

บทที่ 1

บทนำ

ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

เมื่อช่วงต้นปี พ.ศ. 2562 ที่ผ่านมาสถานการณ์ฝุ่นละอองหรือ Particulate Matter เกินค่ามาตรฐานได้แผ่กระจายไปทั่วพื้นที่ของอากาศที่ปกคลุมในประเทศไทยโดยเฉพาะกรุงเทพมหานคร ซึ่งฝุ่นละอองที่กระจายอยู่ในอากาศเป็นทั้งของแข็งและของเหลวมีหลายขนาดตั้งแต่ฝุ่นละอองขนาดใหญ่ไม่เกิน 100 ไมครอน ฝุ่นหยาบขนาดไม่เกิน 10 ไมครอน ฝุ่นละเอียดขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอน และฝุ่นละเอียดขนาดเล็กมีขนาดไม่เกิน 0.1 ไมครอน ฝุ่นละอองที่กำลังแผ่กระจายและสร้างมลพิษทางอากาศคือฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอน สามารถเข้าสู่ปอดและกระแสเลือดได้ง่ายและเป็นอันตรายต่อระบบทางเดินหายใจและปัญหาในระยะยาวต่อสุขภาพ โดยฝุ่นละอองที่แผ่กระจายทั่วกรุงเทพมหานครมีสาเหตุหลักมาจากพื้นที่กรุงเทพมหานครเป็นพื้นที่ที่มีการคมนาคมหนาแน่นและการก่อสร้างทางอุตสาหกรรมจึงทำให้พื้นที่ในบริเวณของกรุงเทพมหานครได้รับผลกระทบจากการแผ่กระจายของฝุ่นละอองขนาดเล็ก ส่งผลกระทบไปทั่วทุกพื้นที่และก่อให้เกิดปัญหาทั้งทางด้านสุขภาพและทางด้านทัศนพิสัยในการมองเห็นและปัญหาที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้คือลักษณะการเคลื่อนที่ของลมมีพัดผ่านไปทางพื้นที่ต่างๆและเมื่อไม่มีลมพัดจะทำให้สภาพอากาศนิ่งหรือสภาพอากาศปิดจะทำให้มีการสะสมของฝุ่นละอองขนาดเล็กมากยิ่งขึ้นเมื่อไม่มีการถ่ายเทของลมและเนื่องจากมลพิษฝุ่นละอองเกินค่ามาตรฐานนั้นได้แผ่กระจายไปทั่วประเทศลมที่พัดมาแทนที่หรือลมที่พัดออกจากพื้นที่ของกรุงเทพมหานครก็จะเป็นที่มีฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM 2.5 อยู่และจึงทำให้มีการสะสมของฝุ่นละอองมากยิ่งขึ้นโดยเฉพาะกรุงเทพมหานครที่ไม่สามารถถ่ายเทอากาศออกไปได้เนื่องจากตึกที่มากและความสูงของตึกก็เป็นปัญหาหนึ่งที่ไม่สามารถที่จะหลีกเลี่ยงได้จึงทำให้สภาพอากาศของกรุงเทพมหานครรุนแรงเพิ่มมากขึ้นอีกหลายเท่า

เนื่องจากมลพิษทางอากาศที่มีความรุนแรงเพิ่มมากขึ้นผู้วิจัยจึงเล็งเห็นว่าปัญหาดังกล่าวไม่สามารถที่จะหลีกเลี่ยงและไม่สามารถยับยั้งการเกิดของฝุ่นละอองขนาดเล็กได้ ในขณะที่ปัจจุบันยังไม่มีมาตรการแก้ไขปัญหาด้านการคมนาคมและปัญหาการเผาไหม้ แต่ปัญหาดังกล่าวสามารถรับรู้ถึงความรุนแรงของมลพิษทางอากาศในเบื้องต้นโดยการตรวจสอบข้อมูลค่าฝุ่นละอองเกินค่ามาตรฐาน ได้ด้วยเครื่องวัดคุณภาพอากาศ โดยระบบการทำงานของวัดคุณภาพมีตั้งแต่การวัดด้วยเครื่องวัดคุณภาพอากาศแบบอินฟราเรดทำงานโดยให้อากาศไหลผ่านท่อที่มีปลายด้านหนึ่งเป็นแหล่งกำเนิดแสงอินฟราเรด ปลายอีกด้านหนึ่งเป็นเซ็นเซอร์ เมื่อฝุ่นเคลื่อนผ่านลำแสงก็จะปิดกั้นแสงตรงนั้นๆให้จางลง ตัวเซ็นเซอร์ก็จะตรวจพบการจางลงของแสง ณ ฉากรับ ทำให้นับจำนวนจุดที่แสงจางลงได้ว่าเป็นปริมาณฝุ่นเท่าใด เครื่องวัดคุณภาพอากาศแบบอินฟราเรดไม่สามารถแยกความ

แตกต่างระหว่าง PM 2.5 กับ PM 10 ถ้าฝุ่นละอองทั้งสองชนิดนี้อยู่ติดกัน และแบบที่ใช้กันอย่างแพร่หลายคือแบบ Beta Attenuation Mass Monitoring ทำงานโดยให้อากาศไหลผ่านแผ่นกรองฝุ่นที่ติดมากับอากาศก็จะถูกแผ่นกรองจับเอาไว้ จากนั้นก็ฉายรังสีเบตาไปที่แผ่นกรอง ฝุ่น PM 10 หรือ PM 2.5 โดยที่แผ่นกรองจะดูดซับรังสีเบตาไว้ทำให้เครื่องอ่านอีกด้านหนึ่งของแผ่นกรองรับรู้ได้ จากนั้นก็ใช้ระบบคำนวณปริมาณฝุ่นออกมา และแบบสุดท้ายคือแบบแสงเลเซอร์ทำงานโดยให้อากาศไหลผ่านท่อที่กำหนดปริมาณอากาศโดยพัลลมดูดจากปลายอีกด้าน แล้วยิงแสงเลเซอร์ในแนวตั้งฉาก จากนั้นจึงทำการตรวจวัดความเข้มของแสง (Photometer) และจะตรวจจับการกระเจิงแสง ดังนั้นผู้วิจัยจึงคิดค้นที่จะทำเครื่องวัดคุณภาพอากาศโดยใช้หลักการกระเจิงของแสง (Light scattering) เมื่ออากาศที่มีฝุ่นละอองผ่านเข้าไปในเครื่องกระทบกับแสงที่ถูกยิงจากเซนเซอร์จะเกิดการหักเหไปกระทบกับไดโอดและจะแปลงไปเป็นค่าทางไฟฟ้าซึ่งจะถูกคำนวณเป็นค่าความเข้มข้นของฝุ่น ณ เวลานั้น

จากที่กล่าวข้างต้นทั้งหมดผู้วิจัยจึงได้คิดและประดิษฐ์เครื่องวัดคุณภาพอากาศขนาดไม่เกิน 10 ไมครอน โดยใช้หลักการแบบแสงเลเซอร์เพื่อที่สามารถเลือกระบบของเซนเซอร์ในการศึกษาการกระเจิงของอนุภาคระดับไมครอน

จุดมุ่งหมายของงานวิจัย

1. ศึกษาการกระเจิงของอนุภาคในระดับไมครอน โดยใช้คุณสมบัติการกระเจิงของแสง
2. ศึกษาการกระเจิงของอนุภาคในระดับไมครอนที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความชื้น
3. ศึกษาการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์

ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาการแผ่กระจายระดับไมครอนของอนุภาคฝุ่น PM 10 และ PM2.5 รอบบริเวณพื้นที่มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
2. ศึกษาการแผ่กระจายระดับไมครอนของอนุภาคฝุ่น PM 10 และ PM2.5 รอบบริเวณถนนสี่แยกกิโลถึงถนนสี่แยกดินแดง
3. ศึกษาการแผ่กระจายระดับไมครอนของอนุภาคฝุ่น PM 10 และ PM2.5 ที่สถานีรถไฟฟ้า BTS ระหว่างสถานีหมอชิตถึงสถานีสยาม

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของจำนวนอนุภาคฝุ่นระดับไมครอนที่ความแตกต่างของอุณหภูมิและความชื้น
2. ได้ทราบการทำงานร่วมกันของไมโครคอนโทรลเลอร์และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

บทที่ 2

ทฤษฎีและเอกสารที่เกี่ยวข้อง

สำหรับการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องได้นำเสนอเป็นหัวข้อต่อไปนี้

1. อนุภาคฝุ่นละออง
2. ทฤษฎีของเลเซอร์
3. การกระเจิง
4. อุปกรณ์ตัวรับแสง
5. ระบบการทำงานของเซ็นเซอร์
6. ความรู้พื้นฐานของโปรแกรม Arduino

ฝุ่นละออง (Particulate Matter)

1.1 ความรู้ทั่วไปของฝุ่นละออง

ฝุ่นละอองหมายถึงอนุภาคของแข็งและหยดละอองของเหลวที่แขวนลอยกระจายในอากาศ อนุภาคที่แขวนลอยอยู่ในอากาศบางชนิดมีขนาดใหญ่และสีดำมองเห็นเป็นเขม่าและควันแต่บางชนิดมีขนาดเล็กมากจนมองไม่เห็นด้วยตาเปล่าฝุ่นละอองที่แขวนลอยในบรรยากาศโดยทั่วไปมีขนาดตั้งแต่ 100 ไมครอนลงมาและก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของคน สัตว์ พืช เกิดความเสียหายต่ออาคารบ้านเรือนทำให้เกิดความเดือดร้อนรำคาญต่อประชาชน บดบังทัศนวิสัยทำให้เกิดอุปสรรคในการคมนาคมขนส่ง นานาประเทศจึงได้มีการกำหนดมาตรฐานฝุ่นละอองในบรรยากาศขึ้นสำหรับในประเทศสหรัฐอเมริกาโดยUS.EPA(United State Environmental Protection Agency)ได้มีการกำหนดค่ามาตรฐานของฝุ่นรวม (Total Suspended Particulate) และฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า10 ไมครอน (PM10) แต่เนื่องจากการศึกษาวิจัยพบว่าฝุ่นขนาดเล็กนั้น จะเป็นอันตรายต่อสุขภาพมากกว่าฝุ่นรวม เนื่องจากสามารถผ่านเข้าไปในระบบทางเดินหายใจส่วนล่างและมีผลต่อสุขภาพมากกว่าฝุ่นรวมดังนั้น US.EPA จึงได้มีการยกเลิกค่ามาตรฐานฝุ่นรวมและกำหนดค่าฝุ่นขนาดเล็กเป็น 2 ชนิด คือ ฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอน (PM10) และฝุ่นละอองที่มีขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอน (PM2.5)

PM10 ตามคำจำกัดความของ US.EPA หมายถึง ฝุ่นหยาบ (Course Particle) เป็นอนุภาคที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5-10 ไมครอนมีแหล่งกำเนิดจากการจราจรบนถนนที่ไม่ได้ลาดยางจากการขนส่งวัสดุฝุ่นจากกิจกรรมบด ย่อย หิน

PM2.5 ตามคำจำกัดความของ US.EPA หมายถึงฝุ่นละเอียด (Fine Particle) เป็นอนุภาคที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กกว่า 2.5 ไมครอนฝุ่นละเอียดมีแหล่งกำเนิดจากควันเสียของรถยนต์ โรงไฟฟ้า โรงงานอุตสาหกรรม

ควันที่เกิดจากหุงต้มอาหารโดยใช้ฟืน นอกจากนี้ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) และสารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) จะทำปฏิกิริยากับสารอื่นในอากาศทำให้เกิดเป็นฝุ่นละอองได้

ในประเทศไทยได้มีการให้ความหมายของคำว่าฝุ่นละออง หมายถึงฝุ่นละอองรวม (Total Suspended Particulate :TSP) ซึ่งเป็นฝุ่นขนาดใหญ่ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 100 ไมครอนลงมาส่วนฝุ่นขนาดเล็ก (PM10) (นพภาพรและคณะ,2547)

1.2 การจำแนกของฝุ่นละออง

การจำแนกฝุ่นละอองจะจำแนกตามรูปร่าง ส่วนประกอบ และขนาด ในการจำแนกตามขนาดซึ่งจะสมมติให้อนุภาคเป็นทรงกลม สามารถจำแนกออกได้เป็น 3 ประเภท คือ ฝุ่นละอองแบบหยาบ (Coarse) ฝุ่นละอองแบบละเอียด (Fine) และฝุ่นละอองแบบละเอียดมาก (Ultrafine) ขนาดของฝุ่นละอองทั้งสามประเภท จะมีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วงน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.01 ถึง 1 μm

ฝุ่นละอองแบบหยาบ (Coarse mode, $\geq 1\mu\text{m}$) จะประกอบไปด้วย เถ้าละอองแร่ เถ้าภูเขาไฟ และ เถ้าลอย (fly ash) ซึ่งเป็นผลมาจากกระบวนการทางกายภาพจำนวนของอนุภาคต่อปริมาตรมีค่าน้อย (Seinfeld and Pandis 1998) มีช่วงอายุที่สั้นเนื่องจากอัตราการตกตะกอนจาก dry deposition สูง แต่มีความสำคัญต่อคุณสมบัติทางแสงเนื่องจากอนุภาคมีขนาดใหญ่

ฝุ่นละอองแบบละเอียดสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทดังนี้

- Accumulation mode (0.1-1 μm) เกิดจากกระบวนการจับตัวกันเป็นก้อนของอนุภาคเล็กๆ และจากกระบวนการควบแน่นของก๊าซบนอนุภาค เนื่องจากมีองค์ประกอบทางเคมี จึงทำให้เกิดกระบวนการออกซิเดชัน จำนวนความหนาแน่นต่อหน่วยอนุภาคของฝุ่นละอองแบบนี้มีมากกว่าฝุ่นละอองแบบหยาบ และช่วงเวลาที่อยู่ในบรรยากาศยาวนานประมาณ 1 สัปดาห์ wet deposition มีอิทธิพลต่อความหนาแน่นของฝุ่นละอองแบบนี้

- Nucleation mode (0.01–0.1 μm) เกิดจากการควบแน่นของไอน้ำอิ่มตัวจากการเผาไหม้ และการจับตัวกันเป็นก้อนของอนุภาคเล็กๆ โดยอนุภาคฝุ่นละอองเล็กๆเหล่านี้เกิดจากกระบวนการเปลี่ยนแปลงจากก๊าซไปเป็นอนุภาคในบรรยากาศ โดยส่วนใหญ่อนุภาคจะประกอบด้วย สารประกอบกำมะถันที่เกิดจากการออกซิเดชันของกำมะถันเป็นสารตั้งต้น ได้แก่ SO₂, H₂S, CS₂, COS, CH₃SC₂H₃ และ CH₃SSCH₃ การเผาไหม้จากเครื่องยนต์เป็นแหล่งกำเนิดหลักของฝุ่นละอองแบบนี้ ถึงแม้ว่าจะมีจำนวนความหนาแน่นต่อหน่วยอนุภาคสูง แต่มวลโดยรวมมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับฝุ่นละอองแบบอื่นๆ อนุภาคนี้มีการเคลื่อนที่แบบบราวเนียนมีอัตราการชนกันของอนุภาคค่อนข้างสูง เมื่อมีการจับตัวกันเป็นก้อนขนาดใหญ่ขึ้นจะกลายเป็นฝุ่นละอองแบบหยาบ

ฝุ่นละอองแบบละเอียดมาก ($\leq 0.01 \mu m$) เกิดขึ้นจากกระบวนการ nucleation ของก๊าซ เช่น ฝุ่นละอองของกรดซัลฟูริกเป็นฝุ่นละอองขนาดเล็กแต่จำนวนความหนาแน่นต่อหน่วยอนุภาคสูง โดยฝุ่นละอองแบบนี้จะทำหน้าที่เป็นแกนกลางในก่อตัวเป็นอนุภาค ที่มีขนาดใหญ่ การก่อตัวจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจากกระบวนการเปลี่ยนแปลงจากก๊าซไปเป็นอนุภาค และกระบวนการจับตัวกันเป็นก้อน ฝุ่นละอองแบบนี้มีช่วงเวลาที่อยู่ในบรรยากาศสั้นกว่าอนุภาคแบบอื่น ดังนั้นเราจะพบเห็นอนุภา ฝุ่นละอองแบบนี้เหล่านี้ไ้ใกล้ๆ กับแหล่งกำเนิดเท่านั้น ถึงแม้ว่าฝุ่นละอองที่มีแหล่งกำเนิดเดียวกันแต่จะมีขนาดไม่เท่ากัน ในอดีตที่ผ่านมาได้มีการศึกษาการแจกแจงขนาดของฝุ่นละออง (Size distribution) และได้มีการเสนอสมการการแจกแจงขึ้นมาหลายแบบโดยสมการการแจกแจงที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางได้แก่ การแจกแจงแบบ log-normal

$$f(r)dr = \frac{C}{\sqrt{2\pi \ln^2 \sigma_g}} \left\{ \frac{-\ln(r/r_g)}{2 \ln^2 \sigma_g} \right\} dr$$

เมื่อ $f(r)dr$ เป็นความน่าจะเป็นที่จะพบอนุภาคของฝุ่นละอองที่มีรัศมีอยู่ในช่วง r ถึง $r+dr$

r เป็นรัศมีของอนุภาคของฝุ่นละออง

C เป็นจำนวนอนุภาคทั้งหมด

r_g เป็นค่าเฉลี่ยรัศมีเชิงเรขาคณิต

σ_g เป็นค่ามาตรฐานเชิงเรขาคณิต

ค่า r_g หาได้จากสมการ

$$\bar{x} = \ln r_g$$

เมื่อ \bar{x} เป็นค่าเฉลี่ยของรัศมีอนุภาค

และค่า σ หาได้จากสมการ

$$\sigma = \ln \sigma_g$$

เมื่อ σ เป็นความเบี่ยงเบนมาตรฐาน

1.3 การเกิดของฝุ่นละออง

สามารถแบ่งการเกิดฝุ่นละอองได้ดังนี้

1.3.1 ฝุ่นละอองที่เกิดในทะเล (sea-salt aerosol)

ฝุ่นละอองที่เกิดขึ้นในทะเลจะเป็นฝุ่นละอองเกลือ (sea-salt aerosol) ซึ่งเกิดจากการแตกของฟองอากาศที่ผิวทะเลฟองเหล่านี้อาจเกิดขึ้นจากกระบวนการทางชีววิทยาปฏิกิริยาทางเคมี หรือการกระเพื่อมของน้ำทะเลเนื่องจากลมถ้าความเร็วลมมีค่ามากกว่า 3m/s จะทำให้สันคลื่นแตกกระจายเป็นฝอยและเกิดฟองอากาศขึ้น โดย

ขนาดของฟองอากาศมีค่าตั้งแต่ $2-3\ \mu\text{m}$ จนถึง 10mm ฟองเหล่านี้จะมีผิวเป็นแผ่นบางๆของน้ำทะเลซึ่งเมื่อแตกออกก็จะเกิดเป็นหยดน้ำเล็กๆ (droplet) จำนวนมาก และถูกกระแสลมพัดฟุ้งกระจายไปในอากาศหยดน้ำเหล่านี้จะมีการระเหยกลายเป็นไอและอนุภาคของเกลือฟุ้งกระจายอยู่ในอากาศโดยมี ขนาดตั้งแต่ $0.25-2\ \mu\text{m}$

1.3.2 ฝุ่นละอองที่เกิดจากการเปลี่ยนจากแก๊สไปเป็นอนุภาค (gas-to-particles)

เป็นฝุ่นละอองแบบละเอียด (Fine particles) ที่พบอยู่เหนือน้ำทะเลส่วนใหญ่เป็นกรดซัลเฟตประมาณ 40% และ ammonium neutralized sulphate ประมาณ 60% ซัลเฟตไดออกไซด์ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดของกรดซัลเฟตจะพบในบรรยากาศเหนือพื้นดินที่ปลดปล่อยมาจากโรงงานอุตสาหกรรม แต่อย่างไรก็ตามมีการค้นพบสารดังกล่าวมาจากแหล่งตื้นในน้ำทะเล ฝุ่นละอองที่เกิดจากกระบวนการดังกล่าวจะมีขนาดเล็ก เพราะเกิดจากปฏิกิริยาเคมีที่เปลี่ยนแปลงจากสารเดิมที่มีสภาพเป็นแก๊สและเกิดสารใหม่ที่มีสภาพเป็น ของเหลว

1.3.3 ฝุ่นละอองที่มีแหล่งกำเนิดจากเปลือกโลก

ฝุ่นละอองชนิดนี้มีกระบวนการเกิดจากแรงทางกลศาสตร์เป็นหลัก โดยทั่วไปจะเกิดจากการสึกกร่อนของดิน หิน หรือของแข็งอื่นๆ อันเนื่องมาจากแรงลม โดยลมจะทำให้อนุภาคของแข็งหลุดออกมาจากวัตถุและฟุ้งกระจายไปตามทิศทางที่ลมของกระแสลมซึ่งอนุภาคของฝุ่นละอองจะมีรูปร่างไม่สม่ำเสมอ (Irregular sharp) และเป็นอนุภาคแบบหยาบ (coarse particles) ซึ่งมีอนุภาคตั้งแต่ $40-10\ \mu\text{m}$

