

## บทที่ 2

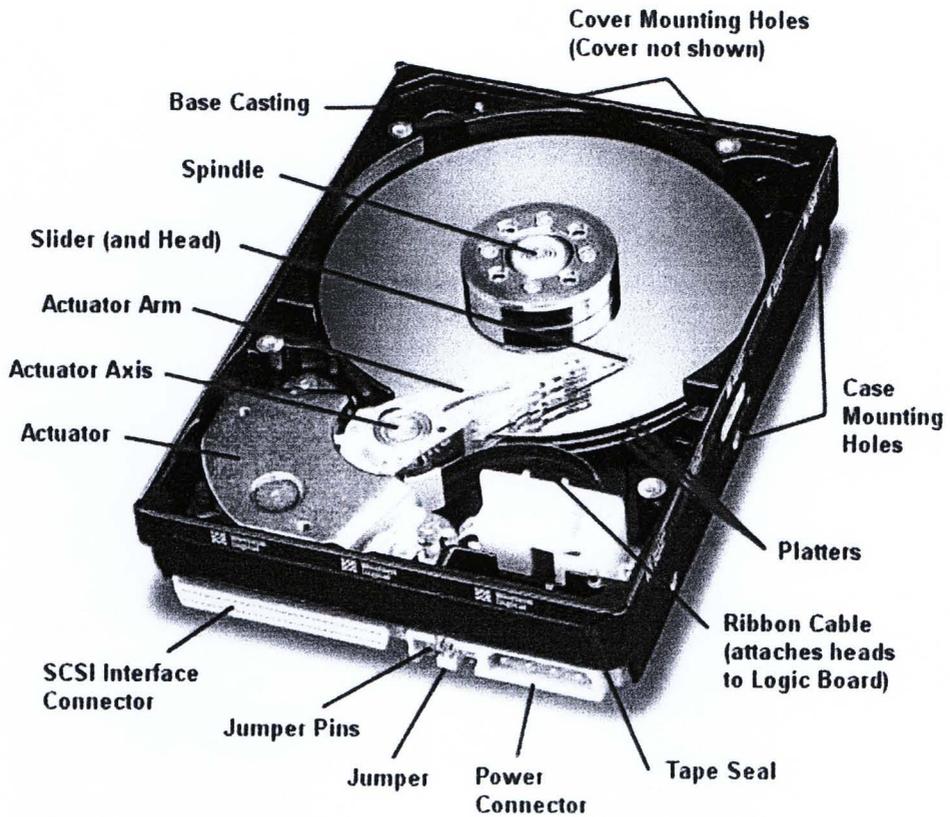
### ปริทัศน์วรรณกรรม

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ในการปรับปรุงอายุการใช้งานของจานแก้วที่ใช้ในเครื่องวัด Flying height และการเพิ่ม Sensitivity ในการวัด Flying height โดยใช้ดิสก์ที่พัฒนาขึ้น ดังนั้นในการที่จะสามารถทำงานวิจัยให้บรรลุจุดประสงค์ได้นั้นจำเป็นต้องมีการศึกษาในด้านต่างๆที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยเช่น ส่วนประกอบต่างๆของฮาร์ดดิสก์ในหัวข้อที่ 2.1 เพื่อที่จะทราบถึงชื่อเรียกของส่วนประกอบต่างๆที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยและหลักการทำงานเบื้องต้นของฮาร์ดดิสก์ จากนั้นเพื่อที่จะทราบถึงข้อจำกัดในการเลือกแนวทางที่จะใช้ปรับปรุงจานแก้วเพื่อเพิ่มอายุการใช้งานและ Sensitivity ได้จึงต้องศึกษาในส่วนของหลักการในการวัดและคำนวณ Flying height ของเครื่องวัด Flying height ในหัวข้อที่ 2.2 ซึ่งหลังจากกำหนดแนวทางได้แล้วจึงทำการศึกษาในส่วนของวัสดุที่จะนำมาใช้ในหัวข้อที่ 2.3 และวิธีที่จะใช้ในการสร้างดิสก์ตามแนวทางที่กำหนดในหัวข้อที่ 2.4 ซึ่งจานแก้วหลังจากผ่านการปรับปรุงอายุการใช้งานและ Sensitivity แล้วยังต้องสามารถนำมาใช้วัด Flying height ได้อย่างถูกต้องด้วยซึ่งจากการศึกษาในส่วนของหลักการในการวัด Flying height นั้นพบว่าค่าดรรชนีหักเหของจานแก้วนั้นมีผลต่อความถูกต้องในการวัด Flying height ดังนั้นจึงต้องมีการศึกษาในส่วนของการวัดดรรชนีหักเหโดยใช้เครื่องมือในการวัดในข้อที่ 2.5 จากนั้นทำการศึกษาในส่วนของทดสอบความแข็งแรงเพื่อที่จะวัดอายุการใช้งานของจานแก้วเปรียบเทียบกับจานแก้วที่ผ่านการปรับปรุงอายุการใช้งานแล้วในหัวข้อที่ 2.6

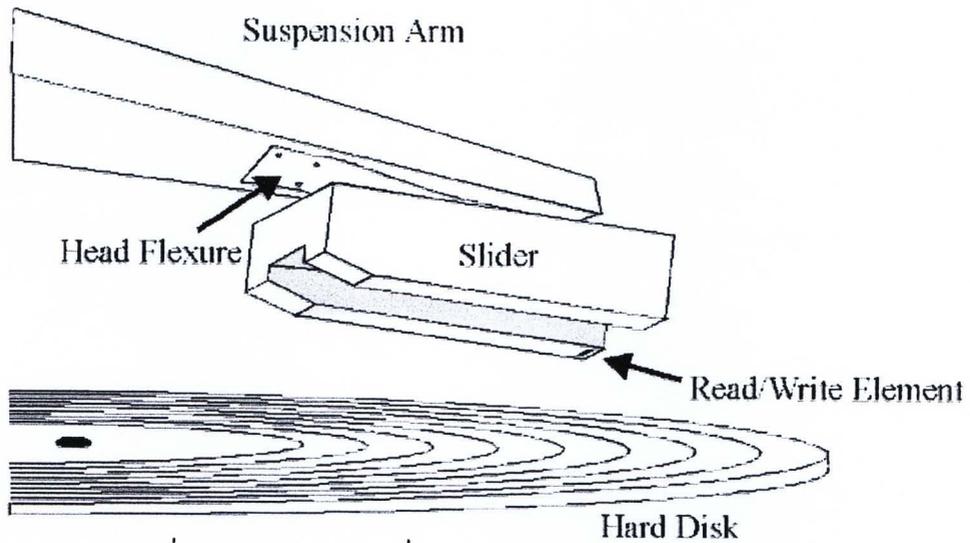
#### 2.1 ฮาร์ดดิสก์

##### 2.1.1 ส่วนประกอบสำคัญของฮาร์ดดิสก์ที่ใช้ในการอ่านและเขียนข้อมูล

ฮาร์ดดิสก์คืออุปกรณ์ที่สำคัญใช้เก็บข้อมูลซึ่งสามารถเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์โดยผ่าน มาเธอร์บอร์ด (Mother board) ทำให้ผู้ใช้สามารถบันทึกข้อมูลต่างๆเช่น ไฟล์เพลง ไฟล์รูปภาพ หรือ ไฟล์เอกสารสำคัญอื่นๆ [8] ได้ลักษณะโดยรวมของฮาร์ดดิสก์ได้แสดงไว้ดัง รูปที่ 2.1 [9] ฮาร์ดดิสก์ประกอบด้วยส่วนสำคัญในการอ่านและเขียนข้อมูลคือหัวอ่าน/เขียน (Head-slider) และแผ่นจานแม่เหล็ก (Magnetic disk, platter) ซึ่งตำแหน่งของหัวอ่าน/เขียนและแผ่นจานแม่เหล็กได้แสดงไว้ดัง รูปที่ 2.2 [10]



รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบของฮาร์ดดิสก์ [9]



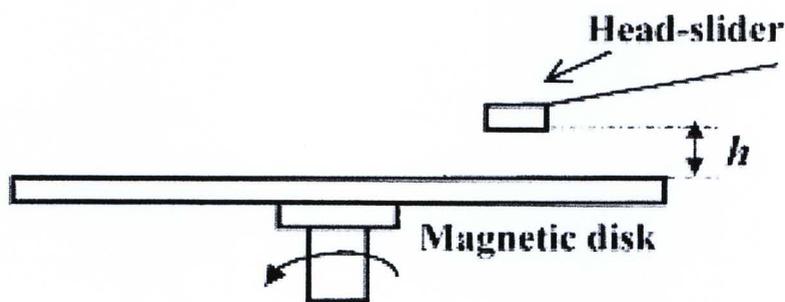
รูปที่ 2.2 หัวอ่าน/เขียนที่บินอยู่เหนือแผ่นจานแม่เหล็ก [10]

จะเห็นได้ว่าหัวอ่าน/เขียนจะบินอยู่บนแผ่นจานแม่เหล็กที่หมุนด้วยความเร็ว 5400 ถึง 7200 รอบต่อนาที [11] ซึ่งการหมุนอย่างรวดเร็วของแผ่นจานทำให้หัวอ่าน/เขียนแยกห่างจาก

ผิวงานด้วยแรงดันที่เกิดจากอากาศที่ไหลผ่านหัวอ่าน/เขียน [12] ในขณะที่อ่านและเขียนข้อมูล โดยระยะห่างระหว่างหัวอ่าน/เขียนและแผ่นจานแม่เหล็กหรือเรียกว่า Flying height

## 2.2 การวัดระยะห่างระหว่างหัวอ่าน/เขียนและแผ่นจานแม่เหล็ก

Flying height หรือระยะห่างระหว่างหัวอ่าน/เขียนและแผ่นจานแม่เหล็กไดอะแกรมแสดงถึง Flying height แสดงไว้ดังรูปที่ 2.3 [13] ซึ่ง Flying height นั้นเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญมากโดยที่ฮาร์ดดิสก์จะสามารถอ่านหรือบันทึกข้อมูลได้ก็ขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์นี้ยิ่งไปกว่านั้น Flying height ยังสำคัญต่อการเพิ่มความจุการบันทึกข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ โดยที่ในปัจจุบันฮาร์ดดิสก์ส่วนมากจะมี Flying height ต่ำกว่า 25 นาโนเมตรและมีแนวโน้มว่าจะลดลงไปที่ 5 ถึง 10 นาโนเมตรในอนาคตเพื่อที่จะเพิ่มความจุในการบันทึกข้อมูลต่อแผ่นจานแม่เหล็ก เมื่อระยะห่างระหว่างหัวอ่าน/เขียนและแผ่นจานแม่เหล็กนั้นใกล้กันมากการสัมผัสหรือชนกันของหัวอ่าน/เขียนและแผ่นจานแม่เหล็กนั้นเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการในขณะการทำงานของฮาร์ดดิสก์ เพราะจะทำให้อายุการใช้งานของฮาร์ดดิสก์ลดลงดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการวัด Flying height อย่างแม่นยำทั้งในกระบวนการออกแบบและกระบวนการผลิตฮาร์ดดิสก์ [5] เครื่องวัด Flying height ในปัจจุบันจะใช้จานแก้วใสแทนแผ่นจานแม่เหล็กและวัด Flying height จากการวิเคราะห์ปรากฏการณ์การแทรกสอดของแสงระหว่างจานแก้วและหัวอ่าน/เขียนซึ่งหนึ่งในวิธีการวัด Flying height ที่นิยมในอุตสาหกรรมคือ Intensity interferometry [6]

