

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับผิวเคลือบกันแสงสะท้อน [4]

อุปกรณ์ทัศนศาสตร์ต่างๆ ที่ถูกผลิตขึ้นมาจากกระจกแบบใดๆ นั้น โดยส่วนมากแล้วจะมีการเคลือบผิวด้วยวัสดุชนิดหนึ่ง เพื่อให้การสะท้อนและการส่งผ่านแสงที่เกิดขึ้นบริเวณผิวหรือขอบของตัวกลานั้นมีการเปลี่ยนแปลง กล่าวคือ เมื่อแสงซึ่งเคลื่อนที่อยู่ในตัวกลางชนิดหนึ่งตกกระทบกับผิว หรือขอบของตัวกลางอีกชนิดหนึ่งซึ่งมีสมบัติเชิงแสงที่แตกต่างกันแล้วนั้น ย่อมมีส่วนของแสงที่สะท้อนกลับไปในตัวกลางอันเดิม และมีส่วนที่ส่งผ่านไปในตัวกลางอันใหม่ซึ่งจะเป็นส่วนที่แสงหักเหตามสมบัติของแสง แต่จะเป็นส่วนมากหรือน้อยนั้นขึ้นกับสมบัติผิวหรือขอบของตัวกลางอันที่แสงตกกระทบเปรียบเทียบกับตัวกลางอันเดิมนั่นเอง

ผิวเคลือบกันแสงสะท้อนชนิด Single layer ที่ถูกทำการเคลือบบนผิววัสดุซึ่งเป็นแก้ว, แก้วควอทซ์ ฯลฯ เมื่อมีแสงมาตกกระทบยังผิวของวัสดุโดยการสะท้อนแสงที่เกิดขึ้นที่รอยต่อระหว่างอากาศ/ฟิล์มบาง กับการสะท้อนที่รอยต่อระหว่างฟิล์มบางและวัสดุเคลือบ หากมุมสะท้อนทั้ง 2 รวมกันแล้วได้ 180° แล้วจะทำให้เกิดการแทรกสอดแบบหักล้างทำให้การสะท้อนของแสงที่เกิดขึ้นถูกทำลายไปเหลือแต่การส่งผ่านแสงนั่นเอง กล่าวคือ การเคลือบผิวด้วยวัสดุกันแสงสะท้อนนี้จะถูกผลิตขึ้นเพื่อลดหรือขจัดการสะท้อนของแสงที่ขอบของตัวกลาง โดยผิวเคลือบกันแสงสะท้อนนี้ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้กันอย่างกว้างขวาง ตัวอย่างเช่น เซลล์สุริยะ ทัศนศาสตร์และกระจก เป็นต้น

2.1.1 ความหนา (d_1)

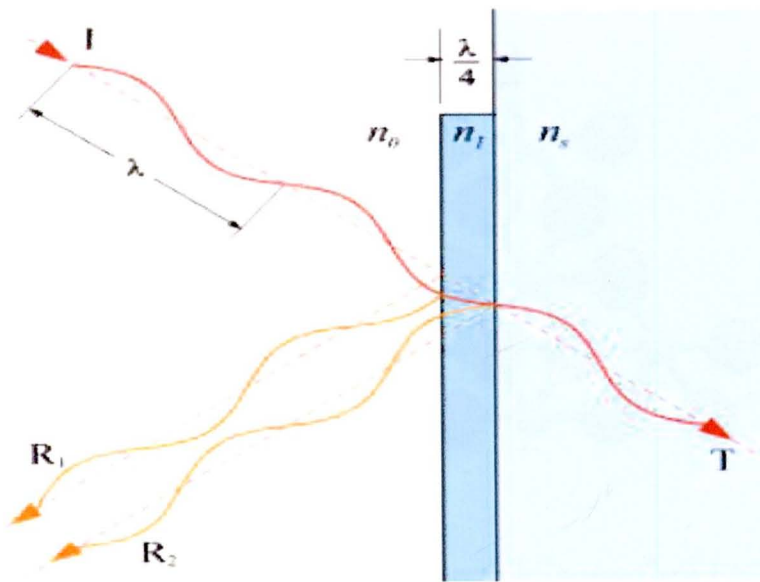
ความหนาชั้นผิวเคลือบกันแสงสะท้อนควรมีค่าที่เป็นไปตามกฎ “1/4 ของความยาวคลื่นแสง” กล่าวคือ ถ้าแสงที่เราพิจารณามีความยาวคลื่นเป็น λ และดัชนีหักเหแสงของชั้นผิวเคลือบกันแสงสะท้อนเป็น n_1 ความหนาที่เหมาะสมของชั้นผิวเคลือบ คือ

$$d_1 = \frac{\lambda}{4n_1} \quad (2.1)$$

2.1.2 ดัชนีหักเหแสง (n_1)

ชั้นผิวเคลือบกันแสงสะท้อนควรมีความโปร่งใสที่ดีและมีดัชนีหักเหแสง n_1 ในอุดมคติ คือ ควรมีค่าเท่ากับค่าเฉลี่ยของผลคูณของค่าดัชนีหักเหแสงของอากาศและของตัวกลางตัวที่ 2 ดังนี้

$$n_1 = \sqrt{n_0 n_2} \quad (2.2)$$

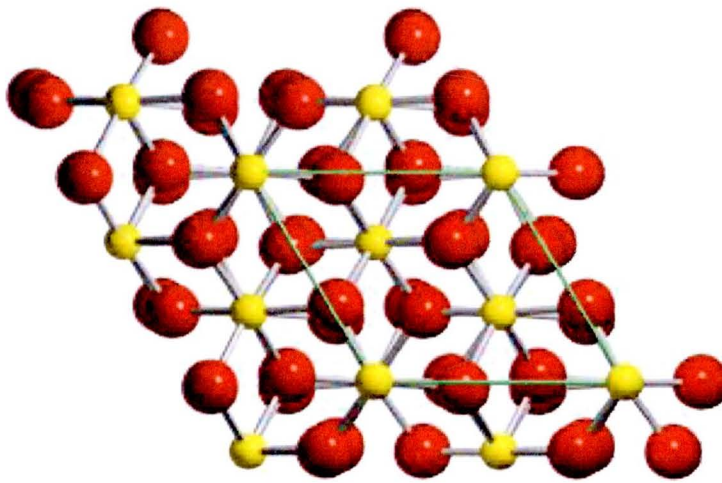


รูป 2.1 ปรากฏการณ์การแทรกสอดของแสงที่เกิดขึ้นในชั้นผิวเคลือบกันแสงสะท้อนที่มีความหนาเท่ากับ $\frac{1}{4}$ ของความยาวคลื่นแสง [17]

ด้วยเงื่อนไขดังกล่าวทั้ง 2 ข้อนี้จะทำให้ความเข้มของแสงแสงสะท้อนมีค่าน้อยที่สุด โดยเงื่อนไขข้อที่ 1 นั้นจะทำให้เฟสของแสงที่สะท้อนที่ผิวบนสุดและที่สะท้อนที่ผิวด้านล่างที่ 2 มีค่าแตกต่างกัน 180° ดังนั้นจึงทำให้แสงที่สะท้อนทั้ง 2 แห่งนั้นไปทำการแทรกสอดแบบหักล้างกัน เมื่อสะท้อนออกจากผิวเคลือบกันแสงสะท้อน จึงทำให้แสงสะท้อนสุทธิมีความเข้มน้อยที่สุด