1.3.4 ฝุ่นละอองที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์

เป็นฝุ่นละอองที่เกิดจากโรงงานอุตสาหกรรมจากกระบวนการในโรงงานอุตสาหกรรมและยานพาหนะต่างๆ ซึ่งส่วนใหญ่จะเกิดจากกระบวนการเผาไหม้ ของเครื่องยนต์ต่างๆ มีทั้งอนุภาคแบบละเอียดและแบบหยาบ เช่น เขม่าและควันไฟ เป็นต้น บางครั้งอาจจะอยู่ในรูปของของเหลวหรือของผสมระหว่างของเหลวและ ของแข็งมีการกระจายอยู่หนาแน่นในย่านอุตสาหกรรมและชุมชนเมือง

1.4 วิวัฒนาการของฝุ่นละออง (Aerosol evolution)

เมื่อฝุ่นละอองฟุ้งกระจายจากแหล่งกำเนิดขึ้นสู่บรรยากาศโดยทั่วไปจะมีการเปลี่ยนแปลงขนาดรูปร่าง และจำนวนอนุภาค ซึ่งบางครั้งมีการเปลี่ยนแปลงเคมีด้วยซึ่งสามารถจำแนกได้ดังนี้

1.4.1 การจับก้อน (coagulation) เป็นกระบวนการที่อนุภาคของฝุ่นละอองซึ่งมีการเคลื่อนที่แบบบราวเนียน (Brownian motion) มาชนกันและเชื่อมติดกันเป็นอนุภาคเดียว กระบวนการนี้จะทำให้อนุภาคขนาดเล็กลดจำนวนลงและอนุภาคขนาดใหญ่มีจำนวนเพิ่มขึ้น โดยทั่วไปกระบวนการเชื่อมติดกันนี้จะเกิดขึ้นจากอนุภาคขนาดเล็กเท่านั้น

1.4.2 การกลั่นตัวของไอที่สารไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous condensation)

ไอสารดังกล่าวอาจเป็นไอน้ำหรือไอของสารอื่นๆ ซึ่งกระบวนการนี้เกิดได้จากสารในบรรยากาศบนอนุภาคของฝุ่นละอองที่เป็นของแข็งกลั่นตัวทำให้อนุภาคของแข็งขนาดใหญ่ขึ้น โดยจะเกิดขึ้นจนกระทั่งถึงจุดสมดุล กล่าวคือ เมื่อถึงจุดสมดุลอัตราการกลั่นตัวจะเท่ากับอัตราการระเหยโดยทั่วไปอัตราการโตขึ้นของอนุภาคของแข็งเนื่องจากการกลั่นตัวจะถูกควบคุมด้วยอัตราการชนระหว่างอนุภาคของไอกับอนุภาคของแข็งโดยอัตราดังกล่าวจะแปรตามพื้นที่ผิวยังผล (Effective surface) ของอนุภาคของแข็งซึ่งหาได้จากสมการ

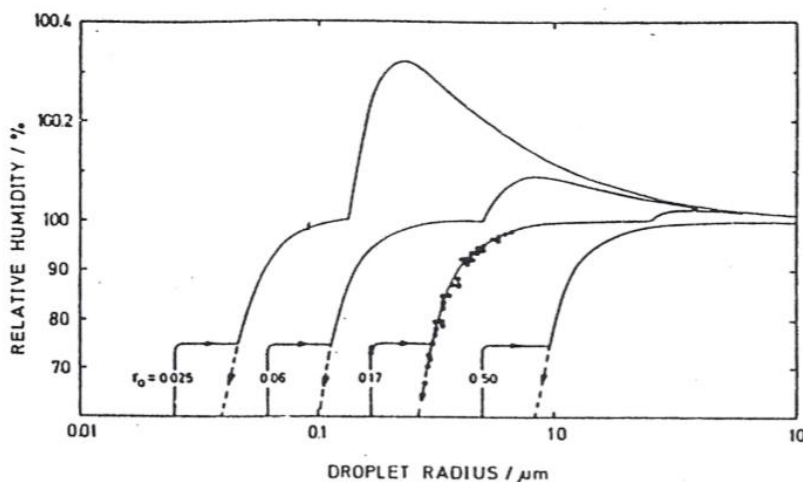
$$S_{eff}(r) = \frac{s(r)}{1 + \frac{2r}{\pi\lambda_1}}$$

เมื่อ	$S_{eff}(r)$	เป็นพื้นที่ผิวยังผล
	$S(r)$	เป็นพื้นที่ผิวของอนุภาค
	r	เป็นรัศมีของอนุภาค
	λ_1	เป็น Mean free path อนุภาคของเหลว

จากสมการดังกล่าว $S_{eff}(r)$ ลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อรัศมีของอนุภาคมีขนาดใหญ่กว่า $0.3 \mu m$ ดังนั้นกระบวนการกลั่นตัวเป็นเนื้อเดียวกันจะเกิดขึ้นอย่างเด่นชัดเมื่ออนุภาคมีค่า $0.1-0.5 \mu m$

1.4.3 การโตขึ้นของอนุภาคของประเภทสารประเภทดูดความชื้น

ฝุ่นละอองสามารถดูดและคายความชื้นได้ ดังนั้นฝุ่นละอองในบรรยากาศที่ดูดกลืนความชื้นเข้าไปจะมีมวลเพิ่มขึ้นขณะที่ฝุ่นละอองที่คายความชื้นออกสู่บรรยากาศจะมีมวลลดลง การดูดและคายความชื้นกับชนิดของฝุ่นละออง ความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิของบรรยากาศ Warneck (1988) ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงขนาดของ ฝุ่นละอองที่เป็นอนุภาคโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ที่ความชื้นสัมพัทธ์ค่าต่างๆ ผลที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 1.4.3 จะกราฟจะเห็นว่าการเพิ่มขึ้นและลดลงของ ขนาดของอนุภาคจะไม่ย้อนรอยเดิมแต่มีลักษณะเป็น hysteric cycles ซึ่งเป็นคุณสมบัติโดยทั่วไปของสารดูดความชื้น



รูปที่ 2.1 แสดงการเปลี่ยนแปลงของอนุภาค NaCl ที่ความชื้นต่างๆ โดยเส้นทึบแสดงการเพิ่มขึ้นของขนาดเมื่อ ความชื้นลดลง

1.4.4 กระบวนการที่ฝุ่นละอองหายไปจากบรรยากาศ (Removal mechanisms)

ฝุ่นละออง ที่เกิดจากแหล่งกำเนิดต่างๆ มีการปลดปล่อยขึ้นสู่บรรยากาศและระหว่างที่อยู่ในบรรยากาศจะมีการเปลี่ยนแปลงขนาดและจำนวนด้วยกระบวนการต่างๆ ดังที่ฝุ่นละอองจะมีการหายไปจากบรรยากาศด้วยกระบวนการดังนี้

- การร่วงหล่นสู่พื้นของสสารแห้งโดยไม่เกี่ยวกับการกลั่นตัว

กระบวนการที่เกิดจากการที่ฝุ่นละอองถูกแรงโน้มถ่วงดึงดูดให้ตกลงสู่พื้นผิวโลก โดยไม่มีการควบแน่น เข้ามาเกี่ยวข้อง กระบวนการดังกล่าวจะขึ้นกับเงื่อนไขทางด้านอุตุนิยมวิทยาใกล้ผิวโลก ความหยาบของผิวโลก (Surface roughness) คุณสมบัติทางฟิสิกส์และเคมีของอนุภาคฝุ่นละออง โดยทั่วไปจะวัดอัตราการร่วงหล่น ในรูปฟลักซ์ของอนุภาคต่อความเข้มอนุภาคใกล้พื้นผิวโลก โดยอัตราการร่วงหล่นจะถูกควบคุมโดยแรงโน้มถ่วงและความปั่นป่วน (turbulent) ของบรรยากาศ การร่วงหล่นโดยอิทธิพลของแรงโน้มถ่วงของอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า $1 \mu\text{m}$ การศึกษาความเร็วของการร่วงหล่นของฝุ่นละอองที่มีขนาดอนุภาคต่างๆ และความเร็วลมค่าต่างๆเหนือพื้นน้ำทะเลซึ่งมีชื้นความสัมพัทธ์ 98.3% พบว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า $10 \mu\text{m}$ จะมีความเร็วของการร่วงหล่นด้วยอิทธิพลเหมือนกับกรณีที่มีการร่วงหล่นเกิดจากเฉพาะแรงโน้มถ่วง ส่วนอนุภาคที่มีขนาด $1-10 \mu\text{m}$ ความเร็วการร่วงหล่นจะขึ้นกับความเร็วลม

- การร่วงหล่นลงสู่พื้นของสสารเปื่อยโดยเกี่ยวข้องกับการกลั่นตัว

กระบวนการนี้เป็นกรณีการลดฝุ่นละอองในบรรยากาศเนื่องจากการกลั่นตัวของเมฆกลายเป็นฝนตกลงสู่พื้นโลก โดยสามารถแบ่งออกเป็น 2 กรณี ได้แก่กระบวนการเกิดในเมฆ (in-cloud process) และ กระบวนการที่เกิดขึ้นได้เมฆ (below-cloud process) กระบวนการที่เกิดขึ้นในเมฆเกิดจากการกลั่นตัวของไอน้ำบน ฝุ่นละอองจนมีขนาดใหญ่กลายเป็นฝนตกลงสู่พื้นผิวโลก กระบวนการ นี้จะเกิดกับอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า $0.1 \mu m$ โดยการเกิดกับอนุภาคขนาดใหญ่ก่อนหลังจากนั้นจะเกิดกับอนุภาคที่มีขนาดเล็ก โดยทั่วไปอัตราการกลั่นตัวจะช้าลงเมื่อหยดน้ำมีขนาดใหญ่ขึ้น กรณีกระบวนการที่เกิดขึ้นได้เมฆจะเกิดขึ้นเมื่อเมฆกลั่นตัวเป็นฝนจะเกิดการชนกันของละอองเมฆเล็กๆ (cloud droplet) ซึ่งจะจับกับฝุ่นละอองเข้าไว้และเมื่อเมฆกลั่นตัวกลายเป็นฝนฝุ่นละอองเหล่านี้จะถูกขนานออกสู่บรรยากาศลงสู่พื้นผิวโลกพร้อมกับฝน นอกจากฝุ่นละอองที่อยู่ในแนวทางการเคลื่อนที่ของเม็ดฝุ่นที่จะถูกจับร่วงหล่นลงสู่พื้นผิวโลกเช่นเดียวกันกระบวนการที่เกิดขึ้นมากับอนุภาคที่มีขนาดโตกว่า $2 \mu m$ แต่ฝุ่นละออง ที่มีขนาด $0-1.2 \mu m$ จะไม่ได้รับผลจากกระบวนการดังกล่าว จึงเป็นผลที่สำคัญต่อฝุ่นละอองที่มีขนาดใหญ่กว่าเท่านั้น

ทฤษฎีเกี่ยวกับเลเซอร์

2.1 ความหมายของเลเซอร์

คำว่าเลเซอร์ มาจากภาษาอังกฤษว่า L.A.S.E.R. ย่อมาจาก Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation แปลเป็นภาษาไทย จะได้ว่า “การขยายแสงโดยการปล่อยแสงแบบถูกกระตุ้น” ขยายแสงหมายความว่า การเพิ่มจำนวนโฟตอน หรืออาจจะหมายถึงการเพิ่มความเข้มแสงให้มากขึ้นก็ได้ คำว่า Emission of Radiation คือการปล่อยแสงหรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านั่นเอง เรียกอีกอย่างสั้นๆว่า emission ส่วนคำว่า stimulated ที่อยู่ด้านหน้าเป็นการบ่งบอกว่าการปล่อยแสงแบบที่ถูกกระตุ้น ซึ่งมีความแตกต่างจากคำที่หลายๆคนส่วนมากจะรู้จักคือการปล่อยแสงแบบที่เกิดขึ้นเอง (spontaneous emission) แสงเลเซอร์เป็นแสงที่มีสมบัติพิเศษแตกต่างจากแสงทั่วไปคือตามสมบัติดังกล่าวประกอบด้วย

2.2 สมบัติของเลเซอร์

2.2.1 เป็นแสงสีเดียว (monochromaticity) แสงเลเซอร์มีความยาวคลื่นเพียงค่าเดียว แสงกำเนิดแสงที่เราพบเห็นในชีวิตประจำวัน เช่น หลอดไฟฟ้า และ ดวงอาทิตย์จะเป็นแสงสีขาว ถ้าให้แสงสีขาวนี้ผ่านปริซึม จะเห็นแถบสีต่างๆเรียงกันอย่างต่อเนื่องจากสีม่วงถึงสีแดง เรียกว่า แถบสเปกตรัมของแสงเลเซอร์ เช่น เลเซอร์ฮีเลียม-นีออน เมื่อให้แสงสีแดงของเลเซอร์ฮีเลียม-นีออนผ่านปริซึม จะไม่มีการแยกเป็นหลายเส้นแต่ยังคงมีเพียง 1 เส้นที่มีความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร

2.2.2 มีความอาพันธ์ (coherence) หลอดไฟฟ้าที่เปล่งแสงประกอบด้วยอะตอมที่เล็กจำนวนมาก โดยแต่ละอะตอมจะทำหน้าที่เป็นต้นกำเนิดแสง ดังนั้นแต่ละอะตอมก็ปล่อยแสงออกมาอย่างอิสระซึ่งกันและกัน แสงที่ถูกปล่อยออกมาจากหลอดไฟจึงมีเฟส และความยาวคลื่นต่าง ๆ กัน ยิ่งกว่านั้นแต่ละคลื่นที่ถูกปล่อยออกมามีทิศทางไม่แน่นอน หรือเป็น random แสงจากแหล่งต้นกำเนิดแสงธรรมดาโดยทั่วไปจะเรียกว่า แสงอินโคฮีเรนต์ (incoherence light) ต้นกำเนิดของแสงเลเซอร์นอกจากจะให้แสงสีเดียวทุกๆ คลื่นของแสงเลเซอร์จะมีเฟสเดียวกันหมด ดังนั้นแสงเลเซอร์จึงเรียกว่า แสงโคฮีเรนต์ (coherence light)

2.2.3 มีทิศทางที่แน่นอน (directionality) ลำแสงเลเซอร์จะขนานกันไปตลอดระยะทางไกลๆ ไม่มีการบานปลายออก ดังนั้นความเข้มของแสงเลเซอร์จะลดลงน้อยมากในระยะทางไกลๆ

2.2.4 มีความเข้มข้น (Intensity หรือ Brightness) สูงมากแสงเลเซอร์มีลักษณะโดดเด่นไม่ซ้ำแหล่งกำเนิดแสงชนิดอื่นในเชิงความเข้มสูง และเมื่อลำแสงตกกระทบวัตถุ ก็เกิดความระยิบระยับของลำแสงขึ้น (Laser Speckle) โดยเฉพาะเมื่อวัตถุนั้นมีความหยาบหรือแม้แต่ในบรรยากาศที่มีฝุ่นละอองหรือควันซึ่งเป็นอนุภาคแขวนลอยอยู่อย่าง random ทั้งนี้เนื่องจากแสงเลเซอร์เกิดการสะท้อนแบบไม่มีทิศทางกับอนุภาค หรือผิวของวัตถุ และเกิดการแทรกสอดของลำแสง ทำให้เกิดความระยิบระยับขึ้นจึงเป็นมิติของการมองเห็น โดยใช้ Laser displays แสงเลเซอร์กำลังต่ำๆ เช่น เลเซอร์ฮีเลียม-นีออน ขนาด 1 mW ก็มีความเข้มสูงกว่าแสงพระอาทิตย์ ฉะนั้นถ้าฉายเข้าตามนุษย์โดยตรงแล้ว จะเป็นอันตรายต่อขนัยน์ตาถึงตาบอดได้

สมบัติดังกล่าวจึงทำให้แสงเลเซอร์ ถูกนำมาใช้ประโยชน์ในหลากหลายด้าน เช่น ทางด้านการสื่อสาร การทหาร ด้านความบันเทิง ด้านอุตสาหกรรม และด้านการแพทย์

2.3 องค์ประกอบของเลเซอร์

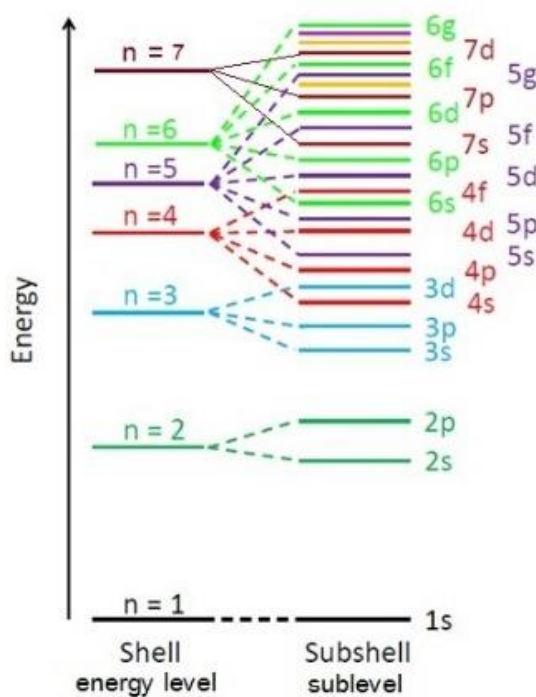
2.3.1 ตัวกลางเลเซอร์ (laser medium) เป็นวัสดุที่ถูกกระตุ้นแล้วให้แสงเลเซอร์ออกมาซึ่งอาจเป็น แก๊ส ของเหลว หรือสารกึ่งตัวนำ

2.3.2 ออปติคัลเรโซเนเตอร์ (optical resonator) เป็นส่วนประกอบของเครื่องกำเนิดเลเซอร์ ที่ทำให้เกิดการปล่อยแสงแบบถูกกระตุ้นเข้าไปซ้ำมา จนทำให้เกิดจุดเลสซิง จะประกอบไปด้วยกระจก 2 แผ่น เอามาวางหันหน้าเข้าหากัน โดยตรงกลางจะมีตัวกลางเลเซอร์อยู่

3.3.3 แหล่งกำเนิดพลังงาน (energy source) ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวกระตุ้นให้อะตอม อยู่ในสถานะที่เป็นประชากรผกผัน

2.4 การเกิดของแสงเลเซอร์

การกำเนิดแสงเลเซอร์ต้องเริ่มทำความเข้าใจตั้งแต่โครงสร้างของอะตอมซึ่งเป็นหน่วยย่อย ของธาตุหรือ สสาร นักฟิสิกส์ได้เสนอแบบจำลองอะตอมว่าประกอบด้วยนิวเคลียสอยู่ตรงกลาง ซึ่งมีประจุบวก และมี อิเล็กตรอนซึ่งมีประจุลบโคจรรอบ การอยู่หรือการจัดวางของอิเล็กตรอนในอะตอมทำให้อะตอม มี พลังงานค่าหนึ่ง ซึ่งอะตอมจะมีพลังงานได้เพียงบางค่าเท่านั้น (quantized energy) ขึ้นอยู่กับจำนวนอิเล็กตรอน และประจุบวกที่อยู่ในนิวเคลียสของอะตอมนั้น เมื่อพิจารณาหลักการหาอะตอม ได้รับพลังงานกระตุ้นที่ เหมาะสม จะมีผลทำให้อะตอมมีพลังงานสูงขึ้นหรือเกิดการสะสมพลังงานนั่นเอง เมื่อเวลาผ่านไปอย่างรวดเร็ว อะตอมจะคายพลังงานส่วนเกินที่ได้รับออกมา เพื่อให้มีพลังงานต่ำลง เพื่อให้ยังคงความเสถียรภาพเอาไว้ได้ เนื่องจากอิเล็กตรอนที่โคจรรอบนิวเคลียสในวงโคจรที่ต่างกันจะมีพลังงานที่แตกต่างกันด้วยเช่นกัน ซึ่งพลังงาน ดังกล่าวบ่งชี้ถึงพลังงานของอะตอมนั่นเอง เมื่อทำการจัดเรียงพลังงานต่างๆ ของอะตอมที่สามารถมีได้ จากค่า น้อยไปหาค่ามาก สามารถเขียนแผนภาพชั้นพลังงาน (energy level) ของอะตอมได้

