

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 การเลี้ยวเบนและการแทรกสอด (Diffraction and Interference)⁽²⁾

ปรากฏการณ์อย่างหนึ่งของแสงที่พบบ่อย ๆ และมักจะสร้างความสับสนในการตีความโดยนิยามคือ การแทรกสอด (Interference) และ การเลี้ยวเบน (Diffraction) ซึ่งถ้าจะพิจารณาอย่างละเอียด จะพบความแตกต่างของปรากฏการณ์ทั้งสองอย่างชัดเจนโดยคำจำกัดความ ทั้ง ๆ ที่บางปรากฏการณ์ไม่สามารถแยกแยะได้ชัดเจนว่าจะเรียกปรากฏการณ์ที่ได้เป็นอย่างไร คำจำกัดความที่เกิดจากแนวคิดต่าง ๆ ให้การเรียกชื่อของปรากฏการณ์หนึ่ง ที่อาจจะสับสน ในกรณีนี้จะเรียกการแทรกสอด คือ การที่กระบวนคลื่นมากกว่า 1 กระบวนคลื่น (Wave-train) มาพบกัน ณ จุด ๆ หนึ่ง และแสดงผลลัพธ์ของการรวมกันได้ (ตามกฎของ การรวมกันของคลื่น) ซึ่งจะสังเกตได้ว่ามิได้สนใจในการพิจารณาว่า คลื่น (Wave-train) เหล่านั้นจะมาจากแหล่งกำเนิดใด ในขณะที่การเลี้ยวเบน คือ การที่แสงเคลื่อนที่ผ่านจากที่หนึ่งไปอีกที่หนึ่ง โดยที่หน้าคลื่นถูกรบกวนไปจากเดิม เช่น การผ่านสิ่งกีดขวางของช่องเปิดหรือช่องเปิดและรูปแบบ ที่ได้จากการที่คลื่นหลาย ๆ คลื่นมารวมกัน ณ จุดใดจุดหนึ่ง ในมิติของการเคลื่อนที่ ในกรณีที่มีการเลี้ยวเบน เรียกเป็น รูปแบบของการเลี้ยวเบน (Diffraction Pattern) ในขณะที่รูปแบบ ที่ได้จากการที่คลื่นรวมกัน ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ในมิติของการเคลื่อนที่อันเกิดมาจากการเดินทางจากต้นกำเนิดจริง(หรือต้นกำเนิดเสมือน) โดยไม่มีการรบกวนของหน้าคลื่น เรียกเป็น รูปแบบของการแทรกสอด (Interference Pattern)

การเลี้ยวเบนเป็นกฎธรรมชาติของคลื่น โดยเฉพาะในเรื่องของคลื่นแสงเราสามารถแสดงให้เห็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น การเลี้ยวเบนสามารถแบ่งเป็น

2 ประเภท คือ

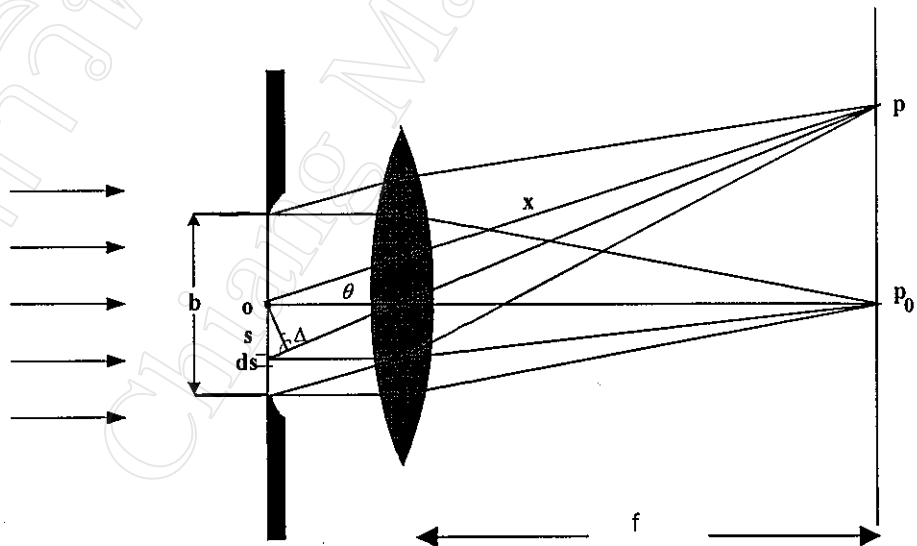
2.1.1. การเลี้ยวเบนแบบฟรอนโฮเฟอร์ (Fraunhofer diffraction) ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อให้คลื่นตกกระทบ (incident wave) และคลื่นเลี้ยวเบน (diffracted wave) เป็นคลื่นระนาบ หรือก็คือการเลี้ยวเบนแบบฟรอนโฮเฟอร์ จะเกิดขึ้นเมื่อระยะจากต้นกำเนิดแสง ถึงวัตถุ และระยะจากวัตถุถึงฉากหรือจุดสังเกต มีระยะไกลมากๆ หรือมากพอ ที่จะถือว่าความโค้งของหน้าคลื่นตกกระทบและคลื่นเลี้ยวเบนมีค่ามากจนถือว่าเป็นคลื่นระนาบได้

2.1.2. การเลี้ยวเบนแบบเฟสเนล (Fresnel diffraction) ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อต้นกำเนิดแสงหรือจาก อยู่ใกล้กับวัตถุที่ทำให้เกิดการเลี้ยวเบน หรือทั้งแหล่งกำเนิดและจากอยู่ใกล้กับวัตถุนั้น จนทำให้ความโค้งของหน้าคลื่นเริ่มมีผลต่อลวดลายการเลี้ยวเบน ทำให้เมื่อเปลี่ยนตำแหน่งของต้นกำเนิดแสงหรือจากไปจากเดิมจะทำให้รูปแบบการเลี้ยวเบนที่ได้เปลี่ยนไปจากเดิม

การเลี้ยวเบนแบบเฟสเนล มีคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้องยุ่งยากกว่า การเลี้ยวเบนแบบฟรอนโฮเฟอร์มาก แต่ในทางปฏิบัติแล้วทำให้เกิดได้ง่ายกว่า เพราะต้องการเพียงจุดกำเนิดแสง วัตถุตัวอย่าง และ จาก ก็จัดให้เกิดลวดลายการเลี้ยวเบนได้ แต่ในกรณีของ การเลี้ยวเบนแบบฟรอนโฮเฟอร์ จำเป็นต้องใช้เลนส์หรืออุปกรณ์ทางแสงอื่นช่วย เพื่อสร้างคลื่นระนาบขึ้น

