

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงงานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นงานวิจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องหรือมีแนวความคิดที่ใกล้เคียงเพื่อเป็นแนวทางสำหรับการออกแบบระบบในงานวิจัยนี้ ส่วนที่สองเป็นทฤษฎีที่ใช้ในงานวิจัยนี้ โดยกล่าวถึงหลักการกระเจิงแสงของ BRDF ที่ตรวจวัดในลักษณะพื้นผิวที่เรียบและพื้นผิวที่มีอนุภาค โดยอาศัยแบบจำลอง MIST เพื่อหามุมตกกระทบ(θ_i) และมุมการกระเจิงแสง(θ_s) ที่เหมาะสมตามรูปแบบการกระเจิงแสงบนอนุภาคแต่ละชนิดที่มีขนาดแตกต่างกัน แล้วเปรียบเทียบกับทฤษฎีการกระเจิงแสงแบบไมย์และการกระเจิงแสงแบบเรย์ไลด์ เพื่อยืนยันความสอดคล้องกันเพื่อนำไปสู่แนวทางการออกแบบระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกรรมวิธีและเทคนิคต่างๆ ของระบบการตรวจวัดหาชนิดและขนาดของอนุภาคหรือสิ่งปนเปื้อนในวิทยานิพนธ์โดยใช้หลักการกระเจิงของแสง มีดังนี้

Yuzo MORI และคณะ [6] ได้วิจัยและพัฒนาขั้นตอนการวัดขนาดของอนุภาคในระดับนาโนเมตรซึ่งอยู่บนแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์ (Si wafer) โดยระบบตรวจจับค่าความเข้มการกระเจิงแสงด้วย PMT (Photomultiplier tube) แปลงจากค่าความเข้มแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้าที่กระเจิงจากอนุภาคโดยใช้ลำแสงตกกระทบชนิดอาร์กอนเลเซอร์มาสแกนบนพื้นผิวของซิลิกอนเวเฟอร์โดยนำค่าความเข้มแสงที่กระเจิงทั้งหมดที่อยู่ในรูปแบบสัญญาณไฟฟ้านามาวิเคราะห์โดยใช้หลักการกระเจิงแสงแบบเรย์ไลด์ ในระบบการตรวจวัดนี้จะไม่ทำลายสภาพพื้นผิวของแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์และสามารถตรวจจับอนุภาคที่มีขนาดประมาณ 20 นาโนเมตรได้

Satoshi SASAKI และคณะ [7] ได้ศึกษาขั้นตอนและพัฒนาการวัดอนุภาคที่มีขนาดระดับนาโนเมตรที่อยู่บนแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์ โดยใช้วิธีการกระเจิงแสงในการตรวจจับอนุภาคที่มีขนาดประมาณ 24 - 34 นาโนเมตร และนำมาทดสอบกับระบบทำความสะอาดของแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์ที่เป็นขั้นตอนการทำความสะอาดแบบเปียก โดยที่สามารถพิสูจน์ได้ว่าขั้นตอนการทำความสะอาดแบบเปียกสามารถนำอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 100 นาโนเมตร ออกจากแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์ได้

Thomas A. Germer [8] ได้ทำการศึกษาวัดเครื่องมือวัดการกระเจิงแสงที่มีอุปกรณ์ตรวจจับแสงหลายตัว โดยใช้อุปกรณ์ตรวจจับแสงทั้งหมด 28 ตัวที่ติดตั้งครอบคลุมเหนืออนุภาคเป็นรูปครึ่งทรงกลม โดยทำการวัดค่าการกระเจิงแสงจากพื้นผิวซิลิกอนที่มีความขรุขระในระดับไมโครเมตร และวัดขนาดของโพลิสแตนลินลาเทค (PSL) ที่มีรูปร่างทรงกลมและอยู่บนพื้นผิวซิลิกอนเวเฟอร์ โดยอุปกรณ์ตรวจจับแสงในแต่ละตัวถูกระบุตำแหน่งการติดตั้งเพื่อนำค่าการกระเจิงแสงในแต่ละตำแหน่งนี้ไปเปรียบเทียบกับค่าการกระเจิงแสงของ BRDF ที่ได้จากการคำนวณในทฤษฎี

A.R. Jones [9] ได้ทำการศึกษารวบรวมงานวิจัยการกระเจิงแสงที่มีความสำคัญและมีการพัฒนาที่ผ่านมานาน โดยเป็นการสรุปทฤษฎีและการปฏิบัติที่ประกอบด้วยงานวิจัยที่เคยมีมาก่อนและงานวิจัยใหม่ บนการทดลองที่ผ่านการแลกเปลี่ยนความคิดเห็นจากกระบวนการทดสอบมาเป็นอย่างดี นอกเหนือจากนี้ยังประกอบด้วยเทคนิคสำหรับการวัดขนาดและการวัดคุณสมบัติอื่นๆซึ่งมีงานวิจัยที่ผ่านมานาน เช่น การกำหนดรูปร่างและการวัดค่าดัชนีหักเหของอนุภาค

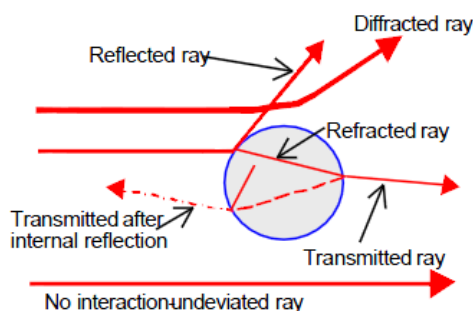
David W.Hahn [10] ได้ทำการศึกษาและอธิบายการเกิดการกระเจิงแสงในรูปแบบเรย์ไล และไมย์ เพื่อหาเงื่อนไขในการเกิดการกระเจิงแสงในแต่ละรูปแบบที่มีความแตกต่างกัน แล้วทำการทดลองเพื่อดูพฤติกรรมของการกระเจิงแสงทั้งแบบเรย์ไล และไมล์ โดยเปรียบเทียบกับขนาดของอนุภาคที่เปลี่ยนแปลงไปตามลำดับ

จากผลงานวิจัยที่กล่าวข้างต้นนี้ ผู้วิจัยได้นำผลดังกล่าวมาวิเคราะห์เปรียบเทียบกับผลของแบบจำลอง MIST นอกจากนี้ยังนำผลไปหาความสัมพันธ์กับหลักการและทฤษฎีของการกระเจิงแสง ซึ่งจะกล่าวขึ้นตอนรายละเอียดในบทถัดไป

2.2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องที่ใช้ในงานวิจัยนี้

2.2.1 หลักการกระเจิงแสง (Light Scattering Method)

พิจารณาเฉพาะอนุภาคใดๆ โดยใช้หลักการกระเจิงแสงจะเห็นได้ว่าเมื่อแสงตกกระทบบนอนุภาคจะทำให้เกิดปรากฏการณ์การกระเจิงแสงซึ่งจะประกอบด้วย การสะท้อนของแสง, การหักเหของแสง และการเลี้ยวเบนของแสง [11] ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ปรากฏการณ์การกระเจิงแสงของอนุภาค [11]

จากกฎการสูญเสียพลังงานสามารถอธิบายได้ตามสมการ(2.1)

$$\text{Extinction} = \text{scattering} + \text{absorption} \quad (2.1)$$

โดยที่ Scattering คือ การกระเจิงของแสง

Absorption คือ การดูดกลืนของแสง

$$\text{เมื่อ} \quad \text{Scattering} = \text{reflection} + \text{refraction} + \text{diffraction} \quad (2.2)$$

