไนไตรด์บนเครื่องประดับ

4. การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางไททาเนียมไนไตรด์ ในส่วนนี้จะเป็นการทดสอบฟิล์มบางที่เคลือบได้ด้วยเทคนิค XRD เพื่อยืนยันว่าฟิล์มที่ได้เป็นฟิล์มของไททาเนียมไนไตรด์ วัดความแข็งของฟิล์มด้วยเทคนิค Nano-Indenter รวมถึงทดสอบการยึดติดของฟิล์ม

1.4 ขอบเขตของโครงการ

1. ออกแบบและสร้างต้นแบบเครื่องเคลือบฟิล์มไททาเนียมไนไตรด์ แบบดีซี แมกนิตอน สปีดเตอร์ริง ที่สามารถเคลือบฟิล์มบางบนวัสดุที่มีพื้นผิวเรียบได้
2. เครื่องเคลือบที่สร้างขึ้นสามารถเคลือบชิ้นงานได้ครั้งละไม่น้อยกว่า 10 ชิ้น
3. เครื่องเคลือบที่สร้างขึ้นสามารถเคลือบเครื่องประดับที่ทำจากวัสดุต่างๆ ได้ เช่น เข็ม กัดัก หัวเข็มขัด ต่างหู พวงกุญแจ
4. เครื่องเคลือบที่สร้างขึ้นสามารถทำความดันได้อยู่ในช่วงประมาณ 10^{-6} mbar และสามารถเคลือบได้ที่ความดันในช่วงประมาณ 10^{-3} mbar ได้
5. เครื่องเคลือบที่สร้างขึ้นในโครงการนี้จะเน้นการใช้วัสดุและอุปกรณ์ต่างๆ ที่มีอยู่ในประเทศเป็นหลัก

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการ

1. ได้ต้นแบบเครื่องเคลือบฟิล์มบางไททาเนียมไนไตรด์ด้วยวิธีสปีดเตอร์ริง สำหรับเคลือบเครื่องประดับ ซึ่งคณะผู้วิจัยเชื่อว่าผลการศึกษาวิจัยในครั้งนี้จะสามารถนำความรู้ที่ได้ไปประยุกต์ใช้จริงเชิงอุตสาหกรรมได้ เนื่องผลของการศึกษาวิจัยและพัฒนาอย่างต่อเนื่องของคณะผู้วิจัยเกี่ยวกับเทคโนโลยีนี้
2. ทำให้ทราบ know how ของการเคลือบฟิล์มบางไททาเนียมไนไตรด์ ด้วยวิธีสปีดเตอร์ริง บนเครื่องประดับด้วยตนเองอันเป็นจุดเริ่มของการพัฒนาอุตสาหกรรมภายในประเทศแบบพึ่งตนเอง
3. เป็นการทดแทนการนำเข้าเครื่องมือ อุปกรณ์และเทคโนโลยีเกี่ยวกับการเคลือบในสุญญากาศจากต่างประเทศ
4. เป็นการพัฒนาศักยภาพของประเทศให้เรียนรู้เทคโนโลยีการเคลือบใหม่ ซึ่งจะทำให้เกิดการถ่ายทอดความรู้และขยายวงในการพัฒนาศักยภาพเพื่อรองรับการนำเทคโนโลยีการเคลือบในสุญญากาศสู่อุตสาหกรรมภายในประเทศ
5. เนื่องจากการเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปีดเตอร์ริงนี้เป็นการเคลือบในสุญญากาศ ซึ่งเกิดขึ้นจำกัดภายในภาชนะสุญญากาศเท่านั้น ดังนั้นด้วยวิธีนี้จึงไม่ทำให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมทั้งด้านน้ำและอากาศ ซึ่งเหมาะสมที่จะนำเข้ามาแทนที่การชุบเคลือบด้วยไฟฟ้า (electroplating) ได้
6. ผลพลอยได้อย่างหนึ่งของการวิจัยและพัฒนาโครงการนี้คือ know how ต่างๆ เกี่ยวกับเทคโนโลยีสุญญากาศ เนื่องจากการศึกษาในโครงการนี้จำเป็นต้องอาศัยเทคโนโลยีสุญญากาศเป็นพื้นฐานในการดำเนินงาน

บทที่ 2

ทฤษฎี

บทนี้กล่าวถึงทฤษฎีและเอกสารที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยในโครงการนี้ซึ่งแบ่งเป็น 8 ส่วน (1) ระบบสุญญากาศ (2) เทคโนโลยีฟิล์มบาง (3) การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปีดเทอริง (4) อุปกรณ์ในระบบ ดี ซี แมกนีตรอน สปีดเทอริง (5) ลักษณะเฉพาะตัวของระบบสปีดเทอริง (6) การเคลือบแบบรีแอคทีฟ สปีดเทอริง (7) สมบัติ โครงสร้างและการใช้งานของไททานเนียมไนไตรด์ และ (8) การหาลักษณะเฉพาะของฟิล์มบาง ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.1 ระบบสุญญากาศ^{[5][6]}

“สุญญากาศ” หรือ “vacuum” เป็นคำในภาษากรีก หมายถึง “ที่ว่าง” ซึ่งในทางปฏิบัติแล้วถ้ามีภาชนะปิดอันหนึ่งแล้วสูบ อากาศ แก๊ส และไอของสารต่างๆ ในภาชนะนั้นออกก็จะเรียกสภาวะในภาชนะหลังการสูบว่า “สุญญากาศ” ทั้งนี้จะเห็นได้ว่าความเป็นสุญญากาศของภาชนะหนึ่งๆ นั้นจะมากน้อยเพียงใดนั้นขึ้นกับการสูบน้ำอากาศออกจากภาชนะนั้นว่าได้มากน้อยเพียงใด หากสูบน้ำอากาศออกจากภาชนะได้มากความเป็นสุญญากาศของภาชนะนั้นก็ยิ่งมาก แต่ในความเป็นจริงแล้วไม่มีระบบใดหรือภาชนะใดที่เป็นสุญญากาศได้อย่างสมบูรณ์ เพราะไม่มีเครื่องมือใดสามารถสูบน้ำอากาศ แก๊ส และไอชนิดอื่นๆ ออกจากระบบหรือภาชนะได้หมด

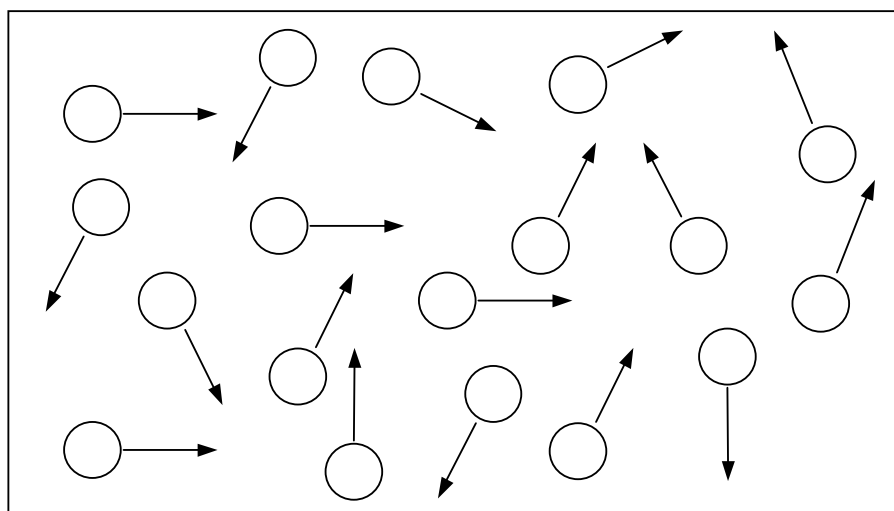
2.1.1 ธรรมชาติของสุญญากาศ

“แก๊ส” ในสุญญากาศจะหมายถึง แก๊สที่ไม่กลั่นตัว (noncondensable gases) และไอ (vapors) ทุกชนิด โดย “แก๊สที่ไม่กลั่นตัว” หมายถึง แก๊สที่ไม่สามารถที่จะกลั่นตัวเป็นของเหลวหรืออัดตัวเป็นของแข็งได้ภายใต้สภาวะปกติ เช่น อากาศแห้งและไอน้ำก็เป็นตัวอย่างที่ดีของไอที่มีอยู่ในอากาศโดยทั่วไป ทั้งนี้โดยปกติแล้วอากาศจะประกอบด้วยแก๊สหลายชนิดแต่จะมีแก๊สไนโตรเจนและแก๊สออกซิเจนเป็นองค์ประกอบสำคัญ (ตารางที่ 2.1) ทั้งนี้สำหรับแก๊สที่บรรจุอยู่ในภาชนะปิดนั้นจะมีความดันอยู่ค่าหนึ่งเสมอ โดยความดันนี้เกิดขึ้นเนื่องจากโมเลกุลเล็กๆ ซึ่งเป็นส่วนประกอบของแก๊สนั้นจะเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วในทุกทิศทุกทาง และอาจจะชนกันเอง หรือชนกับผนังของภาชนะแล้วสะท้อนกลับออกมา การชนผนังภาชนะของโมเลกุลของแก๊สเหล่านี้เองที่เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดความดันขึ้นที่ผนังภาชนะนั้น

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบของอากาศที่ระดับน้ำทะเล^[7]

ชนิดของแก๊ส	ปริมาตร (ร้อยละ)
ไนโตรเจน	78.08
ออกซิเจน	20.95
อาร์กอน	0.93
คาร์บอนไดออกไซด์	0.03
นีออน	0.0018
ฮีเลียม	0.0005
มีเทน	0.0002
คริปทอน	0.0001
ไฮโดรเจน	0.00005

ตัวอย่างการเคลื่อนที่ของโมเลกุลแก๊สในภาชนะปิด แสดงได้ดังรูปที่ 2.1 ซึ่งแต่ละโมเลกุลอาจจะมีอัตราเร็วต่างกันไป อย่างไรก็ตามเราสามารถพิจารณาได้ว่าโมเลกุลเหล่านี้เคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วเท่ากันเรียกอัตราเร็วนี้ว่า “อัตราเร็วเฉลี่ย” นอกจากนี้เมื่อพิจารณาโดยเฉลี่ยแล้วยังถือได้ว่าจำนวนโมเลกุลที่เคลื่อนที่ในแต่ละทิศทางเท่ากันอีกด้วย และเมื่อแก๊สในภาชนะได้รับความร้อนจากภายนอกอัตราเร็วเฉลี่ยนี้จะมีค่าสูงขึ้น ไม่ว่าจะเป็นอากาศ แก๊ส หรือไอของธาตุใดก็ตาม ระยะระหว่างโมเลกุลจะมีค่ามากกว่าเส้นผ่าศูนย์กลางของโมเลกุลมากๆ และถ้ามีการสูบเอาแก๊สนั้นออกไปจากภาชนะปิดระยะระหว่างโมเลกุลนี้ก็จะมีความมากขึ้น



รูปที่ 2.1 การเคลื่อนที่ของโมเลกุลแก๊สในภาชนะปิด^[8]

เนื่องจากโมเลกุลของแก๊สจะวิ่งด้วยอัตราเร็วสูงในทิศทางต่างๆ กัน ซึ่งนอกจากจะทำให้โมเลกุลชนกันเองแล้ว ยังทำให้โมเลกุลเหล่านี้ชนผนังภาชนะด้วย เมื่อโมเลกุลชนผนังภาชนะจะสะท้อนกลับ โมเลกุลแก๊สจะถ่ายเทโมเมนตัมให้แก่ผนังทำให้เกิดแรงกระทำต่อผนังภาชนะ แรงที่โมเลกุลแก๊สกระทำต่อพื้นที่ 1 ตารางหน่วย คือ ความดัน (pressure) ของแก๊สในภาชนะนั่นเอง ซึ่งความดันนี้เป็นปริมาณที่สำคัญมากในทางสุญญากาศ เมื่อมีการสูบเอาแก๊สออกจากภาชนะความดันก็จะลดลง เพราะจำนวน โมเลกุลที่ชนผนังภาชนะในหนึ่งหน่วยเวลาลดลง เมื่อมีการให้ความร้อนแก่แก๊สอุณหภูมิของแก๊สก็จะสูงขึ้น อันมีผลทำให้อัตราเร็วของโมเลกุลภายในมากขึ้นไปด้วยจำนวนครั้งที่โมเลกุลชนผนังภาชนะในหนึ่งหน่วยเวลาจึงเพิ่มขึ้น ลักษณะเช่นนี้ทำให้ความดันของแก๊สเพิ่มขึ้น

2.1.2 หน่วยวัดความดัน

หน่วยของความดัน เป็น หน่วยของ “แรง/พื้นที่” ในระบบ SI คือ N/m^2 หรือ Pa มีการกำหนดค่าความดันของอากาศที่ระดับน้ำทะเลเมื่ออุณหภูมิ 0°C เท่ากับ ความดัน 1 บรรยากาศ ซึ่งความดันนี้มีค่าประมาณ 105 N/m^2 ซึ่งความดันขนาดนี้สามารถดันปรอทให้ขึ้นไปตามท่อสุญญากาศได้สูง 760 mm และจากการที่ความดันอากาศสามารถดันให้ปรอทขึ้นไปตามท่อสุญญากาศได้เองจึงมีการประยุกต์ปรากฏการณ์นี้มาใช้เป็นหน่วยวัดความดันอีกหน่วยหนึ่ง โดยให้ความดัน 1 บรรยากาศ หรือ 105 N/m^2 มีค่าเท่ากับ 760 mm Hg

นอกจากหน่วยวัดดังกล่าวแล้วยังมีการใช้หน่วยอื่นๆ ในการวัดความดันอีก เช่น

หน่วย ทอร์ร (torr)	โดย 1 torr	เท่ากับ 1 mm Hg
หน่วย บาร์ (bar)	โดย 1 bar	เท่ากับ 750.06 mm Hg
หน่วย ไมครอน (micron)	โดย 1μ	เท่ากับ 10^{-3} torr

ในทางเทคนิคเกี่ยวกับสุญญากาศมักใช้หน่วย mm Hg หรือ torr หรือ bar ในการวัดความดัน มากกว่าหน่วย N/m^2 สำหรับปริมาณที่แสดงว่าระบบปิดหนึ่งๆ นั้นมีความเป็นสุญญากาศมากน้อยเพียงใดนั้นสามารถบอกได้ด้วยองศาแห่งสุญญากาศ ซึ่งสามารถจำแนกได้โดยการใช้ความดันภายในระบบนั้นๆ เป็นเกณฑ์

ตารางที่ 2.2 การจำแนกองศาแห่งสุญญากาศ ตามความดันภายในระบบ^[9]

องศาแห่งสุญญากาศ	ความดันภายในระบบ (mm Hg)
ต่ำ (low vacuum)	760 - 25
ปานกลาง (medium vacuum)	$25 - 10^{-3}$
สูง (high vacuum)	$10^{-3} - 10^{-6}$
สูงมาก (very high vacuum)	$10^{-6} - 10^{-9}$
สูงอย่างมาก (ultra high vacuum)	10^{-9} และน้อยกว่า

2.1.3 ระยะปลอดการชน (Mean Free Path)

โมเลกุลแก๊สในภาชนะมีการเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วสูงและอาจชนกันเองก่อนที่จะชนผนังภาชนะ ถ้าพิจารณาโมเลกุลเฉพาะตัวโมเลกุลหนึ่งให้เป็น โมเลกุล A ระยะทางที่โมเลกุล A เคลื่อนที่ได้หลังการชนกับ โมเลกุลอื่นแต่ละครั้งจะไม่เท่ากัน และเมื่อพิจารณาโมเลกุล B อีกตัวหนึ่งก็จะพบว่าระยะระหว่างการชนของ B ไม่เท่ากับของ A อย่างไรก็ตามเราสามารถหาค่าเฉลี่ยของระยะระหว่างการชนของแต่ละโมเลกุลของแก๊สได้ เรียกค่าเฉลี่ยนี้ว่า “ระยะปลอดการชน”

