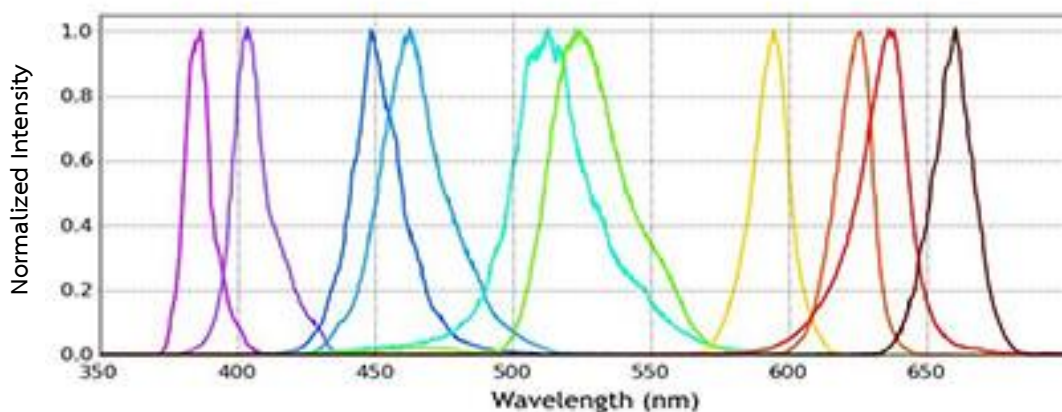


การศึกษาสมบัติการเปล่งแสงและสมบัติโฟโวลเทอิกของหลอด LED

บทนำ

หลอดไดโอดเปล่งแสงได้ (light-emitting diode หรือ LED) เป็นอุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ที่รู้จักกันดีและถูกนำไปใช้แพร่หลาย ด้วยเทคโนโลยีด้านสารกึ่งตัวนำที่พัฒนาอย่างรวดเร็ว หลอด LED ในปัจจุบันจึงมีสเปกตรัมที่ครอบคลุมทั้งในย่านอัลตราไวโอเลต (UV) ย่านมองเห็นได้ (visible) (ดังรูปที่ 1) และย่านอินฟราเรด (infrared) โดยที่สมบัติทางแสงมีความสัมพันธ์กับสมบัติทางไฟฟ้า

ในการทดลองนี้เราจะทำการศึกษาสมบัติของหลอด LED ที่มีค่าความต้านทานภายใน ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางไฟฟ้าและความยาวคลื่นแสง และการแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าหรือสมบัติโฟโวลเทอิก