โดยที่ Reflection คือ การสะท้อนของแสง

Refraction คือ การหักเหของแสง

Diffraction คือ การเลี้ยวเบนของแสง

กรณีการดูดกลืนของลำแสงมีประสิทธิภาพไม่เป็น 100% โฟตอนในลำแสงบางตัวอาจจะไม่ถูกสะท้อนหรือส่งผ่านออกมาจากวัตถุ ในบางกรณีการดูดกลืนอาจจะเข้าใกล้ 100% และมีโฟตอนบางส่วนถูกสะท้อนออกหลังกระทบวัตถุ และมีบางส่วนที่ส่งผ่านวัตถุออกมาหลังการหักเหของแสง

ซึ่งปรากฏการณ์ทั้งหมดนี้จัดอยู่ภายใต้รูปแบบการกระเจิงแสงแบบเรย์ไล และไมย์ [13] โดยมีค่า α เป็นตัวเลือกรูปแบบการกระเจิงแสงซึ่งมีขนาดของอนุภาคเป็นตัวกำหนดและผกผันกับค่าความยาวคลื่นแสงที่ตกกระทบ [11] ตามสมการ (2.3)

$$\alpha = \frac{\pi D}{\lambda} : D = 2r \quad (2.3)$$

D คือ ขนาดของอนุภาค หน่วยไมโครเมตร

r คือ รัศมีของอนุภาค หน่วยไมโครเมตร

λ คือ ค่าความยาวคลื่นของแสงที่ตกกระทบ หน่วยไมโครเมตร

โดยที่ $\alpha \ll 1$ คือ รูปแบบของ Rayleigh Scattering Theory
 $\alpha \sim 1$ คือ รูปแบบของ Mie Scattering Theory
 $\alpha \gg 1$ คือ รูปแบบของ Geometric scattering theory

ตารางที่ 2.1 การหาค่า α แสดงความสัมพันธ์ของอนุภาค (D) ที่ขนาด 0.1 ถึง 0.6 ไมโครเมตรกับ ความยาวคลื่น (λ) เท่ากับ 0.488 และ 0.6328 ไมโครเมตร

$\alpha = \pi D / \lambda = 2\pi r / \lambda$						
Dimeter (D)	Radius (r)	Parameter (α)	Wavelegth ($\lambda = 0.488 \mu\text{m}$)	Wavelegth ($\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$)		
0.001 μm	0.0005 μm	$(\alpha < 1)$	0.006	0.005		Rayleigh Scat.
0.002 μm	0.001 μm		0.013	0.010		
0.003 μm	0.0015 μm		0.019	0.015		
0.004 μm	0.002 μm		0.026	0.020		
0.005 μm	0.0025 μm		0.032	0.025		
0.007 μm	0.0035 μm		0.045	0.035		
0.01 μm	0.005 μm		0.064	0.050		
0.02 μm	0.01 μm		0.129	0.099		
0.03 μm	0.015 μm		0.193	0.149		
0.1 μm	0.05 μm		0.643	0.496		
0.2 μm	0.1 μm	$(\alpha > 1)$		1.287	1.000	Mie Scat.
0.3 μm	0.15 μm			1.930	1.489	
0.4 μm	0.2 μm			2.574	1.985	
0.5 μm	0.25 μm			3.217	2.481	
0.6 μm	0.3 μm			3.861	2.977	

จากตารางที่ 2.1 เป็นการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ (α) ที่ขนาดอนุภาค D ตั้งแต่ 1 ถึง 0.6 ไมโครเมตร ใช้ λ เท่ากับ 0.488 และ 0.6328 ไมโครเมตรซึ่งแสดงตัวอย่างการคำนวณค่า $\alpha = (3.14) (0.007 \times 10^{-6}) / (0.488 \times 10^{-6}) = 0.045$ ซึ่งตกอยู่ในช่วง $\alpha < 1$ ที่เป็นการกระเจิงแสงรูปแบบเรย์ไล และ ค่า $\alpha = (3.14)(0.4 \times 10^{-6}) / (0.6328 \times 10^{-6}) = 2.574$ ซึ่งตกอยู่ในช่วง $\alpha > 1$ ที่เป็นการกระเจิงแสงรูปแบบไมย์ จากการคำนวณดังกล่าวจึงสามารถอธิบายรูปแบบการกระเจิงแสงเพื่อนำไปสู่การเลือกความยาวคลื่นของแสงและเลือกรูปแบบที่เหมาะสม เพื่อใช้กับระบบในงานวิจัยต่อไป

2.2.2 แหล่งกำเนิดแสงและอุปกรณ์ตรวจจับแสง (Light source and Detector)

ความยาวคลื่นของแสงที่ใช้คือเลเซอร์ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดแสง โดยเลเซอร์นี้มีคุณสมบัติพิเศษที่มีประโยชน์ใช้งานอย่างกว้างขวาง LASER ย่อมาจาก "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation" ซึ่งหมายถึง การขยายสัญญาณแสง โดยการปล่อยแสงแบบ

เร่งเร็ว ดังนั้นกลไกพื้นฐานของเลเซอร์จึงได้แก่ การแปลงแสงแบบเร่งเร็ว และการขยายสัญญาณแสง กลไกทั้งสองนี้เป็นสาเหตุที่ทำให้เลเซอร์มีคุณสมบัติพิเศษต่างๆ เช่น เป็นลำแสงขนานที่มีความเข้มสูง และมีคลื่นแสงที่เป็นระเบียบด้วยค่าความยาวคลื่นที่ตายตัว ซึ่งอธิบายได้ดังนี้ [16, 17, 18]

2.2.2.1 หลักการกำเนิดแสงเลเซอร์

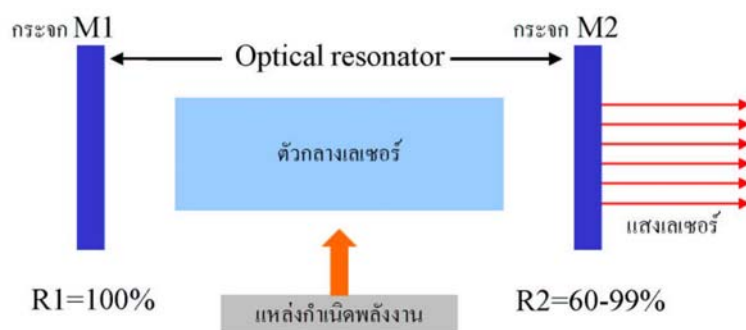
หลักการพื้นฐานที่สำคัญในการทำให้เกิดแสงเลเซอร์ มีดังนี้

1. การทำให้เกิดปรากฏการณ์ประชากรผกผัน (population inversion) หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า (pumping source)
2. การทำให้เกิดการแกว่งกวัดของเลเซอร์ (laser oscillation) ซึ่งกระบวนการข้างเคียงของกับกระจกเลเซอร์ ซึ่งทำหน้าที่เป็นห้องแสง หรือแควิตีแสง (optical cavity)

2.2.2.2 โครงสร้างพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแสงเลเซอร์

จากหลักการพื้นฐานของการเกิดแสงเลเซอร์แล้ว เครื่องกำเนิดแสงเลเซอร์จะต้องมีองค์ประกอบที่สำคัญ 3 ส่วน ดังนี้

1. ตัวกลางเลเซอร์ (laser medium) ได้แก่วัสดุที่ต้องการกระตุ้นให้เกิดการปล่อยแสงเลเซอร์ ซึ่งอาจเป็นแก๊ส ของแข็ง ของเหลว หรือสารกึ่งตัวนำ
2. ออปติคัลเรโซเนเตอร์ (optical resonator) ได้แก่กระจก 2 แผ่น ซึ่งได้กล่าวรายละเอียดไปแล้ว
3. แหล่งกำเนิดพลังงาน (energy source) เพื่อใช้ในการกระตุ้นให้อะตอมอยู่ในสถานะที่เป็นประชากรผกผัน การให้พลังงานแก่อะตอมหรือการปั๊มทำได้หลายวิธี เช่น ถ้าตัวกลางเลเซอร์เป็นแก๊ส ต้นกำเนิดพลังงานที่ใช้คือแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงกำลังสูงเพื่อทำให้เกิดการดิสชาร์จกลายเป็นพลาสมา และถ้าตัวกลางเป็นของแข็งหรือของเหลวจะใช้ต้นกำเนิดพลังงานที่เป็นแสง เช่น แสงจากหลอดไฟแฟลช หรือ หลอดอาร์ก