2.2 ความรู้เบื้องต้นเรื่องอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) [5]

อะลูมิเนียมออกไซด์หรืออะลูมินาเป็นสารประกอบระหว่าง Al กับ O มีสูตรโมเลกุลคือ Al_2O_3 โครงสร้างผลึกของอะลูมิเนียมออกไซด์เป็นแบบ Rhombohedral ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูป 2.2 โครงสร้างผลึกของอะลูมิเนียมออกไซด์ [24]

อะลูมิเนียมออกไซด์มีคุณสมบัติเฉพาะ คือ มีจุดหลอมเหลวประมาณ 2050 องศาเซลเซียส มีความทนไฟสูงมากกว่า 2000 องศาเซลเซียส มีความแข็ง 9 Mohs' scale ทำให้ทนต่อแรงขีดข่วนสูง ทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลันได้ดี เนื่องจากมีอัตราการขยายตัวต่ำ และมีการนำความร้อนได้ดี

2.3 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับนาโนเทคโนโลยี [6]

คำว่า “นาโน” มีรากศัพท์มาจากภาษากรีก แปลว่า “คนแคระ” หมายถึง หนึ่งในพันล้านหน่วย หรือหนึ่งในพันล้านส่วน แต่ที่นิยมเรียกกันจนติดปาก คือ นาโนเมตร (nanometre) ซึ่งหมายถึงสิบกำลังลบเก้าเมตร หรือ 1 ส่วนพันล้านของ 1 m หรือเรียกในอีกชื่อหนึ่งว่า แองสตรอม

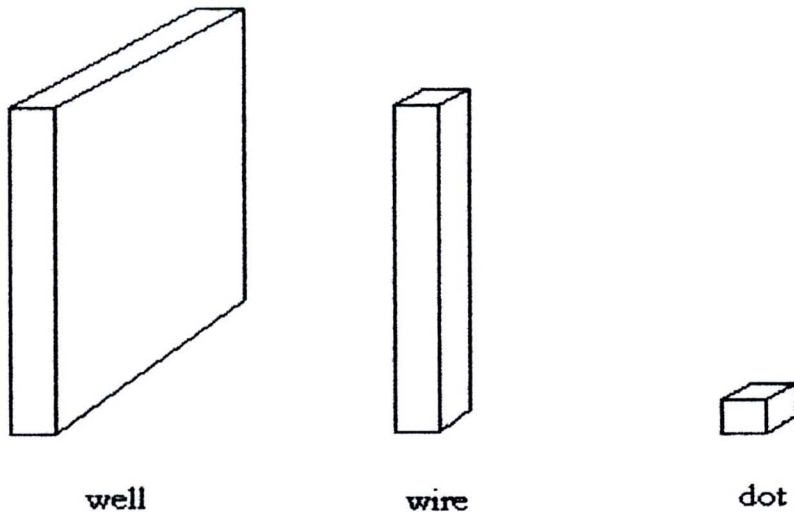
ยูนิต (angstrom unit) ดังนั้น “นาโนเทคโนโลยี” คือ วิทยาการประยุกต์แขนงใหม่ที่ว่าด้วยเรื่องของเทคโนโลยีในการประกอบและผลิตสิ่งต่างๆ ขึ้นมาจากการจัดเรียงอะตอม หรือ โมเลกุลเข้าด้วยกันด้วยความแม่นยำและถูกต้องในระดับนาโนเมตรหรือขนาด 1 ในพันล้านส่วนของ 1 m โดยเป็นการผสมผสานของวิทยาศาสตร์หลายแขนง เช่น ชีววิทยา ฟิสิกส์ ชีวเคมี วิศวกรรมศาสตร์สาขาหุ่นยนต์ และเครื่องจักรกล

นาโนศาสตร์ (nanoscience) หมายถึง การศึกษาหลักการพื้นฐานของโมเลกุลและโครงสร้างขนาด 1 ถึง 100 nm (อักษรย่อ น.ม. –nm) โครงสร้างเหล่านี้เรียกโดยรวมว่า “โครงสร้างนาโน (nanostructures)” โครงสร้างนาโนไม่เพียงเป็นสิ่งมีชีวิตที่มีขนาดเล็กกว่าสิ่งใดๆ ที่มนุษย์เคยประดิษฐ์ขึ้นมาก่อนหน้านี้ แต่ยังเป็นสิ่งที่เล็กจิ๋วที่สุดที่เราสามารถสร้างขึ้นมาได้ ถ้าหากรู้ว่า 1 น.ม. จั๋วขนาดไหน ก็ลองเปรียบเทียบกับผมของคนเราดูจะพบว่า 1 nm มีขนาดประมาณ 1/50,000 ส่วนของเส้นผมของคนเรา หรือเส้นผมมีขนาดประมาณ 50,000 nm หรือเท่ากับอะตอมของไฮโดรเจน 10 ตัวรวมกัน ซึ่งสิ่งเล็กจิ๋วที่สุดที่มนุษย์สามารถมองเห็นได้โดยไม่ต้องมีเครื่องช่วยมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 10,000 nm

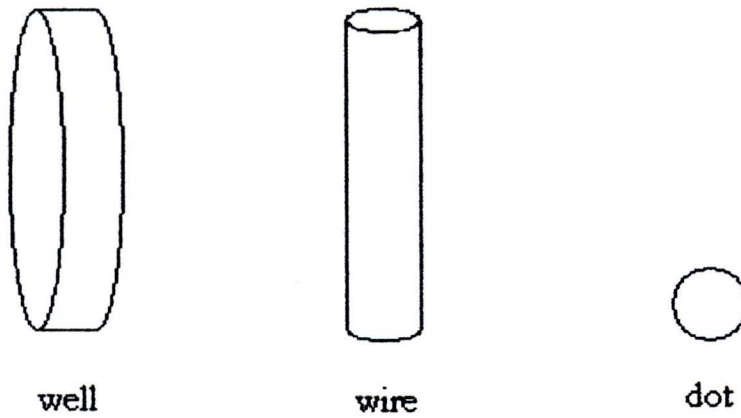
2.4 ลักษณะโครงสร้างทางกายภาพของวัสดุนาโน [7]

นาโนวัสดุเป็นวัสดุที่มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร (หนึ่งในพันล้านเมตร) โดยทั่วไปลักษณะของวัสดุนาโนนั้นจะมีอยู่ 3 แบบคือ

1. quantum well เป็นวัสดุที่มีขนาดเล็กลงในระดับนาโนเมตรเพียงหนึ่งมิติ แต่อีกสองมิติ ยังมีขนาดใหญ่
2. quantum wire เป็นวัสดุที่มีขนาดเล็กลงในระดับนาโนเมตรสองมิติ แต่อีกหนึ่งมิติยังมีขนาดใหญ่
3. quantum dot เป็นวัสดุที่มีขนาดเล็กลงในระดับนาโนเมตรทั้งสามมิติ โครงสร้างในระดับนาโนวัสดุแสดงดังรูปที่ 2.3 และรูปที่ 2.4