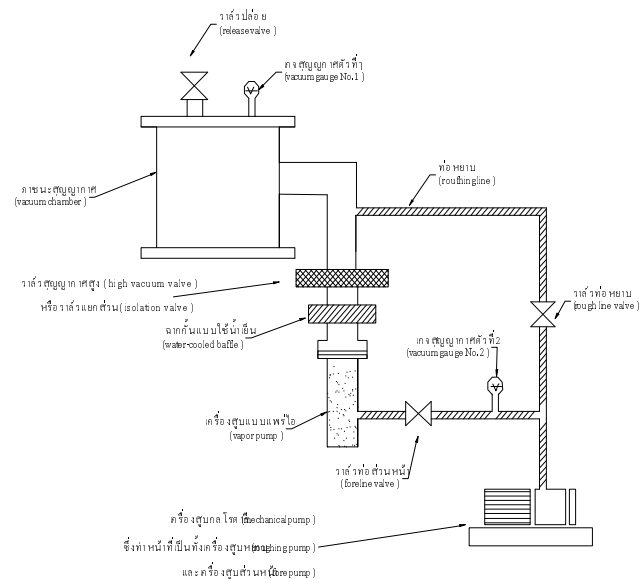
ค่าของระยะปลอดการชนขึ้นกับความดัน กล่าวคือแก๊สที่มีความดันมากจะมีระยะปลอดการชนสั้น เพราะที่อุณหภูมิหนึ่งๆ แก๊สที่มีความดันมากจะมีความหนาแน่นของโมเลกุลสูงกว่าแก๊สที่มีความดันต่ำ สำหรับระบบปิดอันหนึ่งๆ ถ้าความดันของแก๊สในระบบนั้นต่ำพอโมเลกุลของแก๊สก็จะสามารถเคลื่อนที่จากผนังด้านหนึ่งของภาชนะไปยังอีกด้านหนึ่งได้โดยไม่มีการชนกับโมเลกุลอื่น เรียกความดันในสถานะนี้ว่า ช่วงความดันของโมเลกุลอิสระ (free molecule pressure region) ซึ่งในสถานะนี้ระยะปลอดการชนจะมีค่ายาวมากเมื่อเทียบกับขนาดของภาชนะที่ใส่แก๊ส ในทางกลับกันก็มีช่วงของความดันที่ระยะปลอดการชนมีค่าน้อยกว่าขนาดของภาชนะมาก กรณีเช่นนี้เมื่อโมเลกุลหนึ่งเคลื่อนที่จากด้านหนึ่งของภาชนะไปยังอีกด้านหนึ่งโมเลกุลนั้นจะชนกับโมเลกุลอื่นหลายครั้ง หากแก๊สในสถานะนี้กำลังไหลอยู่ในท่อ การไหลจะมีลักษณะเหมือนการไหลของของเหลวที่มีความหนืดสูงจึงเรียกความดันในช่วงที่มีระยะปลอดการชนสั้นๆ นี้ว่า ช่วงหนืด (viscous region) อย่างไรก็ตามค่าของระยะปลอดการชนของแก๊สแต่ละชนิดไม่เท่ากัน โดยแก๊สที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่จะมีระยะปลอดการชนน้อยกว่าแก๊สที่มีโมเลกุลเล็กกว่า

2.1.4 ส่วนประกอบของระบบสุญญากาศ

ระบบสุญญากาศอาจมีลักษณะเฉพาะตัวแตกต่างกัน ขึ้นกับการออกแบบเพื่อให้สอดคล้องกับการใช้งาน แต่โดยพื้นฐานแล้วระบบสุญญากาศจะมีส่วนประกอบหลัก 4 ส่วนคือ ภาชนะสุญญากาศ ระบบเครื่องสูบลมสุญญากาศ ระบบท่อเชื่อมต่อและอุปกรณ์เพิ่มเติม เช่น วาล์ว (valve) ที่ดักไอ (trap) ฯลฯ ความจำเป็นและความต้องการอุปกรณ์เหล่านี้ขึ้นกับการออกแบบและการใช้งาน

ตัวของระบบสุญญากาศพิจารณาได้จากตัวอย่างต่อไปนี้ คือ ถ้าต้องการให้ภาชนะสุญญากาศมีความดันในช่วง 10^{-3} - 10^{-1} mbar ทำได้โดยต่อภาชนะสุญญากาศเข้ากับเครื่องสูบลมโรตารี (rotary mechanical pump) ก็เพียงพอ แต่ถ้าต้องการให้มีความดันต่ำขนาด 10^{-7} - 10^{-5} mbar ก็จำเป็นต้องใช้เครื่องสูบลมแบบแพร่ไอ (vapor pump) ร่วมกับเครื่องสูบลมโรตารี ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ที่แสดงผังการทำงานของระบบสุญญากาศที่ให้ความดันต่ำกว่า 10^{-5} mbar ท่อหยาบ (roughing line) ในระบบเป็นท่อที่ต่อเชื่อมระหว่างภาชนะสุญญากาศกับเครื่องสูบลมโดยตรง โดยก่อนที่จะใช้เครื่องสูบลมแพร่ไอต้องใช้เครื่องสูบลมลดความดันภายในภาชนะมีค่าประมาณ 10^{-3} mbar ก่อน ด้วยเหตุนี้จึงเรียกเครื่องสูบลมในระบบนี้ว่า เครื่องสูบลมหยาบ (roughing pump)

ขณะที่เครื่องสูบลมโรตารีทำงานต้องเปิดวาล์วท่อหยาบ (roughing line valve) พร้อมกับปิดวาล์วท่อส่วนหน้า (foreline valve) จนความดันในภาชนะสุญญากาศมีค่า $10^{-2} - 10^{-3}$ mbar ก่อนแล้วจึงทำการสูบลมอากาศที่เหลือด้วยเครื่องสูบบแบบแพร่ไอ โดยขณะนี้จะต้องปิดวาล์วท่อหยาบ พร้อมกับเปิดวาล์วท่อส่วนหน้าและวาล์วสุญญากาศสูง (high vacuum valve) ซึ่งวาล์วตัวหลังนี้สามารถแยกภาชนะสุญญากาศออกจากส่วนที่เหลือของระบบ บางครั้งเรียกวาล์วนี้ว่า วาล์วแยกส่วน (isolation valve) อากาศที่เครื่องสูบบแบบแพร่ไอสูบลมออกจากภาชนะจะไปรวมกันอยู่ที่ส่วนล่างของเครื่องสูบบแบบแพร่ไอนั้นเครื่องสูบลมโรตารีจะสูบลมอากาศส่วนนี้ออกสู่ภายนอกอีกต่อหนึ่ง และเรียกเครื่องสูบลมโรตารีที่ทำหน้าที่นี้ว่า เครื่องสูบลมส่วนหน้า (fore pump) เรียกท่อที่เชื่อมต่อระหว่างเครื่องสูบบแบบแพร่ไอกับเครื่องสูบลมส่วนหน้าว่า ท่อส่วนหน้า (fore line) เรียกวาล์วปิด-เปิดท่อส่วนหน้าว่า วาล์วท่อส่วนหน้า ระบบสุญญากาศบางระบบจะแยกเครื่องสูบลมโรตารีที่ทำหน้าที่เป็นเครื่องสูบลมส่วนหน้าและเครื่องสูบลมหยาบออกจากกัน แต่บางระบบก็ใช้เครื่องสูบลมเพียงตัวเดียวในการทำหน้าที่ทั้งสอง ระบบในรูปที่ 2.2 เป็นระบบที่ใช้เครื่องสูบลมโรตารีเพียงตัวเดียว วาล์วปล่อย (release valve) ในที่รูป 2.2 ทำหน้าที่ปล่อยอากาศเข้าสู่ภาชนะทำให้ความดันภายในภาชนะเท่ากับความดันบรรยากาศ โดยจะเปิดวาล์วปล่อยนี้เมื่อไม่ต้องการให้สภาพภายในภาชนะไม่เป็นสุญญากาศ



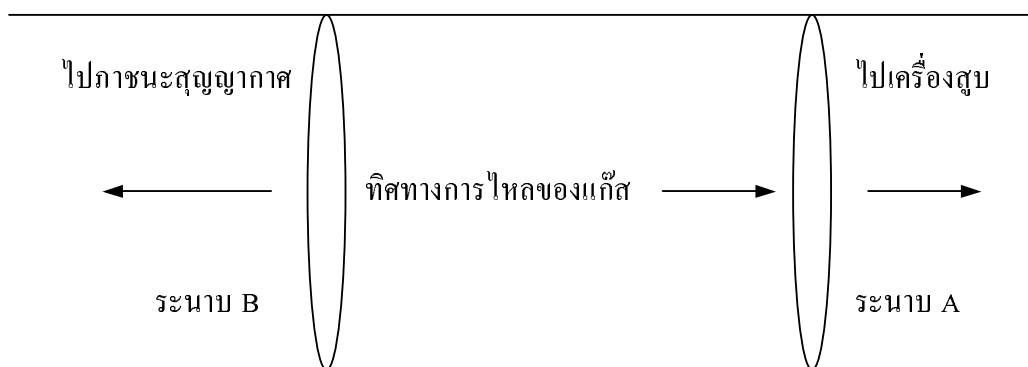
รูปที่ 2.2 ผังการทำงานของระบบสุญญากาศที่มีความดัน $10^{-3}-10^{-7}$ mbar^[10]

สำหรับเครื่องมือวัดความดันภายในภาชนะสุญญากาศเรียกว่าเกจสุญญากาศ (vacuum gauge) ซึ่งระบบสุญญากาศในรูปที่ 2.2 ประกอบด้วยเครื่องวัดนี้ 2 ตัว คือ เกจสุญญากาศตัวที่หนึ่งต้องมีความสามารถวัดความดันต่ำได้ เพราะเครื่องวัดนี้ต้องวัดความดันภายในภาชนะสุญญากาศซึ่งมีค่าประมาณ 10^{-6} mbar ส่วนเกจตัวที่สองจะทำหน้าที่วัดความดันในท่อส่วนหน้าซึ่งเป็นบริเวณที่เชื่อมต่อระหว่างเครื่องสูบบแบบแพร่ไอกับเครื่องสูบลมโรตารี

2.1.5 ปริมาณของแก๊สและแรงขับ

ปริมาณของแก๊ส (quantity of gas) เป็นผลคูณระหว่างความดันกับปริมาตรของแก๊สที่ปรากฏที่อุณหภูมิเดียวกัน เมื่อเปรียบเทียบนิยามของปริมาณแก๊สนี้กับกฎแก๊สจะเห็นได้ว่าค่าของปริมาณแก๊สนี้แปรผันโดยตรงกับจำนวนโมเลกุลของแก๊ส

นอกจากปริมาณของแก๊สแล้วยังมีการกำหนดปริมาณที่เรียกว่า แรงขับ (throughput) ขึ้น เพื่อใช้ในการวัดอัตราการไหลของแก๊สโดยกำหนดว่า ที่อุณหภูมิหนึ่งๆ แรงขับ ก็คือปริมาณของแก๊สที่ไหลผ่านพื้นที่หน้าตัดของส่วนในระบบสุญญากาศในหนึ่งหน่วยเวลา



รูปที่ 2.3 การไหลของแก๊สในระบบสุญญากาศ^[11]

ในรูปที่ 2.3 แก๊สจะไหลจากซ้ายไปขวาได้ ความดันทางซ้ายจะต้องมากกว่าความดันทางขวา ถ้าสามารถวัดปริมาณแก๊สที่ผ่านระนาบ A ได้โดยตรงว่ามีค่าเท่าใดในช่วงเวลาหนึ่งๆ ก็จะสามารถคำนวณค่าแรงขับได้ โดยนำจำนวนของแก๊สนั้นหารด้วยช่วงเวลาที่ใช้ แต่ในทางปฏิบัติไม่สามารถวัดปริมาณของแก๊สได้โดยตรง ปริมาณที่สามารถวัดได้คือความดันที่จุด A และปริมาตรแก๊สที่ไหลผ่านระนาบ A ในหนึ่งหน่วยเวลา ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$Q = \frac{PV}{t} \quad \text{..... (2.1)}$$

เมื่อ P เป็นความดันที่จุด A

V เป็นปริมาตรแก๊สที่ไหลผ่านระนาบ A ในเวลา t วินาที

Q เป็นแรงขับ มีหน่วยเป็น Pa-m³/s

2.1.6 การวัดความดันในระบบสุญญากาศ

เครื่องมือสำหรับใช้วัดความดันในระบบสุญญากาศเรียกว่า “เครื่องวัดความดัน” หรือ “เกจสุญญากาศ” (vacuum gauge) หรือ “เกจความดัน” (pressure gauge) เครื่องวัดความดันนี้มีหลายแบบ โดยแต่ละแบบมีความเหมาะสมที่จะวัดค่าความดันในช่วงที่ต่างกันโดยทั่วไปการวัดความดันที่มีค่าสูงๆ จะใช้หลักการที่ให้ความต่างศักย์ของแก๊สกระทำต่อเครื่องวัดโดยตรง แล้วนำแรงนั้นมาแปลงผลเป็นความดัน ส่วนการวัดความดันที่มีค่าต่ำๆ จะใช้สมบัติบางประการของแก๊สและไอ เช่นการนำความร้อนมาเป็นหลักในการวัด อาจจำแนกเครื่องวัดความดันออกเป็นชนิดต่างๆ ได้ดังนี้

1. เครื่องวัดแบบไฮโดรสแตติก (hydrostatic gauge) เป็นเครื่องวัดความดันที่ใช้แรงดันจริงของแก๊สเป็นตัวหลักในการวัด เช่น มาโนมิเตอร์ (manometer) เกจแม็คคลาวด์ (McLeod gauge) เกจบัวดอง (bourdon gauge) เป็นต้น

2. เครื่องวัดแบบการนำความร้อน (thermal conductivity gauge) หลักการทำงานของเครื่องวัดชนิดนี้มาจากความจริงที่ว่า ค่าการนำความร้อนของแก๊สขึ้นกับค่าความดัน ตัวอย่างเช่น เครื่องวัดแบบพิรานี (Pirani gauge) เครื่องวัดแบบเทอร์มोकัปเปิล (Thermocouple gauge) เป็นต้น เครื่องวัดประเภทนี้สามารถวัดความดันได้ในช่วง $760-10^{-3}$ torr

3. เครื่องวัดแบบความหนืด (viscosity gauge) เครื่องวัดชนิดนี้ใช้หลักการที่ว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความดันจะทำให้ความหนืดของแก๊สเปลี่ยนแปลงไปด้วย ตัวอย่างของเครื่องวัดชนิดนี้ได้แก่ เครื่องวัดแบบความหนืดแลงมัวร์ (Langmuir viscosity gauge)

4. เครื่องวัดแบบเรดิโอมิเตอร์ (radiometer gauge) ใช้หลักการว่า โมเลกุลที่มีอัตราเร็วสูง (คือมีอุณหภูมิสูง) สามารถก่อให้เกิดแรงได้มากกว่าโมเลกุลที่มีอัตราเร็วต่ำ (ซึ่งมีอุณหภูมิต่ำ) ตัวอย่างของเครื่องวัดชนิดนี้ได้แก่ เครื่องวัดคุดเซน (Knudsen gauge)

5. เครื่องวัดแบบไอออไนเซชัน (ionization gauge) เครื่องวัดชนิดนี้จะวัดกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากการแตกตัวของแก๊สแล้วแปลงเป็นความดันเช่น เครื่องวัดเทอร์โมอิเล็กทริกไอออไนเซชัน (thermionic ionization gauge) เครื่องวัดแบบเพนนิ่ง (penning gauge) หรือ เครื่องวัดแบบฟิลลิป (philips gauge) หรือ เครื่องวัดแบบคาโทดเย็น (cold cathode gauge) เครื่องวัดชนิดนี้จะใช้ในการวัดความดันต่ำ เช่น เครื่องวัดแบบเพนนิ่งสามารถวัดความดันได้ในช่วง 10^{-2} ถึง 10^{-6} torr ขณะที่เครื่องวัดแบบเทอร์โมอิเล็กทริกไอออไนเซชันสามารถวัดความดันได้ในช่วง 10^{-3} ถึง 10^{-6} torr

6. เครื่องวัดแบบหลอดคายประจุ (discharge tube gauge) เครื่องวัดชนิดนี้มีหลักในการทำงานว่าเมื่อใส่สนามไฟฟ้าที่มากพอเข้าไปในแก๊สความดันต่างๆ แก๊สจะสามารถเรืองแสงได้โดยสีของแสงที่ได้ขึ้นกับค่าความดันของแก๊ส เครื่องวัดชนิดนี้วัดความดันได้ในช่วง 5 ถึง 0.10 torr และมักจะใช้เครื่องวัดชนิดนี้ในการตรวจสอบรอยรั่วของระบบสุญญากาศ

2.2 เทคโนโลยีฟิล์มบาง

การเคลือบฟิล์มบางในสุญญากาศครั้งแรกทำโดย Bunsen และ Grove ในปี ค.ศ.1852 โดยแนวคิดพื้นฐานแล้ว การเคลือบฟิล์มบางก็คือ การเรียงตัว (fabricated) โดยการตกเคลือบ (deposition) ของสารเคลือบในลักษณะของอะตอมเดี่ยวบนวัสดุรองรับ (substrate) จนเกิดเป็นชั้นของฟิล์มบาง โดยฟิล์มที่ได้จะบางมาก (ระดับไมครอน) ปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้ฟิล์มบางในงานด้านต่างๆ มากมาย เช่น อุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ เช่น สารกึ่งตัวนำ ฟิล์มตัวนำและฟิล์มตัวต้านทาน หรือ อุปกรณ์ทางแสง เช่น เลนส์ กระจกเลเซอร์ กระจกสะท้อนแสง กระจกกรองแสงเฉพาะบางช่วงความถี่ เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถใช้เทคนิคการเคลือบฟิล์มบางนี้ในการเตรียมสารตัวอย่างที่เป็นฟิล์มบาง และมีความเป็นระเบียบสำหรับใช้ศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของวัสดุต่างๆ ในรูปของฟิล์มบาง ซึ่งสมบัติบางประการไม่สามารถวัดได้เมื่ออยู่ในสภาพเป็นก้อน ข้อมูลเหล่านี้มีประโยชน์มากในการพัฒนาวัสดุเพื่อนำไปใช้ในทางอุตสาหกรรม^[2]

2.2.1 กระบวนการเคลือบฟิล์มบาง^[8]

