ภาคผนวก ก

# วิธีการวัดความสะอาดแบบใหม่ในการผลิตฮาร์ดดิสไดร์ฟที่เป็นวิธีโดยตรง

## New Direct Methodology for Cleanliness Measurement in Hard disk drive Manufacture

ณรงก์พันธ์ รุ่งเจริญ และวันชัย ไพจิตโรจนา

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ 99 ม.18 ถนนพหลโยธิน ต.คลองหนึ่ง อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12120 โทร. 0-2564-3001-9 ต่อ 3045 โทรสาร 0-2564-3001-0, E-mail: nu hder2@hotmail.com, pwanchai@engr.tu.ac.th

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวิธีการวัคก่าความสะอาคบนพื้นผิวของ ฮาร์คคิสแบบใหม่ โดยนำหลักการของการกระเจิงแสงมาประยุกต์ใช้ใน การวัคก่าความเข้มของการกระเจิงแสง โดยอาสัยการหามุมในการรับแสง ที่ถูกกระเจิงทั้งจากอนุภาคและจากพื้นผิวของฮาร์คคิส เพื่อทำการแยกค่า ความเข้มการกระเจิงแสงของอนุภาคออกจากก่าการกระเจิงแสงของ พื้นผิวฮาร์คคิส ซึ่งผลที่ได้จะนำมาซึ่งก่าการกระเจิงแสงจากอนุภาคที่ ถูกต้อง โดยจะนำก่าที่ได้นี้มาวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อ หาจำนวนและขนาดของอนุภาคบนพื้นผิวชิ้นงานฮาร์คคิสไดร์ฟ

กำสำคัญ: การกระเจิงแสง, ฮาร์คดิสไคร์ฟ, อนุภาค

#### Abstract

This paper presents methodology for a new direct cleanliness measurement in hard disk drive manufacture. The principle of the methodology is light scattering to measure fine value cleanliness. By obtaining the angle of receiving light scattered from particles or contaminants, the intensity of scattering light is obtained by calculating the difference between the intensity of light scattered from particles plus the surface and the intensity of light scattered from particles only. The results analyzed using computer program are used to obtain the number and size of the particles.

Keywords: Light Scattering, Hard Disk Drive, Particle

#### 1.บทนำ

โดยทั่วไปแล้วการวัดอนุภาค (Particle) ที่เกาะติดอยู่บนพื้นผิว ของอุปกรณ์ฮาร์คดิสไคร์ฟ (Hard Disk Drive) จะมีอยู่ 2 วิธี[1] คือ 1) แบบวิธีโดยตรง (Direct Method) เป็นการวัดกับชิ้นงานได้โดยไม่ต้องนำ ชิ้นงานไปผ่านกระบวนการใดๆ ก่อนการวัด เช่น การวัดโดยใช้กล้อง จุลทรรศน์ (Microscope) ที่สามารถดูขนาดของอนุภาคได้โดยตรง และ 2) แบบวิธีโดยอ้อม (Indirect Method) เป็นวิธีการวัดที่ไม่สามารถกระทำ กับตัวชิ้นงานได้โดยตรงจะต้องผ่านกระบวนการที่ใช้สำหรับนำอนุภาค ออกจากชิ้นงานก่อนแล้วถึงจะสามารถทำการวัดหาอนุภาคนั้นได้ เช่น การวัดที่ใช้เทคนิควิธีการวิเกราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ ส่องกราด (Scanning Electron Microscopy ; SEM) เป็นการวัดที่ไม่ สามารถกระทำกับชิ้นงานได้โดยตรง โดยส่วนใหญ่แล้วในอุตสาหกรรม ฮาร์ดดิสไดร์ฟทั่วไปจะใช้วิธีการวัดแบบโดยอ้อม ซึ่งเป็นวิธีการวัดที่ ให้ผลที่ดีกว่าในการวัดอนุภาค อย่างไรก็ตามวิธีการดังกล่าวมีความยุ่งยาก ในวิธีการใช้เครื่องมือและใช้ระยะเวลานานในการตรวจวัด ทำให้ไม่ เหมาะกับงานที่มีอัตราการผลิตสูงนอกจากนี้ยังไม่สามารถนำเอาชิ้นงาน ที่ผ่านการตรวจวัดแล้วกลับมาใช้ในกระบวนการผลิตอีกได้ จึงได้มี ผู้สนใจศึกษาหลักการกระเจิงของแสงในการตรวจวัดอนุภาคที่อยู่บน พื้นผิวที่เรียบโดย Yuzo MORI และคณะ[2]ได้เสนอวิธีการตรวจวัดหา งนาดและจำนวนของอนุภาคที่อยู่บนแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์(Si Water)โดย ใช้หลักการกระเจิงแสง ในปี 1991 ต่อมาในปี 2000 Daniela Fontani และคณะ[3]ได้นำหลักการกระเจิงแสงมาประยุกต์ใช้ในการตรวจวัด ความเรียบของพื้นผิวโลหะ

บทความนี้จึงได้เสนอวิธีการตรวดวัดหาอนุภากที่อยู่บน อุปกรณ์ฮาร์ดดิสก์ที่มีพื้นผิวความเรียบที่แตกต่างกัน โดยอาศัยหลักการ ของการกระเจิงแสงมาประยุกต์ใช้ในการวัดก่าความเข้มของการกระเจิง แสง โดยอาศัยการหามุมในการรับแสงที่ถูกกระเจิงทั้งจากอนุภาคและ จากพื้นผิวของฮาร์ดดิสไดร์ฟ เพื่อทำการแยกก่าการกระเจิงแสงของ อนุภาคออกจากก่าการกระเจิงแสงของพื้นผิวฮาร์ดดิสไดร์ฟ ซึ่งผลที่ได้จะ นำมาซึ่งก่าการกระเจิงแสงจากอนุภาคที่ถูกต้อง ซึ่งวิธีการดังกล่าวนี้ สามารถลดระยะเวลาในกระบวนการทำความสะอาดและชิ้นงานที่ผ่าน การตรวจวัดและยังสามารถนำกลับไปใช้ใหม่ได้อีกด้วย

## 2. หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 หลักการกระเจิงแสง(Light scattering)

แสงที่ตกกระทบบนวัตถุจะทำให้เกิดการกระเจิงของแสงโดย จะประกอบด้วย การสะท้อนของแสง, การหักเหของแสง และการ เลี้ยวเบนของแสง [4]

การกระเจิงแสงสามารถกำหนดรูปแบบการกระเจิงได้จาก ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากขนาดของอนุภาคหาได้จากสมการ

$$\alpha = \frac{2\pi a m_0}{\lambda} \tag{1}$$

a คือ รัศมีของอนุภาค

 $m_{_0}$  คือ ค่าดัชนีหักเหของอนุภาค

# $\lambda$ คือ ค่าความยาวคลื่นของแสงที่ตกกระทบ

โดยพบว่า α>>1 คือ รูปแบบของ Mie Scattering Theory

α<<1 คือ รูปแบบของ Rayleigh Scattering Theory

# หลักการกระเจิงแสงของอนุภาคแบบไมย์(Mie Scattering Theory)

การกระเจิงแสงบนอนุภาคที่มีขนาคค่า α>>1 จะนำมา คำนวณในการกระเจิงแสงแบบไมย์ [5] โดยอนุภาคที่เป็นทรงกลมจะเกิด การโพลาไรซ์ (Polarization) โดยในแนวตั้งความเข้มแสงที่ตกกระทบ และความเข้มแสงที่กระเจิงหาได้จากสมการ

$$I_{VV} = I_0 \frac{1}{r^2} \sigma_{VV}$$
(2)

<sub>I
0</sub> คือ ค่าความเข้มแสง

r คือ ค่ารัศมีของความเข้มแสง

σ๋,, คือ ค่าความแตกต่างการตัดขวางในด้านแนวตั้ง และการโพลาไรซ์ในแนวนอนความเข้มแสงที่ตกกระทบและความเข้ม แสงที่กระเงิงจะหาได้จากสมการ

$$I_{HH} = I_0 \frac{1}{r^2} \sigma_{HH}$$
 (3)

σ่<sub>m</sub> คือ ค่าความแตกต่างตัดขวางในด้านแนวนอน และในอนุภาคทั่วไปที่ไม่เกิดการโพลาไรซ์ในการกระเจิงแสงแบบไมย์ จะหาได้จากสมการ

$$I_{scat} = I_0 \frac{1}{r^2} \sigma'_{scat}$$
(4)

 $\sigma_{_{\!\scriptscriptstyle M\!M}}^{'}$  คือ ค่าเฉลี่ยของ  $\sigma_{_{\!\scriptscriptstyle I\!V}}^{'}$  กับ  $\sigma_{_{\!\scriptscriptstyle I\!I\!I}}^{'}$  โดยที่ค่า  $\sigma_{_{\!\scriptscriptstyle N}}^{'}$  ,  $\sigma_{_{\!I\!I\!I}}^{'}$  จะหาได้จาก สมการ

$$\sigma_{VV}^{'} = \frac{\lambda^2}{4\pi^2} i_1 \quad , \quad \sigma_{HH}^{'} = \frac{\lambda^2}{4\pi^2} i_2 \tag{5}$$

i<sub>1</sub> , i<sub>2</sub> คือ ฟังก์ชั่นความเข้มแสงที่สัมพันธ์กับมุม ดังนั้นค่า σ<sub>่...</sub> จะหาได้จากสมการ

$$\sigma_{scat} = \frac{\lambda^2}{8\pi^2} (i_1 + i_2) \tag{6}$$

โดยที่ก่า $i_1, i_2$ จะหาได้จากสมการที่ (7) และ (8)

$$i_{1} = \left| \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} \left[ a_{n} \mathcal{T}_{n} (\cos \theta) + b_{n} \mathcal{T}_{n} (\cos \theta) \right] \right|^{2}$$
(7)

$$i_{2} = \left| \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} \left[ a_{n} \mathcal{T}_{n} (\cos \theta) + b_{n} \mathcal{T}_{n} (\cos \theta) \right] \right|^{2}$$
(8)

 $\pi_{_{\!\! n}}, au_{_{\!\! n}}$  คือ มุมที่ขึ้นอยู่กับฟังก์ชั่น Legendre polynomials

 $a_{n,b_n}$  คือ ค่าพารามิเตอร์ขนาดอนุภาคlpha ที่อยู่ในฟังก์ชั่นRicatti-Bessel

# 2.3 หลักการกระเจิงแสงบนพื้นผิวขรุขระ (Roughness

## Scattering Theory)

แสงที่ตกกระทบบนพื้นผิวที่ไม่เรียบจะทำให้เกิดการ กระเจิงแสงบนพื้นผิวเกิดขึ้น[6] โดยก่ากวามเข้มแสงที่ได้จากกระเจิงแสง จากพื้นผิวจะมีก่าเป็น I = (pp\*) ค่า I ที่ได้จากการกระเจิงแสงใน พื้นผิวที่บรุงระน้อยหาได้จากสมการ

$$\langle \rho \rho^* \rangle = e^{-g} \rho_0^2 + \frac{\sqrt{\pi} F^2 T_g}{2L} e^{-V_x^2 T^2/4m} \, \dot{\eta}_{g\Box_1}$$
 (9)

T คือ ระยะที่สัมพันธ์กับความขรุงระ

 $\sigma$  คือ ค่าความขรุขระ

- L คือ ระยะในการส่องสว่าง
- g คือ ค่าที่ใช้กำหนดระดับความขรุขระของพื้นผิว

โดยในแต่ละพื้นผิวนั้นจะมีความขรุขระที่ไม่เหมือนกันโดยสามารถแยก ได้จากค่า g ดังสมาการ

$$g = V_Z^2 \sigma^2 \tag{10}$$

โดยค่า  $ho_{\scriptscriptstyle 0}$  หาได้จากสมการ

$$\rho_0 = \sin c(V_x L) \tag{11}$$

โดยค่า v, หาได้จากสมการ

$$V_{x} = \frac{2\pi}{\lambda} (\sin\theta_{1} - \sin\theta_{2})$$
(12)

 $oldsymbol{ heta}_{_{\!\scriptscriptstyle 1}}$  คือ มุมตกกระทบ

## $heta_{_{\! 2}}$ คือ มุมสะท้อน

้ ก่า 1 ที่ได้จากการกระเจิงแสงในพื้นผิวที่ขรุขระมากได้จากสมการ

$$\left\langle \rho \rho^* \right\rangle = \frac{TF^2 \sqrt{\pi}}{LV_z \sigma^2} \exp\left(-\frac{V_x^2 T^2}{4V_z^2 \sigma^2}\right) \quad \text{in}_{g\Box_1} \tag{13}$$

โดยค่า  $V_z$  หาใด้จากสมการ

$$V_z = \frac{2\pi}{\lambda} (\cos\theta_1 + \cos\theta_2)$$
(14)

### 3. การคำนวณ และการออกแบบระบบ

# 3.1 การวัดการกระเจิงแสงของอนุภาคบนพื้นผิวเรียบโดย สมบูรณ์

การวัดจำนวนและขนาดของอนุภากโดยการวัดการกระเจิง แสงจะทำการวัดก่า I.... โดยจะกำหนดก่ากวามยาวกลื่นที่ใช้กือ 633 นาโนเมตร และอนุภากที่ต้องการวัดจะเป็นชนิด AI.o., Sio. และ Tio. ที่มี ขนาดอนุภากตั้งแต่ 0.2 - 0.6 µm และมีก่าดัชนีหักเหของอนุภาก 1.76, 1.45, 2.75 ตามลำดับ ส่วนก่าดัชนีหักเหของพื้นผิวชิ้นงานที่เป็นชนิด AI 6061-T6 (ชนิดของวัสดุที่นำมาขึ้นรูปเป็นชิ้นงาน) จะมีก่าเป็น 1.525 โดย ที่ยังไม่กิดก่ากวามเฉลี่ยขรุขระระของพื้นผิว