2.2 การเลี้ยวเบนแบบฟรอนโฮเฟอร์โดยสลิตเดี่ยว(Fraunhofer diffraction of a single slit)

สลิตเดี่ยว (single slit) เป็นช่องเปิด ขนาดเล็ก เมื่อนำสลิตเดี่ยวมาวางหน้าต้นกำเนิดแสงจะทำให้เกิดลวดลายการเลี้ยวเบนบนฉาก เราคาดคิดของการเกิดการเลี้ยวเบนดังกล่าวสามารถแสดงได้ในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงเส้นทางเดินของแสงเมื่อผ่านสลิตเดี่ยวและเลนส์นูน

สำหรับสลิตเดี่ยว ที่มีความกว้างเป็น b และมีแสงขนานมาตกกระทบบสลิตผ่านไปยังเลนส์นูน ความยาวโฟกัส f ทำให้เกิดรูปแบบการเลี้ยวเบนบนฉาก ให้ ds เป็นความกว้างของหน้าคลื่นในระนาบของสลิต และที่ระยะ s จากศูนย์กลาง O ซึ่งสมมติให้เป็นจุดกำเนิด คลื่นแสงที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดเมื่อผ่านสลิตแล้วตั้งฉากกับสลิตหรือทำมุม $\theta = 0$ จะไปโฟกัสที่จุด P_0 ส่วนที่ทำมุม θ ใด ๆ กับสลิตจะไปโฟกัสที่จุด P เมื่อพิจารณาหน้าคลื่นที่ออกมาจาก ds อัมปลิจูดจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับระยะ ds และเป็นสัดส่วนผกผันกับระยะ x ที่จุด P จะมีการรวมกันของ ds เล็ก ๆ แต่ละอันสำหรับหน้าคลื่นที่เป็นทรงกลม

การเลี้ยวเบนแบบฟรอนโฮเฟอร์ โดยสลิตเดี่ยว ดังแสดงในรูปที่ 2.3 เมื่อพิจารณาจุด P ใด ๆ บนฉากซึ่งแสงเลี้ยวเบนทำมุม θ จากเดิม

ถ้ากำหนดให้คลื่นมีสมการเป็น $y = a \sin(\omega t - kx)$ จะได้อัมปลิจูดของคลื่น ณ จุด P จากผลของการเลี้ยวเบนของแสงผ่านสลิตเดี่ยว มีสมการเป็น

$$y = \frac{ab}{x} \frac{\sin(\frac{1}{2} k b \sin \theta)}{\frac{1}{2} k b \sin \theta} \sin(\omega t - kx) \quad (2.1)$$

เมื่อ a คือค่าคงที่

b คือ ความกว้างของช่องสลิต

ซึ่งให้ความเข้มแสงมีค่าแปรผันตาม $\left(\frac{\sin \beta}{\beta}\right)^2$

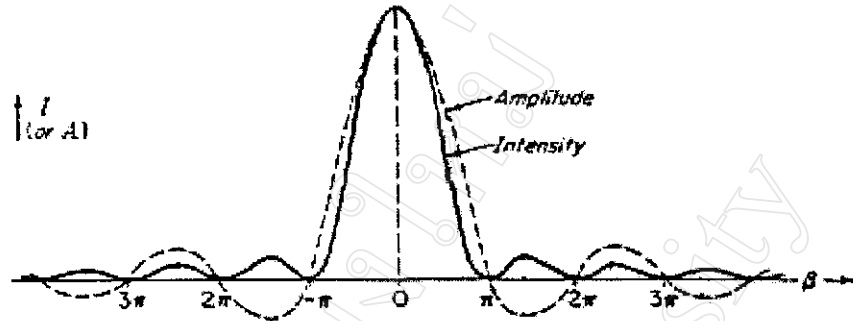
$$\text{ถ้าแทน อัมปลิจูด ที่ } P = A = A_0 \frac{\sin \beta}{\beta} \quad (2.2)$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } \beta &= \frac{1}{2} k b \sin \theta \\ &= \frac{\pi b}{\lambda} \sin \theta \end{aligned} \quad (2.3)$$

ในกรณีแสงตกกระทบบสลิตเดี่ยวทำมุมตกกระทบบ $= i$

$$\beta = \frac{\pi b (\sin i + \sin \theta)}{\lambda} \quad (2.4)$$

ความสัมพันธ์ของอัมปลิจูดและความเข้มแสงกับค่า β ได้ ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัมพลิจูด และ ความเข้มแสง กับ β

รูปที่ 2.2 แสดงการกระจายความเข้มของการเลี้ยวเบนแบบฟรอนโฮเฟอร์ของ สลิทเดี่ยว โดยที่ ณ $\beta = 0$ ค่า $I_p = I_0$ ให้ค่าความเข้มแสงสูงสุด กรณีอื่นๆเมื่อ $\sin\beta = 0$ โดยที่ $\beta \neq 0$ ความเข้มแสงที่ได้จะให้ค่าต่ำสุด

$$\frac{\sin \beta}{\beta} = 1 \text{ เมื่อ } \beta \text{ มีค่าน้อยๆ}$$

$$\text{สำหรับจุดมืด } \beta = \pm m\pi \quad \text{สำหรับ } m \text{ มีค่าเป็น } 1, 2, 3, \dots \quad (2.5)$$