รูปที่ 1 สเปกตรัมจากหลอด LED สีต่างๆ

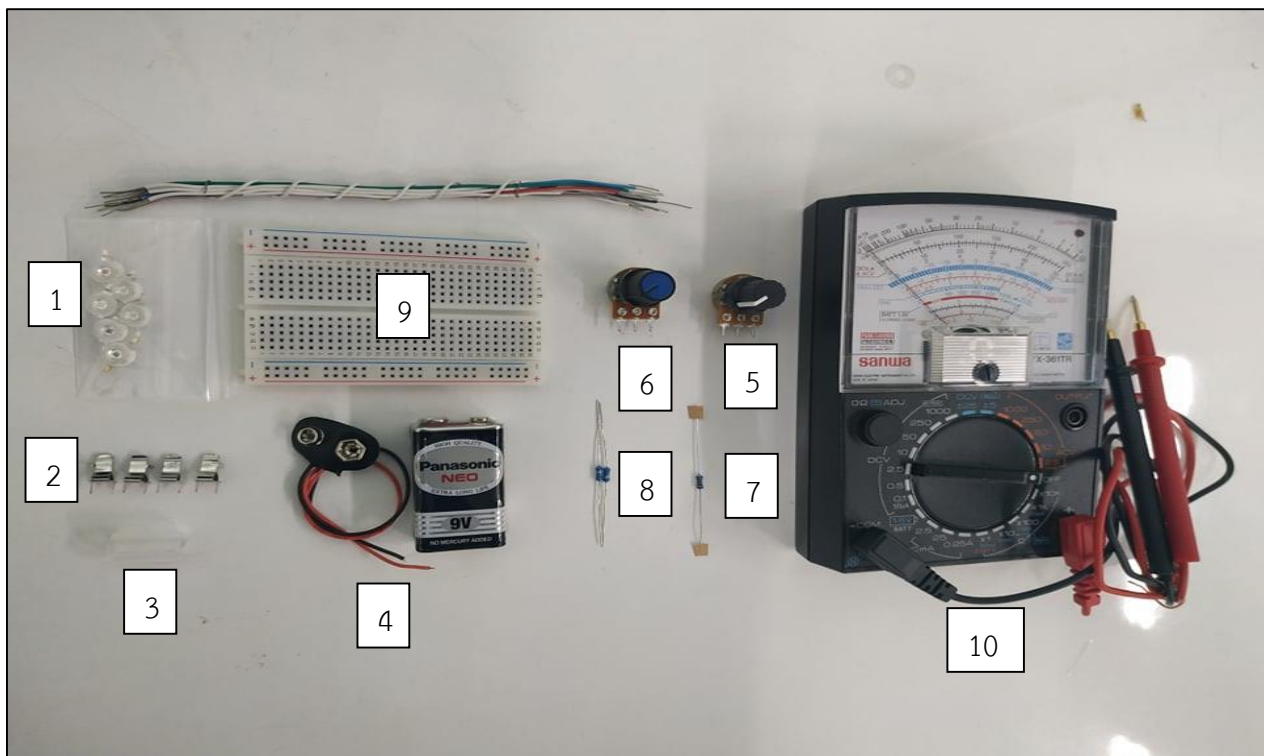
คำเตือนและข้อห้าม

- ในการทดลอง ห้ามนักเรียนต่อ LED โดยตรงเข้ากับแหล่งจ่ายไฟเด็ดขาด จำเป็นต้องต่อตัวต้านทานค่าคงที่เข้ากับหลอด LED เสมอ เพื่อจำกัดกระแสไม่ให้หลอดเสียหาย หากเกิดการเสียหายของหลอด LED สามารถเปลี่ยนได้แต่จะมีการหักคะแนน
- การวัดกระแสให้วัดทางอ้อมโดยใช้การวัดความต่างศักย์ตกคร่อมตัวต้านทานคงที่ ห้ามใช้โหมดวัดกระแสเพราะอาจทำให้เครื่องวัดเสียหายได้ในกรณีเลือกย่านผิด ถ้าเกิดความเสียหายจะมีการหักคะแนน

อุปกรณ์

การทดลองทั้งหมดมี 3 ตอน โดยมีอุปกรณ์ที่ให้ดังต่อไปนี้ (รูปที่ 2)

1. หลอด LED 3 W สีม่วง สีน้ำเงิน สีเขียว สีส้ม สีแดง และ อินฟราเรด อย่างละ 1 หลอด (มีสัญลักษณ์ได้หลอดเขียนว่า P B G O R และ I ตามลำดับ)
2. ขั้วจับหลอด LED จำนวน 4 ขั้ว
3. ท่อยาง 1 ท่อ
4. แบตเตอรี่ 9 V และขั้วแบตเตอรี่ จำนวน 1 ชุด
5. ตัวต้านทานปรับค่าได้ ขนาด 1 k Ω จำนวน 1 ตัว
6. ตัวต้านทานปรับค่าได้ ขนาด 100 k Ω จำนวน 1 ตัว
7. ตัวต้านทาน ขนาด 100 Ω จำนวน 1 ตัว
8. ตัวต้านทาน ขนาด 10 Ω จำนวน 2 ตัว
9. โพรโตบอร์ดและสายไฟ จำนวน 1 ชุด
10. มัลติมิเตอร์ จำนวน 1 เครื่อง



รูปที่ 2 อุปกรณ์ทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง 3 ตอน

การตรวจสอบอุปกรณ์ก่อนทำการทดลอง

ให้นักเรียนทำการตรวจสอบอุปกรณ์ตามขั้นตอนด้านล่างก่อนเริ่มทำการทดลอง หากพบว่าอุปกรณ์มีความบกพร่องหรือชำรุดให้แจ้งผู้ดำเนินการสอบเพื่อขอเปลี่ยนอุปกรณ์