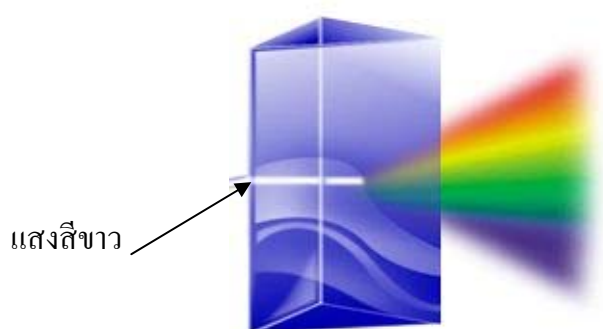
รูปที่ 2.2 โครงสร้างพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแสงเลเซอร์

2.2.2.3 สมบัติของแสงเลเซอร์

แสงเลเซอร์มีสมบัติที่เด่นชัด ดังต่อไปนี้

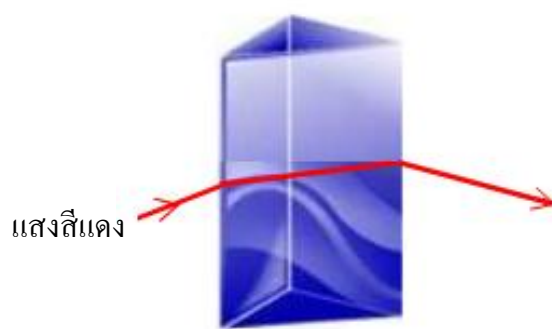
1. เป็นแสงสีเดียว (monochromaticity)

เป็นสมบัติสำคัญประการหนึ่งของเลเซอร์ ซึ่งหมายถึงแสงเลเซอร์มีความยาวคลื่นเพียงค่าเดียว ก่อนอื่นเราจะพิจารณาแสงที่ปล่อยจากต้นกำเนิดแสง โดยทั่วไปที่เราพบเห็นในชีวิตประจำวัน เช่น หลอดไฟฟ้า และดวงอาทิตย์ รวมทั้งต้นกำเนิดแสงที่ใช้ในการทดลองทางวิทยาศาสตร์ เช่น หลอดสเปกตรัม แสงจากหลอดไฟฟ้าและดวงอาทิตย์จะเห็นเป็นแสงสีขาว ถ้าให้แสงสีขาวนี้ผ่านปริซึม จะเห็นแถบสีต่างๆ เรียงกันอย่างต่อเนื่องจากสีม่วงถึงสีแดง เรียกว่า แถบสเปกตรัมของแสง ซึ่งมีความยาวคลื่นในช่วงตั้งแต่ 0.400 - 0.700 ไมโครเมตร ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสงสีขาวจากหลอดไฟฟ้าหรือดวงอาทิตย์เมื่อผ่านปริซึม [17]

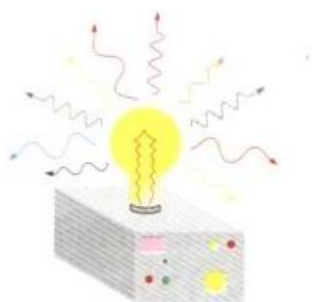
ในกรณีของเลเซอร์ เช่น เลเซอร์ฮีเลียม-นีออน ซึ่งเป็นเลเซอร์ชนิดแก๊สหรือเลเซอร์แก๊สชนิดหนึ่งที่ใช้กันอยู่ทั่วไปในห้องปฏิบัติการฟิสิกส์ เพื่อศึกษาสมบัติต่างๆ ของแสง โดยเลเซอร์ชนิดนี้จะให้แสงสีแดง และถ้าให้แสงสีแดงของเลเซอร์ฮีเลียม-นีออนผ่านปริซึมจะไม่มี การแยกเป็นหลายเส้น แต่ยังคงมีเพียง 1 เส้นที่มีความยาวคลื่น 0.6328 ไมโครเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แสงสีแดงจากเลเซอร์ฮีเลียม - นีออนเมื่อผ่านปริซึม [17]

2. มีความเป็นเฟสเดียวของคลื่น (Coherence light)

ต้นกำเนิดแสงธรรมดาโดยทั่วไป เช่น หลอดไฟฟ้า และหลอดฟลูออเรสเซนต์ จะให้แสงที่มีหลายสีหรือหลายความยาวคลื่น ยิ่งไปกว่านั้นแต่ละคลื่นยังเคลื่อนที่ในทิศทางต่างๆ กันไม่แน่นอน ดังรูปที่ 2.5(ก) เราสามารถอธิบายการปล่อยแสงจากหลอดไฟฟ้าได้ดังนี้ จากรูปที่ 2.5(ก) ใต้หลอดไฟฟ้าที่ปล่อยแสงประกอบด้วยอะตอมที่เล็กมากจำนวนมาก โดยแต่ละอะตอมจะทำหน้าที่เป็นต้นกำเนิดแสง ดังนั้นแต่ละอะตอมก็ปล่อยแสงออกมาอย่างอิสระซึ่งกันและกัน แสงที่ถูกปล่อยออกมาจากหลอดไฟฟ้าจึงมีเฟส และความยาวคลื่นต่างๆ กัน ยิ่งกว่านั้นแต่ละคลื่นที่ถูกปล่อยออกมามีทิศทางไม่แน่นอน (หรือเป็น random) แสงจากแหล่งต้นกำเนิดแสงธรรมดาโดยทั่วไปจะเรียกว่าแสงอินโคฮีเรนต์ (incoherence light) อย่างไรก็ตาม ต้นกำเนิดของแสงเลเซอร์นอกจากจะให้แสงสีเดียว โดยทุกๆ คลื่นของแสงเลเซอร์จะมีเฟสเดียวกันหมด ดังแสดงในรูปที่ 2.5(ข) ดังนั้นแสงเลเซอร์จึงเรียกว่า แสงโคฮีเรนต์ (coherence light)



(ก) แสงจากหลอดไฟฟ้า

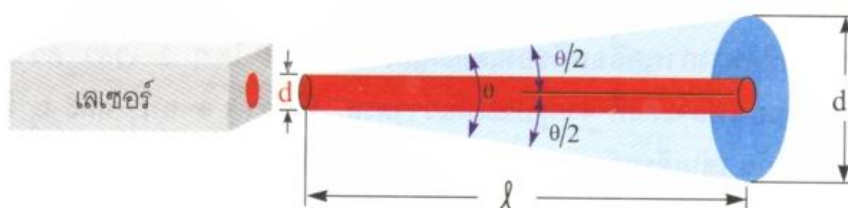


(ข) แสงจากเลเซอร์

รูปที่ 2.5 ต้นกำเนิดแสงชนิดต่างๆ (ก) แสงจากหลอดไฟฟ้า (ข) แสงจากเลเซอร์ [17]

3. มีทิศทางที่แน่นอน (directionality)

สมบัติที่เด่นชัดที่สุดของแสงเลเซอร์ คือลำแสงของเลเซอร์ไม่กระจายออกเหมือนแสงจากไฟฉายหรือต้นกำเนิดแสงอื่นๆ แสงที่ออกจากเลเซอร์มีการบานออก (divergence) ค่อนข้างน้อย มุมที่ลำแสงบานออก (beam divergence, θ) นิยามตามรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ลักษณะการลู่ออกของลำแสงเลเซอร์ [17]