รูป 2.3 แสดงโครงสร้างในระดับนาโนที่มีรูปร่างแบบ rectangular



รูป 2.4 แสดงโครงสร้างในระดับนาโนที่มีรูปร่างแบบ curvilinear

2.5 ผลของขนาดที่เกี่ยวข้องกับสมบัติของวัสดุนาโน [7]

เมื่อวัสดุที่มีขนาดเล็กลงในระดับนาโนเมตร จะส่งผลทำให้พื้นที่ผิวมีขนาดเพิ่มมากขึ้น และทำให้สมบัติของสารนั้นเปลี่ยนไป ซึ่งผลเกี่ยวข้องที่สามารถเปลี่ยนสมบัติของวัสดุในระดับ quantum มีดังนี้

1. Size effects
2. Conduction Electrons and Dimentionality

3. Fermi Gas and Density of States
4. Potential Wells
5. Partial Confinement
6. Properties Dependent on Density of States

2.5.1 Size effects

จะกล่าวถึงคุณสมบัติของระบบที่มีขนาดเล็กมากๆ ตัวอย่าง เช่น เซมิคอนดักเตอร์ GaAs มีค่าคงที่แลตทิซ 0.565 nm และมีปริมาตรต่อหนึ่งหน่วยเซลล์เป็น $(0.565)^3 = 0.18 \text{ nm}^3$ ในหนึ่งหน่วยเซลล์จะมี Ga และ As อย่างละ 4 อะตอม ซึ่งจะเรียงตัวกันแบบ face center cubic (FCC) ซึ่งจะทำให้อะตอมของ Ga อยู่ที่ศูนย์กลางของ tetrahedron ของ As ซึ่งจะสร้างกลุ่มของ GaAs_4 ในทำนองเดียวกันก็จะสร้างกลุ่มของ AsGa_4 ด้วย และจะมีจำนวนอะตอมแต่ละชนิดทั้งสิ้น 22 atom/nm³ ดังนั้น 1 quantum dot แบบลูกบาศก์ซึ่งมีขนาด 10 nm จะมีหน่วยเซลล์ทั้งสิ้น 5.56×10^3 หน่วยเซลล์ สำหรับจำนวนอะตอมที่อยู่บนผิวถ้าสารตั้งต้นมีโครงสร้างเป็น FCC และในหนึ่ง quantum dot บรรจุหน่วยเซลล์ได้ทั้งสิ้น n^3 หน่วยเซลล์ จะสามารถหาจำนวนอะตอมบนผิว (N_s) ได้

$$\text{โดย } N_s = 12n^2$$

$$\text{จำนวนอะตอมทั้งหมด } N_T = 8n^3 + 6n^2 + 3n$$

ขนาดของลูกบาศก์ $d = na$ (เมื่อ a คือค่าคงที่ของแลตทิซ GaAs = 0.565 nm, ZnS = 0.541 nm)

อัตราส่วนระหว่างจำนวนอะตอมที่อยู่บนผิวต่อจำนวนอะตอมทั้งหมด (N_s/N_T) จะมีค่ามากเมื่อ n มีค่าน้อยๆ (คือมีขนาดเล็กมาก) ซึ่งเปอร์เซ็นต์ของอะตอมบนผิวที่มากเองทำให้สมบัติของสารที่มีขนาดเล็กมากๆ เปลี่ยนไปจากสารที่มีขนาดใหญ่

ในตัวนำหรือสารกึ่งตัวนำ เมื่ออิเล็กตรอนอิสระเคลื่อนที่จะมีการกระเจิงเกิดขึ้นเนื่องจากสิ่งแปลกปลอมที่อยู่ภายใน ซึ่งระยะทางที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ได้ก่อนการกระเจิงแต่ละครั้ง (เป็นค่าโดยเฉลี่ย) เรียกว่า mean free path ซึ่งค่า mean free path ของโลหะแต่ละชนิดขึ้นอยู่กับปริมาณของสิ่งเจือปน โลหะทั่วไปจะมีค่า mean free path ประมาณ 2-50 nm ในสารตัวอย่างที่มีความ-

บริสุทธิ์มากๆ ก็จะมีควมยาวมากกว่านี้

ค่าสภาพต้านทานของตัวนำและสารกึ่งตัวนำที่เป็น polycrystalline ซึ่งประกอบขึ้นจาก microcrystalline ซึ่งขนาดใหญ่กว่าค่า mean free path จะคล้ายกับการต่อรวมกันของตัวต้านทาน ซึ่งจะทำให้ค่าสภาพต้านทานเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากสิ่งแปลกปลอมภายในแลตทิซจะเป็นตัวขัดขวางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนตัวนำ และจะเป็นข้อจำกัดของ mean free path ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดค่าสภาพต้านทานด้วย แต่ถ้าหากขนาดของ microcrystalline มีค่าเข้าใกล้หรือน้อยกว่า mean free path จะทำให้บางส่วนมีขนาดเล็กเกินกว่าที่จะมีสิ่งแปลกปลอมจากภายใน จึงทำให้สภาพนำไฟฟ้าสูง ตัวอย่างของสิ่งแปลกปลอมเช่น ช่องว่างภายในแลตทิซ ความเสียหายของแลตทิซที่บริเวณขอบ เป็นต้น

Size effects อื่นๆ สำหรับ quantum dot ขนาด 100 nm โดยทั่วไปจะมีอิเล็กตรอนตัวนำเพียง 10^{-1} - 10^3 ตัว ความหมายของอิเล็กตรอน 10^{-1} ตัว คือ ใน quantum dot 10 ก้อน อาจมีปรากฏการณ์ single electron tunneling

2.5.2 Conduction Electrons and Dimensionality

โดยปกติการศึกษาด้านอิเล็กทรอนิกส์ใน 3 มิติ ไม่ว่าขนาดใหญ่หรือเล็กเราจะพิจารณาว่าอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ได้้อย่างอิสระภายในตัวนำ เช่น ลวดทองแดง เนื่องจากขนาดของตัวกลางใหญ่มากเมื่อเทียบกับขนาดของอะตอม แต่ถ้าหากขนาดของลวดทองแดงมีด้านใดด้านหนึ่ง (หรือมากกว่า) เล็กลงจนเข้าใกล้ระยะห่างระหว่างอะตอมภายในแลตทิซ ซึ่งจะทำให้อิเล็กตรอนอาจจะถูกจำกัดขอบเขตของการเคลื่อนที่ ตัวอย่างเช่น พิจารณาแผ่นทองแดงที่มีความยาว 10 cm กว้าง 10 cm แต่มีความหนาเพียง 3.6 nm หรือความยาวเท่ากับ 10 หน่วยเซลล์ 20% ของอะตอมจะอยู่ที่ผิวของทองแดง อิเล็กตรอนตัวนำจะเคลื่อนที่ได้ภายในแผ่นและถูกจำกัดทิศทาง ซึ่งก็คือ quantum well สำหรับ quantum wire รูปร่างจะยาวใน 1 มิติ อิเล็กตรอนจะสามารถเคลื่อนที่ได้เฉพาะตามความยาว และในส่วนของ quantum dot ไม่ว่าจะเป็นรูปร่างลูกบาศก์เล็กๆ ทรงกระบอกสั้นๆ หรือทรงกลมที่มีขนาดอยู่ในหน่วยนาโนเมตร อิเล็กตรอนอิสระก็จะถูกจำกัดการเคลื่อนที่ทั้ง 3 มิติ