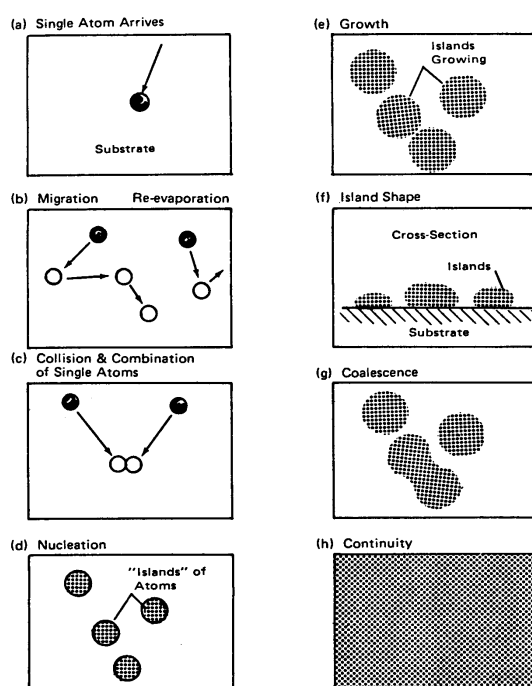
การเคลือบฟิล์มบางเป็นกระบวนการทำให้สารเคลือบตกเคลือบลงบนผิววัสดุรองรับที่ต้องการ ซึ่งทำได้ทั้งจากกระบวนการทางเคมีหรือกระบวนการทางฟิสิกส์ โดยพื้นฐานแล้ว กระบวนการเคลือบฟิล์มบางมีขั้นตอนสำคัญ 3 ขั้นตอน คือ เริ่มจากการสร้างสารเคลือบในรูปของอะตอม โมเลกุลหรืออนุภาค จากนั้นเป็นการเคลื่อนย้ายสารเคลือบมายังวัสดุรองรับ ซึ่งสุดท้ายสารเคลือบจะมีการควบแน่นและเกิดกระบวนการพอกพูนเป็นชั้นของฟิล์มบางบนวัสดุรองรับ

หากพิจารณาในรายละเอียดจะพบว่าสารเคลือบอาจอยู่ในของแข็ง ของเหลว ไอ หรือแก๊สก็ได้ โดยสารเคลือบนี้จะต้องทำให้อยู่ในรูปของไอระเหย ซึ่งสามารถทำได้โดยการให้ความร้อนหรือการระดมยิงด้วยอนุภาคที่มีพลังงานสูง บางครั้งสารเคลือบอาจอยู่ในรูปของแก๊สหรือของเหลว ต่อมาเป็นการเคลื่อนย้ายสารเคลือบ (transport) โดยอาจเกิดขึ้นในสุญญากาศ ซึ่งจะทำให้ไอระเหยของสารเคลือบมีการเคลื่อนที่ในลักษณะเส้นตรงไปยังวัสดุรองรับ หรืออาจเคลื่อนที่ไปในลักษณะของไหลซึ่งจะทำให้ไอระเหยของสารเคลือบมีการชนกับอนุภาคอื่นในภาชนะสุญญากาศบ้าง นอกจากนี้ยังอาจเคลื่อนที่ไปในลักษณะของพลาสมาเนื่องจากพลาสมานั้นจะมีอนุภาคที่มีพลังงานสูงอยู่มาก ซึ่งที่สำคัญในการพิจารณาถึงการเคลื่อนย้ายสารเคลือบคือต้องให้ไอระเหยของสารเคลือบมีความสม่ำเสมอเพื่อที่จะทำให้ฟิล์มบางที่ได้มีความสม่ำเสมอ สุดท้ายเป็นกระบวนการพอกพูนซึ่งจะขึ้นกับเงื่อนไขของวัสดุรองรับหรือการทำปฏิกิริยาของสารเคลือบกับวัสดุรองรับ ตลอดจนพลังงานในการเคลือบ

2.2.2 การก่อเกิดฟิล์มบาง^{[13][14]}

การเคลือบฟิล์มบางในสุญญากาศ สารเคลือบที่กระทบผิววัสดุรองรับส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของอะตอมหรือโมเลกุล (รูปที่ 2.4(a)) โดยพลังงานพันธะ (bonding energy) ระหว่างอะตอม สารเคลือบกับวัสดุรองรับและอุณหภูมิของวัสดุรองรับจะเป็นตัวกำหนดความสามารถในการแพร่ของสารเคลือบบนผิววัสดุรองรับ อะตอมสารเคลือบตกกระทบผิววัสดุในตำแหน่งที่เรียกว่าตำแหน่งการดูดซับ (adsorption site) และเกิดการเกาะติดหรือถ้ามีพลังงานมากพอก็อาจกระโดดข้ามกำแพงพลังงานไปยังบริเวณที่อยู่ติดกันหรือหลุดออกจากตำแหน่งนั้นไป (รูปที่ 2.4(b)) ในเวลาชั่วครู่อะตอมสารเคลือบอาจเกิดการระเหยกกลับและการรวมตัวกันระหว่างอะตอมที่มีการแพร่

เมื่ออะตอมรวมตัวกันอาจเกิดเป็นอะตอมคู่ (รูปที่ 2.4(c)) ซึ่งมีความเสถียรมากกว่าอะตอมเดี่ยว ทั้งนี้การรวมตัวกันของอะตอมจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของอะตอมเดี่ยวและอัตราเคลือบ (deposition rate) อะตอมคู่อาจรวมตัวกับอะตอมเดี่ยวอื่นแล้วกลายเป็นสามอะตอม (triplets) หรือ สี่อะตอม (quadruplets) หรืออื่นๆ ลักษณะเช่นนี้เรียกว่า สถานะการเกิดนิวเคลียส (รูปที่ 2.4(d)) ทำให้ได้กลุ่มอะตอมกึ่งเสถียร (quasi-stable islands) จากนั้นกลุ่มอะตอมจะเริ่มโตขึ้นเรียกว่า การโตเป็นกลุ่มก้อน (island growth) ขนาดของกลุ่มอะตอมจะใหญ่ขึ้น โดยมีจำนวนอะตอมเท่าเดิม หรือเพิ่มขึ้นเล็กน้อย (รูปที่ 2.4(e) และ 2.4(f)) การโตของกลุ่มอะตอมนี้จะเกิดขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งแต่ละกลุ่มชนกัน เรียกว่า การรวมกันเป็นก้อนของกลุ่มอะตอม (agglomeration หรือ coalescence) (รูปที่ 2.4(g))



รูปที่ 2.4 การก่อเกิดฟิล์มบาง^[15]

จากการศึกษาด้วยเทคนิค Transmission Electron Microscopy (TEM) พบว่าขณะที่กลุ่มอะตอมรวมกันเป็นก้อนอะตอมจะมีพฤติกรรมคล้ายของเหลว (liquid-like behaviour) และมีการจัดเรียงทิศทางในเชิงผลึกวิทยา (crystallographic orientation) ด้วย การรวมกันเข้าเป็นก้อนของกลุ่มอะตอมจะเกิดขึ้นจนกระทั่งฟิล์มเชื่อมต่อกันอย่างต่อเนื่อง (รูปที่ 2.4(h)) แต่ในบางกรณีการเชื่อมต่อกันอย่างต่อเนื่องจะเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์เมื่อฟิล์มมีความหนาโดยเฉลี่ยประมาณ 0.04-0.05 μm ลักษณะผิวทั่วไปของฟิล์มจะเกิดการรวมกลุ่มอะตอมจะดูคล้ายเนินและหุบเขา

เมื่อพิจารณาการเกิดฟิล์มในสภาวะที่เป็นกลุ่มอะตอม (island) พบว่าแต่ละกลุ่มอาจเป็นผลึกเดี่ยว หรืออาจประกอบด้วยผลึกจำนวน 2-3 ผลึก ถ้ากลุ่มอะตอมเหล่านี้ตกเคลือบบนวัสดุรองรับที่เป็นวัสดุหลายผลึก ทิศทางการจัดเรียงตัว (orientation) ของแต่ละกลุ่มอะตอมนั้นจะเป็นแบบสุ่ม (random) ทำให้ได้ฟิล์มบางที่มีโครงสร้างเป็นหลายผลึกด้วย แต่ถ้ากลุ่มอะตอมเหล่านั้นตกเคลือบบนวัสดุรองรับที่เป็นผลึกเดี่ยว การจัดเรียงตัวของฟิล์มจะเป็นไปตามโครงสร้างของวัสดุรองรับที่ตกเคลือบซึ่งจะได้ฟิล์มบางที่มีลักษณะเป็นผลึกเดี่ยว และเรียกกระบวนการนี้ว่าเอพิแทกซี (epitaxy)

ถ้าอะตอมที่ผิวมีพลังงานเพียงพอจะทำให้มันสามารถเคลื่อนที่เพื่อเลือกเข้าไปอยู่ในตำแหน่งที่มีพลังงานต่ำกว่าเสมอ และความสามารถในการเคลื่อนที่ (mobility) ของอะตอมจะเพิ่มขึ้นถ้าอุณหภูมิที่ผิววัสดุรองรับสูงขึ้น ทั้งนี้การลดอัตราเคลือบสามารถช่วยให้การโตของผลึกเกิดได้ดียิ่งขึ้น เพราะอะตอมมีเวลาในการโตนานพอ ดังนั้นถ้าอุณหภูมิของวัสดุรองรับสูงและมีอัตราเคลือบต่ำจะได้ฟิล์มที่มีเกรนขนาดใหญ่ มีข้อบกพร่องในเกรนน้อยและได้ฟิล์มที่หนามากพอสำหรับการเชื่อมต่อกันอย่างสมบูรณ์ในทางกลับกันถ้าอุณหภูมิวัสดุรองรับต่ำแต่อัตราเคลือบสูงก็จะให้ผลลักษณะเดียวกัน

2.2.3 ประเภทของการเคลือบฟิล์มบางในสุญญากาศ^[16]

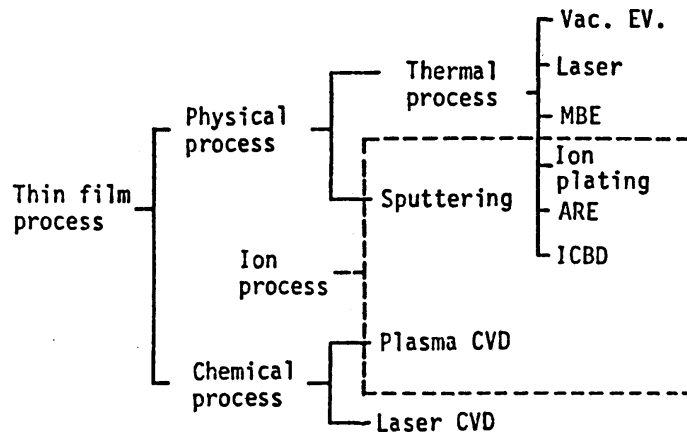
การเคลือบฟิล์มในสุญญากาศบางอาจแบ่งได้เป็น 2 ประเภท (รูปที่ 2.5) ได้แก่ การเคลือบฟิล์มบางด้วยกระบวนการทางเคมี (chemical process) และการเคลือบฟิล์มบางด้วยกระบวนการทางฟิสิกส์ (physical process)

1) การเคลือบฟิล์มบางด้วยกระบวนการทางเคมี

เป็นการเคลือบที่อาศัยการแตกตัวของสารเคมีในสภาพของแก๊สและเกิดปฏิกิริยาเคมีกลายเป็นสารใหม่ (new species) ตกเคลือบบนวัสดุรองรับ เช่น วิธี plasma CVD และวิธี laser CVD เป็นต้น

2) การเคลือบฟิล์มบางด้วยกระบวนการทางฟิสิกส์

เป็นการเคลือบที่อาศัยการทำให้อะตอมของสารเคลือบหลุดออกจากผิวแล้วฟุ้งกระจายหรือวิ่งเข้าไปจับและยึดติดกับผิวของวัสดุรองรับ เช่น วิธีระเหยสาร (evaporation) และวิธีสปัตเตอริง (sputtering) เป็นต้น



รูปที่ 2.5 ประเภทของกระบวนการเคลือบฟิล์มบางในสุญญากาศ^[16]

2.2.4 การเคลือบฟิล์มบางด้วยกระบวนการทางฟิสิกส์^{[4][16]}

การเคลือบฟิล์มบางด้วยกระบวนการทางฟิสิกส์อาศัยหลักการทำให้ระเหยของสารเคลือบหลุดออกจากผิวแล้วฟุ้งกระจายวิ่งเข้าไปจับและยึดติดกับผิวของวัสดุรองรับแล้วพอกพูนเป็นชั้นของฟิล์มบางซึ่งเกิดขึ้นภายใต้ภาวะสุญญากาศ แบ่งเป็น 2 วิธีหลักๆ คือ

1) การเคลือบด้วยวิธีระเหยสาร

เป็นกระบวนการพอกพูนของชั้นฟิล์มบางของสารเคลือบที่ทำให้ระเหยซึ่งเกิดขึ้นในสุญญากาศ (ความดันประมาณ 10^{-6} mbar) ทำได้โดยการให้ความร้อนที่มากพอที่จะทำให้สารเคลือบกลายเป็นไอ ซึ่งไอของสารเคลือบนี้จะฟุ้งไปกระทบกับวัสดุรองรับที่มีอุณหภูมิเหมาะสมก็จะเกิดการควบแน่นของสารเคลือบและพอกพูนโตเป็นชั้นของฟิล์มบางต่อไป การให้ความร้อนในการระเหยสารเคลือบทำได้หลายวิธี แต่วิธีที่นิยมใช้และไม่ยุ่งยากคือการให้ความร้อนแก่ภาชนะบรรจุสารเคลือบด้วยวิธีทางไฟฟ้านอกจากนี้ยังมีวิธีอื่น เช่น การให้ความร้อนจากตัวต้านทาน (resistive heating) การระเหยแบบวาบ (flash evaporation) การระเหยด้วยเลเซอร์ (laser evaporation) การระเหยด้วยลำอิเล็กตรอน (electron beam evaporation) การระเหยด้วยการอาร์ค (arc evaporation) การให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ (radiofrequency heating) การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีนี้นิยมใช้ในการเคลือบสารไดอิเล็กตริก (dielectric) เช่น แมกนีเซียมไดฟลูออไรด์ (MgF_2) หรือ ออกไซด์ (oxide) ของโลหะที่มีสมบัติโปร่งใสบนวัสดุที่ต้องการเคลือบ เช่น เลนส์กล้องถ่ายรูป แว่นตาและกระจกเลเซอร์ ฯลฯ สำหรับข้อเสียของการเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีนี้คือแรงยึดติดระหว่างสารเคลือบและวัสดุรองรับจะไม่สูงนักจึงต้องอาศัยกระบวนการอบด้วยความร้อนหรือวิธีอื่นช่วยให้การยึดเกาะของสารเคลือบดีขึ้น นอกจากนี้ฟิล์มบางที่ได้อาจมีการปนเปื้อนของสารที่ใช้ทำภาชนะบรรจุสารเคลือบได้ ถ้าภาชนะบรรจุสารเคลือบมีจุดหลอมเหลวต่ำหรือใกล้เคียงกับสารเคลือบ

2) การเคลือบด้วยวิธีสปัตเตอริง

เป็นกระบวนการพอกพูนของชั้นฟิล์มบางของสารเคลือบที่ได้จากกระบวนการสปัตเตอริง (ความดันประมาณ 10^{-3} ถึง 10^{-1} mbar) การเคลือบด้วยวิธีนี้เกิดขึ้นเมื่ออะตอมของสารเคลือบที่ได้จากกระบวนการสปัตเตอริงวิ่งเข้าชนวัสดุรองรับและมีการพอกพูนเป็นฟิล์มบางในที่สุด กระบวนการสปัตเตอริงคือการทำให้อะตอมหลุดจากผิวของวัสดุโดยการชนของอนุภาคพลังงานสูง โดยมีการแลกเปลี่ยนพลังงานและโมเมนตัมระหว่างอนุภาคที่วิ่งเข้าชนกับอะตอมที่ผิวสารเคลือบ กระบวนการนี้อ่อนกว่าที่วิ่งเข้าชนอาจเป็นกลางทางไฟฟ้าหรือมีประจุก็ได้ และเนื่องจากไอออนที่ได้จากกระบวนการสปัตเตอริงในการเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปัตเตอริงจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงกว่าวิธีการระเหยสารมาก ดังนั้นเมื่ออะตอมของสารเคลือบวิ่งเข้ากระทบบนวัสดุรองรับก็จะฝังตัวแน่นลงในเนื้อวัสดุที่ต้องการเคลือบมากกว่าวิธีการระเหยสาร ดังนั้นการเคลือบด้วยวิธีสปัตเตอริง จะทำให้การยึดเกาะระหว่างสารเคลือบกับวัสดุรองรับดีกว่า