รูปที่ 1 แสดงทิศทางการกระเจิงแสงของอนุภาค จากรูปที่ 1 แสดงมุมที่ตกกระทบของแสง I<sub>,</sub> จะได้มุมการกระเจิงของแสง I<sub>xa</sub> ที่ขึ้นอยู่กับค่า θฺ และค่าφฺ ที่หาได้จากสมการกระเจิงแสงแบบไมย์ ที่มีก่า α>>1 โดยสามารถหาได้จากสมการที่ (1)

ผลการกำนวณกวามสัมพันธ์ระหว่างก่า I<sub>san</sub> กับมุมการ กระเจิงแสงของอนุภาคบนพื้นผิวเรียบตัวอย่างอนุภากที่ใช้เป็นอนุภาก ของสารประกอบ *sto*g ซึ่งมีขนาด 0.2 µm พบว่าให้ก่ากวามเข้มแสงของ การกระเจิงสูงสุดคือ 0.84772 ในขอบเขตการกระเจิงแสงในรูปครึ่งทรง กลมสามมิติพบว่าอยู่มุมประมาณ 60° ณ จุด A ที่ทิศทางของรังสีตก กระทบและรังสีสะท้อนในรูปที่ 2 เช่นเดียวกับอนุภาคชนิดอื่นๆ และ ขนาดต่างๆสรุปได้ดังตารางที่ 1



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า I<sub>scat</sub> กับมุมการกระเจิงแสงของอนุภาค บนพื้นผิวเรียบ และตำแหน่งของจุด Aที่มีความเข้มแสงสูงสุด



# 3.2 การวัดการกระเจิงแสงจากพื้นผิวขรุขระ

การวัดค่าการกระเจิงแสงของพื้นผิวขรุขระสามารถหาได้จาก การวัดค่าความเข้มแสงที่กระเจิงจากพื้นผิวโดยกำหนดค่าความยาวกลื่น ของแสงทีตกกระทบเป็น 633 nm และค่าเฉลี่ยความขรุขระของพื้นผิว 0.5



รูปที่ 3 แสดงทิศทางการกระเจิงแสงของพื้นผิวขรุขระ

ในรูปที่ 4 มุมตกกระทบของแสง I<sub>o</sub> จะ ใด้มุมการกระเจิงของ แสง I<sub>o</sub> ที่ขึ้นอยู่กับค่า θ<sub>o</sub> ที่หาได้จากสมการการกระเจิงแสงของพื้นผิว หาได้จากสมการที่ (9) และ(13) โดยสมการทั้งสองจะขึ้นอยู่กับค่าที่ใช้ กำหนดระดับความขรุขระของพื้นผิว g ที่หาได้จากสมการที่ (10)

ผลการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างก่า I<sub>,</sub> กับมุมการกระเจิง แสงที่พื้นผิวขรุขระ ซึ่งมีขนาดของความขรุขระ 0.5 μm พบว่าให้ก่าความ เข้มแสงของการกระเจิงสูงสุดคือ 0.00473 ในขอบเขตการกระเจิงแสงใน รูปครึ่งทรงกลมสามมิติพบว่าอยู่มุมประมาณ 48° ณ จุด Aที่ทิศทางของ รังสีตกกระทบและรังสีสะท้อนในรูปที่ 5



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างก่า / กับมุมการกระเจิงแสงบนพื้นผิว ขรุขระและตำแหน่งของจุด Aที่มีความเข้มแสงสูงสุด

# 3.3 การวัดการกระเจิงแสงของอนุภาคบนพื้นผิวขรุขระ

ในส่วนนี้ได้นำวิธีการทั้งสองส่วนในหัวข้อ 3.1 และ3.2 มาทำ การวัดค่าความเข้มของการกระเจิงแสงของอนุภาคบนพื้นผิวขรุขระ โดยมี หลักการของทิศทางการตกกระทบของแสงที่มุมเดียวกันแต่จะมีทิศทาง ในการกระเจิงแสงที่ไม่เหมือนกัน



รูปที่ 5 ทิศทางการกระเจิงแสงของอนุภาคบนพื้นผิวขรุขระ จากรูปที่ 5 มุมที่แสงตกกระทบจะทำให้เกิดการกระเจิงของอนุภาคหรือ สิ่งปนเปื้อนที่อยู่บนพื้นผิวขรุขระจะมีทิศทางเป็น I และทำให้เกิดการ กระเจิงแสงของพื้นผิวขรุขระที่ทิศทาง I คอบั้นตอนการออกแบบของ ระบบการวัดอนุภาคหรือสิ่งปนเปื้อนบนพื้นผิวขรุขระที่ใช้วิธีการกระเจิง แสงสามารถแยกออกได้เป็น 3 ขั้นตอน โดยเริ่มจากการวัดค่าการกระเจิง แสงของอนุภาคที่มีก่าพื้นผิวขรุขระผสมอยู่ด้วย แล้วจึงทำการแยกก่าการ กระเจิงแสงจากพื้นผิวออก สุดท้ายเป็นการเก็บค่าเฉพาะของการกระเจิง แสงจากอนุภาคหรือสิ่งปนเปื้อนเพื่อนำมาวิเกราะห์หาค่าความสะอาดบน พื้นผิวชิ้นงานดังนี้



รูปที่ 6 แผนภาพแสดงการทำงานของระบบ



รูปที่ 7 ภาพแสดงการทคลองกับชิ้นงานจริง

จากผลการกำนวณสามารถนำไปออกแบบระบบได้โดยการ ใช้แสง Laser ความยาวคลื่น 633 นาโนเมตร ซึ่งทำการลดขนาดลำแสง ด้วย ชุดระบบเลนส์ และใช้อุปกรณ์ตรวจจับแสง 2 ส่วนซึ่งมีอุปกรณ์ ตรวจจับแสงทั้งหมด 17 จุด โดยส่วนที่ 1 อุปกรณ์ตรวจจับ (Detector 1) รับก่าความเข้มการกระเจิงแสงจากพื้นผิว 1 มีทั้งหมด 9 จุดอยู่ในช่วงมุม  $\theta_{1}$ ที่ ทำมุมห่างกันระหว่างจุด ที่ 10 องสา ตั้งแต่ 0 – 90 องสา ส่วนที่ 2 อุปกรณ์ตรวจจับ (Detector 2) รับก่าความเข้มการกระเจิงแสงจากอนุภาค และพื้นผิว 1 มีทั้งหมด 8 จุดอยู่ในช่วงมุม  $\theta_{1}$ ทำมุมห่างกันระหว่าง 10 องสา ตั้งแต่ 0 – 90 องสา อยู่ในตำแหน่งบนพื้นผิวตัวสะท้อนครึ่งวงกลม ซึ่งสัญญาณที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจจับแสงจะถูกนำไปขยายสัญญาณก่อน เข้าชุดแปลงสัญญาณเป็นดิจิตอลและประมวลผลในโปรแกรม Labview เพื่อบันทึกและเปรียบเทียบสัญญาณแรงคันที่ตรวจจับได้ในแต่ละมุมจาก ตัวชิ้นงาน



รูปที่ 8 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของระบบการวัด จากไดอะแกรมดังรูปที่ 8 แสดงขั้นตอนกระบวนแยกความ เข้มแสงที่ได้จากการกระเจิงแสงจากพื้นผิวกับการกระเจิงแสงของอนุภาค ออก ในกระบวนการนี้ I ูเป็นความเข้มแสงจากลำแสงที่มาตกกระทบ กับพื้นผิวขรุขระที่มีอนุภาคหรือสิ่งปนเปื้อนเกาะติดอยู่โดยความเข้มแสง ที่กระเจิงออกมานั้นจะได้เป็น I ูคือค่าการกระเจิงแสงของอนุภาคที่มีค่า พื้นผิวขรุขระผสมอยู่ด้วย โดยก่า I ูที่เป็นก่าความเข้มของการกระเจิงแสง จากพื้นผิวขรุขระซึ่งสามารถแยกออกได้จากก่าผลรวมของการกระเจิง แสง(I \_ - I )ผลที่ได้จะเหลือเฉพาะก่า I \_ ูที่เป็นก่าความเข้มของการ กระเจิงแสงของอนุภาคหรือสิ่งปนเปื้อนอย่างเดียว

จากผลของ I<sub>sca</sub> จะใช้โปรแกรมกำนวณหาขนาดและจำนวน ของอนุภาคชนิดต่างๆ และขนาดต่างๆ ได้โดยจะใช้ก่ามาตรฐานจาก โรงงานเป็นก่าเริ่มต้น (Threshold)

#### **4. สรุป**

บทความนี้เป็นการนำเสนอการวัดความสะอาดแบบใหม่ที่ เป็นวิธี โดยตรงบนชิ้นงานของอุปกรณ์ฮาร์คดิส ไดร์ฟ โดยมีข้อดีกว่าวิธี แบบเก่าเพราะสามารถนำเอาชิ้นงานกลับเข้าไปสู่กระบวนการทำความ สะอาดได้อีกส่งผลทำให้ประสิทธิภาพการทำความสะอาดได้เป็นไปตาม มาตรฐานของโรงงานและนอกจากนั้นทำให้ไม่มีการสูญเสียชิ้นงานอีก ด้วย

### 5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์ แห่งชาติ (NECTEC) ที่ให้การสนับสนุนทุนการทำวิจัยและบริษัท เบลตัล อินดัสเตรียล ประเทศไทย จำกัด ที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์การทำวิจัย โครงการวิจัยนี้อยู่ภายใต้โครงการทุนสนับสนุนการศึกษาระดับปริญญา โทรหัส HDD 08-04-50 M

### เอกสารอ้างอิง

 R.Nagarajan "Survey of Cleaning and Cleanliness Measurement in Disk Drive Manufacture" Precision Cleaning, pp. 13-22, Feb 1997.

[2] Y.Mori, H.An, K.Endo, K.Yamauchi and T.Ied "A New Apparatus for Measuring Particle Sizes of the Order of Nanometer", J.JSPE Sept 1991.

[3] D.Fontani, F.Francini, G.Longobardi and P.Sansoni "Optical control of surface finish", Optics and Lasers in Engineering 32 (2000) 459-472

[4] Paul A. Webb"A primer on particle sizing by static laser light scattering", Micromeritics technical workshop series (2000)

[5] David W. Hahn "Light Scattering Theory", Department of Mechnical and Aerospace Engineering (2008)

[6] P.Beckman ,A.Spizzichino "The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces"685 Canton Street Norwood, MA 02062:Artech House, inc. ISBN 0-89006-238-2.

 [7] Thomas A. Germer "Modeled Integrated Scatter Tool (MIST)", Available free of charge from NIST: <u>http://physics.nist.gov/scatmech</u> (2006)

# Optical Characterization of Particle on Surfaces of Hard Disk Drive

<sup>1</sup>N. Rungcharoen and <sup>2</sup>W. Pijitrojana Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University Klongluang, Pathumthani 12120 <sup>1</sup>narongpun@gmail.com, <sup>2</sup>pwanchai@engr.tu.ac.th

Abstract- This work proposes a new direct method for cleanliness measurement on surfaces of hard disk drive products using light scattering technique. Light scattering technique is one of the method to characterize the unknown particle and contaminants. The simulation of light scattering system of particle are done to obtain parameters, such as intensity of scattered light, positions of detectors, and position of light source. These parameters are used to design the whole system. The scattered light intensities from the system are scattered from both particle and surfaces of product. To extract the scattered light intensity of particle from of surface of product, the angles of both particle and surface are defined at first step. After obtaining the accurate light scattering of particle, the computer program is used to analyze for determining the sizes and number of particle on hard disk drive surface.

Keywords; light scattering; hard disk drive; particle; light source; intensity; detector; contamination

#### I. INTRODUCTION

Generally, the measurement of particle on hard disk drive surface is classified into two methods [1]. 1) Direct method is actually to measure cleanliness on the part of interest by directly inspecting and analyzing the surface of the part such as using Microscope. 2) Indirect method is used to extract the particle of interest from the part and then inspecting the particle for the subsequent processing such as Scanning Electron Microscopy (SEM).

Mainly, the hard disk manufactories usually use the indirect method because of obtaining higher efficient measurement. However, the indirect method is not convenient for high production manufacture due to complicated processing and long time of measurement as well as non-reuse items after extracting.

In the year of 1991, Yuzo MORI and team [2] found a measurement for particle sizes and amount on raw Si wafers by using a light-scattering method. Next, in the year of 2000, Daniela Fontani and team [3] have studied a light-scattering method and developed a system for measuring a flat surface using light scattering techniques.

This paper presents the measurement of particle on surfaces of components of hard disk drive by complying the scattered light intensity upon a light-scattering method. In order to obtain an accurate result, the value of scattered light on particle and the value of light scattering on hard disk drive surface were extracted by identifying the angles of both particle and hard disk drive surface. This method supports to decrease a cleanliness operation time and to maintain a mechanical products for reusing.

#### II. THEORETICAL REVIEW

#### A. Light scattering

The incident light generates three types of the scattered light: reflected light, refracted light and diffracted light [4]

The categories of light scattering can be divided by the parameter value of particle sizes as following equation:

$$\alpha = \frac{2\pi a m_0}{\lambda} \tag{1}$$

*a* is the radius of particle.

 $m_0$  is the refractive index of particle.

 $\lambda$  is the wavelength of incident light.