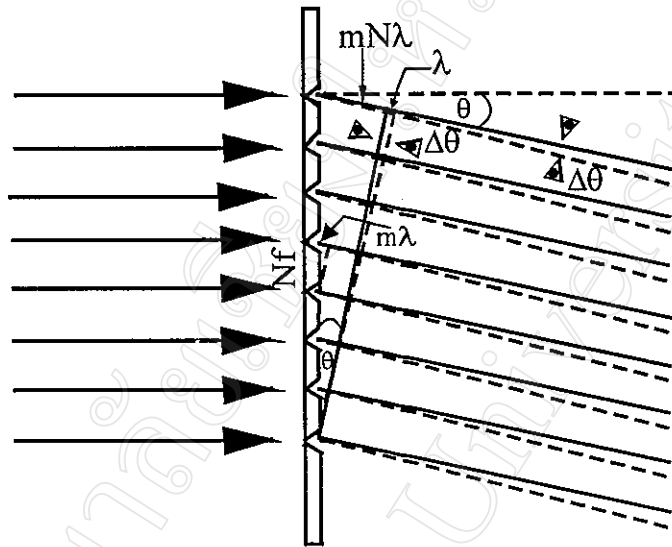
ดังนั้นในกรณี minima ได้

$$b \sin \theta = \pm m\lambda \quad (\text{minima}) \quad (2.6)$$

2.3 เกรตติงเลี้ยวเบน (Diffraction Grating) ⁽³⁾

เกรตติงเลี้ยวเบน ให้รูปแบบการเลี้ยวเบนที่มีพื้นฐานมาจากการแทรกสอดในลักษณะเดียวกันกับรูปแบบการแทรกสอดแบบ Young's double slit หรือเรียกว่าเป็นการเลี้ยวเบนผ่านช่องหลาย ๆ ช่อง ซึ่งนำพื้นฐานของการเลี้ยวเบนและการแทรกสอดของคลื่นแสงมาใช้ จึงสามารถอธิบายปรากฏการณ์ที่ได้จากการที่แสงผ่านเกรตติงและเกิดรูปแบบการเลี้ยวเบนขึ้น

2.3.1 สมการเกรตติง (The Grating Equation)



รูปที่ 2.3 ทางเดินของแสงที่ตกกระทบเกรตติง

ถ้าพิจารณารูปแบบการเลี้ยวเบนผ่านช่องแคบที่อยู่ขนานกันจำนวน N ช่องซึ่งแต่ละช่องมีระยะห่างกันเท่ากับ f ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ดังนั้นการหามุม θ ของลำแสงที่ผ่านช่องสลิตทั้งหลายที่เสริมกัน เมื่อระยะทางเดินแสงของช่องสลิตที่อยู่ติดกันมีค่าเป็นพหุคูณของความยาวคลื่น เท่ากับ $m\lambda$ เมื่อ m เป็นเลขจำนวนเต็ม หาได้จาก

$$\begin{aligned}\sin \theta &= \frac{mN\lambda}{Nf} \\ f \sin \theta &= m\lambda\end{aligned}\quad (2.7)$$

เมื่อ m เป็นเลขจำนวนเต็ม และ

d เป็นระยะห่างระหว่างช่อง

2.4 อำนาจการจำแนก (Resolving Power)

อำนาจการจำแนกของเกรตติง เป็นความสามารถของเกรตติงในการแยกเส้นสเปกตรัมที่มีค่าความยาวคลื่นใกล้เคียงกันมากๆ โดยวิเคราะห์จาก สมการ (2.7)

อัตราการเปลี่ยนแปลง ของ θ เมื่อเทียบกับ λ เขียนได้เป็น

$$f \cos \theta \, d\theta = m d\lambda$$

ดังนั้น

$$\frac{d\theta}{d\lambda} = \frac{m}{f \cos \theta} \quad (2.8)$$

ค่าของ $\frac{d\theta}{d\lambda}$ เรียกว่า Angular dispersion หรือ การกระจายสีเชิงมุมของเกรตติงซึ่งค่าการกระจายจะเพิ่มขึ้นตามลำดับของรูปแบบการเลี้ยวเบนที่เกิดขึ้น (ตามค่า m)

เมื่อพิจารณาสเปกตรัมที่มี 2 ความยาวคลื่น คือ λ และ $\lambda + \Delta\lambda$ ที่ทำมุมตกกระทบเท่ากัน จากข้อกำหนด ของ Rayleigh (ดูหัวข้อ 2.8) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} mN(\lambda + \Delta\lambda) &= mN\lambda + \lambda \\ \frac{\lambda}{\Delta\lambda} &= mN \end{aligned} \quad (2.9)$$

ซึ่งจะเรียก $\frac{\lambda}{\Delta\lambda}$ ว่า อำนาจการจำแนกของเกรตติง

จะเห็นว่า อำนาจการจำแนกของเกรตติง เป็นสัดส่วนกับ N (จำนวนร่องบนเกรตติง) และ ลำดับของรูปแบบการเลี้ยวเบน (m) ที่ใช้งาน เพราะฉะนั้น ถ้าจำนวนร่องของเกรตติงมีมากและเพิ่ม m ให้มากขึ้น เกรตติงจะมีอำนาจการจำแนกสูงขึ้น และที่ลำดับมากขึ้นเกรตติงก็จะแยกสเปกตรัมได้มาก โดยที่ขนาดของเกรตติงไม่มีผลต่อการแยกสเปกตรัม

2.5 ชนิดของเกรตติง⁽⁴⁾

สามารถพิจารณาความแตกต่างของเกรตติงและแบ่งประเภทของเกรตติงได้เป็น 3 กลุ่ม คือ เกรตติงแบบทะลุผ่าน (Transmission Grating) เกรตติงแบบสะท้อน (Reflective Grating) และเกรตติงแบบแบ่งหน้าคลื่น (Amplitude Grating)

2.5.1 เกรตติงแบบทะลุผ่าน เป็นเกรตติงที่ยอมให้แสงเดินทางผ่านเกรตติงไปด้านหลังได้ แล้วจึงทำการแยกสเปกตรัมออกมาได้อย่างชัดเจน

2.5.2 เกรตติงแบบสะท้อน เป็นเกรตติงที่ใช้วิธีแยกสเปกตรัมได้โดยใช้หลักการสะท้อนจากผิวด้านหน้าของเกรตติง ซึ่งทั้ง 2 แบบจะมีจำนวนร่องมากกว่า 1000 เส้น ต่อ มิลลิเมตร

2.5.3 เกรตติงแบบแบ่งหน้าคลื่น เป็นเกรตติงที่ใช้การแบ่งหน้าคลื่นในการแยกสเปกตรัม

2.6 ระยะห่างระหว่างร่องของเกรตติง (Groove Spacing)⁽⁵⁾

จากสมการของเกรตติง และอำนาจจำแนกของเกรตติง จะเห็นได้ว่าสมบัติของเกรตติง นั้นขึ้นกับจำนวนร่องของเกรตติง เมื่อให้ระยะห่างระหว่างร่องของเกรตติง คือ ความยาวช่วงที่ใช้ งานจริงบนแผ่นเกรตติง ซึ่งถูกจำกัดด้วยค่ามากที่สุดของจำนวนช่องบนเกรตติง และความหนาของ สารที่ฉาบผิวด้านหน้าเกรตติงซึ่งมีค่าต่ำสุดเท่ากับจำนวนช่องต่อมิลลิเมตร เกรตติงที่หนามากจะ สะท้อนได้ไม่ดีนัก ซึ่งรูปร่างของช่องบนเกรตติงจะมีหลายลักษณะต่าง ๆ กัน