2.3 การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปัตเตอริง

เมื่อผิวหน้าวัสดุถูกกระดมยิง (bombarded) ด้วยอนุภาคพลังงานสูงจะทำให้เกิดการสีกกร่อนและเมื่ออนุภาคที่ผิวหน้าของวัสดุนั้นหลุดออกมา เนื่องจากการชนของอนุภาคพลังงานสูงกับอนุภาคที่ผิวหน้า ปรากฏการณ์ที่อนุภาคผิวหน้าวัสดุหลุดออกมานี้เรียกว่า สปัตเตอริง (sputtering) กระบวนการสปัตเตอริงนี้ถูกค้นพบครั้งแรกเมื่อ 100 กว่าปีที่ผ่านมาโดย Grove ซึ่งขณะนั้นสปัตเตอริง เป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดความเสียหายกับคาโทดและกริดในหลอดคิสซาร์จ แต่ปัจจุบันได้มีการนำมาประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางเช่น การทำความสะอาดผิวหน้า (surface cleaning) การกัดเซาะ (etching) การวิเคราะห์ชั้นผิวหน้าของวัสดุ (surface layer analysis) และการเคลือบฟิล์มบาง

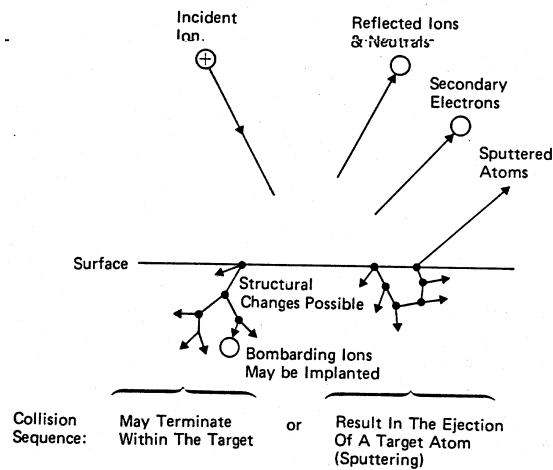
2.3.1 แนวคิดเบื้องต้นเกี่ยวกับสปัตเตอริง^{[13][17]}

1) อันตรกิริยาระหว่างไอออนและผิวเป้าสารเคลือบ

เมื่อไอออนพลังงานสูงวิ่งชนผิวหน้าวัสดุจะเกิดปรากฏการณ์ต่างๆ ดังนี้

1. การสะท้อนที่ผิวหน้าของไอออน (reflected ions and neutrals) ไอออนอาจสะท้อนกลับจากผิวหน้าซึ่งส่วนใหญ่จะสะท้อนออกมาในรูปของอะตอมที่เป็นกลางทางไฟฟ้าอันเกิดจากการรวมตัวกับอิเล็กตรอนที่ผิวเป้าสารเคลือบ

2. การปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron emission) จากการชนของไอออนอาจทำให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิจากเป้าสารเคลือบ ถ้าไอออนที่เข้าชนนั้นมีพลังงานสูงพอ



รูปที่ 2.6 อันตรกิริยาระหว่างไอออนและผิวเป้าสารเคลือบ^[18]

3. การฝังตัวของไอออน (ion implantation) ไอออนที่วิ่งชนเป้าสารเคลือบนั้น ไอออนอาจฝังตัวลงในเนื้อของเป้าสารเคลือบ โดยความลึกของการฝังตัวจะแปรผันโดยตรงกับพลังงานไอออน ซึ่งมีค่าประมาณ 10^{-8} A ต่อพลังงานไอออน 1 keV สำหรับ ไอออนของแก๊สอาร์กอนที่ฝังตัวในแผ่นทองแดง

4. การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของผิวเป้าสารเคลือบ (target material structural rearrangements) บางครั้งการชนของไอออนบนผิวเป้าสารเคลือบอาจทำให้เกิดการเรียงตัวของอะตอมที่ผิวเป้าสารเคลือบใหม่ และเกิดความบกพร่องของโครงสร้างผลึก (lattice defect) เราเรียกการจัดตัวใหม่ของโครงสร้างผิวหน้านี้ว่า altered surface layers

5. กระบวนการสปัตเตอริง (sputtering) บางครั้งการชนของไอออนอาจทำให้เกิดกระบวนการชนแบบต่อเนื่องระหว่างอะตอมของเป้าสารเคลือบ ทำให้เกิดการปลดปล่อยอะตอมจากเป้าสารเคลือบ ซึ่งกระบวนการนี้ว่า สปัตเตอริง

2) กระบวนการสปัตเตอริง

การสปัตเตอริงเป็นกระบวนการที่อะตอมผิวหน้าของวัสดุถูกทำให้หลุดออกมาด้วยการชนของอนุภาคพลังงานสูงโดยมีการแลกเปลี่ยนพลังงานและโมเมนตัมระหว่างอนุภาคที่วิ่งเข้าชนกับอะตอมที่ผิววัสดุดังกล่าว กระบวนการนี้อ่อนภาคที่วิ่งเข้าชนอาจเป็นกลางทางไฟฟ้าหรือมีประจุก็ได้ ดังนั้นสิ่งที่จำเป็นในกระบวนการสปัตเตอริง คือ

1. เป้าสารเคลือบ ทำหน้าที่เป็นเป้าให้อนุภาคพลังงานสูงวิ่งเข้าชนจนมีการปลดปล่อยอะตอมของเป้าสารเคลือบลงเคลือบบนวัสดุรองรับ
2. อนุภาคพลังงานสูง ซึ่งจะวิ่งเข้าชนเป้าสารเคลือบ แล้วทำให้อะตอมของเป้าสารเคลือบหลุดออกมา ปกติอนุภาคพลังงานสูงนี้อาจเป็นกลางทางไฟฟ้า เช่น นิวตรอน หรืออะตอม

ของธาตุต่างๆ แต่การทำให้อนุภาคที่เป็นกลางมีพลังงานสูงเกินกว่า 10 eV เพื่อใช้ในกระบวนการสปัตเตอริงทำได้ค่อนข้างยาก วิธีการหนึ่งที่นิยมคือการเร่งอนุภาคประจุภายใต้สนามไฟฟ้า ซึ่งสามารถควบคุมระดับพลังงานไอออนได้ตามต้องการ อิเล็กตรอนเป็นอนุภาคที่มีประจุชนิดหนึ่งที่เกิดได้ง่ายและสามารถเร่งให้มีพลังงานสูงภายใต้สนามไฟฟ้าได้ แต่อิเล็กตรอนมีมวลน้อยกว่าอะตอมของเป้าสารเคลือบมากทำให้การถ่ายเทพลังงานและโมเมนตัมต่ออะตอมเป้าสารเคลือบเป็นไปอย่างไม่มีประสิทธิภาพและไม่สามารถทำให้กระบวนการสปัตเตอริงเกิดขึ้นได้ตามทฤษฎีทางฟิสิกส์การชนระหว่าง 2 อนุภาคที่มีการส่งถ่ายพลังงานและโมเมนตัมดีที่สุดจะเกิดขึ้นเมื่อมวลของอนุภาคทั้งสองมีค่าเท่ากัน ดังนั้นเราจึงเลือกการเร่งไอออนของแก๊สในสนามไฟฟ้าเป็นอนุภาควิ่งชนเป้าสารเคลือบซึ่งให้อัตราการปลดปล่อยสารเคลือบจากเป้าสารเคลือบสูงเพียงพอกับความต้องการ

3. การผลิตอนุภาคพลังงานสูง อนุภาคพลังงานสูงในระบบสปัตเตอริงนี้จะต้องถูกผลิตขึ้นอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้กระบวนการเคลือบสารเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่องจนได้ความหนาฟิล์มตามต้องการ ทั้งนี้สามารถทำได้หลายวิธีเช่นการใช้ลำอนุภาคจากปืนไอออนที่มีปริมาณการผลิตไอออนในอัตราสูงหรือผลิตจากกระบวนการโคล์ดชิพอาร์จ เนื่องจากปืนไอออนมีราคาค่อนข้างสูงและให้ไอออนในพื้นที่แคบ กระบวนการสปัตเตอริงทั่วไปในระดับอุตสาหกรรมจึงนิยมใช้กระบวนการโคล์ดชิพอาร์จในการผลิตอนุภาคพลังงานสูง

3) ค่าyield ของสปัตเตอริง (sputtering yield : S)

ค่าyield ของกระบวนการสปัตเตอริง คือ ค่าเฉลี่ยปริมาณการหลุดของอะตอมเป้าสารเคลือบต่อปริมาณการชนของไอออน 1 อนุภาค มีหน่วยเป็น อะตอมต่อไอออน การวัดค่าyield นี้สามารถทำได้โดยการหาน้ำหนักหรือความหนาที่ลดลงของเป้าสารเคลือบ หรือหาได้จากวัสดุทั้งหมดที่ถูกสปัตเตอ์ หรืออาจหาได้จากการตรวจวัดสปัตเตอ์อะตอม (sputter atom) ขณะที่ยังพุ่งกระจาย ค่าyield ของกระบวนการสปัตเตอริงจะเปลี่ยนไปตามภาวะต่างๆ ดังนี้

1. เปลี่ยนแปลงตามพลังงานไอออน การชนตรงของอนุภาค 2 อนุภาค การถ่ายเทพลังงานระหว่างอนุภาคจะเป็นไปตามสมการ (2.2)

$$\Delta E = \frac{4mM}{(m+M)^2} \dots\dots (2.2)$$

เมื่อ ΔE คือพลังงานที่ถ่ายเทระหว่างอนุภาค

m คือมวลอะตอมที่ถูกชน

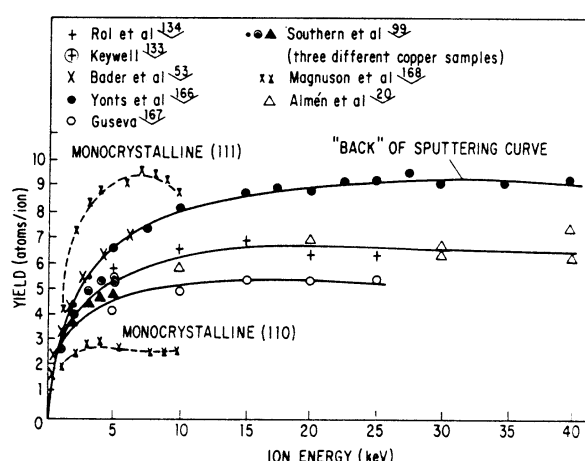
M คือมวลของอะตอมที่วิ่งเข้าชน

เมื่อพลังงานไอออนมีค่าต่ำมากค่าyieldจากกระบวนการสปีดเตอริงจะเป็นศูนย์ เนื่องจากไม่สามารถเอาชนะแรงยึดเกาะระหว่างอะตอมบนเป้าสารเคลือบได้ เมื่อไอออนมีพลังงานสูงเกินกว่า 4 H (H คือค่าพลังงานเฉลี่ยที่ใช้ในการระเหิด 1 อะตอม จากผิวสารเคลือบ) ถ้าพลังงานไอออนสูงมากพอในการทำให้เกิดกระบวนการชนอย่างต่อเนื่องระหว่างอะตอมสารเคลือบและเริ่มมีการปลดปล่อยอะตอมสารเคลือบ เรียกพลังงานค่านี้ว่า พลังงานขีดเริ่ม (threshold energies) ซึ่งเปลี่ยนแปลงไประหว่างคู่การชนของอนุภาค (ตารางที่ 2.3) เมื่อไอออนที่เข้าชนมีพลังงานสูงขึ้นyieldจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลในช่วงแรก และเปลี่ยนเป็นการเพิ่มแบบเชิงเส้น จากนั้นจึงมีการอิ่มตัว (saturation) ของค่าyield เมื่อพลังงานไอออนมีค่าสูงมาก ทั้งนี้เนื่องจากไอออนพลังงานสูงมีโอกาสในการฝังตัวบนผิวเป้าสารเคลือบสูงขึ้นทำให้yieldของสารเคลือบมีค่าคงที่ จากนั้นจะมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มพลังงานไอออนให้สูงมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.7

ตารางที่ 2.3 พลังงานขีดเริ่มของเป้าสารเคลือบชนิดต่างๆ^[19]

	Ne	Ar	Kr	Xe	Hg		Ne	Ar	Kr	Xe	Hg
Be	12	15	15	15		Mo	24	24	28	27	32
Al	13	13	15	18	18	Rh	25	24	25	25	
Ti	22	20	17	18	25	Pd	20	20	20	15	20
C	21	23	25	28	25	Ag	12	15	15	17	
Cr	22	22	18	20	23	Ta	25	26	30	30	30
Fe	22	20	25	23	25	W	35	33	30	30	30
Co	20	25	22	22		Re	35	35	25	30	35
Ni	23	21	25	20		Pt	27	25	22	22	25
Cu	17	17	16	15	20	Au	20	20	20	18	
Ge	223	25	22	18	25	Th	20	24	25	25	
Zr	23	22	18	25	30	U	20	23	25	22	27
Nb	27	25	26	32							

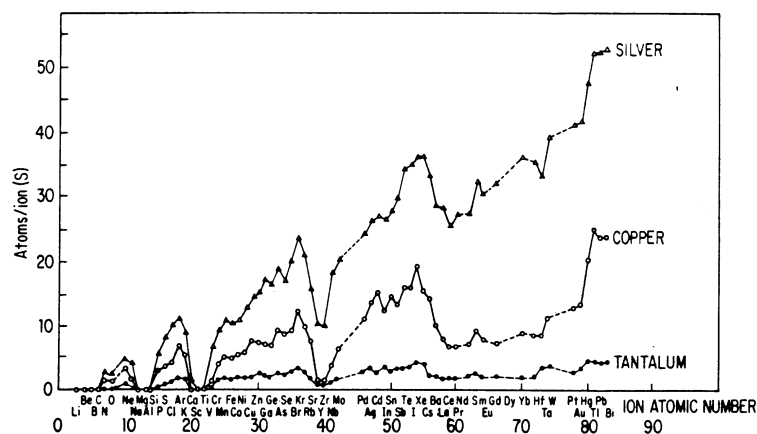
Boldface values are those for which the energy-transfer factor $4m_1m_2/(m_1+m_2)^2$ is 0.9 or higher



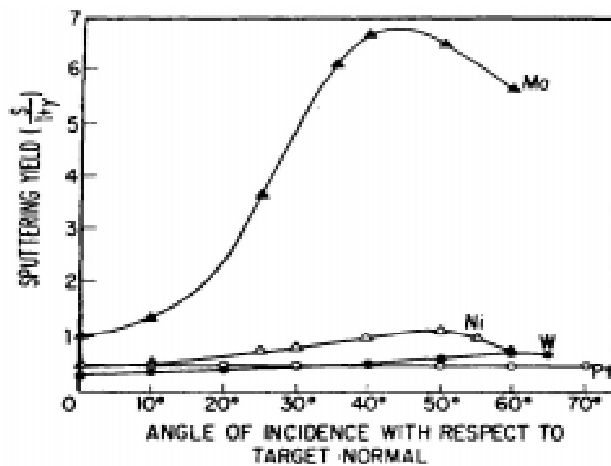
รูปที่ 2.7 Yield ของทองแดงที่ถูกชนด้วยไอออนจากแก๊สอาร์กอนที่พลังงานต่างๆ^[19]

2. เปลี่ยนแปลงตามระนาบผลึกของผิวเป้าสารเคลือบ จากการทดลองพบว่าเมื่อใช้เป้าสารเคลือบที่เป็นผลึกเดี่ยวค่าyieldจะมีความมากที่สุดเมื่อไอออนชนเป้าในแนวระนาบที่มีอะตอมหนาแน่นที่สุด และมีค่าต่ำในระนาบที่มีอะตอมเบาบาง ในทองแดงซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบ FCC (face centered cubic) พบว่าการชนบนระนาบ (111) ซึ่งมีความหนาแน่นอะตอมสูงสุด ค่าyieldจะมีความสูงสุดเมื่อใช้ค่าพลังงานไอออนในการชนค่าเดียวกัน ส่วนระนาบที่มีความหนาแน่นอะตอมต่ำ ไอออนมีแนวโน้มวิ่งฝังตัวในเป้าสารเคลือบมากขึ้น

3. เปลี่ยนแปลงตามชนิดของไอออนที่ชนเป้าสารเคลือบ ค่าyieldจากเป้าสารเคลือบชนิดเดียวกัน เมื่อใช้ไอออนต่างชนิดกันวิ่งชนจะมีค่าแตกต่างกันออกไป แม้สมการ (2.2) จะแสดงให้เห็นว่าการถ่ายเทพลังงานระหว่าง 2 อนุภาคที่ชนกันจะมีค่าสูงสุดเมื่อมวลของอะตอมทั้งสองมีค่าเท่ากัน แต่อะตอมบนเป้าสารเคลือบยึดเกาะกับอะตอมข้างเคียงจึงทำตัวเสมือนมีมวลยังผลสูงกว่ามวลของอะตอมเดี่ยวจึงพบว่าyieldมีค่าสูงขึ้นเมื่อใช้ไอออนที่มีมวลสูงกว่ามวลของอะตอมเป้าสารเคลือบ รูปที่ 2.8 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าyieldพบว่ามีความสูงสุดเป็นช่วงๆ ณ ตำแหน่งที่ใช้ไอออนจากแก๊สเฉื่อย คือแก๊ส Ne, Ar, Kr, และ Xe ซึ่งเป็นอะตอมที่มีอิเล็กตรอนครบ 8 ในวงนอกสุด สาเหตุของการเกิดจุดสูงสุดของค่าyieldเป็นช่วงๆ นี้ยังไม่มีคำอธิบายที่ชัดเจน