1. **LED ทุกหลอด** โดยให้ตั้งค่ามัลติมิเตอร์ไปที่ย่านวัดความต้านทาน $\times 10$ และใช้โพรบวัดที่ขั้ว LED ให้ถูกขั้ว จะทำให้ LED เปล่งแสงและสามารถวัดความต้านทานได้ (เข็มกระดิก) โดยที่หลอด LED มีขั้ว (+) หรือ (-) เขียนไว้ที่ขา
2. **แบตเตอรี่** ต้องเป็นแบตเตอรี่ใหม่หุ้มพลาสติก ให้แกะพลาสติกและวัดแรงดันไฟฟ้าโดยตั้งค่ามัลติมิเตอร์ไปที่ย่านการวัดค่าความต่างศักย์ 10 V ค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ควรมีค่าไม่น้อยกว่า 9 V
3. **การตั้งค่า 0 ให้กับมัลติมิเตอร์** ในการวัดความต้านทานจำเป็นต้องตั้งค่า 0 ก่อนเสมอ โดยมีวิธีการคือ
 - 3.1 เลือกย่านการวัดค่าความต้านทาน เช่น $\times 1 \text{ k}\Omega$
 - 3.2 นำโพรบทั้งสองมาแตะกันและปรับปุ่ม **0 Ω ADJ** ดังรูปจนกระทั่งอ่านค่าความต้านทานได้เท่ากับ 0
 - 3.3 ถ้าไม่สามารถตั้งค่า 0 ได้ ให้เปลี่ยนมัลติมิเตอร์



รูปที่ 3 การตั้งค่า 0 ของมัลติมิเตอร์สำหรับวัดความต้านทาน



ตอนที่ 1 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของหลอด LED ที่มีความต้านทานภายใน

[4.3 คะแนน]

ในการทดลองนี้ เราจะทำการศึกษาสมบัติพื้นฐานของหลอด LED ที่มีความต้านทานภายใน โดยศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกระแส I และความต่างศักย์ V ที่ตกคร่อม

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เมื่อทำการไบแอสตรง (ให้ความต่างศักย์ไฟฟ้ากระแสตรง) ให้กับหลอด LED สูงกว่าความต่างศักย์ขีดเริ่ม V_t จะทำให้เกิดกระแสไหล โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่าง $I - V$ อธิบายด้วยสมการ

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{e(V - IR_s)}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (1)$$

โดยที่ R_s คือความต้านทานภายในแบบอนุกรม (internal series resistance), e คือค่าประจุของอิเล็กตรอน, k คือค่าคงที่ของโบลทซ์มานน์ (Boltzmann constant), I_0 คือกระแสอิ่มตัวย้อนกลับ (reverse saturation current) และ n คือค่าแฟกเตอร์อุดมคติ (ideality factor) ในกรณีที่หลอด LED แบบอุดมคติจะไม่มีค่าความต้านทานภายใน และเราจะเรียกสมการนี้ว่า ความสัมพันธ์ของชอกลีย์ (Shockley's equation)

เมื่อเราปรับความต่างศักย์ V ให้มากขึ้น พจน์แรกในสมการ (1) จะมีค่ามากกว่า 1 จนเราสามารถประมาณได้ว่า

$$I \approx I_0 \left[\exp\left(\frac{e(V - IR_s)}{nkT}\right) \right] \quad (2)$$

และในกรณีที่กระแสนี้มีค่าไม่มากนัก เราจะได้

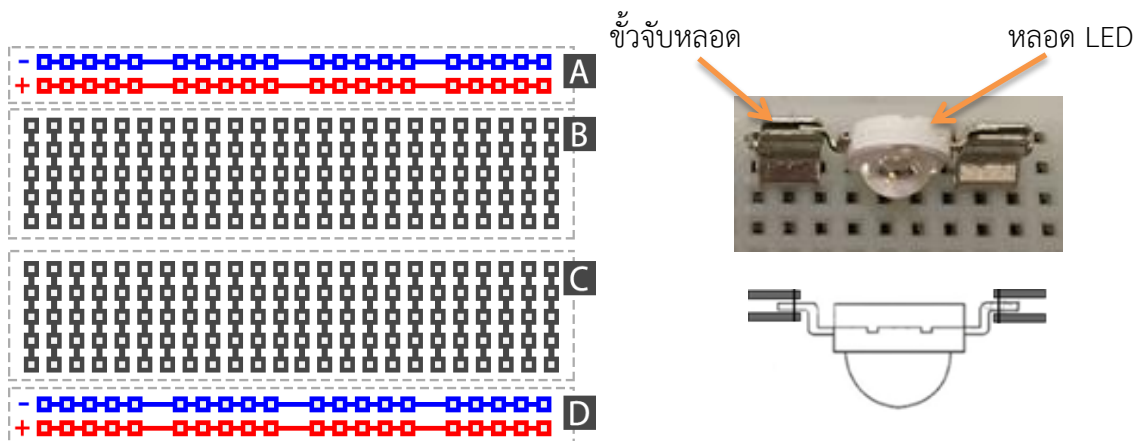
$$I \approx I_0 \exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) \quad (3)$$