Thus,  $\alpha >> 1$  (Based on Mie Scattering Theory)  $\alpha << 1$  (Based on Rayliegh Scattering Theory)

B. The principle of scattered light of particle base on Mie Scattering Theory

The scattered light of particle having  $\alpha >> 1$  is calculated based on Mie Scattering Theory [5] which the vertical polarization is occurred on the round particle. According to above matter, the intensity of incident light and scattered light can be written as:

$$I_{VV} = I_0 \frac{1}{r_1^2} \sigma_{VV}^{\prime}$$
(2)

 $I_0$  is the intensity of incident light.

- *r* is the length between particle and detector of scattered light intensity.
- $\sigma'_{_{_{VV}}}$  is the vertical polarized scattering light.

Where scattered light intensity with horizontal polarization is proportional to incident light intensity by equation:

$$I_{HH} = I_0 \frac{1}{r^2} \sigma'_{HH}$$
(3)

 $\sigma_{_{H\!H}}$  is the horizontal polarized scattering light.

Also, scattered light intensity of a particle without polarization based on Mie Scattering Theory is defined as follows:

$$I_{scat} = I_0 \frac{1}{r^2} \sigma'_{scat}$$
(4)

 $\sigma'_{scot}$  is the average of  $\sigma'_{VV}$  and  $\sigma'_{HH}$  which  $\sigma'_{VV}$ ,  $\sigma'_{HH}$  are defined by equations:

$$\sigma_{VV}^{\prime} = \frac{\lambda^2}{4\pi^2} i_1 \quad , \quad \sigma_{HH}^{\prime} = \frac{\lambda^2}{4\pi^2} i_2 \tag{5}$$

Where  $i_1$  and  $i_2$  are the intensity function of calculated from the infinite series.

Thus,  $\sigma'_{scat}$  is equal:

$$\sigma_{scat}^{\prime} = \frac{\lambda^2}{8\pi^2} (i_1 + i_2)$$
(6)

Where  $i_1$  and  $i_2$  are given by formulas (7) and (8) respectively:

$$i_{1} = \left| \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} \left[ a_{n} \mathcal{T}_{n}(\cos\theta) + b_{n} \mathcal{T}_{n}(\cos\theta) \right] \right|^{2}$$
(7)

$$i_{2} = \left| \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} \left[ a_{n} \tau_{n} (\cos \theta) + b_{n} \pi_{n} (\cos \theta) \right] \right|^{2}$$
(8)

 $\pi_{\mu}, \tau_{\mu}$  are expressed in terms of the Legendre polynomials functions.

a and b are the parameters defined from equation of parameter values of particle size (  $\alpha$  ).

#### C. Roughness light Scattering Theory

The incident light on roughness surface presents the scattered light on surface [6] which the scattered light intensity is equal  $I_s = \langle \rho \rho^* \rangle$ . If the value of  $I_s$  is obtained by nominal roughness, it is given by:

$$\left\langle \rho \rho^* \right\rangle = e^{-g} \rho_0^2 + \frac{\sqrt{\pi} F^2 T_g}{2L} e^{-V_x^2 T^2 / 4m} \text{ by } \mathcal{S} << 1$$
 (9)

T is the correlation distance.

- $\sigma$  is the value of roughness.
- L is the length of surface.

g is the value of surface roughness level.

Each surface has different roughness which is defined by the value of g:

$$g = V_Z^2 \sigma^2 \tag{10}$$

Where  $\rho_0$  and  $v_1$  are given by:

$$\rho_0 = \operatorname{sinc}(V_x L) \tag{11}$$

$$V_{x} = \frac{2\pi}{\lambda} (\sin\theta_{1} - \sin\theta_{2})$$
 (12)

 $\theta_1$  is the incident angle.

 $\theta_{2}$  is the reflected angle.

On the other hand,  $I_s$  represents the scattered light intensity on extreme roughness surface as following formula;

$$\left\langle \rho \rho^* \right\rangle = \frac{TF^2 \sqrt{\pi}}{LV_z \sigma^2} \exp\left(-\frac{V_x^2 T^2}{4V_z^2 \sigma^2}\right) \text{ by } \mathcal{G} >> 1$$
 (13)

And  $V_{z}$  is obtained from:

$$V_z = \frac{2\pi}{\lambda} (\cos\theta_1 + \cos\theta_2)$$
(14)

#### III. DESIGN OF EXPERIMENT

1. The measurement of scattered light of particle on a flat surface

To measure particle size and amount by light scattering, the value of  $I_{scat}$  is defined by 635 nanometer of wavelength light, types of particle are  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$  and  $TiO_2$ , the rang of size of particle is 0.2 - 0.6  $\mu m$  and the refractive indices values of particle are 1.76, 1.45, 2.75 respectively. The refractive index of material (Al 6061-T6) of mechanical product surface is 1.525.



Fig. 1 Light scattering on particle.

Refer to Fig. 1, based on Mie Scattering Theory ( $\alpha >> 1$ ), the incident light  $I_{\alpha}$  is reflected at the scattered angle which is equal  $\theta_{\alpha}$  and  $\phi_{\alpha}$ , as shown in equation (1).

The result of correlation between  $I_{scott}$  and scattered angle of example flat surface containing  $SiO_2$  particle with the size of 0.2  $\mu m$  is found that the highest intensity of scattered light is 0.84772. Under scattered light of 3-dimensional semispherical surface, the angle of scattered light is 60° (at point A) with maximum intensity as shown in Fig. 2. Similarly, scattered light intensity and angle of other types and sizes of particle are shown in Fig.3.



Fig. 2 The relation between  $I_{scat}$ , scattered light of particle on flat surface, and the highest intensity of scattered light at point A.

The maximun intensity of pariticle each type.



Fig.3 The maximum intensity of scattered light of particle  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$  and  $TiO_2$  with sizes of  $0.2 - 0.6 \ \mu m$ .

#### 2. The measurement of scattered light of roughness surface

To measure light scattering of roughness surface, fig. 4 shows the diagram of incident light angle and scattered light, the wavelength of light incident is 635 nm and the value of roughness is 0.5.



Fig 4. Light scattering on roughness surface.

According to Fig. 5, the incident light is reflected at the scattered angle which is  $\theta_2$  by equations (9) and (13). These formulas are related to the value of roughness **g** by equation (10).

According to the relation between the value of  $I_s$  and scattered angle on roughness surface with 0.5  $\mu_m$ , it is found that the maximum scattered light intensity is 0.00473. Under the scattered light of 3-dimensional semi-spherical surface, the scattered angle is 48° (at point A) with maximum intensity as shown in fig. 6.



Fig. 5 The relation between the value of  $I_s$  and scattered angle on roughness surface, and highest intensity at point A.

# 3. The measurement of scattered light of particle on roughness surface

This section combines the method of part 1 and 2 to measure the scattered light intensity of particle on roughness surface as following diagram (fig.6).



Fig. 6 Scattered light of particle on roughness surface

From Fig. 6, the scattered light intensity of particle on roughness surface is presented by  $I_{ss}$  and the scattered light of roughness surface is presented by  $I_{ss}$ . To design system of particle measurement, there are three steps. First step, scattered light intensity of particle on roughness surface is obtained. Then, the scattered light intensity of roughness surface is extracted from the value of  $I_{ss}$  as shown in Fig 7. Then, the scattered light intensity,  $I_{ss}$ , is collected and analyzed to obtain the value of cleanliness of surface of products.



Fig. 7 Three steps of particle measurement system.

From the calculations, simulations, and the above results, the cleanliness measurement system was designed as shown in fig.8. The system composes of a laser with wavelength of 635 nm, 17 light detectors, and collimator system. The light detectors are divided into 2 sections. Section 1 of detectors is used to detect 9 points of the scattered light intensity of surface  $I_x$  at different angles ranging from 0° to 90°. Section 2 of detectors is used to detect 8 points of the scattered light intensity of particle and surface  $I_{xx}$  at different angle ranging from 0° to 90°. The position of section 2 of detectors is located perpendicularly to the position of section 1 of detector as shown in fig 8. The signals from the detectors are amplified and converted to digital signals, then these signals are passed to the above process (as shown fig.7) using computer software.



Fig. 8 Conceptual design of system.



Fig. 9 The equipment setup.

#### IV. Conclusions

This work presents the method of a direct cleanliness measurement on surfaces of hard disk drive. The scattered light intensities, both, of particle and surfaces of hard disk drive are measured and then analyzed by using computer program. The sizes and number of particle in surfaces of hrad disk drive are obtained.

The system has been implemented using light source, 635 nm wavelength diode 17 light detectors- 9 detectors for scattered light intensities of surfaces and 8 detectors for scattered light intensities of particle.

The advantages of the method are not only a direct method but also the product can be recleaned and the yield is improved.

#### ACKNOWLEDGMENT

The author would like to thank the National Electronics and Computer Technology Center (NECTEC) of Thailand for financial support and BELTON INDUSTRIAL (Thailand) Ltd. for supporting equipments for this research. The code of research project is HDD 08-04-50 M.

#### REFERENCES

[1] R.Nagarajan "Survey of Cleaning and Cleanliness Measurement in Disk Drive Manufacture" Precision Cleaning, pp. 13-22, Feb 1997.

[2] Y.Mori, H.An, K.Endo, K.Yamauchi and T.Ied "A New Apparatus for Measuring Particle Sizes of the Order of Nanometer", J.JSPE Sept 1991.

[3] D.Fontani, F.Francini, G.Longobardi and P.Sansoni "Optical control of surface finish", Optics and Lasers in Engineering 32 (2000) 459-472

[4] Paul A. Webb"A primer on particle sizing by static laser light scattering", Micromeritics technical workshop series (2000)

[5] David W. Hahn "Light Scattering Theory", Department of Mechnical and Aerospace Engineering (2008)

[6] P.Beckman ,A.Spizzichino "The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces" 685 Canton Street Norwood, MA 02062: Artech House, inc. ISBN 0-89006-238-2.

[7] Thomas A. Germer "Modeled Integrated Scatter Tool (MIST)", Available free of charge from NIST: <u>http://physics.nist.gov/scatmech</u> (2006)

# การศึกษาแบบจำลองการวัดความสะอาดบนพื้นผิวโดยหลักการ BRDF Study Model of Cleanliness Measurement on Surface Using BRDF

มงคล วรรณประภา<sup>1</sup> ณรงก์พันธ์ รุ่งเจริญ<sup>2</sup> และ วันชัย ไพจิตโรจนา<sup>3</sup> ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ 99 ม.18 ถนนพหลโยธิน ต.คลองหนึ่ง อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12120 โทร. 0-2564-3001-9 ต่อ 3045 โทรสาร 0-2564-3001-0 E-mail: w\_mongkol@hotmail.com<sup>1</sup>, nu\_hder2@hotmail.com<sup>2</sup>, pwanchai@engr.tu.ac.th<sup>3</sup>

#### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอแนวทางการวัดโดยใช้แบบจำลอง Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF) [1] 3 ลักษณะ กือ การจำลอง BRDF ที่ใช้ตรวจวัดค่าความเรียบบนพื้นผิวของแผ่น บันทึกข้อมูลชนิด Lubricant ( $n_D^{20}$ ) [2] การจำลอง BRDF<sub>upp</sub> ที่ใช้ตรวจวัด ค่าเฉลี่ยความขรุขระของพื้นผิวที่ขนาด Roughness average (Ra) [3] 0.1, 0.2, 0.5, 0.6, 0.8 และ1 µm และการจำลอง BRDF<sub>put</sub> ที่ใช้ตรวจวัดอนุภาค ที่มีขนาด 10 และ 100 µm ซึ่งมีลักษณะเป็นรูปทรงกลม ชนิด Polystyrene latex (PSL) [4] และอยู่บนพื้นผิวเรียบ ซึ่งผลการทดลองทั้ง 3 ลักษณะนี้ จะมีมุมตกกระทบและมุมสะท้อนที่เหมาะสมที่สุดคือ 89<sup>°</sup>,85<sup>°</sup> และ 89<sup>°</sup> ตามลำดับโดยการสร้างแบบจำลองนี้จะใช้ไปรแกรม Modeled Integrated Scattering Tool (MIST) [5] ตลอด ซึ่งจากการจำลองการตรวจวัดทั้ง 3 รูปแบบสามารถนำไปสู่กระบวนการออกแบบและสร้างระบบตรวจวัดได้ อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: BRDF, PSL, MIST, ค่าเฉลี่ยความขรุขระ, อนุภาค

#### Abstract

This paper proposes a methodology for cleanliness measurement using Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF) [1] in 3 cases: BRDF on surface of recording media of lubricant  $(n_D^{20})$  [2], BRDF<sub>topo</sub> on roughness surface with roughness average [3] (Ra) 0.1, 0.2, 0.5, 0.6, 0.8 and 1 µm, and BRDF<sub>part</sub> for size measurement of Polystyrene latex (PSL) [4] particle, which has spherical shape, on smooth surface. By the results of experiment in 3 cases are incident and reflection of light that perfect angles at 89<sup>°</sup>, 85<sup>°</sup> and 89<sup>°</sup> respectively. The simulations of the model are obtained by software called Modeled Integrated Scattering Tool (MIST). [5] The results of the simulations lead to new design systems of cleanliness measurement effectively.