จากรูปที่ 2.6 ถ้าลำแสงเลเซอร์ที่ออกจากเครื่องเลเซอร์มีเส้นผ่านศูนย์กลาง d แล้วเริ่มบานออกเป็นมุม θ โดยที่ระยะ l จากเครื่องเลเซอร์เส้นผ่านศูนย์กลางของปลายลำแสงมีขนาด d' โดยทั่วไปสำหรับแสงเลเซอร์มุมที่ลำแสงบานออกจะมีค่าประมาณ 1-10 mrad (มิลลิเรเดียน) หรือประมาณ 0.06-0.6 องศา ดังนั้นมุม θ ถือว่าน้อยมาก

4. มีความเข้มหรือมีความสว่าง (brightness) สูงมาก

นิยามคำว่า ความสว่าง (Brightness) ว่า คือความเข้มของพลังงาน ที่ถูกปล่อยออกมาจากต้นกำเนิดแสงต่อ 1 หน่วยพื้นที่ของต้นกำเนิดแสง ดังนั้น

$$\text{ความสว่าง} = \frac{I}{A_0} \frac{W}{m^2 - sr} \quad (2.4)$$

นั่นคือ การที่เราจะบอกว่าต้นกำเนิดแสงหนึ่งมีความสว่างมากหรือน้อย ขึ้นกับความเข้มของพลังงานที่ถูกปล่อยออกมาจากต้นกำเนิดแสงนั้นๆ

2.2.2.4 ชนิดของเลเซอร์

ปัจจุบันได้มีการพัฒนาเลเซอร์ชนิดต่างๆ จำนวนมากมายหลายชนิดด้วยกัน การแบ่งชนิดของเลเซอร์แบ่งตามวัสดุตัวกลางที่เป็นต้นกำเนิดแสงเลเซอร์ ซึ่งแบ่งเป็น 4 ชนิดด้วยกันคือ เลเซอร์ชนิดแก๊ส (gas laser) เลเซอร์ชนิดของแข็ง (solid state laser) เลเซอร์ชนิดของเหลว (liquid laser) และเลเซอร์ชนิดสารกึ่งตัวนำ (semiconductor laser) หรือเลเซอร์ไดโอด (laser diode) ตารางที่ 2.2 เป็นตัวอย่างเลเซอร์ชนิดต่างๆ ที่นิยมใช้กันมาก รวมทั้งความยาวคลื่นและกำลังของแสงเลเซอร์ที่ได้จากเลเซอร์ชนิดนั้นๆ

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างของเลเซอร์ชนิดต่างๆ [16]

ชนิด	ชื่อเลเซอร์	ชื่อย่อ	ความยาวคลื่น (nm)	ลักษณะการทำงาน		กำลังของแสงเลเซอร์แบบต่อเนื่อง	พลังงานของแสงเลเซอร์ต่อพัลส์
				ต่อเนื่อง	พัลส์		
แก๊ส	อาร์กอนไอออน (Argon ion)	Ar ⁺	488,514.5	CW	-	1-20 W	-
	คริปตอนไอออน (Krypton ion)	Kr ⁺	568.2	CW	-	1-10 W	-
	ฮีเลียม-นีออน (Helium-Neon)	He-Ne	632.8	CW	-	1-50 mW	-
	คาร์บอนไดออกไซด์ (Carbondioxide)	CO ₂	10,600	CW	-	25 W-20 kW	-
ของแข็ง	ทับทิม (Ruby) นีโอดิเมียม แยก (Neodymium YAG)	- Nd:YAG	694.3 1,064	- -	1-100 Hz 1-500 Hz	- -	10-50 mJ 50-1000 mJ
ของเหลว	ดาย (Dye)	-	300-1,000 (จูนเลือกความยาวคลื่นได้)	-	1-1000Hz	-	0.1-100 J
สารกึ่งตัวนำ	อะลูมิเนียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ (Aluminium gallium-arsenide)	AlGaAs	750-850	CW	-	1-400 mW	-

2.2.2.5 โฟโตไดโอด (Photodiode)

โฟโตไดโอด ใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจจับแสงในงานวิจัยนี้ ซึ่งเป็นสิ่งประดิษฐ์ตรวจจับแสงชนิดโฟโตอิเล็กทริกแบบภายใน (Internal photoelectric) มีโครงสร้างพื้นฐานเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดรอยต่อ pn เมื่อมีแสงตกกระทบบนรอยต่อ pn จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าและแรงดันขึ้น โดยความหมายกว้างๆ แล้วอาจรวมเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยก็ได้แต่โดยทั่วไปเมื่อกล่าวถึงโฟโตไดโอด จะหมายถึงเซ็นเซอร์ชนิดหนึ่งที่สามารถเปลี่ยนสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้าและใช้ตรวจวัดความเข้มของแสง ปัจจุบันโฟโตไดโอดแบบรอยต่อ pn มีราคาไม่แพงและมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายในอุปกรณ์ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ และมีการผลิตโฟโตไดโอดจากสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ เช่น Si, GaAs, GaAsP, และ GaP ซึ่งไวต่อแสงในย่านความยาวคลื่นต่างๆ กัน สำหรับในระบบการสื่อสารด้วยแสงนิยมใช้โฟโตไดโอดชนิดพิเศษที่ทำงานได้รวดเร็วมากคือ พินโฟโตไดโอด และอะวอลานช์โฟโตไดโอด [12]

2.2.2.6 โครงสร้างของโฟโตไดโอดชนิดต่างๆ

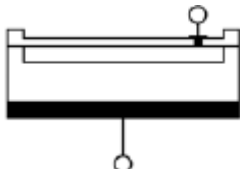
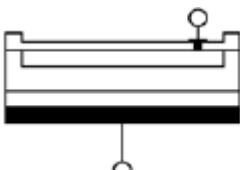
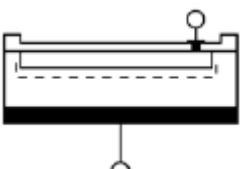
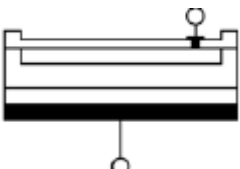
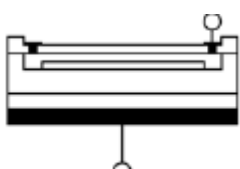
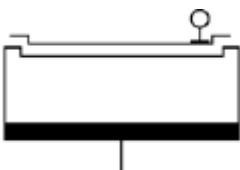
โฟโตไดโอดเป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่สามารถเปลี่ยนสัญญาณแสงอินพุตเป็นสัญญาณไฟฟ้าเอาต์พุตได้เมื่อมีแสงมาตกกระทบบ ปัจจุบันมีการพัฒนาให้โฟโตไดโอดและคุณสมบัติเด่นแตกต่างกันออกไปมากมายหลายชนิดเช่น [12]

- โฟโตไดโอดชนิดรอยต่อ pn (pn photodiode) และแบ่งออกเป็น
 - ชนิดแพลนาร์ดิฟฟิวชัน (planar diffusion)
 - ชนิดแพลนาร์ดิฟฟิวชันที่มีความจุไฟฟ้าต่ำ (low capacitance planar diffusion)
 - ชนิดรอยต่อ pnn⁺
- พินโฟโตไดโอด (pin photodiode)
- โฟโตไดโอดชนิดรอยต่อชอตต์กี (Schottky photodiode)
- อะวอลานช์โฟโตไดโอด (Avalanche photodiode)

