

Laboratorio di fisica della materia

I anno CdL Specialistica in Fisica

Misura 3 – Misura dell'energia associata ad un fotone

L'obiettivo di questo esperimento era di valutare l'energia associata ad un fotone nello spettro della luce visibile attraverso la misura della radiazione di corpo nero.

Premessa

Secondo la legge di Planck, un oggetto irradia energia in forma di fotoni il cui spettro dipende dalla temperatura dell'oggetto stesso. Ogni singolo fotone trasporta un'energia pari a $E = \hbar\omega$ dove \hbar è la costante di Planck ridotta e ω la pulsazione associata ad una determinata componente della radiazione emessa a frequenza $f = \omega/2\pi$. Se i fotoni emessi sono trattati come un gas [1], si può usare un approccio statistico per ricavare la legge di Planck, che mette in relazione l'intensità $I(\omega, T)$ della luce emessa ad una determinata pulsazione ω da un corpo nero di temperatura T :

$$I = \frac{\hbar\omega^3}{\pi^2 c^3 \text{Exp}\left(\frac{\hbar\omega}{k_b T}\right) - 1} \quad (1)$$

dove c è la velocità della luce, k_b la costante di Boltzmann, ω è dato in Hertz e T in Kelvin.

Si consideri il rapporto tra due intensità, I_1 e I_2 , misurate alla stessa frequenza (colore) ma a temperature T_1 e T_2 . Dall'equazione 1, tale rapporto è dato da:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{\text{Exp}\left(\frac{\hbar\omega}{k_b T_2}\right) - 1}{\text{Exp}\left(\frac{\hbar\omega}{k_b T_1}\right) - 1} \approx \frac{\text{Exp}\left(\frac{\hbar\omega}{k_b T_2}\right)}{\text{Exp}\left(\frac{\hbar\omega}{k_b T_1}\right)} \quad (2)$$

L'approssimazione della formula è valida per emissione di luce visibile e nel vicino infrarosso in cui $\omega > 6.5 \times 10^{11}$ Hz. Possiamo quindi ricavare:

$$\hbar\omega = k_b / (1/T_2 - 1/T_1) * \ln(I_1/I_2) \quad (3)$$

Dall'equazione 3, $\hbar\omega$ può essere determinato sperimentalmente dal rapporto di intensità di emissione di un corpo nero a due temperature distinte. Tuttavia è più utile per raccogliere un discreto numero di dati relativi all'intensità per più valori di temperatura ad una specifica lunghezza d'onda della luce. In questo quadro, è più preciso di utilizzare il metodo dei minimi quadrati per estrarre il valore della costante di Planck.

$$\frac{1}{T} = \left[\frac{k_b}{\hbar\omega} \ln(I_0) + \frac{1}{T_0} \right] + \frac{-k_b}{\hbar\omega} \ln(I) \quad (4)$$

Dove $1/T$ è la variabile dipendente e $\ln(I)$ agisce da variabile indipendente. Utilizzando questa formula attraverso l'analisi minimi quadrati possiamo ricavare $\hbar\omega$ ad una determinata frequenza.

Indicazioni per lo svolgimento della prova di laboratorio

Per eseguire l'esperimento, una lampadina a filamento di tungsteno è utilizzata come sorgente di emissione di luce (corpo nero) la cui temperatura è variata per effetto Joule. La lampadina è connessa ad un generatore di corrente mentre l'intensità luminosa ad una frequenza fissata è misurata raccogliendo con un fotodiodo la luce emessa dal filamento **opportunamente filtrata**.

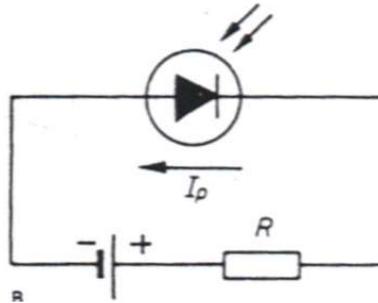
¹ "Thermal Physics". C. Kittel, H. Kroemer. Pg 94.