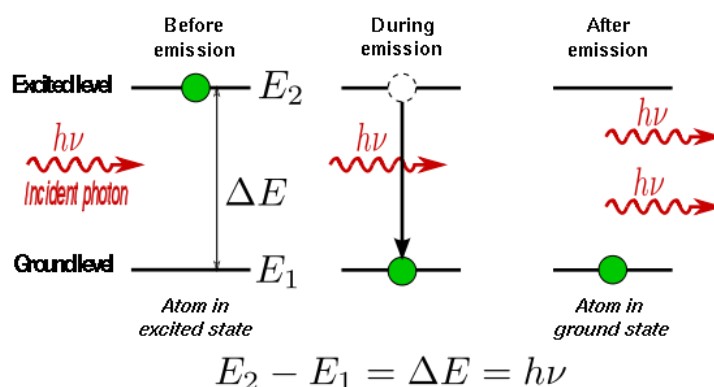


รูปที่ 2.1 แสดงระดับชั้นพลังงานของอะตอม

(ที่มา http://www.satriwit3.ac.th/external_newsblog.php?links=1357)

อะตอมที่มีพลังงาน E_1 เป็นอะตอมที่อยู่ในสถานะพื้น (ground state) เป็นระดับที่มีความเสถียรภาพมากที่สุด แต่ถ้าอะตอมที่มีพลังงานสูงขึ้นไป จะอยู่ในสถานะกระตุ้น (excited states) หรือ อะตอมดูดซับพลังงานเข้าไป จึงมีพลังงานสะสมสูงขึ้นและย้ายมาอยู่ในสถานะนี้

ในสภาวะสมดุลความร้อน เมื่อพิจารณาอะตอมหนึ่งๆ จะมีพลังงานอยู่ค่าหนึ่ง ซึ่งจะสามารถอยู่ในชั้นพลังงานใดชั้นพลังงานหนึ่งได้ แต่ในธรรมชาติ ธาตุและสารประกอบจะประกอบด้วยอะตอมจำนวนมาก ดังนั้นในชั้นพลังงานของอะตอมสำหรับธาตุหรือสารประกอบจึงมีอะตอมหรือประชากรอะตอมกระจายอยู่ในจำนวนที่แตกต่างกัน ซึ่งโดยปกติ ประชากรอะตอมในชั้นพลังงานต่ำจะมีมากกว่าประชากรอะตอมในชั้นพลังงานสูง การเปลี่ยนชั้นพลังงานของประชากรอะตอมสามารถเกิดขึ้นได้ เมื่อมีพลังงานจากภายนอกมากระตุ้น เช่นการกระตุ้นโดยโฟตอนแสง (อนุภาคของแสง) ที่มีพลังงานเท่ากับความแตกต่างของระดับพลังงานพอดี กล่าวคือ ถ้าต้องการกระตุ้นอะตอมที่เดิมอยู่ในสถานะพื้น ให้ไปอยู่ในสถานะกระตุ้นที่ 2 โฟตอนแสงที่ไปกระตุ้นต้องมีพลังงานเท่ากับขนาดของผลต่าง $E_2 - E_1$ การเปลี่ยนชั้นพลังงานของอะตอมที่เกิดขึ้นโดยการดูดกลืนโฟตอนแสงเป็นปรากฏการณ์ที่เรียกว่า การดูดกลืนแสง (light absorption) แต่อะตอมที่อยู่ในชั้นพลังงาน E_2 จะไม่เสถียร เมื่อเวลาผ่านไปอย่างรวดเร็ว อะตอมนั้นจะกลับมามีพลังงานในชั้นพลังงาน E_1 เช่นเดิม โดยปลดปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปของโฟตอนแสง ที่มีพลังงานเท่ากับ $E_2 - E_1$ ปรากฏการณ์ปลดปล่อยโฟตอนโดยธรรมชาตินี้เรียกว่า การปล่อยแสงแบบเกิดขึ้นเอง (spontaneous emission)



รูปที่ 2.2 แสดงปรากฏการณ์ปลดปล่อยโฟตอนแบบเกิดขึ้นเอง

(ที่มา Gould, R. Gordon (1959). "The LASER, Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation". in Franken, P.A. and Sands, R.H. (Eds.). The Ann Arbor Conference on Optical Pumping, the University of Michigan,)

โดยที่

E = พลังงาน (J)

ν = ความถี่ของคลื่น (s⁻¹)

h = ค่าคงที่ของพลังค์มีค่าเท่ากับ 6.626×10^{-34} Js

ในปี ค.ศ. 1917 ไอน์สไตน์[6] เสนอขบวนการปลดปล่อยโฟตอนของอะตอมแบบกระตุ้น (stimulated emission) โดยพิจารณาอันตรกิริยาของโฟตอนกับอะตอม มี 3 แบบ ด้วยกันคือ (วุฒิ 2537)

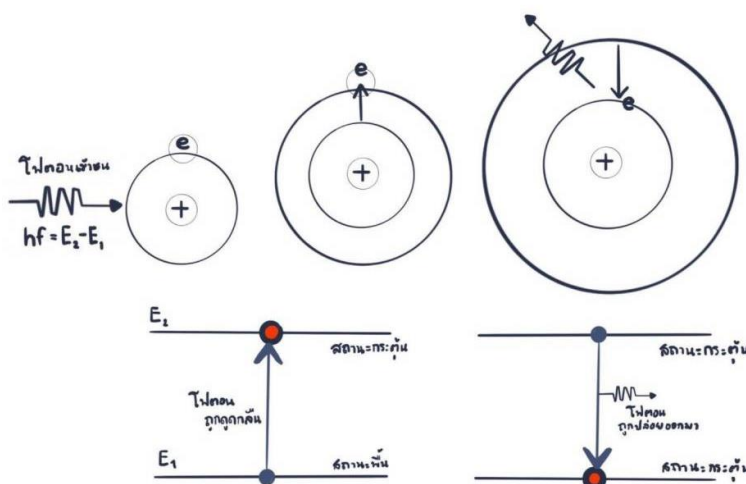
- แบบที่ 1 การดูดกลืนแบบกระตุ้น (Stimulated absorption)

ถ้ามีโฟตอนจากภายนอกมากระตุ้นให้อะตอมเปลี่ยนระดับพลังงาน จากระดับพลังงานต่ำ E_1 ไปสู่ระดับพลังงานที่สูงกว่า E_2 อะตอมจะดูดกลืนโฟตอนที่มีพลังงานเท่ากับผลต่างของระดับพลังงาน เรียกขบวนการดูดกลืนแบบกระตุ้นดังภาพประกอบที่ โดยเขียนสมการพลังงานของการดูดกลืนตามหลักของพลังค์ได้ดังนี้

$$h\nu_{21} = E_2 - E_1 = \Delta E$$

เมื่อ ν_{21} = ความถี่ของโฟตอนที่ถูกดูดกลืน

h = ค่าคงตัวของพลังค์

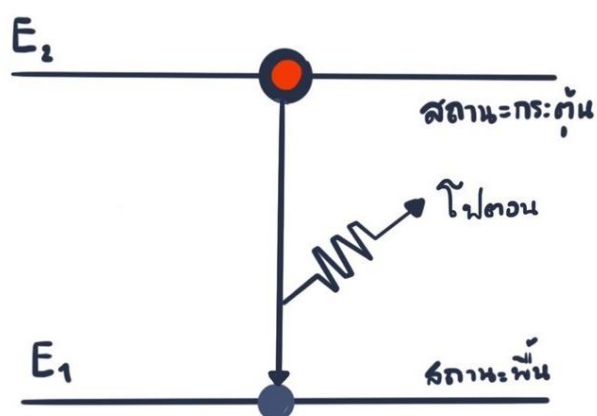


รูปที่ 2.3 แสดงการดูดกลืนแบบกระตุ้น

(ที่มา <http://www.rmutphysics.com/charud/oldnews/0/285/19/laser/k06.htm>)

- แบบที่ 2 การปลดปล่อยโฟตอนด้วยตัวเอง (Spontaneous emission)

ถ้าอะตอมที่อยู่ระดับพลังงานที่สูงกว่า E_2 อะตอมจะอยู่ที่ระดับพลังงานนั้นได้ไม่นาน ประมาณ $(10^{-4} - 10^{-8}$ วินาที) ก็จะปลดปล่อยโฟตอนออกมาเนื่องจากอะตอมไม่เสถียรและพลังงานที่ปลดปล่อยออกมามีความถี่ ν_{21} เท่ากับ $(E_2 - E_1)/h$ หลังจากนั้นอะตอมจะกลับมาอยู่ในระดับพลังงานต่ำ E_1 ดังภาพประกอบที่

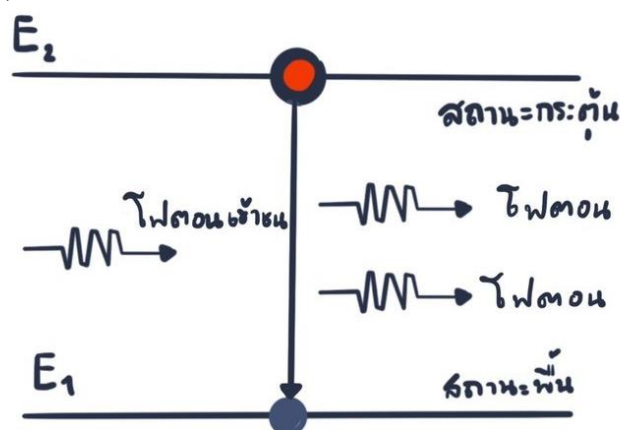


รูปที่ 2.4 แสดงการปลดปล่อยโฟตอนด้วยตัวเอง

(ที่มา <http://www.rmutphysics.com/charud/oldnews/0/285/19/laser/k06.htm>)

- แบบที่ 3 การปลดปล่อยโฟตอนแบบกระตุ้น (Stimulated emission)

ถ้าอะตอมขณะเริ่มต้นที่ระดับพลังงาน E_2 และมีโฟตอนภายนอกความถี่ $\nu = (E_2 - E_1)/h$ เข้ามากระตุ้นทำให้อะตอมเปลี่ยนระดับพลังงาน E_2 และในที่สุดอะตอมจะกลับมายังระดับพลังงาน E_1 และขณะเดียวกัน จะมีการปลดปล่อยโฟตอนออกมาเพิ่มอีกตัวรวมกับตัวเดิมอีก 1 ตัว กลายเป็น 2 ตัว จุดสำคัญของการปลดปล่อยแบบกระตุ้นมี 2 ประการ คือพลังงานของโฟตอนตัวที่สอง ที่เกิดจากการกระตุ้นจะเท่ากับพลังงานของโฟตอนตัวแรก นั่นคือความถี่หรือความยาวคลื่นของโฟตอนทั้งสองเท่ากัน และโฟตอนทั้งสองจะมีเฟสเดียวกัน ซึ่งจะมีความเป็นอาพันธ์ (coherent wave)



รูปที่ 2.5 แสดงการปล่อยโฟตอนแบบกระตุ้น

(ที่มา <http://www.rmutphysics.com/charud/oldnews/0/285/19/laser/k06.htm>)

การปลดปล่อยโฟตอนแบบกระตุ้น เป็นขบวนการสำคัญในการเกิดเลเซอร์ ในการกระตุ้นอะตอมออกจากระดับชั้นพลังงาน E_1 ให้ไปอยู่ที่ระดับชั้นพลังงาน E_2 ที่จะต้องใช้พลังงานงานป้อนเข้าไปและจะต้องกระตุ้นจำนวนอะตอมเพื่อให้ไปอยู่ระดับพลังงานชั้น E_2 ถึงจะเกิดเลเซอร์ออกมาได้ ขบวนการที่จะอธิบายหลักการนี้เรียกว่า “ขบวนการประชากรผกผัน (population inversion)”

ขบวนการประชากรผกผัน (population inversion)

เงื่อนไขที่จำเป็นสำหรับการเกิดเลเซอร์คือขบวนการเกิดประชากรผกผัน (population inversion) โดยหลักการที่จะทำให้เกิดขบวนการประชากรผกผันก็จะต้องทำให้จำนวนประชากร (อะตอมหรือโมเลกุล) ที่ระดับพลังงานสูงกว่าจำนวนประชากรที่ระดับต่ำกว่า ในสภาวะปกติไม่สามารถทำได้ เนื่องจากอะตอมและโมเลกุลจะพยายามอยู่ที่สถานะต่ำกว่าซึ่งเป็นไปตามหลักการของโบลซ์มานน์ ที่เสนอแนวคิดที่ว่าในสภาพสมดุลเชิงความร้อนตามธรรมชาติ โดยทั่วไปอะตอมที่อยู่ระดับพลังงานสูงกว่าจะมีจำนวนน้อยกว่าอะตอมที่อยู่ระดับต่ำกว่าเสมอ ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนอะตอมและระดับพลังงาน จะเป็นไปตามกฎการแจกแจงสมการโบลซ์มานน์ดังสมการ

$$\frac{N_1}{N_2} = \exp\left(\frac{E_2 - E_1}{kT}\right)$$

โดยที่ $E_2 > E_1$

เมื่อ N_1 คือจำนวนอะตอมที่ระดับชั้นพลังงานที่ 1

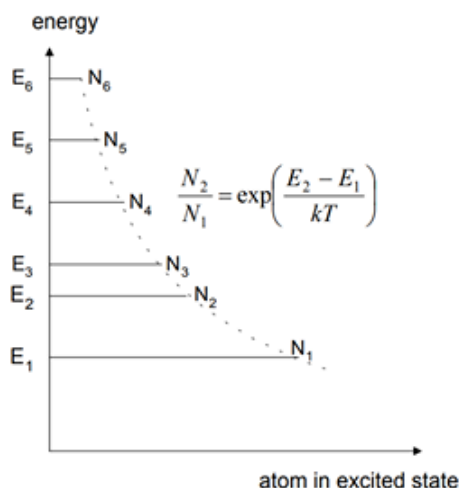
N_2 คือจำนวนอะตอมที่ระดับชั้นพลังงานที่ 2

E_1 คือค่าพลังงานที่ระดับชั้นพลังงานที่ 1

E_2 คือค่าพลังงานที่ระดับชั้นพลังงานที่ 2

k คือค่าคงตัวของโบลซ์มานน์ เท่ากับ 1.38×10^{-23} จูล/เคลวิน

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ในหน่วยเคลวิน



รูปที่ 2.6 แสดงลักษณะการแจกแจงประชากรของโบล์ซมานน์

(ทีมา คุณิต ,2542)

จากรูปที่ แสดงให้เห็นว่า $E_2 > E_1$ ดังนั้นจากสมการนี้ N_1 จึงมีค่ามากกว่า N_2 เสมอ ดังนั้นอะตอมทั่วไปจะไม่เกิดปรากฏการณ์ประชากรผกผัน

ในการทำให้เกิดประชากรผกผันได้นั้นจะต้องเลือกอะตอมที่มีเวลาอายุ τ_2 (life time) ที่ระดับพลังงานสูงซึ่งมีค่ายาวนานกว่าเวลาอายุ τ_1 ที่ระดับพลังงานต่ำ นั่นคือ $E_2 > E_1$ และต้องทำให้เวลา $\tau_2 > \tau_1$ ดังนั้นเราจะต้องทำการกระตุ้นอะตอมจำนวนมากๆ จะทำให้ได้ความสัมพันธ์ $N_2 > N_1$ ซึ่งก็คือเงื่อนไขประชากรผกผันขึ้นมา เราสามารถแสดงปรากฏการณ์นี้ได้ด้วยสมการ

$$\frac{N_1}{N_2} = \exp\left(\frac{-E_2 - E_1}{kT}\right)$$

เนื่องจาก $E_2 > E_1$ ดังนั้นจากสมการจะได้ $N_2 > N_1$ ก็ต่อเมื่อ $T < 0$ แต่ในสภาพเป็นจริงอุณหภูมิมีค่าติดลบไม่ได้ เราจึงมีการเรียกชื่อสภาพของประชากรผกผันได้อีกชื่อหนึ่งว่า “การแจกแจงอุณหภูมิเชิงลบ” (negative temperature distribution) เงื่อนไขประชากรผกผันจึงเป็นสิ่งที่สำคัญที่ทำให้เกิดการเปล่งแสงแบบเรงูเร้า หรือการเกิดเลเซอร์

2.5 ชนิดของเลเซอร์

2.5.1 Gas Laser เป็นสารตัวกลางเลเซอร์ที่มีลักษณะเป็นก๊าซ ได้แก่ CO₂ Laser, Argon Laser , Xenon Laser , He-Ne Laser

2.5.1.1 Carbon dioxide Laser คาร์บอนไดออกไซด์ เลเซอร์

เลเซอร์ชนิดนี้มีลักษณะเป็นก๊าซ มีส่วนประกอบคือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซไนโตรเจน และก๊าซฮีเลียม ในอัตราส่วน 1:1:10 เพื่อให้ประสิทธิภาพของเลเซอร์ดีขึ้น ซึ่งมีความแตกต่างจากเลเซอร์ก๊าซประเภทอื่น ๆ มาก เพราะแสงเลเซอร์ชนิดนี้ไม่ได้เกิดจากการเปลี่ยนระดับพลังงานของอะตอม แต่เกิดจากการหมุนและการสั่นของโมเลกุลก๊าซ โมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์ ตามปกติจะมีลักษณะเป็นเส้นตรง โดยมีออกซิเจนอยู่สองข้างและคาร์บอนอยู่ตรงกลาง ลักษณะของการสั่นของโมเลกุลจะเป็นการสั่นขึ้นลงหรือเข้าออกของออกซิเจน เมื่อนำไปเทียบกับคาร์บอน พลังงานจากการเปลี่ยนระดับพลังงานในการสั่นของโมเลกุลจะมีค่าประมาณ 0.1 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งจะทำให้ความยาวคลื่นแสงเลเซอร์อยู่ที่ 10.6 ไมครอน (10.6×10^{-6} เมตร) ซึ่งจัดว่าเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่อยู่ในช่วงของอินฟราเรด จากการที่พลังงานจากการเปลี่ยนระดับพลังงานมีค่าต่ำ ทำให้ pump โดยใช้ electrical discharge ได้ง่าย แล้วยังมีประสิทธิภาพสูงมากถึง 20% ซึ่งถือว่ามากถ้าหากเทียบกับเลเซอร์ทั่วไป ที่มีประสิทธิภาพประมาณ 1%

2.5.1.2 Argon-ion Laser อาร์กอน-ไอออน เลเซอร์

เป็นตัวกลางที่เป็นต้นกำเนิดของแสงเลเซอร์ ซึ่งเกิดจากการกระตุ้นอะตอมของอาร์กอน จนอิเล็กตรอน บางอนุภาคหลุดออกไป Pumping source ที่ใช้เป็นแบบ electrical discharge จึงทำให้ไอออนและอาร์กอนถูกกระตุ้นไปอยู่ที่ชั้นพลังงานที่สูง เรียกว่า metastable state โดยในบางส่วนที่เป็น metastable states จะมีอยู่หลายชั้นย่อย ซึ่งสามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานได้หลายแบบ แต่สิ่งที่เห็นได้ชัดคือ แสงเลเซอร์ชนิดนี้จะมี ความยาวคลื่น 514 นาโนเมตร (สีเขียว) และ 488 นาโนเมตร (สีน้ำเงิน) กำลังของแสงเลเซอร์ชนิดนี้จะอยู่ที่ 1-20 วัตต์ ซึ่งมีข้อเสียคือ ต้องใช้กระแสไฟฟ้าในการ Pump สูงมาก เพราะต้องทำหน้าที่สองอย่างคือ การทำให้อะตอมเป็นไอออน และกระตุ้นไอออนให้เกิดประชากรผกผัน จึงทำให้เกิดความร้อนสูง จำเป็นต้องมีระบบหล่อเย็น อาร์กอน-ไอออน เลเซอร์ ซึ่งการใช้เลเซอร์ชนิดนี้จะถูกใช้ในวงการแพทย์ในด้านการผ่าตัด การสร้างโฮโลแกรม (Holography) และงานด้าน Spectro photometry

2.5.1.3 He-Ne Laser ฮีเลียม-นีออน เลเซอร์

จัดว่าเป็นเลเซอร์ชนิดแรก ประกอบไปด้วยก๊าซฮีเลียม (He) และนีออน (Ne) ในอัตราส่วน 10:1 แหล่งกำเนิดพลังงานที่กระตุ้นให้เกิดประชากรผกผัน มีชื่อเรียกว่า pumping source ที่ใช้เป็น electrical discharge ซึ่งจะทำให้อิเล็กตรอนวิ่งผ่านและชนกัน ส่วนก๊าซที่บรรจุอยู่ในหลอดเลเซอร์ จะมีแสงเลเซอร์เป็นสีแดง ซึ่งจะมี ความยาวคลื่นอยู่ที่ 632.8 นาโนเมตร และจะมีกำลังอยู่ประมาณ 0.5 – 50 มิลลิวัตต์ สามารถเปลี่ยนพลังงานของอะตอมให้กลายเป็นเลเซอร์สีเขียวและอินฟราเรดได้ แต่ไม่นิยม เพราะมีความยุ่งยากและมีต้นทุนสูง ส่วนมากจะใช้ใน