เกรตติงที่มีระยะห่างระหว่างร่องแคบ จะต้องใช้ช่วงกว้างมากในการเลี้ยวเบนในแต่ละ ลำดับเพื่อที่จะให้เห็นสเปกตรัมแต่ละอันชัดเจน สำหรับ เกรตติงที่มีระยะห่างระหว่างร่อง กว้างก็ จะสามารถทำให้เห็นสเปกตรัมได้ที่มุมเล็กๆ (ช่วงแคบกว่า) เกรตติงที่มีระยะห่างระหว่างร่อง แคบกว่าก็จะมีประสิทธิภาพในการแยกสเปกตรัมเฉพาะแบบได้น้อย และกระจายสเปกตรัมแสง ที่มีความเข้มใกล้เคียง ๆ กันได้ตลอดความยาวคลื่น ส่วนเกรตติงที่มีระยะห่างระหว่างร่องกว้างมาก กว่า ก็จะสามารถใช้ประโยชน์ได้จำกัดเฉพาะบางช่วงเท่านั้น ทั้งนี้เพราะระยะห่างระหว่างร่องที่ กว้างมากจะเกิด ช่วงสเปกตรัมที่วัดไม่ได้มาก จึงกล่าวได้ว่าที่ระยะห่างระหว่างร่องแคบๆ จำเป็น ต้องใช้ในการแยกสเปกตรัมมากกว่า

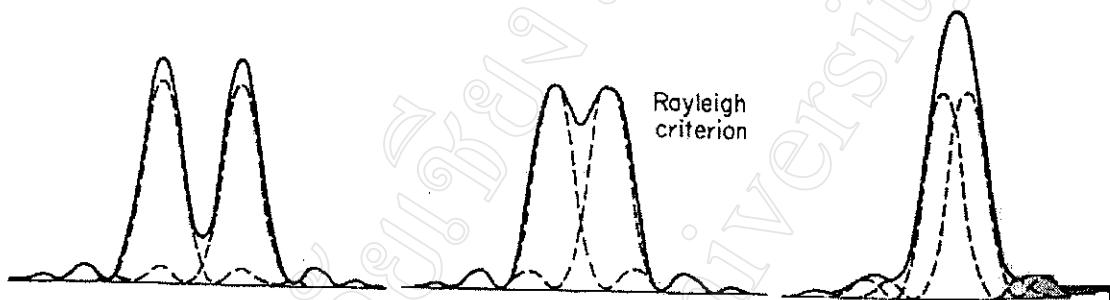
2.7 มุม Blaze

มุม Blaze คือ ประสิทธิภาพที่มากที่สุดที่เกรตติงสามารถทำงานได้เป็นค่าที่บอกถึง ปริมาณแสงมากเท่าไรที่จะสามารถผ่านเกรตติง และแยกสเปกตรัมออกเป็นค่าเฉพาะของแต่ละ ความยาวคลื่นเดียวกันๆ ซึ่งจะไม่ขึ้นกับการสะท้อนจากผิวของเกรตติงแต่อย่างใดแต่จะขึ้นกับรูป ร้างของช่องบนเกรตติง ในทางอุดมคติเชื่อว่า ถ้าผ่านแสงไปยังเกรตติงที่มีมุม Blaze จะทำให้ เกรตติงดูราวกับว่าเป็นกระจกราบ เกรตติงจะมีประสิทธิภาพมากที่สุดเมื่อใช้ที่มีมุม Blaze แต่หาก เป็นมุมอื่นที่ต่างไปก็จะทำให้อาจจะเกิดการแทรกสอดหรือเลี้ยวเบนอันเนื่องมาจากการชนขอบ ของช่องเกรตติง ทำให้สุดท้ายแล้วก็จะได้พื้นที่ใช้งานจริงน้อยลง อาจทำให้เกิดเห็นเป็นแถบ สเปกตรัมอื่นที่ไม่ต้องการได้

2.8 ข้อกำหนดของเรย์เล (Rayleigh's Criterion)⁽⁶⁾

จากหลักความจริงที่ว่า การเลี้ยวเบนจะเป็นตัวกำหนดกำลังในการแยกสเปกตรัมใน ระบบทัศนศาสตร์ ยกตัวอย่างเช่น การพิจารณาจากวัตถุที่มีขนาดเท่ากัน 2 ชิ้น เมื่อดูจากรูปแบบ การเลี้ยวเบน สังเกตเห็นว่าลักษณะของรูปแบบ แยกออกห่างกันแสดงให้เห็นว่าตำแหน่งของวัตถุ

ที่วางอยู่จริงทั้ง 2 ขึ้นก็จะอยู่ห่างกันด้วยเช่นกัน ถ้ารูปแบบการเลี้ยวเบน เริ่มขยับเข้าหากันโดยมีจุดยอดตรงกลางเกือบรวมกันสนิท แสดงว่าขณะนี้วัตถุทั้งสองสิ่งดังกล่าวตอนแรกนั้นกำลังจะซ้อนกันเป็นอันเดียว แต่ถ้าจุดยอดของวัตถุขึ้นที่ 1 และจุดต่ำสุดของขึ้น 2 ซ้อนทับกันพอดี จะแยกวัตถุทั้งสองได้พอดี หลักการนี้เรียกว่า "Rayleigh's criterion" ดังแสดงรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงให้เห็น ผลของ Rayleigh criterion

จากตารางที่ 2 แสดงค่าต่ำสุดของมุมที่ตกกระทบ ในรูปของรัศมี กำหนดโดยเลนส์และเส้นผ่านศูนย์กลาง D ที่ความยาวคลื่น λ คือ

$$\theta_{\min} \approx 1.22 \frac{\lambda}{D} \quad (2.10)$$

Minimum	Single slit,m	Circular aperture,J
First-order	1	1.220
Second-order	2	2.223
Third-order	3	3.238

ตารางที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุมตกกระทบ กับ สลิต

2.9 อิมเมจเซ็นเซอร์ (Image Sensor)

อิมเมจเซ็นเซอร์ เป็นสิ่งประดิษฐ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่ผลิตโดยอาศัย เทคโนโลยีของการผลิตวงจรรวมขนาดใหญ่ (VLSI) เป็นชนิดซิลิคอนเต็มตัว มีลักษณะแบน กะทัดรัด จากความก้าวหน้าทางฟิสิกส์และเทคโนโลยี ปัจจุบัน มีอิมเมจเซ็นเซอร์ชนิดต่าง ๆ มากมาย อิมเมจเซ็นเซอร์ที่เป็นที่รู้จักและใช้งานกันมากที่สุดในปัจจุบัน ได้แก่ชนิด CCD (charge-coupled device) ในที่นี้จะกล่าวถึงโครงสร้างและหลักการทำงานพื้นฐานของอิมเมจเซ็นเซอร์