รูปที่ 2.8 การเปลี่ยนแปลงค่าyieldของเป้าทองแดง (Cu), เงิน (Ag) และแทนทาลัม (Ta) เมื่อใช้ไอออนพลังงาน 45 keV จากธาตุที่มีเลขอะตอมค่าต่างๆ^[19]



รูปที่ 2.9 การเปลี่ยนแปลงของยิลด์เมื่อใช้ไอออนของปรอทพลังงาน 200 eV ชนเป้า

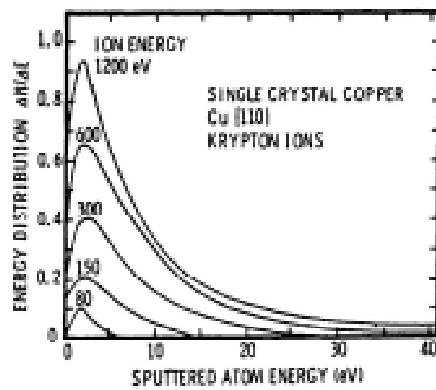
นิกเกิล (Ni), โมลิบดีนัม (Mo), ทังสเตน (W) และทองคำขาว (Pt)

ที่มุมการตกกระทบค่าต่างๆ (วัดเทียบกับแนวชนตั้งฉากบนเป้า)^[19]

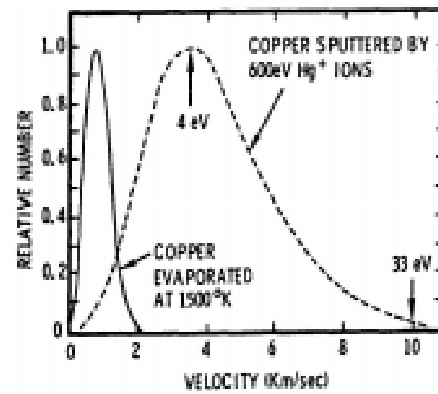
4. เปลี่ยนแปลงตามมุมตกกระทบของไอออนบนเป้าสารเคลือบ ทั้งนี้จากการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มมุมเอียงของการชนจากไอออนบนเป้ามามากขึ้นยิลด์จะมีค่าสูงขึ้นตามมุมที่เอียง เนื่องจากอะตอมสารเคลือบที่หลุดออกมาเปลี่ยนจากการกระเจิงกลับ (back scattering) เป็นการกระเจิงไปข้างหน้า (forward scattering) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ต้องการจำนวนครั้งของการชนระหว่างอะตอมน้อยกว่าทำให้ยิลด์สูงขึ้นจนถึงจุดหนึ่งซึ่งมีค่าสูงสุดที่องศาการเอียงมากกว่า 45° จากนั้นยิลด์จะมีค่าลดลงเมื่อมุมสูงขึ้น และเป็นศูนย์เมื่อมุมเอียงมีค่า 90° โดยขณะนั้นพื้นที่การชนเมื่อมองจากไอออนมีค่าเป็นศูนย์ รูปที่ 2.9

4) ความเร็วและพลังงานของอะตอมที่ถูกสปัตเตอร์

อะตอมที่หลุดออกจากผิวหน้าเป้าสารเคลือบด้วยวิธีสปัตเตอร์มีพลังงานจลน์ค่อนข้างสูงและมากกว่าพลังงานของอะตอมที่หลุดออกด้วยวิธีการระเหิดสารประมาณ 50-100 เท่า อะตอมมีการกระจายพลังงานแบบแมกซ์เวลล์ (Maxwellian) โดยพลังงานส่วนใหญ่มีค่าต่ำกว่า 10 eV และอีกส่วนหนึ่งมีพลังงานระหว่าง 10-40 eV ถ้าไอออนที่ใช้มีพลังงานสูงขึ้น พลังงานเฉลี่ยของอะตอมจากสปัตเตอร์จึงจะมีค่าสูงขึ้นจนเมื่อไอออนที่วิ่งชนมีพลังงานเกิน 1 keV พลังงานเฉลี่ยของอะตอมจากการสปัตเตอร์จะไม่เพิ่มขึ้นและเป้าที่มีค่ายิลด์สูงมีแนวโน้มทำให้พลังงานเฉลี่ยของอะตอมที่หลุดออกมามีค่าต่ำ เนื่องจากไอออนที่วิ่งชนเมื่อเฉลี่ยพลังงานให้กับอะตอมที่หลุดออกมาจำนวนมาก อะตอมแต่ละตัวจะรับพลังงานเฉลี่ยจากไอออนได้น้อยลง (รูปที่ 2.10 และ รูปที่ 2.11)



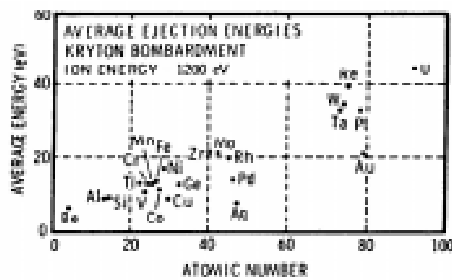
(a)



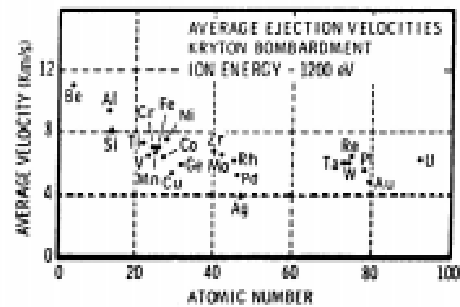
(b)

รูปที่ 2.10 (a) การกระจายค่าพลังงานของอะตอมทองแดงที่ถูกสเปคเตอร์จากไอออนของแก๊ส Kr ที่พลังงานต่างๆ

(b) เปรียบเทียบการกระจายค่าความเร็วของอะตอมทองแดงที่ได้จากการระเหยสารและการสเปคโตริง^[20]



(a)



(b)

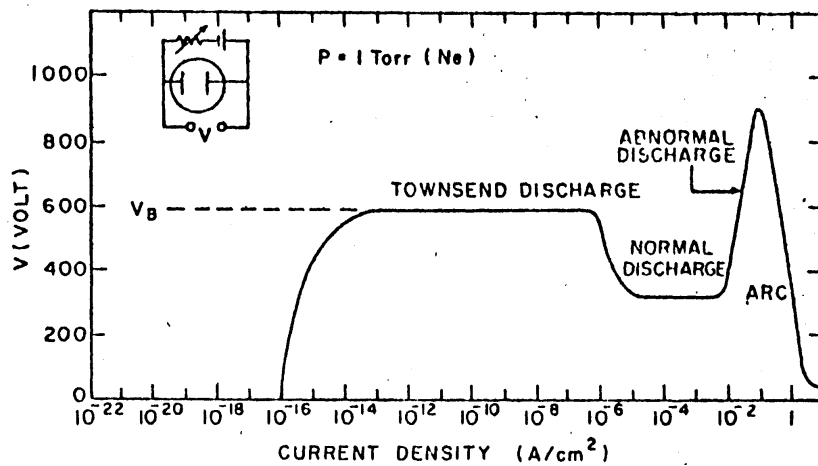
รูปที่ 2.11 (a) พลังงานเฉลี่ยของอะตอมสารเคลือบที่มีค่าเลขอะตอมต่างๆ เมื่อถูกชนด้วยไอออนของไอออนของ Kr พลังงาน 1200 eV ที่พลังงานต่างๆ

(b) ความเร็วเฉลี่ยของอะตอมสารเคลือบที่มีค่าเลขอะตอมต่างๆ เมื่อถูกชนด้วยไอออน Kr พลังงาน 1200 eV^[20]

2.3.2 โกลว์ดิซชาร์จ^{[4][14][17][21]}

เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้กับขั้วอิเล็กโตรด 2 ขั้ว ที่วางห่างกันเป็นระยะ d ภายใต้ความดันประมาณ 1.33 mbar ของแก๊สเนออน พบว่าช่วงแรก que เพิ่มแรงดันไฟฟ้าจะมีกระแสไหลในวงจรน้อยมาก กระแสส่วนนี้เกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและไอออนของแก๊สที่เกิดขึ้นตลอดเวลาในบรรยากาศเนื่องจากการชนของรังสีคอสมิกและถูกเร่งภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสนี้จะมีค่าค่อนข้างคงที่เพราะอัตราการเกิดประจุขึ้นกับความเข้มของรังสี เมื่อศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นใกล้ค่าแรงดันไฟฟ้าทะลาย (breakdown voltage : V_B) พลังงานของประจุที่ถูกเร่งภายใต้สนามไฟฟ้าจะมีค่าสูงขึ้นจนสามารถชนโมเลกุลของแก๊สให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนบวกและอิเล็กตรอนซึ่งจะถูกเร่งภายใต้สนามไฟฟ้าให้มีการชนและเกิดการไอออไนซ์เพิ่มขึ้น ส่วนของไอออนบวกจะถูกเร่งเข้าชนคาโทด จนเกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิ เรียกกระบวนการช่วงนี้ว่า ทาวน์เซนด์ดิซชาร์จ (Townsend discharge)

ต่อมาเมื่อแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นถึงแรงดันไฟฟ้าทะลายก็จะเกิดกระบวนการถล่ม (avalanche) ทำให้ปริมาณไอออนบวกวิ่งเข้าชนคาโทดมากขึ้นและมีการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิออกมามากขึ้น ซึ่งจะถูกร่งให้วิ่งเข้าหาแอโนด ขณะเดียวกันอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้ก็จะมีชนกับโมเลกุลของแก๊สทำให้เกิดไอออนออกมามากขึ้น สุดท้ายไอออนบวกที่เพิ่มมากขึ้นนี้จะวิ่งเข้าชนคาโทดแล้วเกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิเพิ่มขึ้นตามมาด้วย และชนโมเลกุลแก๊สทำให้เกิดผลิตไอออนเพิ่มขึ้นทำให้กระแสเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนมีปริมาณไอออนมากเพียงพอที่จะผลิตอิเล็กตรอนได้ในจำนวนคงที่ ช่วงนี้ระบบสามารถรักษาสภาพดิซชาร์จได้ด้วยตัวเองโดยไม่ต้องอาศัยแหล่งกำเนิดรังสีจากภายนอกในการผลิตไอออนช่วงนี้แก๊สภายในระบบจะเกิดการเรืองแสงขึ้น แรงดันไฟฟ้าระหว่าง อิเล็กโตรดลดค่าลงและกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เรียก การเรืองแสงปกติ หรือ นอร์มอลโกลว์ (normal glow) สถานะนี้อัตราการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิต่ออัตราการชนของไอออนมีค่าค่อนข้างต่ำ คือประมาณ 0.1 สำหรับเป้าคาโทดที่ทำจากวัสดุทั่วไป โดยในช่วงเริ่มต้นของการเรืองแสงหรือโกลว์ การชนของไอออนบนคาโทดจะปรับตัวเองให้เกิดขึ้นในบางบริเวณ แนวการเรืองแสงอาจเลื่อนไปมาได้และการชนของไอออนบนคาโทด ไม่มีความสม่ำเสมอโดยจะมีความเข้มของบริเวณการเรืองแสงตามแนวขอบหรือมุมของคาโทดที่มีสนามไฟฟ้าสูงเพื่อรักษาสภาพการโกลว์ (self-sustaining) บางบริเวณไว้ เมื่อกระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นแนวการชนของไอออนจะค่อยๆ ขยายตัวเพิ่มพื้นที่จนครอบคลุมตลอดผิวคาโทด จนกระทั่งมีค่าความหนาแน่นกระแสเท่ากันตลอดโดยมีค่าแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโตรดคงที่



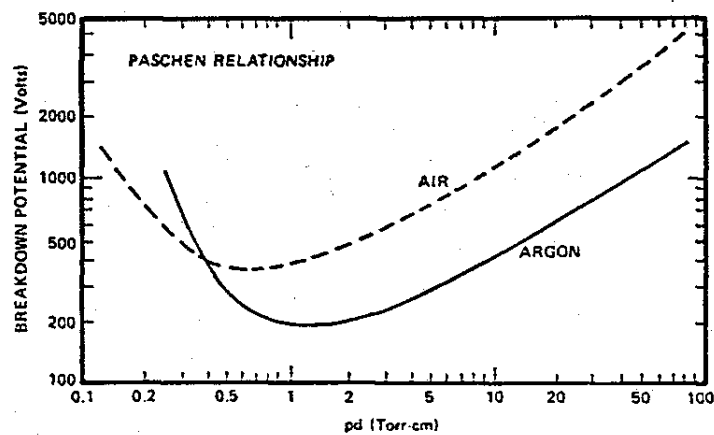
รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นกระแสและแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโทรดของ กระบวนการเกิด ดีซี โกลว์ดีสชาร์จ ในหลอดสุญญากาศบรรจุแก๊สนีออน^[22]

หลังจากการชนของไอออนครอบคลุมพื้นที่ทั้งหมดของคาโทดแล้ว การเพิ่มกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบจะทำให้ทั้งแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น เรียกว่า ช่วงการเรืองแสงผิดปกติ การเปล่งแสงจ้าขึ้น หรือ แอบนอร์มอลโกลว์ (abnormal glow) เป็นช่วงที่ใช้กับระบบสปีดเทอริงและอีกหลายๆ ระบบของกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับโกลว์ดีสชาร์จ ช่วงนี้ถ้าไม่ระบายความร้อนให้กับคาโทด เมื่อความหนาแน่นกระแสของคาโทดเพิ่มขึ้นสูงประมาณ 0.1 A/cm^2 ความร้อนที่เกิดจากการชนของไอออนบวกบนผิวคาโทดจะมากขึ้น จนเกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนแบบเทอร์มิออนิก เสริมกับการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิและติดตามด้วยกระบวนการถล่มอีกครั้งหนึ่ง ทำให้ความนำไฟฟ้าของแก๊สในระบบสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว แรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโทรดตกลงมากขณะที่กระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นสูงและเปล่งประกายขาวของการอาร์ค (arc discharge) (รูปที่ 2.12)

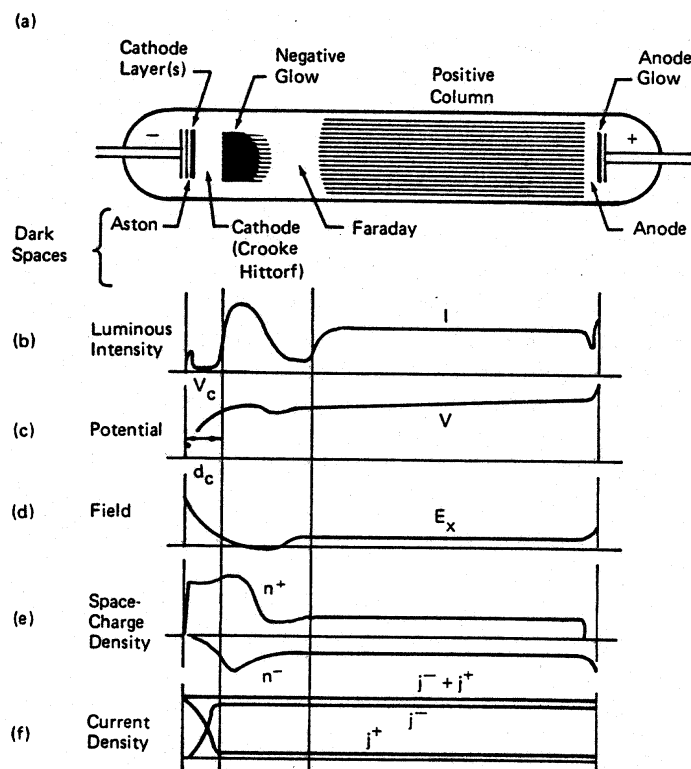
ค่าแรงดันไฟฟ้าจะลายในกระบวนการโกลว์ดีสชาร์จจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปกับระยะทาง d ระหว่างอิเล็กโทรด และระยะปลดการชนระหว่างอิเล็กตรอนทุติยภูมิและโมเลกุลของแก๊ส (ระยะปลดการชนของอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะแปรผกผันกับความดัน และมีค่ามากกว่าระยะปลดการชน ของการชนกันเองระหว่างโมเลกุลแก๊ส) โดยปกติอิเล็กตรอนทุติยภูมิแต่ละตัวควรมีความสามารถในการผลิตไอออนบวกได้ระหว่าง 10 ถึง 20 ตัว เพื่อให้เกิดกระบวนการถล่ม ในช่วงของนอร์มอลโกลว์ ถ้าความดันต่ำเกินไป (ระยะปลดการชนยาวขึ้น) หรือระยะทาง d มีค่าน้อยเกินไป อิเล็กตรอนทุติยภูมิจะไม่สามารถผลิตไอออนได้มากพอก่อนการชนกับอะโนด ถ้าความดันสูงเกินไป (ระยะปลดการชนสั้นลง) หรือระยะ d มากเกินไป อิเล็กตรอนทุติยภูมิไม่สามารถเพิ่มพลังงานให้กับตัวเองในสนามไฟฟ้าได้มากพอสำหรับการไอออไนซ์ เมื่อเกิดการชนพลังงานจะถูกถ่ายทอดให้โมเลกุลแก๊สในรูปการกระตุ้น (excite) ขึ้นไปอยู่ในระดับพลังงานที่สูงขึ้นทำให้ไม่สามารถผลิตไอออนบวกได้มากเพียงพอเช่นกัน ดังนั้นทั้งสองกรณีจะต้องใช้แรงดันไฟฟ้าทะเลายที่มีค่าค่อนข้างสูง

