การทดลองที่ 10. ค่าคงตัวของพลังค์

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาหลักการทำงานของหลอดไดโอดเปล่งแสง
2. หาค่าคงตัวของพลังค์ (h) โดยใช้หลอดไดโอดเปล่งแสง

ทฤษฎี

ค่าคงตัวของพลังค์

ค่าคงตัวของพลังค์ (Planck's constant; h) เป็นค่าคงตัวที่อธิบายพฤติกรรมของอนุภาคย่อยของอะตอม (subatomic) ซึ่งประกอบด้วย โปรตอน อิเล็กตรอนและนิวตรอน เมื่ออยู่ในสภาวะถูกกระตุ้น ซึ่งเป็นหลักการที่สำคัญในการอธิบายพฤติกรรมที่ไม่ปกติของอนุภาคเหล่านี้ในกลศาสตร์ควอนตัม เมื่ออนุภาคย่อยในอะตอมได้รับการกระตุ้นจะมีการปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของแสงและคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอื่น ๆ ค่าคงตัวของพลังค์ตั้งชื่อตามชื่อของนักฟิสิกส์ชาวเยอรมัน **มักซ์ คาร์ล แอนส์ ลุดวิจ พลังค์ (Max Karl Ernst Ludwig Plank; พ.ศ. $2401 - 2490$)** หรือ **แมกซ์ พลังค์** เมื่อพิจารณาพลังงานที่โปรตอนแต่ละตัวปล่อยออกมาเนื่องจากโปรตอนเหล่านี้ถูกกระตุ้น พลังงานที่ถูกปล่อยออกมานี้จะสัมพันธ์กับความยาวคลื่นของรังสีที่แผ่ออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ตามสมการ

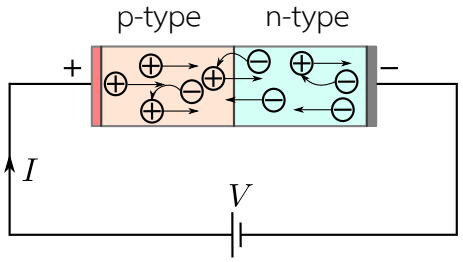
$$E = \frac{hc}{\lambda} \tag{10.1}$$

เมื่อ E คือ พลังงานที่โปรตอนปล่อยออกมา มีหน่วยเป็น จูล (J)
c คือ ค่าอัตราเร็วของแสงในสุญญากาศ มีหน่วยเป็น เมตรต่อวินาที ($\mathrm{m/s}$)
โดยที่ $c = 3.0 \times 10^8\,\mathrm{m/s}$
λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีที่โปรตอนปล่อยออกมา ในหน่วย เมตร (m)
และ h คือ ค่าคงตัวของพลังค์ ในหน่วย จูล· วินาที ($\mathrm{J \cdot s}$) โดยที่ $h = 6.626 \times 10^{-34}\,\mathrm{J \cdot s}$

หลอดไดโอดเปล่งแสง

หลอดไดโอดเปล่งแสง (light-emitting diode) หรือหลอด LED เป็นไดโอดที่สามารถเปล่งแสงได้เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน LED สร้างขึ้นจากการนำสารกึ่งตัวนำสองชนิดมาเชื่อมต่อกัน เรียกว่า **รอยต่อ**

พี-เอ็น (p-n junction) ซึ่งประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำที่ทำหน้าที่ให้อิเล็กตรอน (donor) เป็นสารกึ่งตัวนำ n-type และสารกึ่งตัวนำที่ทำหน้าที่รับอิเล็กตรอน (hole) เป็นสารกึ่งตัวนำ p-type เมื่อให้ไบแอสตรง (forward bias) กับไดโอดอิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำ n-type จะข้ามรอยต่อไปรวมกับ hole ที่ฝั่งสารกึ่งตัวนำ p-type ขณะที่ Hole ในสารกึ่งตัวนำ p-type ก็จะข้ามรอยต่อมารวมกับอิเล็กตรอนที่ด้าน n-type เกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านไดโอดดังรูปที่ 10.1 และปล่อยพลังงานออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงที่ตามองเห็น