ในอิมเมจเซ็นเซอร์หนึ่งตัวนั้นมีความสามารถในการเปลี่ยนแปลงสัญญาณแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า มีความสามารถในการเก็บสัญญาณ (storage) มีความสามารถในการทำสแกนนิ่ง และมีความสามารถในการส่งสัญญาณไฟฟ้าออกสู่ภายนอกในตัว⁽⁷⁾ จุดภาพ (picture element) แต่ละจุดในอิมเมจเซ็นเซอร์นั้นถูกกำหนดตำแหน่งตายตัว ดังนั้นอิมเมจเซ็นเซอร์จึงให้ภาพที่เหมือนของจริง มีความบิดเบี้ยวของภาพน้อยมาก

อิมเมจเซ็นเซอร์ถูกพัฒนาขึ้นเป็นครั้งแรกที่สถาบันวิจัยของบริษัทฟิลิปส์⁽⁸⁾ และที่สถาบันวิจัยของเบลล์⁽⁹⁾ อิมเมจเซ็นเซอร์มีน้ำหนักเบา ขนาดเล็ก ทนทานต่อการใช้งานในสภาพแวดล้อมต่างๆ ได้ดี เช่น ขณะมีการสั่นหรือชนต่อแรงกระแทก ใช้แรงดันไฟฟ้าต่ำ และกินกำลังไฟฟ้าต่ำ การพัฒนาและปรับปรุงคุณภาพของอิมเมจเซ็นเซอร์ดีขึ้นตามลำดับ⁽¹⁰⁻¹²⁾ และปัจจุบันสามารถถ่ายภาพได้ละเอียดและชัดเจนพอๆ กับหลอดถ่ายภาพอิมเมจชนิดสูญญากาศ

ถ้าจะแบ่งอิมเมจเซ็นเซอร์ออกตามชนิดของการจัดเรียงจุดภาพจะมี 2 ชนิดใหญ่ ๆ คือ ชนิดหนึ่งมิติและชนิดสองมิติ

2.9.1. อิมเมจเซ็นเซอร์ชนิดหนึ่งมิติ มีการใช้เป็นหัวถ่ายภาพของต้นฉบับในเครื่องส่งโทรสาร ใช้ในเครื่องอ่านกราฟฟิกและอ่านตัวอักษร และยังสามารถใช้เป็นเซ็นเซอร์ในงานตรวจสอบคุณภาพ เช่น วัดขนาด รูปร่าง ความหนา และตำแหน่งของวัตถุโดยไม่มีการสัมผัสและต้องโดยตรง

2.9.2 อิมเมจเซ็นเซอร์ชนิดสองมิติ มีการใช้งานมากที่สุดในกล้องถ่ายวีดีโอและยังสามารถใช้เป็นตาให้หุ่นยนต์ (robot) ใช้เป็นตัวตรวจสอบสินค้าในระบบการผลิตแทนตาของมนุษย์ได้ ใช้วัดขนาดรูปร่างและจดจำภาพของวัตถุต่าง ๆ ได้ด้วย

ปัญหาที่มักเกิดขึ้นกับอิมเมจเซ็นเซอร์ได้แก่ การเกิดบลูมมิง (blooming) และสเมียร์ (smear) การเกิดบลูมมิง ได้แก่การที่มีแสงสว่างจ้ามากๆ เกินขีดจำกัดวิ่งเข้าสู่หน้ากล้องเพียงจุดใดจุดหนึ่งจะทำให้ประจุสัญญาณที่เกิดขึ้นที่จุดภาพนั้น มีจำนวนมากเกินไปและประจุส่วนเกินเหล่านั้น จะไหลไปสู่จุดภาพที่อยู่ข้างเคียง ทำให้เกิดภาพที่มีขนาดใหญ่เกินความเป็นจริงและ

ภาพโดยรวมมีลักษณะเลือน ไม่ชัดเจน ส่วนการเกิดสเมียร์ ได้แก่การที่ประจุสัญญาณที่มีมากเกินไปนั้นไหลเข้าไปสู่บริเวณของการทำสแกนนิ่ง ทำให้เกิดเป็นภาพแถบสีขาว ๆ แต่อย่างไรก็ตาม ปัจจุบันได้มีความพยายามหาวิธีลด และป้องกันการเกิดข้อเสียเหล่านี้ ทั้งด้วยวิธีปรับปรุงโครงสร้างภายในและการออกแบบวงจรไฟฟ้ากำจัดข้อเสียดังกล่าว

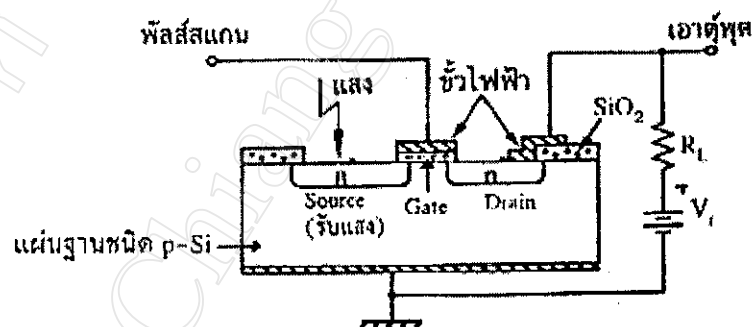
สิ่งประดิษฐ์ที่ใช้ในการแปลงสัญญาณแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าในอิมเมจเซ็นเซอร์นั้นมี 2 ชนิดใหญ่ ๆ คือ

ชนิดรอยต่อแบบ MOS (metal – oxide – semiconductor)