Keywords: BRDF, PSL, MIST, Ra, Particle

#### 1.บทนำ

ในปัจจบันนี้การตรวจวัดอนภาก (Particle) ที่อย่บนพื้นผิวของ อุปกรณ์ฮาร์คคิสไคร์ฟ (Hard Disk Drive) จะมีอยู่ 2 วิธี [6] คือ 1) แบบวิธี โดยตรง (Direct Method) เป็นการวัดกับชิ้นงานได้โดยไม่ต้องนำชิ้นงาน ไปผ่านกระบวนการใดๆ ก่อนการวัด เช่น การวัดโดยใช้กล้องจลทรรศน์ (Microscope) [7] ที่สามารถดูขนาดของอนุภากได้โดยตรง และ 2) แบบ วิธีโดยอ้อม (Indirect Method) เป็นวิธีการวัดที่ไม่สามารถกระทำกับตัว ชิ้นงานได้โดยตรงจะต้องผ่านกระบวนการที่ใช้สำหรับนำอนภาคออก จากชิ้นงานก่อนแล้วถึงจะสามารถทำการวัดหาอนุภาคนั้นได้ เช่น การวัด ที่ใช้เทคนิควิธีการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่อง กราด Scanning Electron Microscopy (SEM) [7] เป็นการวัดที่ไม่สามารถ กระทำกับชิ้นงานได้โดยตรง โดยส่วนใหญ่แล้วในอุตสาหกรรมฮาร์ดดิส ใคร์ฟทั่วไปจะใช้วิธีการวัดแบบโคยอ้อม ซึ่งเป็นวิธีการวัดที่ให้ผลที่ดีกว่า แต่อข่างไรก็ตามวิธีการดังกล่าวยังมีกวามข่งขากในการใช้เครื่องมือและ ใช้ระยะเวลานานในการตรวจวัด ทำให้ไม่เหมาะกับงานที่มีอัตราการผลิต สูงนอกจากนี้ยังไม่สามารถนำเอาชิ้นงานที่ผ่านการตรวจวัดแล้วกลับมา ใช้ในกระบวนการผลิตอีกได้ ดังนั้นหลายปีที่ผ่านมาจึงได้มีผ้สนใจศึกษา หลักการเชิงแสงแบบ BRDF ในการตรวจวัดความเรียบของผิวซิลิกอนเว เฟอร์ (Si Wafer) ในปี 1997 Thomas A. Germer และ Clara C. Asmail ได้ ทำการศึกษาการกระเจิงแสงโพลาไลซ์ในรูปแบบของ BRDF ที่ใช้หาค่า ความเรียบของแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์ในระดับไมโกรเมตร [8] จากนั้นในปี 1998 Thomas A. Germer ได้ศึกษาการหาค่าความขรุขระบนแผ่นฟิล์มที่มี ขนาด 1 ใมโครเมตรโดยใช้รูปแบบของ BRDF<sub>.....</sub> มาวิเคราะห์ [9] และ ต่อมาในปี 1999 Lipiin Sung และคณะ ได้ทำการศึกษาการหาขนาดของ อนุภาคชนิค PSL ที่เป็นรูปทรงกลมบนแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์ โดยใช้ เทคนิคการโพลาไลซ์ของแสงที่อยู่ในรูปแบบของ BRDF แป็นการวัค การกระเจิงโดยตรงและสามารถตรวจวัดหาอนุภาคชนิด PSL ที่มีขนาด อยู่ในช่วง 100 จนถึง 200 นาโนเมตร [10]

บทความนี้จึงได้เสนอแนวทางในการสร้างแบบจำลองของ การตรวจวัด 3 ลักษณะ โดยใช้หลักการเชิงแสงของ BRDF คือ 1. แบบจำลอง BRDF บนพื้นผิวเรียบ (BRDF form smooth surface: BRDF ) 2. แบบจำลอง BRDF บนพื้นผิวขรุขระ (BRDF form roughness surface: BRDF (กก) 3. แบบจำลอง BRDF ขณะที่อนุภาคอยู่บน พื้นผิวเรียบ (BRDF form particle on smooth surface: BRDF<sub>nart</sub>) ทั้ง 3 รูปแบบนี้จะใช้โปรแกรม MIST คำนวณเพื่อสร้างแบบจำลองที่มีความ แม่นยำและสามารถนำไปออกแบบเพื่อสร้างระบบตรวจวัคได้จริง

## 2. หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

# หลักการ Bidirectional Reflection Distribution Function (BRDF)

BRDF คือ คุณสมบัติเชิงแสง โดยแสงจะตกกระทบบนวัตถุทำ ให้เกิดปฏิกิริยาเชิงแสง 3 ลักษณะ ประกอบด้วย การสะท้อนของแสง (Reflected light) การดูดกลื่นแสง (Absorbed light) การส่งผ่านของแสง (Transmitted light) โดยทั้งหมดนี้จะเกิดขึ้นและอยู่ในรูปแบบของ พลังงานที่เรียกว่า การอนุรักษ์พลังงาน (Energy Conservation) [1] ดังนี้ Incident light = Reflected light + Absorbed light + Transmitted light

การพิจารณา BRDF จะอยู่ในรูปแบบอัตราส่วนของสัญญาณ

แสงที่สะท้อนกับสัญญาณแสงที่ตกกระทบหาได้จากสมการ

$$BRDF = \frac{Output Signal}{Input Signal} = \frac{L_r}{E_i}$$
(1)

- L คือ จำนวน/ปริมาณของแสงที่สะท้อนในทิศทาง 🖉
- E คือ จำนวน/ปริมาณแสงที่ตกกระทบจากทิศทาง @
- คือ ทิศทางของแสงที่ตกกระทบ
- $arma_{_{\!\!P}}$  คือ ทิศทางที่แสงสะท้อนออก

จากสมการ (1) ทำการพิจารณาในรูปแบบของมุมที่แสงตก กระทบและมมที่แสงสะท้อนดังสมการ (2)

$$BRDF(\theta_{i},\phi_{i},\theta_{r},\phi_{r}) = \frac{dL_{r}}{dE_{i}} \frac{(\theta_{i},\phi_{i},\theta_{r},\phi_{r})}{(\theta_{i},\phi_{i})}$$
(2)

- $heta_{\!\!\!\!\!\!\!\!\!\!\!\!\!\!\!\!}$ คือ มุมของแสงตกกระทบ
- $\theta_{\rm c}$ คือ มุมของแสงสะท้อน
- φฺ คือ มุมอซิมุทของแสงสะท้อน

มุมของแสงตกกระทบและมุมของแสงสะท้อนที่เกิดขึ้นบน หลักการ BRDF สามารถอธิบายได้จากโครงสร้างเรขาคณิตของ BRDF ในรูปที่ 1



รูปที่ 1 โครงสร้างเรขาคณิตของ BRDF บนพื้นผิว

จากรูปที่ 1 มุมของแสงตกกระทบ L จะขึ้นอยู่กับมุมตัน (Solid Angle: d $\omega$ ) ที่ประกอบด้วย มุมของแสงตกกระทบ  $heta_i$  และ มุมอซิมุทของแสงตกกระทบ **o**, ที่ระนาบ xy บนพื้นที่ dA, ในทำนอง เดียวกันมุมของแสงสะท้อนในทิศทาง Lฺ จะขึ้นอยู่กับมุมตันที่ hetaฺ และ  $\phi$ ฺ บนระนาบ xy เมื่อพิจารณาโครงสร้างเรขาคณิตของ BRDF ในรปแบบ ครึ่งทรงกลมหนึ่งหน่วยดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 โครงสร้างเรขาคณิตของ BRDF บนครึ่งทรงกลมหนึ่งหน่วย

เมื่อพิกัดของมุมตันในทรงกลมรูปที่ 3 สามารถหาค่าของ dω และ dE ในรูปของตรีโกณได้จากสมการดังนี้

$$d\omega = (\text{height})(\text{width}) = (d\theta)(\sin\theta d\phi) = \sin\theta d\theta d\phi$$
(3)  
$$dE_i = L_i \cos\theta_i d\omega_i$$
(4)

 $dE_i = L_i \cos \theta_i d\omega_i$ และ

ดังนั้นในสมการที่ (3) และ (4) จะสามารถหาพื้นที่ขนาคเล็ก บนพื้นผิวทรงกลมในรูปที่ 3 ของมุมตันที่เป็นทิศทางของ BRDF ระหว่าง มุมของแสงสะท้อนกับมุมของแสงตกกระทบ



รูปที่ 3 พิกัคมุมตันในทรงกลม

ดังนั้นในสมการที่ (1) และ (2) ของ BRDF ถูกแทนด้วย สมการที่ (3) และ (4) ในส่วนมุมตกกระทบของแสงได้ดังสมการที่ (5)

$$BRDF(\theta_{i},\phi_{i},\theta_{r},\phi_{r}) = \frac{L_{r}}{L_{i}\cos\theta_{i}d\omega_{i}}$$
(5)

บนพื้นฐานของ BRDF ที่กล่าวมาข้างต้นนี้สามารถนำมาใช้ วิเคราะห์หาก่ากวามเรียบหรือก่ากวามขรุขระบนพื้นผิวของแผ่นบันทึก ข้อมูลในฮาร์ดดิสไดร์ฟได้ นอกจากนี้ BRDF ยังสามารถวิเคราะห์หา อนุภาคบนพื้นผิวได้อีกด้วยซึ่งจะกล่าวในหัวข้อดังต่อไปนี้

# 2.1 หลักการของ BRDF บนพื้นผิวเรียบ (BRDF form smooth surface: BRDF)

การหาค่าความเรียบบนพื้นผิวของแผ่นบันทึกข้อมูลสามารถ วิเคราะห์ใด้ในสมการที่ (6) ดังนี้

$$BRDF = \frac{N}{A} \frac{\left| S \cdot \hat{e} \right|^2}{\cos \theta_r \cos \theta_i} F$$
(6)

<sup>N</sup> คือ ค่าความเข้มของแสงที่กระเจิงภายในพื้นที่ความส่องสว่าง A

^ e คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ขนานกับสนามไฟฟ้าที่ตกกระทบ

F คือ ความสัมพันธ์ระหว่างจุดศูนย์กลางการกระเจิงแสงที่แตกต่างกัน

S คือ ความสัมพันธ์ระหว่าการกระเจิงและการตกกระทบของแสง

# 2.2 หลักการของBRDF<sub>topo</sub> บนพื้นผิวขรุขระ (BRDF form

### roughness surface: BRDF<sub>topo</sub>)

การหาค่าความขรุขระบนพื้นผิวสามารถวิเคราะห์ได้ใน สมการที่ (7) ดังนี้

$$BRDF_{topo} = \frac{16\pi^2}{\lambda_{ij}^4} \cos\theta_i \cos\theta_r S(f) \times \left| q_{ij}^{topo} \cdot \hat{e} \right|^2$$
(7)

 $\lambda$  คือ ความยาวคลื่นแสงที่ตกกระทบ

S(f) คือ ฟังก์ชันความถี่ที่ความเข้มข้นของกำลังสเปกครัม q<sub>ij</sub><sup>topo</sup> คือ ค่าเมทริกการ โพลาไลซ์ของทางแนวตั้งและแนวนอน

# 2.3 หลักการของ BRDF<sub>part</sub> ขณะที่อนุภาคอยู่บนพื้นผิวเรียบ

## (BRDF form particle on smooth surface: BRDF<sub>part</sub>)

การหาอนุภาคบนพื้นผิวเรียบที่สามารถวิเคราะห์ได้ในสมการ ที่ (8) ดังนี้

$$BRDF_{part} = \frac{16\pi^4}{\lambda^4} \left( \frac{n_{sph}^2 - 1}{n_{sph}^2 + 2} \right)^2 \frac{a^6}{\cos\theta_r \cos\theta_i} \frac{NF}{A} \times \left| q_{ij}^{part} \cdot \hat{\mathbf{e}} \right|^2 \qquad (8)$$
$$\mathbf{n}_{sph} \, \mathbf{\vec{n}}_0 \, \mathbf{\vec{n}}_1 \mathbf{\vec{n}}_5 \mathbf{\vec{n}}_1 \mathbf{\vec{n}}_5 \mathbf{\vec{n}}_1 \mathbf{\vec{n}}_5 \mathbf{\vec{n}_5} \mathbf{$$

a คือ รัศมีของอนุภาค

## 3. การคำนวณ BRDF ทั้ง 3 รูปแบบ

BRDF ทั้ง 3 รูปแบบ ประกอบด้วย BRDF บนพื้นผิวเรียบ BRDF<sub>แดง</sub> บนพื้นผิวขรุขระ และ BRDF<sub>per</sub> ที่อนุภาคบนพื้นผิวเรียบ ซึ่งจะ กล่าวรายละเอียดวิธีการคำนวณในหัวข้อดังต่อไปนี้

# 3.1 การคำนวณ BRDF บนพื้นผิวเรียบ

การวัดค่าความเรียบของพื้นผิวโดยใช้หลักการคำนวณ BRDF โดยกำหนดแหล่งกำเนิดแสงตกกระทบบนพื้นผิวที่ความยาวคลื่น532 nm โดยมีทิศทางแสงตกกระทบ L<sub>i</sub> จะได้ทิศทางแสงสะท้อน L<sub>i</sub> ที่ขึ้นอยู่กับ มุม θ<sub>i</sub> และ θ<sub>i</sub> ดังรูปที่ 4ซึ่งสามารถหาค่า BRDFได้ตามสมการที่ (6) ส่วน ความเรียบของพื้นผิวที่แสงตกกระทบนั้นเป็นแผ่นบันทึกข้อมูลชนิด Lubricant ( n<sup>20</sup><sub>c</sub>) ) ที่มีค่าดัชนีหักเหของพื้นผิว 1.45 – 1.55



รูปที่ 4 โครงสร้างเรขากณิตของ BRDF บนพื้นผิวเรียบที่เป็นแผ่น บันทึกข้อมูลชนิค Lubricant (  $n_{2}^{20}$  )

จากรูปแบบของ BRDF ในการวัดค่าความเรียบบนพื้นผิว บันทึกข้อมูลสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมแสงตกกระทบกับ มุมแสงสะท้อนในรูปแบบกราฟพิกัดครึ่งวงกลมดังแสดงในรูปที่ 5 (ก) โดยงานวิจัยของ Heinrich Bechและ Alfred Leder [11] ได้แสดงผลใน รูปแบบกราฟพิกัดครึ่งวงกลมที่แสดงการกระเจิงแสงในรูปแบบของไมล์ ดังรูปที่ 5 (ข)แล้วพบว่าผลการทดลองของ Heinrich Bech สามารถ อธิบายมุมตกกระทบกับมุมสะท้อนของแสงได้