อุปกรณ์สำหรับตอนที่ 1

1. หลอด LED 3 W สีเขียว 1 หลอด (มีสัญลักษณ์ใต้หลอดเขียนว่า G)
2. ขั้วจับหลอด LED จำนวน 2 ขั้ว
3. แบตเตอรี่ 9 V และขั้วแบตเตอรี่ จำนวน 1 ชุด
4. ตัวต้านทานปรับค่าได้ขนาด 1 k Ω จำนวน 1 ตัว
5. ตัวต้านทาน ขนาด 100 Ω จำนวน 1 ตัว
6. ตัวต้านทาน ขนาด 10 Ω จำนวน 2 ตัว
7. โพรโตบอร์ดและสายไฟ จำนวน 1 ชุด
8. มัลติมิเตอร์ จำนวน 1 เครื่อง

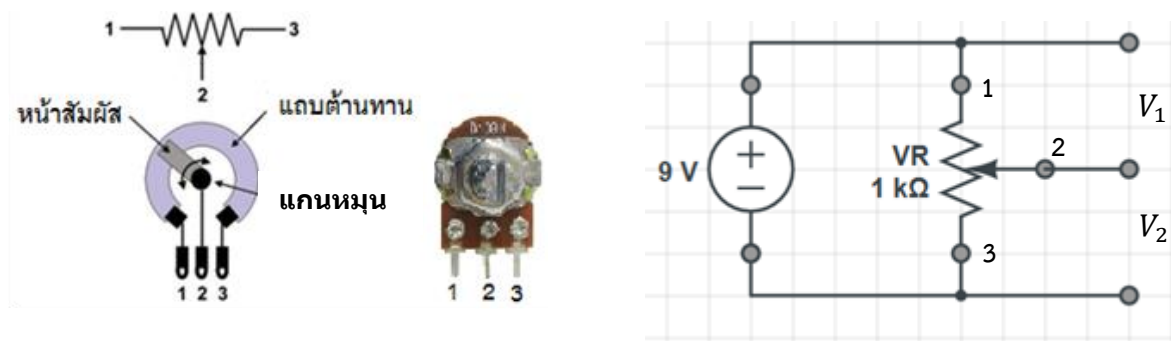
คำแนะนำการทดลองตอนที่ 1

1. ใช้แผ่นโพรโตบอร์ดในการต่อวงจร โดยที่จุดต่างๆภายในแผ่นโพรโตบอร์ดเชื่อมต่อกันดังแสดงในรูปที่ 4 (ซ้าย) โดยโซน A และ D มีการเชื่อมต่อในแนวนอน โซน B และ C มีการเชื่อมต่อแนวตั้ง
2. ขาหลอด LED ไม่สามารถเสียบเข้าโพรโตบอร์ดได้โดยตรง ห้ามฝืนเสียบเข้าไป แต่ให้เสียบหลอด LED ไว้ระหว่างขั้วจับหลอดดังแสดงในรูปที่ 4 (ขวา)



รูปที่ 4 (ซ้าย) แสดงการเชื่อมต่อของจุดต่างๆภายในแผ่นโพรโตบอร์ด (ขวา) การต่อ LED บนโพรโตบอร์ด

3. ให้ใช้ตัวต้านทานปรับค่าได้ต่อเนื่องเป็นวงจรแบ่งแรงดันเพื่อสร้างเป็นแหล่งจ่ายไฟที่ปรับค่าความต่างศักย์ได้ดังแสดงในรูปที่ 5 โดยจะได้แรงดันไฟฟ้าปรับค่าได้ตามเงื่อนไข $V_1 + V_2 = 9\text{ V}$



รูปที่ 5 (ซ้าย) โครงสร้างและสัญลักษณ์ของตัวต้านทานปรับค่าได้ (ขวา) ไดอะแกรมการต่อวงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าด้วยตัวต้านทานปรับค่าได้

4. เพื่อความสะดวกและลดความคลาดเคลื่อนในการวัด สามารถนำสายไฟพันปลายโพรบแล้วนำไปเสียบเข้าที่แผ่นโพรโตบอร์ดได้



คำสั่งการทดลองตอนที่ 1

ในการทดลองนี้ นักเรียนไม่ต้องหาค่าความคลาดเคลื่อน ให้ใช้ค่าคงที่โบลทซ์มานน์ $k = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K และ อุณหภูมิห้อง $T = 300$ K