La temperatura del filamento di tungsteno nella lampadina è controllata variando la tensione V_L ai suoi capi. Per temperature di circa 2500 K, la resistenza del filamento di tungsteno obbedisce ad una relazione lineare con la temperatura:

$$R(T) = R_0 (1 + a(T - T_0)) \quad (5)$$

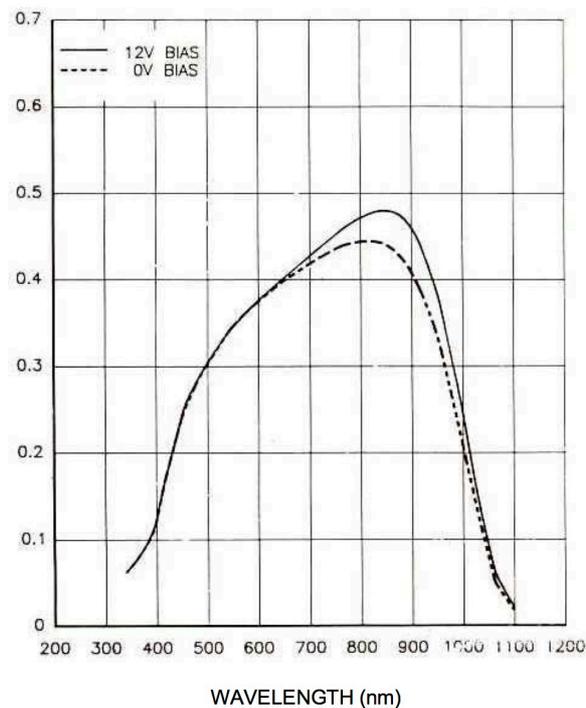
Il valore tabulato di a per il tungsteno è 4,5 mΩ/K. Tuttavia, a causa delle impurità del materiale, il valore effettivo del filamento può essere diverso dal valore tabulato. Quindi deve essere considerata per a un'incertezza di 0,5 mΩ/K.

Il fotodiode deve essere collegato nel seguente circuito per misurare l'intensità della luce emessa:



in cui il generatore di tensione è portato a 12,0 V e la corrente foto-indotta I_p è misurata attraverso la misura della ddp ai capi del resistore di shunt R avendo misurato inizialmente il valore della sua resistenza (si scelga un resistore con $R = 1 \div 100 \text{ k}\Omega$). E' buona norma **mantenere la ddp ai capi del fotodiode costante** in modo da eliminare la leggera dipendenza della risposta dello stesso dalla tensione di polarizzazione per effetto della corrente di polarizzazione inversa. **Attenzione, il fotodiode può essere fortemente danneggiato se polarizzato con tensioni superiori a 15 V.**

Un aspetto importante del fotodiode utilizzato è la sua curva di risposta, ovvero la dipendenza della corrente prodotta dal fotodiode dalla lunghezza d'onda per un'intensità di luce costante. Tale curva ha il seguente andamento:



Altre caratteristiche possono essere dedotte dalla tabella contenuta nella sua scheda tecnica.

Materiali

1. Contenitore con pareti opache
2. Fogli di materiale riflettente
3. Una lampadina (12 V; 5 W)
4. Un fotodiodo Centronic OSD15-5T
5. Un resistore con $R = 1 \div 100 \text{ k}\Omega$
6. 4 Multimetri
7. 2 Generatori di ddp
8. Filtri colorati saturi
9. Cavi e basetta

Realizzazione dell'esperimento

1. Realizzare un filtro di un determinato colore da porre davanti al fotodiodo;
2. Realizzare un contenitore a pareti riflettenti in cui inserire la lampadina ed il fotodiodo ponendoli su pareti opposte;
3. Chiudere il contenitore in modo che non filtri luce al suo interno.
4. Connettere la lampadina ad un generatore di ddp avendo cura di inserire un voltmetro ed un amperometro nel circuito;
5. Misurare il valore di resistenza del resistore di shunt;
6. Realizzare il circuito di polarizzazione del fotodiodo ponendo un voltmetro ai capi del resistore di shunt e ai capi del fotodiodo;
7. Polarizzare il fotodiodo fino ad ottenere $V_d=12\text{V}$ ai suoi capi e misurare la tensione V_R ai capi del resistore di shunt;
8. Fornire una serie di valori di ddp al filamento della lampadina (almeno 5) nell'intervallo 0 - 12V (attenzione a non eccedere 12 V!) e registrare i lavori V_L , I_L , V_d e V_R . Si ricorda di verificare che V_d rimanga costante;
9. Ripetere l'esperimento cambiando il filtro posto davanti al fotodiodo.