โฟโตไดโอดทั้งหมดเหล่านี้มีคุณสมบัติเด่นโดยทั่วไปคือ

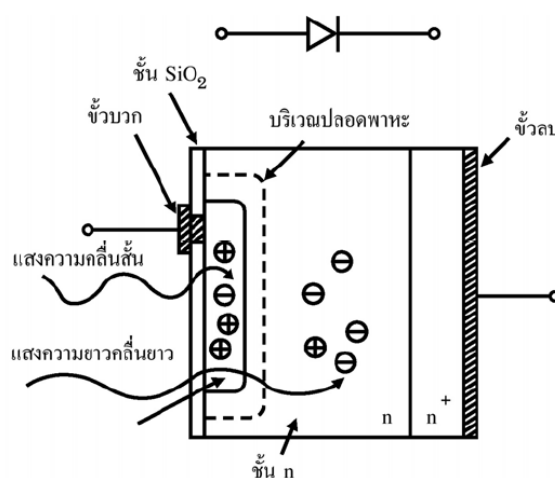
1. สัญญาณเอาต์พุตเปลี่ยนแปลงตามความเข้มของแสงอินพุตแบบเชิงเส้นได้ดี
2. มีสัญญาณรบกวนต่ำ
3. ตอบสนองต่อแสงในช่วงความยาวคลื่นแสงที่กว้าง
4. มีความคงทนทางกลศาสตร์
5. มีขนาดกะทัดรัดและเบา
6. มีอายุการใช้งานยาวนาน

ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างโครงสร้างของโฟโตไดโอดชนิดต่างๆ [12]

โฟโตไดโอด	คุณสมบัติเด่น
1. 	กระแสไฟฟ้ามืดมีค่าน้อย
2. 	กระแสไฟฟ้ามืดมีค่าน้อย ตอบสนองเร็ว และมีความไวสูง
3. 	กระแสไฟฟ้ามืดมีค่าน้อย ตอบสนองเร็ว และมีความไวสูง ตัดทอนแสงอินฟราเรด
4. 	ตอบสนองเร็วมาก
5. 	ตอบสนองแสงย่านอัลตราไวโอเล็ต
6. 	มีความสามารถขยายสัญญาณ ตอบสนองเร็วมาก

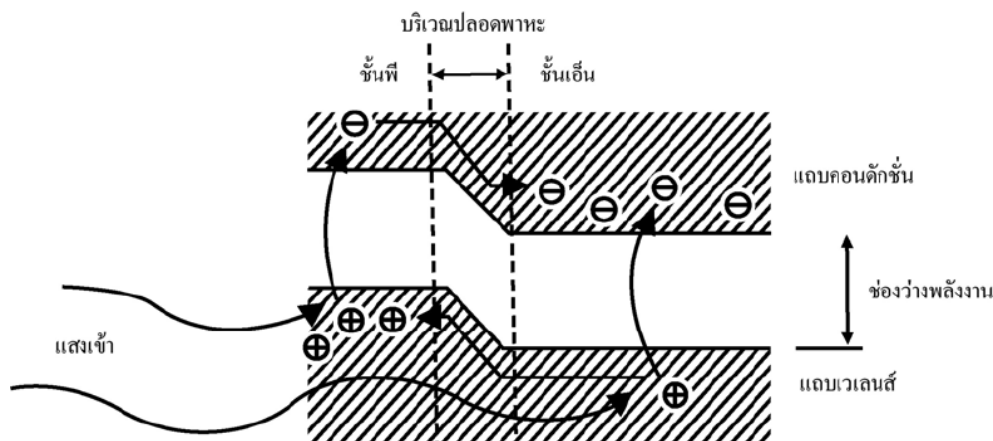
1. โฟโตไดโอดชนิดแพลงนาร์ดิฟิวชัน มีโครงสร้างเป็นรอยต่อ pn และมีฉนวน SiO_2 เคลือบทับ มีกระแสไฟฟ้ามีค่าน้อย วัสดุที่ใช้ได้แก่ Si GaAsP GaP Ge และ GaAs เป็นต้น
2. โฟโตไดโอดชนิดแพลงนาร์ดิฟิวชันที่มีความจุไฟฟ้าต่ำ เป็นชนิดที่ออกแบบให้สารเจือปนในชั้น n มีปริมาณน้อย ทำให้ชั้น n มีความต้านทานสูงและชั้นปลอดพาหะค่อนข้างหนา เป็นผลให้ค่าความจุไฟฟ้าที่รอยต่อมีค่าน้อย ทำให้โฟโตไดโอดชนิดนี้ทำงานได้รวดเร็วมาก ช่วงเวลาขาขึ้นมีค่าเพียง 1 ใน 10 ของชนิดแรก นอกจากนี้เนื่องจากชั้น p มีความบางมาก จึงตอบสนองต่อแสงความยาวคลื่นสั้นได้ดี
3. โฟโตไดโอดชนิดรอยต่อ pnn^+ สารกึ่งตัวนำชั้น n^+ มีค่าสภาพความต้านทานต่ำโดยการโดปด้วยสารเจือปนปริมาณมากๆ และชั้น n^+ หนาหลายๆจนทำให้ที่รอยต่อระหว่างชั้น n และชั้น n^+ เปรียบเสมือนชั้นปลอดพาหะ ลักษณะเช่นนี้จะทำให้ไม่มีผลตอบสนองต่อแสงอินฟราเรด จึงใช้วัดแสงความยาวคลื่นสั้นได้ดี
4. โฟโตไดโอดชนิดรอยต่อ pin หรือ ฟินโฟโตไดโอด ที่บริเวณตรงระหว่างชั้น p และ n มีการใส่ชั้นสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (intrinsic ย่อว่า i) ทำให้โฟโตไดโอดทำงานได้รวดเร็วมากเป็นพิเศษ เพราะชั้น i หนาและมีแคพาซิแตนซ์น้อยมาก ในการใช้งานจะใช้วิธีไบแอสแบบย้อนจึงทำให้กระแสไฟฟ้ารั่วมีค่าน้อย
5. โฟโตไดโอดชนิดรอยต่อชอตต์กี เป็นโฟโตไดโอดรอยต่อชอตต์กีแบร์เรียร์ ใช้วิธีเคลือบโลหะที่บางมากๆ ลงบนที่ผิวของสารกึ่งตัวนำให้มีคุณสมบัติเป็นรอยต่อชอตต์กีแบร์เรียร์ โฟโตไดโอดชนิดนี้จึงตอบสนองต่อแสงตั้งแต่ย่านมองเห็นไปจนถึงย่านอัลตราไวโอเล็ตได้ดี
6. โฟโตไดโอดชนิดอะวะลันช์ เป็นโฟโตไดโอดที่มีการขยายสัญญาณอยู่ภายในทำงานโดยใช้สนามไฟฟ้าสูงป้อนเข้าสู่รอยต่อ pn แบบย้อนกลับจนทำให้พาหะที่ถูกกระตุ้นด้วยแสงถูกเร่งให้วิ่งไปชนกับอะตอมตัวอื่นๆ และเกิดอิเล็กตรอนชุดที่สองขึ้นมาใหม่ ลักษณะกระบวนการเช่นนี้เกิดขึ้นซ้ำๆ กันซึ่งเรียกว่าปรากฏการณ์อะวะลันช์ ทำให้สามารถตรวจวัดแสงความเข้มต่ำมากๆ ได้ดี เพราะโฟโตไดโอดชนิดนี้มีกลไกของการขยายสัญญาณอยู่ภายใน นอกจากนี้ก็มีผลตอบสนองที่รวดเร็วมากด้วย

2.2.2.7 หลักการทำงานของโฟโตไดโอด



รูปที่ 2.7 ภาพตัดขวางแสดงโครงสร้างพื้นฐานของโฟโตไดโอดชนิดรอยต่อ pn [12]