1. ให้ออกแบบและทดลองหากระแสไฟฟ้า I ที่ความต่างศักย์ V ต่างๆ ของหลอด LED สีเขียว โดยต้องครอบคลุมตั้งแต่ช่วงค่ากระแส I น้อยๆ ที่ไม่มีผลของ R_s จนถึงช่วงที่ I มากพอเห็นผลของ R_s (อย่างน้อยต้องมี 3 ค่าในช่วงที่กระแส I สูง) ให้แสดงวิธีทำอย่างละเอียด และวาดไดอะแกรมวงจรไฟฟ้า และเขียนตารางบันทึกผล (ให้บันทึกค่ากระแสในหน่วย A และค่าความต่างศักย์ในหน่วย V)
2. ให้ใช้สมการ (3) วาดกราฟเส้นตรง เพื่อหาค่ากระแสอิ่มตัวย้อนกลับ I_0 และค่าแฟกเตอร์อุดมคติ n ของหลอด LED สีเขียว
หมายเหตุ: ช่วงที่กระแสมีค่ามากกราฟจะไม่เรียงตัวเป็นเส้นตรง ให้ใช้เฉพาะช่วงที่จุดบนกราฟเรียงเป็นเส้นตรง
3. ให้นักเรียนหาวิธีประมาณค่าเฉลี่ยของ R_s ของหลอด LED สีเขียว จากข้อมูลในช่วงที่ I มีค่ามากและข้อมูลเบี่ยงเบนออกจากกราฟเส้นตรง

***หมายเหตุ: กำหนดค่าที่ได้จากฟังก์ชันล๊อการิทึมให้มีเลขนัยสำคัญ 3 ตัว

ตอนที่ 2 การหาความยาวคลื่น LED อินฟราเรด

[5.4 คะแนน]

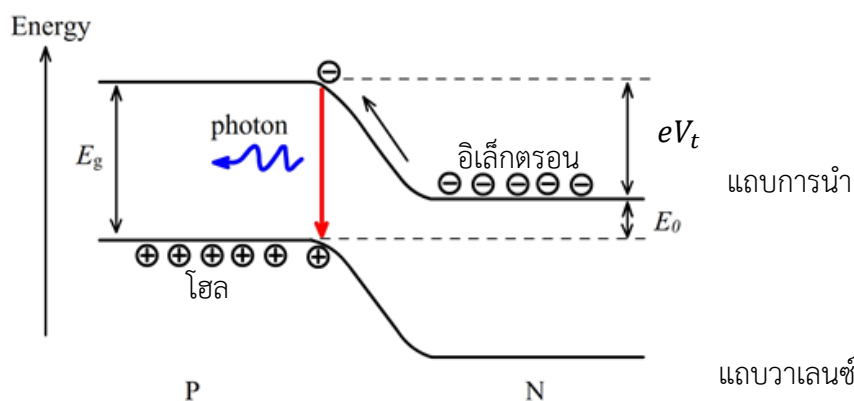
ในการทดลองนี้เราจะใช้หลอด LED จำนวน 5 สีที่ทราบความยาวคลื่นเพื่อทำนายความยาวคลื่นของหลอด LED อินฟราเรด

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

โครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ของสารกึ่งตัวนำชนิด P และ N ที่มีระดับชั้นพลังงานที่ประกอบไปด้วยแถบการนำ (conduction band) และแถบวาเลนซ์ (valence band) ซึ่งแยกกันด้วยช่องว่างพลังงาน (energy gap: E_g) โดยรอยต่อ P-N ที่สภาวะสมดุลแถบพลังงานจะยกตัวขึ้นเป็นกำแพงศักย์ค่าหนึ่ง ดังรูปที่ 6

เมื่อไบแอสตรง LED ด้วยความต่างศักย์มากกว่าค่าขีดเริ่ม V_t ทำให้อิเล็กตรอนจะมีพลังงานมากพอข้ามกำแพงศักย์และรวมตัวกับโฮล (hole) เพื่อปลดปล่อยพลังงานแสงได้ โดยที่ V_t มีความสัมพันธ์กับช่องว่างพลังงาน E_g ดังแสดง

$$eV_t = E_g - E_0 \quad (4)$$



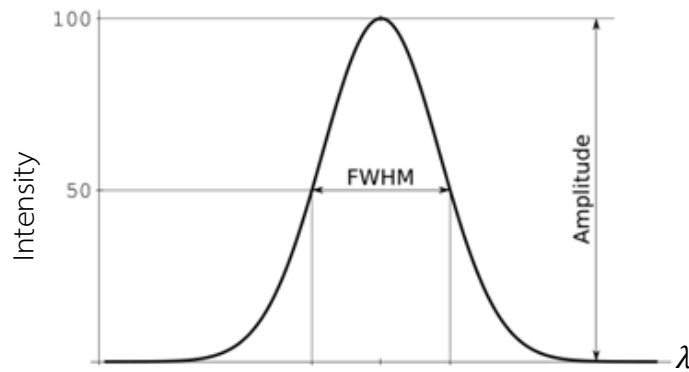
รูปที่ 6 ไดอะแกรมแสดงระดับพลังงานที่รอยต่อ P-N และการปลดปล่อยแสงของหลอด LED