2.5.3 Fermi Gas and Density of States

เนื่องจากวัสดุที่มีขนาดเล็กมีผลทำให้เกิดสมบัติดังกล่าว จึงทำให้นักวิจัยสนใจศึกษาเกี่ยวกับ Nano Technology เพื่อสามารถผลิตวัสดุผสมและนำไปประยุกต์ใช้กับสิ่งต่างๆทั้ง ภายนอก เช่น การทำให้วัสดุต่างๆ มีสมบัติตามที่ต้องการ เช่น ให้มีความแข็ง (Hardness) มีความเหนียวและมีน้ำหนักเบา เช่น อุปกรณ์กีฬา วัสดุที่ต้องการความแข็งแรง อ่อนเหนียว และมีน้ำหนักเบา วัสดุในเชิงอุตสาหกรรม ฯลฯ รวมทั้งในด้านการแพทย์และเวชกรรมชีวภาพ

2.6 ประเภทของวัสดุนาโนและเทคนิคการสังเคราะห์

โดยปกติประเภทของวัสดุนาโนแบ่งออกได้เป็นหลายประเภท ขึ้นอยู่กับความต้องการนำไปใช้งาน เช่นวัสดุนาโนบางชนิดใช้เป็นส่วนผสมสำหรับเสริมแรงในเนื้อวัสดุ หรือบางชนิดใช้วัสดุนาโนเพื่อทำฟิล์มบางซึ่งวัสดุนาโนแต่ละประเภทจะมีเทคนิคในการสังเคราะห์ที่แตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับชนิดและเทคนิคการสังเคราะห์

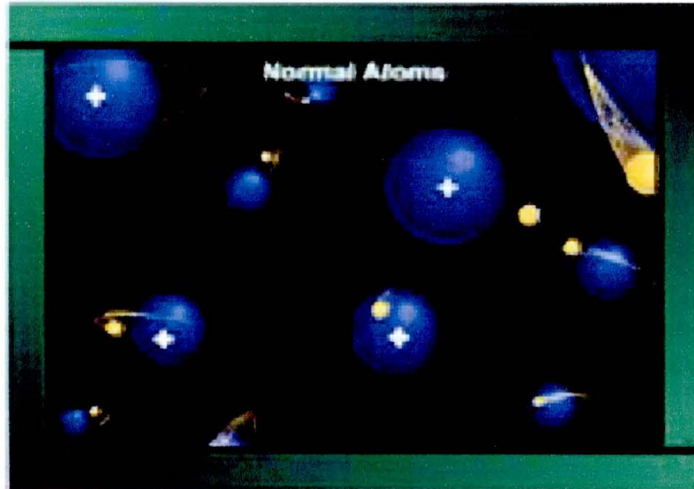
2.6.1 วัสดุนาโนประเภทฟิล์มบาง (nano thin films)

เป็นวัสดุนาโนในรูปแบบ nano well ที่มีขนาดเล็กลงในระดับนาโนเมตรเพียงหนึ่งมิติ แต่อีกสองมิตียังมีขนาดใหญ่ หรือเรียกว่าฟิล์มบาง เช่นเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีความหนาของชั้นอนุภาคในระดับนาโนเมตร ซึ่งเทคนิคในการทำให้เกิดฟิล์มบางมีหลายวิธี เช่น

2.6.1.1 Arc Spray Technique [8]

เป็นเทคนิคการทำให้เกิดฟิล์มบางโดยใช้หลักการอาร์ค (arc) ลวดโลหะด้วยศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูง เพื่อทำให้อิเล็กตรอนที่อยู่บริเวณปลายเส้นลวดโลหะถูกกระตุ้นและชนกับโมเลกุลของอากาศบริเวณปลายเส้นลวดโลหะจนทำให้โมเลกุลของอากาศแตกตัวกลายเป็นไอออนบวกและลบดังรูปที่ 2.5 และรูปที่ 2.6

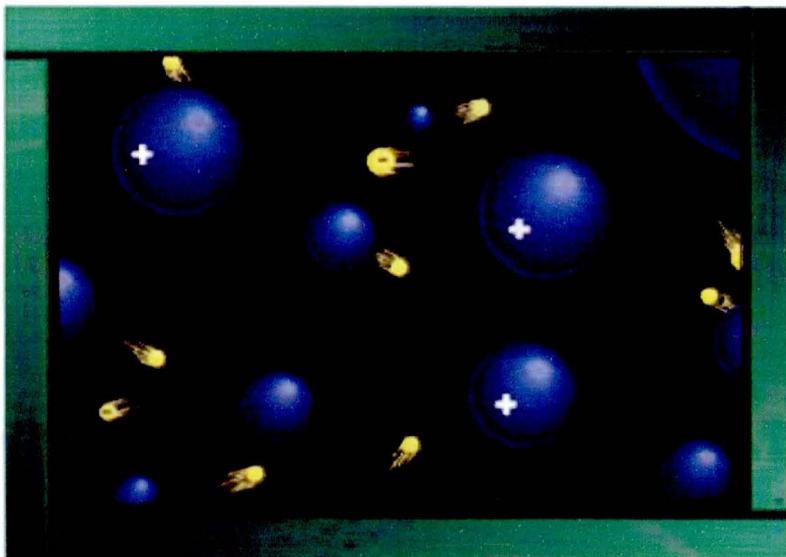
Normal atoms are charge neutral



รูป 2.5 อะตอมของอากาศในสภาวะปกติ [9]

Add some thermal energy

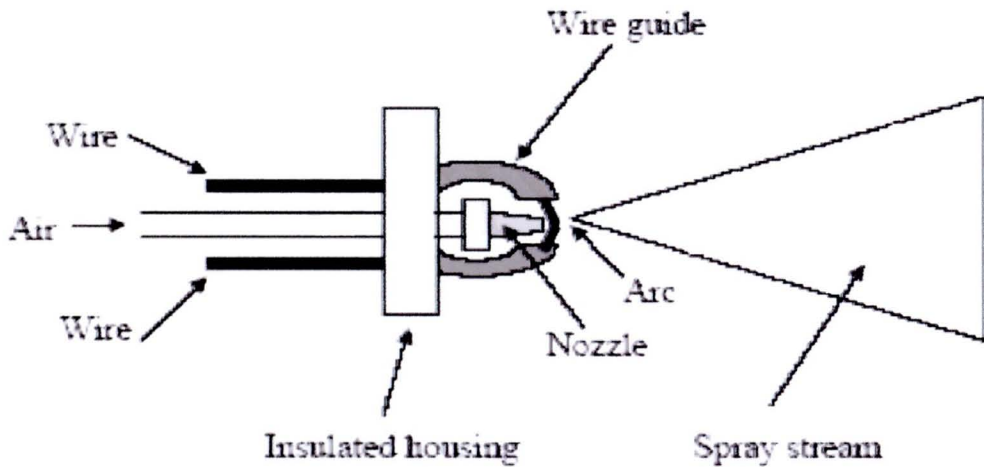
electrons acquire enough energy to escape from atomic binding forces => ions & electrons