รูปที่ 5 (ก) กราฟพิกัคครึ่งวงกลมของแบบจำลอง BRDF ใน MIST (ข) รูปแบบการกระเจิงแสงของทฤษฎีไมล์ที่มุม 0°- 360°

จากรูปแบบกราฟพิกัดกรึ่งวงกลมที่ใช้อธิบายมุมตกกระทบ กับมุมสะท้อนของแสงข้างด้นสามารถนำมาแสดงผลแบบจำลองของ BRDF บนพื้นผิวเรียบที่เป็นแผ่นบันทึกข้อมูลโดยในการสร้าง แบบจำลองดังกล่าวได้กำหนดมุมตกกระทบและมุมสะท้อนของแสงอยู่ ในช่วง 1 °จนถึง 90 °มีระยะห่างกันทุกๆ 10 ° ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 ผลการกำนวณแบบจำลอง BRDFบนพื้นผิวเรียบ เปรียบเทียบมุม ตกกระทบ/มุมสะท้อนที่ 1 °จนถึง 90 °

จากผลการทคลองคังกล่าวสามารถเลือกมุมที่เหมาะสม สำหรับการวัดค่าความเรียบของพื้นผิวที่มุมตกกระทบกับมุมสะท้อนของ แสงโดขอาสัยหลักการคำนวณการจำลองแบบของ BRDF โดยการ ออกแบบในครั้งนี้จะทำการวัดค่าความเรียบบนพื้นผิวของแผ่นบันทึก ข้อมูลชนิด Lubricant พิจารณาผลการจำลองในรูปที่ 6 เป็นการ เปรียบเทียบมุมตกกระทบกับมุมสะท้อน ค่าที่ได้พบว่ารูปแบบของการ กระเจิงแสงในช่วงมุม 0 จนถึง 360 มีรูปแบบการกระจายของการกระเจิง แสงเป็นแบบวงกลมและยังมีก่า BRDF สูงสุดที่มุมตกกระทบกับมุม สะท้อนที่ 89 และเมื่อทำการเปรียบเทียบกับมุมอื่นๆ ตั้งแต่ 1 จนถึง 90 สรุปได้ว่ามุมที่ 89 เป็นมุมที่เหมาะสมและแม่นยำสำหรับการวัดค่าความ เรียบบนพื้นผิวของแผ่นบันทึกข้อมูลชนิด Lubricant ดังรูปที่ 6

# 3.2 การคำนวณ BRDF<sub>เop</sub> บนพื้นผิวขรุขระ

การวัดค่าความขรุขระของพื้นผิวโดยใช้หลักการคำนวณ BRDF<sub>ww</sub>โดยกำหนดแหล่งกำเนิดแสงตกกระทบบนอนุภาคที่ความยาว คลื่น 532 nmโดยมีทิศทางแสงตกกระทบ L, จะได้ทิศทางแสงสะท้อน L, ที่ขึ้นอยู่กับมุม θ, และ θ, ดังรูปที่ 7 ซึ่งสามารถหาค่า BRDF<sub>ww</sub>ได้ตาม สมการที่ (7) ส่วนค่าความขรุขระของพื้นผิวที่แสงตกกระทบนั้นให้มีค่า อยู่ที่ Ra เท่ากับ 0.1, 0.2, 0.5, 0.6, 0.8 และ1 μm



รูปที่ 7 โครงสร้างเรขาคณิตของ BRDF<sub>topo</sub>บนพื้นผิวขรุขระ (Ra: Roughness Average) [2]

จากทฤษฎีการกระเจิงแสงในรูปแบบการกระเจิงแสงบน พื้นผิวขรุขระ [Light Scattering Theory (Roughness Scattering)] ซึ่ง ผลงานวิจัยของ Daniela Fontani และคณะ [12] ได้ผลการทดลองเป็น รูปแบบของการกระเจิงแสงบนพื้นผิวขรุขระที่ขนาด Ra 0.1 จนถึง 1 µm และมุมการกระเจิงแสงในช่วง 0 ถึง 90 ที่มุมตกกระทบในแนวตั้งทำ มุม θ เท่ากับ 85 กับความยาวคลื่น 532 nm ดังรูปที่ 8 และทำการ เปรียบเทียบผลการทดลองโดยใช้การกำนวณแบบจำลองของ BRDF<sub>เอ</sub>ที่ ใช้เงื่อนไขเช่นเดียวกันกับผลงานวิจัยของ Daniela Fontani และคณะ ได้ผลดังรูปที่ 9 โดยพบว่าผลการทดลองที่ได้จากก่า BRDF<sub>เอ</sub>มีรูปแบบ แนวโน้มเช่นเดียวกันกับค่าในผลงานวิจัยดังกล่าว ซึ่งผลการทดลองที่ได้ เป็นที่น่าเชื่อถือและสามารถนำไปใช้ในออกแบบเพื่อก่าความขรุงระบน พื้นผิวได้



เบท 8 ผสการ วงชของ Daniela Fontani แสะคณะ ทมุมตกกระทบ 85 ที่ก่ากวามขรุขระบนพื้นผิวขนาด Ra 0.1 จนถึง 1 μm [12]



รูปที่ 9 เปรียบเทียบมุมตกกระทบ 85 ํกับมุมสะท้อน 0ํ ถึง 90ํ ที่ก่าความ ขรุงระบนพื้นผิวงนาค Ra 0.1, 0.2, 0.5, 0.6, 0.8 และ1 µm

จากผลการทคลองที่ได้เปรียบเทียบดังกล่าวนั้น จึงสามารถยึด เป็นแนวทางในการออกแบบหาค่าความขรุขระบนพื้นผิว โดยอาศัย หลักการคำนวณการจำลองแบบของ BRDF<sub>แต</sub> โดยการออกแบบในครั้งนี้ จะทำการวัดพื้นผิวขรุขระที่ขนาด Ra 0.1, 0.2, 0.5, 0.6, 0.8 และ1 µm พิจารณาผลการจำลองในรูปที่ 9 ที่มุมตกกระทบ 85 กับมุมการกระเจิง 0 ถึง 90 ํค่าที่ได้พบว่ารูปแบบของการกระเจิงแสงในช่วงมุม 0 ํ จนถึง 90ํ มี แนวโน้มของรูปแบบการกระจายของการกระเจิงแสงที่พื้นผิวขรุขระ ขนาด Ra 0.1 µm นั้นมีลักษณะค่าของ BRDF<sub>เคต</sub> ที่สูงกว่าก่าความขรุขระ ขนาดอื่นๆ เช่น 0.2, 0.5, 0.6, 0.8 และ1 µm เมื่อพิจารณาแล้วสรุปได้ว่า แบบของจำลอง BRDF<sub>เคต</sub> ดังกล่าวสามารถจะกำนวณหาก่าความขรุขระ พื้นผิวได้ละเอียดในระดับไมโกรเมตรหรือน้อยกว่านี้ได้อย่างถูกต้อง เหมาะสมและแม่นยำ ดังรูปที่ 9

# 3.3 การคำนวณ BRDF<sub>part</sub> ที่อนุภาคบนพื้นผิวเรียบ

การวัดขนาดของอนุภาคโดยใช้หลักการคำนวณ BRDF<sub>per</sub>โดย กำหนดแหล่งกำเนิดแสงดกกระทบบนอนุภาคที่ความยาวคลื่น 532 nm โดยมีทิสทางแสงดกกระทบ L<sub>i</sub> จะได้ทิสทางแสงสะท้อน L<sub>i</sub> ที่ขึ้นอยู่กับ มุม θ<sub>.</sub> และ θ<sub>.</sub> ดังรูปที่ 10 ซึ่งสามารถหาค่า BRDF<sub>per</sub>ได้ตามสมการที่ (8) ส่วนอนุภาคที่แสงดกกระทบนั้นให้มีขนาดอยู่ที่ 10 และ 100 µm ที่มี ลักษณะเป็นรูปทรงกลมชนิด Polystyrene latex (PSL) โดยมีค่าดัชนีหัก เห 1.59 [4] ส่วนพื้นผิวเป็นแผ่นบันทึกข้อมูล



รูปที่ 10 โครงสร้างเรขาคณิตของ BRDF<sub>part</sub> บนอนุภาคชนิด (PSL) ที่อยู่บนแผ่นบันทึกข้อมูลชนิด Lubricant

จากทฤษฎีการกระเจิงแสงในรูปแบบของไมล์ [Light Scattering Theory (Mie Scattering)] ซึ่งผลงานวิจัยของ David W. Hahn [13] ใด้ผลการทดลองเป็นรูปแบบของการกระเจิงแสงบนอนุภาคขนาด 1.7 μm ลักษณะรูปทรงกลมที่ค่าดัชนีหักเห 1.4 และมุมการกระเจิงแสง ในช่วง 0ํ ถึง 180ํ ที่มุมตกกระทบในแนวตั้งทำมุม θุเท่ากับ 90ํ กับความ ยาวกลิ่น 532 nm ดังรูปที่ 11 และทำการเปรียบเทียบผลการทดลองโดยใช้ การกำนวณแบบจำลองของ BRDF<sub>put</sub>ที่ใช้เงื่อนไขเช่นเดียวกันกับ ผลงานวิจัยของ David W. Hahn ได้ผลดังรูปที่ 12

โดยพบว่าผลการทดลองที่ได้จากก่า BRDF<sub>pu</sub>มีรูปแบบ แนวโน้มเช่นเดียวกันกับก่าผลงานวิจัยดังกล่าว ซึ่งผลการทดลองที่ได้เป็น ที่น่าเชื่อถือและสามารถนำไปใช้ในออกแบบเพื่อหาอนุภาคที่อยู่บน พื้นผิวเรียบได้



รูปที่ 11 การจำลองการกระเจิงแสงแบบไมล์ที่อนุภาคขนาค 1.7 μm [12]



รูปที่ 12 แบบจำลองBRDF กับอนุภาคขนาด 1.7 µm (m =1.4-0i) ที่ความขาวคลื่น 532 nm

จากผลการทดลองที่ได้เปรียบเทียบดังกล่าวนั้น จึงสามารถยึด เป็นแนวทางในการออกแบบหาอนุภาคบนพื้นผิวเรียบโดยอาศัยหลักการ ดำนวณการจำลองแบบของ BRDF<sub>μm</sub> โดยการออกแบบในครั้งนี้จะทำการ วัดขนาดที่อนุภาค 10 และ 100 μm พิจารณาผลการจำลองในรูปที่ 13 เป็นการเปรียบเทียบมุมตกกระทบ 1, 45 และ 89 กับมุมสะท้อน 1, 45 และ 89 ที่อนุภาคขนาด 10 μm ก่าที่ได้พบว่ารูปแบบของการกระเจิงแสง ในช่วงมุม 0 จนถึง 180 มีรูปแบบการกระจายของการกระเจิงแสงและยัง มีก่า BRDF<sub>μm</sub> มากที่สุดในมุมตกกระทบและมุมกระเจิงที่ 89 เปรียบเทียบ กับมุมอื่นๆ เช่นที่มุม 1 และ 45 เมื่อพิจารณาแล้วสรุปว่า มุมที่ใช้วัดหา ก่าที่เหมาะสมและแม่นยำในการวัดที่อนุภาคขนาด 10 μm อยู่ที่มุม 89 ดัง รูปที่ 13



รูปที่ 13 เปรียบเทียบมุมตกกระทบ (1, 45, 89) กับมุมสะท้อน (1, 45, 89) ที่อนุภาคขนาด 10 μm

ในทำนองเดียวกันในรูปที่ 14 สำหรับอนุภาคขนาด 100 μm มี แนวโน้มเดียวกันกับรูปแบบแรก คือ รูปแบบการกระจายของการกระเจิง แสงมีก่า BRDF<sub>put</sub> มากที่สุดในมุมตกกระทบและมุมกระเจิงแสงที่ 89 จากผลทั้งสองนี้ยืนยันได้ว่าการกระเจิงแสงที่ได้จากก่า BRDF<sub>put</sub> สามารถ นำไปสู่กระบวนการสร้างและออกแบบระบบการตรวจวัดขนาดของ อนุภากบนพื้นผิวจริงได้



รูปที่ 14 เปรียบเทียบมุมตกกระทบ (1, 45, 89) กับมุมสะท้อน (1, 45, 89) ที่อนุภาคขนาด 100 μm

#### 4. สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอลักษณะรูปแบบการวัดหาค่า BRDF ทั้ง 3 แบบ คือ BRDF, BRDF<sub>แค</sub> และBRDF<sub>μπ</sub> ตามลำดับ ซึ่งประเด็นที่สรุป ได้มี 3 ลักษณะ คือ 1) แบบจำลอง BRDF สามารถหามุมที่เหมาะสมและ แม่นขำที่ใช้วัดหาก่าความเรียบบนพื้นผิวของแผ่นบันทึกข้อมูลชนิด Lubricant อยู่ที่มุม 89 คือมุมตกกระทบและมุมสะท้อน 2) แบบจำลอง BRDF<sub>μφ</sub> ดังกล่าวสามารถจะกำนวณหาก่าความขรุขระพื้นผิวได้ละเอียด ในระดับ ไม โคร เมตร หรือน้อยกว่านี้ได้อย่างถูกต้องและแม่นขำ 3) แบบจำลอง BRDF<sub>μπ</sub> มุมที่ใช้วัดหาก่าที่เหมาะสมและแม่นขำของการ วัดอนุภากที่ขนาด 10 µm และ100 µm อยู่ที่มุม 89 คือมุมตกกระทบและ มุมสะท้อน สำหรับรูปที่15 เป็นข้อมูลตัวอย่างของแบบจำลองBRDF<sub>pπ</sub> เพื่อใช้เปรียบเทียบหรือทดสอบความถูกต้องทางข้อมูลสำหรับการวัดหา อนุภากที่มีขนาด 1.7 µm ซึ่งมุมตกกระทบและมุมสะท้อนที่ 89 ๋ (เส้นที่อยู่ วงนอกสุด) เป็นมุมที่เหมาะสมที่สุด กับข้อมูลที่จะวัดจริงต่อไป

จากข้อสรุปดังกล่าวข้างด้น สามารถจะนำไปหาแนวทางใน การออกแบบระบบตรวจวัดซึ่งเป็นวิธีวัดโดยตรงแบบใหม่บนชิ้นงาน ของอุปกรณ์ฮาร์ดดิสไดร์ฟ เพื่อหาก่ากวามเรียบ ก่ากวามขรุขระ และ ขนาดอนุภากที่อยู่บนพื้นผิวของชิ้นงาน ตามถำดับ และยังสามารถนำ ชิ้นงานของอุปกรณ์ฮาร์ดดิสไดร์ฟกลับเข้าไปสู่กระบวนการทำกวาม สะอาดได้อีกกรั้ง ส่งผลให้มีประสิทธิภาพเป็นไปตามมาตรฐานของ โรงงานและไม่มีการสูญเสียชิ้นงานอีกด้วย



รูปที่ 15 เป็นข้อมูลตัวอย่างจากแบบจำลองแบบ BRDF<sub>mat</sub>

### เอกสารอ้างอิง

 Chris Wym "An Introduction to BRDF-Based Lighting" NVIDIA Corporation.