และ ชนิดรอยต่อแบบ p-n

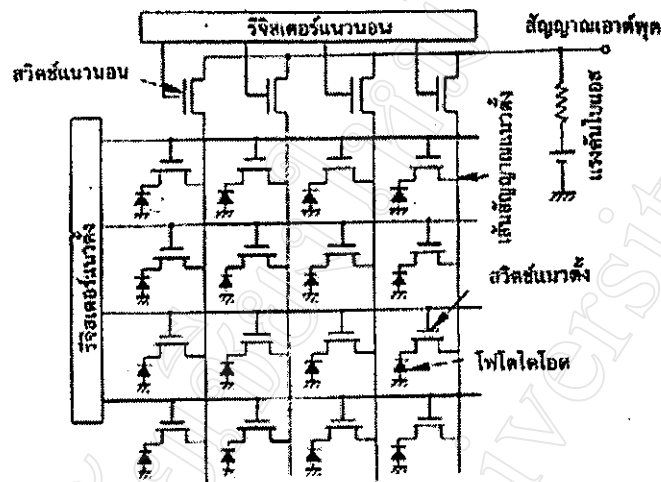
2.10 อิมเมจเซ็นเซอร์ ชนิด MOS

โครงสร้างพื้นฐานของอิมเมจเซ็นเซอร์ชนิด MOS ในสิ่งประดิษฐ์นี้มี MOS FET ที่มีชั้นแนลชนิด n อยู่บนแผ่นฐานผลึกซิลิคอนชนิด p ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ซึ่งรอยต่อ p-n ทำหน้าที่รับแสงและเก็บประจุไฟฟ้าไว้ชั่วคราว ขั้วเกต (gate) ถูกต่อเข้ากับสายสแกนนิ่งพัลส์และขั้วเดรน (drain) ถูกต่อไปสู่สายเอาต์พุต



รูปที่ 2.5 โครงสร้างภายในของอิมเมจเซ็นเซอร์ชนิด MOS

เมื่อมีแรงดันพัลส์บวกป้อนเข้าสู่เกตจะทำให้เกิดชั้นแนลชนิด n ขึ้นที่ใต้ขั้วเกต ประจุอิเล็กตรอนที่ขั้วเดรนจะค่อยๆ ไหลผ่านชั้นแนลไปสู่ขั้วซอร์ส และไหลจนกว่าศักย์ไฟฟ้าที่ซอร์สจะมีค่าเท่ากับที่เดรนขณะนั้นประจุอิเล็กตรอนถูกเก็บอยู่ที่รอยต่อที่เดรน หลังจากนั้นแรงดัน



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างโครงสร้างพื้นฐานของอิมเมจเซ็นเซอร์ชนิด MOS 2 มิติ

2.11 อิมเมจเซ็นเซอร์ชนิด CCD

อิมเมจเซ็นเซอร์ชนิด CCD ประกอบด้วยส่วนสำคัญใหญ่ ๆ 3 ส่วนคือ

- 2.11.1 ส่วนที่ไวต่อแสง(storage) ซึ่งอาจเป็นรอยต่อ p-n ของโฟโตไดโอดหรือรอยต่อของ MOS
- 2.11.2 ส่วนที่ทำหน้าที่ถ่ายโอนสัญญาณ (transfer) ซึ่งผลิตจากแอนะล็อกชิฟต์รีจิสเตอร์ (analog shift register)
- 2.11.3 วงจรสัญญาณเอาต์พุตทำให้ได้ค่าดิจิทัลสูงและไวต่อแสงคลีนล้น ดังนั้นจึงมีการใช้ชนิดรอยต่อ p-n กันมากที่สุด

ถ้าแบ่งอิมเมจเซ็นเซอร์ชนิด CCD ออกตามชนิดของการจัดเรียง (arrays) ของจุดภาพจะแบ่งได้เป็น 2 ชนิดคือ ชนิดหนึ่งมิติ และชนิดสองมิติ ในชนิดสองมิตียังแบ่งออกตามวิธีของการถ่ายโอน (transfer) ข้อมูลได้อีก 2 ชนิดคือ ชนิด Frame Transfer CCD (FT-CCD) และชนิด Inter Line Transfer CCD (IL-CCD)

CCD ชนิด 1 มิติ เป็นสิ่งประดิษฐ์แบบแอคทิฟ ที่ทำงานโดยอาศัยการใช้แรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดชั้นปลดปล่อย ซึ่งจะทำหน้าที่เปรียบเสมือนหลุมบ่อของศักย์ไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำ เพื่อเก็บพาหะ และอาศัยสัญญาณนาฬิกาพัลส์เพื่อช่วยให้บ่อศักย์ไฟฟ้าเหล่านี้เกิดการเคลื่อนย้ายตำแหน่งไปตามลำดับ ซึ่งจะทำให้เกิดการถ่ายโอนประจุไฟฟ้า

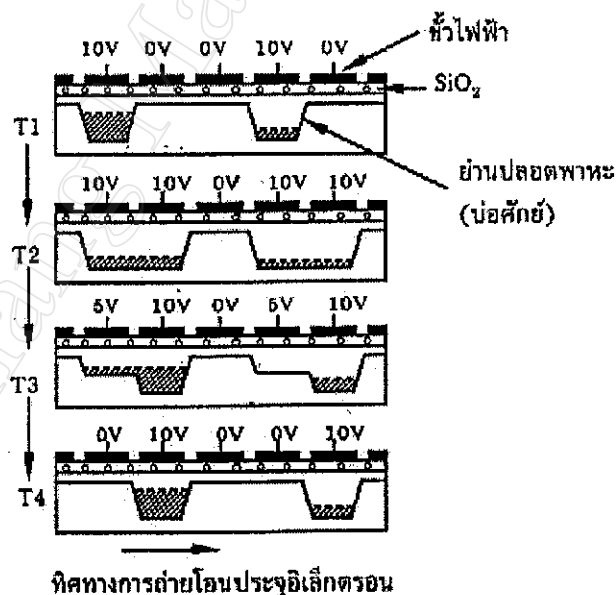
ในรูปที่ 2.8 แสดงหลักการถ่ายโอนประจุไฟฟ้าใน CCD บนแผ่นฐานสารกึ่งตัวนำมีชั้นฉนวนของ SiO_2 เคลือบอยู่ และมีขั้วถ่ายโอนจำนวนมากเคลือบอยู่ห่างกันเป็นระยะ ๆ ชั้นตอนการไหลถ่ายโอนประจุอิเล็กตรอนและการทำงานของ CCD อธิบายได้ดังนี้

ขั้นตอน T1 เมื่อป้อนแรงดันบวก (เช่น 10 V) เข้าสู่ขั้วถ่ายโอนจะทำให้เกิดบ่อศักย์ไฟฟ้าลึกลงไปที่ใต้ขั้วนั้น และเมื่อมีแสงอินพุตเข้ามากระทบ CCD จะทำให้เกิดพาหะโฟโตและพาหะโฟโตเหล่านี้ก็จะเก็บอยู่ในบ่อศักย์ไฟฟ้าลึก ๆ นั้น