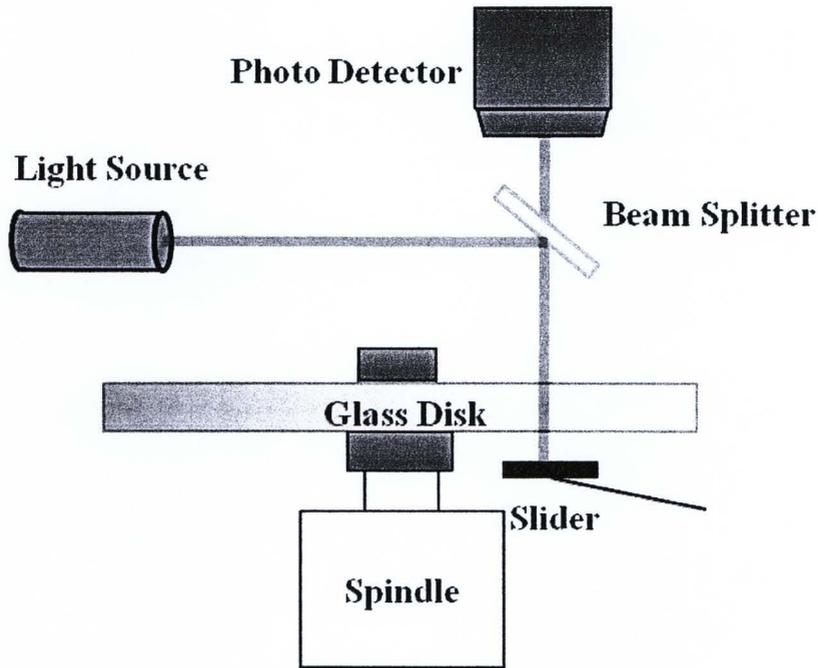


รูปที่ 2.3 ไดอะแกรมแสดงถึง Flying height หรือความสูง ( $h$ ) ที่หัวอ่าน/เขียนบินอยู่เหนือแผ่นจานแม่เหล็ก [13]

### 2.2.1 เครื่องวัด Flying height แบบ Intensity interferometry

เครื่องวัด Flying height แบบ Intensity interferometry มีลักษณะและอุปกรณ์ดังรูปที่ 2.4 [6] โดยจะจำลองลักษณะการบินของหัวอ่าน/เขียนในการใช้งานจริงของฮาร์ดดิสก์แต่ใช้จาน

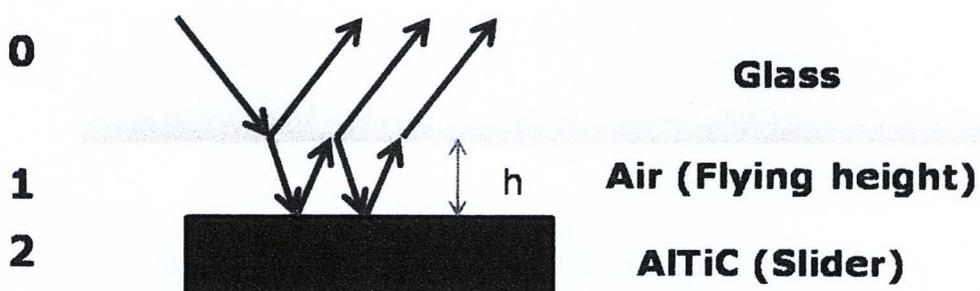
แก้วใสแทนแผ่นจานแม่เหล็กแสงจากแหล่งกำเนิดจะสะท้อนที่ผิวของจานแก้วและหัวอ่าน/เขียน และกลับมาที่ Photo detector เพื่อทำการวิเคราะห์และวัด Flying height จากปรากฏการณ์การแทรกสอดของแสงระหว่างหัวอ่าน/เขียนและจานแก้ว [14]



รูปที่ 2.4 ไดอะแกรมของเครื่องวัด Flying height แบบ intensity interferometry

### 2.2.2 การคำนวณ Flying height ด้วยวิธี Intensity interferometry เมื่อใช้จานแก้ว [6]

จากรูปที่ 2.4 [6] แสงที่ใช้ในการวัดเป็นแสงที่ทำมุมตั้งฉากกับผิวของจานแก้วซึ่งที่รอยต่อระหว่างหัวอ่าน/เขียนและจานแก้วแสงจะสะท้อนกลับไปที่แสดงไว้ดังรูปที่ 2.5 โดยที่จะพิจารณาแสงที่สะท้อนกลับออกมาจากรอยต่อ (Interface) ระหว่างชั้นของแก้วและอากาศกับรอยต่อของชั้นอากาศและหัวอ่าน/เขียน (AITiC Slider)



รูปที่ 2.5 ลักษณะการสะท้อนของแสงที่รอยต่อระหว่างหัวอ่าน/เขียนและจานแก้ว

ซึ่งในกรณีนี้ความเข้มของแสงที่สะท้อนออกมาจากรอยต่อระหว่างหัวอ่าน/เขียนและจานแก้ว สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.1) ซึ่งสามารถดูที่มาของสมการเพิ่มเติมได้ที่ภาคผนวก ก.

$$I_s = I_0 \left[ \frac{r_{01} + r_{12} e^{2i\beta_1}}{1 + r_{01} r_{12} e^{2i\beta_1}} \right]^2 \quad \text{--- (2.1)}$$

โดยที่ตัวแปรต่างๆสามารถคำนวณได้ตามสมการต่อไปนี้

$$\beta_1 = 2\pi \left( \frac{h}{\lambda} \right) n_1 \quad \text{--- (2.2)}$$

$$r_{01} = \frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1} \quad \text{--- (2.3)}$$

$$r_{12} = \frac{n_1 - (n_2 + ik_2)}{n_1 + (n_2 + ik_2)} \quad \text{--- (2.4)}$$

โดยที่  $h$  คือ Flying height

$\lambda$  คือ ความยาวคลื่นแสง

$n_0$  คือ ดรรชนีหักเหของจานแก้ว

$n_1$  คือ ดรรชนีหักเหของอากาศ

$n_2 + ik_2$  คือ ดรรชนีหักเหของหัวอ่าน/เขียน

$r_{01}$  คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงที่บริเวณจานแก้วและอากาศ

$r_{12}$  คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงที่บริเวณอากาศและหัวอ่าน/เขียน

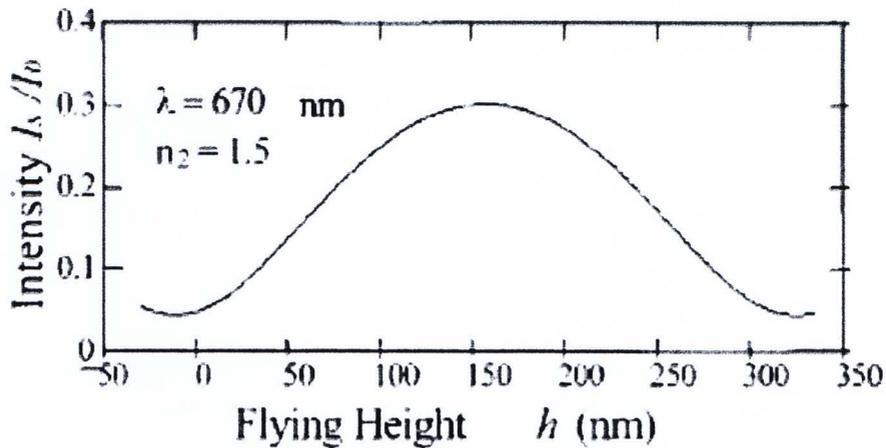
$\beta_1$  คือ การเปลี่ยนแปลงของเฟสเนื่องจากแสงเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่ 1

$I_0$  คือ ความเข้มแสงที่ตกกระทบจานแก้ว

$I_s$  คือ ความเข้มแสงที่สะท้อนออกมาจากรอยต่อระหว่างหัวอ่าน/เขียนและจานแก้ว

กำหนดให้ดรรชนีหักเหของของอากาศ จานแก้ว และ หัวอ่าน/เขียนเป็น 1, 1.5 และ  $2.2+0.4i$  ตามลำดับและใช้ความยาวคลื่นเท่ากับ 670 นาโนเมตร Flying height อยู่ในช่วง 0 ถึง 350 นา

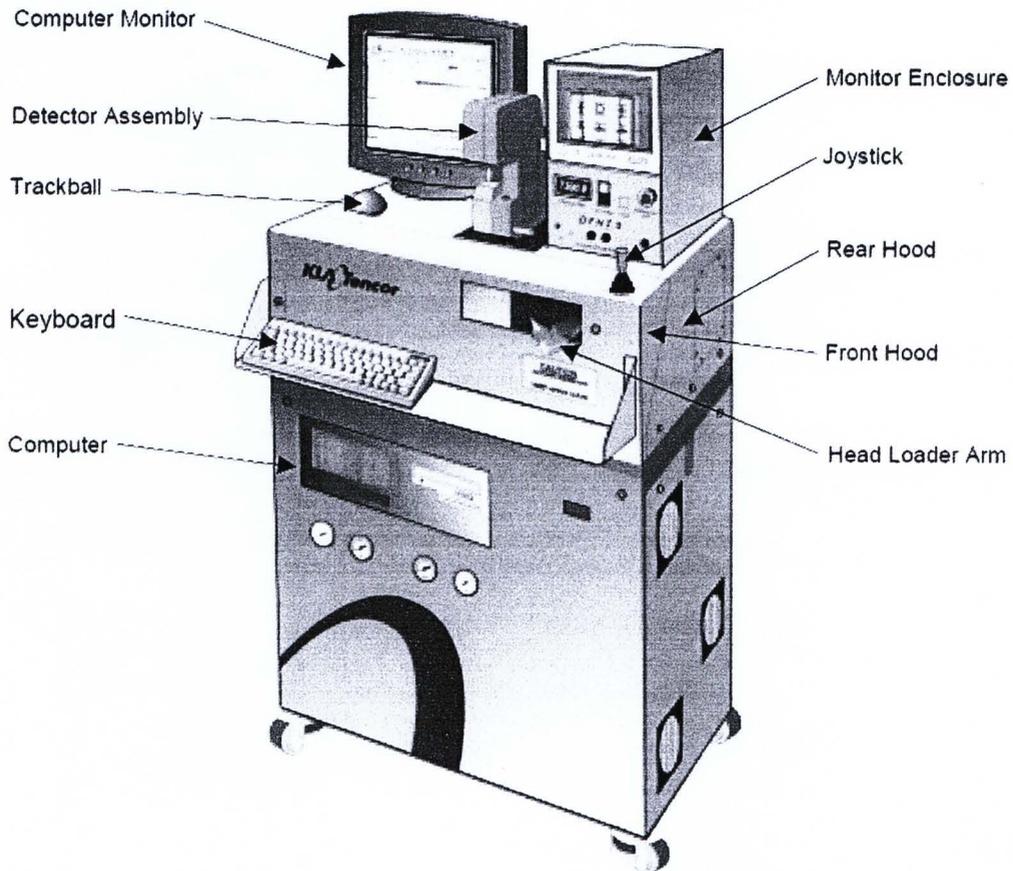
โนเมตร ซึ่งผลของการคำนวณแสดงไว้ในกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Flying height กับ อัตราส่วนความเข้มแสง ( $\frac{I_S}{I_0}$ ) แสดงไว้ดังรูปที่ 2.6 [6]