Elaborazione

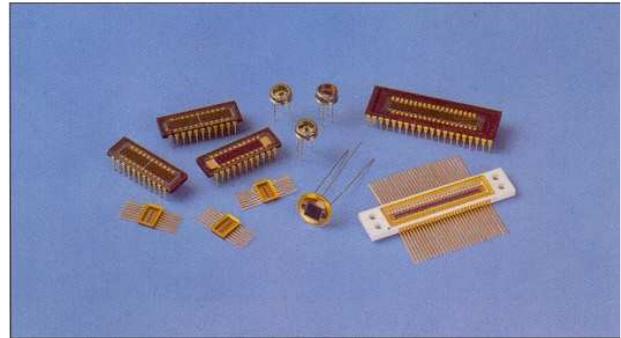
1. Elaborare i dati per ricavare il valore dell'energia del fotone associata ai colori dei filtri utilizzati.
2. Ricavare una stima del valore della costante di Planck da una misura della frequenza della luce trasmessa dai filtri (esperimento da realizzare liberamente).
3. Quale influenza ha la curva di risposta del fotodiodo sulle valutazioni effettuate?

Silicon Photodetector

Series 5T

BLUE SENSITIVE FOR BIASED OR UNBIASED OPERATION

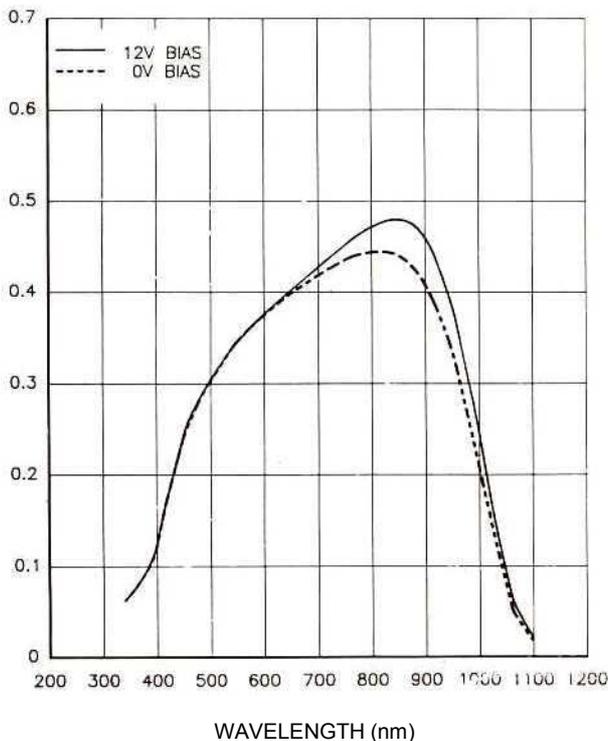
The Centronic Series 5T detectors offer high blue sensitivity coupled with high shunt resistance and low dark leakage current. They are particularly suited to low light level applications from 430-900 nm where the highest signal to noise ratio is important. They may be operated photovoltaically or with a reverse bias of up to 12V where lower capacitance is needed. The 5T range provides the most economic solution for all applications where high speed of response above 800 nm is not critical.



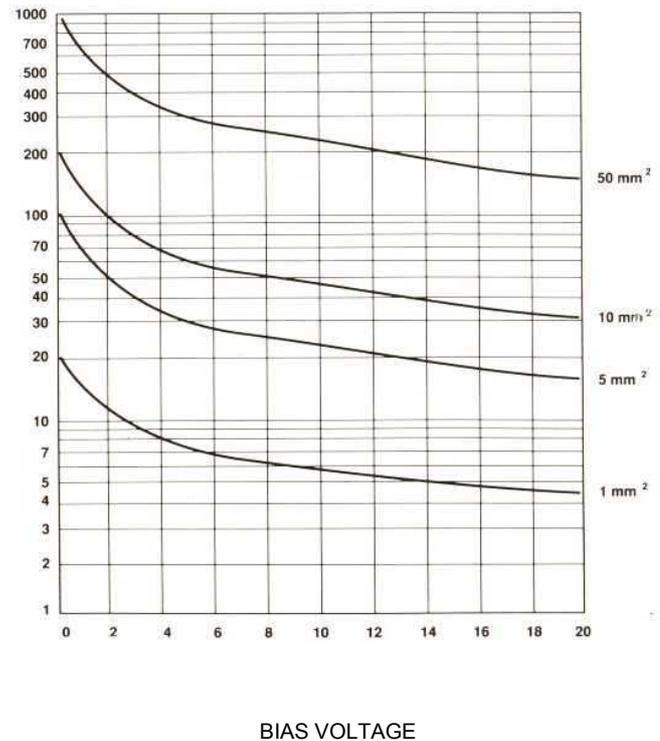
ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