รูป 2.6 อะตอมของอากาศเมื่อได้รับพลังงานสูงทำให้อิเล็กตรอนหลุดจากอะตอม [9]

เมื่ออะตอมเกิดการแตกตัว ไอออนบวกจะวิ่งชนปลายเส้นลวดด้านแคโทด ในขณะที่ไอออนลบวิ่งชนบริเวณปลายเส้นลวดด้านแอโนดจนทำให้เกิดความร้อนมากพอที่จะทำให้ก้อนอนุภาคเล็กๆ บริเวณปลายลวดโลหะหลุดออกมาในปริมาณมาก จากรูปที่ 2.7 จะมีท่ออากาศ

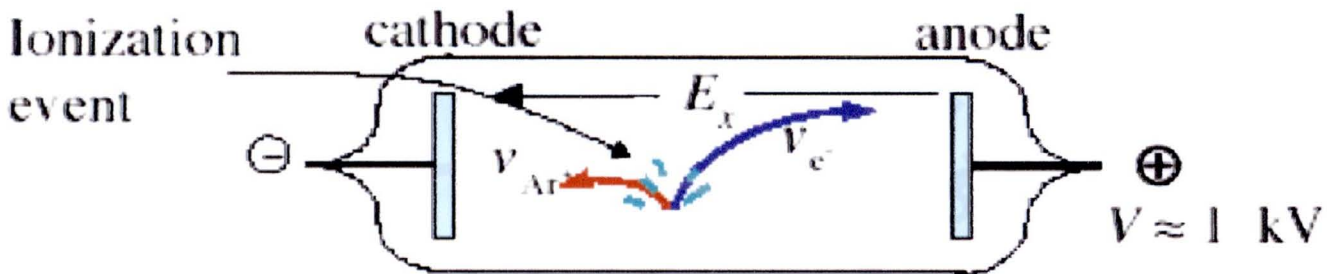
สำหรับพ่นอนุภาคที่หลุดให้เกาะติดกับ substrate ในลักษณะของฟิล์มบาง โดยเทคนิคนี้จะช่วยให้ อนุภาคที่ถูกพ่นเกาะติดแน่นขึ้น



รูป 2.7 เทคนิคของ two-wire arc spray gun [8]

2.6.1.2 Sputtering Technique [9]

เป็นกระบวนการเกิดไอออนของ แก๊สในบรรยากาศ เกิดขึ้นด้วย ความต่างศักย์ไฟฟ้า ระหว่างขั้วแอโนดและขั้วแคโทด ดังรูปที่ 2.8



รูป 2.8 หลักการเกิด ionization ระหว่างขั้วแอโนดกับขั้วแคโทดของแก๊ส

กระบวนการเกิดไอออน (break down) เริ่มขึ้นเมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วแอโนด และขั้วแคโทดมากกว่าพลังงานศักย์ของอะตอมของแก๊ส ดังสมการที่ 2.3



$$V_{CD} \gg V_{bkdn} \Rightarrow \text{ions (e.g. Ar}^+ + e^-) \quad (2.3)$$

$$\text{Ions} \ll 1\% \text{ of atoms.}$$

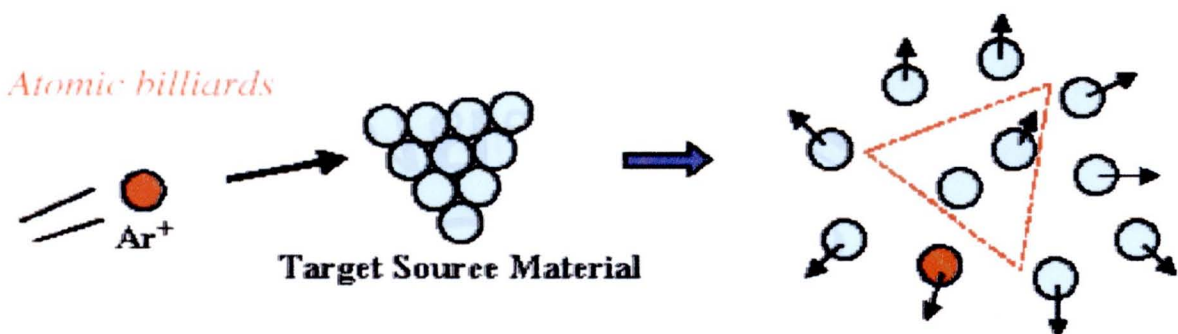
จากรูปที่ 2.8 ถ้าขั้วแคโทดเป็นเป้าโลหะ (target source material) ทำให้ Ar^+ วิ่งเข้าชนเป้าโลหะและอิเล็กตรอน (e^-) วิ่งเข้าชนขั้วแอโนดที่ทำหน้าที่เป็น substrate ด้วยพลังงานจลน์ดังสมการที่ 2.4

$$E_{kin} \approx 1\text{keV} = \begin{cases} = \left(\frac{1}{2}\right) M_{Ar} V_{Ar}^2 = 916 m_g V_{Ar}^2 \\ = \left(\frac{1}{2}\right) M_{gr} V_g^2 = 916 m_g V_g^2 \end{cases} \therefore V_{Ar} = \frac{V_g}{43} \quad (2.4)$$

และมีการถ่ายเทโมเมนตัมดังสมการที่ 2.5

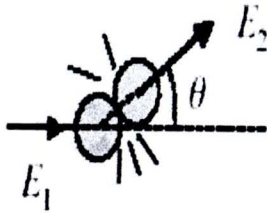
$$\text{Momentum transfer} \begin{cases} P_{Ar} = MV = 1832 \text{ mv}/43 \\ P_g = mv \end{cases} \quad (2.5)$$

กล่าวคือ เมื่อ Ar^+ เคลื่อนที่เข้าชนเป้าโลหะที่ขั้วแคโทดที่แสดงดังรูปที่ 2.9



รูป 2.9 ลักษณะการชนกันของอะตอม

จากรูปที่ 2.9 จะเกิดการชนและถ่ายเทพลังงานแบบยืดหยุ่นขึ้น เป็นไปตามสมการที่ 2.6



$$\frac{E_2}{E_1} \propto \frac{4M_1M_2}{(M_1+M_2)} \cos^2\theta \quad E_2 \text{ greatest for } M_1 \cong M_2 \quad (2.6)$$