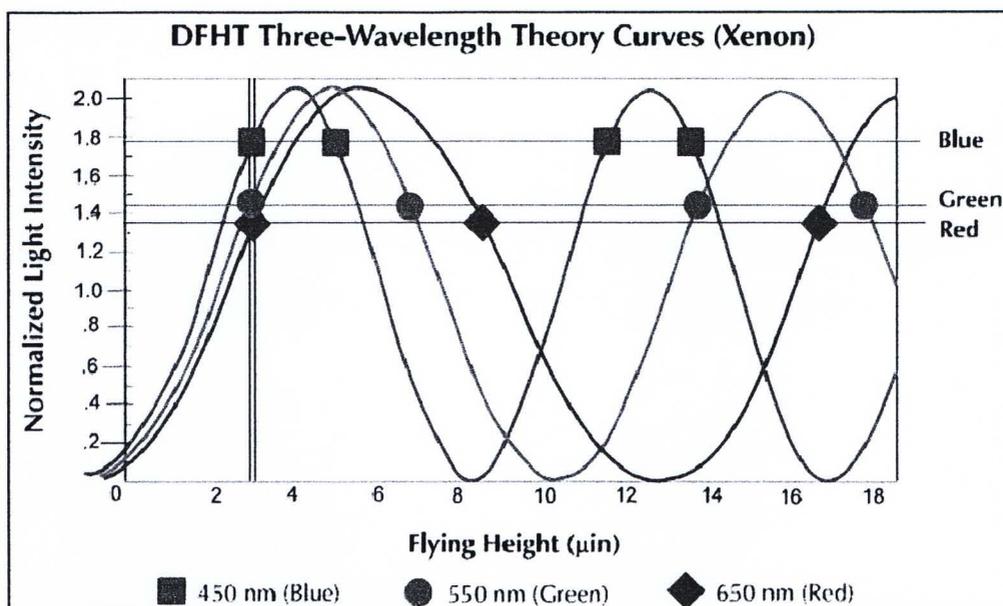
รูปที่ 2.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Flying height กับ อัตราส่วนความเข้มแสง [6]

ซึ่งในปัจจุบันนั้นเครื่องวัด Flying height แบบ Interferometry ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม ฮาร์ดดิสก์นั้นจะมีความซับซ้อนกว่านี้มากเช่นเครื่องวัด Flying height รุ่น DFHT5 (Dynamic flying height tester) ของบริษัท KLA-Tencor ที่จะนำมาใช้ในงานวิจัยนี้โดยที่ไดอะแกรมของ เครื่องวัดแสดงไว้ดังรูปที่ 2.7 ซึ่งเครื่องวัดนี้จะใช้หลักการของ Three wavelength interferometry ในการวัด Flying height โดยจะวัดการแทรกสอดของความเข้มแสงของแสงที่มีความยาวคลื่นแตกต่างกัน 3 ความยาวคลื่น (450, 550 และ 650 นาโนเมตร) ซึ่งจะให้ ความแม่นยำในการวัดมากกว่าเครื่องวัด Flying height แบบ Interferometry ที่ใช้ความยาวคลื่นเดียว โดยปกติแล้วการวัด Flying height นั้นจะใช้งานแก้วในการวัดซึ่งต้องใส่ค่าดรรชนีหักเหของงาน แก้วทั้ง 3 ความยาวคลื่นก่อนทำการวัด โดยที่เครื่องวัด Flying height จะทำการสร้างเส้นโค้ง ของความเข้มแสงที่ Normalize ให้อยู่ในช่วง 0 ถึง 2 ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ Flying height (Theory curve) ในขั้นตอนของการ Calibration โดยการคำนวณทางทฤษฎีดังที่ได้อธิบายไว้แล้วซึ่งจะใช้ ค่าดรรชนีหักเหของงานแก้วในการคำนวณ หลังจากนั้นในขั้นตอนของการวัดเครื่องวัดจะทำการ วัดความเข้มแสงตามตำแหน่งของ ABS ของหัวอ่าน/เขียนที่ได้กำหนดไว้ (ในกรณีนี้เครื่องวัดใช้ แสงที่มีความยาวคลื่นแตกต่างกัน 3 ความยาวคลื่นในการวัดจึงทำให้ค่าความเข้มแสงที่อ่านมา ได้มี 3 ค่า) และนำความเข้มแสงที่อ่านค่าได้มาเปรียบเทียบกับ Theory curve โดยสามารถอ่าน ค่า Flying height ได้จากจุดตัดกันระหว่างข้อมูลที่ได้จากการวัดและ Theory curve ดังที่แสดง ไว้ในรูปที่ 2.8 โดยจะเห็นว่าข้อมูลความเข้มแสงที่ได้จากการวัดของทั้ง 3 ความยาวคลื่นที่วัด

เป็นเส้นตรงจะตัดกับ Theory curve หลายจุด ซึ่งอัลกอริทึมในเครื่องวัด Flying height จะพิจารณาจุดตัดของทั้ง 3 ความยาวคลื่นที่มีค่า Flying height ใกล้เคียงกันมากที่สุดเป็นค่า Flying height ของตำแหน่งนั้นๆบน ABS ซึ่งจากรูปที่ 2.8 จะเห็นได้ว่าจุดตัดของทั้ง 3 ความยาวคลื่นจะใกล้เคียงกันมากที่สุดที่ค่า Flying height ประมาณ 3 ไมโครนิ้ว ซึ่งก็คือค่า Flying height ของตำแหน่งที่ทำการวัด [15]



รูปที่ 2.7 ไดอะแกรมของเครื่องวัด Flying height DFHT5 ของบริษัท KLA-Tencor [15]



รูปที่ 2.8 ไดอะแกรมในแปลงค่าความเข้มแสงเป็นค่า Flying height โดยใช้หลักการ Three wavelength inteferometry [15]

### 2.3 คุณสมบัติของวัสดุใสและวัสดุเคลือบใส

เนื่องจกงานวิจัยนี้ต้องการปรับปรุงอายุการใช้งานของจานแก้วที่ใช้ในเครื่องวัด Flying height โดยที่มีแนวทางในการปรับปรุง 2 แนวทางคือ 1. การเปลี่ยนวัสดุที่ใช้ทำงานแก้วให้มีความแข็งแรงขึ้นและ 2. การเคลือบจานแก้วด้วยวัสดุที่มีความแข็งแรง (ซึ่งได้เลือกแนวทางที่ 2 ในภายหลัง เนื่องจากแนวทางแรกนั้นมีค่าใช้จ่ายสูงมากในการสร้างจานแก้วจากวัสดุทางเลือก) และมีเงื่อนไขคือติสก์ที่ผ่านขั้นตอนการปรับปรุงความแข็งแรงทั้ง 2 วิธีนั้นต้องสามารถวัด Flying height ได้อย่างถูกต้องด้วยดั่งนั้นวัสดุที่จะนำมาใช้แทนหรือเคลือบจานแก้วนั้นต้องยอมให้แสงเดินทางผ่านได้เนื่องจากเครื่องวัด Flying height นั้นใช้หลักการทางแสงในการวัดระยะห่างระหว่างหัวอ่าน/เขียนและแผ่นแม่เหล็กซึ่งจากหลักการในการวัดที่ได้อธิบายไปแล้วแสงจากแหล่งกำเนิดในเครื่องวัดนั้นต้องสามารถเดินทางผ่านจานแก้วและสะท้อนกลับจากหัวอ่าน/เขียนมายังเครื่องวัด Flying height ได้ ดังนั้นจึงทำการศึกษาความแข็งแรงของวัสดุใสและวัสดุเคลือบใสที่สามารถให้ความโปร่งแสงในช่วงความยาวคลื่นแสงในช่วง 450 ถึง 650 นาโนเมตรดังนี้

#### 2.3.1 Fused silica (SiO<sub>2</sub>) [16]

Fused silica คือ ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO<sub>2</sub>) สังเคราะห์ที่มีความบริสุทธิ์มากมีลักษณะไม่เป็นผลึก ไม่มีสี มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ มีคุณสมบัติทางแสงดีมากและ

โปร่งใสในหลายช่วงความยาวคลื่นแสงโดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงอัลตราไวโอเลต (Ultraviolet) สามารถทนต่อการขีดข่วนและการช็อคทางความร้อน (Thermal shock) ได้



### 2.3.2 BK-7 (BK-7 Glass) [17]

BK-7 คือแก้วโบโรซิลิเกต (Borosilicate glass) ซึ่งมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันมีคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีที่ดีซึ่งทำให้นิยมใช้กันในช่วงความยาวคลื่นแสงที่ตามองเห็นและช่วงอินฟราเรด (Infrared) เช่นการทำหน้าต่าง เลนส์ และ ปริซึมที่ใช้ใน Laser และอุปกรณ์ทางแสงต่างๆ

### 2.3.3 Fused quartz (SiO<sub>2</sub>) [18]

Fused quartz คือแก้วชนิดหนึ่งที่มีลักษณะการเรียงตัวไม่เป็นระเบียบมีลักษณะโปร่งใส มีคุณสมบัติทางด้านความร้อนและด้านแสงเหนือกว่าแก้วธรรมดาเนื่องจากความบริสุทธิ์ที่มีมากกว่าดังนั้นจึงนิยมนำมาใช้ในการสร้างอุปกรณ์ประเภทสารกึ่งตัวนำโดยที่ Fused quartz มีความโปร่งใสในช่วงอัลตราไวโอเลตมากกว่าแก้วชนิดอื่นๆ

### 2.3.4 Sapphire (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) [19]

แซฟไฟร์ (Sapphire) คืออัญมณีประเภทคอร์ันดัม (Corundum) ซึ่งสีจะขึ้นอยู่กับแร่ที่ปะปนมารวมถึงชนิดที่ไม่มีสี เนื่องจากแซฟไฟร์มีความแข็งแรงมากจึงนิยมนำมาใช้ในการหลากหลายเช่น อุปกรณ์ทางด้านแสงอินฟราเรด นาฬิกา กระดาษที่มีความทนทานสูง และเวเฟอร์ที่ใช้ในการปลูกฟิล์มประเภทสารกึ่งตัวนำ

### 2.3.5 DLC (Diamond-like carbon) [20]

DLC (Diamond-like carbon) เป็นชื่อทั่วไปที่ใช้อธิบายถึงฟิล์มคาร์บอนที่เรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบซึ่งประเภทของฟิล์มประกอบด้วยประเภท Hydrogen free DLC (a-C) Hydrogenate DLC (a-C:H) Tetrahedral amorphous carbon (ta-C) Hydrogenate tetrahedral amorphous carbon (ta-C:H) และมีประเภทอื่นๆเช่นพวกที่มีส่วนผสมของซิลิกอนซึ่งความแตกต่างของ DLC ขึ้นอยู่กับส่วนประกอบที่ผสมในแต่ละประเภท ความแข็งแรงของฟิล์มที่ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนพันธะแบบ Sp<sup>3</sup> DLC นิยมใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพของพื้นผิว ซึ่งการเคลือบผิวด้วย DLC จะให้ความแข็งแรงมาก ทนทานต่อการสึกหรอและมีสัมประสิทธิ์ของความเสียดทานต่ำ ซึ่งโดยทั่วไปนิยมนำมาเคลือบผิววัสดุเพื่อเพิ่มความทนทาน



### 2.3.6 Zinc oxide (ZnO) [21]

Zinc Oxide คือสารประกอบอนินทรีย์โดยปกติจะพบในลักษณะของผงสีขาวไม่ละลายน้ำมีคุณสมบัติดังนี้ โปร่งใส เรืองแสงในอุณหภูมิต่ำ จึงทำให้นิยมใช้ในการทำกระจกป้องกันความร้อน LCD (Liquid crystal display) และทำเป็นฟิล์ม LED (Light-emitting diodes)

### 2.3.7 Silicon nitride (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) [22]

Silicon nitride คือสารประกอบทางเคมีของซิลิกอนและไนโตรเจนซึ่งมีลักษณะเป็นเซรามิกแข็งมีความแข็งแรงสูงในหลายช่วงอุณหภูมิ มีสัมประสิทธิ์ทางความร้อนปานกลาง ซึ่ง Silicon nitride ฟิล์มนิยมนำมาใช้เป็นฉนวนในชิ้นส่วนทางอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ซิลิกอนเป็นฐาน และใช้เป็นชิ้นส่วนที่ใช้ในการตรวจจับ (Sensing path) ใน AFM (Atomic force microscope)