การศึกษาวิจัย การวัด การสร้างภาพโฮโลแกรม ได้มีการนำไปใช้ในงานอุตสาหกรรมที่ใช้เป็นมาตรฐานในการสอบเทียบการวัดเชิงมิติ

2.5.2 Solid State Laser : เป็นสารตัวกลางเลเซอร์ที่มีลักษณะเป็นแท่งผลึกแข็ง ได้แก่ Nd:YAG Laser, Ruby Laser

2.5.2.1 Nd:YAG Laser นิโอดีเมียมเย็กเลเซอร์

จัดว่าเป็นเลเซอร์ชนิดของแข็ง โดยมี host เป็นผลึกของ Yttrium-aluminium garnet ($\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$) ซึ่งเรียกสั้น ๆ ว่า YAG ส่วนของ Impurity คือ Nd^{3+} ซึ่งจะถูก dope เข้าไปประมาณ 1% โดยน้ำหนัก ซึ่งโดยทั่วไปแล้วนิโอดีเมียมเย็กเลเซอร์ จะมีกำลังเฉลี่ยอยู่ที่ 3 -1,000 วัตต์ สามารถให้แสงได้ทั้งแบบ (Pulse) และแบบต่อเนื่องได้ (continuous) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ pumping source ที่นำมาใช้เป็นแบบ หลอดไฟแฟลช หรือหลอดไฟอาร์ค เลเซอร์นี้มีความยาวคลื่นอยู่ที่ 1064 นาโนเมตร อยู่ในช่วงคลื่นอินฟราเรด ซึ่งนิยมนำมาใช้ควบคู่กับ second harmonic crystal ยกตัวอย่างเช่น KTP ที่ทำให้ได้ความยาวคลื่น 532 นาโนเมตร เป็นแสงสีเขียวออกมาได้ เลเซอร์ชนิดนี้สามารถทำให้เกิดค่ากำลังสูงสุดได้มากถึง 2,000 วัตต์ ซึ่งเลเซอร์ชนิดนี้จัดว่าเป็นเลเซอร์ขนาดเล็ก จึงนิยมนำไปทำการเจาะ ตัด หรือการแกะสลักวัสดุที่มีความแข็งสูง วัสดุประเภทโลหะ เช่น แก้ว เซรามิก หรืออัญมณีได้เป็นอย่างดี

2.5.2.3 Ruby Laser

จัดว่าเป็นเลเซอร์ชนิดของแข็ง ซึ่งมีลักษณะที่สำคัญคือ ตัวกลางของเลเซอร์จะเป็นแท่งผลึกของฉนวน จะทำหน้าที่เป็น host และมีการฉาบ (dope) โครเมียม (เป็น impurity) เข้าไป ซึ่งเลเซอร์ชนิดนี้มีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า doped insulator laser และมีตัวอย่างเลเซอร์หลัก ๆ 2 ชนิดที่ใช้เทคนิคนี้ ซึ่งได้แก่ เลเซอร์ทับทิม และ Nd:YAG เลเซอร์ โดยเลเซอร์ทับทิมนั้น เป็นเลเซอร์ชนิดแรกที่ถูกสร้างขึ้นโดย Theodore Maiman ในปี ค.ศ. 1960 สารตัวกลางของเลเซอร์ชนิดนี้คือ $\text{Cr}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$ เป็นการ dope Cr^{3+} ลงไปใน Al_2O_3 นั่นก็คือ ทับทิมสังเคราะห์ pumping source ที่ใช้เป็นแบบ optical ซึ่งนิยมใช้กันคือ หลอดไฟแฟลช (Xenon flash lamp ซึ่งเป็นหลอดแก้วเกลียว ซึ่งโอบรอบแท่งผลึกทับทิมอยู่ตรงกลาง) ซึ่งการทำให้เกิดประชากรผกผันในเลเซอร์ทับทิมนั้นทำได้ยาก และจะได้เลเซอร์แบบที่เป็นพัลส์เท่านั้น ความยาวคลื่นของแสงเลเซอร์ชนิดนี้คือ 694.3 นาโนเมตร และมีระดับพลังงานในระดับ มิลลิจูลต่อพัลส์ถึงกิโลจูลต่อพัลส์

2.5.3 Dye Laser : เป็นสารตัวกลางเลเซอร์ที่มีลักษณะเป็นของเหลวเป็นเลเซอร์ที่ใช้สำหรับรักษาความผิดปกติของเส้นเลือด โดยไม่ทำลายเนื้อเยื่อ หรือ ผิวบริเวณที่ทำการรักษาค่ะ ซึ่งปัญหาส่วนใหญ่ที่ใช้รักษา โดยมีความยาวคลื่น 959 nm ได้แก่ Rhodamin 6G Laser

2.5.4 Semiconductor Laser : นับว่ามีจำนวนมากที่สุด โดยมีลักษณะคล้ายกับ LED (light emitting diode) ซึ่งมีลักษณะพิเศษ ที่ทำให้แสงออกมาเป็นเลเซอร์ โดย LED จะให้แสงจาก spontaneous emission สำหรับแสงเลเซอร์ชนิดนี้เกิดจากการรวมตัวของอิเล็กตรอนกับหลุม โดยจะมีความยาวคลื่นหลัก ๆ 650, 770, 809, 1100 และ 1500 นาโนเมตร สามารถใช้ประยุกต์กับอุปกรณ์หลายชนิด เช่น ปริ้นเตอร์ เลเซอร์พอยน์เตอร์และเป็นเลเซอร์ที่จะใช้สารตัวกลางของเลเซอร์เป็นสารกึ่งตัวนำ ได้แก่ Diode Laser ชนิดต่าง ๆ

1.38X10⁻²³จูล/เคลวิน

การกระเจิงของแสง (scattering of light)

การกระเจิงของแสง (scattering of light) เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นเมื่อคลื่นแสงเคลื่อนที่ตกกระทบโมเลกุลหรืออนุภาคต่างๆในบรรยากาศแล้วเกิดการกระเจิงออกมา โดยมีปัจจัยของความยาวคลื่น ถ้าความยาวคลื่นสั้นการกระเจิงของแสงก็จะสามารถกระเจิงได้โดยง่าย ขนาดของสิ่งกีดขวางมีผลต่อการกระเจิงของแสงเมื่อสิ่งกีดขวางที่มีขนาดใหญ่จะทำให้แสงเกิดการกระเจิงได้โดยง่ายเนื่องจากไปขวางการเคลื่อนที่ของคลื่น และความหนาแน่นของอนุภาค ถ้าในบริเวณที่มีความหนาแน่นมากแสงก็จะกระเจิงได้มาก โดยแสงที่กระเจิงออกมาจำนวนมากหรือน้อยนั้นขึ้นกับขนาดของโมเลกุลหรืออนุภาคที่คลื่นแสงตกกระทบ โดยแบ่งลักษณะของการกระเจิงของแสงได้ 2 ประเภทคือดังนี้

- การกระเจิงแบบยืดหยุ่น (elastic scattering) คือการกระเจิงที่ความถี่ของแสงตกกระทบเท่ากับความถี่ของแสงหลังเกิดการกระเจิง

- การกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น (non elastic scattering) คือการกระเจิงที่ความถี่ของแสงตกกระทบและความถี่ของแสงหลังเกิดการกระเจิงมีค่าไม่เท่ากันเนื่องมาจากการสูญเสียพลังงานบางส่วนให้กับโมเลกุลหรืออนุภาคที่แสงตกกระทบซึ่งทำให้แสงที่ถูกกระเจิงออกมามีความถี่เปลี่ยนไปการกระเจิงของแสงเนื่องจากโมเลกุลหรืออนุภาคในชั้นบรรยากาศยังสามารถบอกคุณสมบัติของโมเลกุลหรืออนุภาคในชั้นบรรยากาศได้โดยจำแนกตามอันตรกิริยาเชิงแสงเนื่องจากแสงเลเซอร์กับโมเลกุลหรืออนุภาคที่อยู่ในชั้นบรรยากาศดังนี้

3.1 การกระเจิงแบบเรย์ลีห์ (Rayleigh scattering)

การกระเจิงแบบเรย์ลีห์เป็นการกระเจิงแบบยืดหยุ่นเกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลหรืออนุภาคทรงกลมที่แสงจะถูกกระเจิงมีขนาดรัศมี (r) น้อยกว่าความยาวคลื่นของแสงตกกระทบโดยการกระเจิงแบบเรย์ลีห์นั้นถูกนิยามตามสมการด้านล่าง

$$S(\theta) = a^3 \left(\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \right) \text{ สำหรับโพลาไรเซชันในแนวตั้งฉาก}$$

$$s(\theta) = -a^3 \left(\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \right) \cos(\theta) \text{ สำหรับโพลาไรเซชันในแนวนอน}$$

$$\text{เมื่อ } a = kr = \frac{2\pi r}{\lambda}$$

ถ้า r คือ รัศมีของโมเลกุลและอนุภาค

λ คือ ความยาวคลื่นของแสงในสุญญากาศ

n คือ ดัชนีหักเหของโมเลกุลและอนุภาค

ความเข้มข้นของแสงที่ถูกกระเจิงคือ

$$I_{\perp} = I_{\perp 0} \frac{(S_{\perp}(\theta))^2}{k^2 d^2} = I_{\perp 0} \frac{16\pi^4 r^6 \left(\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \right)^2}{\lambda^4 d^2} \text{ สำหรับโพลาไรเซชันในแนวตั้งฉาก}$$

$$I_{\parallel} = I_{\parallel 0} \frac{(S_{\parallel}(\theta))^2}{k^2 d^2} = I_{\parallel 0} \frac{16\pi^4 r^6 \left(\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \right)^2}{\lambda^4 d^2} \cos^2(\theta) \text{ สำหรับโพลาไรเซชันในแนวนอน}$$

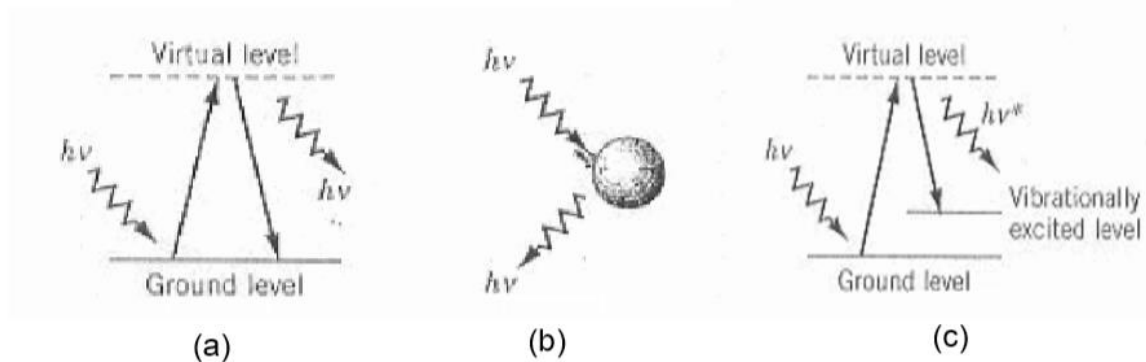
d คือ ระยะทางระหว่างโมเลกุลหรืออนุภาค กับจุดที่ทำการสังเกต (observing point) เมื่อ n และ d เป็นค่าคงที่ ที่จะสังเกตได้ว่าความเข้มของแสงจากการกระเจิงแบบเรย์ลีนั้นเป็นส่วนผกผันกับกำลังสี่ของความยาวคลื่นและเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกำลังหกของรัศมีของโมเลกุลหรืออนุภาคที่แสงตกกระทบ

3.2 การกระเจิงแบบมี (Mie scattering)

การกระเจิงแบบมีเป็นการกระเจิงแบบยืดหยุ่น ซึ่งมีสัญญาณที่กระเจิงกลับมาจากชั้นบรรยากาศจะมีขนาดของความยาวคลื่น และความถี่หลังการกระเจิงไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับความยาวคลื่นและความถี่ของแสงที่ปล่อยออกไปจากแหล่งกำเนิด

3.3 การกระเจิงแบบรามาน (Raman scattering)

การกระเจิงแบบรามานเป็นการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่นที่มีความเปลี่ยนแปลงไปหลังการกระเจิงซึ่งเปลี่ยนแปลงไปมากหรือน้อยขึ้นกับลักษณะของโมเลกุลความแตกต่างของพลังงานระหว่างโฟตอนที่ตกกระทบกับโฟตอนที่คายออกมาขึ้นกับโมเลกุลที่แสงตกกระทบ และสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงในระดับของควอนตัม ในการศึกษารามานสเปกตรัมได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการศึกษามลพิษเช่นการกระเจิงที่เกิดจากการยิงแสงเลเซอร์เข้าไปในกลุ่มควันของโรงงานอุตสาหกรรมเมื่อนำไปวิเคราะห์จะแสดงให้เห็นถึงขนาดของโมเลกุลของสิ่งที่ปล่อยออกมาจากโรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น



รูปที่ 2.7 แสดง อันตรกิริยาระหว่างเลเซอร์ กับโมเลกุลหรืออนุภาคที่ตกกระทบ (a) แบบเรย์ลีย์ (b) แบบมี (c) แบบรามาน
ที่มา Schouepnikoff, L.; Van Den Bergh, H., & Calpini, B. (1990), Tropospheric air pollution monitoring lidar, P. 4878

อุปกรณ์ตัวรับแสง

อุปกรณ์ตัวรับแสง (photodetector) ที่เป็นโฟโตไดโอด จะต้องพิจารณาถึงตัวเปล่งแสง (LED) เสมอ โฟโตไดโอดใช้เป็นอุปกรณ์ในการนำแสงเข้าและส่งสัญญาณไฟฟ้าออกมา ตามหลักการทำงานของโฟโตไดโอด จะต้องอยู่กับเปล่งแสง ตัวรับแสงจะดูดโฟตอนและปล่อยอิเล็กตรอนทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหล

4.1 คุณสมบัติของตัวรับแสงที่ดี

ตัวรับแสงที่ดีควรจะประกอบไปด้วยคุณสมบัติดังนี้

4.1.1 ความไวแสงสูง (highly sensitive) กระแสไฟฟ้าควรมีค่าสูงพอในการตอบสนองต่อสัญญาณที่เกิดจากแสงเพราะตัวรับแสงจะเลือกย่านความยาวคลื่นในการตอบสนอง (การตอบสนองจะเกิดในช่วงของความยาวคลื่นที่จำกัด) ความไวแสงควรในช่วงความยาวคลื่นที่ใช้งาน

4.1.2 เวลาในการตอบสนอง (response time) ต้องรวดเร็ว ตัวรับแสงควรจะตอบสนองในช่วงเวลาที่สั้นที่สุดของคลื่นแสงทำให้การทำงานเกิดขึ้นในลักษณะอัตราสัญญาณข้อมูลและจะมีผลต่อประสิทธิภาพของระบบโทรคมนาคม

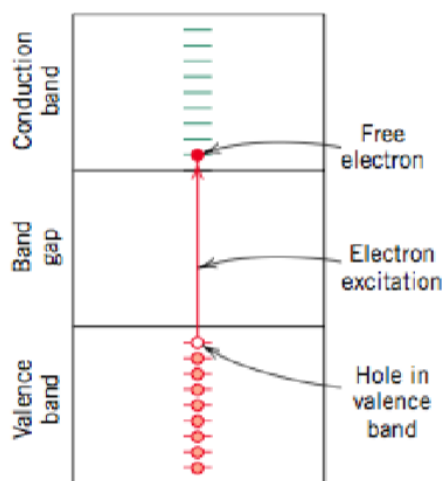
4.1.3 การส่งสัญญาณแบบเชิงอุปมาน (analog) สัญญาณของตัวรับแสงจะต้องมีความสัมพันธ์ลักษณะเป็นเชิงเส้น (linearity) สำหรับการเกิดการสูญเสียที่น้อยที่สุดโดยจะพิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของแสงที่ตกกระทบกับกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้น

4.1.4 สัญญาณรบกวนภายใน (internal noise) ขึ้นจะต้องมีค่าน้อยที่สุดขณะที่มีการนำสัญญาณแสงเข้ามา

4.1.5 คุณลักษณะอื่นๆ ที่สำคัญเช่นความเชื่อถือได้ (reliability) ความมีเสถียรภาพ (stability) ความไวแสง (Insensitivity) ภายใต้อุณหภูมิแวดล้อมที่ไม่เหมาะสมและราคาของตัวรับแสง

4.2 หลักการตัวรับแสง (Printciples of photodetection)

ประสิทธิภาพที่เกิดขึ้นมีความสำคัญต่อการเปลี่ยนโฟตอนแต่ละตัวจะปล่อยอิเล็กตรอนออกมา 1 อนุภาค การเปล่ง (emission) หมายถึงการปล่อยอนุภาคอิเล็กตรอนอิสระซึ่งจะเคลื่อนที่และเป็นผลให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลเมื่อมีแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม อิเล็กตรอนอิสระที่เกิดขึ้นโดยการถ่ายเทอิเล็กตรอนจากแถบเวเลนซ์ในโครงสร้างอะตอมไปยังแถบการนำ (conduction band) หลังจากอิเล็กตรอนหลุดจากแถบเวเลนซ์ก็จะมีสภาพเป็นโฮล (holes) กระบวนการในการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล เราเรียกว่าตัวกำเนิดแสงที่เกิดขึ้นจากอิเล็กตรอน-โฮล (electron-hole photogeneration)



รูปที่ 2.8 แสดงการเคลื่อนของอิเล็กตรอนโฮล

(ที่มา Callister and Rethwisch, 2010)

วิธีการดังกล่าวได้แสดงตามรูปที่ โฟตอนซึ่งถูกดูดซับโดยอะตอมและส่งผลให้อิเล็กตรอนเกิดการเคลื่อนที่จากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบการนำ การเปลี่ยนแปลงของพลังงานที่เกิดขึ้นจากอิเล็กตรอนจะมีค่าเท่ากับ E_g ซึ่งทำให้โฟตอนต้องมีพลังงานอย่างน้อยเท่ากับ E_g เพราะพลังงานของโฟตอนจะมีความสัมพันธ์กับความถี่ของมัน (หรือความยาวคลื่น) เราสามารถหาค่าช่องว่างพลังงาน (energy gap E_g) ได้จากขนาดสัญญาณการ

ตอบสนองในย่านความถี่ของตัวรับแสงโดยที่ E_p มีค่ามากกว่า E_g (หรือเท่ากับ E_g ถ้าไม่มีการสูญเสียพลังงาน)
โดยที่ $E_p \geq E_g$

ตัวรับจะไม่ตอบสนองในช่วงความถี่ $f_c = E_g / h$ หรือในช่วงที่ความยาวคลื่นที่สูงตามสมการ $\lambda_c = \left(\frac{ch}{E_g} \right)$

โดยให้ความถี่ช่วงตัด (cutoff frequency : f_c) และช่วงความยาวคลื่น (cutoof wavelength : λ_c) ของตัวรับแสงที่มีระดับพลังงานเท่ากับ E_g

ประสิทธิภาพตัวรับแสงจะพิจารณาจาก สัมประสิทธิ์ควมดัม (η_o) ซึ่งคล้ายกับประสิทธิภาพของ LED ตามสมการ $\eta_o = \frac{N_e}{N_p}$ นั่นคือจำนวนอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ส่วนด้วยจำนวนของโฟตอนที่ตกกระทบ

โดยส่วนใหญ่จะพิจารณาค่า η_o เท่ากับ 1 ซึ่งก็หมายถึงทุก ๆ ครั้งที่โฟตอนถูกดูดซับก็จะทำให้เกิดอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ที่หลุดออกมาโดยปกติ η_o จะมีค่าประมาณ 70-80%

ในทางปฏิบัติเราจะพิจารณาความสัมพันธ์ช่วงการทำงานของตัวรับแสงว่ามีค่าความไวในการตอบสนองสัญญาณแสงอย่างไร (Responsivity: R) หรือเรียกว่าความไวต่อการแผ่รังสี (Radiant Sensitivity: R) โดยอาจจะนิยามอัตราส่วนของกระแสที่เกิดจากการรับแสง (ก็คือกระแสที่เกิดขึ้นจากการดูดกลืนของโฟตอน) ต่อกำลังของโฟตอนที่ตกกระทบ ตามสมการ

$$R = \frac{I_p}{P_i}$$

เมื่อ R ความไวต่อการแผ่รังสี มีหน่วยเป็นแอมแปร์ต่อวัตต์ (A/W) หรือเป็นไมโครแอมแปร์ต่อไมโครวัตต์ ($\mu A / \mu W$)

I_p เป็นกระแสที่เกิดจากการรับแสง (A)

P_i เป็นกำลังของแสงที่ตกกระทบ (W)

สามารถใช้ความสัมพันธ์ของ R กับ η_o ได้ว่า $I_p = \frac{(N_e \times e)}{s}$ (1)

เมื่อ e เป็นประจุของอิเล็กตรอน (1.602×10^{-19}) คูลอมบ์

N_e เป็นจำนวนของอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่

จากสมการ $P_i = \frac{(N_p \times E_p)}{s}$ (2)