โดยมีจุดหนึ่งระหว่างนี้ที่ใช้ค่าแรงดันไฟฟ้าทะลายต่ำที่สุดตามกฎของปาส์เชน (Paschen's law) ซึ่งแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าทะลายและผลคูณระหว่างความดันแก๊ส (p) และระยะระหว่างอิเล็กโทรด (d) (รูปที่ 2.13)

ในระบบสปีดเตอริงทั่วไปสถานะของการเกิดโกลว์ดิสชาร์จ จะกระทำในช่วงที่ผลคูณของความดันกับระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด (pxd) ซึ่งมีค่าต่ำกว่าจุดต่ำสุดของกราฟมาก (เนื่องจากการเคลือบฟิล์มที่ความดันต่ำทำให้ฟิล์มที่ได้มีคุณภาพดี การแทรกตัวของแก๊สในเนื้อฟิล์มน้อย และลดปริมาณสารปลอมปนในฟิล์ม) จึงต้องการแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นค่อนข้างสูง บางครั้งจึงมีความจำเป็นต้องใช้การเพิ่มความดันชั่วขณะเพื่อให้เริ่มการดิสชาร์จได้ที่แรงดันไฟฟ้าต่ำ



รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าทะลายและผลคูณระหว่างความดัน (p) และระยะระหว่างอิเล็กโทรด (d)^[23]



รูปที่ 2.14 โกลว์ดิสชาร์จ ของหลอดแก๊สนีออนยาว 50 cm ที่ความดัน 1.33 mbar^[24]

ส่วนต่างๆ ของกระบวนการโกลว์ดิสชาร์จ แสดงได้ดังรูปที่ 2.14 ซึ่งแต่ละส่วนอธิบายได้ดังนี้ ช่วงแรกคือช่วงมืดแอสตัน (Aston dark space) เป็นบริเวณที่อิเล็กตรอนถูกปล่อยออกจากคาโทด ด้วยพลังงานต่ำประมาณ 1 eV ซึ่งไม่สามารถไอออไนซ์โมเลกุลของแก๊สได้ทำให้เกิดเป็นช่วงมืดขึ้น ถัดออกมาจากผิวคาโทดเป็นบริเวณที่มีการเปล่งแสงออกมาด้วยความเข้มสูงมาก เรียกว่าคาโทดโกลว์ (cathode glow) เป็นบริเวณที่ไอออนของแก๊สจากการดิสชาร์จ และไอออนของอะตอมสารเคลือบซึ่งถูกผลิตขึ้นบริเวณคาโทด มีการรวมตัวเป็นกลางกับอิเล็กตรอนใกล้ผิวคาโทดด้วยกระบวนการต่างๆ ทำให้เกิดการปลดปล่อยแสงซึ่งเป็นความถี่เฉพาะของสารที่ทำคาโทดและของแก๊สที่ใช้เช่นเมื่อคาโทดเป็นทองแดงการเรืองแสงของคาโทดโกลว์จะมีสีเขียว ทองคำมีสีส้มแดง แก๊สอาร์กอนมีสีน้ำเงินฟ้า และแก๊สไนโตรเจนมีสีม่วงแดงเป็นต้น

ถัดจากคาโทดโกลว์ เรียกว่าช่วงมืดครุค หรือช่วงมืดคาโทด (crook or cathode dark space) พลังงานของอิเล็กตรอนมีค่าสูงกว่าพลังงานในการไอออไนซ์โมเลกุลของแก๊สเมื่อถูกเร่งผ่านสนามไฟฟ้าในระยะปลดการชนออกมา ทำให้บริเวณปลดการชนนั้นไม่มีกระบวนการกระตุ้นหรือการไอออไนซ์เกิดขึ้น การปลดปล่อยแสงจึงไม่เกิดขึ้นในช่วงนี้และกลายเป็นบริเวณมืด ระยะปลดการชนออกไปอิเล็กตรอนทุกตัวจะสูญเสียพลังงานส่วนใหญ่โดยการไอออไนซ์โมเลกุลของแก๊สและไอออนบวกที่เกิดขึ้นเคลื่อนที่ได้ช้ากว่าอิเล็กตรอนมาก ทำให้ระยะปลดการชนของ

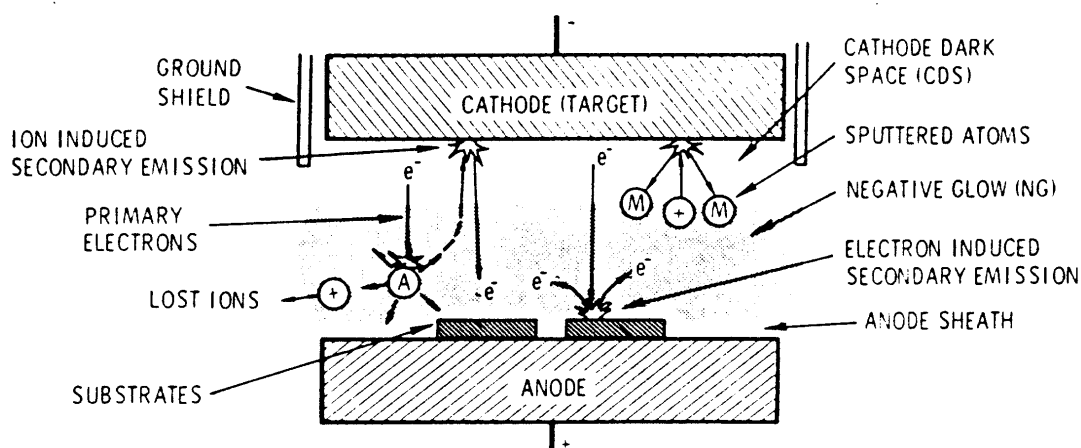
อิเล็กตรอนมีการสะสมของไอออนบวกอยู่มาก (positive space charge) ศักย์ไฟฟ้าเกือบทั้งหมดตกคร่อมบริเวณคาโทดคาร์คสเปซนี้ทำให้สนามไฟฟ้าบริเวณนี้สูงขึ้นมากและมากเกินไปในการเร่งอิเล็กตรอนชนและไอออนโมเลกุลของแก๊สในเวลาถัดมาจึงทำให้ภายหลังการเกิดออร์มอลโกลว์ แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมขั้วอิเล็กโตรดมีค่าลดลงตามกราฟในรูปที่ 2.12 ส่วนอิเล็กตรอนเมื่อเลยจากบริเวณผลิตไอออนของคาร์คสเปซแล้วจะมีพลังงานลดลงมาก ดังนั้นพลังงานที่เหลือจึงเพียงใช้ในการกระตุ้นโมเลกุลของแก๊สและเกิดการเรืองแสงขึ้น แม้อิเล็กตรอนจะเป็นอนุภาคที่เคลื่อนที่ได้เร็ว แต่พลังงานที่เหลือน้อยมากรวมทั้งประจุบวกจากประจุสะสมของไอออนทางด้านซ้ายมือในบริเวณคาร์คสเปซทำให้อิเล็กตรอนใช้เวลาในการเคลื่อนที่ผ่านช่วงเรืองแสงนี้นานขึ้นและเกิดการสะสมประจุลบบริเวณนี้จึงเรียกบริเวณนี้ว่า เนกาทีฟ โกลว์ (negative glow)

หลังจากนั้นอิเล็กตรอนจะมีพลังงานลดลงจนไม่สามารถกระตุ้นโมเลกุลของแก๊สให้เปลี่ยนไปอยู่ในระดับพลังงานสูงขึ้นได้ ทำให้เกิดบริเวณมืดอีกช่วงหนึ่งเรียกว่า ช่วงมืดฟาราเดย์ (Faraday dark space) ถัดจากช่วงนี้กระบวนการที่เกิดขึ้นจะคล้ายกับการดิซชาร์จของทาวนด์เซนด์ซึ่งมีปริมาณอิเล็กตรอนค่อนข้างคงที่ถูกเร่งภายใต้สนามไฟฟ้าค่าต่ำๆ ทำให้อิเล็กตรอนถูกเร่งเข้าสู่แอโนดและมีพลังงานสูงพอสำหรับการกระตุ้นโมเลกุลของแก๊สหรือ ไอออนแก๊สได้และเกิดการเรืองแสงขึ้นที่บริเวณนี้อีกครั้งหนึ่ง อิเล็กตรอนซึ่งเคลื่อนที่เร็วจะถูกกวาดเข้าสู่แอโนดโดยเร็วทำให้พลาสมาบริเวณนี้มีประจุบวกสูงกว่าจึงเรียกว่า ลำเรืองแสงศักย์ไฟฟ้าบวก (positive glow column)

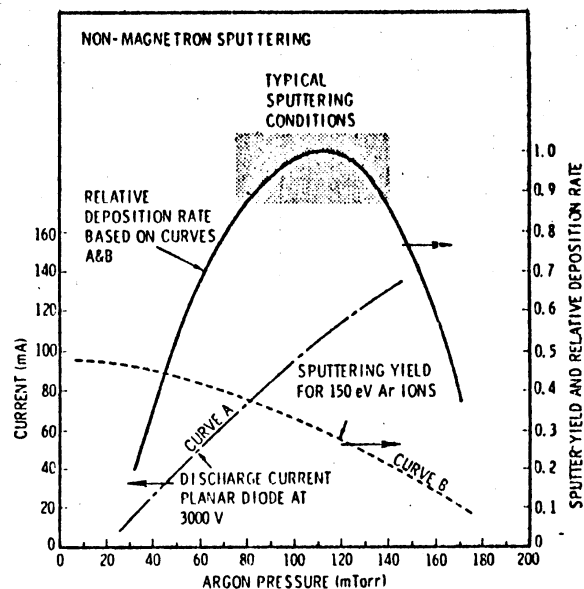
เนื่องจากการรักษาภาวะโกลว์ดิซชาร์จขึ้นกับปริมาณของอิเล็กตรอนที่ถูกผลิตขึ้นบริเวณคาโทดจากการชนของไอออนที่ถูกผลิตบริเวณเนกาทีฟ โกลว์ จึงพบว่าการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งแอโนดเพียงเล็กน้อยจะไม่มีผลต่อกระบวนการโกลว์ดิซชาร์จ เมื่อเลื่อนแอโนดเข้าหาคาโทดจนพ้นช่วงมืดฟาราเดย์และเข้าสู่เนกาทีฟ โกลว์จนเข้าสู่ช่วงคาโทดคาร์คสเปซ ทำให้ปริมาณไอออนที่ถูกผลิตจากอิเล็กตรอนทุติยภูมิมีปริมาณน้อยลง การรักษาสภาพโกลว์ดิซชาร์จไว้จำเป็นต้องใช้แรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้นในการเร่งไอออนเข้าชนคาโทดด้วยพลังงานสูงและเกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิปริมาณสูงขึ้นซึ่งจะส่งผลถึงปริมาณไอออนที่ถูกผลิตสูงขึ้นด้วย การโกลว์ในลักษณะนี้จะเรียกว่า ออปสตรัค โกลว์ (obstructed glow) และเมื่อเลื่อนแอโนดเข้าใกล้คาโทดต่อมาจนพ้นขอบของ คาโทดคาร์คสเปซ ซึ่งมีระยะสั้นกว่าระยะปลอดการชนของอิเล็กตรอนจะไม่มีการผลิตไอออนเกิดขึ้นและกระบวนการโกลว์ดิซชาร์จสิ้นสุด แม้จะเพิ่มแรงดันไฟฟ้าขึ้นอีกก็ไม่สามารถคงสภาพโกลว์ดิซชาร์จไว้ได้ และถ้าหากมีสิ่งสกปรกบริเวณคาโทดก็อาจการอาร์คเกิดขึ้นได้โดยไม่เกิดการโกลว์ดิซชาร์จก็ได้

2.3.3 ระบบเคลือบแบบ ดีซี สปีดเตอริง^{[2][4][12][17]}

ระบบเคลือบแบบ ดีซี สปีดเตอริงแบบง่ายที่สุดสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.15 ซึ่งประกอบด้วยคาโทดคือแผ่นเป้าสารเคลือบและอโนดใช้เป็นทิวางวัสดุรองรับหรือชิ้นงานที่ต้องการเคลือบ ปกติระยะระหว่างคาโทดและวัสดุรองรับจะอยู่ระหว่าง 4.0-10.0 cm เพื่อป้องกันการสูญเสียอะตอมสารเคลือบออกด้านข้างหรือผนังของภาชนะสุญญากาศ โดยทั่วไประยะคาร์คสเปชอยู่ระหว่าง 1.0-4.0 cm โดยอโนดจะอยู่บริเวณเนกาทีฟโกลว์ ส่วนอุปกรณ์ทำงานอยู่ในช่วงแอมบอร์มอลโกลว์ แก๊สที่ใช้เป็นแก๊สเฉื่อยซึ่งให้ยึดสูงและไม่ทำปฏิกิริยากับเป้าสารเคลือบ (ปกติใช้แก๊สอาร์กอน) ขณะเกิดโกลว์ดีสชาร์จที่ความดันค่าหนึ่ง กระบวนการไอออนไนซ์จะรักษาสภาพโกลว์ดีสชาร์จไว้คราบที่ระยะคาร์คสเปชไม่มากกว่าระยะระหว่างคาโทดและอโนด เมื่อความดันลดลงหรือแรงดันไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดสูงขึ้น ระยะปลดการชนของอิเล็กตรอนจะสูงขึ้น ทำให้ระยะคาร์คสเปชขยายตัวออก และแหล่งผลิตไอออนในระบบมีปริมาณน้อย กระแสไฟฟ้าจะลดลงและอะตอมที่ถูกสปีดเตอริงมีปริมาณลดลงตามปริมาณของไอออนและกระแสไฟฟ้าในระบบ ที่ความดันต่ำกว่า 10^{-2} mbar ระยะคาร์คสเปชจะยาวกว่าระยะระหว่างอิเล็กโตรดและกระแสไฟฟ้าลดลงสู่ศูนย์ ทำให้กระบวนการผลิตไอออนสิ้นสุดลงและไม่มีอะตอมหลุดออกจากเป้าสารเคลือบเนื่องจากการ สปีดเตอริงอีก



รูปที่ 2.15 ระบบสปีดเตอริงแบบ ดีซี สปีดเตอริง^[25]



รูปที่ 2.16 ผลของความดันในระบบที่มีผลต่ออัตราเคลือบ ค่าyield และกระแสไฟฟ้า
ในระบบสปีดเตอริงของนิเกิลที่ใช้แรงดันไฟฟ้า 3,000 V
ระหว่างขั้วอิเล็กโทรดที่วางห่างกัน 4.5 cm^[26]

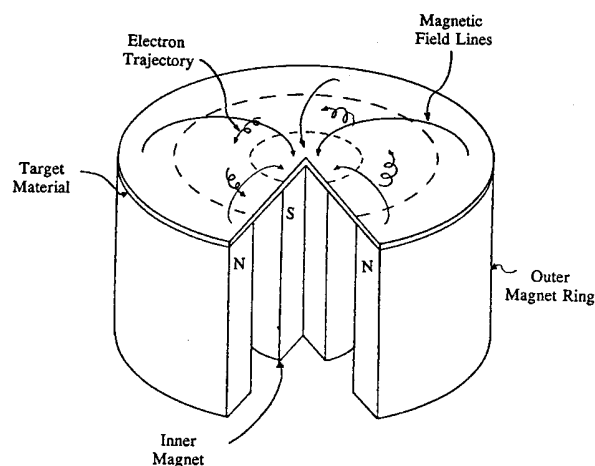
ขณะที่ความดันสูงขึ้นระยะคาร์คสเปซจะหดสั้นลง บริเวณการผลิตไอออนมีปริมาตรสูงขึ้นกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรเพิ่มขึ้นและกระบวนการสปีดเตอริงเกิดขึ้นในอัตราสูงตามความดัน (รูปที่ 2.16 เส้นกราฟ A) ขณะที่ความดันภายในระบบสูงขึ้นระยะปลอดการชนระหว่างโมเลกุลของแก๊สมีค่าลดลง อะตอมสารเคลือบที่หลุดออกจากเป้าจะส่งผ่านเคลือบบน วัสดุรองรับได้ยากจากการชนกับโมเลกุลของแก๊สและสะท้อนกลับสู่เป้าสารเคลือบหรือสูญเสียสู่ผนังภาชนะสุญญากาศทำให้ค่า yield จากการสปีดเตอริงมีค่าลดลง แต่เมื่อความดันสูงขึ้น (รูปที่ 2.16 เส้นกราฟ B) ผลรวมระหว่าง yield และกระแสไอออนจะทำให้อัตราเคลือบมีค่าสูงสุดที่ความดันค่าหนึ่ง ทั้งนี้พบว่าการสปีดเตอริงนี้เกิดเมื่อใช้แรงดันไฟฟ้า 3,000 V ระหว่างขั้วอิเล็กโทรดที่วางห่างกัน 4.5 cm ในแก๊สอาร์กอน การเคลือบจะหยุดที่ความดันมีค่าต่ำกว่า 2.6×10^{-4} mbar และที่ความดันสูงกว่า 1.6×10^{-5} mbar โดยอัตราเคลือบจะมีค่าสูงสุดและลดลงเมื่อความดันสูงเกินค่านี้ ดังนั้นบริเวณที่เหมาะสมกับกระบวนการสปีดเตอริงคือบริเวณที่ให้อัตราเคลือบสูงและประสิทธิภาพดีที่สุด จากรูป 2.16 พบว่าความดันที่เหมาะสมสำหรับการเคลือบคือ 1.0×10^{-5} mbar ความหนาแน่นกระแส 1.0 mA/cm^2 ด้วยอัตราเคลือบ $0.036 \text{ } \mu\text{m/min}$ ซึ่งเป็นอัตราเคลือบที่ค่อนข้างต่ำในขณะที่ใช้แรงดันไฟฟ้าค่อนข้างสูง