โครงสร้างพื้นฐานชนิดรอยต่อ pn รูปที่ 2.7 แสดงตัวอย่างภาพตัดขวางของโฟโตไดโอด ที่ด้านรับแสงเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด p และติดต่อกับชนิด n เป็นรอยต่อ pn นี้ทำหน้าที่เป็นส่วนเปลี่ยนสัญญาณแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าด้วยกระบวนการโฟโตโวลตาอิก (photovoltaic effect) ในกรณีโฟโตไดโอดที่ทำจากวัสดุซิลิคอนนั้น ชั้น p เตรียมได้จากการแพร่สมธาตุโบรอนเข้าสู่ซิลิคอนด้วยความลึกประมาณ $1\text{ }\mu\text{m}$ ที่บริเวณตรงกลางรอยต่อ pn เป็นย่านปลอดพาหะในการผลิตจริงจะมีการควบคุมความหนาและปริมาตรการโด๊ปสารเจือปนของชั้น p ชั้น n และชั้นล่างสุด (n^+) ให้เหมาะสมซึ่งจะช่วยให้โฟโตไดโอดไวต่อแสงในย่านที่ต้องการได้และสามารถทำงานที่ความถี่สูงที่ต้องการได้ เมื่อมีแสงตกกระทบโฟโตไดโอดและถ้าพลังงานโฟตอนของแสงมีค่ามากกว่าช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำ กล่าวคือถ้า $h\nu \geq E_g$ แสงก็就会被สารกึ่งตัวนำดูดกลืนโดยพลังงานโฟตอนของแสงจะไปกระตุ้นให้อิเล็กตรอนกระโดดจากแถบเวเลนซ์ขึ้นไปสู่แถบคอนดักชัน และที่แถบเวเลนซ์จะเหลือโฮลอยู่



รูปที่ 2.8 แถบพลังงานของโฟโตไดโอดชนิดรอยต่อ pn [12]

รูปที่ 2.8 แสดงลักษณะแถบพลังงานของโฟโตไดโอดชนิดรอยต่อ pn การเกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลนั้นเกิดขึ้นได้ทั้งในชั้น p ชั้นปลอดพาหะ และชั้น n อิเล็กตรอนที่เกิดในแถบคอนดักชันในชั้น p จะแพร่กระจายไปสู่ชั้น n และอิเล็กตรอนที่เกิดในแถบคอนดักชันในชั้นปลอดพาหะจะถูกศักย์ไฟฟ้าภายในพัคพาให้วิ่งไปสู่ชั้น n ส่วนกรณีโฮลก็จะไหลในทิศทางตรงข้ามกับอิเล็กตรอน กล่าวคือจะไหลจากแถบเวเลนส์ในชั้น n หรือชั้นปลอดพาหะไปสู่ชั้น p จำนวนการเกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลนี้จะแปรผันกับจำนวนโฟตอนของแสงที่สารกึ่งตัวนำดูดกลืน อิเล็กตรอนที่สะสมในชั้น n จะทำให้ชั้น n

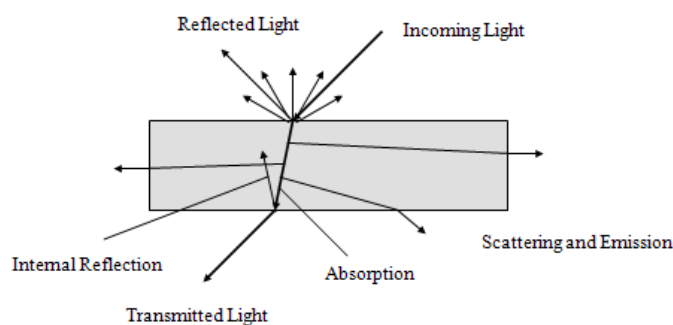
มีประจุไฟฟ้าเป็นลบและโฮลที่ไปสะสมในชั้น p จะทำให้ชั้น p มีประจุไฟฟ้าเป็นบวก ต่อจากนั้นถ้าเราต่อโฟโตไดโอดกับวงจรภายนอก อิเล็กตรอนก็จะไหลออกจากชั้น n และโฮลก็จะไหลออกจากชั้น p ไปวงจรภายนอก

จากข้อมูลข้างต้นสามารถสรุปการเลือกใช้อุปกรณ์ที่จำเป็นและให้เหมาะสมกับงานวิจัยนี้ คือเลเซอร์ฮีเลียม-นีออนที่มีความยาวคลื่นที่ 0.6328 ไมโครเมตร และโฟโตไดโอดชนิดพิน โดยสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับรูปแบบกระเจิงแสงภายใต้ หลักการกระเจิงแสงของ Bidirectional Reflection Distribution Function (BRDF)

2.2.3 หลักการกระเจิงแสง (Bidirectional Reflection Distribution Function : BRDF)

เนื่องด้วยงานวิจัยนี้พิจารณาบนพื้นผิววัตถุจึงใช้หลักการกระเจิงแสงของ BRDF ซึ่งเป็นคุณสมบัติเชิงแสงที่จะตกกระทบบนวัตถุแล้วทำให้เกิดปฏิกิริยาเชิงแสง 3 ลักษณะ ประกอบด้วย การสะท้อนของแสง (Light Reflected) การส่งผ่านของแสง (Light Transmitted)

และการดูดกลืนแสง (Light Absorbed) ดังรูปที่ 2.9 โดยทั้งหมดนี้จะเกิดขึ้นและอยู่ในรูปแบบของพลังงานที่เรียกว่า การอนุรักษ์พลังงาน (Energy Conservation) [4] ดังนี้



รูปที่ 2.9 ปฏิกริยาทางแสงของ BRDF [4]

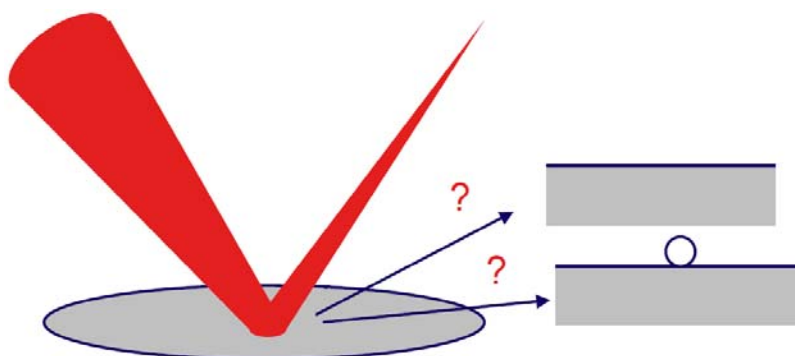
$$\text{Light incident at surface} = \text{Light Reflected} + \text{Light Transmitted} + \text{Light Absorbed} \quad (2.5)$$

โดยที่ Light Reflected คือ แสงที่ถูกสะท้อน

Light Transmitted คือ แสงที่ถูกส่งผ่าน

Light Absorbed คือ แสงที่ถูกดูดกลืน

เมื่อพิจารณากรณีแสงตกกระทบบนพื้นผิวที่ไม่มีอนุภาค และแสงตกกระทบบนพื้นผิวที่มีอนุภาค สามารถอธิบายในรูปแบบตามหลักการกระจายแสงของ BRDF ได้ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 รูปแบบการกระจายแสงบนพื้นผิวเรียบ และบนพื้นผิวเรียบที่มีอนุภาค [20]

การพิจารณา BRDF จะอยู่ในรูปแบบอัตราส่วนของสัญญาณแสงที่สะท้อนกับสัญญาณแสงที่ตกกระทบบนได้จากสมการ (2.6)

$$\text{BRDF} = \frac{\text{Output Signal}}{\text{Input Signal}} = \frac{L_r}{E_i} \quad (2.6)$$