#### [2] http://books.google.com/books?id=GpAO5dGXN60C&pg=PA125&

- [3] http://www.electrical-res.com/surface-roughness-terminology
- [4] Renliang Xu "Particle Characterization Light Scattering Methods" KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS, ISBN: 0-792-36300-0, (2002).
- [5] Thomas A. Germer "Modeled Integrated Scatter Tool (MIST)", Available free of charge from NIST ,(2006).
- [6] R.Nagarajan "Survey of Cleaning and Cleanliness Measurement in Disk Drive Manufacture" Precision Cleaning, pp. 13-22, Feb 1997.
- [7] U.Patakham, "Materials Characterization with Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis Technique" MTEC a member of NSTDA, 20, July 2006
- [8] Thomas A. Germer and Clara C. Asmail "The polarization of outof-plane scattering from microrough silicon" Published in Optics Letters 22 (17), 1284-1286 (1997).
- [9] Thomas A. Germer "Application of bidirectional ellipsometry to the characterization of roughness and defects in dielectric layers" SPIE 3275, 121-131, (1998).
- [10] Lipiin Sung, George W. Mulholland, and Thomas A. Germer"Polarization of light scattering by particles on silicon wafers" SPIE 3619, 80-81 (1999).
- [11] Heinrich Bech and Alfred Leder "Particle sizing by time-resolved Mie calculations - A numerical study" Optik 117, 40–47 (2006).
- [12] D.Fontani, F.Francini, G.Longobardi and P.Sansoni "Optical control of surface finish", Optics and Lasers in Engineering 32, 459-472, (2000).
- [13] David W. Hahn "Light Scattering Theory", Department of Mechnical and Aerospace Engineering (2008).

# การศึกษาผลการทดลองจริงของการกระเจิงแสงเพื่อเปรียบเทียบกับ แบบจำลอง BRDF บนพื้นผิวส่วนประกอบฮาร์ดดิสไดร์ฟ Study of Experiment Result of Scattering Light to Compare with BRDF Model on Surface of Hard Disk Drive Component

มงคล วรรณประภา<sup>1</sup> ณรงค์พันธ์ รุ่งเจริญ<sup>2</sup> และ วันซัย ไพจิตโรจนา<sup>3</sup> ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ 99 ม.18 ถนนพหลโยธิน ต.คลองหนึ่ง อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12120 โทร. 0-2564-3001-9 ต่อ 3045 โทรสาร 0-2564-3001-0

E-mail: w\_mongkol@hotmail.com<sup>1</sup>, nu\_hder2@hotmail.com<sup>2</sup>, pwanchai@engr.tu.ac.th<sup>3</sup>

# บทคัดย่อ

บทความนี้น้ำเสนอการเปรียบเทียบผลการทดลองจริงเพื่อหาค่าผลรวม เฉลี่ยความเข้มแสงที่กระเจิงในแบบเรย์ไล (Rayleigh scattering) [1] กับ แบบจำลอง Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF)[2] โดยเลือกโหมด BRDF<sub>part</sub> ในโปรแกรม Modeled Integrated Scattering Tool (MIST) [3] ซึ่งในช่วงแรกของงานวิจัยจะ เปรียบเทียบเพื่อหาความเป็นเชิงเส้นระหว่างค่าผลรวมเฉลี่ยการกระเจิง แสงกับขนาดของอนุภาคในช่วง 100 ถึง 600 นาโนเมตรกับชนิด Ag, Au, SiC,  $AI_2O_3$  และ SiO\_2 บนพื้นผิวซิลิกอนเวเฟอร์ (Si wafer) [4] พบว่ามีความเป็นเชิงเส้นกันทั้ง 2 รูปแบบ จากนั้นนำผลมาวิเคราะห์เพื่อ วัดหาขนาดของอนุภาคในช่วงที่ต้องการคือ 100 ถึง 600 นาโนเมตร กับ ชนิด TiO,, Al,O, และSiO, บนพื้นผิวแผ่นบันทึกข้อมูลชนิด Lubricant ( n 20 ) [5] โดยทั้งสองส่วนของงานวิจัยนี้ใช้ความยาวคลื่นเดียวกันคือ 448 นาโนเมตร ผลสรุปที่ได้คือค่าผลรวมเฉลี่ยการกระเจิงแสงที่สามารถ นำไปตอบขนาดของอนุภาคในแต่ละชนิดที่อยู่บนพื้นผิวแผ่นบันทึก ข้อมูลได้และสามารถนำข้อมูลนี้ไปวิเคราะห์หาอนุภาคใน ภาคอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสไดร์ฟได้อย่างมีความถูกต้องและแม่นยำต่อไป

#### Abstract

This paper proposes a comparison of the results from experiments, which is average integrated intensity of Rayleigh scattered light [1], to model of Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF) [2]. The software called Modeled Integrated Scattering Tool (MIST) [3] is used to model BRDF<sub>part</sub> on smooth surface mode. First, the linearity of average integrated intensity of scattered light is compared to size of

particle, ranges from 100 to 600 nm with types of Ag, Au, SiC,  $Al_2O_3$ , and SiO\_2 on Si wafer surface [4]. The results are both linearities. From the results, sizes of particle ranged from 100 to 600 nm with types of TiO\_2,  $Al_2O_3$ , and SiO\_2 on lubricant ( $n^{20}_{D}$ ) [5] recording media surface are obtained. The wavelength of the light source in this research is 448 nm. In conclusion, the average integrated intensity of scattered light can be used to design systematically to find sizes of particle with types on recording media surface in hard disk drive industries precisely.

# คำสำคัญ

Rayleigh scattering, BRDF, MIST, Si wafer, อนุภาค

# 1.บทนำ

ในการตรวจวัดอนุภาค (Particle) บนพื้นผิวของ อุปกรณ์ฮาร์ดดิสไดร์ฟ (Hard Disk Drive) ที่มีอยู่ในปัจจุบันนี้ มีอยู่ 2 วิธี [6] คือ 1) แบบวิธีโดยตรง (Direct Method) เป็น การตรวจวัดโดยตรงบนชิ้นงาน เช่น การวัดโดยใช้กล้อง จุลทรรศน์ (Microscope) [7] ที่สามารถดูขนาดของอนุภาคได้ โดยตรง และ 2) แบบวิธีโดยอ้อม (Indirect Method) เป็นวิธีที่ ไม่สามารถวัดได้โดยตรงบนชิ้นงานต้องอาศัยกระบวนการ อื่นๆเข้าช่วย เช่น การวัดที่ใช้เทคนิควิธีการวิเคราะห์ด้วยกล้อง จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Scanning Electron Microscopy (SEM) [7] แต่ไม่สามารถกระทำการวัดบน

ชิ้นงานได้โดยตรง ซึ่งส่วนใหญ่แล้วในอุตสาหกรรมฮาร์ดดิส ใดร์ฟทั่วไปจะใช้วิธีการวัดแบบโดยอ้อม และเป็นวิธีการวัดที่ ให้ผลที่ดีกว่า อย่างไรก็ตามวิธีการดังกล่าวยังมีความซับซ้อน และเสียเวลานานในการตรวจวัด จึงไม่เหมาะกับงานที่อัตรา การผลิตที่สูง นอกจากนี้กระบวนการตรวจวัดดังกล่าวนี้ยังทำ ให้ชิ้นงานที่ผ่านการตรวจวัดแล้วเกิดการเสียหายไม่สามารถ นำกลับมาใช้ใหม่ได้ ซึ่งในอดีตมีผู้สนใจปัญหานี้ได้ทำการวิจัย โดย ในปี 1991 มีนักวิจัยชื่อ Yuzo MORI และคณะ[4] ทำการศึกษาและสร้างระบบวัดอนุภาคบนพื้นผิวซิลิกอนเว เฟอร์ (Si Wafer) [8] ในระดับนาโนเมตรโดยอาศัยหลักการ กระเจิงแสงแบบเรย์ไล และต่อมาในปี 1999 Lipiin Sung และ คณะ [9] ได้ทำการศึกษาการหาขนาดของอนุภาคชนิด Polystyrene latex (PSL) [8] ที่เป็นรูปทรงกลมบนพื้นผิว ซิลิกอนเวเฟอร์ โดยใช้เทคนิคการโพลาไลซ์ของแสงที่อยู่ใน รูปแบบของ BRDF<sub>กละ</sub> เป็นการวัดการกระเจิงโดยตรงและ สามารถตรวจวัดหาอนุภาคชนิด PSL ที่มีขนาดอยู่ในช่วง 100 ถึง 200 นาโนเมตร

บทความนี้จึงได้เสนอแนวทางในการออกแบบและ สร้างระบบการตรวจวัดอนุภาคบนพื้นผิวของอุปกรณ์ฮาร์ดดิส ไดร์ฟที่มีความแม่นยำและสามารถนำไปออกแบบเพื่อสร้าง ระบบตรวจวัดได้จริงโดยใช้โปรแกรม MIST สร้างแบบจำลอง ซึ่งอาศัยหลักการของ BRDF คำนวณหาอนุภาคชนิด TiO,, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> และSiO<sub>2</sub> ที่มีขนาดตั้งแต่ 100 – 600 นาโนเมตร โดยมี ค่าดัชนี่หักเหของอนุภาค 2.60, 1.76 และ1.45 [8] ตามลำดับ ซึ่งอนุภาคต่างๆนี้จะศึกษาอยู่บนพื้นผิวของแผ่นบันทึกข้อมูล ชนิด Lubricant ( n₀0 ) ที่มีค่าดัชนีหักเหของพื้นผิว 1.45 – 1.55 [5] ด้วยโปรแกรม MIST นี้ถูกเลือกใช้ในโหมดแบบจำลอง BRDF ที่อนุภาคอยู่บนพื้นผิวเรียบ (BRDF form particle on smooth surface: BRDF<sub>กลt</sub>) ที่มีความยาวคลื่นตกกระทบ เท่ากับ 448 นาโนเมตรโดยทำการเปรียบเทียบผลการทดลอง ของค่าผลรวมเฉลี่ยการกระเจิงแสงของอนุภาคที่อยู่ในระดับ นาโนเมตรบนพื้นผิวซิลิกอนเวเฟอร์ (Si wafer) ซึ่งเป็นงานวิจัย ของ Yuzo MORI และคณะ [4]

# 2. หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

# 2.1 หลักการกระเจิงแสงแบบเรย์ไล(Rayleigh scattering)

เมื่อแสงตกกระทบอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าความ ยาวคลื่นทำให้เกิดปรากฏการณ์การกระเจิงแสงรอบๆอนุภาค ที่มีค่าความเข้มแสงทุกทิศทางเท่ากันโดยเรียกปรากฏการนี้ว่า การกระเจิงแสงแบบเรย์ไล (Rayleigh scattering) ซึ่งอยู่ในรูป ที่ 1



รูปที่ 1การกระเจิงแสงแบบเรย์ไล (Rayleigh scattering)[10]

จากรูปที่ (1) สามารถอธิบายหลักการการกระเจิง แสงแบบ เรไลย์ ได้จากสมการ (1)

$$I_{s} = I_{0} \frac{(1 + \cos^{2} \theta)}{2R^{2}} \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^{4} \left(\frac{n^{2} - 1}{n^{2} + 2}\right)^{2} \left(\frac{D}{2}\right)^{6}$$
(1)  
$$I_{0}$$
คือ ค่าความเข้มแสงที่ตกกระทบ

- θ คือ มุมของแสงที่ตกกระทบ
- R คือ ระยะของการกระเจิงแสง
- D คือ ขนาดของอนุภาค
- n คือ ค่าดัชนีหักเหของอนุภาค