ระบบสปัตเตอร์ทั่วไปจะต่ออาโนดลงกราวด์ร่วมกับภาชนะสุญญากาศและให้คาโทด มีศักย์ไฟฟ้าลบ โดยแยกขั้วคาโทดและผิวของภาชนะสุญญากาศด้วยฉนวน เรียกว่า กราวด์ชีลด์ (ground shield) ดังแสดงในรูปที่ 2.15 กราวด์ชีลด์จะมีลักษณะเป็นผนังโลหะหุ้มรอบๆ ขอบของคาโทด โดยจะต้องจัดระยะระหว่างคาโทดและกราวด์ชีลด์ให้สั้นกว่าระยะคาร์คสเปซ ดังนั้นแม้ว่าศักย์ไฟฟ้าของ กราวด์ชีลด์จะเท่ากับอาโนดการไอออไนซ์ของสปีดเตอรังจะไม่สามารถเกิดกับคาโทด ในบริเวณที่มีกราวด์ชีลด์หุ้มอยู่ทำให้สามารถควบคุมบริเวณที่ต้องการสปัตเตอร์ได้

2.3.4 ระบบเคลือบแบบ ดีซี แมกนีตรอน สปัตเตอร์ริง ^{[2][4][17][21]}

อัตราการเกิดสปัตเตอร์นั้นจะขึ้นกับผลคูณระหว่างอีลด์และปริมาณไอออนที่วิ่งชนเป้าสารเคลือบ ดังนั้นการเพิ่มอัตราการสปัตเตอร์นั้นนอกจากจะทำได้โดยการเพิ่มอีลด์แล้วยังทำได้โดยการเพิ่มปริมาณไอออนที่วิ่งเข้าชนเป้าสารเคลือบ ซึ่งในระบบ ดีซี สปัตเตอร์ริง ปกติแล้วทำได้เพียงการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรด หรือเพิ่มความดัน ซึ่งจะมีขีดจำกัดสูงสุดที่ ความหนาแน่นกระแสประมาณ 1 mA/cm^2 และความดันประมาณ $1.33 \times 10^{-5} \text{ mbar}$ นอกจากนี้ยังพบว่าในระบบ ดีซี สปัตเตอร์ริงทั่วไปจะยอมของแก๊สที่จะเกิดการไอออไนซ์มีค่าน้อยกว่า 1% นอกจากนี้ยังมีข้อเสียเมื่อความดันสูงขึ้นจะทำให้ปริมาณแก๊สที่แทรกตัวในฟิล์มบางที่ได้มีค่าสูงด้วย

ต่อมาได้มีการพัฒนาระบบใหม่เรียกว่า ระบบดีซี แมกนีตรอน สปัตเตอร์ริง ซึ่งเป็นการใช้สนามแม่เหล็กช่วย โดยจ่ายสนามแม่เหล็กให้มีทิศขนานกับผิวหน้าเป้าสารเคลือบและมีทิศตั้งฉากกับสนามไฟฟ้าซึ่งจะช่วยเพิ่มระยะทางเดินของอิเล็กตรอนให้ยาวขึ้น โดยอำนาจของสนามแม่เหล็กจะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่เป็นทางโค้ง (รูปที่ 2.17) ทำให้การไอออไนซ์เนื่องจากการชนระหว่างอิเล็กตรอนกับอะตอมแก๊สเฉื่อยมีค่าสูงขึ้นซึ่งจะทำให้อัตราการสปัตเตอร์สูงขึ้นด้วย



รูปที่ 2.17 การเคลื่อนที่ของอนุภาคอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็ก ^[27]

ทั้งนี้จากการศึกษาการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็ก พบว่าถ้าอิเล็กตรอนมีทิศทางการเคลื่อนที่ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก อิทธิพลของสนามแม่เหล็กจะทำให้อนุภาคประจุนั้นเคลื่อนที่ในแนววงกลม (รูปที่ 2.18(a)) ด้วยรัศมี

$$r = \frac{3.37 (W)^{1/2}}{B} \quad \text{..... (2.3)}$$

เมื่อ W คือพลังงานของอิเล็กตรอนในหน่วย eV

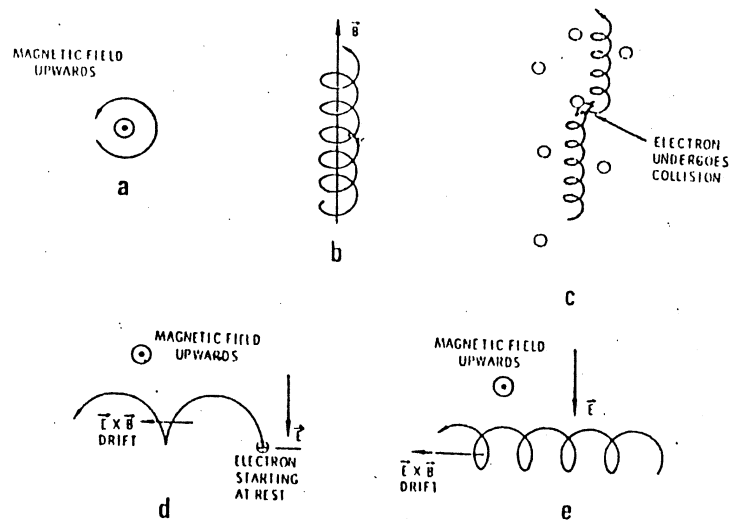
B คือความเข้มสนามแม่เหล็กในหน่วย gauss หมุนด้วยความถี่ไซโคลตรอน $\nu = 2.8 \times 10^6$ Hz

ถ้าพลังงานเฉลี่ยของอิเล็กตรอนในแนวตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กมีค่า 10 eV และสนามแม่เหล็กมีค่าความเข้ม 100 gauss รัศมีการหมุนมีค่าเท่ากับ 0.1 cm ด้วยความถี่การหมุนเท่ากับ 2.8×10^6 Hz รูปที่ 2.18(b) แสดงอิเล็กตรอนมีความเร็วส่วนหนึ่งในแนวนานกับสนามแม่เหล็ก อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่หมุนควงรอบแนวสนามแม่เหล็กด้วยจำนวนเส้นแรงคงที่ค่าหนึ่งระหว่างนี้ถ้าอิเล็กตรอนชนกับอะตอมแก๊ส รูปที่ 2.18(c) แนวการหมุนควงรอบสนามแม่เหล็กจะเปลี่ยนไป ถ้าอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ภายในสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าซึ่งมีทิศทางตั้งฉากกัน อำนาจของสนามทั้งสองนอกจากจะทำให้ให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในแนวโค้งแล้วยังสามารถทำให้เกิดการเคลื่อนที่ในแนวตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าเรียกว่า การเคลื่อนที่แบบลอยเลื่อน (drift motion) มีค่าเท่ากับ

$$V_E = \frac{10^8 E}{B} \quad \text{..... (2.4)}$$

เมื่อ E คือสนามไฟฟ้าหน่วยเป็น V/cm

B คือความเข้มสนามแม่เหล็กในหน่วย gauss



รูปที่ 2.18 การเคลื่อนที่ของอนุภาคในสนามต่างๆ โดยที่

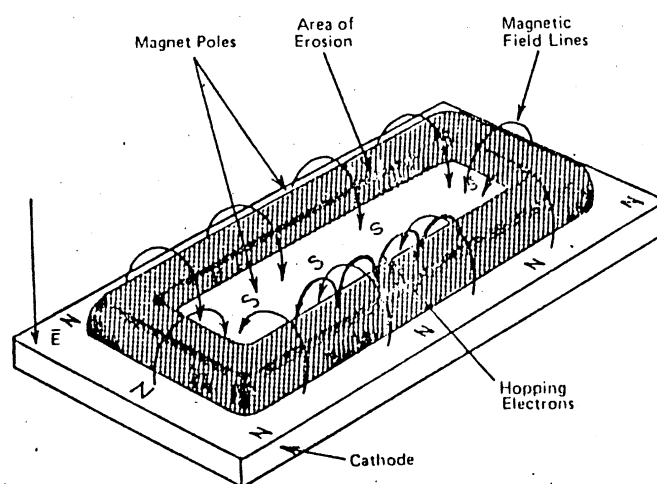
a , b , c เป็นการเคลื่อนที่ของอนุภาคประจุในสนามแม่เหล็กอย่างเดียว
ส่วน d และ e เป็นการเคลื่อนที่ของอนุภาคประจุในสนามแม่เหล็กและ
สนามไฟฟ้าร่วมกันในลักษณะต่างๆ^[28]

กรณีสนามไฟฟ้าบริเวณคาร์คสเปซมีค่าประมาณ 1,000 V/cm และสนามแม่เหล็ก 100 gauss จะให้ค่าความเร็วลอยเลื่อน (drift velocity) เท่ากับ 10^7 m/s ซึ่งเป็นค่าที่ค่อนข้างสูงกรณีพลังงานเริ่มต้นของอิเล็กตรอนมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับพลังงานที่ได้รับจากสนามไฟฟ้า การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจะเป็นรูปไซคลอยด์ (cycloid) ดังรูปที่ 2.18(d) ถ้าอิเล็กตรอนมีพลังงานเริ่มต้นสูงกว่าพลังงานที่ได้รับจากสนามไฟฟ้า การเคลื่อนที่แบบลอยเลื่อนจะอยู่ในแนววงกลมซ้อนกันดังแสดงในรูปที่ 2.18(e) พฤติกรรมที่ปรากฏต่ออิเล็กตรอนนี้จะเด่นชัดมาก ถึงแม้จะใช้สนามแม่เหล็กมีค่าน้อยๆ ระหว่าง 50-500 gauss แต่จะมีผลในการเบี่ยงเบนแนวทางเดินของไอออน (ซึ่งมีมวลสูงกว่าอิเล็กตรอนมาก) อย่างไม่เด่นชัด

ระบบสปีดเทอริงที่ใช้สนามแม่เหล็กช่วยเพิ่มปริมาณไอออนนั้น ถ้าสนามแม่เหล็กมีทิศทางขนานกับสนามไฟฟ้าจะเรียกว่า สนามตามยาว (longitudinal field) จะทำให้ประสิทธิภาพการเพิ่มไอออนไม่สูงนักแต่ไม่ทำให้แนวการเกิดโกลว์ดิซาร์จเปลี่ยนแปลงไปและยังสามารถรักษาความสม่ำเสมอของฟิล์มบางไว้ได้ดี กรณีของสนามแม่เหล็กตั้งฉากกับสนามไฟฟ้าเรียกว่า สนามตามขวาง (transverse field) โดยกระบวนการเพิ่มปริมาณไอออนเกิดขึ้นดังนี้ หลังจากที่ไอออนบวกชนกับเป้าสารเคลือบและเกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิออกมา อิเล็กตรอนทุติยภูมิจะเคลื่อนที่ในลักษณะเดียวกับรูปที่ 2.18(d) ทำให้อิเล็กตรอนถูกกักอยู่ในบริเวณสนามแม่เหล็กใกล้คาโทดและเคลื่อนที่แบบลอยเลื่อนไปตามแนวผิวหน้าของคาโทด (รูปที่ 2.19) ทำให้อิเล็กตรอนมีโอกาสชนกับโมเลกุลแก๊สบริเวณผิวหน้าเป้าสารเคลือบมากขึ้นจนเพิ่มปริมาณไอออนสูงมากใกล้ผิวเป้าสารเคลือบ

อิเล็กตรอนตัวใดที่ไม่ชนโมเลกุลของแก๊สจะเดินทางเป็นวงโค้งเข้าชนเป้าสารเคลือบและผลิตอิเล็กตรอนทุติยภูมิมากขึ้นเป็นผลทำให้ไอออนถูกผลิตในปริมาณสูงมากและเกิดโกล์ผิวคาโทด ทำให้เกิดสเปซชาร์จ (space charge) จากไอออนบวกสูงที่ผิวคาโทด ซึ่งอาจสั้นกว่าระยะปลดการชนของระบบ ดีซี สปีดเตอริงที่ความดันใช้งานมาก แรงเคลื่อนไฟฟ้าเกือบทั้งหมดจะตกคร่อมบริเวณนี้ และมีค่าสนามไฟฟ้าสูงกว่าบริเวณดาร์คสเปซใน ดีซี สปีดเตอริงขณะไม่มีสนามแม่เหล็กมากทำให้ความต้องการแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโตรดของระบบ แมกนีตรอน สปีดเตอริง ลดลง มีค่าประมาณ 300-800 V ถ้าใช้สนามแม่เหล็กกับแมกนี ตรอนทรงกระบอกจะเรียกว่า แมกนีตรอน สปีดเตอริงทรงกระบอก (cylindrical magnetron sputtering) และถ้าใช้สนามแม่เหล็กกับระบบดีซี สปีดเตอริงที่ใช้เป้าแบบแผ่นราบจะเรียกว่า พลาสมาแมกนีตรอน สปีดเตอริง (planar magnetron sputtering)

ในระบบแมกนีตรอน สปีดเตอริง ไอออนและพลาสมาที่เกิดขึ้นเข้มข้นมากบริเวณเป้าสารเคลือบทำให้อัตราการสปีดเตอริงของระบบมีค่าสูง ขณะที่ใช้ความดันต่ำและแรงดันไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดมีค่าเกือบคงที่ที่ทุกค่าของอัตราการสปีดเตอริง แมกนีตรอนสปีดเตอริงทรงกระบอกทั่วไปมีอัตราการสปีดเตอริงสูงกว่า $1.0 \mu\text{m}/\text{min}$ และมีอัตราเคลือบสูงกว่า $0.2 \mu\text{m}/\text{min}$ ความหนาแน่นกระแสที่ผิวคาโทด ประมาณ $20.0 \text{ mA}/\text{cm}^2$ แรงดันไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดมีค่าระหว่าง 300-800 V ที่ความดันประมาณ $5.33 \times 10^{-5} \text{ mbar}$ ซึ่งแสดงถึงการเพิ่มประสิทธิภาพการเคลือบสูงขึ้นกว่า 10 เท่าตัว นอกจากนี้ยังสามารถขยายสเกลใช้กับระบบสปีดเตอริงขนาดใหญ่ได้ง่าย ส่วนข้อเสียของระบบแมกนีตรอน สปีดเตอริง คือแรงดันไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดมีค่าต่ำ จึงมีข้อจำกัดในการเคลือบวัสดุบางชนิดที่ต้องการแรงดันไฟฟ้าสูงเพื่อควบคุมคุณภาพฟิล์ม แต่มีข้อได้เปรียบที่ระบบนี้สามารถคุมอิเล็กตรอนส่วนใหญ่ให้อยู่ภายในกรอบสนามแม่เหล็กจึงมีอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาและวิ่งเข้าสู่ตัวสุรรองรับปริมาณน้อยซึ่งช่วยลดปัญหาความร้อนบนตัวสุรรองรับเนื่องจากการชนของอิเล็กตรอนลงได้อย่างมาก



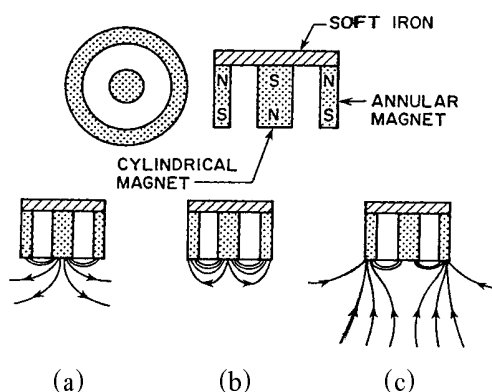
รูปที่ 2.19 การจัดสนามแม่เหล็กและแนวการกักตร้อนของเป้าสารเคลือบ
ในระบบพลาสมาแมกนีตรอน สปีดเตอริง^[29]

2.3.5 ระบบเคลือบแบบ อังบาลานซ์ แมกนีตรอน สปีดเตอริง^{[30][31][32][33]}

ในกระบวนการเคลือบฟิล์มนั้น พบว่าหากการระดมยิงไอออนระหว่างที่สารเคลือบมีการตกเคลือบและการก่อตัวเป็นฟิล์มนั้นจะเป็นการเปลี่ยนแปลงสมบัติของฟิล์มหลายอย่าง เช่น พฤติกรรมการเกิดนิวเคลียส (nucleation behaviour) สัณฐานวิทยา (morphology) องค์ประกอบ (composition) ทิศทางการจัดเรียงตัว และสมบัติเชิงกล เป็นต้น เช่น ในกรณี แมกนีตรอน สปีดเตอริง ไอออนที่ใช้ในการระดมยิงวัสดุรองรับจะมาจากประจุไฟฟ้าที่อยู่รอบวัสดุรองรับ ซึ่งทำได้โดยการจ่ายศักย์ไฟฟ้าลบประมาณ -1 ถึง -500 V ให้กับวัสดุรองรับ ทั้งนี้ความหนาแน่นกระแสที่ฟิล์มหรือผิวหน้าของวัสดุรองรับ สำหรับ ระบบดีซี แมกนีตรอน ปกติจะมีค่าต่ำประมาณ 0.05-0.10 ไอออน/อะตอมสารเคลือบ แต่การใช้งานจริงต้องมีค่าสูงกว่านี้