	Max. Rating
DC Reverse Voltage	15V
Peak Pulse Current (1 μ s, 1% duty cycle)	200mA
Peak DC Current	10mA
Storage Temperature Range Except for those listed below:	-45°C to + 100°C -25°C to + 80°C
Operating Temperature Range Except for: LD12, LD16, LD20, LD35, MD25, MD100 and MD144-5T	-25°C to + 75°C 0°C to + 75°C
Soldering Temperature for 5 seconds max.	200°C

Series 5T – Typical Spectral Response



Series 5T – Typical Capacitance versus Bias Voltage for a given Detector Area



Silicon Photodetector

Series 5T

Electrical / Optical Specifications

Characteristics measured at 22°C (±2) ambient, and a reverse bias of 12 volts, unless otherwise stated. Shunt Resistance measured at ± 10mV.

For rise time on Quadrants, Linear and Matrix Arrays take figures for single element diodes having equivalent active area.

Single Elements

Type No.	Active Area		Responsivity A/W $\lambda = 436\text{nm}$		Dark Current (nA)		NEP $\text{WHz}^{-1/2}$ $\lambda = 436\text{nm}$ $V_r = 0\text{V}$ Typ.	Capacitance pF		Shunt Resistance Megohms		Risetime ns $\lambda = 820\text{nm}$ $R_L = 50\ \Omega$ Typ.	Package
	mm^2	mm	Min.	Typ.	Max.	Typ.		$V_r = 0\text{V}$ Max.	$V_r = 12\text{V}$ Max.	Min.	Typ.		
OSD1-5T	1	1.13 dia	0.18	0.21	1	0.2	2.5×10^{-14}	35	7	250	1000	7	TO18
OSD3-5T	3	2.16 x 1.4	0.18	0.21	2	0.5	3.0×10^{-14}	80	20	100	700	9	TO18
OSD5-5T	5	2.52 dia	0.18	0.21	2	0.5	3.3×10^{-14}	130	35	100	600	9	TO5
OSD7.5-5T	7.5	2.75 x 2.75	0.18	0.21	3	1	4.6×10^{-14}	180	40	60	300	10	TO5
OSD15-5T	15	3.8 x 3.8	0.18	0.21	5	1	5.5×10^{-14}	390	80	50	200	12	TO5
OSD35-5T	35	5.9 x 5.9	0.18	0.21	10	2	7.5×10^{-14}	950	200	20	100	20	TO8
OSD50-5T	50	7.98 dia	0.18	0.21	15	5	1.6×10^{-13}	1300	270	5	25	26	TO8
OSD60-5T	62	7.9 x 7.9	0.18	0.21	25	6	2.3×10^{-13}	1800	310	3	12	30	TO8
OSD100-5T	100	11.3 dia	0.18	0.21	30	8	2.1×10^{-13}	2500	520	2	15	45	13
OSD300-5T	300	19.54 dia	0.18	0.21	200	30	3.5×10^{-13}	7500	1500	1	5	125	15

Quadrants

(Values given are per element unless otherwise stated)

Type No.	Active Area (Total)			Responsivity A/W $\lambda = 436\text{nm}$		Dark Current nA		NEP $\text{WHz}^{-1/2}$ $\lambda = 436\text{nm}$ $V_r = 0\text{V}$ Typ.	Capacitance pF		Shunt Resistance Megohms		Crosstalk% $\lambda = 900\text{nm}$		Package
	mm^2	mm	Sep. mm	Min.	Typ.	Max.	Typ.		$V_r = 0\text{V}$ Max.	$V_r = 12\text{V}$ Max.	Min.	Typ.	Max.	Typ.	
QD7-5T	7	2.99 dia	0.2	0.18	0.21	6	2	2.3×10^{-14}	50	15	80	1200	5	1	TO5
QD50-5T	50	7.98 dia	0.2	0.18	0.21	30	3	4.6×10^{-14}	330	80	10	300	5	1	10
QD100-5T	100	11.3 dia	0.2	0.15	0.18	50	5	7.0×10^{-14}	650	130	5	100	5	1	11