### 2.3.8 คุณสมบัติทางความแข็งแรงของวัสดุใสและวัสดุเคลือบใส

โปร่งใสและจานแก้ว (จานแก้ว GD-FHT บริษัท OHARA เป็นผู้ผลิตและใช้อยู่ในอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ แสดงไว้ดังตารางที่ 2.1 และ ตารางความแข็งแรงของวัสดุเคลือบใส แสดงไว้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 วัสดุและความแข็งแรงของวัสดุโปร่งใสและจานแก้ว

Material	Chemical formula	Hardness(GPa)
Fused silica [23]	SiO <sub>2</sub>	6.4
BK-7 [23]	BK-7 Glass	5.6
GD-FHT [23]	N/A	5.9
Fused quartz [24]	SiO <sub>2</sub>	10
Sapphire [25]	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22.5

ตารางที่ 2.2 ความแข็งแรงของวัสดุเคลือบใส

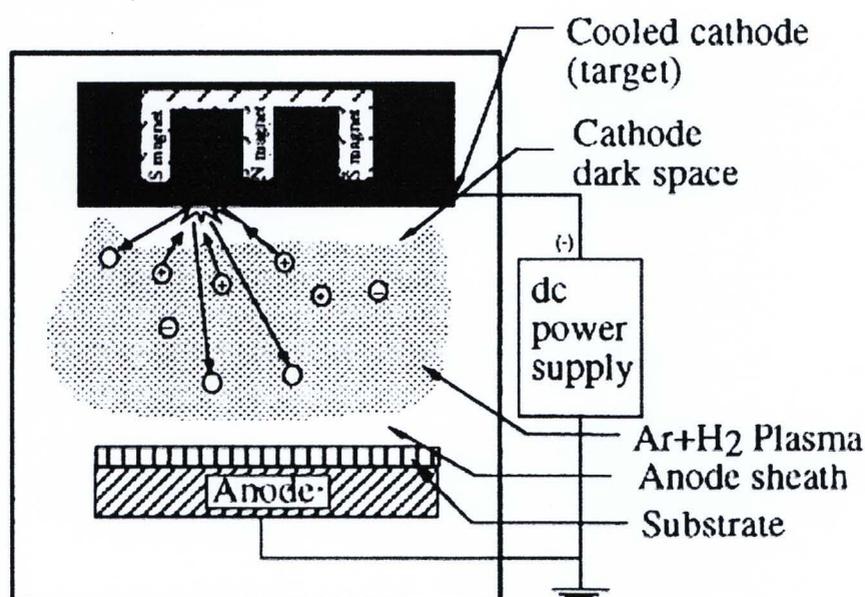
Coating Material	Deposition method	chemical formula	Hardness(GPa)
DLC [26]	Cathodic arc coating	a-C	24
	Ion beam coating	a-C:H	19
	ECR-CVD coating	a-C:H	22
	DC sputtered coating	a-C:H	15
Sapphire [27]	R.f. sputtering	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8.3
Zinc oxide [28]	R.f. sputtering	ZnO	8.7
Silicon nitride [29]	Chemical vapor deposition	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	14.5

#### 2.4 วิธีการปลูก DLC ฟิล์ม [20]

จากหัวข้อที่ 2.3 ในส่วนของการปรับปรุงอายุการใช้งานของจานแก้วด้วยการเคลือบผิวด้วยวัสดุเคลือบใสที่มีความแข็งแรงนั้นและจากตารางความแข็งแรงของวัสดุเคลือบใสพบว่า DLC นั้นมีค่าความแข็งแรงมากที่สุดในวัสดุทางเลือกประกอบกับ DLC นั้นเป็นวัสดุที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในการนำมาเคลือบผิวหน้าของวัสดุเพื่อเพิ่มความแข็งแรงและความทนทานต่อรอยขีดข่วนดังนั้นจึงเลือกทำการศึกษาวิธีที่ใช้ในการปลูกฟิล์ม DLC ซึ่งมีวิธีการ Deposition มากมายที่สามารถใช้ในการปลูก DLC ฟิล์มได้ซึ่งโดยทั่วไปแล้วฟิล์มจะถูกปลูกด้วยวิธี Plasma vapour deposition (PVD) หรือ Chemical vapour deposition (CVD) ซึ่งวิธีการที่แตกต่างกันในการปลูกฟิล์ม DLC เช่นทำให้มีพลังงานของประจุที่แตกต่างกัน (Ion energies) การเปลี่ยนแปลงก๊าซที่ใช้ (Precursor gas) ชนิดของวัสดุเป้าหมาย (Target material) หรือการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ จะส่งผลให้ฟิล์มของ DLC มีคุณสมบัติที่หลากหลายตั้งแต่ฟิล์มชนิด a-C-H ที่นุ่มและลื่น ไปจนถึงฟิล์มชนิด ta-C ที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับเพชร ซึ่งจะอธิบายถึงตัวอย่างวิธีการทั่วไปที่นิยมใช้ในการปลูกฟิล์ม DLC ดังต่อไปนี้

### 2.4.1 Sputtering

Sputtering เป็นวิธีที่ควบคุมการปลูกฟิล์ม DLC ได้ดีและนิยมใช้กันในกระบวนการอุตสาหกรรมไดอะแกรมของวิธีการปลูกฟิล์มแบบ Sputtering แสดงไว้ดังรูปที่ 2.9 ในกระบวนการ Sputtering ก๊าซเฉื่อย (Inert gas) ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้อาร์กอน (Argon) จะถูกทำให้แตกตัวเป็นไอออน (Ionised) โดยอิเล็กตรอนที่ปล่อยออกมาจากขั้ว Cathode ไอออน  $Ar^+$  ถูกเร่งให้ไปที่ขั้ว Cathode และ Sputter สารเป้าหมายที่อยู่ขั้ว Cathode ออก กระบวนการ Sputtering ที่ใช้กันสำหรับ DLC คือ Dc diode sputtering หรือ Radio frequency (RF) sputtering นั้นจะ Sputters แกรไฟต์ได้จึงต้องมีการใช้วิธีการเพิ่มเติมเพื่อที่จะเพิ่มอัตราการปลูกฟิล์ม (Deposition rate) ซึ่งวิธีการทั่วไปที่นิยมใช้กันคือ Unbalance magnetron sputtering ซึ่งในวิธีนี้จะมีแม่เหล็กวางอยู่ใต้แกรไฟต์ที่ขั้ว Cathode ซึ่งทำให้เกิดสนามแม่เหล็กซึ่งส่งผลให้อิเล็กตรอนถูกปล่อยออกมาจากขั้ว Cathode ซึ่งส่งผลให้เพิ่มอัตราการเกิด Plasma ionization โดยที่สนามแม่เหล็กจะถูกทำให้ไม่สมดุล (Unbalance) โดยการเรียงตัวของแท่งแม่เหล็กและจะเกิดสนามแม่เหล็กวางตัวข้าม Substrate ทำให้ไอออนของอาร์กอน bombard ที่ Substrate เช่นเดียวกันกับที่สารเป้าหมาย ซึ่งการ Bombard ของไอออนนี้ทำให้เกิดพันธะ  $sp^3$  ขึ้นในฟิล์ม ทำให้ฟิล์มมีความหนาแน่นและมีอัตราการปลูกฟิล์มที่สูงขึ้น

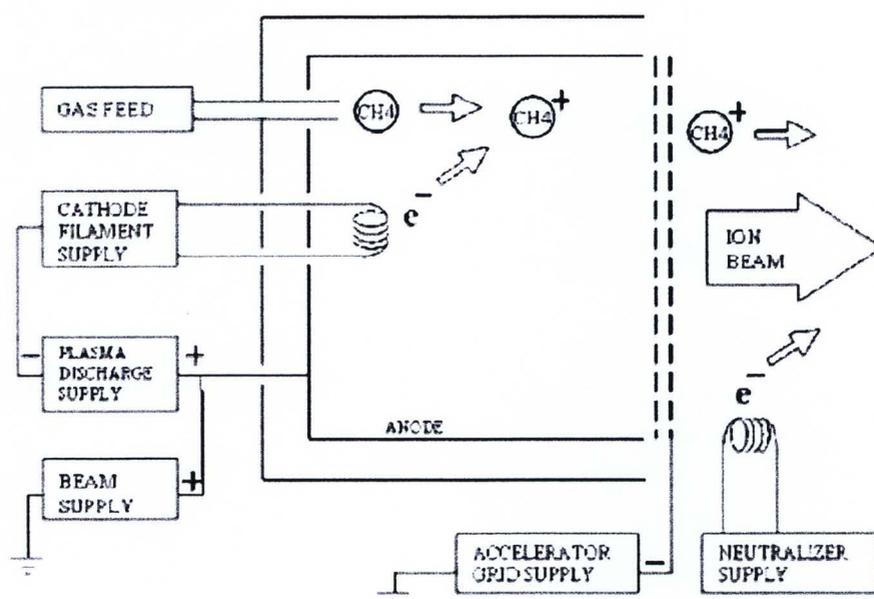


รูปที่ 2.9 ไดอะแกรมของการปลูกฟิล์มด้วยวิธี Sputtering [20]

### 2.4.2 Ion beam deposition

Ion beam deposition หรือ Ion beam sputtering จะใช้ลำอนุภาคของอาร์กอนไอออน (Beam of Argon ion) เพื่อที่จะ Sputter คาร์บอนออกจากแกรไฟต์ (Graphite target)

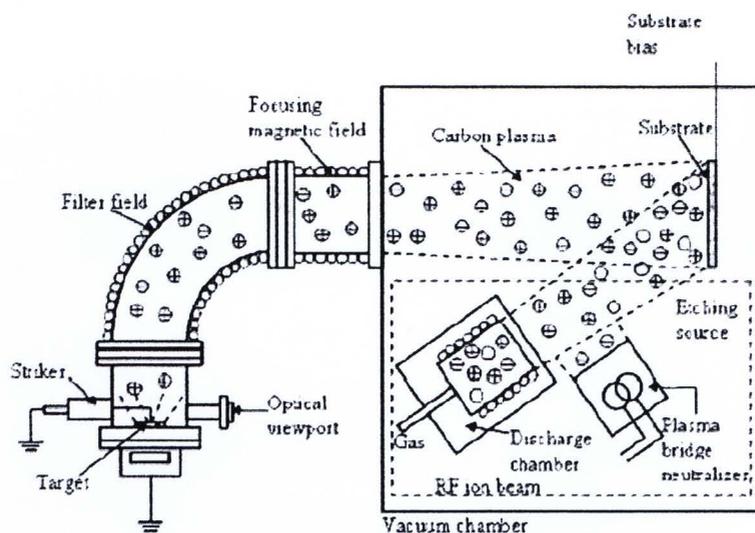
ไต่อะแกรมของการปลูกฟิล์มด้วยวิธี Ion beam deposition แสดงไว้ดังรูปที่ 2.10 ซึ่งข้อได้เปรียบของวิธีนี้คือจะให้ฟิล์มที่มีคุณภาพดีที่อุณหภูมิห้อง อย่างไรก็ตามจะมีอัตราการปลูกฟิล์มที่ต่ำและฟิล์มจะมีความหนาแน่นต่ำเนื่องจากอะตอมสามารถเคลื่อนที่ได้น้อยในกระบวนการปลูกฟิล์ม อีกทั้งยังต้องมีการเตรียม Substrate ให้ดีเพื่อที่จะให้ได้ฟิล์มที่มีความราบเรียบ (Uniform film) กระบวนการ Ion beam สามารถปรับปรุงให้ดีขึ้นได้หลายวิธีเช่นการให้ความร้อนกับ Substrate หรือการปล่อยให้อิทธิพล Bombardment ดำเนินไปอย่างต่อเนื่อง ซึ่งวิธีการให้ความร้อนกับ Substrate อาจนำไปสู่การได้ฟิล์มที่ผิดรูปร่างหรือนิ่มซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการ โดยที่วิธีการ Ion plating หรือวิธี Ion beam assisted deposition (IBAD) จะนิยมมากกว่า ในวิธีการ Ion plating จะมีการให้ประจุขนาดเล็กกับส่วนที่จะถูกเคลือบและอัตราส่วนของ Coating flux ที่ถูกทำให้เป็นไอออนจะแปรผันตรงกับ Flux ที่ผ่านเข้าไปให้กับพลาสมาหรือโดยการใช้ขดลวดความร้อนเพื่อที่จะสร้าง Flux ของอิเล็กตรอนให้กับระบบ ใน IBAD ลำอนุภาคของไอออนอาร์กอนที่ 2 จะใช้ Bombard ฟิล์มเพื่อช่วยให้ฟิล์มมีความหนาแน่นและสร้างพันธะ  $sp^3$  ปฏิบัติการ Bombardment ของไอออนจะส่งผลให้ Substrate ร้อนดังนั้นจึงต้องมีความระมัดระวังในการควบคุมวิธีการนี้ โดยที่ IBAD ก็เป็นวิธีการปลูกฟิล์มที่ใช้กันในอุตสาหกรรม