# 2.2 หลักการ Bidirectional Reflection Distribution Function (BRDF)

BRDF คือ คุณสมบัติเชิงแสงโดยแสงจะตกกระทบ ลงบนวัตถุแล้วทำให้เกิดปฏิกิริยาเชิงแสงได้ 3 ลักษณะ ประกอบด้วย การสะท้อนของแสง (Reflected light) การ ดูดกลืนแสง (Absorbed light) และการส่งผ่านของแสง (Transmitted light) โดยทั้งหมดนี้จะเกิดขึ้นและอยู่ในรูปแบบ ของพลังงานที่เรียกว่า การอนุรักษ์พลังงาน (Energy Conservation) [2] ในรูปแบบอัตราส่วนของสัญญาณแสงที่ สะท้อนกับสัญญาณแสงที่ตกกระทบหาได้จากสมการ (2)

$$BRDF = \frac{Output Signal}{Input Signal} = \frac{L_r}{E_i}$$
(2)

L, คือ จำนวน/ปริมาณของแสงที่สะท้อนในทิศทาง **ឈ** 

- E<sub>1</sub> คือ จำนวน/ปริมาณแสงที่ตกกระทบจากทิศทาง **ญ**
- ω คือ ทิศทางของแสงที่ตกกระทบ
- ωุ คือ ทิศทางที่แสงสะท้อนออก

จากสมการ (2) ทำการพิจารณาในรูปแบบของมุมที่ แสงตกกระทบและมุมที่แสงสะท้อนดังสมการ (3)

$$BRDF(\boldsymbol{\theta}_{i},\boldsymbol{\phi}_{i},\boldsymbol{\theta}_{r},\boldsymbol{\phi}_{r}) = \frac{dL_{r}}{dE_{i}} \frac{(\boldsymbol{\theta}_{i},\boldsymbol{\phi}_{i},\boldsymbol{\theta}_{r},\boldsymbol{\phi}_{r})}{(\boldsymbol{\theta}_{i},\boldsymbol{\phi}_{i})}$$
(3)

θ คือ มุมของแสงตกกระทบ

- **\$** คือ มุมอซิมุทของแสงตกกระทบ
- θ คือ มุมของแสงสะท้อน
- คือ มุมอซิมุทของแสงสะท้อน

มุมของแสงตกกระทบและมุมของแสงสะท้อนที่ เกิดขึ้นบนหลักการ BRDF สามารถอธิบายได้จากโครงสร้าง ทางเรขาคณิตของ BRDF ในรูปที่ 2



รูปที่ 2 โครงสร้างทางเรขาคณิตของ BRDF บนพื้นผิว

 2.3 หลักการของ BRDF<sub>pat</sub> ที่อนุภาคอยู่บนพื้นผิวเรียบ (BRDF form particle on smooth surface: BRDF<sub>pat</sub>) การหาอนุภาคบนพื้นผิวเรียบที่สามารถวิเคราะห์ได้ ในสมการที่ (4) ดังนี้

# 3.การสร้างแบบจำลองบนโปรแกรม MIST เปรียบเทียบ การกระเจิงแสงแบบเรย์ไล กับ แบบจำลอง BRDF

ในการสร้างแบบจำลอง BRDF นี้จะใช้โปรแกรม MIST เพื่อศึกษาผลการกระเจิงแสงบนแบบจำลอง BRDF<sub>pat</sub> เปรียบเทียบกับผลการทดลองการกระเจิงแสงแบบเรย์ไล ของ Yuzo MORI และคณะ [4],[11] ได้ทำการศึกษาและสร้าง ระบบวัดอนุภาคบนพื้นผิวซิลิกอนเวเฟอร์ที่มีขนาดในช่วง 1 ถึง 30 นาโนเมตร ชนิด Ag, Au, SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> และSiO<sub>2</sub> โดยมีค่า ด้ชนีหักเหของอนุภาค 0.23, 1.46, 2.46, 1.76 และ1.45 [8] ตามลำดับรวม 5 ชนิดบนพื้นผิวซิลิกอนเวเฟอร์ (Si wafer) ที่ ค่าดัชนีหักเห 1.5 และความยาวคลื่นแสงตกกระทบ 448 นา โนเมตร โดยทำการวัดผลรวมเฉลี่ยของค่าความเข้มแสงที่ กระเจิงโดยรอบอนุภาคทั้ง 5 ชนิดเปรียบเทียบกับขนาดของ อนุภาคในช่วง 1 ถึง 30 นาโนเมตรซึ่งค่าผลรวมเฉลี่ยของ ความเข้มแสงที่กระเจิงได้จากการทดลองจริงจะสัมพันธ์อยู่กับ ชนิดและขนาดของอนุภาค ดังรูปที่ 3 และรูปที่ 4



รูปที่ 3 ระบบวัดอนุภาคบนพื้นผิวซิลิกอนเวเฟอร์ ของ Yuzo MORI [11]



รูปที่ 4 ผลการทดลองจริงของ Yuzo MORI ในรูปแบบการ กระเจิงแสงแบบเรย์ไล [4]

เมื่อทำการสร้างแบบจำลอง BRDF<sub>part</sub> ในโปรแกรม MIST โดยกำหนดมุมตกกระทบและมุมสะท้อนเท่ากับ 89 องศา [12] ส่วนค่าผลรวมเฉลี่ยความเข้มแสงที่กระเจิงนั้นจะ ได้จากจำนวนมุมในการวัดค่าความเข้มแสงที่กระเจิงนั้นจะ ได้จากจำนวนมุมในการวัดค่าความเข้มแสงที่กระเจิงเท่ากับ 360 จุด และใช้เงื่อนไขและตัวแปรต่างๆตามรูปแบบการ ทดลองในงานวิจัยที่ได้กล่าวมาข้างต้นพบว่า ผลการทดลองที่ ได้จากแบบจำลอง BRDF<sub>part</sub> มีความสอดคล้องกันกับผลการ ทดลองจริงข้างต้นโดยมีอัตราการกระเจิงแสงที่เพิ่มขึ้นตาม ขนาดของอนุภาคที่เพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 1 ถึง 30 นาโนเมตร โดย มีความขันและความเป็นเชิงเส้นต่อกันทั้ง 5 ชนิด ดังรูปที่ 5 ซึ่งสรุปได้ว่าการเปรียบเทียบจากผลการทดลองจริงมีความ สอดคล้องกันกับทฤษฎีแบบจำลอง BRDF อย่างแน่นอน ดังนั้นผลที่ได้นี้สามารถนำไปเป็นแนวทางในการออกแบบและ สร้างระบบตรวจวัดได้จริงต่อไป

นอกจากนี้แบบจำลอง BRDF<sub>par</sub> ที่ได้กล่าวมา ข้างต้นยังสามารถที่จะจำลองเพื่อหาผลลัพธ์ต่างๆ ได้ตาม ต้องการ อาทิเช่น การหาขนาดและชนิดของอนุภาคที่เป็นแบบ ของไมย์ หรือรูปแบบอื่นได้อีกมากด้วย



รูปที่ 5 ผลการทดลองของโปรแกรม MIST ในแบบ BRDF<sub>part</sub>

จากข้อสรุปดังกล่าวจึงได้นำไปสู่กระบวนการ ตรวจวัดอนุภาคจากเดิมที่ขนาดในช่วง 1 ถึง 30 นาโนเมตร ชนิด Ag, Au, SiC, Al2O3 และSiO2 เพิ่มเป็นในช่วงที่ ต้องการคือ 100 ถึง 600 นาโนเมตร บนพื้นผิวซิลิกอนเวเฟอร์ เพื่อดูความสัมพันธ์ของขนาดกับผลรวมของค่าความเข้มแสง ที่เกิดขึ้น ดังรูปที่ 6



จากรูปที่ 6 พบว่าการเพิ่มขึ้นของขนาดอนุภาคมี ความต่อเนื่องและสัมพันธ์กันเป็นเชิงเส้นได้พอดี ดังนั้นผู้วิจัย จึงได้นำแบบจำลอง BRDF<sub>pat</sub> นี้ไปใช้ในการจำลองหาค่า ผลรวมเฉลี่ยการกระเจิงแสงที่ขนาดอนุภาคในช่วง 100 ถึง 600 นาโนเมตร ชนิด Ag, Au, SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> และSiO<sub>2</sub> ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7ผลการจำลอง BRDF<sub>pat</sub>ที่ขนาด100 ถึง 600 นาโนเมตร ที่อนุภาคชนิด Ag, Au, SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> และSiO<sub>2</sub> บนพื้นผิว ซิลิกอนเวเฟอร์

หลังจากนั้นได้ทำการปรับเปลี่ยนพื้นผิวให้เหมาะกับ การตรวจวัดในงานวิจัยนี้จากซิลิกอนเวเฟอร์เป็นพื้นผิวของ แผ่นบันทึกข้อมูลชนิด Lubricant ( x<sup>2</sup><sub>p</sub>) และตรวจหาอนุภาค ชนิด TiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> และSiO<sub>2</sub> พบความเป็นรูปแบบของการ กระเจิงแสงที่ผกผันไปตามขนาดของอนุภาคยังเป็นเชิงเส้นอยู่ อย่างเห็นได้ชัดทำให้มีความถูกต้องสูงที่จะสามารถนำไปใช้ ออกแบบเพื่อวัดอนุภาคที่ขนาดและชนิดต่างๆได้อย่างแน่นอน ดังในรูปที่ 8



รูปที่ 8 ผลการจำลอง BRDF<sub>par</sub> ที่ขนาด 100 ถึง 600 นาโน เมตร ที่อนุภาคชนิด TiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> และSiO<sub>2</sub> บนพื้นผิวของแผ่น บันทึกข้อมูลชนิด Lubricant ( n<sup>20</sup><sub>0</sub> )

ตัวอย่างผลการจำลองแบบ BRDF<sub>pat</sub> ซึ่งแสดงค่าผลรวม เฉลี่ยการกระเจิงแสงในรูปแบบเรย์ไล ตั้งแต่มุม 0 ํถึง 360ํ รวม ทั้งหมด 360 จุด สามารถบอกลักษณะการกระเจิงแสงที่ เปลี่ยนไปเนื่องจากขนาดของอนุภาคที่ใหญ่ขึ้นได้



รูปที่ 9 การจำลองแบบ BRDF<sub>par</sub>  $\lambda$  = 448 nm รวม 360 จุด

# 4. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนภายใต้โครงการทุนสนับสนุน งานวิจัย จากศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์ แห่งชาติ (NECTEC NSTDA) ศูนย์วิจัยร่วมฯ I/U CRC

# สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอการเปรียบเทียบผลการ ทดลองจริงเพื่อหาค่าผลรวมเฉลี่ยความเข้มแสงที่กระเจิงกับ แบบจำลอง BRDF<sub>part</sub> เพื่อยื่นยันความเป็นได้ในการ คำนวณหาอนุภาคชนิด TiO<sub>2</sub>, AI<sub>2</sub>O<sub>3</sub> และSiO<sub>2</sub> ที่มีขนาดตั้งแต่ 100 ถึง 600 นาโนเมตร และมีค่าดัชนีหักเหของอนุภาค 2.60, 1.76 และ1.45 ตามลำดับซึ่งอนุภาคต่างๆเหล่านี้จะอยู่บน พื้นผิวของแผ่นบันทึกข้อมูลชนิด Lubricant (*n*<sup>20</sup>) ที่มีค่าดัชนี หักเหของพื้นผิว 1.45 – 1.55 ภายใต้โปรแกรม MIST ได้ ซึ่ง ผลสรุปที่ได้คือค่าผลรวมเฉลี่ยของการกระเจิงแสงสามารถ นำไปตอบขนาดของอนุภาคในแต่ละชนิดที่อยู่บนพื้นผิวแผ่น บันทึกข้อมูลได้อย่างมีความถูกต้องแม่นยำส่งผลให้มี ประสิทธิภาพในการออกแบบระบบตรวจวัดซึ่งเป็นวิธีวัด โดยตรงแบบใหม่บนชิ้นงานของอุปกรณ์ฮาร์ดดิสไดร์ฟ เพื่อหา ขนาดอนุภาคที่อยู่บนพื้นผิวของชิ้นงานได้และเป็นไปตาม มาตรฐานของโรงงานที่จะไม่มีการสูญเสียชิ้นงานอีกต่อไป

# 6. เอกสารอ้างอิง

- [1]http://hyperphysics.phyastr.edu/hbase/atmos/blusky. html.28-Feb-2006
- [2] Chris Wym "An Introduction to BRDF-Based Lighting" NVIDIA Corporation.
- [3] Thomas A. Germer "Modeled Integrated Scatter Tool (MIST)", Available free of charge from NIST: <u>http://physics.nist.gov/scatmech</u> (2006).
- [4] Y.Mori, H.An, K.Endo, K.Yamauchi and T.Ied"A New Apparatus for Measuring Particle Sizes of the Order of Nanometer", J.JSPE Sept 1991.
- [5] http://books.google.com/books?id=GpAO5dGXN60 C&pg=PA125&lpg=PA125&dq=lubricant+refractive +index&source.
- [6] R.Nagarajan "Survey of Cleaning and Cleanliness Measurement in Disk Drive Manufacture" Precision Cleaning, pp. 13-22, Feb 1997.
- [7] U.Patakham, "Materials Characterization with Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis Technique" MTEC a member of NSTDA, 20, July 2006

- [8] Renliang Xu "Particle Characterization Light Scattering Methods" in KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS, ISBN: 0-792-36300-0, (2002).
- [9] Thomas A. Germer "Application of bidirectional ellipsometry to the characterization of roughness and defects in dielectric layers" SPIE 3275, 121-131, (1998).
- [10] http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Mi e\_scttering.svg.
- [11] S.SASAKI, H.AN, Y.MORI, T.KATAOKA, K.ENDO "Evaluation of Particle on a Si Wafer before and after Cleaning Using a New Laser Particle Counter" IEEE, 317-320, 26-28 Sept
- [12] M.WANNAPRAPA, N.RUNGCHAROEN, P.WIJITROJANA "Study Model of Cleanliness Measurement on Surface Using BRDF", NCOA-5 (2010).