ขั้นตอน T2 ใช้สัญญาณพัลส์ (เช่น 10 V) ป้อนไปที่ขั้วถ่ายโอนที่อยู่ข้าง ๆ จะทำให้บ่อกว้างขึ้นและอิเล็กตรอนก็จะไหลแผ่กว้างขึ้น

ขั้นตอน T3 ลดขนาดแรงดันที่ขั้วเดิมให้เหลือประมาณ 5V จะทำให้อิเล็กตรอนไหลลงไปสู่บ่อข้างเคียงที่มีแรงดัน 10V

ขั้นตอน T4 เมื่อตัดแรงดันที่ขั้วเดิมออกหมด จะทำให้อิเล็กตรอนทั้งหมดขยับไปอยู่ในบ่อข้างเคียง

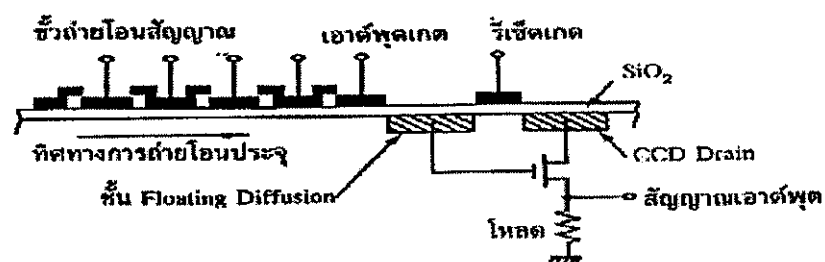


รูปที่ 2.8 แสดงหลักการถ่ายโอนประจุไฟฟ้าใน CCD

ด้วยวิธีดังกล่าวข้างต้นนี้และการใช้ทรานส์เฟอร์พอลส์ป้อนเข้าสู่ขั้วถ่ายโอนตามลำดับทีละขั้ว เช่น จากขั้วด้านซ้ายไปสู่ขั้วด้านขวา จะทำให้อิเล็กตรอนถูกเคลื่อนย้ายไปตามบ่อศักย์ไฟฟ้าใน CCD จากซ้ายไปขวาและในที่สุดอิเล็กตรอน(สัญญาณอิมเมจ)ก็จะไหลออกไปสู่วงจรภายนอกเป็นสัญญาณเอาต์พุตของอิมเมจได้ตามต้องการ

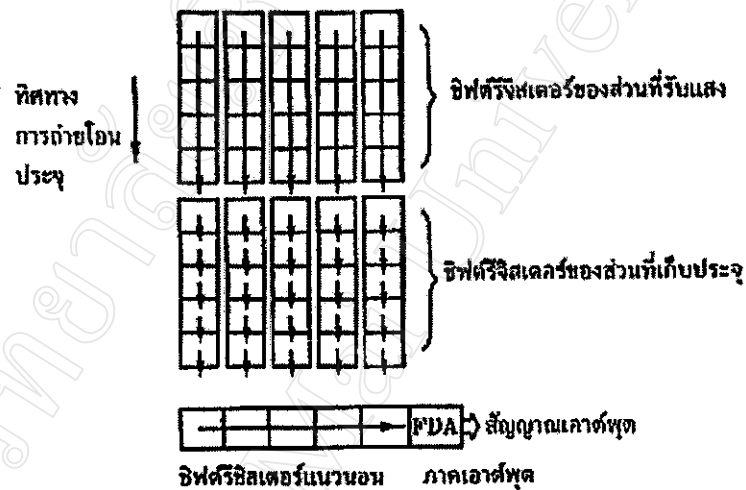
CCD มีโครงสร้างที่ง่าย แต่เนื่องจากในการทำงานนั้นจำเป็นจะต้องมีการถ่ายโอนประจุอิเล็กตรอนซึ่งเป็นปริมาณอะนาลอกให้ไหลไปตามแผ่นฐานสารกึ่งตัวนำ ดังนั้นความยากลำบากจึงอยู่ที่ว่าทำอย่างไรจึงจะสามารถถ่ายโอนอิเล็กตรอนได้สมบูรณ์ที่สุด เพื่อให้ประสิทธิภาพของการถ่ายโอนประจุดีที่สุด จึงได้มีการออกแบบให้ความยาวของขั้วถ่ายโอนมีขนาดสั้นที่สุดเพื่อให้พาหะข้างน้อยเสียเวลาวิ่งน้อยที่สุด และจำเป็นต้องออกแบบโครงสร้างของขั้วถ่ายโอนให้สนามไฟฟ้าจากขั้วข้างเคียงช่วยกันถ่ายโอนพาหะให้ได้ดีที่สุด ในส่วนที่ใช้รับแสงใน CCD นั้น ในอดีตเคยใช้โครงสร้าง MOS แต่ปัจจุบันนิยมใช้เป็นรอยต่อ p-n ของโฟโตไดโอด เพราะไวต่อแสงมากกว่าโดยเฉพาะอย่างยิ่งไวต่อแสงความยาวคลื่นสั้นๆ

ในส่วนของการตรวจวัดสัญญาณเอาต์พุต จาก CCD นิยมใช้วิธี Floating Diffusion Amplifier (FDA) ⁽¹³⁾ ดังแสดงในรูปที่ 2.9 เป็นวิธีที่ทำให้การวัดสัญญาณเอาต์พุตมีลักษณะแปรผันเชิงเส้น กับจำนวนของสัญญาณที่ไหลออกมา การเปิดรีเซ็ตเกต จะทำให้ศักย์ไฟฟ้าของชั้น FD (Floating Diffusion) มีค่าเท่ากับศักย์ไฟฟ้าของขั้วเดรนใน CCD ต่อจากนั้นถ้าปิดรีเซ็ตเกต และเปิดเอาต์พุตเกต จะทำให้ประจุสัญญาณไหลเข้าชั้น FD และศักย์ไฟฟ้าของ FD จะลดลง ปริมาณการลดลงของศักย์ไฟฟ้านี้ สามารถตรวจวัดได้ด้วย MOS ทรานซิสเตอร์ซึ่งต่อแบบซอร์สฟอลโลเวอร์ (source follower) และนี่ก็คือ เอาต์พุตของ CCD นั้นเอง วิธีการวัดเอาต์พุตด้วย FDA นี้ใช้ใน CCD มากที่สุด เพราะจะได้แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตสูงและมีสัญญาณรบกวนน้อย



รูปที่ 2.9 แสดงหลักการทำงานของ FDA (Floating Diffusion Amplifier)