L_r คือ จำนวน/ปริมาณของแสงที่สะท้อนในทิศทาง ω_r

E_i คือ จำนวน/ปริมาณแสงที่ตกกระทบจากทิศทาง ω_i

ω_i คือ ทิศทางของแสงที่ตกกระทบ

ω_r คือ ทิศทางที่แสงสะท้อนออก

จากสมการ (2.6) ทำการพิจารณาในรูปแบบของมุมที่แสงตกกระทบและมุมที่แสงสะท้อนดังสมการ (2.7)

$$BRDF(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) = \frac{dL_r(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r)}{dE_i(\theta_i, \phi_i)} \quad (2.7)$$

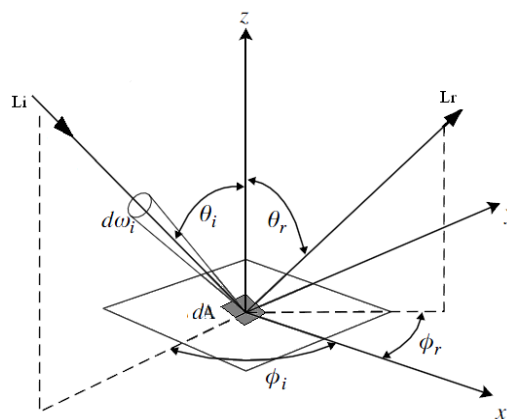
θ_i คือ มุมของแสงตกกระทบ

ϕ_i คือ มุมอซิมุทของแสงตกกระทบ

θ_r คือ มุมของแสงสะท้อน

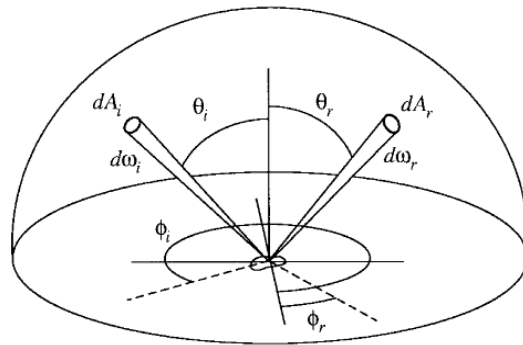
ϕ_r คือ มุมอซิมุทของแสงสะท้อน

มุมของแสงตกกระทบและมุมของแสงสะท้อนที่เกิดขึ้นบนหลักการกระเจิงแสงของ BRDF สามารถอธิบายได้จากโครงสร้างทางเรขาคณิตของ BRDF ในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 โครงสร้างเรขาคณิตของ BRDF บนพื้นผิว

จากรูปที่ 2.11 มุมของแสงตกกระทบ L_i จะขึ้นอยู่กับมุมตัน (Solid Angle : $d\omega$) ที่ประกอบด้วย มุมของแสงตกกระทบ θ_i และมุมอซิมุทของแสงตกกระทบ ϕ_i ที่ระนาบ xy บนพื้นที่ dA_i ในทำนองเดียวกันมุมของแสงสะท้อนในทิศทาง L_r จะขึ้นอยู่กับมุมตันที่ θ_r และ ϕ_r บนระนาบ xy เมื่อพิจารณาโครงสร้างเรขาคณิตของ BRDF ในรูปแบบครึ่งทรงกลมหนึ่งหน่วยดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 โครงสร้างเรขาคณิตของ BRDF บนครึ่งทรงกลมหนึ่งหน่วย

เมื่อพิกัดของมุมตันในทรงกลมรูปที่ 2.12 สามารถหาค่าของ $d\omega$ และ dE_i ในรูปของตรีโกณได้จากสมการดังนี้

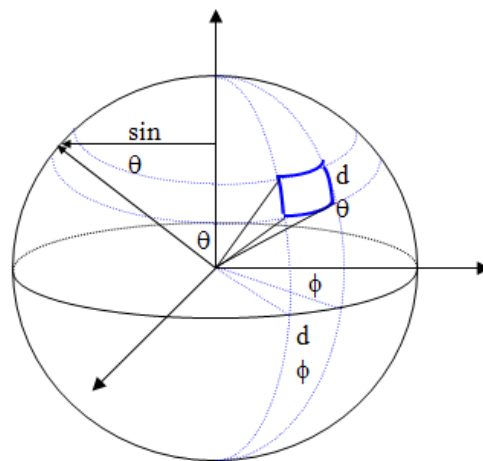
$$d\omega = (\text{height})(\text{width}) = (d\theta)(\sin\theta d\phi) = \sin\theta d\theta d\phi \quad (2.8)$$

height คือ ความสูงของพื้นที่

width คือ ความกว้างของพื้นที่

และ
$$dE_i = L_i \cos\theta_i d\omega_i \quad (2.9)$$

ดังนั้นในสมการที่ (2.8) และ (2.9) จะสามารถหาพื้นที่ขนาดเล็กบนพื้นผิวทรงกลมในรูปที่ 10 ของมุมตันที่เป็นทิศทางของ BRDF ระหว่างมุมของแสงสะท้อนกับมุมของแสงตกกระทบ



รูปที่ 2.13 พิกัดมุมตันในทรงกลม [4]

ดังนั้นในสมการที่ (2.6) และ (2.7) ของ BRDF ถูกแทนด้วยสมการที่ (2.7), (2.9) ในส่วนมุมตกกระทบของแสงได้ดังสมการที่ (2.10)

$$\text{BRDF}(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) = \frac{L_r}{L_i \cos \theta_i d\omega_i} \quad (2.10)$$

2.2.3.1 หลักการกระเจิงแสงของ BRDF บนพื้นผิวเรียบ (BRDF form smooth surface: BRDF)

การหาค่าความเรียบบนพื้นผิวของแผ่นบันทึกข้อมูลสามารถวิเคราะห์ได้ในสมการที่ (2.11) ดังนี้

$$\text{BRDF} = \frac{N}{A \cos \theta_r \cos \theta_i} \frac{|\hat{S} \cdot \hat{e}|^2}{F} \quad (2.11)$$

N/A คือ ค่าความเข้มของแสงที่กระเจิงภายในพื้นที่ความส่องสว่าง

$\hat{e}$ คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ขนานกับสนามไฟฟ้าที่ตกกระทบ

F คือ ความสัมพันธ์ระหว่างจุดศูนย์กลางการกระเจิงแสงที่แตกต่างกัน

S คือ ความสัมพันธ์ระหว่างการกระเจิงและการตกกระทบของแสง

2.2.3.2 หลักการกระเจิงแสงของ BRDF_{part} ขณะที่อนุภาคอยู่บนพื้นผิวเรียบ (BRDF form particle on smooth surface: BRDF_{part})

บนพื้นฐานของ BRDF ที่กล่าวมาข้างต้นนี้สามารถนำไปวิเคราะห์หาอนุภาคบนพื้นผิวได้โดย

เลือกใช้โหมดของ BRDF_{part} ในโปรแกรม MIST การหาอนุภาคบนพื้นผิวเรียบที่สามารถวิเคราะห์ได้ในสมการที่ (2.12) ดังนี้

$$\text{BRDF}_{\text{part}} = \frac{16\pi^4}{\lambda^4} \left(\frac{n_{\text{sph}}^2 - 1}{n_{\text{sph}}^2 + 2} \right)^2 \frac{a^6}{\cos \theta_r \cos \theta_i} \frac{NF}{A} \times \left| \mathbf{q}_{ij}^{\text{part}} \cdot \hat{e} \right|^2 \quad (2.12)$$