รูปที่ 10.1 การให้ไบแอสตรงกับหลอด LED

สีของแสงจากหลอด LED ขึ้นกับพลังงานของโฟตอนที่เปล่งออกมาสามารถกำหนดได้โดยการกำหนดสัดส่วนของสารเคมีที่ใช้ในการสร้างสารกึ่งตัวนำ เช่น แกลเลียม (gallium; Ga) สารหนู (arsenic; As) และอะลูมิเนียม (aluminium ; Al) แสงที่เปล่งออกมาโดยหลอด LED อยู่ในรูปของสเปกตรัมของแสง แต่สีของแสงที่เรามองเห็นเป็นแสงที่มีความเข้มมากที่สุดที่ปล่อยออกมา เช่น แสงสีแดง แสงสีเขียว และแสงสีม่วงช่วงของแสงที่มีความเข้มมากที่สุดมีความยาวคลื่น 653.06 490.44 และ 401.56 นาโนเมตร ตามลำดับ

ช่องว่างพลังงาน

ช่องว่างพลังงาน (band gap) เป็นช่วงความแตกต่างของระดับพลังงานระหว่างแถบพลังงานต่ำหรือแถบวาเลนซ์ (valence band) ซึ่งเป็นระดับพลังงานที่อิเล็กตรอนอยู่กับแถบพลังงานสูงหรือแถบนำกระแส (conduction band) ความกว้างของช่องว่างพลังงานเป็นตัวบอกความสามารถในการนำไฟฟ้าของสสารต่าง ๆ เช่น ฉนวนไฟฟ้ามีช่องว่างพลังงานกว้างจำเป็นต้องใช้พลังงานสูงในการทำให้อิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ข้ามไปยังแถบนำกระแส สารกึ่งตัวนำมีช่องว่างพลังงานแคบ ส่วนตัวนำไฟฟ้าระดับพลังงานของแถบวาเลนซ์บางส่วนซ้อนทับกับระดับพลังงานของแถบนำกระแส อิเล็กตรอนจึงสามารถอยู่ในแถบนำกระแสได้และทำให้ตัวนำนำไฟฟ้าได้ดี

รูปที่ 10.2 ช่องว่างพลังงานของฉนวน สารกึ่งตัวนำและตัวนำไฟฟ้า

ช่องว่างพลังงานของหลอด LED สัมพันธ์กับความต่างศักย์ที่น้อยที่สุดที่ให้กับหลอด LED แล้วทำให้หลอด LED เปล่งแสงออกมาก เรียกว่า **แรงดันขีดเริ่ม (threshold voltage)** แทนด้วย V_{th} โดยมีความ

สัมพันธ์ดังสมการ

$$E = eV_{\text{th}} \tag{10.2}$$

เมื่อ E คือ ช่องว่างพลังงาน มีหน่วยเป็นจูล (J)
e คือ ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน มีหน่วยเป็น คูลอมบ์ (C)
โดยที่ $e = 1.602 \times 10^{-19}\,\text{C}$
และ V_{th} คือ แรงดันขีดเริ่ม มีหน่วยเป็น โวลต์ (V)

พลังงานที่หลอด LED เปล่งออกมาในรูปของโฟตอนหรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยแสงที่ตามนุษย์มองเห็นจากหลอด LED เป็นแสงที่มีความเข้มมากที่สุด เมื่อกำหนดให้ λ_{max} เป็นความยาวคลื่นของแสงที่มีความเข้มมากที่สุด สมการของพลังงานจากสมการที่ (10.1) จึงเขียนใหม่ได้เป็น

$$E = \frac{hc}{\lambda_{\text{max}}} \tag{10.3}$$

เมื่อแทนลงในสมการ (10.2) และจัดรูปสมการใหม่เพื่อหาค่าคงตัวของพลังค์ (h) ได้เป็น

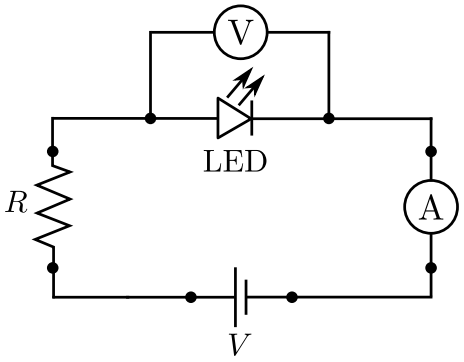
$$h = \frac{e}{c} V_{\text{th}} \lambda_{\text{max}} \tag{10.4}$$