กรณีของอิเล็กตรอน (e^-) ที่วิ่งเข้าชน substrate ที่จับแอด โนด เนื่องจากมวลของอิเล็กตรอนมีค่าน้อยกว่ามวลอะตอมของ substrate ($M_1 \ll M_2$) จากสมการที่ 2.6 จะได้

$$\frac{E_2}{E_1} \approx \frac{4M_1}{M_2} \quad (small) \quad (2.7)$$

แต่อิเล็กตรอนจะให้พลังงานจลน์ (E_k) แบบไม่ยืดหยุ่น ดังสมการจะเป็นไปตามสมการที่ 2.8

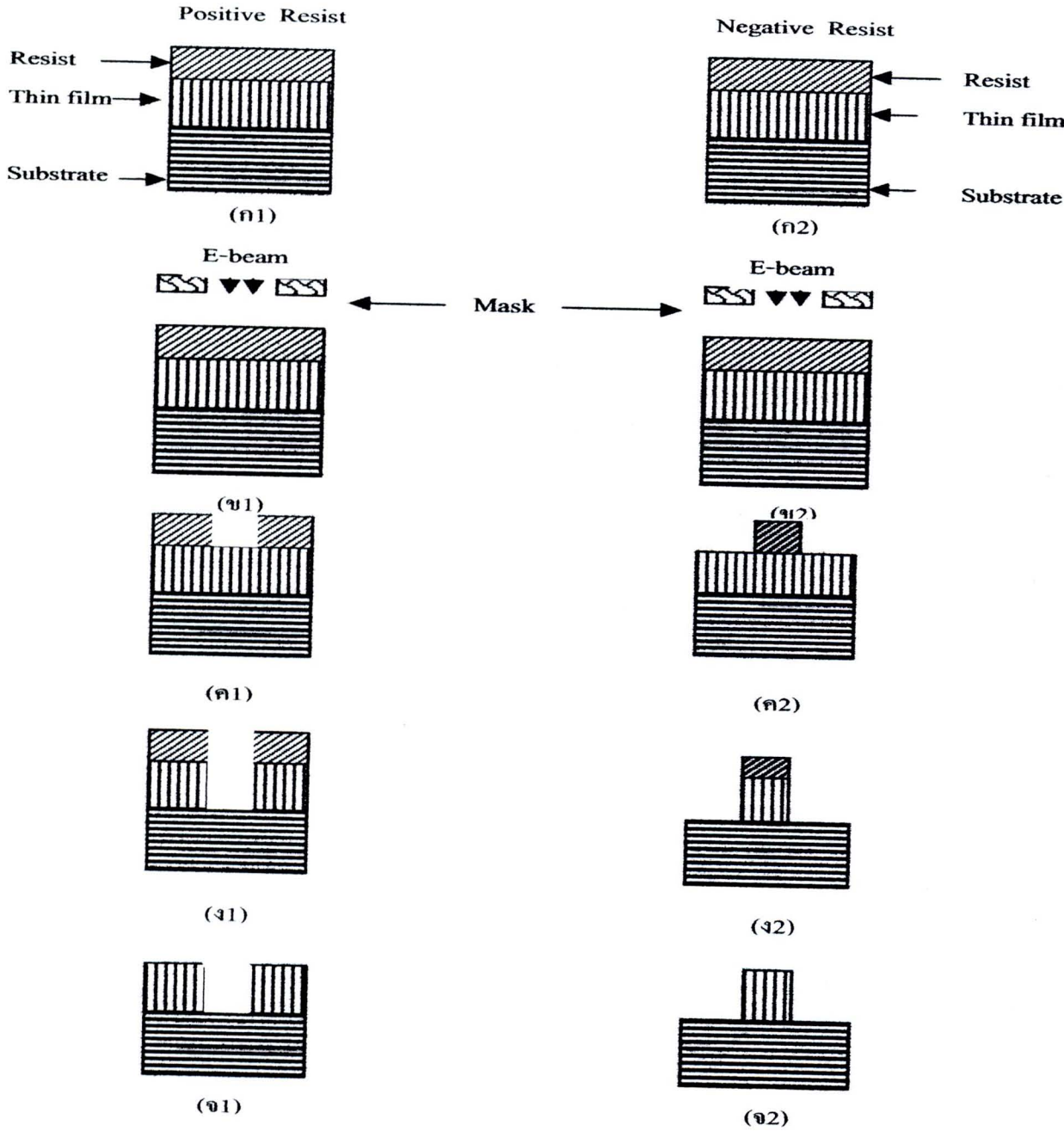
$$\frac{1}{2} M_e V_e^2 \Rightarrow \Delta U \quad (2.8)$$

2.6.2 วัสดุนาโนประเภทอนุภาค (nano dots) [10]

จุดนาโน (nano dot) หรือจุดควอนตัม (quantum dot) คือโครงสร้างขนาดเล็กที่สร้างขึ้นมาจากของแข็ง โดยทั่วไปจะอยู่ในช่วงไม่เกิน 100 nm ในแต่ละคอตประกอบด้วยอะตอมประมาณ $10^3 - 10^9$ atom ซึ่งจะมีค่าพอๆกันกับจำนวนของอิเล็กตรอน ในเซมิคอนดักเตอร์อิเล็กตรอนส่วนใหญ่จะยึดกับนิวเคลียสอย่างหนาแน่นจะมีอิเล็กตรอนอิสระเพียงเล็กน้อยหากอาศัย Current fabrication technology จะทำให้เราสามารถควบคุมขนาดและรูปร่างของคอตได้อย่างแม่นยำ ซึ่ง quantum dot มีรูปร่างหลายแบบ เช่น แท่งสามเหลี่ยมมัน รูปร่างทรงกระบอก หรือเป็นแบบทรงกลม ขึ้นอยู่กับเทคนิควิธีการทำให้เกิดคอต ซึ่งมีหลายเทคนิคดังนี้

2.6.2.1 Lithography Technique [7]

เป็นเทคนิคการสร้างควอนตัมคอต โดยการฉายรังสีผ่านแบบลงบนพื้นผิวที่เคลือบด้วยสารไวต่อรังสี ซึ่งจะถูกล้างออกไปโดยกระบวนการทางเคมี เพื่อให้เกิดควอนตัมคอต สารไวต่อรังสีทั่วไปที่ใช้คือ polymer polymethyl metacrylate ($C_5O_2H_9$)_n ที่มีมวลโมเลกุลอยู่ระหว่าง $10^5 - 10^6$ Da (daltons ; g/mol) กระบวนการ lithography จะทำให้ควอนตัมคอตมีลักษณะเป็นทรงสี่เหลี่ยมวางอยู่บนชั้นสเตรต



รูป 2.10 กระบวนการ Lithography [7] (ก1-ง1) ใช้ resist แบบ positive (ก2-ง2) ใช้ resist แบบ negative