เมื่อ E_p เป็นพลังงานของโฟตอน

N_p เป็นจำนวนโฟตอนที่ตกกระทบ

เมื่อแทนสมการ(1)และสมการที่(2) ในสมการ $F_c - F_v > E_c - E_v = h\omega / 2\pi$

$$\begin{aligned} \text{จะได้ } R &= (N_e \times e) / (N_p \times E_p) \\ &= (\eta_Q \times e) / E_p \end{aligned}$$

ถ้าคิด $R = (\eta_Q \times e) / E_p$, E_p จะได้ออกมาเป็นจูล แต่ถ้าคิด $R = \eta_Q / E_p$, E_p จะได้ออกมาเป็นอิเล็กตรอน โวลต์ (eV)

$$\begin{aligned} R &= (\eta_Q \times e) / (h \times f) \\ &= \eta_Q \times (e \times \lambda) / (h \times c) \end{aligned} \quad (3)$$

เมื่อ η_Q เป็นค่าสัมประสิทธิ์ควอนตัม

λ เป็นค่าความยาวคลื่นมีหน่วย

R เป็นเมตรเป็นความไวต่อการตอบสนองสัญญาณแสงมีหน่วยเป็นแอมแปร์ต่อวัตต์

c เป็นความเร็วแสงมีหน่วย

e เป็นเมตรต่อวินาทีเป็นประจุของอิเล็กตรอนมีหน่วยเป็นคูลอมบ์

ค่าสัมประสิทธิ์ควอนตัมและค่าการตอบสนองสัญญาณแสงจะคิดเฉพาะค่าความยาวคลื่นที่จุดซึ่งมีการตอบสนองสัญญาณสูงสุดจากสมการ (3)เขียนได้เป็นสมการใหม่คือ (4)

$$R = (\eta_Q \times \lambda) / 1.24 \quad (4)$$

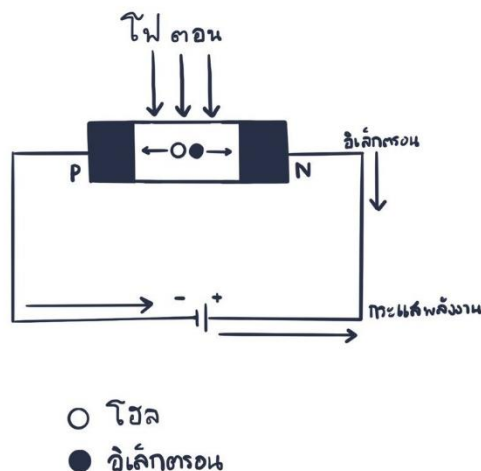
จากสมการ (3) และสมการ (4) แสดงให้เห็นว่าการตอบสนองสัญญาณแสงจะเพิ่มขึ้นตามความถี่แสงที่ตกกระทบจะผ่านสารกึ่งตัวนำชนิดพี (หรือสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น) มาที่บริเวณปลอดพาหะ (depletion region) หรือส่วนที่ไม่มีการเจือสาร (intrinsic region) โฟโตนิกไดโอดจะมีโครงสร้างเป็นลักษณะแคปซูล (capsulate) และมีพลาสติกหรือแก้วครอบไว้ด้านบน (สำหรับให้แสงลอดผ่าน) ทั้งสารกึ่งตัวนำชนิดพี (หรือสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น) และส่วนที่เป็นโครงแคปซูลจะมีวัสดุที่สามารถป้องกันอันตรายที่จะเกิดขึ้นไว้ก่อน (filtering effect) กำลังของแสงที่ตกกระทบจะแปรตามความยาวคลื่น ในการแสดงค่าการตอบสนองสัญญาณแสงกับฟังก์ชันของความยาวคลื่นจะต้องมีสัญญาณการตอบสนองเหมือนกันทั้งสองด้าน

4.3 ตัวรับแสง (Photodetector)

4.3.1 พี-เอ็นโฟโตนิกไดโอด (P-N photodiode)

โฟโตนิกไดโอดเป็นตัวรับแสงชนิดหนึ่งที่ส่วนใหญ่นิยมใช้กัน โดยไดโอดแบบนี้จะมีความทำงานลักษณะเป็นการไบแอสย้อนกลับ (reverse bias) จะทำให้ที่บริเวณปลอดพาหะ (depletion region) มีกำลังที่เกิดจากแสงขึ้นถ้าไดโอดไม่มีการไบแอสก็จะทำให้ส่วนบริเวณปลอดพาหะมี ระยะแคบ (narrow) ส่วนนี้ก็จะมีการเคลื่อน

(อิเล็กตรอนและโฮล) ที่เกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยกรณีที่มีการไบแอสเพิ่มขึ้นส่วนปอดพาหะก็จะมีระยะเพิ่มขึ้นด้วยโฟตอนที่ตกกระทบบนส่วนปอดพาหะจะเป็นผลให้เกิดคู่อิเล็กตรอนโฮล (electron-hole pairs) ซึ่งจะสามารถเคลื่อนที่ได้เมื่อมีแรงดันตกคร่อมที่จุดนี้



รูปที่ 2.9 แสดงสัญลักษณ์ของโฟโตไดโอด

ภายในบริเวณปอดพาหะอิเล็กตรอนและโฮลจะเกิดการเคลื่อนที่เมื่อให้แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมเนื่องจากบริเวณปอดพาหะนี้มีความต้านทานสูง จึงทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า E ขึ้นได้ง่ายและเป็นตัวเร่งให้อนุภาคอิเล็กตรอนและอนุภาคโฮลเคลื่อนที่มีเพียงอนุภาคโฟตอนบางตัวหลุดออกส่วนปอดพาหะเข้าไปอยู่ในส่วน P และส่วน N ลักษณะของประจุที่เคลื่อนที่จะกระจายออกทำให้มีความเร็วต่ำและส่วนใหญ่จะกลับมารวมตัวกันตลอดระยะเวลาการเคลื่อนที่ซึ่งจะส่งผลให้กระแสที่เกิดจากแสงที่มีค่าต่ำไปด้วย

ถ้าเราขยายส่วนปอดพาหะให้มีระยะกว้างขึ้น ก็จะทำให้โอกาสที่จะสามารถดูดกลืนโฟตอนมีมากขึ้นเป็นผลให้กระแสที่เกิดจากแสงมีมากขึ้นด้วย จากผลดังกล่าวและผลจากการเพิ่มพื้นที่ในการตอบสนองสัญญาณแสงทำให้เกิดมีไดโอดชนิดใหม่ คือพิน-ไดโอด (Positive Intrinsic-Negative: PIN) นับว่าเป็นประโยชน์สำหรับกระแสที่ได้จะมีตัวเดียวกับกระแสนอนกลับของไดโอด (กระแสเกิดการรั่วไหล) ทำให้ค่ากระแสเกิดการรั่วไหล (leakage current) หรือกระแสที่เกิดในช่วงที่แสงมืด (dark current) มีค่าน้อย

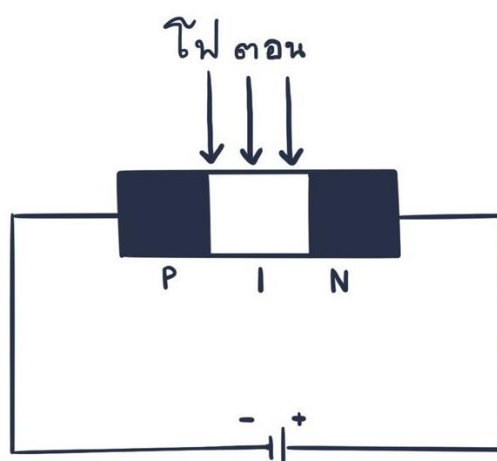
4.3.2 พิน-โฟโตไดโอด (PIN- photodiode)

โครงสร้างของพิน-โฟโตไดโอดจะประกอบด้วยส่วน P และส่วน N ที่มีส่วนซึ่งเป็นวัสดุบริสุทธิ์ (intrinsic material region) โดยวัสดุนี้ปราศจากการโด๊ปสารในส่วนนี้จะเป็นสารกึ่งตัวนำ (semiconductor) เช่นซิลิกอน (silicon) ก็จะเรียกว่าซิลิกอนไดโอด (silicon diode), เจอร์มันเนียม (germanium) ก็จะเรียกว่าเจอร์มันเนียมไดโอด (germanium diode) หรืออื่นๆ

ส่วนที่เป็นวัสดุบริสุทธิ์จะมีประจุที่เคลื่อนที่เพียงเล็กน้อยสำหรับสารกึ่งตัวนำทุกชนิดที่ใช้เป็นส่วนหลอดพาหะ แต่ในทางตรงกันข้ามพิน-โฟโต้ไดโอดที่ส่วนหลอดพาหะนี้ จะมีพาหะ(สารโด๊ป)ปนอยู่ก่อนเล็กน้อย จึงทำให้ไม่มีความจำเป็นที่ให้อิโอดเกิดการไบแอสย้อนกลับเพื่อขยายส่วนหลอดพาหะให้กว้างขึ้น พิน-โฟโต้ไดโอดนี้ทำงานแล้วจะให้การไบแอสย้อนกลับสำหรับระดับแรงเคลื่อนที่เกิดจากแสง (photovoltaic mode) และระดับของความนำไฟฟ้าที่เกิดจากแสง (photoconductive mode) มีค่าเป็นศูนย์

พื้นที่ของการตอบสนองต่อสัญญาณแสงที่ตกกระทบ (photosensitive area) จะเพิ่มขึ้นตามส่วนที่ปราศจากการโด๊ปสาร (intrinsic region) มีผลทำให้สัญญาณแสงมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยเมื่อเทียบกับพี-เอ็นโฟโต้ไดโอด เวลาในการตอบสนองสัญญาณแสงจะมีค่าลดลงทั้งนี้เนื่องจากประการแรกไม่ต้องมีตัวกำเนิดแสง (photogeneration) ที่ส่วน P และส่วน N (ส่วนที่ประจุมีการเคลื่อนที่อย่างช้า ๆ) เป็นสาเหตุให้การตอบสนองสัญญาณแสงเกิดขึ้นช้า ประการที่สองเนื่องจากส่วนหลอดพาหะมีขนาดกว้างขึ้นสภาพความเป็นตัวนำมีน้อยกว่า จึงทำให้การตอบสนองสัญญาณแสงเกิดขึ้นได้รวดเร็วขึ้น

ข้อดีทั้งสองข้อของพิน-โฟโต้ไดโอด จะได้เปรียบตัวรับแสงส่วนใหญ่ในเรื่องของความเร็วในการตอบสนองสัญญาณแสงและทำงานที่แรงดันต่ำพี-เอ็นโฟโต้ไดโอดจะทำงานที่ 20-30 โวลต์หรือสูงกว่าระดับค่าความนำของแสงที่เกิดขึ้น ในขณะที่พินโฟโต้ไดโอดจะทำงานที่ค่าแรงดันไบแอสย้อนกลับเท่ากับ 8-10 โวลต์ สำหรับค่าที่ระดับความนำที่เกิดจากแสงหรือที่แรงดันศูนย์โวลต์สำหรับระดับค่าแรงเคลื่อนที่เกิดจากแสงทั้งสองกรณีทีกล่าวมานั้นไม่ว่าจะเป็นการเพิ่มการไบแอสย้อนกลับ มีผลทำให้การตอบสนองสัญญาณแสงไวขึ้นและเวลาในการเคลื่อนที่ของอนุภาคอิเล็กตรอนจากส่วน P ไปสู่ส่วน N ได้เร็วขึ้นด้วย



รูปที่ 2.10 แสดงพิน-โฟโต้ไดโอด

4.3.3 อวาลานซ์โฟโตรีโอด (Avalanche photodiodes)

อวาลานซ์โฟโตรีโอด (avalanche photodiode: APD) จะมีคุณลักษณะพื้นฐาน (basic characteristic) เหมือนกับอวาลานซ์ไดโอดอนุภาคลิเล็กตรอนที่เป็นตัวกำเนิดแสง (photogenerated electrons) จะถูกเร่งด้วยแรงดันย้อนกลับที่มีค่าสูงพอและเกิดการชนกับอะตอมอื่นๆ เกิดเป็นอนุภาคลิเล็กตรอนอิสระขึ้นมาใหม่แล้วเป็นผลให้เกิดการชนอย่างต่อเนื่องและสุดท้ายก็จะได้เป็นอนุภาคลิเล็กตรอนที่มีค่าความนำ (Conduction electrons) อนุภาคลิเล็กตรอนที่เป็นตัวกำเนิดเกิดแสงเพียงหนึ่งอนุภาคสามารถเพิ่มเป็นทวีคูณได้อนุภาคลิเล็กตรอนอิสระมากกว่า 100 อนุภาคโดยปรากฏการณ์เพิ่มทวีคูณแบบอวาลานซ์ (avalanche multiplication effect) สนามที่เกิดขึ้นนี้มีการตอบสนองสัญญาณแสงของตัวรับแสงค่อนข้างสูง ที่ความไวแสงประมาณ 25-100 แอมแปร์ต่อวัตต์ เมื่อเปรียบเทียบกับพี-เอ็นโฟโตรีโอดจะมีค่าเพียง 0.5-0.8 แอมแปร์ต่อวัตต์

ผลของการเกิดปรากฏการณ์อวาลานซ์แรงดันไบแอสย้อนกลับที่ใช้จะมีค่าสูงซึ่งปกติ APD จะทำงานที่ค่าแรงดันไบแอสย้อนกลับประมาณ 40-400 โวลต์ ยิ่งแรงดันที่ใช้มีค่าสูงเวลาในการตอบสนองสัญญาณแสงจะมีระยะเวลาดำเนิน อนุภาคลิเล็กตรอนที่ได้จะมีความเร็วสูงหลังจากนั้นก็จะเคลื่อนที่ผ่านส่วน P และส่วน N

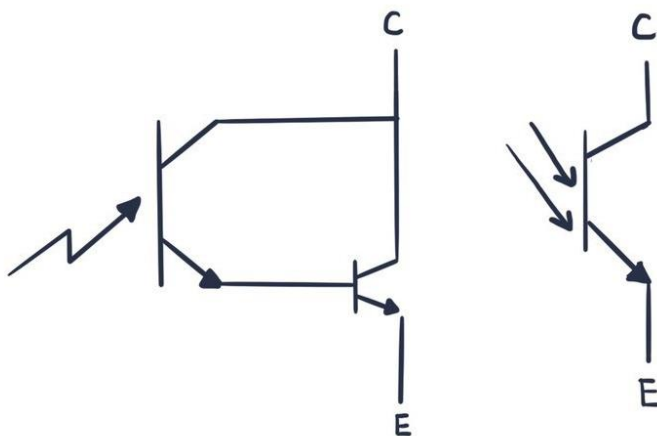
APD จะมีสัญญาณรบกวนภายในสูงกว่าพี-เอ็นโฟโตรีโอดหรือพิน-โฟโตรีโอดและมีการตอบสนองต่ออุณหภูมิมากกว่าด้วยสัญญาณรบกวนภายในเราจะสามารถทำการแก้ไขได้โดยต้องระมัดระวังค่าแรงดันที่ใช้

4.3.4 ตัวรับแสงชนิดอื่น

ตัวรับแสง 2 ชนิดที่มีลักษณะการทำงานเป็นแบบมีอัตราขยายจริง (active gain) คือ โฟโตทรานซิสเตอร์ (phototransistor) และพิน-เฟต (PIN-FET: Positive Intrinsic Negative-Field Effect Transister) ซึ่งทั้งสองสามารถทำงานที่ระดับแสงต่ำมาก

- โฟโตทรานซิสเตอร์สามารถที่จะทำงานเหมือนกับทรานซิสเตอร์ธรรมดาซึ่งกระแสที่ได้จะขึ้นอยู่กับแสงที่ตกกระทบ (incident light) โดยแสงผ่านโฟโตรีโอดมาที่ขาเบส (base) เข้าวงจรโดยสัญลักษณ์ของโฟโตรีโอด และอุปกรณ์อีกชนิดหนึ่งที่มีลักษณะคล้ายกันก็คือโฟโตรีโอดาร์ลิ่งตัน (photodarlington) ที่มีวงจรเป็นคาร์ลิงตันการนำสัญญาณเข้าผ่านมาทางขาเบสกระแสที่ผ่านมาจะถูกเปลี่ยนมาจากกำลังเข้าของ โดยตัวโฟโตทรานซิสเตอร์จะช้าและเหมาะกับการใช้งานที่ความเร็วต่ำ (ประมาณ 10 ไมโครวินาที)

- พิน-เฟตเป็นวงจรอินทิเกรต (integrated circuit) ที่มีตัวรับแสงเป็นแบบพินโฟโตรีโอด (PIN detector) และส่วนขยายสัญญาณเป็นเฟต (FEI amplifier) ในการปรับความไวในการรับแสงและลดสัญญาณรบกวนลงจะทำได้โดยการเพิ่มส่วนขยายสัญญาณที่เป็นเฟตเข้ากับพิน-โฟโตรีโอดรวมเป็นวงจรเดียวกันการรวมเป็นวงจรเดียวกันของพิน-เฟตเพื่อทำให้สามารถใช้งานได้กับความกว้างแถบ (Bandwidth) ที่กว้างกว่า 100 เมกะเฮิรตซ์



รูปที่ 2.11 แสดงสัญลักษณ์ของโฟโตทรานซิสเตอร์(ขวา)และสัญลักษณ์ตัวตรวจจับโฟโด้คาร์ลิงตัน

4.4 คุณสมบัติของตัวรับแสง Characteristics of photodetectors)

ความไม่เสถียรของตัวรับแสงจะพิจารณาจากคุณลักษณะที่เป็นองค์ประกอบของตัวรับแสงเองจำนวนพารามิเตอร์ (parameters) มาตรฐานเปลี่ยนไปอย่างไรองค์ประกอบที่เกิดกับความไวในการรับแสงกระแสที่เกิดขึ้นในช่วงมืด (dark current) ขนาดของความยาวคลื่นที่ความเข้มค่ายอด (peak wavelength) ช่วงเวลาขาขึ้นของสัญญาณตอบสนอง (rise time) กำลังสมมูลของสัญญาณรบกวน (noise-equivalent power) และพื้นที่ในการรับแสงจริง (active area) จะส่งผลต่อการทำงานของตัวรับแสงที่ประกอบมาดังนี้

4.4.1 บอกลักษณะรูปร่างของตัวรับ (outline) ว่ามีลักษณะอย่างไร

4.4.2 พื้นที่ส่วนรับแสงหรือพื้นที่ประสิทธิภาพ (the effective area) จะบอกมาเป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง

4.4.3 บอกช่วงของความยาวคลื่น (range) ใช้สำหรับไดโอดที่สามารถที่จะตอบสนองสัญญาณได้

4.4.4 บอกความไวในการรับรังสี (radiant sensitivity) หรือความไวในการตอบสนองสัญญาณ (responsivity) ในรูปของช่วงความยาวคลื่นเช่นเลเซอร์ชนิดฮีเลียมนีออน (helium neon laser) มีความยาวคลื่น 633 นาโนเมตรหรือเลเซอร์ชนิดแกเลียมอาแซไนด์ (GaAs laser) มีความยาวคลื่น 930 นาโน เมตร

4.4.5 บอกค่าของกระแสลัดวงจร (short-circuit current) ซึ่งเป็นกระแสที่เกิดขึ้นจากแหล่งกำเนิดแสงเฉพาะ (particular light source) เช่นที่กำลังแสง 100 ลักซ์ในขณะที่ไดโอดไม่มีการไบแอสเกิดขึ้น ($V_D = 0$)

4.4.6 กระแสที่เกิดขึ้นในช่วงมืด (dark current: I_D) เป็นกระแสที่เกิดจากไดโอดมีการไบแอสย้อนกลับ ในขณะที่ไม่มีแสงตกกระทบกระแสนี้จะทำให้เกิดสัญญาณรบกวนภายในขึ้น (internal noise) และในการออกแบบวงจรต้องคำนวณค่ากระแสรั่วไหลของไดโอด (leakage current) ด้วย

4.4.7 ช่วงเวลาขาขึ้นของสัญญาณ (rise time: t_r) ขณะที่โหลดมีค่า 50 โอห์ม (ohms) ค่า t_r จะเพิ่มขึ้นในลักษณะเป็นเส้นตรงกับค่า R_L ที่เพิ่มขึ้นถ้าช่วงทำงานมีความเร็วสูงภาระที่ต่อก็ควรจะมีค่าต่ำแต่ในทางกลับกันนั้นจะมีผลทำให้ขนาดแอมพลิจูด (amplitude) ของสัญญาณลดลง

4.4.8 ความถี่ช่วงตัด (cutoff frequency: f) ปกติจะอยู่ที่ความถี่ 3 เดซิเบลเป็นจุดที่มีการตอบสนองดีที่สุด กระแสที่เกิดขึ้นจะลดลงเมื่อความถี่ต่ำกว่าจุดนี้

4.4.9 สัญญาณรบกวนที่เนื่องจากความไม่สมดุลของกำลัง (noise equivalent power: NEP) เป็นกำลังของแสงที่ทำให้เกิดกระแสไหลผ่านโหลดจะต้องเท่ากับกระแสที่เกิดขึ้นกับสัญญาณรบกวนขณะที่ไดโอดเกิดการไบแอสย้อนกลับและไม่มีสัญญาณที่ด้านเข้ามา (ไม่มีแสงสัญญาณเกิดขึ้น) อิทธิพลที่ช่วยทำให้เกิดกระแสสัญญาณรบกวนก็คือกระแสที่เกิดในช่วงมืดของไดโอดเมื่อกระแสไหลผ่านก็จะมีกระแสที่เกิดจากสัญญาณรบกวนเกิดขึ้นในอัตราส่วนกับรากที่สองของช่วงความกว้างแถบที่ใช้ (bandwidth) หรือ NEP จะมีค่าเป็นวัตต์ต่อรากที่สองของความกว้างแถบ ($W / (BW)^{1/2}$) หรือวัตต์ต่อรากที่สองของค่าความเป็นเอิร์ตซ์

4.5 ความตรวจจับได้ของสัญญาณรบกวนและความกว้างและแคบของสัญญาณ

สำหรับสัญญาณแสงที่ถูกตรวจจับได้นั้น ควรจะมีขนาดเท่ากับสัญญาณรบกวนของตัวตรวจจับหรือมากกว่า นั่นคือความตรวจจับได้ (detectibility) ซึ่งจะหาได้จากสัญญาณรบกวนโดยทั่วไปของตัวตรวจจับ โดยจะไม่สนใจสัญญาณรบกวนภายนอกเนื่องจากขึ้นอยู่กับตัวแปรของวงจรเพราะว่าสัญญาณนี้ถูกตรวจจับจะอยู่ในนิพจน์ของกำลังด้านเข้าและสัญญาณรบกวนเป็นกระแสแบบสุ่มภายในค่า NEP ใช้เป็นการเชื่อมโยงระหว่างกระแสสัญญาณรบกวนและกำลังด้านเข้า

สัญญาณรบกวนภายในถูกกำหนดเป็นนิพจน์ของกระแสภายใน 2 ส่วนคือกระแสสัญญาณรบกวนแบบความร้อน (thermal noise current) หรือสัญญาณรบกวนจอห์นสัน (Johnson noise) ซึ่งมีสาเหตุมาจากกระแสแบบสุ่มในความต้านทานของตัวตรวจจับแสงและสัญญาณรบกวนแบบช็อต (shot noise) มีสาเหตุมาจากกระแสไฟตรงของไดโอดกระแสสัญญาณรบกวนทั้งหมด

Photo detector	Peak Wavelength (nm)	Reponsivity (A/W)	Dark Current Approximate (nA)	Rise time (ns) (50 Ω load)	Operating Voltage	NEP (W/Hz)	Note
Silicon P-N	550-850	0.4-0.7	1-5	5-10	20-40	10^{-13} - 10^{-14}	High Speed, highly linear Long wavelength,
Silicon PIN	850-950	0.6-0.8	3-300	1-5	5-40	10^{-13} - 10^{-14}	
InGaAs PIN	300-1500	0.8	10-30	1-3	5-40	10^{-13} - 10^{-14}	

Silicon APD	650-900	74-100	1	0.5-2	60-120	10^{-14}	highly linear High R, needs Bias stability
Phototransistor	800-900	70	25-100	5-15 μ s	10	No data	High R, stable operation

เซ็นเซอร์ (sensor)

เป็นอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณหรือปริมาณทางฟิสิกส์ต่างๆ เช่น อุณหภูมิ เสียง แสง แรงทางกล ความดันบรรยากาศ ระยะกระจัด ความเร็ว อัตราเร่ง ระดับของเหลว และอัตราการไหล จากนั้นจะทำหน้าที่เปลี่ยนเป็นสัญญาณออก หรือปริมาณเอาต์พุตที่ได้จากการวัดในอีกรูปแบบหนึ่งที่สามารถนำไปประมวลผลต่อได้

5.1 เซ็นเซอร์แบบ Photoelectric sensor

Photoelectric Sensor คือ เครื่องเซ็นเซอร์ที่ใช้แสงในการตรวจจับวัตถุโดยไม่ต้องมีการสัมผัส โดยมีคุณสมบัติพิเศษคือ มีการตอบสนองอย่างรวดเร็ว ระยะการตรวจจับไกล และ ที่สำคัญไม่ว่าวัตถุใดๆ Photoelectric Sensor ก็จะสามารถตรวจจับได้ เหมาะสำหรับการใช้งานที่ต้องการความเร็วในการตรวจจับและ ไม่มีการสัมผัสกับตัววัตถุ แต่การใช้งานเซ็นเซอร์ประเภทนี้ จะไม่ค่อยเหมาะกับการติดตั้งในบริเวณ ที่มีฝุ่นหรือสารเคมีที่สามารถกัดกร่อนอย่างรุนแรงได้ เนื่องจากจะทำให้ระยะในการตรวจจับ และความแม่นยำในการตรวจจับลดลงเป็นอย่างมาก

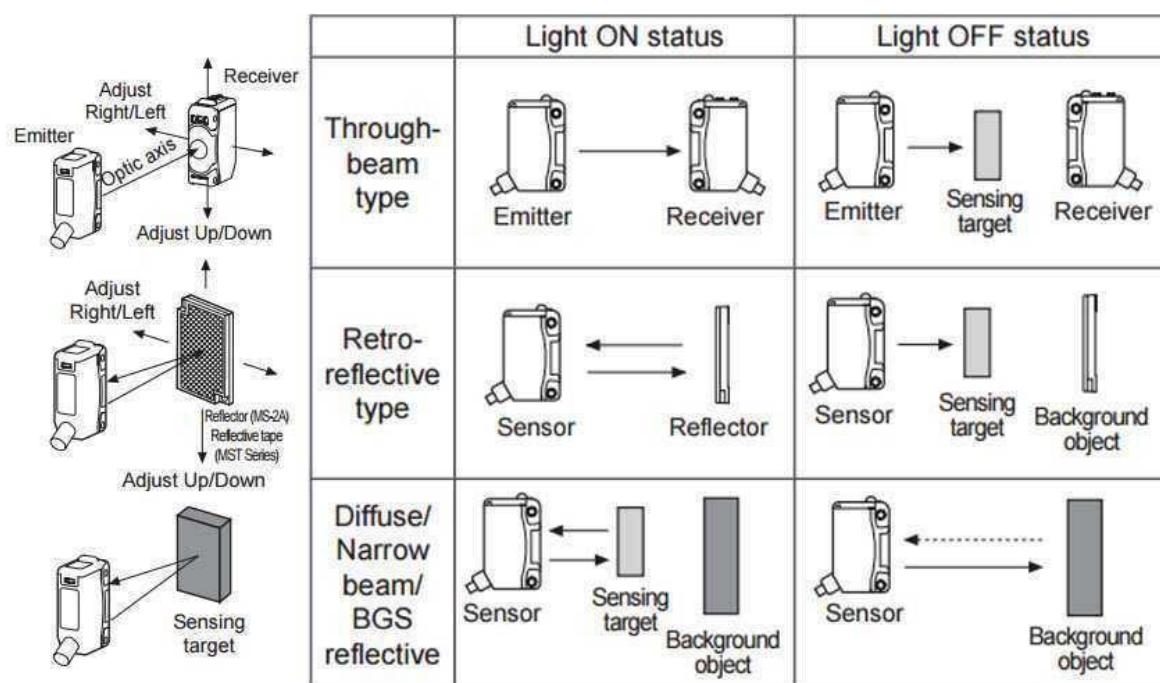
5.2 หลักการทำงานของเซ็นเซอร์แบบ Photoelectric sensor

Photoelectric Sensor จะอาศัยหลักการสะท้อนหรือการหักเหของแสง จากตัวส่ง ไปยังตัวรับ โดยภายในโครงสร้างของตัว Photoelectric Sensor จะประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลัก คือ ภาควัดสัญญาณ Emitter และภาควัดสัญญาณ Receiver

ซึ่งภาควัดสัญญาณแสงนั้น จะใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เรียกว่า Light Emitting Diode หรือ LED โดย LED จะมีหน้าที่สร้างแสงที่เป็นพัลส์ เพื่อส่งออกไปโดยแสงที่ส่งออกไปนั้น ก็จะขึ้นอยู่กับชนิดของ LED ว่าจะจะเป็นแบบ Visible Light หรือ Non Visible Light โดย Visible Light ก็จะเป็นแสงที่เราสามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า

เมื่อแสงที่ถูกส่งออกมาจากตัว LED ของ Emitter ถูกส่งต่อไปยังตัว Receiver โดยภายในประกอบด้วยตัว Photo Diode หรือ อีกชื่อหนึ่ง คือ Photo Transistor ซึ่งทำหน้าที่ในการรับแสง และ เปลี่ยนพลังงานแสงที่ได้รับให้เป็นพลังงานไฟฟ้า เพื่อถูกส่งไปยังวงจรฟิลเตอร์ความถี่ PLL หรือ (Phase Lock Loop) ต่อจากนั้นจะเป็นการกรอง

เฉพาะความถี่ ให้ตรงกับแสงที่ตัวส่งเป็นผู้ส่งมาเท่านั้น โดยจะตัดตัวความถี่อื่นๆ ที่ไม่เกี่ยวข้องออกไปเมื่อมีวัตถุหรือชิ้นงานวิ่งผ่าน ก็จะทำให้ตัวรับไม่สามารถรับสัญญาณแสงได้ ซึ่งทำให้ภาควจรตรวจจับสามารถรับรู้ได้ว่าการเปลี่ยนแปลงแล้วจะส่งต่อไปยังภาคขับเอาต์พุต เพื่อเปลี่ยนแปลงสถานะเอาต์พุตต่อไป



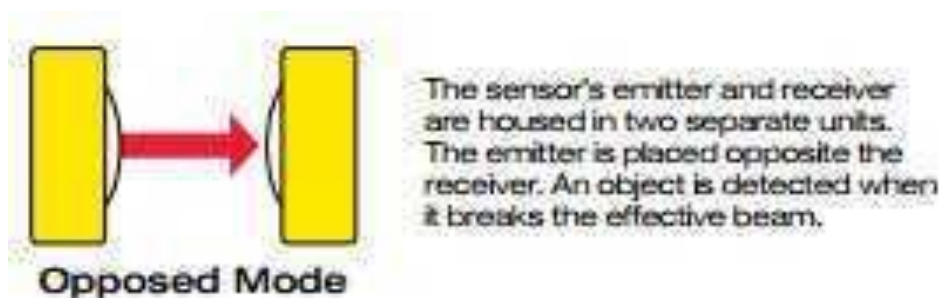
รูปที่ 2.12 แสดงการทำงานของ Photoelectric Sensor

(ที่มา <https://mall.factomart.com/principle-of-photoelectric-sensor/>)

5.3 ประเภทของเซ็นเซอร์แบบ Photoelectric sensor

5.3.1 ประเภท Opposed Mode, Through Beam Photoelectric sensor

เป็นโฟโต้เซ็นเซอร์แบบตัวรับ-ตัวส่ง อยู่แยกกันเมื่อถึงเวลาการใช้งานจะวางให้อยู่ตรงข้ามกัน ซึ่งเป็นโฟโต้เซ็นเซอร์ที่สามารถตรวจจับวัตถุที่มีขนาดใหญ่ และช่วงระยะในการตรวจจับมากที่สุด ซึ่งในสภาวะการทำงานปกติตัวรับ Receiver จะสามารถรับสัญญาณแสงจากตัวส่ง Emitter ได้ตลอดเวลา โดยเซ็นเซอร์แบบนี้จะทำหน้าตรวจจับวัตถุที่เคลื่อนที่ตัดผ่านหน้าเซ็นเซอร์ ซึ่งวัตถุหรือชิ้นงานที่ผ่านหน้าเซ็นเซอร์จะขวางลำแสงที่ส่งจากตัวส่ง Emitter ไปยังตัวรับ Receiver เมื่อลำแสงไม่สามารถถึงตัวรับ จะทำให้วงจรภายในรับรู้ได้ว่า มีวัตถุหรือชิ้นงานขวางอยู่ ทำให้สถานะของเอาต์พุตของตัวรับเปลี่ยนแปลงไป โดยเราเรียกลักษณะการทำงานแบบนี้ว่า Dark On หรือ Dark Operate



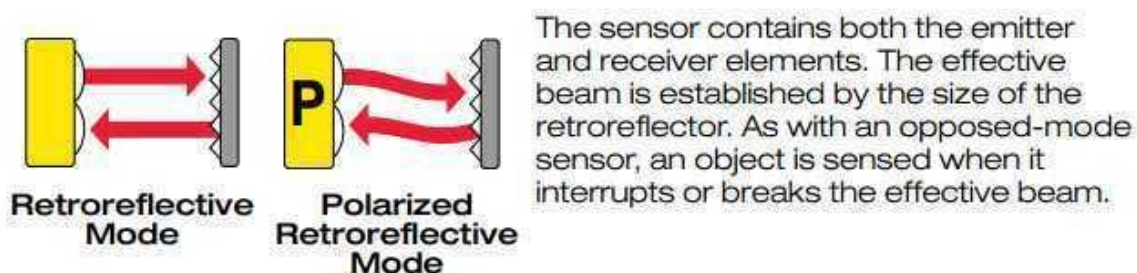
รูปที่ 2.13 แสดงการทำงานของ Photoelectric sensor แบบ Opposed Mode

(ที่มา <https://mall.factomart.com/type-of-photoelectric-sensor/>)

5.3.2 ประเภท Retro-reflective Photoelectric sensor

โฟโต้เซ็นเซอร์แบบใช้งานคู่กับแผ่นสะท้อนภายในตัวเซ็นเซอร์แบบนี้จะมีตัวส่ง Emitter และตัวรับ Receiver ติดตั้งภายในตัวเดียวกัน ทำให้ไม่จำเป็นต้องเดินสายไฟทั้งสองฝั่งเหมือนแบบ Opposed Mode ทำให้การติดตั้งใช้งานได้ง่ายกว่า แต่อย่างไรก็ตามจำเป็นต้องติดตั้งตัวแผ่นสะท้อนหรือ Reflector ไว้ตรงข้ามกับตัวเซ็นเซอร์เอง โดยโฟโต้เซ็นเซอร์แบบที่ใช้แผ่นสะท้อนแบบนี้จะเหมาะสำหรับชิ้นงานที่มีลักษณะทึบแสงไม่เป็นมันวาว เนื่องจากอาจทำให้ตัวเซ็นเซอร์เข้าใจผิดว่าเป็นตัวแผ่นสะท้อน และทำให้ทำงานผิดพลาดได้เซ็นเซอร์แบบนี้จะมีช่วงในการทำงานหรือระยะในการตรวจจับจะได้ใกล้กว่าแบบ Opposed mode ซึ่งในสภาวะการทำงานปกติตัวรับ Receiver จะสามารถรับสัญญาณแสงจากตัวส่ง Emitter ได้ตลอดเวลา เนื่องจากลำแสงจะสะท้อนกับแผ่นสะท้อน Reflector อยู่ตลอดเวลาหน้าที่หลักของเซ็นเซอร์ชนิดนี้จะคอยตรวจจับวัตถุที่เคลื่อนที่ตัดผ่านหน้าเซ็นเซอร์ เมื่อวัตถุหรือชิ้นงานผ่านเข้ามาที่หน้าเซ็นเซอร์ แล้วจะการขวางลำแสงที่ส่งจากตัวส่ง Emitter ที่ส่งไปยังแผ่นสะท้อน จึงทำให้ตัวรับ Receiver ไม่สามารถรับลำแสงที่จะสะท้อนกลับมาได้ซึ่งจะทำให้วงจรภายในรับรู้ได้ว่า มีวัตถุหรือชิ้นงานขวางอยู่ ทำให้สถานะของเอาต์พุตของตัวรับเปลี่ยนแปลงไป โดยเราเรียกลักษณะการทำงานแบบนี้ว่า Dark On หรือ Dark Operate นอกจากนี้ตัว Photoelectric sensor ที่ใช้แผ่นสะท้อน สามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ ได้ดังนี้ Non Polarization Photoelectric sensor / Polarization

Photoelectric sensor



รูปที่ 2.14 แสดงการทำงานของ Photoelectric sensor แบบ Retro-reflective

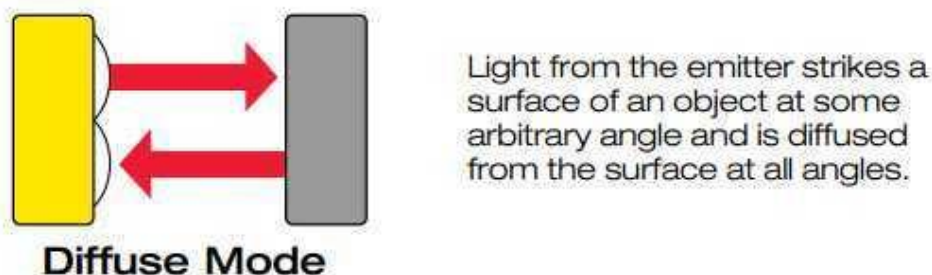
(ที่มา <https://mall.factomart.com/type-of-photoelectric-sensor/>)

5.3.3 ประเภท Diffuse mode, Proximity mode

โฟโต้เซ็นเซอร์แบบสะท้อนกับวัตถุโดยตรงภายในตัวเซ็นเซอร์แบบนี้จะมีตัวส่ง Emitter และตัวรับ Receiver ติดตั้งภายในตัวเดียวกัน ทำให้ไม่จำเป็นต้องเดินสายไฟทั้งสองฝั่งเหมือนแบบ Opposed Mode ทำให้การติดตั้งใช้งานได้ง่ายกว่า โฟโต้เซ็นเซอร์แบบสะท้อนกับวัตถุเซ็นเซอร์ชนิดนี้จะใช้ในการ ตรวจจับชิ้นงานที่มีลักษณะทึบแสงและโปร่งแสงได้ ซึ่งในสภาวะการทำงานปกติตัวรับ Receiver จะไม่สามารถรับสัญญาณจากตัวส่ง Emitter ได้ เนื่องจากไม่มีวัตถุที่จะทำหน้าที่เป็นตัวสะท้อนลำแสงกลับมายังตัวรับ Receiver โดยเซ็นเซอร์แบบนี้จะทำหน้าที่ตรวจจับวัตถุที่เคลื่อนที่ตัดผ่านที่หน้าของเซ็นเซอร์ โดยวัตถุหรือชิ้นงานที่ผ่านหน้าเซ็นเซอร์ จะทำหน้าที่สะท้อนลำแสงที่ส่งมาจากตัวส่ง Emitter กลับไปยังตัวรับ จึงทำให้ตัวรับ Receiver สามารถรับลำแสงที่จะสะท้อนกลับมาได้ ซึ่งจะช่วยให้วงจรภายในรับรู้ได้ว่า มีวัตถุหรือชิ้นงานขวางอยู่ ทำให้สถานะของเอาต์พุตของตัวรับเปลี่ยนแปลงไป โดยเราเรียกลักษณะการทำงานแบบนี้ว่า Light On หรือ Light Operate นอกจากนี้ตัว Photoelectric sensor ที่ใช้แผ่นสะท้อน สามารถแบ่งประเภทย่อยได้ดังนี้

5.3.3.1 ประเภท Diffuse Mode

เป็นโหมดการทำงานพื้นฐานสุดของ Photoelectric sensor แบบ Diffuse mode ซึ่งแสงที่ส่งออกจากตัว Emitter นั้น จะทำมุมกับตัวเซ็นเซอร์เอง แต่ตัวรับหรือ Receiver นั้นจะรับเฉพาะแสงที่สะท้อนกับวัตถุแล้วส่งกลับมามากับตัวรับเท่านั้น ซึ่งการทำงานแบบนี้ ในเรื่องของสี ขนาด และความสว่างของวัตถุ มีผลต่อระยะทางในการตรวจจับทั้งสิ้น

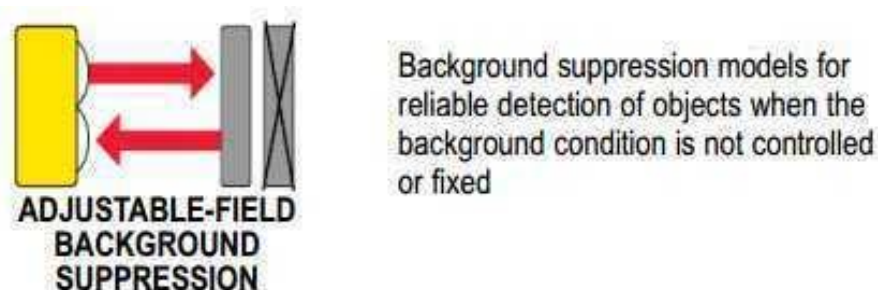


รูปที่ 2.15 แสดงการทำงานของ Photoelectric sensor แบบ Diffuse

(ที่มา <https://mall.factomart.com/type-of-photoelectric-sensor/>)