ในที่นี้ E_0 คือความแตกต่างของระดับพลังงานแถบการนำในด้าน N กับแถบวาเลนซ์ในด้าน P โดยที่เราสามารถประมาณได้ว่า E_0 มีค่าเท่ากันสำหรับ LED ทุกตัว โฟตอนของแสงที่ปลดปล่อยออกมาจะมีความยาวคลื่น λ ขึ้นอยู่กับช่องว่างพลังงานซึ่งเป็นไปตามสมการ

$$E_g = \frac{hc}{\lambda} \quad (5)$$

โดยที่ h คือค่าคงที่ของพลังค์ (Planck constant) และ c คือความเร็วแสงในสุญญากาศ

หลอด LED ให้ความยาวคลื่นที่มีช่วงกว้างขนาดหนึ่ง ดังรูปที่ 7 และมีความเข้มสูงสุดที่ความยาวคลื่น λ ความคลาดเคลื่อนของความยาวคลื่น $\Delta\lambda$ หาได้จากกึ่งหนึ่งของค่าความกว้างที่ความสูงครึ่งหนึ่งของพีค (full width at half maximum: FWHM) นั่นคือ $\Delta\lambda = \text{FWHM}/2$



รูปที่ 7 แสดงการหาค่า FWHM ของสเปกตรัม

การหาค่า V_t โดยการพล็อตกราฟ $I - V$ ของ LED นั้นทำได้ยากเนื่องจากเป็นกราฟเอกโพเนนเชียลที่ไม่มีจุดขีดเริ่มชัดเจน ดังนั้นจึงใช้หลักการที่ว่า ที่ค่าความต่างศักย์ขีดเริ่มนั้นจะทำให้มีกระแสไหลน้อยมากประมาณ $< 1\%$ ของค่ากระแสที่ใช้ขับหลอด LED ปกติซึ่งอยู่ในระดับ 10 mA ดังนั้นค่า V_t จะวัดได้เมื่อเริ่มมีกระแสไหลผ่านหลอด LED เป็นปริมาณ 0.1 mA

อุปกรณ์สำหรับตอนที่ 2

1. หลอด LED 3 W สีม่วง สีน้ำเงิน สีเขียว สีส้ม สีแดง และ อินฟราเรด อย่างละ 1 หลอด (มีสัญลักษณ์ใต้หลอดเขียนว่า P B G O R และ I ตามลำดับ)
2. ขั้วจับหลอด LED จำนวน 2 ขั้ว
3. แบตเตอรี่ 9 V และขั้วแบตเตอรี่ จำนวน 1 ชุด
4. ตัวต้านทานปรับค่าได้ ขนาด 1 k Ω จำนวน 1 ตัว
5. ตัวต้านทาน ขนาด 100 Ω จำนวน 1 ตัว
6. โพรโตบอร์ดและสายไฟ จำนวน 1 ชุด
7. มัลติมิเตอร์ จำนวน 1 เครื่อง
8. กราฟสเปกตรัมแสดงความยาวคลื่นของหลอด LED สีม่วง สีน้ำเงิน สีเขียว สีส้ม และสีแดง (อยู่ในกระดาษสรุปคำตอบ)



คำสั่งการทดลองตอนที่ 2

1. หาความยาวคลื่น λ และความคลาดเคลื่อนของความยาวคลื่น $\Delta\lambda$ ของหลอด LED สีม่วง น้ำเงิน เขียว ส้ม แดง จากการวิเคราะห์กราฟสเปกตรัมในกระดาษสรุปคำตอบ
2. ให้นักเรียนออกแบบและทำการทดลองเพื่อหาค่า λ และความคลาดเคลื่อนของความยาวคลื่นที่ได้จากการทดลอง ($\delta\lambda$) ของหลอด LED อินฟราเรด จากการเขียนกราฟเส้นตรง พร้อมอมทั้งวาดไดอะแกรมวงจรที่ใช้ทดลอง และเขียนตารางบันทึกผล

การทดลองนี้ให้คิดความคลาดเคลื่อนจากการอ่านมิเตอร์ครั้งเดียว (ไม่คิดความคลาดเคลื่อนของตัวต้านทาน)