Silicon Photodetector

Series 5T

Linear Arrays

(Values given are per element unless otherwise stated)

Type No.	No. of Elements	Array Dimensions				Responsivity A/W $\lambda = 436 \text{ nm}$ $V_r = 0V$		Shunt Resistance Megohms		NEP $\text{WHz}^{-1/2}$ $\lambda = 436 \text{ nm}$ Typ.	Capacitance pF		Dark Current nA		Package
		Area mm^2	Width mm	Lgth. mm	Sep. mm	Min.	Typ.	Min.	Typ.		$V_r = 0V$ Min.	$V_r = 12V$ Typ.	Max.	Typ.	
LD2A-5T	2	1.00	2.0	0.5	0.05	0.18	0.21	100	1000	2.5×10^{-14}	30	6	2	0.7	TO5
LD2B-5T	2	2.02	1.422	1.422	0.45	0.18	0.21	50	1000	2.5×10^{-14}	60	12	5	1	TO5
LD2C-5T	2	0.483	1.27	0.38	0.05	0.15	0.18	100	1000	2.9×10^{-14}	15	4	2	0.5	TO18
LD4B-5T	4	15.0	3.0	5.0	0.05	0.15	0.18	15	400	4.5×10^{-14}	380	80	25	3	16
LD4C-5T	4	0.64	0.8	0.8	0.3	0.15	0.18	40	500	4.0×10^{-14}	38	10	10	1	TO5
LD5A-5T	5	0.10	0.125	0.8	0.05	0.15	0.18	100	1000	2.9×10^{-14}	4	2	5	0.5	TO5
LD12A-5T	12	0.25	0.5	0.5	0.05	0.15	0.18	100	2000	2.0×10^{-14}	10	3	5	0.5	21
LD16C-5T	16	0.035	0.2	0.175	0.025	0.15	0.18	100	2000	2.0×10^{-14}	10	2	5	0.5	20
LD16(1.8)-5T	16	1.8	2.1	0.9	0.1	0.18	0.21	100	1500	2.0×10^{-14}	60	11	5	0.5	16
LD16(2.5)-5T	16	2.5	2.5	1	0.5	0.18	0.21	100	1500	2.0×10^{-14}	80	14	5	0.5	16
LD20-5T	20	3.60	4.0	0.90	0.05	0.18	0.21	100	1000	2.5×10^{-14}	130	20	5	0.5	16
LD20(0.36)-5T	20	0.36	0.6	0.6	0.1	0.18	0.21	100	2000	1.7×10^{-14}	15	5	5	0.5	16
LD35-5T	35	4.42	4.6	0.96	0.03	0.18	0.21	40	2000	1.7×10^{-14}	130	25	5	0.5	17

Matrix Arrays

(Values given are per element unless otherwise stated)

Type No.	No. of Elements	Array Dimensions				Responsivity A/W $\lambda = 436 \text{ nm}$ $V_r = 0V$		Shunt Resistance Megohms		NEP $\text{WHz}^{-1/2}$ $\lambda = 436 \text{ nm}$ Typ.	Capacitance pF		Dark Current nA		Package
		Area mm^2	Width mm	Lgth. mm	Sep. mm	Min.	Typ.	Min.	Typ.		$V_r = 0V$ Min.	$V_r = 12V$ Typ.	Max.	Typ.	
MD25-5T	5 x 5	7.99	2.7	2.7	0.1	0.15	0.18	5	200	6.4×10^{-14}	240	47	50	5	18
MD100-5T	10 x 10	1.96	1.4	1.4	0.1	0.15	0.18	1	400	4.5×10^{-14}	55	12	200	1	19
MD144-5T	12 x 12	1.96	1.4	1.4	0.1	0.15	0.18	1	400	4.5×10^{-14}	55	12	200	1	19

Note: Recommended operating voltage range 0 to 12 volts, for all Series 5T Detectors

Highlighted items are Centronic standard products generally available from stock