สำหรับการเคลือบแข็ง (hard coating) ฟิล์มที่ต้องการนั้นจะต้องมีช่องว่าง (voids) ในเนื้อฟิล์มน้อยที่สุด ซึ่งจะทำให้ฟิล์มบางที่ได้นั้นมีความทนต่อการกัดกร่อน (corrosion) และทนต่อการขัดสี (wear resistance) มากขึ้น การลดช่องว่างในเนื้อฟิล์มนี้ทำได้โดยการเพิ่มความต่างศักย์ไบแอสให้กับวัสดุรองรับ แต่ก็จะทำให้เกิดความเค้นและความบกพร่อง (defects) ภายใน เกรน (grain) ของฟิล์มมากขึ้นเมื่อความต่างศักย์ไบแอสเพิ่มขึ้นด้วย ทำให้คุณภาพของฟิล์มและการยึดติดของฟิล์มกับวัสดุรองรับลดลง ปัญหานี้แก้ไขได้โดยการเพิ่มความหนาแน่นของกระแสไอออนที่ใช้ ซึ่งทำได้โดยใช้ระบบเคลือบแบบอังบาลานซ์ แมกนีตรอน สปีดเตอริง (unbalanced magnetron sputtering)

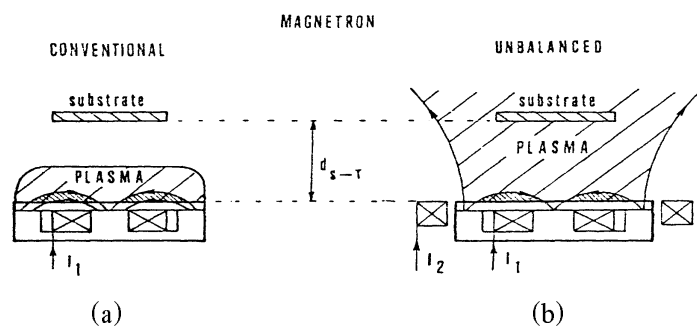
ระบบอังบาลานซ์ แมกนีตรอน สปีดเตอริง ได้รับการคิดค้นและตีพิมพ์เผยแพร่โดย Window และ Savvides ครั้งแรกในปี ค.ศ.1986 โดยทั้งสองพบว่าการติดตั้งแม่เหล็กที่คาโทดของระบบสปีดเตอริงปกติ หากทำให้ความเข้มของสนามแม่เหล็กด้านใดด้านหนึ่งมากกว่าหรือน้อยกว่าอีกด้านหนึ่งแล้วสนามแม่เหล็กที่คาโทดมีลักษณะไม่สมมาตร ทำให้ปริมาณไอออนที่วิ่งเข้าชนหรือระดมยิงวัสดุรองรับ (ฟิล์มบาง) นั้นมีปริมาณมากกว่าปกติ ซึ่งจะมีผลต่อคุณภาพของฟิล์มบางที่เคลือบได้โดยตรง การจัดแม่เหล็กของระบบนี้อาจแบ่งเป็น 3 แบบ คือความเข้มสนามของแม่เหล็กที่ด้านในมากกว่าด้านนอก (รูปที่ 2.20 (a)) หรือกลับกัน (รูปที่ 2.20 (c)) หรือใกล้เคียงกัน (รูปที่ 2.20 (b))



รูปที่ 2.20 ลักษณะเส้นแรงแม่เหล็กของระบบอังบาลานซ์ แมกนีตรอน สปีดเตอริง^[34]

การจัดแม่เหล็กตามรูปที่ 2.20(a) ไอออนที่ระดมยิงวัสดุรองรับจะมีค่าต่ำ (อัตราส่วนไอออน/อะตอมสารเคลือบประมาณ 0.25:1) ส่วนการจัดแม่เหล็กตามรูปที่ 2.20(c) ไอออนที่ระดมยิงวัสดุรองรับจะมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้อัตราส่วนไอออน/อะตอมสารเคลือบมีค่าสูงขึ้นคือประมาณ 2:1 (เมื่อใช้ความต่างศักย์ไบแอสต่ำ) จากการศึกษาของ Musil และ Kadlec ที่ใช้ระบบเคลือบแบบอเนกบาลานซ์ ฟลนาร์ แมกนีตรอนเดี่ยวและเคลือบแม่เหล็กไฟฟ้า 2 ขด เคลือบไททาเนียมไนไตรด์ที่ระยะเป้าสารเคลือบและวัสดุรองรับประมาณ 200.0 mm ใช้ความต่างศักย์ไบแอสในช่วง -5 ถึง -100 V พบว่าความหนาแน่นกระแสสูงถึง 6.0 mA/cm^2 ซึ่งมากพอสำหรับใช้ในงานอุตสาหกรรม

หากเปรียบเทียบระบบสปัตเตอริงทั้ง 3 ระบบ พบว่าในระบบสปัตเตอริงปกตินั้น อิเล็กตรอนที่ได้จากการไอออไนซ์จะวิ่งไปจับแอนดโดยไม่เกี่ยวข้องกับการสปีดเตอริงเลย ดังนั้นเพื่อให้ระบบสปัตเตอริงมีประสิทธิภาพมากขึ้นจึงมีแนวคิดที่จะนำอิเล็กตรอนเหล่านี้เข้ามาช่วยในกระบวนการสปัตเตอริงโดยการใส่สนามแม่เหล็กช่วย จึงเกิดระบบแมกนีตรอน สปัตเตอริง ซึ่งใช้สนามแม่เหล็กช่วยทำให้เกิดอิเล็กตรอนบริเวณหน้าคาโทดเพิ่มขึ้น (เนื่องจากอิเล็กตรอนเหล่านี้มีส่วนช่วยทำให้กระบวนการสปัตเตอริงคงอยู่อย่างต่อเนื่อง) อำนาจของสนามแม่เหล็กจะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่เป็นทางโค้งทำให้การไอออไนซ์แก๊สเฉื่อยสูงขึ้น นอกจากนี้สนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้ายังทำให้การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่วิ่งชนเป้าสารเคลือบมีลักษณะเป็นการชนแบบซ้ำๆ ต่อเนื่องกัน ทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิปริมาณนี้มากขึ้น ซึ่งทำให้เกิดการสปัตเตอริงมากตามไปด้วย แต่ก็ยังมีอิเล็กตรอนบางส่วนที่มีพลังงานสูงสามารถหลุดจากอำนาจของสนามแม่เหล็กนี้วิ่งเข้าหาขั้วแอนดโดยทันที สำหรับในระบบอเนกบาลานซ์ แมกนีตรอน สปัตเตอริง นั้นอิเล็กตรอนพลังงานสูงที่หลุดจากสนามแม่เหล็กนี้จะถูกยึดไว้ด้วยเส้นแรงแม่เหล็กส่วนเกินของระบบแล้วเคลื่อนที่เป็นทางโค้งไปตามเส้นแรงแม่เหล็กเข้าชนกับอะตอมของแก๊สเฉื่อยและเกิดการไอออไนซ์เป็นพลาสมาบริเวณผิวหน้าวัสดุรองรับทำให้ความหนาแน่นกระแสที่วัสดุรองรับมีค่าสูงกว่าในระบบแมกนีตรอน สปัตเตอริงมาก (ประมาณ $5.0\text{-}10.0 \text{ mA/cm}^2$ ปกติมีค่าน้อยกว่า 1.0 mA/cm^2)



รูปที่ 2.21 ลักษณะพลาสมาของระบบสปัตเตอริง^[31]

(a) ระบบบาลานซ์แมกนีตรอน สปัตเตอริง

(b) ระบบอเนกบาลานซ์แมกนีตรอน สปัตเตอริง

2.4 อุปกรณ์ในระบบ แมกนีตรอน สปีดเตอริง¹⁴

ในการออกแบบและสร้าง ระบบเคลือบแบบ ดีซี แมกนีตรอน สปีดเตอริง นั้นปกติแล้วมีส่วนประกอบสำคัญที่ต้องพิจารณาในการออกแบบ ดังนี้คือ คาโทดและเป่าสารเคลือบ วัสดุรองรับ ระบบสุญญากาศ แหล่งกำเนิดไฟฟ้า ระบบป้อนแก๊ส ซึ่งแต่ละส่วนมีรายละเอียดดังนี้

2.4.1 คาโทดและเป่าสารเคลือบ

ในการออกแบบคาโทดและการติดตั้งเป่าสารเคลือบให้มีรูปร่างต่างๆ เพื่อความเหมาะสมกับประเภทของงานมีสิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณาในการออกแบบ 5 ส่วน คือ ระบบหล่อเย็น ระบบฉนวนของไฟฟ้าแรงสูงและรอยต่อ สนามแม่เหล็ก คาโทดชนิด และวัสดุที่ใช้ในการสร้าง

1. ระบบหล่อเย็น พลังงานที่ใช้ในกระบวนการสปีดเตอริงที่ทำให้เกิดการปลดปล่อยอนุภาคจากเป่าสารเคลือบจะมีค่าประมาณ 1% ส่วนพลังงานที่ใช้เปลี่ยนเป็นความร้อนที่เป่าสารเคลือบจากการชนของไอออนที่ผิวเป่าในกระบวนการสปีดเตอริงจะมีค่าประมาณ 75% และส่วนที่เหลือคือพลังงานที่ใช้ในการผลิตอิเล็กตรอนทุติยภูมิ และทำให้เกิดพลาสมาในระบบซึ่งจะวิ่งชนและกลายเป็นพลังงานความร้อนบนวัสดุรองรับและผนังภาชนะสุญญากาศ พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นบนเป่าสารเคลือบนี้มีค่าสูงมากจนอาจจะละลายเป่าสารเคลือบได้ ทั้งสามารถก่อปัญหาเกิดการแพร่ที่แตกต่างกันของธาตุต่างชนิดในการเคลือบอัลลอย ทำให้ฟิล์มเคลือบมีปริมาณธาตุในอัลลอยแตกต่างจากเป่าสารเคลือบมาก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องติดตั้งระบบหล่อเย็นเข้ากับคาโทดและเป่าสารเคลือบเพื่อป้องกันปัญหาดังกล่าว การหล่อเย็นอาจใช้น้ำหรือน้ำมันเป็นวัสดุหล่อเย็น น้ำมันมีคุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าดีกว่าน้ำและทำให้เกิดการกัดกร่อนของเนื้อวัสดุที่ใช้ทำคาโทดต่ำกว่าน้ำ แต่ประสิทธิภาพในการทำความเย็นน้อยกว่าน้ำและมีราคาแพงรวมทั้งมีความหนืดสูงทำให้ต้องใช้เครื่องสูบลำขนาดใหญ่ และก่อให้เกิดความสกปรกแก่ระบบสุญญากาศได้ง่าย น้ำแม้จะมีความนำไฟฟ้าสูงกว่าและต้องใช้ร่วมกับระบบไฟฟ้าแรงสูงที่คาโทด แต่มีราคาถูก

การหล่อเย็นอาจให้เป่าสารเคลือบสัมผัสโดยตรงกับน้ำโดยชิดกันน้ำรั่วไหลด้วยแผ่นยางระหว่างคาโทดกับแผ่นเป่าสารเคลือบ หรืออาจออกแบบคาโทดปิดด้วยแผ่นปิดหลัง (backing plate) กันน้ำรั่วไหล และติดแผ่นเป่าสารเคลือบโดยการเชื่อมติดเข้ากับแผ่นปิดหลัง การยึดแผ่นเป่ากับแผ่นปิดหลังด้วย สกรูยึดทำให้การระบายความร้อนไม่ดีทุกผิวสัมผัส และทำให้เกิดการโค้งงอของแผ่นเป่าหนีการสัมผัสระบายความร้อนอันทำให้เกิดความเสียหายกับเป่าสารเคลือบได้วัสดุทั่วไปที่ใช้ทำแผ่นปิดหลังของคาโทดคือทองแดงเนื่องจากนำความร้อนได้ดีและต้องมีความหนาเพียงพอในการทนความดันบรรยากาศและความดันน้ำที่ใช้ในการหล่อเย็นโดยไม่เกิดการโป่งนูนออก

ตารางที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นเมื่อใช้กำลังไฟฟ้าค่าต่างๆ ที่ความแตกต่างอุณหภูมิน้ำเข้าและน้ำออกของระบบหล่อเย็นไม่เกิน 10°C ^[4]

Power dissipated (KW)	Water flow rate		Power dissipated (KW)	Water flow rate	
	(liter/min)	(gal/min)		(liter/min)	(gal/min)
2	2.8	0.74	15	21	5.6
4	5.6	1.5	20	28	7.4
6	8.4	2.2	25	35	9.3
8	11.2	3.0	30	42	11.0
10	14.0	3.7			

ในการออกแบบน้ำหล่อเย็นนิยมควบคุมให้อุณหภูมิน้ำเข้าและขาออกแตกต่างกันไม่เกิน 10°C อุณหภูมิน้ำขณะหล่อเย็นควรมีค่าสูงกว่าจุดกลั่นตัวของไอน้ำในอากาศเพื่อป้องกันการจับตัวของไอน้ำขณะคาโทดเปิดออกสัมผัสบรรยากาศ ซึ่งอาจเกิดการลัดวงจรหรือลดความดันลงยากในการเคลือบครั้งต่อไป ความนำไฟฟ้าของน้ำที่ใช้ควรมีค่าต่ำ โดยมีความต้านทานจำเพาะสูงกว่า $10\text{ k}\Omega\text{-cm}$ เพื่อลดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าจากขั้วคาโทดสู่กราวด์ของระบบน้ำหล่อเย็น ปริมาณของน้ำหล่อเย็นต่ำสุดที่ใช้กับระบบหล่อเย็นสัมพันธ์กับกำลังงานไฟฟ้าของระบบสปีดเตอริง (ตารางที่ 2.4)

2. ฉนวนไฟฟ้าแรงสูงและรอยต่อวงจรไฟฟ้า เนื่องจากคาโทดและเป่าสารเคลือบจะต้องเข้ากับศักย์ไฟฟ้าแรงสูง ขณะที่ภาชนะสุญญากาศเป็นกราวด์ ดังนั้นจึงต้องใช้ฉนวนไฟฟ้ากัน ฉนวนนี้ต้องมีคุณสมบัติในการชีระบบสุญญากาศได้ดี อาจใช้ซิลด์โลหะ-เซรามิค หรือใช้ เทฟลอน (TEFLON) และแผ่นยางซิลสุญญากาศร่วมกัน ท่อน้ำต้องใช้ท่ออย่างซึ่งเป็นฉนวนไฟฟ้าและควรให้ความยาวมากสัมพันธ์กับขนาดท่อเพื่อลดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าผ่านน้ำจากคาโทดสู่กราวด์ ถังน้ำหล่อเย็นควรต่อลงกราวด์และขั้วต่อไฟฟ้าแรงสูงควรมีฉนวนหุ้มเพื่อป้องกันอันตราย ส่วนรอยต่อไฟฟ้าทุกจุดควรยึดด้วยโบลท์และนัทขันแน่นหรือเชื่อมติดกัน

3. สนามแม่เหล็ก ระบบปลานาร์ แมกนีตรอน สปีดเตอริงสนามแม่เหล็กจะตั้งฉากกับสนามไฟฟ้าทั้งหมด การกักร่อนเป่าสารเคลือบเกิดขึ้นสูงในบริเวณที่สนามแม่เหล็กมีความเข้มสูง การกักร่อนผิวเป่าสารเคลือบจะเป็นรูปตัววีลึกลงเป็นบางบริเวณ อายุการใช้งานของเป่าสารเคลือบจะสิ้นสุดลงเมื่อร่องลึกปรากฏเท่ากับความหนาของเป่า ดังนั้นการจัดขั้วแม่เหล็กให้มีการเคลื่อนย้ายตำแหน่งได้ย่อมสามารถทำให้การกักร่อนจากกระบวนการสปีดเตอริงกระจายออกทั่วแผ่นเป่าและลดความสิ้นเปลืองจากการใช้เป่าอย่างไม่มีประสิทธิภาพ

สนามแม่เหล็กที่ใช้อาจใช้ได้ทั้งแม่เหล็กถาวรและแม่เหล็กไฟฟ้าโดยติดตั้งไว้ภายนอก แต่แม่เหล็กไฟฟ้าไม่สามารถติดตั้งชิดกับเป่าสารเคลือบได้ เนื่องจากไม่สามารถจุ่มขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้าไว้ในระบบน้ำหล่อเย็นซึ่งมีศักย์ไฟฟ้าค่าเดียวกับคาโทดได้ ดังนั้นจึงอาจติดตั้งไว้ภายนอก