รูปที่ 2.10 ไต่อะแกรมของการปลูกฟิล์มด้วยวิธี Ion beam deposition [20]

### 2.4.3 Cathodic arc

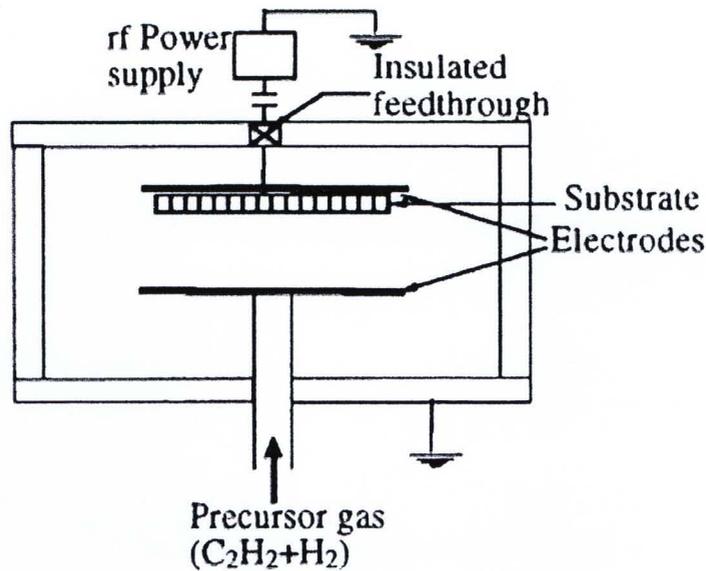
Cathodic arc เป็นวิธีที่ซับซ้อนที่สุดในการปลูกฟิล์ม DLC แต่มีข้อได้เปรียบคือฟิล์มมีคุณสมบัติทางกลที่ดีมากซึ่งวิธีการนิยมนี้นำใช้ในการปลูกฟิล์มในอุตสาหกรรม สำหรับฟิล์ม DLC แกรไฟต์ที่ขั้ว Cathode จะถูกชนด้วยคาร์บอนที่สูญญากาศจากนั้นก็เลยสูญญากาศออกเพื่อที่จะทำให้เกิด Arc ที่ปล่อยออกมาซึ่งส่งผลให้เกิดพลาสมาที่มีพลังงานและมีความหนาแน่นของไอออนสูงมาก ตำแหน่งของ Arc จะเกิดขึ้นที่ขั้ว Cathode โดยมีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 ถึง 10 ไมโครเมตรและมีความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าสูงมากซึ่งไม่เพียงแต่ทำให้เกิดพลาสมาแต่ยังปล่อยอนุภาคเล็กๆขนาดไมโครเมตรออกมาจากขั้ว Cathode ซึ่งเป็นผลให้เกิดความหยابขึ้นบนฟิล์มและทำให้ฟิล์มเสียหายเนื่องจากเกิดรอยแตกที่ขอบตามลำดับ การเกิดอนุภาคนี้สามารถถูกทำให้หายไปโดยผลของกระบวนการ Explosive emission ซึ่งกำจัด Evaporant species จากพื้นผิวของขั้ว Cathode และพลาสมาจะถูกบังคับให้เดินทางผ่านที่กรองสนามแม่เหล็ก (Magnetic filter) เพื่อที่จะลดผลกระทบ โดยที่วิธีการนี้รู้จักกันในชื่อ Filtered cathodic vacuum arc (FCVA) โดยที่ไดอะแกรมของการปลูกฟิล์มด้วยวิธี FCVA แสดงไว้ดังรูปที่ 2.11 ใน FCVA สนามไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic field) จะถูกสร้างขึ้นเนื่องจากพลาสมาอิเล็กตรอนหมุนวนเป็นวงรอบที่กรองสนามแม่เหล็ก ซึ่งส่งผลให้เกิดการดึงดูดไอออนที่มีประจุบวกให้เดินทางตามเส้นทางของที่กรองเนื่องจากอนุภาคเล็กๆไม่สามารถเดินทางตามเส้นทางได้ทำให้อนุภาคเหล่านี้เกาะติดตามผิวตลอดเส้นทางของที่กรอง วิธีการปลูกฟิล์มแบบ FCVA นั้นจะทำให้ได้คาร์บอนฟิล์ม (a-C) ที่มี Hardness, Young's modulus, Scratch resistance ที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการปลูกฟิล์มแบบ Ion beam deposition และ Radio frequency sputtering



รูปที่ 2.11 ไดอะแกรมของการปลูกฟิล์มด้วยวิธี Filtered cathodic vacuum arc [20]

#### 2.4.4 Chemical vapour deposition

Chemical vapour deposition (CVD) เป็นวิธีที่ใช้อุณหภูมิสูงและกระบวนการทาง Thermochemical ซึ่งทำให้อุณหภูมิของ Substrate อยู่ในช่วง 800 ถึง 1000 องศาเซลเซียส ในกระบวนการ CVD ปฏิกริยาทางเคมีเกิดขึ้นเหนือ Substrate ซึ่งสารเคมีจะแตกตัวออกและรวมตัวกันเพื่อที่จะสร้างฟิล์มบน Substrate กระบวนการ CVD จะให้ฟิล์มที่มีความราบเรียบ (Uniform) มีความแข็งแรงสูง (Hardness) และมีการยึดติดที่ดี (Adhesion) อย่างไรก็ตามมีข้อจำกัดคือไม่สามารถปลูกฟิล์มที่หนาเกิน 10 ไมโครเมตรได้ เนื่องจากความแตกต่างของการขยายตัวทางความร้อนทำให้เกิดความเครียดสูง (Stress) และมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมคือก๊าซที่เกิดขึ้นจากปฏิกริยาเคมี ดังนั้นกระบวนการปลูกฟิล์มด้วยวิธี Plasma enhanced chemical vapour deposition (PECVD) จึงถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อทำให้วิธี CVD สามารถปลูกฟิล์มที่อุณหภูมิของ Substrate ต่ำๆได้ โดยที่ไดอะแกรมของการปลูกฟิล์มด้วยวิธี PECVD แสดงไว้รูปที่ 2.12 PECVD นั้นเป็นวิธีการปลูกฟิล์มที่รวมกันระหว่างกระบวนการ CVD และการกระตุ้นด้วยพลังงานอิเล็กตรอน (Energetic electron 100-300 eV) ภายในพลาสมา โดยทั่วไปแล้วกระบวนการ PECVD จะใช้ความดัน 0.01 ถึง 5 torr



รูปที่ 2.12 ไดอะแกรมของการปลูกฟิล์มด้วยวิธี Plasma enhanced chemical vapour deposition [26]

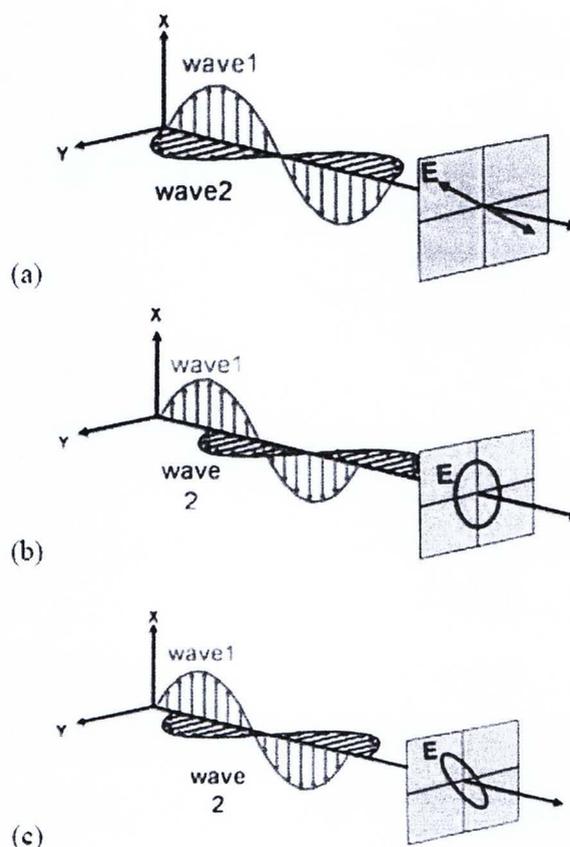
## 2.5 การวัดดรรชนีหักเหของวัสดุเคลือบใส

การวัดดรรชนีหักเหของวัสดุเคลือบใสสามารถวัดโดยใช้เครื่องวัด Ellipsometry ซึ่งวัดการเปลี่ยนแปลงโพลาไรเซชัน (Polarization) ของแสงเนื่องจากแสงสะท้อนหรือเดินทางผ่านวัสดุทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโพลาไรเซชันของแสงซึ่งจะแสดงอยู่ในรูปของอัตราส่วนของแอมพลิจูด (Amplitude ratio,  $\Delta$ ) และความแตกต่างของเฟส (Phase difference,  $\psi$ ) ซึ่งการวัดจะเปลี่ยนแปลงไปตามคุณสมบัติเชิงแสงของวัสดุ (Optical properties) ดังนั้น Ellipsometry จึงนิยมใช้ในการวิเคราะห์ความหนาและดรรชนีหักเหของฟิล์มซึ่งสามารถวัดฟิล์มที่ความหนาในระดับนาโนเมตรได้ซึ่งในปัจจุบันนิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น Biosensor สารกึ่งตัวนำ และ อุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ ในการวัดคุณสมบัติของฟิล์มต่างๆ เช่น โลหะ สารกึ่งตัวนำ สารอินทรีย์ และ วัสดุผสม [30]

### 2.5.1 Polarization ของแสง

แสงโดยทั่วไปสามารถอธิบายได้ในลักษณะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งใน Ellipsometry จะอธิบายถึงพฤติกรรมของสนามไฟฟ้าของคลื่นแสงว่า Polarization สนามไฟฟ้าของคลื่นแสงจะตั้งฉากกับทิศทางที่แสงเดินทางเสมอ ดังนั้นถ้าแสงเดินทางไปแกน Z สนามไฟฟ้าก็จะอยู่ในทิศทางแกน X และแกน Y ในกรณีที่แสงมีการวางตัวแบบสุ่มทั้งทิศทางและเฟสจะพิจารณาว่าเป็นแสงที่ Unpolarized สำหรับ Ellipsometer ซึ่งสนใจแสงที่เรียงตัวอย่างมีทิศทางและวางตัวเป็นรูปร่างที่ชัดเจนในทุกๆ ตำแหน่งซึ่งเรียกว่าแสงที่ Polarized ในกรณีที่สนามไฟฟ้าที่ตั้งฉาก