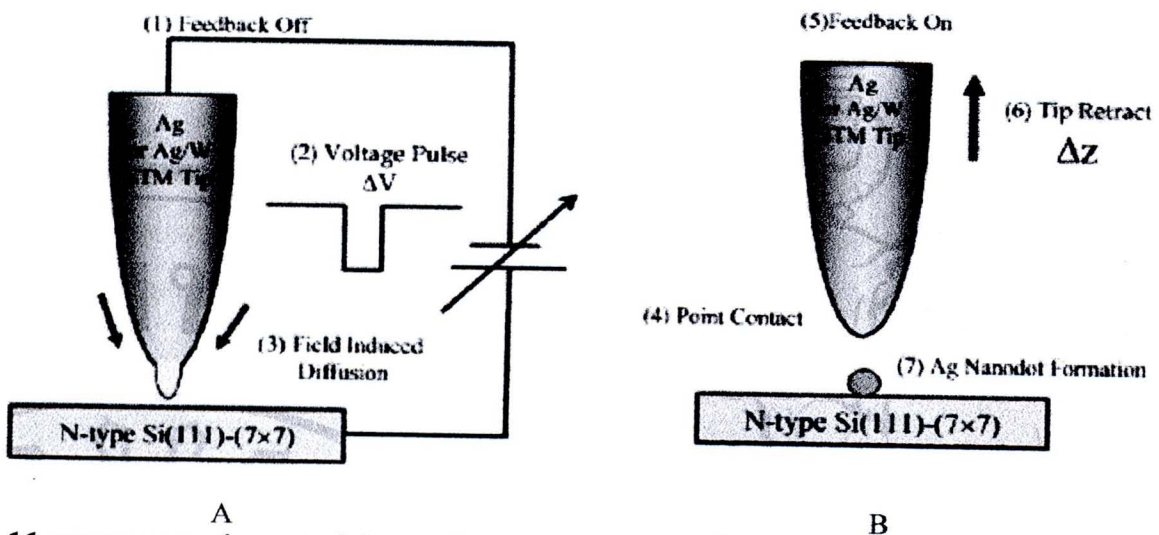
- (ก) ลักษณะฟิล์มบางบนแผ่นรองรับ และมี resist อยู่ด้านบนก่อนที่จะทำการทดลอง
- (ข) ฉายรังสีผ่านแบบลงบนชิ้นงาน
- (ค) ใช้กระบวนการทางเคมีล้าง resist ในส่วนที่โดนแสง สำหรับ resist แบบ positive และส่วนที่ไม่โดนแสงสำหรับ resist แบบ negative ออกไป

- (ง) ลักษณะชิ้นงานที่ได้หลังจากล้างฟิล์มบางในส่วนที่ไม่มี resist ปิดออกไป
- (จ) ชิ้นงานที่ได้หลังจากล้าง resist ออกไป ซึ่งจะได้จุดควอนตัมตามตำแหน่งที่ออกแบบไว้ ซึ่งจะเหมือนกับ mask

ขั้นแรกของกระบวนการ lithography คือ การวาง resist ลงบนชิ้นงานตามรูปที่ (ก) หลังจากนั้นชิ้นงานจะถูกยิงด้วยลำอิเล็กตรอนผ่าน mask ซึ่งมีลวดลายต่างๆ ซึ่งจะทำให้สารไวต่อรังสีโคนอิเล็กตรอนเฉพาะในส่วนที่ต้องการดังรูป (ข) ขั้นที่ 3 จะเป็นการใช้กระบวนการทางเคมีเพื่อกำจัดสารไวต่อรังสีออกไปดังรูป (ค) ขั้นที่ 4 กำจัดส่วนของฟิล์มบางในบริเวณที่ไม่มี mask ปิดออกไปและขั้นตอนสุดท้ายส่วนของ mask ก็จะถูกกำจัดออกไป จึงเหลือเฉพาะจุดควอนตัมทรงสี่เหลี่ยมในบริเวณที่ออกแบบไว้

2.6.2.2 STM-Based Fabrication Technique

D. Fujita และ T. Kumakura [11] ได้ทำการสร้างควอนตัมดอทโดยอาศัย tip ของกล้องจุลทรรศน์ทะลวงกวาด (Scanning Tunneling Microscopy หรือ STM) จะมีส่วนของ tip บางส่วนไปเกาะอยู่บนสับสเตรต หลังจากให้พัลส์ของความต่างศักย์ในการทดลองนี้เป็นการทำให้เกิดควอนตัมดอทของเงินลงบนผิวของ Si(111)-(7×7)



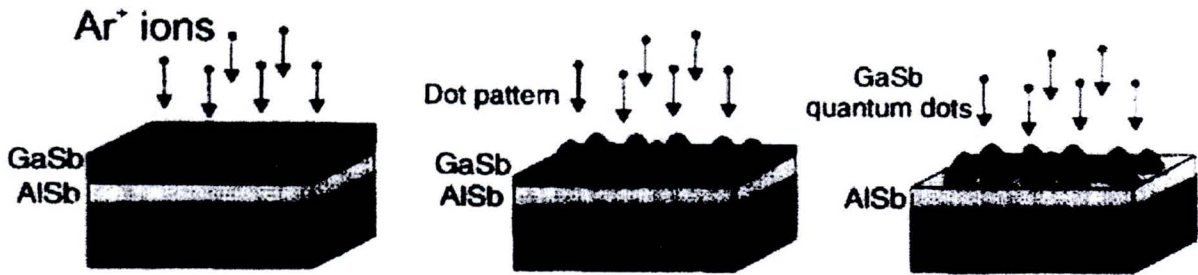
รูป 2.11 กระบวนการ tip material transfer mechanism ของเงินลงบน n-Si (111) โดยการให้พัลส์ของความต่างศักย์ ซึ่งกระบวนการนี้ทำในระบบ ultra high vacuum (UHV) [11]

- (A) ให้พัลส์ความต่างศักย์แก่ tip และขับเคลื่อนหลังจากปีดระบบ feedback control ส่วนที่ยาวขึ้นมากพอที่จะสัมผัสกับผิวของขับเคลื่อนในระหว่างการจ่ายให้ความต่างศักย์ ΔV
- (B) เมื่อสิ้นสุดการจ่ายพัลส์ก็จะทำให้ระบบ feedback control กลับมาทำงานอีกครั้ง ซึ่งจะยก tip ขึ้นให้หลุดจากผิวของขับเคลื่อน ทำให้เกิดควอนตัมคอตขึ้นบนผิวของซิลิกอน

จากรูปที่ 2.11 กระบวนการ tip - material transfer จาก tip ของเงินลงบนผิว Si (111) ทำได้โดยวาง tip เหนือขับเคลื่อนโดยใช้ระบบ feedback control ซึ่งโดยทั่วไปจะอยู่ที่ความสูงประมาณ 1 มิลลิเมตร หลังจากปีดระบบ feedback control จ่ายพัลส์ของความต่างศักย์ให้ tip ตลอดช่วงเวลาของพัลส์จะมี tunneling current เกิดขึ้นซึ่งสามารถวัดได้โดยกล้องจุลทรรศน์ออสซิลโลสโคป ช่องว่างระหว่าง tip และขับเคลื่อนจะลดลงเรื่อยๆ เนื่องจากส่วนของ tip ที่ยาวขึ้น เมื่อระยะห่างอยู่ในระยะที่เหมาะสม สังเกตจากกระแส μA ส่วนปลายของ tip จะแพร่ไปเกาะติดอยู่ที่ผิวของซิลิกอน เมื่อ tip ถูกยกขึ้นก็จะทำให้เกิดควอนตัมคอตบนผิวของซิลิกอนซึ่งจะไม่หลุดออกมา เนื่องจากพันธะเคมีระหว่างอะตอมของเงินและอะตอมของซิลิกอนยึดเกาะไว้

