

การออกแบบและสร้างเครื่องมือวัดพลังงานการแผ่รังสี



นายถนัดกิจ ชรรค์เพชร

000877

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

แผนกวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. ๒๕๒๒

I 1572134b

DESIGN AND CONSTRUCTION OF A RADIATION MEASURING DEVICE

Mr. Tanadkit Karnpech

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Electrical Engineering
Department of Electrical Engineering
Graduate School
Chulalongkorn University

1979

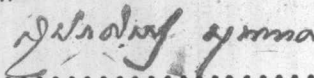
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การออกแบบและสร้างเครื่องมือวัดพลังงานการแผ่รังสี.

โดย นายถนัดกิจ ชรรค์เพชร


แผนกวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

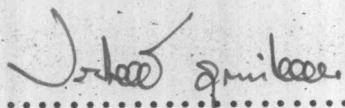
อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.ประโมทย์ อุณหัฒไวยะ

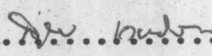
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

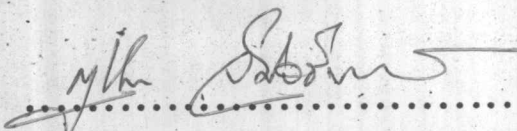

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุประดิษฐ์ บุนนาค)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.จรวัย บุญยกุล)


.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประโมทย์ อุณหัฒไวยะ)


.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุทิน เวทย์วัฒน์)


.....กรรมการ
(อาจารย์ กฤษณา วิสธีรานนท์)

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การออกแบบและสร้างเครื่องมือวัดพลังงานการแผ่รังสี.

ชื่อนิสิต นายถนัดกิจ ชรรค์เพชร

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.ประโมทย์ อุทโทไวยะ

แผนกวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา ๒๕๒๑



บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้แสดงการออกแบบและสร้างเครื่องมือวัดพลังงานการแผ่รังสี ซึ่งอ่านค่าได้เป็นตัวเลข ใช้เซลล์รับพลังงานแสง (photovoltaic cells) เป็นตัวรับพลังงานแสง แล้วผ่านวงจร Analog-to-digital converter เพื่อแสดงค่าเป็นตัวเลข เมื่อความเข้มของแสงเพิ่มขึ้นหรือลดลงกระแสลัดวงจรขาออก (short circuit current) ของเซลล์รับพลังงานแสงก็จะเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามไปด้วยเป็นปฏิภาคโดยตรง จึงสามารถหาความสัมพันธ์ของพลังงานแสงที่ได้รับกับกระแสลัดวงจรขาออกของเซลล์รับพลังงานแสงได้

การวิจัยโดยเลือกใช้เซลล์รับพลังงานแสง แบบ ฟลิกซิลิกอน (Silicon solar cell) เป็นตัวรับพลังงานแสงอาทิตย์ ส่วนเซลล์รับพลังงานแสง แบบ ฟลิกซีลีเนียม (Selenium photovoltaic cell) นั้นใช้เป็นตัวรับพลังงานแสงในช่วงตามนุษย์มองเห็น (visible radiation) โดยปรับผลตอบสนองต่อแสงของซีลีเนียมให้ใกล้เคียงกับตามนุษย์ (V_{λ} curve) ด้วยการใช้ฟิล์มกรองแสง เมื่อใช้วัดพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยเซลล์รับพลังงานแสง แบบ ฟลิกซิลิกอน ค่าที่อ่านได้เป็นตัวเลขมีหน่วยเป็น mW/cm^2 ส่วนการวัดพลังงานแสงในช่วงตามนุษย์มองเห็นด้วยเซลล์รับพลังงานแสง แบบ ฟลิกซีลีเนียม ค่าที่อ่านได้เป็นตัวเลขมีหน่วยเป็น ฟุต-แคนเดิล (foot-candle) รวมทั้งการสอบเทียบและศึกษาผลของอุณหภูมิ, มุมที่รังสีตกกระทบ และรูปสเปกตรัมของแสงที่มีต่อเครื่องมือวัดพลังงานการแผ่รังสี

Thesis Title Design and Construction of a Radiation Measuring Device
Name Mr. Tanadkit Karnpech
Thesis Advisor Dr. Pramoth Unhavaithaya
Department Electrical Engineering
Academic Year 1978

ABSTRACT

This thesis concerns with the design and construction of a radiation measuring device with digital readout. Radiations are received by a photovoltaic cell and the output current is amplified and readout by an analog-to-digital converter. Since the short circuit current of the photovoltaic cell increases or decreases in accordance with with the intensity of the radiation, the readout of the measuring device can be calibrated to give the correct value of the radiation intensity.

The silicon photovoltaic cell is selected as solar energy receiver. The selenium photovoltaic cell is selected as the visible radiation receiver, with the spectral response adjusted to approach the human eye's sensitivity (V_{λ} Curve) by using optical filter. When the solar energy is measured with the silicon photovoltaic cell, the digital readout is calibrated in mW/cm^2 but when the visible radiation is measured with the selenium photovoltaic cell, the digital readout is calibrated in foot-candle. The characteristics of the measuring device under different ambient temperatures, incident angles and radiation spectra are also studied.