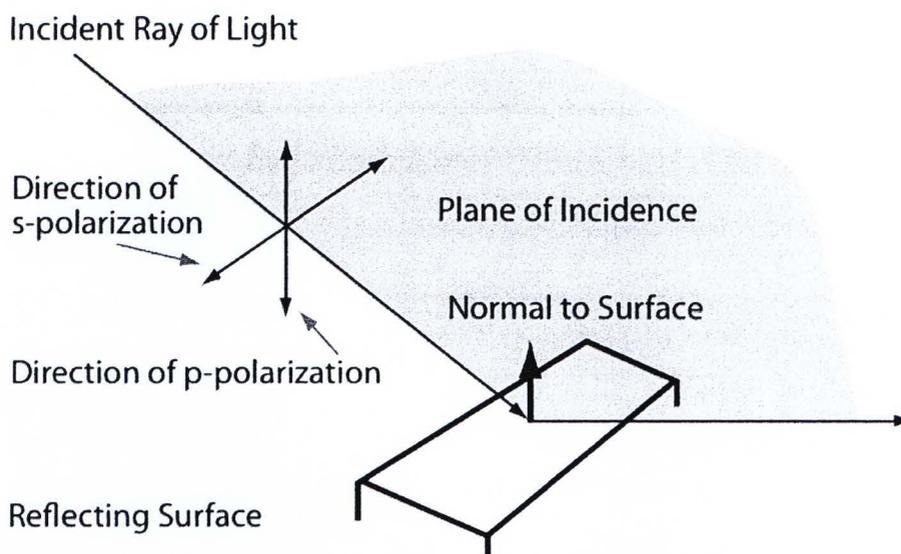
กันมีเฟสเท่ากันจะเรียกแสงประเภทนี้ว่า Linear polarized ส่วนแสงที่มีสนามไฟฟ้าที่ตั้งฉากกัน มีเฟสต่างกัน 90 องศาและมีแอมพลิจูดเท่ากันจะเรียกว่า Circularly polarized ในกรณีที่ สนามแม่เหล็กที่ตั้งฉากกันมีทั้งเฟสและแอมพลิจูดต่างกันซึ่งเป็นลักษณะที่ธรรมดาที่สุดของ Polarization เรียกว่า Elliptical polarized ซึ่งเป็นที่มาของชื่อ Ellipsometry ซึ่งลักษณะต่างๆ ของ Polarization ที่อธิบายไปแล้วแสดงไว้ดังรูปที่ 2.13 [30]



รูปที่ 2.13 ลักษณะต่างๆของ Polarization โดยที่ a) คือ Linear polarization b) คือ Circularly polarization และ c) คือ Elliptical polarization [30]

### 2.5.2 p- และ s-polarization

รูปที่ 2.14 [31] แสดงถึงการสะท้อนของแสงบนผิวของวัตถุ เมื่อแสงสะท้อนหรือผ่าน ทะลุวัตถุในลักษณะทำมุมเอียงแสงจะถูกแบ่งออกเป็นคลื่นแสง p- และ s-polarization ซึ่งขึ้นกับ ทิศทางการสั่นของสนามไฟฟ้าซึ่ง p- และ s-polarization จะมีทิศทางการสั่นของสนามไฟฟ้าที่ แตกต่างกันใน p-polarization คลื่นสนามไฟฟ้าของแสงที่ตกกระทบและสะท้อนจะมีทิศทางการ สั่นอยู่ในระนาบเดียวกันซึ่งเรียกระนาบนี้ว่าระนาบตกกระทบ (Plane of incident) [32] ส่วน s-polarization จะมีคลื่นสนามไฟฟ้าของแสงที่สะท้อนและตกกระทบอยู่ในทิศที่ตั้งฉากกับ ระนาบตกกระทบ [33]



รูปที่ 2.14 การสะท้อนของ p- และ s-polarization [31]

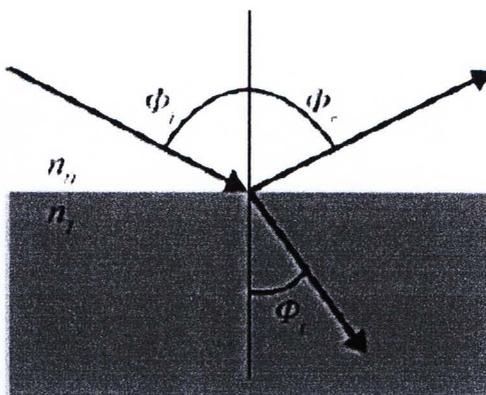
โดยที่ทั้ง p- และ s-polarization และนั้นเป็นอิสระต่อกันและสามารถคำนวณแยกกันได้ ซึ่ง Fresnel ได้อธิบายถึง p- และ s-polarization ของแสงที่สะท้อนบนผิววัตถุไว้ตั้งสมการที่ (2.5) และ (2.6) และ p- และ s-polarization ของแสงที่เดินทางผ่านทะลุวัตถุไว้ตั้งสมการที่ (2.7) และ (2.8) โดยที่ความหมายของตัวแปรต่างๆในสมการได้อธิบายไว้ตั้งรูปที่ 2.15 โดยที่  $r$  คือแอมพลิจูดของคลื่นแสงที่สะท้อนจากรอยต่อระหว่างชั้นตัวกลางและ  $t$  คือแอมพลิจูดของคลื่นแสงที่เดินทางผ่านทะลุรอยต่อระหว่างชั้นตัวกลาง ส่วนตัวห้อย  $p$  และ  $s$  แสดงถึง p- และ s-polarization

$$r_s = \frac{n_0 \cos \phi_i - n_l \cos \phi_t}{n_0 \cos \phi_i + n_l \cos \phi_t} \quad \text{--- (2.5)}$$

$$r_p = \frac{n_l \cos \phi_i - n_0 \cos \phi_t}{n_0 \cos \phi_i + n_l \cos \phi_t} \quad \text{--- (2.6)}$$

$$t_s = \frac{2n_0 \cos \phi_i}{n_0 \cos \phi_i + n_l \cos \phi_t} \quad \text{--- (2.7)}$$

$$t_p = \frac{2n_0 \cos \phi_i}{n_0 \cos \phi_i + n_l \cos \phi_t} \quad \text{--- (2.8)}$$

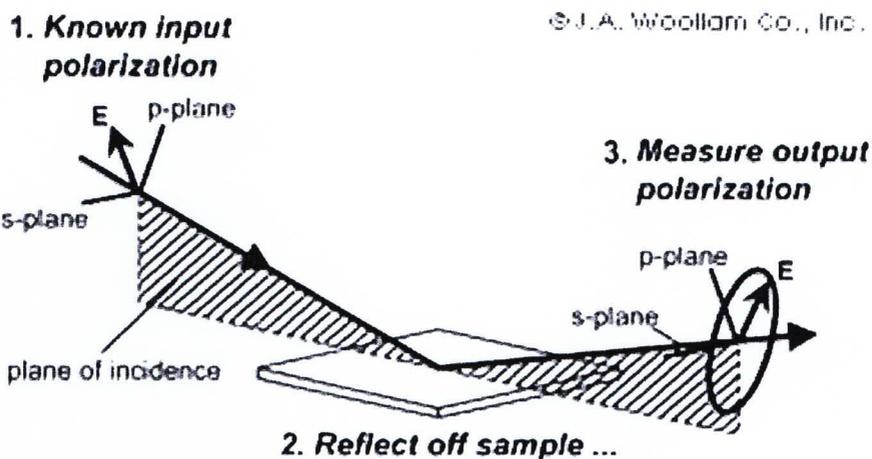


รูปที่ 2.15 ความหมายของตัวแปรต่างๆที่ใช้ในสมการที่ (2.5) ถึง (2.8) [30]

### 2.5.3 หลักการทำงานของ Ellipsometry

Ellipsometry จะวัดการความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงของ p- และ s-polarization ของแสงซึ่งจะใช้แสงอ้างอิงซึ่งรู้ Polarization ในการวัดเมื่อแสงอ้างอิงสะท้อนหรือเดินทางผ่านวัสดุตัวอย่างซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง Polarization ซึ่ง Ellipsometry จะวัดแสงที่เปลี่ยนแปลง Polarization เปรียบเทียบกับแสงอ้างอิง ไดอะแกรมของการวัด Ellipsometry แสดงไว้ดังรูปที่ 2.16 [30] แสงที่ตกกระทบเป็นแบบ Linear polarized ซึ่งเรียกว่าแสงที่รู้ Polarized เมื่อแสงที่รู้ Polarized สะท้อนออกจากผิวของวัตถุทำให้แอมพลิจูดและเฟสของ p- และ s-polarized ของแสงเป็นลักษณะ Elliptical polarized ซึ่ง Ellipsometry จะวัดการเปลี่ยนแปลงของแอมพลิจูด ( $\Delta$ ) และเฟส ( $\psi$ ) ของ p- และ s-polarized ซึ่งการเปลี่ยนแปลง Polarization ของแอมพลิจูดของแสงที่สะท้อนจากรอยต่อระหว่างตัวกลางสามารถเขียนเป็นสมการทั่วไปได้ดังสมการที่ (2.9) โดยที่  $\rho$  คือการเปลี่ยนแปลง Polarization,  $\Delta$  คืออัตราส่วนความเข้มแสงและ  $\psi$  คือความแตกต่างของเฟส [30]

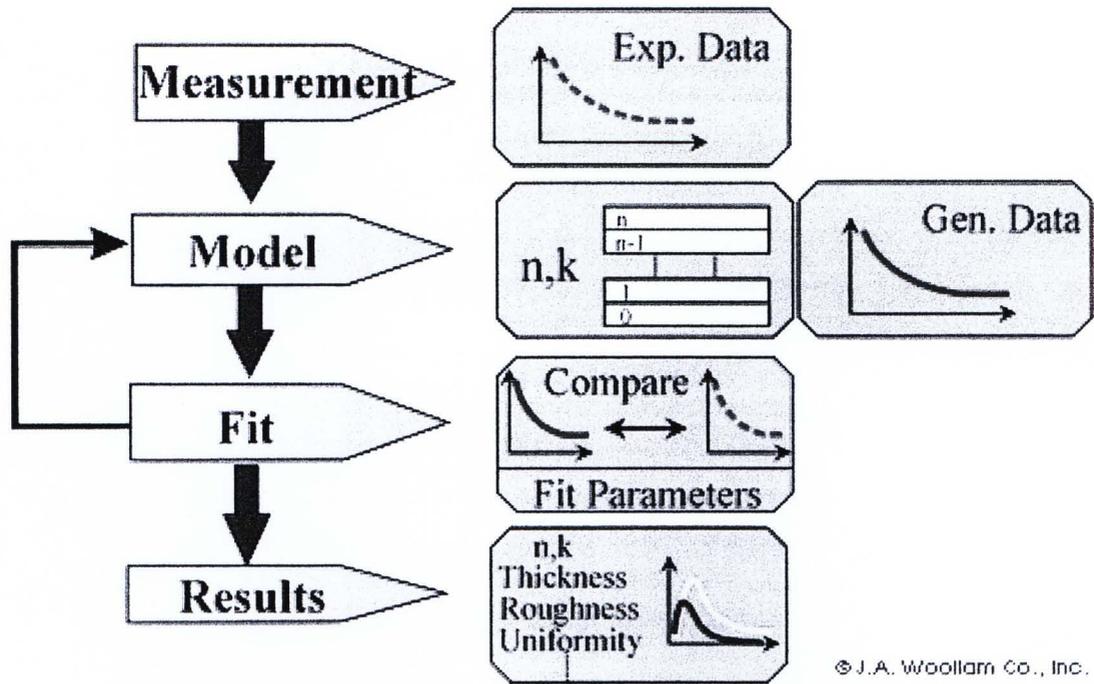
$$\rho = \frac{r_p}{r_s} = \tan(\psi) e^{i\Delta} \quad \text{--- (2.9)}$$



รูปที่ 2.16 ลักษณะของ Ellipsometry ทั่วไป [30]