# The Study of Experimental Results of Scattering Light compared to BRDF Simulation for the Measurement System Design of Particle Size on Surface of Components of Hard Disk Drive

<sup>1</sup>M. Wannaprapa <sup>2</sup>N. Rungcharoen and <sup>3</sup>W. Pijitrojana Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University Klongluang, Pathumthani 12120 <sup>1</sup>w mongkol@hotmail.com, <sup>2</sup>narongpun@gmail.com, <sup>3</sup>pwanchai@engr.tu.ac.th

Abstract-This work aims to obtain the well-implemented measuring system to characterize particle of sizes ranged from 200-600 nm., type of SiO<sub>2</sub> [1], on surface of Lubricant  $(n_D^{20})$  recording media [2], at 635 nm of wavelength of incident light. The system has an incident and reflective angles at 89 which is based on the principle of Mie scattering theory [3]. Moreover, the intensities of scattered light from simulations based on BRDF<sub>part</sub> [4] are compared to the results of experiments from David W.Hahn [5]. For the conclusion, the system based on our design will be implemented to measure the particle sizes and types accurately and efficiently.

**Keywords:** Light scattering theory, BRDF<sub>part</sub>, Particle characterization, Rayleigh scattering, Mie scattering

#### I. INTRODUCTION

Nowadays hard disk drive technology has been developed to have smaller size, and it seems that particle and contaminations are bigger compared to the size of hard disk drive. These particle and contaminations cause damages of the inner items of hard disk drive during production process. As this reason, researchers are interested in studying and finding methods to characterize particle and contaminations. One of the methods is to use light scattering technology to analyze sizes and types of particle and contaminations of nanometer (nm) class.

The group of Yuzo MORI [6,7] have studied measuring system to measure sizes ranged from 1-30 nm of particle on Silicon (Si) wafer surface with refractive index 1.5, and types of Ag, Au, SiC,  $Al_2O_3$  and SiO<sub>2</sub> with refractive indices 0.23, 1.46, 2.46, 1.76 and 1.45 respectively [1]. The wavelength of the incident light is 448 nm. The results based on Rayleigh Scattering Theory [8] are the average intensities of scattering light for five types of particle. The results and diagram of the measurement system are shown in Figure 1 and Figure 2.



Fig. 1 The experimental results of Yuzo MORI [6]



Fig. 2 The measurement system of Yuzo MORI [7]

The other group of David W. Hahn [5] have researched on scattering light based on Mie Scattering Theory [3]. The experiment is setup using a light source of wavelength 532 nm to characterize spherical particle of size 1.7 micrometer ( $\mu$ m) with refractive index 1.4. The scattered angles vary from 0° - 180° vertically in an area and the incident angle,  $\theta_{i}$ , is 90°. The results are shown in Figure 3.



Fig. 3 David W. Hahn, the result of scattering for the particle size of 1.7 µm based on Mie scattering theory [5].

In this paper, we use the principle of Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF) to model and design the system using MIST program [11]. In order to study the characteristics of scattered light from particle on surfaces, the BRDF<sub>part</sub> simulation based on Rayleigh and Mie Scattering theory are specified. Then, the results of the simulations are compared to the experimental results of Yuzo MORI [6] using Rayleigh scattering theory and David W. Hahn [5] using Mie scattering theory. It is confirmed that the model and designing of the system are well-defined and lead to implementation of the real measurement system for both size and type of particle, size ranged from 200-600 nm and type of SiO<sub>2</sub>, on surface of Lubricant ( $n_{D}^{20}$ ) recording media of hard disk drive [2].

#### II. PRINCIPLES AND THEORIES

#### A. Scattering principle

The Light scattering is the alteration of the direction and intensity of a light beam that strikes an object, the alteration being due to the combined effects of reflection, refraction, and diffraction [3] as shown in Figure 4.



Fig. 4 Phenomenon of scattering particle [3]

This phenomenon is base on Rayleigh and Mie scattering theories, which  $\alpha$  value classifies the type of scattered light. The formula was defined by the particle size and reciprocal wavelength of incident light [1].

$$\alpha = \frac{\pi D}{\lambda} \tag{1}$$

#### B. Rayleigh Scattering Theory



Fig. 5 Rayleigh scattering [9]

According to Figure 5, the incident light on small particle means  $\alpha \ll 1$  value, which the phenomenon of scattered light equaling the scattering intensity occurs all around. It is called Rayleigh scattering theory as following formula [2].

$$I_{Ray} = I_0 \frac{(1 + \cos^2 \theta)}{2R^2} \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^4 \left(\frac{D}{2}\right)^6 \left(\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2}\right)^2$$
(2)

- I<sub>0</sub> is incident light intensity
- $\theta$  is the scattering angle
- R is distance of scattered
- n is refractive index of particle
- C. Mie Scattering Theory



Fig. 6 Mie scattering theory [9]

Refer to Figure 6, the incident light on particle means  $\alpha >>1$  value, which the phenomenon of scattered light have high scattering intensity in the inverse direction of incident light. It is called Mie scattering theory as following formula [3].

$$I_{Mie} = I_0 \frac{1}{R^2} \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^4 \left(\frac{D}{2}\right)^6 \left(i_\perp + i_\parallel\right) \tag{3}$$

Where  $i_{\perp}$ ,  $i_{\parallel}$  are the intensity function of calculated from the infinite series.

#### D. Principle of Bidirectional Reflection Distribution Function (BRDF)

BRDF is property of the incident light on material occur optical interaction three characterization; Reflected light, Transmitted light, and Absorped light which is called Energy conservation [10], shown in Figure 7.



Fig. 7 BRDF's light reaction [10]

Incident light= Reflected light+ Transmitted light+ Absorbed light

BRDF is considered by the ratio of reflected light signal and incident light signal as per formula (4).

$$BRDF = \frac{Output \ Signal}{Input \ Signal} = \frac{L_r}{E_i} \tag{4}$$

 $L_r$  is quantity of light reflected in direction  $\omega_r$ 

 $E_i$  is quantity of light arriving in direction  $\boldsymbol{\omega}_i$ 

 $\omega_i$  is incoming light direction

 $\omega_r$  is outgoing reflected direction

Due to formula [4], it is considered by the incident light angle and reflected light angle as following formula [5].

$$BRDF(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) = \frac{dL_r}{dE_i} \frac{(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r)}{(\theta_i, \phi_i)}$$
(5)

 $\theta_i$  is the zenith angle of incident light  $\phi_i$  is the azimuthal angle of incident light  $\theta_r$  is the zenith angle of reflected light  $\phi_r$  is the azimuthal angle of reflected light

Occurring of the incident light angle and the reflected light angle under BRDF principle is described as geometric structure as Figure 8.



Fig. 8 Geometric structure on BRDF surface

Refer to above BRDF principle, BRDF<sub>part</sub> mode on MIST program shall be analyzed particle on surface as following [9].

$$BRDF_{part} = \frac{1}{\cos\theta_r \cos\theta_i} \frac{NF}{A} \times \left| q_{ij}^{part} \cdot \hat{e} \right|^2 \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right)^4 \left( \frac{D}{1} \right)^6 \left( \frac{n_{sph}^2 - 1}{n_{sph}^2 + 2} \right)^2 (6)$$

N/A is density of scatters within the illuminated area F is structure factor that depends upon the correlation between different scattering centers.

- $n_{\text{sph}}$  is refractive index of particle
- $\hat{e}$  is a unit vector parallel to the incident electric field. q<sub>ii</sub> is Jones scattering matrix value
- III. COMPARISON OF THE RESULTS OF  $BRDF_{PART}$  SIMULATION TO THE RESULTS OF YUZO MORI'S GROUP BASED ON RAYLEIGH SCATTERING THEORY

Comparing the results of Yuzo MORI's experiment based on Rayleigh scattering theory to the results obtained from BRDF<sub>part</sub> simulation defined by using the average sum of intensities of scattered light from 360 points and the same conditions of the incident and reflected angle at 89 [12] are well matched. Both results are linearly increasing with sizes of particle increasing as shown in Figure 9. This confirms our model and system design based on BRDF principle.



Fig. 9 The results of BRDF<sub>part</sub> simulation at 89 incident and reflected angle under conditions of Yuzo MORI's experiment.

# IV. COMPARISON OF THE RESULTS OF $BRDF_{\mbox{part}}$ simulation to the results of David W. Hahn's group based on Mie scattering theory

To confirm our model and system design definitely, we compare the results of David W. Hahn's experiment based on Mie scattering theory to the results of  $BRDF_{part}$  simulation defined by using the intensities of scattered light at the incident and reflected angle of 89 and under the same conditions. The results are also well matched as shown in Figure 10. Therefore, we are able to conclude that our model and system design are well-defined.



Fig. 10 BRDF<sub>part</sub> simulation for the particle size of 1.7  $\mu$ m (m =1.4-0i) with wavelength at 532 nm.

V. THE RESULTS OF BRDF<sub>PART</sub> SIMULATIONS BASED ON RAYLEIGH AND MIE SCATTERING THEORIES.



Fig. 11 Rayleigh and Mie scattering at 635 nm wavelength for the particle type of SiO<sub>2</sub>, sizing ranged from1- 600 nm on ( $n_D^{20}$ ) surface.

In order to understand the relationship between the results based on Rayleigh scattering and the results based on Mie scattering, we simulate and compare the results based on both Rayleigh and Mie scattering as shown in Figure 11. From Figure 11, it is shown that the patterns of Rayleigh and Mie scattering can be classified as shown in Table 1. The wavelength of the light source is 635 nm. The first group of particle with sizes ranged from 1-100 nm gives  $\alpha \ll 1$  and Rayleigh scattering is obtained. Figure 11 shows concentric circles, the smallest circle means the size of particle is 1 nm and has lowest intensity of scattered light. The light intensities are increasing according to the sizes of particle are also increasing. The biggest circle is for the particle with size of 100 nm. The second group of particle with sizes ranged from 200-600 nm gives  $\alpha >>1$  and this means that Mie scattering is obtained. The patterns of Mie scattering are shown as directional closed loops and increasing due to the sizes of particle are increasing; it means that the intensities of scattered light are also increasing.



Table 1:  $\alpha$  value and the relationship between D particlessizing ranged from 1-600 nm at 635 nm wavelength.

Figure 12 and 13 show the patterns of intensities of scattered light based on Rayleigh and Mie scattering respectively. The patterns of Rayleigh scattering are circles, it means that the particle with sizes ranged from 1-100 nm scatter the same light intensities in every direction. It opposes to Mie scattering, instead of circles, the patterns of Mie scattering are directional closed loops with maximum light intensity pointing to one direction. Both models are under the same conditions, as with the incident and reflected angles of  $89^{\circ}$ , SiO<sub>2</sub> particle with refractive index 1.45, and Lubricant  $(n_D^{20})$  recording media surface with refractive index 1.5.



Fig. 12 Rayleigh scattering at 635 nm wavelength for  $SiO_2$  particle Sizing ranged from 1-100 nm on ( $n_D^{20}$ ) surface.

#### VI. DESIGN THE MEASUREMENT SYSTEM



Fig. 14 The measurement system design based on Mie scattering.

From the results above, it leads to design the measurement system as shown in Figure 14. According to our main purpose to characterize the SiO<sub>2</sub> particle with sizes ranged from 200-600 nm, we design the system based on Mie scattering and obtain all the parameters for system design. The photo detector only moves from  $0^{\circ}$  - 180 to measure the intensities of scattered light. The angle of incident and reflected light is 89. The samples can be moved and controlled automatically. The interpretation of signals from the system can be done by using computer and software.

Fig. 13 Mie scattering at 635 nm for  $SiO_2$  particle, sizing ranged from 200-600 nm on ( $n_D^{20}$ ) surface.

#### ACKNOWLEDGMENT

The author would like to thank the National Electronics and Computer Technology Center of Thailand and I/U CRC for financial support.

#### REFERENCES

- Renliang Xu "Particle Characterization Light Scattering Methods" in KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS, ISBN: 0-792-36300-0, (2002).
- [2] <u>http://books.google.com/books?id=GpAO5dGXN60</u> <u>C&pg=PA125&lpg=PA125&dq=lubricant+refractive</u> <u>+index&source.</u>
- [3] Paul A. Webb"A primer on particle sizing by static laser light scattering", Micromeritics technical workshop series (2000).
- [4] Thomas A. Germer "Angular dependence and polarization of out-of-plane optical scattering from particulate contamination, subsurface defects, and surface microroughness" SPIE 3275, 8798-8805, (1997).
- [5] David W. Hahn "Light Scattering Theory", Department of Mechnical and Aerospace Engineering (2008).
- [6] Y.Mori, H.An, K.Endo, K.Yamauchi and T.Ied "A New Apparatus for Measuring Particle Sizes of the Order of Nanometer", J.JSPE Sept 1991.
- [7] S.SASAKI, H.AN, Y.MORI, T.KATAOKA, K.ENDO "Evaluation of Particle on a Si Wafer before and after Cleaning Using a New Laser Particle Counter" IEEE, 317-320, 26-28 Sept.
- [8] http://hyperphysics.phyastr.edu/hbase/atmos/blusky. html.28-Feb-2006.
- [9] http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Mie\_scttering.svg.
- [10] Chris Wym "An Introduction to BRDF-Based Lighting" NVIDIA Corporation.
- [11] Thomas A. Germer "Modeled Integrated Scatter Tool (MIST)", Available free of charge from NIST: <u>http://physics.nist.gov/scatmech</u> (2006).
- [12] M. Wannaprapa, N. Rungcharoen and W. Pijitrojana "Study Model of Cleanliness Measurement on Surface Using BRDF", NCOA-5, 2010.