กำหนดให้

ประจุของอิเล็กตรอน $e = 1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$

ความเร็วแสงในสุญญากาศ $c = 3.00 \times 10^8 \text{ m/s}$

ค่าคงที่โบลทซ์มานน์ $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$

ค่าคงที่ของพลังค์ $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$

อุณหภูมิห้อง $T = 300 \text{ K}$

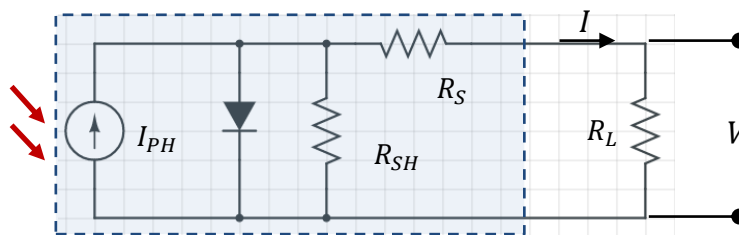
ตอนที่ 3 การศึกษาสมบัติโฟโวลเทอิกของหลอด LED

[10.3 คะแนน]

โครงสร้างแบบรอยต่อสารกึ่งตัวนำแบบ P-N ของหลอด LED นอกจากสามารถเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานแสงได้แล้วยังสามารถเกิดกระบวนการย้อนกลับได้อีกด้วย กล่าวคือหลอด LED สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ หรือเรียกว่าปรากฏการณ์โฟโวลเทอิก (photovoltaic effect) ซึ่งปรากฏการณ์นี้เองสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการสร้างเซลล์สุริยะ (solar cell)

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เมื่อโฟตอนแสงที่มีพลังงานมากพอตกกระทบบนรอยต่อ P-N จะทำให้อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์มีพลังงานมากพอที่จะขึ้นไปยังแถบการนำและเกิดกระแส (photocurrent) I_{PH} และเกิดการไหลของกระแสแบบไดโอดด้วย โดยปกติแล้วสมบัติ $I - V$ ของเซลล์โฟโวลเทอิกยังมีผลจากความต้านทานภายใน 2 แบบคือ ความต้านทานแบบอนุกรม (series resistance, R_S) และ ความต้านทานแบบขนาน (shunt resistance, R_{SH}) ซึ่งแสดงในวงจรเสมือนดังรูปที่ 8 โดยที่เซลล์โฟโวลเทอิกในอุดมคติจะมีค่า $R_S = 0$ และ $R_{SH} \rightarrow \infty$



รูปที่ 8 ไดอะแกรมวงจรเสมือนของเซลล์โฟโวลเทอิกที่มีความต้านทานภายใน

เมื่อรวมผลจากส่วนประกอบทั้งหมด เราพบว่ากระแส I ที่ไหลผ่านตัวต้านทานภายนอก R_L เท่ากับ

$$I = I_{PH} - I_0 \left[\exp \left(\frac{e(V + IR_S)}{nkT} \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_S}{R_{SH}} \quad (6)$$

กระแสสูงสุดที่ได้จากเซลล์โฟโวลเทอิก $I = I_{SC}$ จะเกิดขึ้นเมื่อ $V = 0$ และความต่างศักย์สูงสุดจากเซลล์โฟโวลเทอิก $V = V_{OC}$ เกิดขึ้นเมื่อ $I = 0$ นอกจากนี้ช่วงที่กระแสมีน้อย ($I < \frac{I_{SC}}{2}$) เราพบว่า $\frac{dI}{dV} \approx -\frac{1}{R_S}$ และช่วงที่ความต่างศักย์มีน้อย ($V < \frac{V_{OC}}{2}$) เราพบว่า $\frac{dI}{dV} \approx -\frac{1}{R_{SH} + R_S}$

โดยทั่วไปเมื่อต่อเซลล์โฟโวลเทอิกเข้ากับโหลดตัวต้านทาน R_L ดังรูปที่ 8 เราจะพบว่ามีค่าของ R_L ค่าหนึ่งที่ทำให้เซลล์โฟโวลเทอิกให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด P_{MAX}