#### 2.5.4 การวิเคราะห์ข้อมูลของ Ellipsometry [30]

Ellipsometry จะวัดการเปลี่ยนแปลง Polarization ของแสง ซึ่งในการวัดนั้นจะใช้แสงความยาวคลื่นหลายค่า และมีมุมที่ใช้ในการวัดคงที่หรือหลายมุม เพื่อระบุคุณสมบัติของชั้นงานที่วัดเช่น ความหนาของฟิล์ม, ค่าดัชนีหักเหของวัสดุแต่ละชั้น และความหยาบของพื้นผิว ซึ่งกระบวนการทั่วไปที่ Ellipsometry ใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของวัตถุแสดงไว้ดังแผนผังในรูปที่ 2.17 [30] โดยมีขั้นตอนดังนี้ หลังจากที่ได้ทำการวัดชั้นงานตัวอย่างแล้วแบบจำลองจะถูกสร้างขึ้นมาเพื่ออธิบายลักษณะของชั้นงานตัวอย่างซึ่งแบบจำลองนี้จะใช้ในการคำนวณและทำนายผลจากสมการ Fresnel's (Fresnel's equation) ซึ่งอธิบายถึงความหนา, ค่าดัชนีหักเหของวัสดุแต่ละชั้น และความหยาบของพื้นผิว ซึ่งถ้าไม่รู้ค่าเหล่านี้ Ellipsometry จะทำการประมาณค่าเริ่มต้นเพื่อจุดประสงค์ในการคำนวณเบื้องต้นซึ่งค่าที่คำนวณได้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการวัดโดยจะทำการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ต่างๆของวัสดุที่ไม่รู้ค่าเช่น ความหนา ดรรชนีหักเหและความหยาบของพื้นผิวเพื่อที่จะปรับปรุงความเข้ากันของข้อมูลจากการคำนวณและการวัด โดยทั่วไปในการหาความเข้ากันที่ดีที่สุดของข้อมูลจากการคำนวณและจากการวัดจะใช้วิธี Regression ซึ่งใช้ ค่าเฉลี่ยของค่าความผิดพลาดกำลังสอง (Mean Square Error, MSE) เป็นตัวพยากรณ์เพื่อปรับปรุงความแตกต่างระหว่างข้อมูลจากการคำนวณและข้อมูลจากการวัดให้ดีขึ้นซึ่งพารามิเตอร์ต่างๆที่ไม่รู้ค่าเช่น เช่น ความหนา ดรรชนีหักเหและความหยาบจะสามารถเปลี่ยนแปลงได้จนกว่าจะได้ค่า MSE ที่น้อยที่สุด โดยที่ค่าตอบ (ค่าพารามิเตอร์ต่างๆเช่น ความหนา ดรรชนีหักเหและความหยาบ ที่ทำการเปลี่ยนแปลงจนกระทั่งได้ที่ MSE มีค่าน้อยที่สุด) ที่ถูกต้องที่สุดจะสัมพันธ์กับค่า MSE ที่น้อยที่สุด



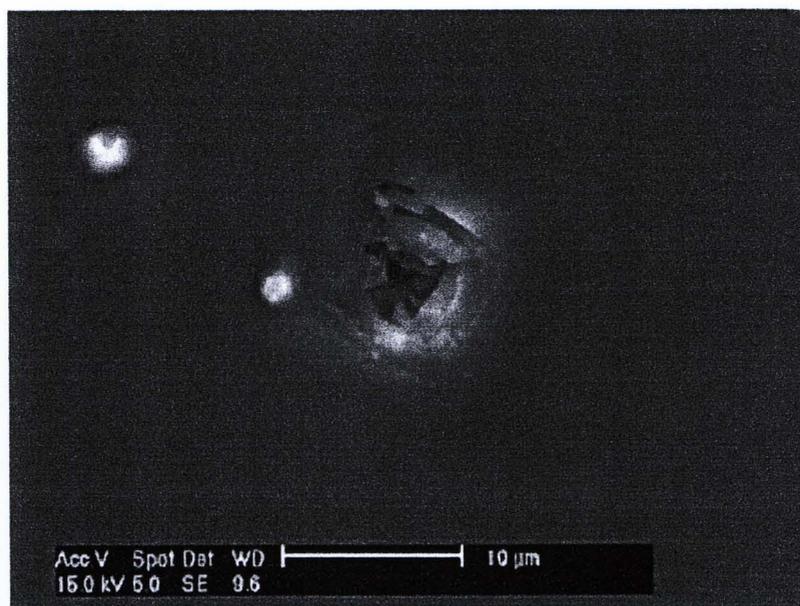
รูปที่ 2.17 แผนผังการวิเคราะห์ข้อมูลของ Ellipsometry [30]

## 2.6 การวัดคุณสมบัติทางกลของฟิล์ม

โดยทั่วไปมีอยู่หลากหลายวิธีในการบ่งบอกถึงประสิทธิภาพของพื้นผิวและคุณสมบัติทางกลของฟิล์ม DLC การทดสอบเพื่อวัดคุณสมบัติทางกลจะประกอบด้วย การวัดความแข็งแรง (Hardness and nanoindentation test) การวัดความสามารถในการยึดเกาะ (Adhesion) โดยการทดสอบ Scratch (Scratch test) และการทดสอบการคงทนต่อรอยขีดข่วน (Wear test) [20, 26]

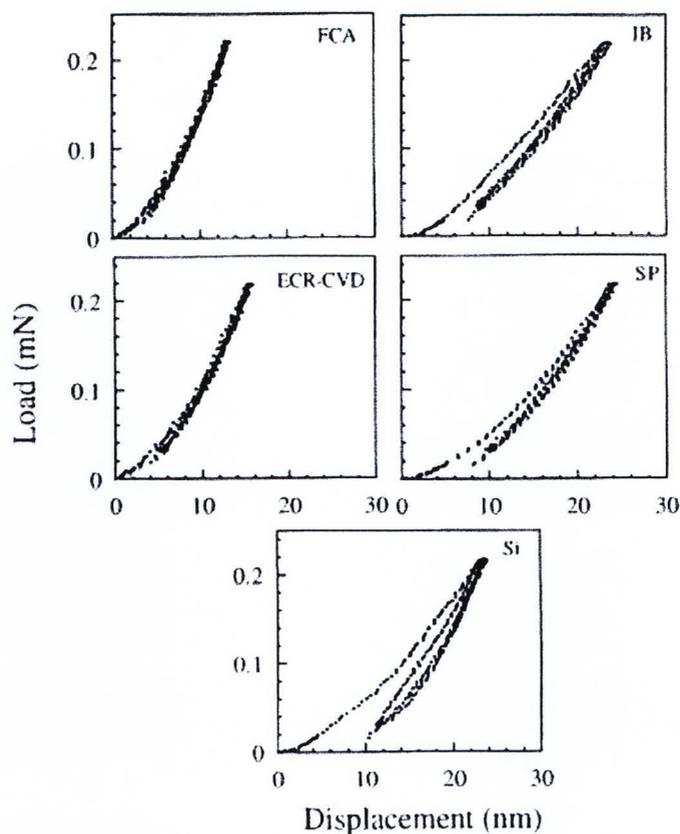
### 2.6.1 การวัดความแข็งแรงของฟิล์ม

การวัดความแข็งแรง (Hardness test) ถูกใช้เพื่อวัดคุณสมบัติของฟิล์มมานานแล้ว การวัดด้วย Microindentation มีข้อดีคือประหยัด ไม่ซับซ้อนและนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายแต่ในการวัด Hardness นั้นยากที่จะแยกผลของกระแทกของ substrate ที่มีต่อ Hardness ออกจากฟิล์ม ยิ่งไปกว่านั้นในการวัด DLC ฟิล์มการเกิดรอยแตกนั้นเป็นเรื่องปกติและอาจเกิดขึ้นในลักษณะ Nested crack รอบๆเส้นรอบวงของรอยกดดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.18 [20] ดังนั้นจึงยากที่จะระบุขนาดของรอยกดได้อย่างแม่นยำและนำไปสู่ความไม่แน่นอนในการคำนวณ Hardness [20]



รูปที่ 2.18 Nested crack ที่เกิดขึ้นจากการใช้วิธี Microindentator บนฟิล์ม DLC [20]

ในปัจจุบัน Nanoindentation นั้นกลายเป็นวิธีที่นิยมในการวัด Elastic modulus และ Hardness ของฟิล์ม ในการวัด Nanoindentation แรงและความลึกที่กดลง (Displacement) ไปบนวัตถุตัวอย่าง (Sample) จะถูกบันทึกไว้เป็นฟังก์ชันของเวลาเพื่อที่จะสร้าง Mechanical fingerprint ของการตอบสนองทางกลในการกด ข้อดีของ Nanoindentation ที่เหนือกว่าการวัด Hardness แบบทั่วไปคือสามารถวัดคุณสมบัติทางกลของฟิล์มแยกกับ Substrate ได้ซึ่งมีกฎอยู่ว่าการที่จะสามารถวัด Hardness ของฟิล์มเพียงอย่างเดียวความลึกในการกดต้องอยู่ที่ประมาณ 10% ของความหนาของฟิล์ม [20] ความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ใช้กดและความลึกที่กดลงไปโดยการใช้ Nanoindentation บน DLC ฟิล์มที่ปลูกด้วยวิธีที่แตกต่างกันแสดงไว้ดังรูปที่ 2.19 [26] โดยใช้แรงในการกด 0.2 ถึง 10 มิลลินิวตันโดยจะมีการตรวจจับและบันทึกความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ใช้กดกับความลึกที่กดลงไป (Load displacement curve) DLC ที่ใช้ในการทดสอบมีความหนา 100 นาโนเมตรปลูกบนซิลิกอน Substrate โดยที่วิธี FCA (Filter cathodic arc) มีค่า Hardness สูงที่สุดและตามมาด้วย ECR-CVD (ECR-chemical vapour deposition), IB (Ion beam deposition, IBD), SP (Sputtering) และซิลิกอน Substrate ตามลำดับโดยที่ความลึกของรอยกดจะแปรผกผันกับ Hardness [26]

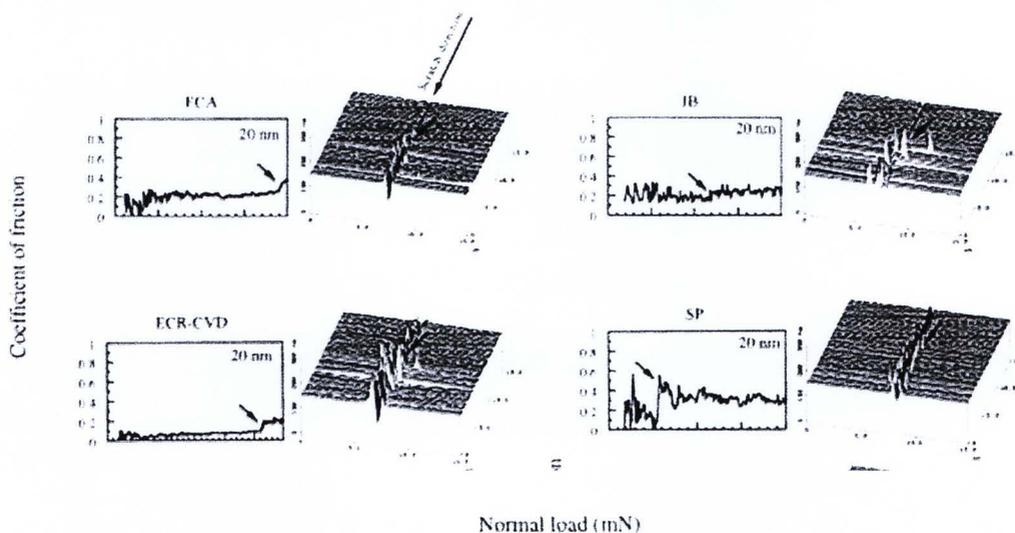


รูปที่ 2.19 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ใช้กดกับความลึกของรอยกดของ DLC หนา 100 นาโนเมตรที่ปลูกด้วยวิธีต่างๆบนซิลิกอน Substrate และซิลิกอน Substrate [26]