สมการที่ (10.3) สามารถคำนวณค่า h ได้เมื่อเรารู้ค่าแรงดันขีดเริ่ม (V_{th}) และความยาวคลื่นแสงที่มีความเข้มสูงสุด (λ_{max}) ซึ่งค่า λ_{max} สัมพันธ์กับแสงที่เปล่งออกจากหลอด LED ดังตารางที่ 10.1

ตารางที่ 10.1 ความยาวคลื่นแสงที่มีความเข้มแสงสูงที่สุดของหลอด LED สีต่าง ๆ

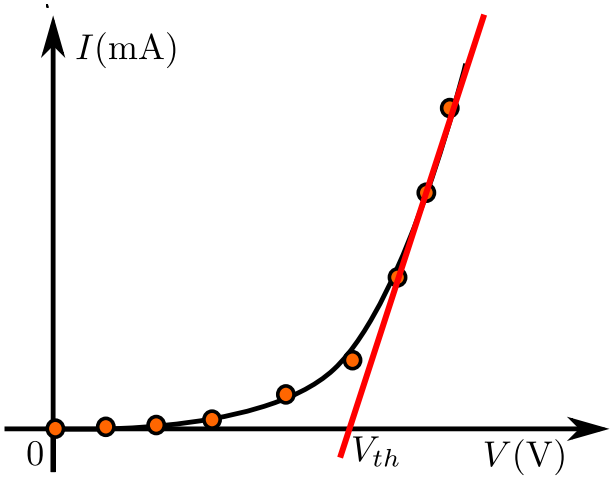
สีของแสง	λ_{max} (nm)
สีแดง	650
สีเขียว	490
สีม่วง	400

ค่าแรงดันขีดของหลอด LED สีต่างๆ หาได้จากการทดลองโดยต่อวงจรไฟฟ้าดังรูปที่ 10.3 เมื่อให้ความต่างศักย์ไฟฟ้ากับหลอด LED โดยปรับค่าความต่างศักย์เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านหลอด LED แล้วเปล่งแสงออกมา เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า (I) กับความต่างศักย์ (V) ได้กราฟดังรูปที่ 10.4



รูปที่ 10.3 วงจรไฟฟ้าสำหรับวัดค่าแรงดันไฟฟ้าขีดเริ่มของหลอด LED

ค่าแรงดันขีดเริ่ม V_{th} ได้จากการลากเส้นตรงให้ผ่านแนวของพิกัดข้อมูลของกระแสไฟฟ้า (I) และความต่างศักย์ (V) ในช่วงที่หลอด LED เปล่งแสง โดยอ่านค่า V_{th} บนแกนนอน (แกนความต่างศักย์) ที่จุดตัดของเส้นตรงนี้กับแกนนอน ดังรูปที่ 10.4