5.3.3.2 Background Suppression

เป็นโฟโต้เซ็นเซอร์ชนิดหนึ่งที่อยู่ในกลุ่มของ Diffuse Mode โดยโฟโต้เซ็นเซอร์แบบ Background Suppression นั้น ถูกออกแบบมาให้แก้ปัญหาในการตรวจจับวัตถุที่มีตำแหน่งในการตรวจจับวางอยู่ใกล้กับตัวพื้นหลัง ซึ่งอาจมีลักษณะของพื้นผิวที่ใกล้เคียงกับชิ้นงานจนทำให้บางครั้งตัวเซ็นเซอร์แบบธรรมดาไม่สามารถแยกแยะระหว่างชิ้นงานกับพื้นหลังได้ ทำให้การทำงานเกิดความผิดพลาดแต่สำหรับ Photoelectric sensor background suppression นั้นจะอาศัยหลักการทำงานแบบสามเหลี่ยมมุมฉาก โดยตัว Emitter จะส่งสัญญาณแสงเป็นเส้นตรงโดยตั้งฉากกับเลนส์ ส่วนภาครับจะติดตั้งให้ทำมุมกับภาคส่ง เพื่อแสงสะท้อนกับชิ้นงานแล้วกลับมายังภาครับ ซึ่งภาครับของตัว Photosensor แบบ Background Suppression จะประกอบไปด้วย Photo Transistor 2 ชุด ซึ่งทำหน้าที่รับสัญญาณแสงที่จะสะท้อนกลับมา และทำการเปรียบเทียบกับเป็นวงจร Window Comparator เพื่อให้สามารถรับรู้ได้ว่าตำแหน่งที่ต้องการตรวจจับอยู่ที่ตรงไหน โดย Photo Transistor ทั้งสองชุดจะจดจำค่าระดับของแสงที่รับได้เอาไว้ ก็จะสามารถจำกัดระยะทางในการตรวจจับได้ ตามขนาดของมุมที่สะท้อนกลับมา

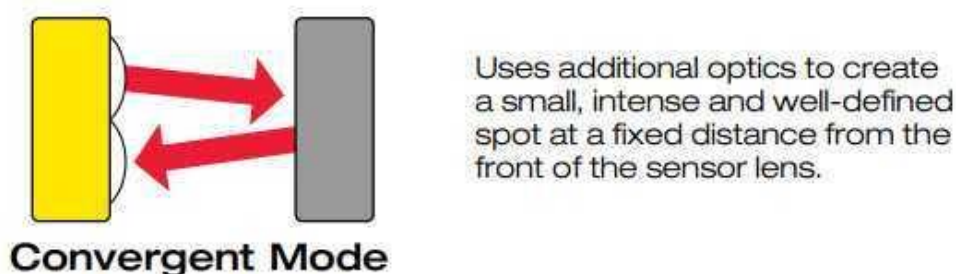


รูปที่ 2.16 แสดงการทำงานของ Photoelectric sensor แบบ Background Suppression

(ที่มา <https://mall.factomart.com/type-of-photoelectric-sensor/>)

5.3.3.3 Convergent

เป็นโฟโต้เซ็นเซอร์ชนิดหนึ่งที่อยู่ในกลุ่มของ Diffuse Mode โดยโฟโต้เซ็นเซอร์แบบ Convergent นั้น ถูกออกแบบมาให้ตรวจจับวัตถุในลักษณะของการจำกัดพื้นที่ หรือ ย่านในการตรวจจับ โดยจะตรวจจับชิ้นงาน หรือวัตถุเฉพาะที่อยู่ในย่านการตรวจจับเท่านั้น โดยอาศัยการสร้างพื้นที่ในการตรวจจับจากการทำมุมของตัวส่ง และตัวรับภายในเซ็นเซอร์เอง

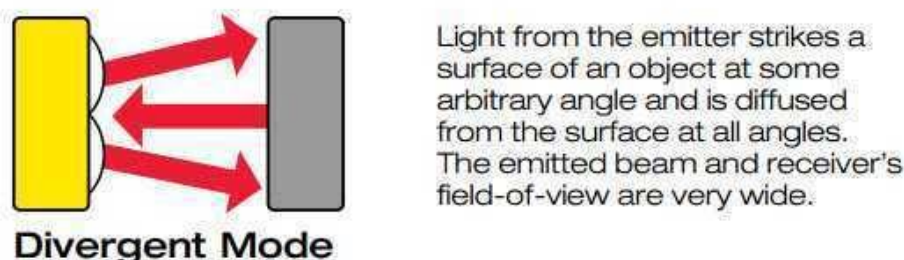


รูปที่ 2.17 แสดงการทำงานของ Photoelectric sensor แบบ Convergent

(ที่มา <https://mall.factomart.com/type-of-photoelectric-sensor/>)

5.3.3.4 Divergent

เป็นโฟโต้เซ็นเซอร์ชนิดหนึ่งที่อยู่ในกลุ่มของ Diffuse Mode โดยโฟโต้เซ็นเซอร์แบบ Divergent ถูกออกแบบมาให้แก้ปัญหาในการตรวจจับวัตถุที่มีความมันวาว หรือมีขนาดเล็กๆ ซึ่งในบางครั้งการใช้ตัวเซ็นเซอร์แบบธรรมดา นั้น ไม่สามารถตรวจจับและทำให้การทำงานผิดพลาดได้แต่สำหรับ Divergent นั้น จะอาศัยหลักการการทำงานโดยการลดย่านในการตรวจจับให้สั้นลง เพื่อให้สามารถตรวจจับวัตถุที่มีความมันวาวได้ โดยจะทำให้เกิดการกระจายแสง หรือสะท้อนกลับของแสงแบบกระจาย แต่จะมีแสงบางส่วนเท่านั้นที่สะท้อนมาตรงกับตัวเซ็นเซอร์ ซึ่งเป็นผลทำให้ให้ระยะในการตรวจจับสั้นลง



รูปที่ 2.18 แสดงการทำงานของ Photoelectric sensor แบบ Divergent

(ที่มา <https://mall.factomart.com/type-of-photoelectric-sensor/>)

ความรู้พื้นฐานของบอร์ด Arduino และโปรแกรม Arduino

6.1 ความเป็นมาของ Arduino

Arduino เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR ใช้ในการเขียนโปรแกรมในการควบคุมในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สามารถเชื่อมต่อกับชนิดของมอเตอร์ เซนเซอร์และอุปกรณ์มีการพัฒนาทั้งด้านฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์

6.1.1 ฮาร์ดแวร์ (Hardware)

เป็นบอร์ดอิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กที่มีไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นส่วนหลักประกอบด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่นๆ เรียกว่า “บอร์ด Arduino” โดยในแต่ละรุ่นมีความแตกต่างกันของขนาดและสเปค

6.1.2 ซอฟต์แวร์ (Software)

6.1.2.1 ภาษาที่ใช้เขียนโค้ดควบคุมบอร์ด Arduino เป็นภาษาสำหรับเขียนโปรแกรมควบคุมที่มีไวยากรณ์แบบเดียวกับภาษา C/C++

6.1.2.2 Arduino IDE เป็นเครื่องมือสำหรับเขียนโค้ดโปรแกรม การคอมไพล์โปรแกรม (การแปลงไฟล์ภาษาซีให้เป็นภาษาเครื่อง) และอัปโหลดโปรแกรมลงบอร์ด

6.2 บอร์ดอาดูอิน

Arduino อ่านว่า (อา-ดู-อิ-โน้ หรือ อาดูอิน) เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR ในรูปแบบโอเพนซอร์ส (Open Source) คือการเปิดเผยข้อมูลทั้งด้านฮาร์ดแวร์ (Hardware) และซอฟต์แวร์ (Software) โดยตัวฮาร์ดแวร์ใช้งานง่ายราคาถูก ส่วนด้านซอฟต์แวร์จะเป็นคำสั่งที่ไม่ซับซ้อนสามารถพัฒนาได้ จึงเหมาะสมสำหรับผู้เริ่มต้นพัฒนาจนถึงการพัฒนาแบบขั้นสูง เนื่องจากสามารถพัฒนาต่อร่วมกับอุปกรณ์ในการใช้งานได้ง่าย โดยการต่ออุปกรณ์เสริมต่าง ๆ นั้นผู้ใช้งานสามารถต่อวงจรอิเล็กทรอนิกส์จากภายนอกแล้วเชื่อมต่อเข้ามาที่ขา I/O ของบอร์ดได้ บอร์ดอาดูอินที่ถูกพัฒนาจาก Wiring ได้พัฒนาบอร์ดอาดูอินให้มีความเหมาะสมกับการใช้งานเพิ่มขึ้นและได้ลดข้อจำกัดของบอร์ดตระกูลไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR เบอร์ ATmega128 ลงโดยได้พัฒนาไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR ขนาดเล็กคือ ATmega8 และ ATmega168 ทำให้ได้รับความนิยมจนถึงปัจจุบัน บอร์ด Arduino Uno R3 เป็นบอร์ดรุ่นแรกที่มีผลิตออกมามีขนาดประมาณ 68.6 x 53.4 mm. เป็นบอร์ดมาตรฐานที่นิยมใช้งานมากที่สุดเนื่องจากเป็นขนาดที่เหมาะสมสำหรับการเริ่มต้นเรียนรู้ Arduino และมี Shields ให้เลือกใช้งานได้มากกว่าบอร์ด Arduino รุ่นอื่นและได้รับความนิยมมากที่สุดเนื่องจากราคาไม่แพง ส่วนใหญ่โปร

เจกและ Library ที่ถูกพัฒนาขึ้นมา Support จะอ้างอิงกับบอร์ดนี้เป็นหลักข้อดีอีกอย่างคือกรณีที่ MCU เสีย
ผู้ใช้งานสามารถซื้อมาเปลี่ยนเองได้ง่าย



รูปที่ 2.19 บอร์ด Arduino รุ่น Uno R3

(ที่มา <https://www.myarduino.net>)

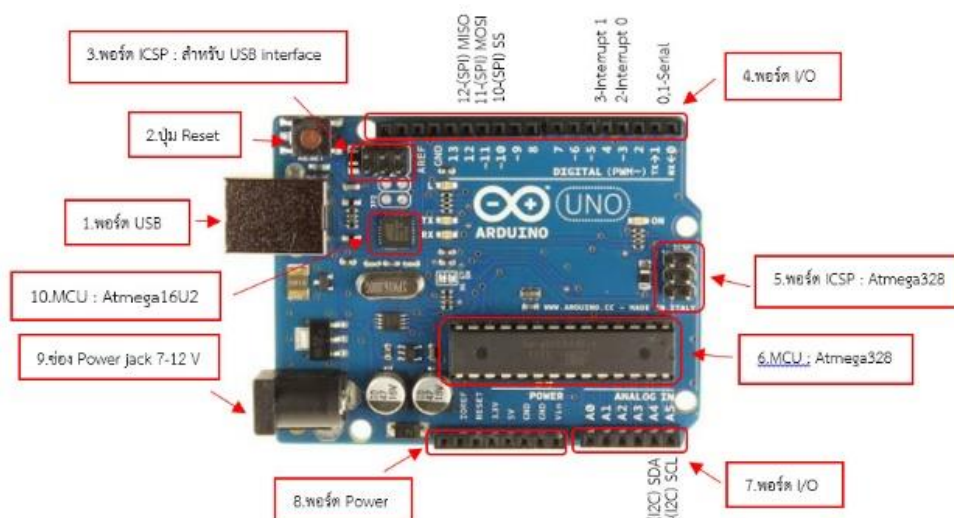
ตารางแสดงข้อมูลจำเพาะของบอร์ด Arduino Uno R3

ข้อมูล	รายละเอียด
ชิปไอซีไมโครคอนโทรเลอร์	ATmega328
แรงดันไฟฟ้า	5 V
รองรับการจ่ายแรงดันไฟฟ้า (แนะนำ)	7-12 V
รองรับการจ่ายแรงดันไฟฟ้า (จำกัด)	6-20 V
พอร์ต Digital input/output	14 พอร์ต (มี 6 พอร์ต PWW output)
พอร์ต Analog input	6 พอร์ต
กระแสไฟที่จ่ายได้ในแต่ละพอร์ต	40 mA
กระแสไฟที่จ่ายได้ใน 3.3 V	50 mA
พื้นที่โปรแกรมภายใน	32 KB พื้นที่โปรแกรม, 500B ใช้โดย Boot Loader
พื้นที่แรม	2 KB
พื้นที่หน่วยความจำถาวร (EEPROM)	1 KB
ความถี่คริสตัล	16 MHz
ขนาด	68.6 x 53.4 mm
น้ำหนัก	25 กรัม

ตารางแสดงคุณสมบัติต่างๆ ของบอร์ด Arduino แต่ละรุ่น

	Processor					Input / Output							Power				Connectivity					
	Family	SRAM	FLASH	EEPROM	Clock	Digital I/O	Analog In	ADC Bits	PWM	UART	Analog Out	DAC Bits	VCC	Vin Range	5V	3V3	Serial	USB - Serial	I2C	Ethernet	USB-Host	SD Card
Arduino UNO R3	ATmega328	2k	32k	1k	16MHz	14	6	10	6	1	N/A	N/A	5V	7-12V	Yes	Yes	ATmega16U2		1	No	No	No
Arduino UNO SMD	ATmega328	2k	32k	1k	16MHz	14	6	10	6	1	N/A	N/A	5V	7-12V	Yes	Yes	ATmega16U2		1	No	No	No
Arduino Mega 2560 R3	ATmega2560	8k	256k	4k	16MHz	54	16	10	14	4	N/A	N/A	5V	7-18V	Yes	Yes	ATmega16U2		1	No	No	No
Arduino Mega ADK	ATmega2560	8k	256k	4k	16MHz	54	16	10	14	4	N/A	N/A	5V	7-18V	Yes	Yes	ATmega16U2		1	MAX3421E	No	No
Arduino Leonardo	ATmega32U4	2.5k	32k	1k	16MHz	25	12	10	7	1	N/A	N/A	5V	7-12V	Yes	Yes	Built-In		1	No	No	No
Arduino Mini 05	ATmega328	2k	32k	1k	16MHz	14	6	10	6	1	N/A	N/A	5V	7V-9V	Yes	No	N/A		1	No	No	No
Arduino Pro Mini 328 - 3.3V	ATmega328	2k	32k	1k	8MHz	14	6	10	6	1	N/A	N/A	3.3V	5V-12V	No	Yes	N/A		1	No	No	No
Arduino Pro Mini 328 – 5V	ATmega328	2k	32k	1k	16MHz	14	6	10	6	1	N/A	N/A	5V	7V-12V	Yes	No	N/A		1	No	No	No
Arduino Ethernet with PoE module	ATmega328	2k	32k	1k	16MHz	9	6	10	4	1	N/A	N/A	5V	6-18V	Yes	Yes	N/A		1	No	No	No
Arduino Ethernet without PoE module	ATmega328	2k	32k	1k	16MHz	9	6	10	4	1	N/A	N/A	5V	6-18V	Yes	Yes	N/A		1	No	No	No
Arduino DUE	SAM3X8E	96kb	512k	N/A	84MHz	70	12	12	12	4	2	12	3.3V	7-12V	No	VC C	Built-In		2	No	Yes	No

ส่วนประกอบของบอร์ด Arduino Uno R3



รูปที่ 2.20 ส่วนประกอบของบอร์ด Arduino

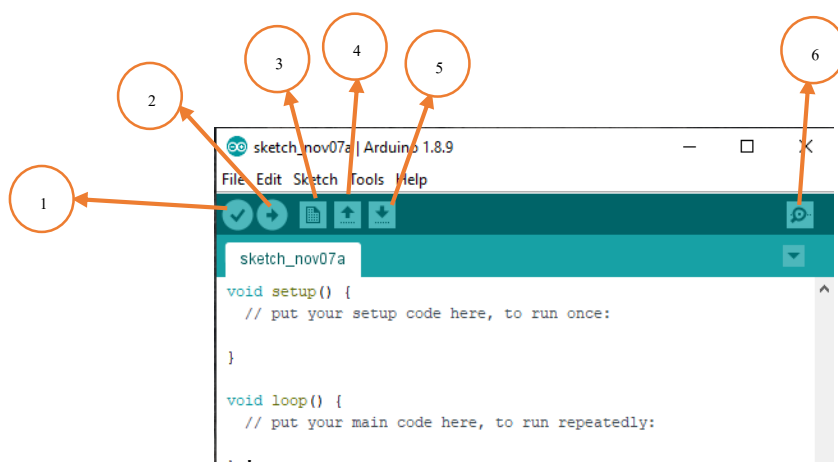
(ที่มา <https://www.thaieasyelec.com>)

1. USB Port: ใช้สำหรับต่อกับ Computer เพื่ออัปโหลดโปรแกรมเข้า MCU และจ่ายไฟให้กับบอร์ด
2. Reset Button: เป็นปุ่ม Reset ใช้กดเมื่อต้องการให้ MCU เริ่มการทำงานใหม่
3. ICSP Port ของ Atmega16U2 เป็นพอร์ตที่ใช้โปรแกรม Visual Com port บน Atmega16U2
4. I/O Port: Digital I/O ตั้งแต่ขา D0 ถึง D13 นอกจากนี้ บาง Pin จะทำหน้าที่อื่นๆ เพิ่มเติมด้วย เช่น Pin0,1 เป็นขา Tx,Rx Serial, Pin3,5,6,9,10 และ 11 เป็นขา PWM
5. ICSP Port: Atmega328 เป็นพอร์ตที่ใช้โปรแกรม Bootloader
6. MCU: Atmega328 เป็น MCU ที่ใช้บนบอร์ด Arduino
7. I/O Port: นอกจากจะเป็น Digital I/O แล้ว ยังเปลี่ยนเป็น ช่องรับสัญญาณอนาล็อก ตั้งแต่ขา A0-A5
8. Power Port: ไฟเลี้ยงของบอร์ดเมื่อต้องการจ่ายไฟให้กับวงจรภายนอก ประกอบด้วยขาไฟเลี้ยง +3.3 V, +5V, GND, Vin
9. Power Jack: รับไฟจาก Adapter โดยที่แรงดันอยู่ระหว่าง 7-12 V
10. MCU ของ Atmega16U2 เป็น MCU ที่ทำหน้าที่เป็น USB to Serial โดย Atmega328 จะติดต่อกับ Computer ผ่าน Atmega16U2

6.3 โปรแกรมสำหรับการใช้งานบอร์ดอาดูอิน

สำหรับการสั่งการโดยใช้บอร์ดอาดูอินเพื่อควบคุมการทำงานจะต้องดาวน์โหลดโปรแกรม Arduino IDE Program ลงคอมพิวเตอร์โดยสามารถดาวน์โหลดได้จาก <https://www.arduino.cc/en/main/software> สำหรับคำสั่งที่ใช้ในการพิมพ์ในโปรแกรม Arduino IDE จะต้องเป็นภาษาซี

6.3.1 ส่วนประกอบของโปรแกรม Arduino IDE

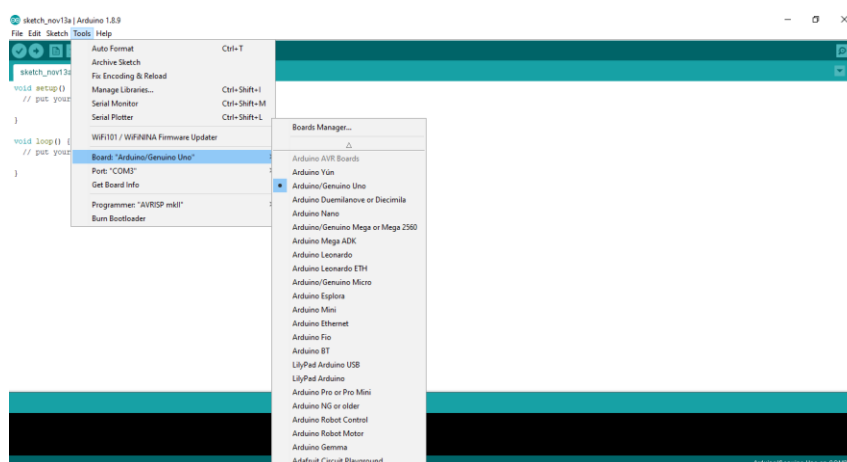


รูปที่ 2.21 แสดงส่วนประกอบของโปรแกรม Arduino IDE

- 1) Verify/compile ตรวจสอบโค้ดโปรแกรม
- 2) Upload คอมไพล์พร้อมกับอัปโหลดโปรแกรมไปที่บอร์ด Arduino
- 3) New สร้างไฟล์ใหม่
- 4) Open เปิดไฟล์ที่ได้บันทึกไว้ รวมถึงโค้ดโปรแกรมตัวอย่าง
- 5) Save บันทึกไฟล์
- 6) Serial Monitor แสดงผลเอาต์พุตจากบอร์ดมายังจอคอมพิวเตอร์