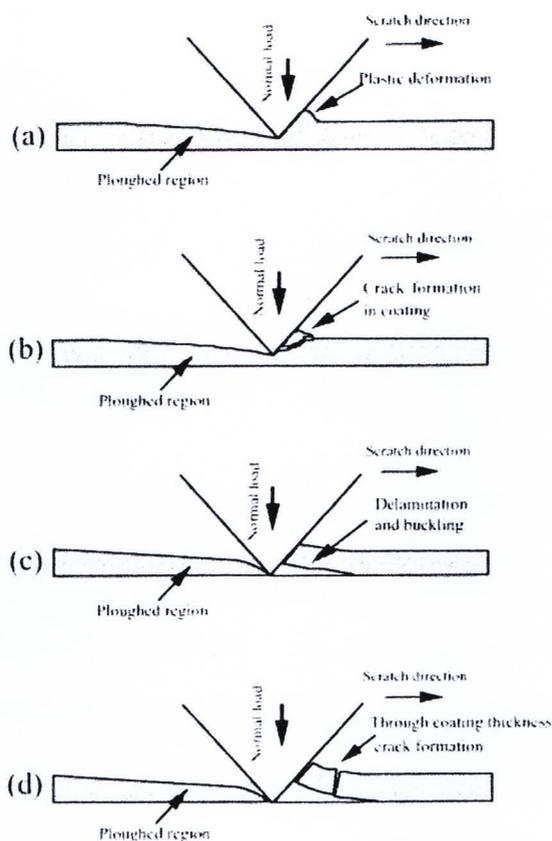
### 2.6.2 Microscratch [26]

ในการศึกษา Microscratch ใช้หัวกด (Indenter) ที่มีลักษณะเป็นกรวยโดยมีปลายที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 ไมโครเมตรลากบนผิวของวัตถุตัวอย่างและเพิ่มแรงกดจนกระทั่งเกิดความเสียหายขึ้นบนพื้นผิวของวัตถุตัวอย่างโดยจะตรวจจับโดยใช้สัมประสิทธิ์ของความเสียหายซึ่งสัมประสิทธิ์ของความเสียหายจะค่อยๆเพิ่มขึ้นเมื่อเกิดการขีดขึ้นโดยที่การเพิ่มขึ้นอย่างฉับพลันของสัมประสิทธิ์ของความเสียหายจะสัมพันธ์กับ Scratch resistance หรือความแข็งแรงในการยึดเกาะของฟิล์ม (Adhesion strength) Microscratch เป็นเทคนิคที่ใช้ในการศึกษาการยึดเกาะของฟิล์ม (Adhesion) และความทนทานต่อการสึกหรอเชิงกล (Mechanical durability) ของการปลูกฟิล์มวิธีต่างๆ ในการทดสอบ Scratch การเกิดรอยแตกหรือการลอกออกของฟิล์ม (Delamination) จะถูกตรวจจับโดยการเพิ่มขึ้นอย่างฉับพลันของสัมประสิทธิ์ของความเสียหายซึ่งแรงกดที่สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันของสัมประสิทธิ์ของความเสียหายคือ Critical load กราฟความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์ของความเสียหายกับแรงกดและรูปร่างของพื้นผิวที่เกิดความเสียหายจากการทดสอบ Scratch ที่ได้จากการวัด AFM (Atomic force microscope) ของฟิล์ม DLC หนา 20 นาโนเมตรที่ปลูกด้วยวิธีที่

แตกต่างกันบนซิลิกอน Substrate แสดงไว้ดังรูปที่ 2.20 [26] โดยที่ลูกศรในภาพระบุถึง Critical load ซึ่งแสดงให้เห็นว่า FCA และ ECR-CVD มีการยึดเกาะของฟิล์มดีกว่า IB และ SP ซึ่ง Critical load จะแปรผันตรงกับความสามารถในการยึดเกาะของฟิล์มโดยที่สามารถวิเคราะห์รอยขีดข่วนที่เกิดขึ้นจากรูปร่างของรอยขีดข่วนที่ได้จากการวัด AFM ไดอะแกรมลักษณะการลอกออกของ DLC ฟิล์มแสดงไว้ดังรูปที่ 2.21 [26] ก่อนที่จะเกิดการลอกออกของฟิล์มถ้าฟิล์มมีความแข็งแรงและความเหนียวดี (Toughness) การขีดจะทำให้วัสดุที่ใช้เคลือบเสียรูปร่างเนื่องจากเกิดความเสียหายขึ้นที่พื้นผิว (รูปที่ 2.21a) อย่างไรก็ตามถ้าฟิล์มมีความแข็งแรงและความเหนียวน้อยการขีดจะทำให้เกิดเศษเล็กๆของวัสดุที่ใช้เคลือบ (รูปที่ 2.21b) เมื่อแรงกด (Normal load) เพิ่มขึ้นจนถึง Critical load จะเกิดการลอกของฟิล์มที่รอยต่อระหว่างฟิล์มกับ Substrate (รูปที่ 2.21c) ถ้าเพิ่มแรงกดให้มากกว่า Critical load จะทำให้เกิด Breakdown ของฟิล์มขึ้นเนื่องจากฟิล์มจะแตกออก (รูปที่ 2.21d)



รูปที่ 2.20 กราฟความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับแรงกดและรูปร่างของพื้นผิวที่เกิดความเสียหายของฟิล์ม DLC หนา 20 นาโนเมตรที่ปลูกด้วยวิธีที่แตกต่างกันบนซิลิกอน Substrate [26]



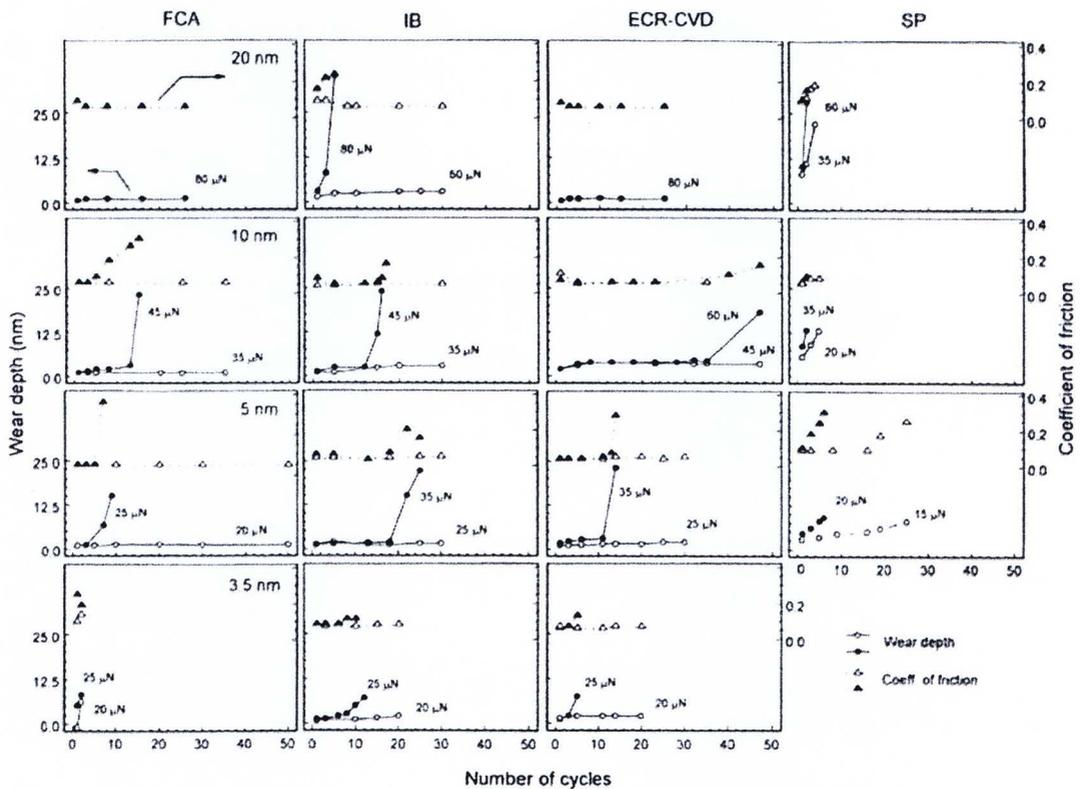
รูปที่ 2.21 ไตอะแกรมกลไกการเกิดความเสียหายของฟิล์ม DLC (a) ฟิล์มเสียรูปร่างเนื่องจากการขีด (b) เกิดเศษของฟิล์มขึ้นเนื่องจากการขีด (c) ฟิล์มเกิดการลอกออกจาก Substrate (d) เกิดฟิล์ม Breakdown ขึ้นเนื่องจากฟิล์มเกิดรอยแตกขึ้น [26]

### 2.6.3 การทดสอบรอยขีดข่วน [24]

การศึกษา Microwear สามารถทำได้โดยใช้ AFM (Atomic force microscope) โดยใช้หัวกดเพชรที่มีรูปทรงพีระมิดมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 นาโนเมตรโดยใช้แรงในการกดตั้งแต่ 1 ถึง 150 ไมโครนิวตัน หัวกดเพชรจะยึดติดกับคานที่ทำด้วยเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) โดยที่จะลากไปบนผิวของวัตถุตัวอย่างในทิศทางตั้งฉากกับแกนยาวของคานโดยทั่วไปใช้อัตราความเร็ว 0.5 รอบต่อวินาที หัวกดเพชรจะติดอยู่ที่ปลายคาน สำหรับการศึกษา Microwear โดยทั่วไปจะใช้หัวกดเพชรลากไปบนวัตถุตัวอย่างเป็นพื้นที่ 2 ไมโครเมตร x 2 ไมโครเมตรและลากซ้ำตามจำนวนรอบที่กำหนด

Microwear ทดสอบกับ DLC ฟิล์มที่ปลูกด้วยวิธีที่แตกต่างกันบนซิลิกอน Substrate ตามที่แสดงไว้ดังรูปที่ 2.22 [24] โดยที่ฟิล์มที่ปลูกด้วยวิธี FCA กับ ERCVD ที่มีความหนา 20 นาโนเมตรมีความทนทานต่อรอยขีดข่วนได้อย่างดีเยี่ยมโดยสามารถทนได้ที่แรงมากถึง 80 ไมโครนิวตันซึ่งที่แรงกดนี้จะทำให้ฟิล์มที่ปลูกด้วยวิธี IB นั้นเสียหายได้ ฟิล์มที่ปลูกด้วยวิธี SP จะเสียหายด้วยแรงเพียง 35 ไมโครนิวตัน ที่ฟิล์มหนา 10 นาโนเมตรฟิล์มที่ปลูกด้วยวิธี ERCVD

ต้องใช้แรง 65 ไมโครนิวตันโดยทำการขูดเข้าไปเข้ามาถึง 45 รอบถึงจะเกิดความเสียหายขึ้นใน ขณะที่ IB และ FCA เกิดความเสียหายที่ 45 ไมโครนิวตันโดยที่ผลจากการทดสอบพบว่า การปลูกฟิล์มด้วยวิธี FCA และ ERCVD ที่มีความหนาฟิล์ม 10 ถึง 20 นาโนเมตร มีความสามารถในการทนทานต่อรอยขีดข่วนดีที่สุด โดยที่ความสามารถในการทนทานต่อรอยขีดข่วนสามารถระบุได้จากความลึกของรอยขีดข่วนที่เกิดขึ้น ปริมาณแรงกดที่สามารถทนได้ สัมประสิทธิ์ของความเสียหาย และจำนวนรอบที่สามารถทนได้



รูปที่ 2.22 ข้อมูลทดสอบ Wear บนฟิล์ม DLC ที่ปลูกด้วยวิธีที่แตกต่างกัน ความหนาฟิล์มใน แถวเดียวกันจะเท่ากัน โดยที่แต่ละกราฟจะแสดงความลึกของรอยขีดข่วนและสัมประสิทธิ์ของความเสียหาย [26]