กิติกรรมประกาศ

ผู้เขียนวิทยานิพนธ์ ขอขอบพระคุณ ดร.ประโมทย์ อุณหไวทยะ อาจารย์ที่ปรึกษาที่กรุณา
สละเวลาให้ความรู้ และคำแนะนำตลอดจนเป็นกำลังใจ จนวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลงได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ อาจารย์กฤษดา วิชาชีรานนท์, ดร.ศิริ วัชรทัย และ ดร.วิทยา ยงเจริญ
ที่ให้คำแนะนำและช่วยเหลือ เป็นอย่างดี ในระหว่างการทดลอง

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณต่อสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์ประยุกต์แห่งประเทศไทยที่ให้ความอนุ
เคราะห์ให้ยืมเครื่องวัด Universal Spectrophotometer จนวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลงได้



สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
กิตติกรรมประกาศ	จ
รายการรูป และกราฟ	ฉ
รายการตาราง	ค
สัญลักษณ์	ด
หน่วย, ค่าคงที่ และเครื่องวัดที่ใช้	น



บทที่

๑. ทัวไป	๑
๑.๑ บทนำ	๑
๑.๒ แหล่งกำเนิดรังสีหรือแสง	๒
๑.๓ รังสี	๕
๑.๓.๑ รังสีเหนือม่วง (Ultraviolet Radiation)	๕
๑.๓.๒ แสงที่ตามนุษย์มองเห็น (Visible Radiation)	๕
๑.๓.๓ รังสีใต้แดง (Infrared Radiation)	๕
๑.๔ วัตถุประสงค์ของการวิจัย	๕

๒. เซลล์รับพลังงานแสง	๗
๒.๑ บทนำ	๗
๒.๒ รอยต่อ พี-เอ็น	๘
๒.๓ การทำงานเมื่อมีพลังงานแสงตกกระทบ	๑๑
๒.๔ วงจรสมมูลย์ และคุณสมบัติของเซลล์รับพลังงานแสง	๑๓
๒.๔.๑ แรงดันไฟฟ้าสูงสุด, V_o (open circuit voltage)	๑๔
๒.๔.๒ กระแสลัดวงจร, I_s (short circuit current)	๑๕
๒.๕ เซลล์รับพลังงานแสง (Photovoltaic cells)	๑๕
๒.๕.๑ เซลล์รับพลังงานแสง แบบ ผลึกของซิลิกอน (Silicon photovoltaic cells)	๑๖
๒.๕.๒ เซลล์รับพลังงานแสง แบบ ผลึกซีลีเนียม (Selenium photovoltaic cells)	๑๖
๒.๕.๓ Germanium photovoltaic cells	๑๗
๒.๕.๔ Indium - arsenide (In As) photovoltaic cells	๑๘
๒.๕.๕ Indium - antimonide (In Sb) photovoltaic cells	๑๘
๓. ฟิล์มกรองแสง	๑๘
๓.๑ ฟิล์มกรองแสง (Optical filters)	๑๘
๓.๑.๑ ฟิล์มกรองแสงแบบดูดซึม (Absorption filters)	๑๘
๓.๑.๒ ฟิล์มกรองแสงแบบสะท้อนแสง (Reflection filters หรือ Interference filters)	๑๘
๓.๒ ลักษณะการทำงาน	๑๘

หน้า

๓.๒.๑ Short-wavelength pass filters	๑๔
๓.๒.๒ Long-wavelength pass filters	๑๔
๓.๒.๓ Band pass filters	๒๐
๓.๓ เปอร์เซ็นต์การส่งผ่านทางสเปกตรัม (Percent transmittance)	๒๐
๓.๔ การกรองแสงโดยใช้ฟิล์มกรองแสงหลายอัน	๒๑
๓.๕ ชนิดของฟิล์มกรองแสง	๒๓
๓.๕.๑ Gelatin หรือ Acetate filters	๒๓
๓.๕.๒ Glass filters	๒๓
๔. หน่วยแสดงสัญญาณตัวเลข	๒๔
๔.๑ บทนำ	๒๔
๔.๒ Pulse width modulator analog-to-digital converter	๒๔
๔.๓ Up-down integrator analog-to-digital converter	๒๖
๔.๔ $3\frac{1}{2}$ - digit single chip analog-to-digital converter	๓๐
๔.๔.๑ ภาคแอนาล็อก	๓๐
๔.๔.๑.๑ ช่วงปรับศูนย์อัตโนมัติ (auto-zero phase, A/Z)	๓๐
๔.๔.๑.๒ ช่วง integrate สัญญาณ (Signal integrate phase, INT)	๓๑
๔.๔.๑.๓ ช่วง deintegrate (deintegrate phase, DE)	๓๑
๔.๔.๒ ภาคดิจิทัล	๓๒
๔.๔.๓ ภาคสัญญาณนาฬิกา	๓๒
๔.๔.๔ ค่าต่าง ๆ ของวงจรภายนอกที่เลือกใช้	๓๔
๔.๔.๕ วงจรเปลี่ยนสัญญาณแอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล (ICL 7107)	๓๔