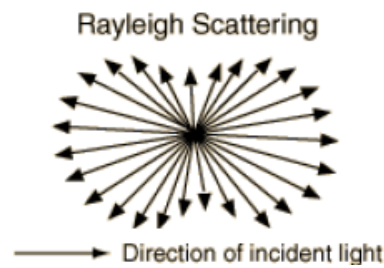
n_{sph} คือ ค่าดัชนีหักเหของอนุภาค

a คือ รัศมีของอนุภาค

q_{ij} คือ ค่าการกระเจิงแสงของเมตริกซ์ไจน์

2.2.4 การกระเจิงแสงแบบเรย์ไล (Rayleigh Scattering Theory)

การกระเจิงแสงแบบเรย์ไล สามารถวัดอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่นแสงที่ตกกระทบซึ่งใช้กับอนุภาคขนาดเล็กลักษณะทรงกลมซึ่งการกระเจิงแสงอยู่ในรูปแบบเท่ากันทุกทิศทางทางอธิบายได้จากรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 การกระเจิงแสงแบบเรย์ไล (Rayleigh scattering) [19]

จากรูปที่ 2.14 อธิบายได้ว่าเมื่อแสงตกกระทบบนอนุภาคขนาดเล็กเปรียบเทียบกับค่า $\alpha \ll 1$ จะทำให้เกิดปรากฏการณ์การกระเจิงแสงทั่วทุกทิศทุกทางที่มีขนาดค่าความเข้มแสงกระเจิงเท่ากันซึ่งถูกเรียกว่าการกระเจิงแสงแบบเรย์ไล โดยหาได้จากสมการ (2.13)

$$I_{\text{Ray}} = I_0 \frac{(1 + \cos^2 \theta)}{2R^2} \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^4 \left(\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \right)^2 \left(\frac{D}{2} \right)^6 \quad (2.13)$$

$$I_{\perp}^s(\theta) = \frac{4\pi D^6}{4\lambda^4 R^2} \left| \frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \right|^2 I_{\perp}^o$$

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

I_0 คือ ค่าความเข้มแสงที่ตกกระทบบน

θ คือ มุมของแสงที่ตกกระทบบน

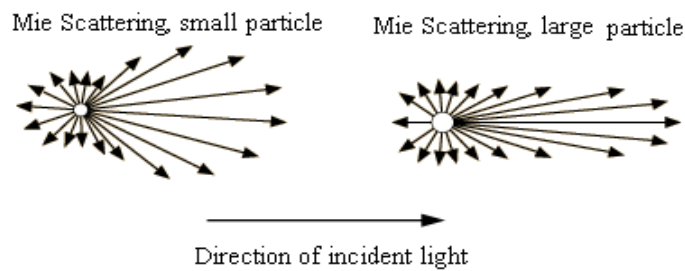
R คือ ระยะทางถึงอนุภาค

n คือ ค่าดัชนีหักเหของอนุภาค

D คือ ขนาดของอนุภาค หรือ $2r$ (r คือรัศมี)

2.2.5 การกระเจิงแสงแบบไมย์ (Mie Scattering Theory)

การกระเจิงแสงแบบไมย์เป็นการกระเจิงที่เกิดขึ้นเมื่ออนุภาคมีขนาดประมาณเท่ากับหรือใหญ่กว่าความยาวคลื่นแสงที่ตกกระทบบนเมื่อเทียบกับการกระเจิงแสงแบบเรย์ไลแสดงใน รูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 การกระเจิงแสงแบบไมย์ (Mie scattering) [19]

จากรูปที่ 2.15 อธิบายได้ว่าเมื่อแสงตกกระทบบนอนุภาคเปรียบเทียบกับค่า $\alpha \approx 1$ จะทำให้เกิดปรากฏการณ์การกระเจิงแสงที่มีลักษณะขนาดค่าความเข้มแสงกระเจิงค่ามากในทิศทางตรงข้ามกับแสงที่ตกกระทบประกอบด้วย 2 รูปแบบ คือ แบบไมย์อนุภาคที่มีขนาดเล็ก และแบบไมย์อนุภาคที่มีขนาดใหญ่ขึ้นซึ่งรูปแบบการกระเจิงแสงแบบไมย์ทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่นั้นให้ค่าความเข้มของการกระเจิงที่มีทิศทางไปข้างหน้ามากกว่าทิศทางอื่นๆ และแตกต่างกันตรงที่ค่าความเข้มการกระเจิงแสงของขนาดใหญ่จะให้ค่าความเข้มมากกว่าขนาดเล็กโดยขึ้นอยู่กับขนาดซึ่งถูกเรียกว่าการกระเจิงแสงแบบไมย์ โดยหาได้จากสมการ (2.14)

$$I_{\text{Mie}} = I_0 \frac{1}{2R^2} \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^4 \left(\frac{D}{2} \right)^6 (i_{\perp} + i_{\parallel}) \quad (2.14)$$

$$I_{\perp}^s(\theta) = \frac{\lambda^2 \alpha^6}{4\pi^2 R^2} \phi_{\perp}(\alpha, n, \theta) I_{\perp}^o \quad : \phi_{\perp}(\alpha, n, \theta) = i_{\perp}$$

$$I_{\parallel}^s(\theta) = \frac{\lambda^2 \alpha^6}{4\pi^2 R^2} \phi_{\parallel}(\alpha, n, \theta) I_{\parallel}^o \quad : \phi_{\parallel}(\alpha, n, \theta) = i_{\parallel}$$

เมื่อ $i_{\perp}$, $i_{\parallel}$ เป็นฟังก์ชันความเข้มแสงของการคำนวณจากอนุกรมอนันต์

2.2.6 ค่าดัชนีหักเหของแสง (Reflective index : n, ik)

ค่าดัชนีหักเหของแสงจะมีสองค่า ค่าหนึ่งเป็นเลขจำนวนจริง (n) และอีกค่าหนึ่งเป็นเลขจำนวนจินตภาพ (ik) โดยค่าดัชนีหักเหของแสงที่ใช้อยู่ เช่น แก้วมีค่าเป็น 1.5 และ น้ำมีค่าเป็น 1.3 ซึ่งเป็นค่าของเลขจำนวนจริงเป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากค่าที่เป็นส่วนของเลขจินตภาพนั้นมีค่าน้อยมากๆ แต่อย่างไรก็ตามแก้วจะมีค่าดัชนีหักเหของแสงเท่ากับ 1.5 หรือ ถ้าคิดเป็นค่าการสะท้อนของแสงก็ประมาณร้อยละ 4 ซึ่งสามารถสะท้อนได้น้อยกว่าวัสดุอื่นๆ ที่มีค่าดัชนีหักเหของแสงมาก แต่สำหรับโลหะนั้นจะมีค่าที่เป็นเลขจำนวนจริงน้อยและมีส่วนที่เป็นเลขจินตภาพสูง ซึ่งจะช่วย

แสงสะท้อนได้ดีขึ้นเช่นกัน แต่การที่โลหะมีค่าดัชนีหักเหของแสงที่อยู่ในรูปของเลขจินตภาพสูงนั้น ก็จะทำให้แสงบางส่วนถูกดูดซับในเนื้อโลหะได้ง่ายขึ้นด้วย การดูดซับพลังงานแสงเข้าไปนั้น เนื่องมาจากส่วนที่เป็นเลขจินตภาพของค่าดัชนีหักเหของแสงของวัสดุนั้นๆ (ไม่จำเป็นต้องเป็น โลหะ) สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในอีกลักษณะหนึ่งได้ คือ การตรวจวัดว่าวัสดุนั้นเป็นอะไร เพราะ วัสดุแต่ละชนิดก็จะดูดซับพลังงานแสงที่ความถี่ต่างๆ ได้ไม่เท่ากัน ศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับการใช้งานในลักษณะนี้ก็คือ สเปกโตรเมทรี (Spectrometry)