2.6.2.3 Iron Sputtering Technique

S.Facsko [12] และคณะได้ทำการฟาบรีเคตควอนตัมคอตขึ้นโดยใช้ Molecular Beam Epitaxy (MBE) ฉายลงบนผิวของ GaSb ซึ่งวางอยู่บนขับเคลื่อนชนิดอื่น (AlSb , GaAs) Ar^+ ที่มีพลังงานระหว่าง 100 eV - 2 keV จะถูกปล่อยลงสู่ผิวของขับเคลื่อนด้วยอัตรา $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ การทดลองจะทำที่อุณหภูมิ 60°C และ -100°C โดยหล่อเย็นด้วยไนโตรเจนเหลว ลักษณะของควอนตัมคอตที่เกิดขึ้นบนผิวของ GaSb ขึ้นอยู่กับเวลาที่ใช้ในการฉายไอออน ทำให้ควอนตัมคอตที่ได้มีขนาดเฉลี่ย 26 nm และมีความหนาแน่น $6 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ กระบวนการ fabrication ควอนตัมคอตสามารถแสดงดังรูปที่ 2.10



รูป 2.12 หลักการเกิดควอนตัมดอทโดยอาศัยหลักการ Iron Spttering [12]

ควอนตัมดอทจะเริ่มก่อตัวหลังจากยิงไอออน ขนาดและความสูงของควอนตัมดอทจะเพิ่มขึ้นตามเวลาที่ใช้ของไอออนในขณะที่ความหนาแน่นของควอนตัมดอทยังคงที่ หลังจากยิงไอออน 400 วินาที โครงสร้างพื้นผิวจะก่อตัวเป็น close-packed hexagonal

2.7 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง

สำหรับข้อมูลของการศึกษาการเตรียมฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ซึ่งมีสมบัติกันสะท้อนสามารถสรุปสาระสำคัญได้ดังนี้

ในปี ค.ศ. 2004 Z.W. Zhao และคณะ [13] ได้ทำการทดลองศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิการอบอ่อนที่มีต่อสมบัติเชิงแสงและ โครงสร้างของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์ที่เตรียมจากวิธีการแคโทดิกอาร์กในสุญญากาศแบบมีฟิลเตอร์ โดยพบว่าเมื่อใช้อุณหภูมิที่ใช้ในการอบอ่อนสูงขึ้นจะส่งผลให้สมบัติเชิงแสงของฟิล์มบางดีขึ้น ซึ่งจากการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิการอบอ่อน 600 องศาเซลเซียสนั้นจะส่งผลให้ฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์มีค่าการส่งผ่านของแสงที่สูงที่สุด อีกทั้งโครงสร้างของฟิล์มบางที่ได้นั้นยังคงเป็นออสัณฐานและมีพื้นผิวที่เรียบขึ้นอีกด้วย แต่อย่างไรก็ตามก็พบว่าเมื่อทำการอบอ่อนที่อุณหภูมิสูงกว่า 900 องศาเซลเซียส แล้วจะส่งผลให้สมบัติเชิงแสงและ โครงสร้างของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์นั้นแย่ลง

ต่อมาในปี ค.ศ. 2006 Naoko Yamaguchi และคณะ [14] ได้ทำการศึกษาสมบัติกันสะท้อนของฟิล์มบางอะลูมินาที่มีลักษณะคล้ายดอกบนชั้นสเตรคซึ่งเป็นแก้วซิลิกาโซดาไลม์ที่

เตรียมได้จากวิธีการโซล-เจลและการแช่น้ำร้อน พบว่ามีการเกิดผลึกนาโนของ pseudoehmite บนพื้นผิวฟิล์ม ทั้งความสะท้อนในช่วงความยาวคลื่น 360-620 นาโนเมตร ของฟิล์มหลังจากการนำไปแช่น้ำร้อนเป็นเวลา 30 นาที นั้นมีค่าน้อยกว่า 0.5% รวมไปถึงความหยาบผิวของฟิล์มบางอะลูมิเนียมออกไซด์นั้นจะน้อยลงด้วย

สำหรับข้อมูลของการศึกษาเกี่ยวกับการเตรียมฟิล์มบางนาโนที่ได้จากกระบวนการสปาร์ค นั้นสามารถสรุปสาระสำคัญได้ ดังนี้

ในปี ค.ศ. 2007 T. Kumpika และคณะ [15] ได้ทำการศึกษาถึงสมบัติเชิงแสงและเชิงไฟฟ้าของฟิล์มบางอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์บนควอตซ์ซึ่งเตรียมจากกระบวนการสปาร์ค โดยทำการสปาร์คควอตซ์กับขั้วสเตรตที่เป็นควอตซ์ จำนวน 50-200 ครั้ง ด้วยความต่างศักย์สูงประมาณ 10 กิโลโวลต์ในสภาวะบรรยากาศปกติ โดยมีอัตราการสะสมของฟิล์มเป็น 1 นาโนเมตรต่อการสปาร์ค 1 ครั้ง หลังจากการตรวจสอบด้วยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์, สเปกโทรสโกปีแบบรามาน, UV-vis spectrophotometry และ ionoluminescence ที่อุณหภูมิห้อง พบว่าเมื่อนำฟิล์มบางอนุภาคนาโน ซิงค์ออกไซด์มาทำการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 400-800 องศาเซลเซียส จะปรากฏผลการปลดปล่อยพลังงานที่ความยาวคลื่น 483 (แสงสีเขียว) และ 650 (แสงสีส้มแดง) นาโนเมตร อีกทั้งสภาพด้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางนั้นเป็นสัดส่วนกับความเข้มของการปลดปล่อยพลังงานของแสงสีส้มแดงด้วย

ต่อมาในปีเดียวกัน W. Thongsuwan และคณะ [16] ได้ทำการศึกษาถึงสมบัติโฟโตแคตาไลติกของอนุภาคคอลลอยด์นาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมได้จากกระบวนการสปาร์ค โดยอนุภาคนาโนไททาเนียมออกไซด์ที่ได้หลังจากการสปาร์ควัตถุไททาเนียมในน้ำเป็นเวลา 1-5 ชั่วโมง มีขนาดอนุภาคประมาณ 1-5 นาโนเมตร และหลังจากการตรวจสอบด้วยเทคนิครูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนและสเปกโทรสโกปีแบบรามาน พบว่าอนุภาคนาโนคอลลอยด์ไททาเนียมออกไซด์ที่ได้หลังถูกนำไปอบอ่อนที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส จะปรากฏเฟสอะนาเทสเกิดขึ้น แต่อย่างไรก็ตามหากทำการอบอ่อนที่อุณหภูมิต่ำกว่า 500 องศาเซลเซียส แล้วจะส่งผลให้มีการเปลี่ยนเฟสจากอะนาเทสไปเป็นรูไทล์เกิดขึ้นได้