๔.๕ วงจรเปลี่ยนกระแส เป็นแรงดันไฟฟ้า _____ ๓๖

 ๔.๕.๑ ออปแอมป์ _____ ๓๖

 ๔.๕.๑.๑ วงจรขยายแบบ inverting _____ ๓๖

 ๔.๕.๑.๒ วงจรขยายแบบ non-inverting _____ ๓๗

 ๔.๕.๑.๓ วงจรขยายความแตกต่าง _____ ๓๘

 ๔.๕.๒ ความคลาดเคลื่อนของแรงดัน output (output offset voltage, V_{OO}) _____ ๔๒

 ๔.๕.๒.๑ กระแสไบแอสที่ input (I_{IB}) _____ ๔๒

 ๔.๕.๒.๒ กระแส offset ที่ input (I_{IO}) _____ ๔๓

 ๔.๕.๒.๓ แรงดัน offset ที่ input (V_{IO}) _____ ๔๓

 ๔.๕.๑.๔ การ drift _____ ๔๔

 ๔.๕.๓ วงจรเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าเป็นแรงดันไฟฟ้าที่ออกแบบสร้าง _____ ๔๔

๔.๖ แหล่งจ่ายไฟตรง _____ ๔๖

 ๔.๖.๑ วงจร bridge rectifier _____ ๔๗

 ๔.๖.๒ วงจรควบคุมแรงดันคงที่ _____ ๔๗

 ๔.๖.๒.๑ วงจรควบคุมแรงดัน +๕ โวลต์ _____ ๔๗

 ๔.๖.๒.๒ วงจรควบคุมแรงดัน -๕ โวลต์ _____ ๔๘

 ๔.๖.๓ เซลล์แบตเตอรี่ _____ ๔๘

๕. การวิจัย และผลการวิจัย _____ ๕๐

 ๕.๑ ผลตอบสนอง รังสีหรือแสงเปรียบเทียบกับของเซลล์รับพลังงานแสง _____ ๕๐

๕.๑.๑	ผลตอบสนองเปรียบเทียบของเซลล์พลังงานแสงแบบผลึกซิลิกอน	๕๐
๕.๑.๒	ผลตอบสนองเปรียบเทียบของเซลล์พลังงานแสงแบบผลึกซิลิเนียม	๕๐
๕.๒	ผลตอบสนองต่อแสงของตามนุษย์ (V_{λ} curve หรือ CIE curve)	๕๑
๕.๓	การวัดเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านทางสเปกตรัม	๕๑
๕.๔	การปรับรูปลสเปกตรัมด้วยฟิล์มกรองแสง	๕๑
๕.๔.๑	การปรับผลตอบสนองของเซลล์พลังงานแสงให้เป็น V_{λ} curve	๕๑
๕.๔.๑.๑	เซลล์พลังงานแสงแบบผลึกซิลิเนียม	๕๒
๕.๔.๑.๒	เซลล์พลังงานแสงแบบผลึกซิลิกอน	๕๓
๕.๔.๒	การปรับผลตอบสนองต่อรังสีทำกันตลอดช่วง	๕๓
๕.๕	การปรับเทียบเครื่องมือวัดพลังงานแสง กับลักซ์มิเตอร์	๕๔
๕.๖	การปรับเทียบเครื่องมือวัดพลังงานแสงกับพลังงานแสงอาทิตย์	๕๕
๕.๗	การวัดเทียบ open circuit voltage ของเซลล์พลังงานแสงแบบผลึกซิลิกอน กับพลังงานแสงอาทิตย์	๕๖
๕.๘	ผลของอุณหภูมิที่มีต่อเซลล์พลังงานแสง	๕๖
๕.๙	ผลของมุมที่แสงตกกระทบ	๕๗
๖.	สรุปการวิจัย และข้อเสนอแนะ	๘๖
	เอกสารอ้างอิง	๘๘
	ภาคผนวก	๙๐
	ประวัติ ผู้เขียน	๑๓๐

รายการรูปและกราฟ

รูปที่

หน้า

๑.๑ Block diagram ของเครื่องมือวัดพลังงานการแผ่รังสี _____ ๑

๑.๒ แสดงสเปกตรัมของพลังงานการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ _____ ๒