CCD ชนิด 2 มิติ หลายชนิด และที่นิยมใช้คือ ชนิด FT-CCD และชนิด IL-CCD สำหรับ FT-CCD ประกอบด้วยส่วนรับแสง ส่วนเก็บประจุ และซีฟไตรจิสเตอร์แนวนอน ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ประจุที่เก็บอยู่ในส่วนรับแสงจะถ่ายโอนในแนวดิ่งลงสู่ส่วนเก็บประจุแบบเฟรมต่อเฟรม หลังจากนั้นประจุจะถูกส่งด้วยซีฟไตรจิสเตอร์แนวนอนที่ละบรรทัดให้ไหลออกไปสู่ส่วนเอาต์พุต วิธีการเช่นนี้ต้องมีส่วนเก็บประจุจำนวนเท่าๆ กับส่วนรับแสง จึงมีข้อเสียที่ทำให้ CCD มีขนาดใหญ่ แต่ด้านโครงสร้างนั้นไม่ซับซ้อน จึงผลิตให้มีคุณภาพจำนวนมากๆ ได้ง่าย



รูปที่ 2.10 โครงสร้างของ FT-CCD (Frame-Transfer CCD)

IL-CCD ประกอบด้วยส่วนรับแสง และซีฟไตรจิสเตอร์แนวตั้ง โดยมีสวิตช์ FET คั่นอยู่ เนื่องจากไม่จำเป็นต้องมีส่วนเก็บประจุจึงทำให้ CCD มีขนาดเล็ก แต่โครงสร้างภายในซับซ้อนมากขึ้น

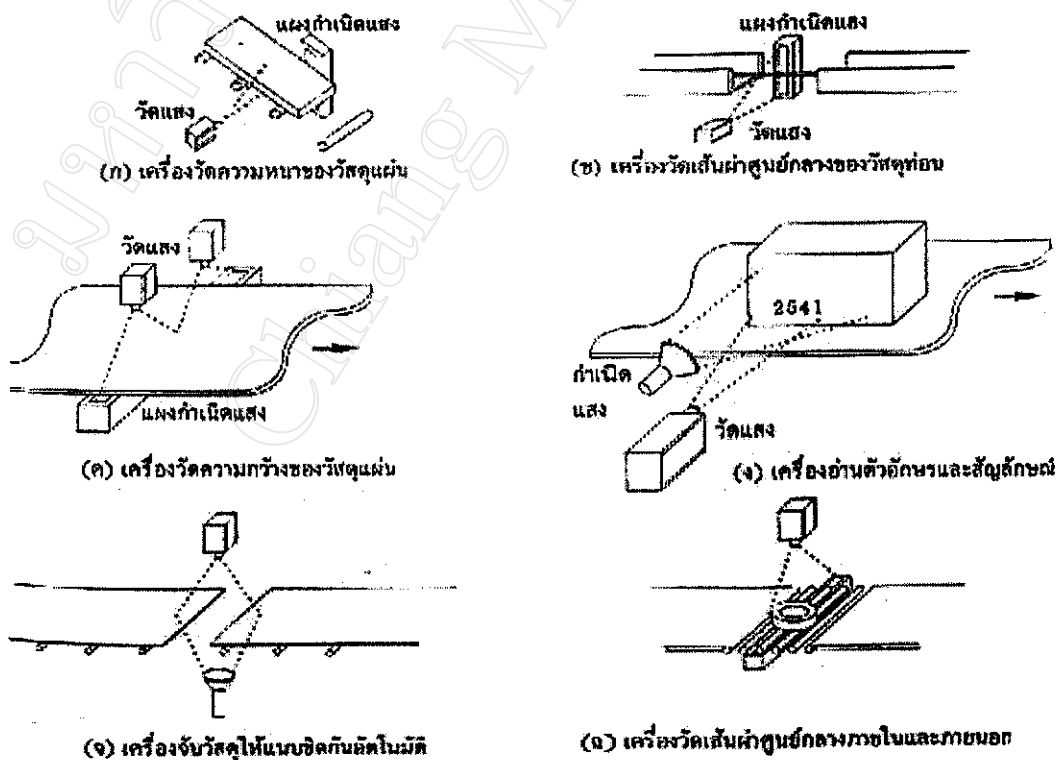
รูปที่ 2.11 และ 2.12 แสดงโครงสร้างและภาพตัดขวางของ IL-CCD ตามลำดับ โครงสร้างที่แสดงในรูปที่ 2.12 นี้เรียกว่า โครงสร้างแบบโอเวอร์โฟลว์ตามแนวตั้ง มีลักษณะเด่น คือ มีการสร้างบ่อสำหรับดูดกลืนพาหะ (p-well) ที่มีจำนวนมากเกินความจำเป็นให้หมดไป เช่น ตอนถูกแสงจ้ามาก ทำให้ลดการเกิดบวมมิง และสเปียร์ได้

[illegible]

ปัจจุบันมีการนำ CCD ไปใช้งานอย่างกว้างขวาง ไม่เพียงแต่การใช้งานเป็นกล้องถ่ายภาพ สัญญาณวิดีโอเท่านั้น แต่สามารถใช้ในการตรวจสอบคุณภาพต่าง ๆ ได้อีกด้วย ตารางที่ 3 แสดงตัวอย่างการประยุกต์ใช้งาน CCD ในงานวัดต่าง ๆ และรูปที่ 2.13 แสดงตัวอย่างการใช้งานอิมเมจเซ็นเซอร์ในงานอุตสาหกรรมวัดคุณสมบัติต่าง ๆ

ชนิด	การใช้งาน	
Area Image Sensor	กล้องถ่ายภาพทัศนียภาพ กล้องถ่ายภาพวิดีโอ กล้องตรวจจับขโมย	
Linear Image Sensor	เครื่องวัดขนาด วัดขนาด วัดตำแหน่ง วัดระยะทาง	-ตรวจแปล ความสกปรก -ควบคุมขนาดการผลิตแผ่นเหล็ก -วัดเส้นผ่านศูนย์กลาง -วัดรูปร่างวัสดุ -วัดระดับความสูงของของเหลว -ตรวจตำแหน่งรูเจาะ -ปรับโฟกัสอัตโนมัติในกล้องถ่ายรูป

ตารางที่ 3 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานอิมเมจเซ็นเซอร์ชนิด CCD



รูปที่ 2.13 ตัวอย่างการใช้งานอิมเมจเซ็นเซอร์ในงานอุตสาหกรรมวัดคุมอัตโนมัติต่าง ๆ