นอกจากนี้ยังมีปริมาณที่ใช้ในการประเมินประสิทธิภาพของเซลล์โฟโตวอลเทอิกที่เรียกว่า ฟิลแฟกเตอร์ (fill factor, FF) นิยามโดย

$$FF = \frac{P_{MAX}}{V_{OC} \times I_{SC}} \quad (7)$$

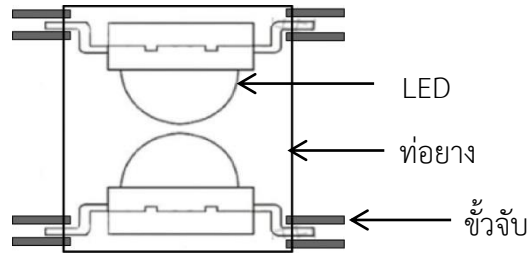
อาจกล่าวได้ว่าค่าของ $V_{OC} \times I_{SC}$ คือลิมิตของกำลังไฟฟ้าที่เซลล์โฟโตวอลเทอิกสามารถผลิตได้ที่ความเข้มแสงค่าหนึ่ง

อุปกรณ์สำหรับการทดลองที่ 3

1. หลอด LED 3 W สีม่วง 1 หลอด และสีเขียว 1 หลอด
2. ขั้วจับหลอด LED จำนวน 4 ขั้ว
3. ท่อยาง 1 ท่อ
4. แบตเตอรี่ 9 V และขั้วแบตเตอรี่ จำนวน 1 ชุด
5. ตัวต้านทานปรับค่าได้ ขนาด 1 k Ω จำนวน 1 ตัว
6. ตัวต้านทานปรับค่าได้ ขนาด 100 k Ω จำนวน 1 ตัว
7. ตัวต้านทาน ขนาด 100 Ω จำนวน 1 ตัว
8. ตัวต้านทาน ขนาด 10 Ω จำนวน 2 ตัว
9. โพรโตบอร์ดและสายไฟ จำนวน 1 ชุด
10. มัลติมิเตอร์ จำนวน 1 เครื่อง

คำแนะนำการทดลองตอนที่ 3

1. ให้ใช้วงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าโดยใช้ตัวต้านทานปรับค่าได้ขนาด 1 k Ω เพื่อขับหลอด LED สำหรับปรับความเข้มแหล่งกำเนิดแสง
2. เพื่อลดความคลาดเคลื่อนเรื่องระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดแสงและเซลล์โฟโตวอลเทอิก ให้บรรจุหลอด LED ทั้งสองหลอดในท่อยางโดยให้หันหน้าเข้าหากันก่อนนำไปวางให้แนบบนขั้วจับหลอดดังรูปที่ 9 โดยให้ระยะห่างระหว่างหลอดน้อยที่สุด ซึ่งจะถูกกำหนดโดยระยะในโปรโตบอร์ด



รูปที่ 9 แสดงการยึดหลอด LED ในตัวอย่าง

3. เพื่อให้ความเข้มแสงตกกระทบบเซลล์โฟโตโวลเทอิกมีค่าเป็นมาตรฐาน ต้องทำการปรับชดเชยความเข้มแสงโดยมีขั้นตอนดังนี้
 - 3.1. ให้ใช้หลอดตัวต้านทานมาตรฐาน $R_L = 100 \, \Omega$ ต่อกับเซลล์โฟโตโวลเทอิก
 - 3.2. ให้ปรับความเข้มแสงของแหล่งกำเนิดจนอ่านค่าความต่างศักย์ที่ตกคร่อมหลอดตัวต้านทานได้ $V_L = 0.03 \, \text{V}$

คำสั่งการทดลองตอนที่ 3

1. ใช้หลอด LED สีม่วงสำหรับเป็นแหล่งกำเนิดแสง และใช้หลอด LED สีเขียวสำหรับเป็นเซลล์โฟโตโวลเทอิก
2. ให้นักเรียนทำการปรับชดเชยความเข้มแสงก่อนเริ่มการทดลองโดยมีรายละเอียดในคำแนะนำ
3. การทดลอง
 - 3.1 วาดไดอะแกรมวงจร ทำการทดลอง และเขียนกราฟเพื่อหาค่า R_L และหาค่า I , V ที่ทำให้เซลล์โฟโตโวลเทอิกให้กำลังสูงสุด P_{MAX}
 - 3.2 เขียนกราฟ $I - V$ ของเซลล์โฟโตโวลเทอิก และจากกราฟให้หาค่า
 - A. I_{SC} , V_{OC} และ FF
 - B. R_S และ R_{SH}
 - C. I_{PH} ที่กำลังสูงสุด

การทดลองนี้ไม่ต้องคำนวณค่าความคลาดเคลื่อน ให้ใช้ค่าคงที่โบลทซ์มานน์ $k = 1.38 \times 10^{-23} \, \text{J/K}$ และอุณหภูมิห้อง $T = 300 \, \text{K}$