๑.๓ แสดงสเปกตรัมของหลอดไอโซเดียมความดันไอต่ำ _____ ๓

๑.๔ แสดงสเปกตรัมของหลอดไอปรอทความดันไอสูง _____ ๓

๑.๕ แสดงสเปกตรัมของหลอดไส้ทั้งสแตนด์ที่อุณหภูมิ ๓๐๐๐ ° K _____ ๔

๑.๖ แสดงสเปกตรัมของหลอดไอปรอทความดันไอต่ำ (แบบ daylight) _____ ๔

๒.๑ แสดงระดับพลังงาน (energy level) ระดับต่าง ๆ
ของสารกึ่งตัวนำ _____ ๔

๒.๒ แสดงระดับพลังงานของรอยต่อ พี-เอ็น ของสารกึ่งตัวนำ _____ ๔

(ก) รอยต่อแบบ พี-เอ็น ในสภาวะสมดุล _____ ๔

(ข) รอยต่อแบบ พี-เอ็น เมื่อได้รับ forward bias voltage V . _____ ๔

๒.๓ แสดง I-V curve ของรอยต่อ พี-เอ็น ของเซลล์รับพลังงานแสง _____ ๑๑

๒.๔ แสดงการเกิด electron-hole pairs ของเซลล์รับพลังงานแสง
เมื่อมีแสงที่มีพลังงาน $h\nu \gg eE_g$ ตกกระทบ _____ ๑๒

๒.๕ (ก) เซลล์รับพลังงานแสงเมื่อต่อปลายทั้งสองเข้ากับภาระ R_L _____ ๑๓

(ข) วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเซลล์รับพลังงานแสง _____ ๑๓

(ค) วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเซลล์รับพลังงานแสง เมื่อไม่คิดค่า
ความต้านทานที่ต่ออย่างอนุกรม (R_S) _____ ๑๓

๒.๖ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส I_L กับแรงดัน V เมื่อกระแส
ลัดวงจร I_S มีค่าคงที่ค่าหนึ่ง ๆ _____ ๑๔

๒.๗ โครงสร้างของเซลล์รับพลังงานแสงแบบผลึกซิลิกอน _____ ๑๖

รูปที่

หน้า

๒.๘	โครงสร้างของเซลรับพลังงานแสงแบบผลึกซิลิเนียม	๑๗
๓.๑	แสดงค่าการส่งผ่านทางสเปกตรัม (T) ของฟิล์มกรองแสงใน อุดมคติ ซึ่งมีลักษณะการทำงานแบบ	
	(ก) Short-wavelength pass filter	๒๐
	(ข) Long-wavelength pass filter	๒๐
	(ค) Band pass filter	๒๐
๓.๒	แสดงการผสมสีแบบรวมสีของแสงระหว่างแสงสีน้ำเงิน ($T_{\lambda,B}$) กับแสงสีเหลือง ($T_{\lambda,Y}$)	๒๑
๓.๓	แสดงการผสมสีแบบแยกสีของแสงเมื่อให้แสงสีขาวผ่านฟิล์มกรองแสง สีน้ำเงิน ($T_{\lambda,B}$) และฟิล์มกรองแสงสีเหลือง ($T_{\lambda,Y}$)	๒๒
๔.๑	(ก) แสดง Block diagram ของ pulse width modulator analog-to-digital converter	๒๔
	(ข) Timing diagram ของคาปาซิเตอร์ C และของ pulse width	๒๔
๔.๒	แสดง Block diagram ของวงจร Up-down integrator analog-to-digital converter	๒๖
๔.๓	(ก) แสดง Block diagram ของ Up-down integrator analog-to-digital converter	๒๗
	(ข) แสดง timing diagram ของการแปลงสัญญาณแอนาล็อก เป็นสัญญาณดิจิทัล	๒๘
๔.๔	แสดง Block diagram ของภาคแอนาล็อกของ analog-to- digital converter	๓๑
๔.๕	แสดงแรงดันคล็อก C_{INT} ในช่วงเวลาทั้ง ๓ ช่วง และจำนวน clock pulses	๓๒

รูปที่

๔.๖ แสดง Block diagram ของภาคดิจิทัล และภาคสัญญาณนาฬิกา _____ ๓๓

๔.๗ แสดงการต่อวงจรของ ICL 7107 _____ ๓๕

๔.๘ แสดงการต่อวงจรขยายแรงดัน _____ ๓๖

๔.๙ การต่อออปแอมป์แบบ inverting _____ ๓๗

๔.๑๐ การต่อออปแอมป์แบบ non-inverting _____ ๓๘

๔.๑๑ การต่อออปแอมป์แบบขยายความแตกต่าง _____ ๓๘

๔.๑๒ รูปแสดงการต่อออปแอมป์แบบขยายความแตกต่าง เมื่อ $V_2 = 0$
และวงจรสมมูลของ input impedance _____ ๔๐

๔.๑๓ รูปแสดงการต่อออปแอมป์แบบขยายความแตกต่าง เมื่อ $V_1 = 0$
และวงจรสมมูลของ input impedance _____ ๔๑

๔.๑๔ รูปแสดงการต่อออปแอมป์แบบขยายความแตกต่าง และวงจร
สมมูลของ input impedance _____ ๔๑

๔.๑๕ การต่อวงจรแบบ inverting เมื่อสัญญาณ input ต่อลง ground _____ ๔๒

๔.๑๖ วงจรขยายแบบ inverting เมื่อต่อความต้านทาน R_2
ที่ input ขั้วบวก _____ ๔๓

๔.๑๗ แสดงการแทนออปแอมป์ที่ใช้งานด้วยออปแอมป์ในอุดมคติ
และเซลล์แบตเตอรี่ซึ่งแทนค่า V_{IO} _____ ๔๓

๔.๑๘ วงจรเปลี่ยนกระแส I_{in} เป็นแรงดัน V_o _____ ๔๔

๔.๑๙ แสดงการต่อวงจรภายนอก เพื่อแก้ค่าความคลาดเคลื่อนของ
แรงดัน output _____ ๔๕

๔.๒๐ แสดงวงจรเปลี่ยนกระแสเป็นแรงดันไฟฟ้า _____ ๔๖

๔.๒๑ แสดงการต่อวงจร bridge rectifier _____ ๔๗

๔.๒๒ วงจรควบคุมแรงดัน +๕ โวลต์ _____ ๔๗

๔.๒๓ วงจรควบคุมแรงดัน -๕ โวลต์ _____ ๔๘

รูปที่

๕.๒๔ รูปวงจรรายภายในของเครื่องมือวัดพลังงานแสง _____ ๕๙

๕.๒๕ รูป เครื่องมือวัดพลังงานแสงและเซลรับพลังงานแสง _____ ๕๙

๕.๑ แสดงการจัดตั้ง เครื่องมือ ในการเปรียบเทียบ เครื่องมือวัดพลังงาน
แสงกับลักซ์มิเตอร์ _____ ๕๔

๕.๒ แสดงรูปกล่องใส่ เซลรับพลังงานแสงก่อนและหลังแก้ edge effect _____ ๕๘

กราฟที่

๕.๑ แสดงผลตอบสนองต่อ รังสี เปรียบเทียบของ เซลรับพลังงาน
แสงซิลิกอน _____ ๕๙

๕.๒ แสดงผลตอบสนองต่อแสง เปรียบเทียบของ เซลรับพลังงาน
แสงซิลิเนียม _____ ๖๐

๕.๓ แสดงการตอบสนองต่อแสงของตามนุษย์ หรือ CIE curve
หรือ V_λ curve _____ ๖๑

๕.๔ (ก) รูปสเปกตรัมของฟิล์มกรองแสงสีเหลือง _____ ๖๒

(ข) รูปสเปกตรัมของฟิล์มกรองแสงสีน้ำเงิน _____ ๖๓

(ค) รูปสเปกตรัมของ อะคริลิกพลาสติกใส _____ ๖๔

๕.๕ รูปสเปกตรัมของฟิล์มกรองแสง เมื่อนำฟิล์มกรองแสงสีเหลือง
กับสีน้ำเงินมาซ้อนกัน _____ ๖๕

๕.๖ (ก) แสดงรูปเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านทางสเปกตรัมของฟิล์มกรองแสงในอุดมคติ
ที่สามารถปรับรูปผลตอบสนองต่อแสงของ เซลรับพลังงานแสงซิลิเนียมให้
เหมือน V_λ curve _____ ๖๖

(ข) แสดงรูปเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านทางสเปกตรัมของฟิล์มกรองแสงในอุดมคติ
ที่สามารถปรับรูปผลตอบสนองต่อรังสีของ เซลรับพลังงานแสงซิลิกอนให้
เหมือน V_λ curve _____ ๖๗

(ค) รูปสเปกตรัมของฟิล์มกรองแสงเบอร์ ๑๐๒ ของโกดัก _____ ๖๘

กราฟที่

หน้า

- ๕.๗ แสดงผลตอบสนองต่อแสงของเซลล์รับพลังงานแสงซีลีเนียม
เมื่อปรับรูปสเปกตรัมด้วยฟิล์มกรองแสงเบอร์ ๑๐๒ ของโกดัก _____ ๖๔
- ๕.๘ รูปสเปกตรัมของ อะคริลิกพลาสติคซีเลีย _____ ๗๐
- ๕.๙ (ก) แสดงผลตอบสนองต่อแสงของเซลล์รับพลังงานแสงซีลีเนียม
เมื่อปรับรูปสเปกตรัมด้วย อะคริลิกพลาสติคซีเลีย _____ ๗๑
- (ข) แสดงผลตอบสนองต่อแสงของเซลล์รับพลังงานแสงซีลีเนียม เมื่อปรับรูป
สเปกตรัมด้วยฟิล์มกรองแสงสีเหลืองร่วมกับสีน้ำเงิน _____ ๗๒
- ๕.๑๐ (ก) รูปสเปกตรัมของกระจกกรองแสงเบอร์ ๓๐๑ (Infrareded-cutoff
Filter) ของโกดัก _____ ๗๓
- (ข) การส่งผ่านทางสเปกตรัมเปรียบเทียบของกระจกกรองแสงสีซีเลีย _____ ๗๔
- ๕.๑๑ (ก) แสดงผลตอบสนองเปรียบเทียบของเซลล์รับพลังงานแสงซิลิกอน เมื่อปรับ
ด้วยฟิล์มกรองแสงเบอร์ ๑๐๒ ร่วมกับเบอร์ ๓๐๑ เพื่อให้มีรูปสเปกตรัม
คล้ายกับ V_{λ} curve _____ ๗๕
- (ข) ผลตอบสนองต่อแสงเปรียบเทียบของเซลล์รับพลังงานแสงซิลิกอน เมื่อใช้
งานร่วมกับกระจกกรองแสงสีซีเลีย ๒ ชั้น และอะคริลิกพลาสติคซีเลีย _____ ๗๖
- ๕.๑๒ (ก) แสดงผลตอบสนองต่อรังสีของเซลล์รับพลังงานแสงซิลิกอน เมื่อปรับด้วยฟิล์ม
กรองแสง เพื่อให้มีรูปสเปกตรัมราบเท่ากันตลอดช่วง _____ ๗๗
- (ข) แสดงผลตอบสนองต่อรังสีของเซลล์รับพลังงานแสงซิลิกอน เมื่อปรับด้วยฟิล์ม
กรองแสง เพื่อให้มีรูปสเปกตรัมราบเท่ากันตลอดช่วง _____ ๗๘
- ๕.๑๓ (ก) แสดงการปรับเครื่องมือวัดพลังงานแสง เมื่อใช้ซีลีเนียมเป็นตัวรับพลังงาน
แสงจากหลอดกำเนิดแสงชนิดต่างๆเทียบกับลักซ์มิเตอร์ _____ ๗๙
- (ข) แสดงการปรับเครื่องมือวัดพลังงานแสง เมื่อใช้ซีลีเนียมร่วมกับอะคริลิก
พลาสติคซีเลีย เป็นตัวรับพลังงานแสงจากหลอดกำเนิดแสงชนิดต่างๆ
เทียบกับลักซ์มิเตอร์ _____ ๘๐

กราฟที่

หน้า

(ค) แสดงการปรับเครื่องมือวัดพลังงานแสง เมื่อใช้ซิลิกอนร่วมกับกระจกกรองแสงสีเขียว ๒ ชั้น และอะคริลิกพลาสติกสีเขียว เป็นตัวรับพลังงานแสง ชนิดต่างๆ เทียบกับลักซ์มิเตอร์ _____ ๘๑

๕.๑๔ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานแสงอาทิตย์กับค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือวัดพลังงานที่ใช้ซิลิกอนเป็นตัวรับพลังงานแสงอาทิตย์ _____ ๘๒

๕.๑๕ แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง open circuit voltage ของเซลล์รับพลังงานแสงซิลิกอนกับพลังงานแสงอาทิตย์ (mW/cm^2) _____ ๘๓

๕.๑๖ แสดงค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือวัดพลังงานแสงที่มีค่าแปรเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิทำงาน เมื่ออุณหภูมิห้องขณะนั้นมีค่า ๓๒ องศาเซนติเกรด _____ ๘๔

๕.๑๗ แสดงผลของมุมที่แสงตกกระทบ และการแกว่ง edge effect _____ ๘๕

รายการตาราง

ตารางที่	หน้า
๕.๑ (ก) ผลตอบสนองต่อแสงของ เซลล์รับพลังงานแสงซิลิกอน _____	๕๑
(ข) ผลตอบสนองต่อแสงของ เซลล์รับพลังงานแสงซิลิกอน (จากหนังสือของ S.S.L.Chang) _____	๕๒
๕.๒ ผลตอบสนองต่อแสงของ เซลล์รับพลังงานแสงซิลิเนียม _____	๕๓
๕.๓ การตอบสนองต่อแสงของตามนุษย์ _____	๕๔
๕.๔ (ก) เพอร์เซนต์การส่งผ่านทางสเปกตรัมของฟิล์มกรองแสงสีเหลือง _____	๕๕
(ข) เพอร์เซนต์การส่งผ่านทางสเปกตรัมของฟิล์มกรองแสงสีน้ำเงิน _____	๕๖
(ค) เพอร์เซนต์การส่งผ่านทางสเปกตรัมของแผ่นอะคริลิกพลาสติกใส _____	๕๗
๕.๕ เพอร์เซนต์การส่งผ่านทางสเปกตรัมของฟิล์มกรองแสง เมื่อนำฟิล์มกรองแสง สีเหลืองกับสีน้ำเงินมาซ้อนกัน _____	๕๘
๕.๖ เพอร์การส่งผ่านทางสเปกตรัมของฟิล์มกรองแสงเบอร์ ๑๐๒ ของโกดัก _____	๕๙
๕.๗ ผลตอบสนองต่อแสงของ เซลล์รับพลังงานแสงซิลิเนียม เมื่อปรับรูปลспекตรัม ด้วยฟิล์มกรองแสงเบอร์ ๑๐๒ ของโกดัก _____	๑๐๐
๕.๘ เพอร์เซนต์การส่งผ่านทางสเปกตรัมของอะคริลิกพลาสติกสีเขียว _____	๑๐๑
๕.๘ (ก) ผลตอบสนองต่อแสงของ เซลล์รับพลังงานแสงซิลิเนียม เมื่อปรับรูปลспекตรัม ด้วยอะคริลิกพลาสติกสีเขียว _____	๑๐๒
(ข) ผลตอบสนองต่อแสงของ เซลล์รับพลังงานแสงซิลิเนียม เมื่อปรับรูปลспекตรัม ด้วยฟิล์มกรองแสงสีเหลืองร่วมกับสีน้ำเงิน _____	๑๐๓

ตารางที่

- ๕.๑๐ (ก) เปอร์เซนต์การส่งผ่านทางสเปกตรัมของกระจกกรองแสงเบอร์๓๐๑ของโกดัก _____ ๑๐๔
- (ข) เปอร์เซนต์การส่งผ่านทางสเปกตรัมของกระจกกรองแสงสีเขียว _____ ๑๐๕
- ๕.๑๑ (ก) ผลตอบสนองต่อแสงของเซลล์พลังงานแสงซิลิกอน เมื่อปรับรูปสเปกตรัม
ด้วยฟิล์มกรองแสงเบอร์ ๑๐๒ ร่วมกับเบอร์ ๓๐๑ ของโกดัก _____ ๑๐๖
- (ข) ผลตอบสนองต่อแสงของเซลล์พลังงานแสงซิลิกอน เมื่อปรับรูปสเปกตรัม
ด้วยกระจกกรองแสงสีเขียว ๒ ชั้นร่วมกับอะคริลิกพลาสติกสีเขียว _____ ๑๐๗
- ๕.๑๒ (ก) การปรับรูปสเปกตรัมของเซลล์พลังงานแสงซิลิกอนให้มีผลตอบสนองต่อ
รังสีเท่ากันตลอดช่วง _____ ๑๐๘
- (ข) การปรับรูปสเปกตรัมของเซลล์พลังงานแสงซิลิกอนให้มีผลตอบสนองต่อ
รังสีเท่ากันตลอดช่วง _____ ๑๐๙
- ๕.๑๓ (ก) การปรับเครื่องมือวัดพลังงานแสงกับลักซ์มิเตอร์ด้วยหลอดกำเนิดแสง
๔ ชนิด เมื่อใช้ซีลีเนียมเป็นตัวรับพลังงานแสง _____ ๑๑๐
- (ข) การปรับเครื่องมือวัดพลังงานแสงกับลักซ์มิเตอร์ด้วยหลอดกำเนิดแสง
๔ ชนิด เมื่อใช้ซีลีเนียมร่วมกับอะคริลิกพลาสติกสีเขียวเป็นตัวรับพลังงานแสง _____ ๑๑๑
- (ค) การปรับเครื่องมือวัดพลังงานแสงกับลักซ์มิเตอร์ด้วยหลอดกำเนิดแสง
๔ ชนิด เมื่อใช้ซิลิกอนร่วมกับกระจกกรองแสงสีเขียว ๒ ชั้น และอะคริลิก
พลาสติกสีเขียว เป็นตัวรับพลังงานแสง _____ ๑๑๒
- ๕.๑๔ การปรับเครื่องมือวัดพลังงานแสงเทียบกับไพราโนมิเตอร์ _____ ๑๑๓
- ๕.๑๕ การวัด open circuit voltage ของซิลิกอนเทียบกับไพราโนมิเตอร์ _____ ๑๑๔
- ๕.๑๖ ผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือวัดพลังงานแสง _____ ๑๑๕
- ๕.๑๗ ผลของมุมตกกระทบและ edge effect ที่มีต่อค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือวัด
พลังงานแสง _____ ๑๑๖

สัญลักษณ์

E_C	ระดับพลังงานขอบล่างของ conduction band
E_D	ระดับพลังงานของ donor level
E_A	ระดับพลังงานของ acceptor level
E_f	ระดับพลังงานของ fermi level
E_V	ระดับพลังงานขอบบนของ valence band
I_1	กระแสอิเล็กตรอนจากด้านพี ไปด้านเอ็น
I_2	กระแสโฮลจากด้านพี ไปด้านเอ็น
I_3	กระแสอิเล็กตรอนจากด้านเอ็น ไปด้านพี
I_4	กระแสโฮลจากด้านเอ็น ไปด้านพี
n_1	ความหนาแน่น (density) ของอิเล็กตรอนด้านพี
n_2	ความหนาแน่นของโฮลด้านพี
n_3	ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนด้านเอ็น
n_4	ความหนาแน่นของโฮลด้านเอ็น
k_1, k_2, k_3, k_4	ค่าคงที่
I_0	กระแสไหลกลับอิ่มตัว (reverse saturation current) ของเซลล์รับพลังงานแสงเมื่อไม่มีแสงตกกระทบบ หรือเรียกว่า 'dark current'
I_S	กระแสลัดวงจรของเซลล์รับพลังงานแสง ซึ่งเป็นกระแสของ minority carriers
V	แรงดันคล่อมปลายทั้งสองของเซลล์รับพลังงานแสง
V_0	แรงดันสูงสุด หรือ open circuit voltage ของเซลล์รับพลังงานแสง
e	พลังงานของประจุไฟฟ้าอิเล็กตรอน
η	ความถี่ของแสง



E_g	energy gap
T	อุณหภูมิทำงานมีหน่วยเป็นองศาเคลวิน ($^{\circ}K$)
V_T	Thermal voltage มีค่า $= \frac{kT}{e} = 8.616 \times 10^{-5} \times T$
e	natural log. base
S_{Si}	ผลตอบสนองต่อรังสีของเซลล์รับพลังงานแสงแบบผลึกซิลิกอน
S_{Se}	ผลตอบสนองต่อแสงของเซลล์รับพลังงานแสงแบบผลึกซีลีเนียม
V_{λ}	การตอบสนองต่อแสงของตามนุษย์
λ	ความยาวคลื่นของแสงมีหน่วยเป็นนาโนเมตร
γ_{λ}	ค่าการส่งผ่านทางสเปกตรัมที่มีความยาวคลื่นต่าง ๆ กัน
$\gamma_{\lambda,Y}$	การส่งผ่านทางสเปกตรัมของฟิล์มกรองแสงสีเหลือง
$\gamma_{\lambda,B}$	การส่งผ่านทางสเปกตรัมของฟิล์มกรองแสงสีน้ำเงิน
γ_A	การส่งผ่านทางสเปกตรัมของอะคริลิกพลาสติกใส
$\gamma_{\lambda,G}$	การส่งผ่านทางสเปกตรัมของฟิล์มกรองแสง เมื่อนำฟิล์มกรองแสงสีเหลืองกับสีน้ำเงินมาซ้อนกัน
γ_{102}	การส่งผ่านทางสเปกตรัมของฟิล์มกรองแสงเบอร์ ๑๐๒ ของโกดัก
γ_{AG}	การส่งผ่านทางสเปกตรัมของอะคริลิกพลาสติกสีเขียว
γ_{301}	การส่งผ่านทางสเปกตรัมของกระจกกรองแสงเบอร์ ๓๐๑ ของโกดัก
$\left. \begin{matrix} \gamma_{F_1}, \gamma_{F_2} \\ \gamma_{F_3}, \gamma_{F_4} \end{matrix} \right\}$	การส่งผ่านทางสเปกตรัมของฟิล์มกรองแสง ในอุดมคติ
P_I	พลังงานการแผ่รังสีที่ตกกระทบบัวกลาง
P_T	พลังงานการแผ่รังสีที่ได้ผ่านตัวกลางไป
V_{IN}	สัญญาณแอนะล็อกที่เข้ามาทาง input
Z_{in}	input impedance ของออปแอมป์
V_{oo}	ความคลาดเคลื่อนของแรงดัน output

I_{IB}	กระแส bias ที่ input (Input bias current)
I_{IO}	กระแส offset ที่ input (Input offset current)
V_{IO}	แรงดัน offset ที่ input (Input offset voltage)
V_{rms}	root mean square voltage
D_1	ซีลิกอนไดโอดทนกระแส forward ได้ ๑ แอมป์ และทนแรงดันย้อนกลับได้ ๔๐๐ โวลต์
D_2	
D_3	
D_4	
C_1	คาปาซิเตอร์ขนาด ๑,๐๐๐ ไมโครฟารัด, แรงดันทำงาน ๑๖ โวลต์
C_2	
D_Z	ซีเนอร์ไดโอด
I_Z	กระแสไหลกลับของซีเนอร์ไดโอด
CIE	Commission International de l' Eclairage (International Commission on Illumination)

$3\frac{1}{2}$ Digit หลอดตัวเลขมีอยู่ ๓ หลัก ทางขวามืออ่านค่าได้ตั้งแต่ ๐๐๐ จนถึง ๔๔๔ แต่หลอดตัวเลขซ้ายมือสุดอ่านค่าได้ ๐ กับ ๑ เท่านั้น นอกจากนี้ก็มีเครื่องหมายบวก, ลบ อีกหลักหนึ่งด้วย

หน่วย, ค่าคงที่ และเครื่องวัดที่ใช้

หน่วย และค่าคงที่

1 watt ของแสง	= 680 lumens ที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร
1 foot-candle	= 1 lumen/ft ²
1 lux	= 1 lumen/m ²
1 foot-candle	= 10.764 lux
1 calory/min	= 69.779 mW
1 watt	= 14.331 calories/min
1 joule	= 1 watt-sec.
Planck's constant , h	= 6.6252 x 10 ⁻³⁴ joule-sec.
Boltzmann's constant , k	= 1.3804 x 10 ⁻²³ joule/°K
Electron charge , e	= 1.6021 x 10 ⁻¹⁹ coulomb

เครื่องวัดที่ใช้

1. Double Beam Spectrophotometer , "PERKIN-ELMER" Model 124 ,
Serial No. 6859-07
2. X-Y Recorder , "PERKIN-ELMER" Model 56
3. Universal Spectrophotometer , "COLEMAN" Model 14 , Serial
No. D4352
4. Pyranometer , "EKO" Model MS-4 , Serial No. A76159
5. Differential AC/DC Voltmeter , "FLUKE" Model 803B , Serial
No. 8259
6. Foot-candle or Lux Meter , "WESTON" Model 614 , Serial
No. 9037