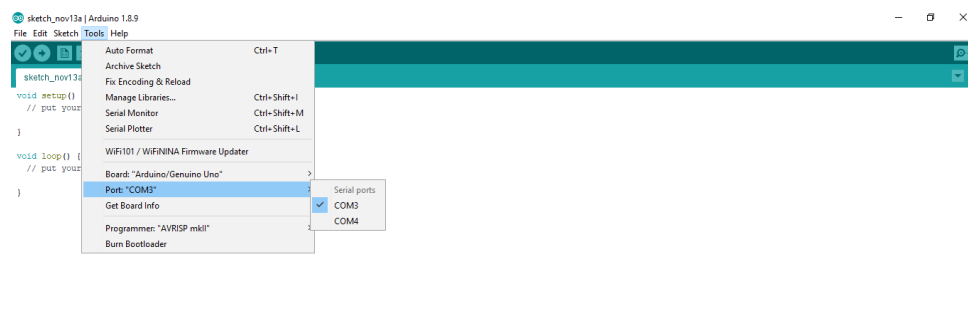
6.3.2 การใช้งานเบื้องต้นสำหรับโปรแกรม Arduino IDE

ขั้นที่ 1 เปิดโปรแกรม Arduino IDE Program ---> Tools ---> Board เพื่อเลือก Board ให้ตรงกับบอร์ดอาคู่ยโน้ที่ใช้งาน



รูปที่ 2.22 แสดงขั้นตอนการเลือกบอร์ดอาคู่ยโน้

ขั้นที่ 2 เปิดโปรแกรม Arduino IDE Program ---> Tools ---> Port เพื่อเลือก Port ให้ตรงกับบอร์ดอาคู่ยโน้



รูปที่ 2.23 แสดงการเลือกPort ให้ตรงกับที่ใช้งาน

6.3.3 โครงสร้างพื้นฐานของภาษาซีที่ใช้กับ Arduino IDE

ภาษาซีของ Arduino จะจัดรูปแบบโครงสร้างของการเขียนโปรแกรมออกเป็นส่วนย่อยหลายๆส่วน โดยเรียกแต่ละส่วนว่าฟังก์ชันและเมื่อนำฟังก์ชันมารวมเข้าด้วยกัน ก็จะเรียกว่าโปรแกรม โดยโครงสร้างการเขียนโปรแกรมของ Arduino นั้น ทุกๆโปรแกรมจะต้องประกอบไปด้วยฟังก์ชันจำนวนเท่าใดก็ได้ แต่อย่างน้อยที่สุดต้องมีฟังก์ชัน จำนวน 2 ฟังก์ชัน คือ setup() และ loop() ซึ่งฟังก์ชัน ทั้ง 2 ส่วนนี้มีรูปแบบโครงสร้างที่เหมือนกัน แต่ถูกกำหนดด้วยชื่อฟังก์ชันเป็นการเฉพาะ คือ setup() และ loop() โดย setup() จะเขียนไว้ก่อน loop() ซึ่งทั้ง 2 ฟังก์ชันนี้ มีขอบเขต เริ่มต้นและสิ้นสุด อยู่ภายใต้เครื่องหมาย{ }

```
void setup() {
    // put your setup code here, to run once:

}

void loop() {
    // put your main code here, to run repeatedly:

}
```

โครงสร้างพื้นฐานของภาษาซีที่ใช้กับ Arduino นั้นจะประกอบไปด้วย 3 ส่วนใหญ่ด้วยกัน คือ

1. Header ในส่วนนี้จะมีหรือไม่มีก็ได้ ถ้ามีต้องกำหนดไว้ในส่วนเริ่มต้นของโปรแกรม ซึ่งส่วนของ Header ได้แก่ ส่วนที่เป็น Compiler Directive ต่างๆรวมไปถึงส่วนของการประกาศตัวแปร และค่าคงที่ต่างๆที่จะใช้ในโปรแกรม

2. setup() ในส่วนนี้เป็นฟังก์ชันบังคับที่ต้องกำหนดให้มีในทุกๆโปรแกรม ถึงแม้ว่าในบางโปรแกรมจะไม่ต้องการใช้งานก็ยังจำเป็นต้องประกาศไว้ด้วยเสมอ เพียงแต่ไม่ต้องเขียนคำสั่งใดๆไว้ในระหว่างวงเล็บปีกกา {} ที่ใช้เป็นตัวกำหนดขอบเขตของฟังก์ชัน โดยฟังก์ชันนี้จะใช้สำหรับบรรจุคำสั่งในส่วนที่ต้องทำให้โปรแกรมทำงานเพียงรอบเดียวตอนเริ่มต้นทำงานของโปรแกรมครั้งแรกเท่านั้น ซึ่งได้แก่คำสั่งเกี่ยวกับการ Setup ค่าการทำงานต่างๆ เช่น การกำหนดหน้าที่การใช้งานของ PinMode และการกำหนดค่า Baudrate สำหรับใช้งานพอร์ตสื่อสารอนุกรม เป็นต้น

3.loop() เป็นส่วนฟังก์ชันบังคับที่ต้องกำหนดให้มีในทุกๆโปรแกรมเช่นเดียวกับฟังก์ชัน setup() โดยฟังก์ชัน loop() นี้จะใช้บรรจุกำสั่งที่ต้องการให้โปรแกรมทำงานเป็นวงรอบซ้ำๆกันไปไม่รู้จบ ซึ่งถ้าเปรียบเทียบกับรูปแบบของ ANSI-C ส่วนนี้ก็คือ ฟังก์ชัน main() นั่นเอง

```
#include <header.h>
```

เมื่อพบคำสั่ง #include ตัวแปลภาษาของ Arduino จะไปค้นหาไฟล์ที่ระบุไว้ในเครื่องหมาย <> หลังคำสั่ง #include จากตำแหน่ง Directory ที่เก็บไฟล์ Library ของโปรแกรม Arduino ไว้
ซึ่งแน่นอนว่าส่วนของ Header จะนับรวมไปถึง คำสั่งส่วนที่ใช้ประกาศสร้าง ตัวแปร (Variable Declaration) และ ค่าคงที่ (Constant Declaration) รวมทั้ง ฟังก์ชันต่างๆ (Function Declaration) ด้วย ซึ่งจากตัวอย่างได้แก่ส่วนที่เป็นคำสั่ง

บทที่ 3

ขั้นตอนดำเนินการ

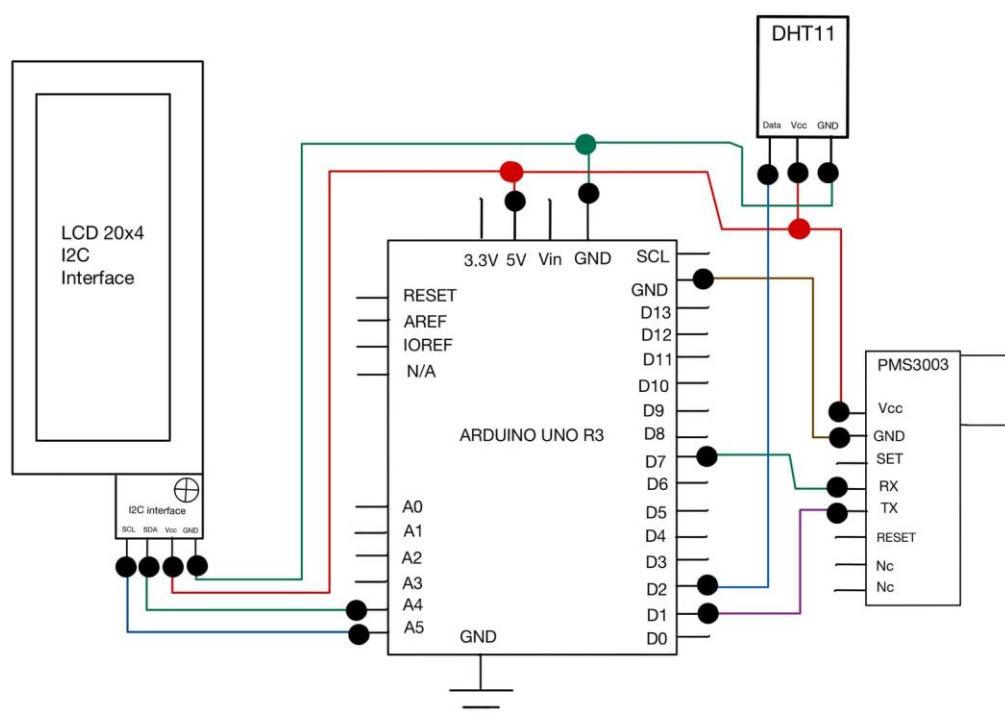
3.1 วัสดุอุปกรณ์

- | | |
|--|-------|
| 1.บอร์ดอาดูโน้ (Arduino UNO R3) | 1 ตัว |
| 2.เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ และ ความชื้น (Humidity and Temperature Sensor DHT11) | 1 ตัว |
| 3.เซนเซอร์ตรวจวัดฝุ่น (dust sensor PMS3003) | 1 ตัว |
| 4.บอร์ดทดลอง 830 รู (protoboard) | 1 ตัว |
| 5.จอ LCD ขนาด 20*4 (Character Display 20x4 + I2C interface board) | 1 ตัว |
| 6.สายไฟ | |

3.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน

3.2.1 ขั้นตอนการออกแบบวงจรและการทำงานของวงจร

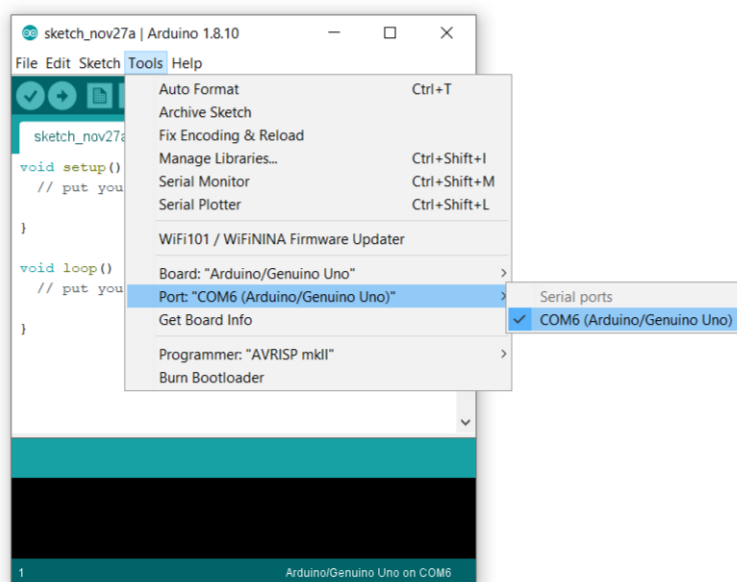
ขั้นตอนที่ 1 ออกแบบวงจรตามภาพ



รูปที่ 3.1 แสดงการออกแบบการต่อวงจร

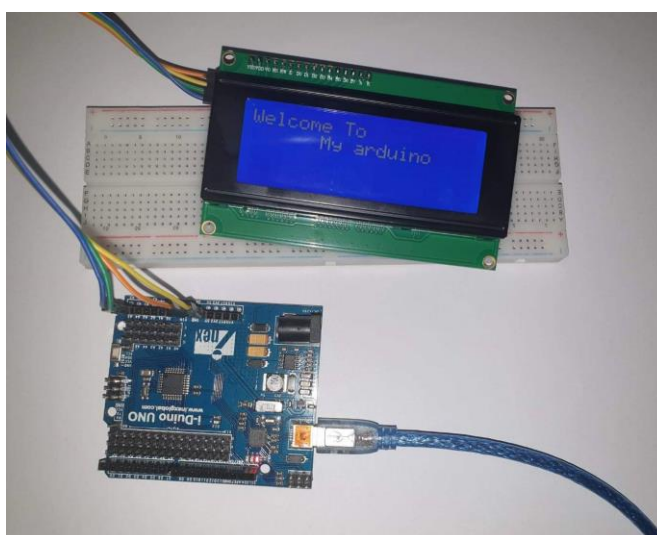
ขั้นตอนที่ 2 ติดตั้งโปรแกรม Arduino IDE ผ่านทางเว็บไซต์ <https://www.arduino.cc/en/main/software> เพื่อนำมาใช้เขียนคำสั่งให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์

ขั้นตอนที่ 3 นำบอร์ดอาคู่ย์โน้ตต่อเข้ากับ computer พร้อมทั้งเลือก Board และ Port ตาม Arduino ที่ใช้



รูปที่ 3.2 แสดงการเลือก Board และ Port ตาม Arduino ที่ใช้งาน

ขั้นตอนที่ 4 นำบอร์ดอาคู่ย์โน้ตต่อกับ จอ LCD ขนาด 20*4 ตามรูป เขียน code ผ่านโปรแกรม Arduino IDE พร้อมทำการทดสอบ



รูปที่ 3.3 แสดงการนำบอร์ดอาคู่ย์โน้ตต่อกับ จอ LCD ขนาด 20*4

```

test_lcd_20x4 | Arduino 1.8.10
File Edit Sketch Tools Help

test_lcd_20x4
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>

// Set the LCD address to 0x27 or 0x3F for a 16 chars and 2 line display
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 20, 4);

void setup()
{
  // initialize the LCD
  lcd.begin();

  // Turn on the backlight and print a message.
  lcd.backlight();
  lcd.setCursor(0, 0); // พิมพ์ที่แถวที่ 0 หลักที่ 1
  lcd.print("Welcome To");

  lcd.setCursor(6, 1); // พิมพ์ที่แถวที่ 1 หลักที่ 6
  lcd.print("My arduino");
}

void loop() {
  }

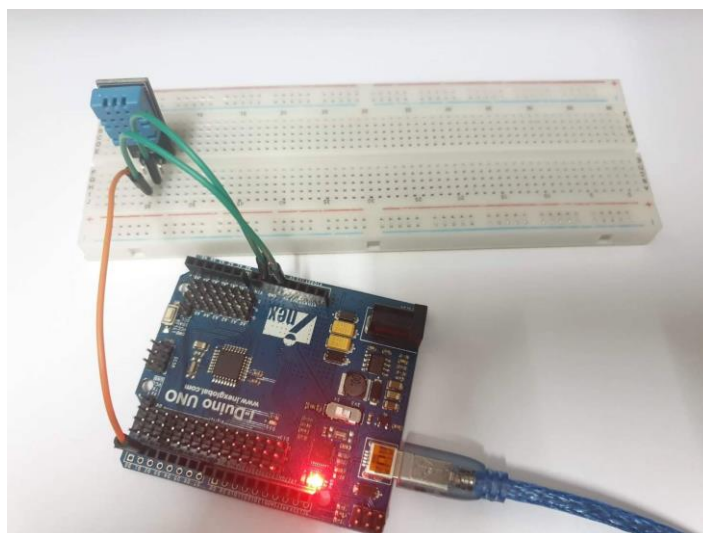
```

Done uploading.

Sketch uses 2908 bytes (9%) of program storage space. Maximum is 32256 bytes.
Global variables use 273 bytes (13%) of dynamic memory, leaving 1775 bytes for local variables. Maximum is 2048 bytes.

รูปที่ 3.4 แสดงการเขียน code ผ่านโปรแกรม Arduino IDE

ขั้นตอนที่ 5 นำบอร์ดคอนโทรลเลอร์กับเซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น (Humidity and Temperature Sensor DHT11) ตามรูป เขียน code ผ่านโปรแกรม Arduino IDE พร้อมทำการทดสอบ



รูปที่ 3.5 แสดงการนำบอร์ดคอนโทรลเลอร์กับเซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น (Humidity and Temperature Sensor DHT11)



```

DHT_test1 | Arduino 1.8.10
File Edit Sketch Tools Help

DHT_test1

#include <Wire.h>
#include "DHT.h"
#include <LiquidCrystal.h>
LiquidCrystal lcd(12, 11, 7, 6, 5, 4);
DHT dht;
void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  Serial.println();
  Serial.println("Status\tHumidity (%)\tTemperature (C)\t(F)");
  dht.setup(8); // data pin 2
  lcd.begin(16,2);
}

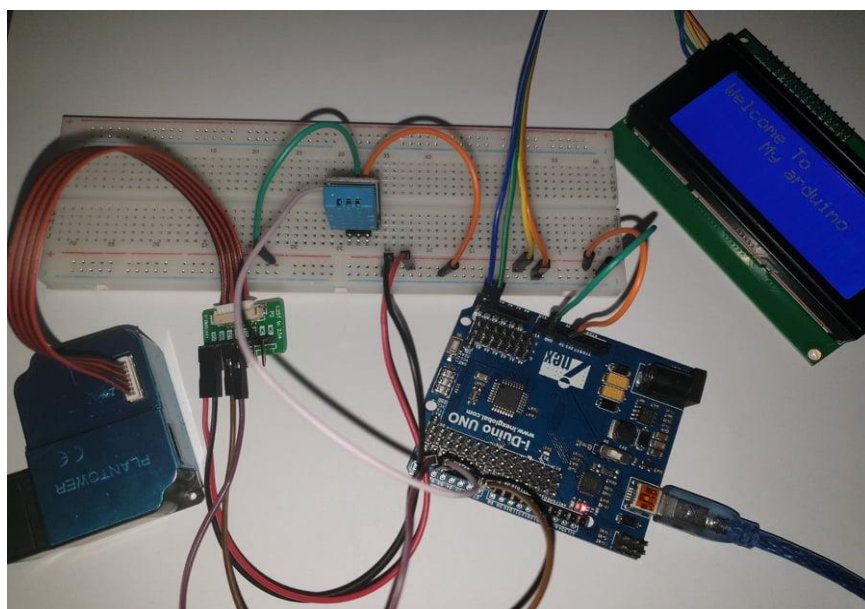
void loop()
{
  delay(dht.getMinimumSamplingPeriod());
  float humidity = dht.getHumidity(); // ดังค่าความชื้น
  float temperature = dht.getTemperature(); // ดังอุณหภูมิ
  Serial.print(dht.getStatusString());
  Serial.print("\t");
  Serial.print(humidity, 1);
  Serial.print("\t\t");
  Serial.print(temperature, 1);
  Serial.print("\t\t");
  Serial.println(dht.toFahrenheit(temperature), 1);

  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("humidity:  ");
  lcd.setCursor(10, 0);
  lcd.print(humidity);
  lcd.setCursor(14, 0);
  lcd.print("%");
}

```

รูปที่ 3.6 แสดงการเขียน code ผ่านโปรแกรม Arduino IDE

ขั้นตอนที่ 7 นำอุปกรณ์ที่ทดสอบแล้วทั้งหมดมาต่อเข้ากับบอร์ดอาคูยโน ตามรูป เขียน code ผ่านโปรแกรม Arduino IDE พร้อมทั้งทดสอบการทำงานร่วมกันของเซนเซอร์



รูปที่ 3.6 แสดงการต่ออุปกรณ์ทั้งหมดเข้ากับบอร์ดอาคูยโน



```

pms30031 | Arduino 1.8.10
File Edit Sketch Tools Help

pms30031

#include <Arduino.h>
#include <SoftwareSerial.h>
#define LENG 31 //0x42 + 31 bytes equal to 32 bytes
SoftwareSerial PMSerial(7, 1); // RX, TX
unsigned char buf[LENG];

int PM01Value=0; //define PM1.0 value of the air detector module
int PM2_5Value=0; //define PM2.5 value of the air detector module
int PM10Value=0; //define PM10 value of the air detector module

void setup()
{
  PMSerial.begin(9600);
  PMSerial.setTimeout(1500);
  Serial.begin(9600);
}

void loop()
{
  if(PMSerial.find(0x42)){
    PMSerial.readBytes(buf,LENG);

    if(buf[0] == 0x4d){
      if(checkValue(buf,LENG)){
        PM01Value=transmitPM01(buf); //count PM1.0 value of the air detector module
        PM2_5Value=transmitPM2_5(buf); //count PM2.5 value of the air detector module
        PM10Value=transmitPM10(buf); //count PM10 value of the air detector module
      }
    }
  }

  static unsigned long OledTimer=millis();
  if (millis() - OledTimer >=1000)
  {
  }
}

Sketch uses 4054 bytes (12%) of program storage space. Maximum is 32256 bytes.
Global variables use 386 bytes (18%) of dynamic memory, leaving 1662 bytes for local variables. Maximum is 2048 bytes.

```

รูปที่ 3.7 แสดง code ผ่านโปรแกรม Arduino IDE

ขั้นตอนที่ 8 ประกอบอุปกรณ์และนำไปทดลองและบันทึกค่า

3.2.2 ขั้นตอนการแสดงผลการทำงานของวงจร

แผนผังขั้นตอนการทำงาน (Flow chart)