รูปที่ 10.4 วงจรไฟฟ้าสำหรับวัดค่าแรงดันไฟฟ้าขีดเริ่มของหลอด LED

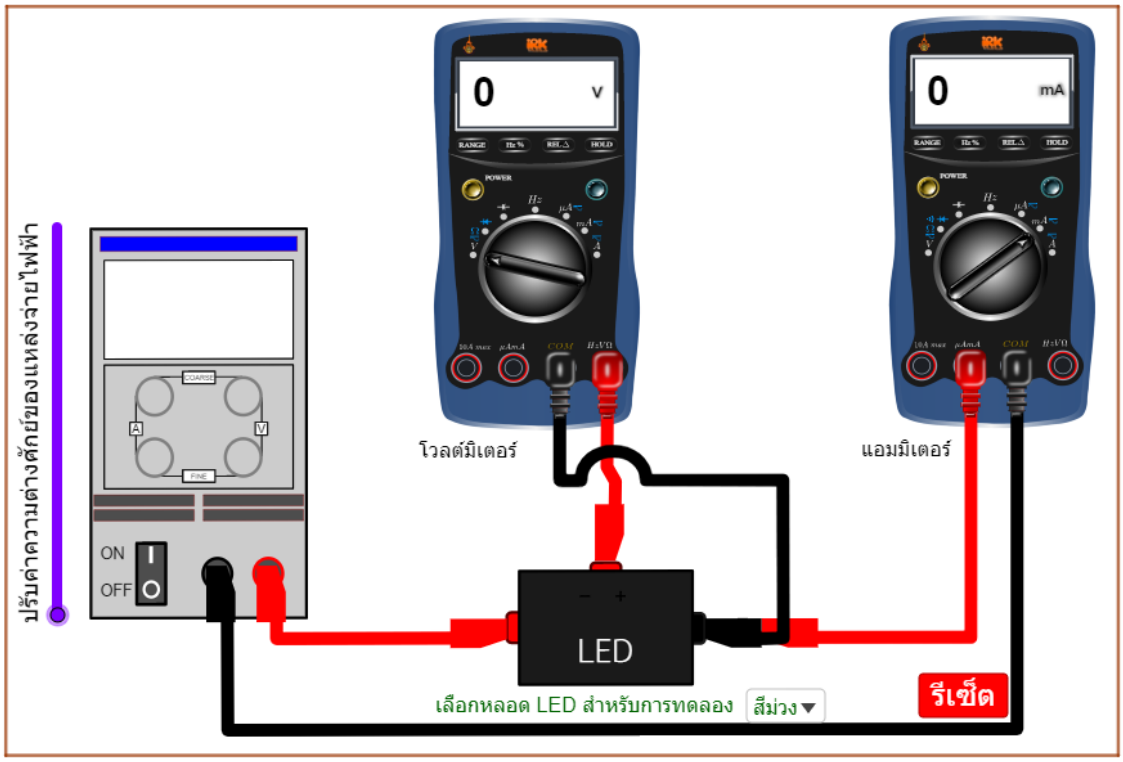
อุปกรณ์การทดลอง

1. หลอด LED สีแดง สีเขียวและสีม่วง
2. ตัวต้านทาน
3. แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง
4. มัลติมิเตอร์ 2 ตัว

วิธีการทดลอง

1. คลิ๊กลิงค์ https://www.geogebra.org/m/vfsvbzvx ดังรูปที่ 10.5

2. ทดลองโดยเลือกหลอด LED สีแดง เลื่อนแถบ **ปรับค่าความต่างศักย์ของแหล่งจ่ายไฟฟ้า** เพื่อปรับค่าความต่างศักย์ตกคร่อมหลอด LED อ่านค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านหลอด LED บนหน้าจอแสดงผลของแอมมิเตอร์ โดยใช้ค่าความต่างศักย์ $1.00 - 2.20\ \mathrm{V}$ และปรับเพิ่มครั้งละ $0.20\ \mathrm{V}$ บันทึกค่า V และ I ในตารางบันทึกผลการทดลอง
3. ทำการทดลองซ้ำข้อ 2 แต่เปลี่ยนหลอด LED เป็นหลอดที่ให้แสงสีเขียว ทดลองในช่วงความต่างศักย์ $1.00 - 3.00\ \mathrm{V}$ และสีม่วงในช่วงความต่างศักย์ $1.00 - 3.40\ \mathrm{V}$ ตามลำดับ อาจคลิ๊กปุ่ม **รีเซ็ต** เพื่อปรับไปเป็นค่าตั้งต้น
4. เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า (I) ในหน่วยมิลลิแอมป์ (mA) และความต่างศักย์ (V) จากข้อมูลของหลอด LED ทั้งสามสีบนกระดาษกราฟแผ่นเดียวกัน โดยค่าบนแกนนอนให้เริ่มจากค่าความต่างศักย์ $1.00\ \mathrm{V}$



รูปที่ 10.5 การต่ออุปกรณ์การทดลองเพื่อหาค่าคงตัวของพลังค์

5. ลากเส้นตรงให้ซ้อนทับกับเส้นกราฟแต่ละเส้นในช่วงที่หลอด LED เปล่งแสง ให้เส้นตรงนี้ตัดแกนนอน (แกนความต่างศักย์) อ่านค่า V_{th} ของหลอด LED แต่ละสีดังรูปที่ 10.4 บันทึกผลการทดลองในตารางบันทึกผลการทดลอง
6. คำนวณค่าคงตัวของพลังค์ (h) โดยใช้ค่า V_{th} ที่ได้จากหลอด LED แต่ละหลอดโดยใช้สมการที่ 4 คำนวณค่าเฉลี่ยของ h
7. หาเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของ h จากค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดลองโดยเทียบกับค่า $h = 6.626 \times 10^{-34}\ \mathrm{J \cdot s}$
8. สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง