
Giacomo Torzo

Studio di una lampada a incandescenza usando CBL come oscilloscopio

Riassunto:

Si studia il comportamento elettro-ottico di una lampadina alimentata in corrente alternata con un sistema composto da CBL, calcolatrice grafica TI-89, due sensori di tensione e un sensore di luce.

Introduzione

Nelle riviste dedicate al laboratorio didattico di fisica sono apparsi molti articoli dedicati allo studio delle lampade ad incandescenza, alcuni molto interessanti e didatticamente validi ¹, ma non una analisi che raccolga insieme tre aspetti osservabili in una lampadina alimentata in corrente alternata: riscaldamento per

effetto Joule, non linearità e sfasamento tra massimi di luce emessa e massimi della potenza erogata. In questo contributo sono messi in evidenza il riscaldamento del filamento attraverso misure della variazione della sua resistenza al crescere della corrente che lo attraversa, la conseguente relazione non lineare tra tensione e corrente e lo sfasamento tra i massimi di luce emessa e i massimi della potenza erogata (dovuto insieme alla capacità termica finita del filamento, ai processi di trasferimento dell'energia prodotta e alla non linearità del sistema). L'insieme dei dati raccolti in questo esperimento forniscono ampio materiale per una utile discussione in classe sui fenomeni elettrici, termici e ottici.

Come è nato questo esperimento

I lettori che troveranno interessante l'esperimento che qui descrivo (spero ce ne siano...) dovrebbero ringraziare in primo luogo Michele Impedovo, che qualche tempo fa ci aveva chiesto la ragione di uno sfasamento tra massimi di luce emessa e massimi della corrente, che aveva notato misurando con un sensore di luce l'emissione di una lampadina alimentata a rete e con un sensore di campo magnetico l'induzione dovuta alla corrente elettrica. Il suo dubbio era che la risposta della sonda di luce fosse lenta. Anche se la spiegazione qualitativa di questo sfasamento mi è parsa subito certa dopo una veloce analisi con un oscilloscopio, mi son chiesto se fosse possibile mettere in evidenza con semplicità i vari aspetti del fenomeno, in un esperimento che fosse alla portata di tutti, e in particolare che non richiedesse l'uso di un oscilloscopio (strumento che in questi anni sembra essere poco simpatico alla maggior parte degli insegnanti di fisica).

Quando Giorgio Delfitto e Pietro Scatturin hanno completato un prototipo di generatore di segnali² adatto ad essere usato in un laboratorio "povero" con CBL (e che sarà presto reso disponibile commercialmente

Nota 1. Si veda ad esempio: I. R. EDMONDS, *Stephan-Boltzmann law in the laboratory*, Am. J. Phys., 36, 845 (1975); B.S.N. PRASAD, R. MASCARENHAS, *A laboratory experiment on the application of Stefan's law to tungsten filament electric lamps*, Am. J. Phys., 46, 420 (1978); J. COOPER, *Physics with a car headlamp and a computer*, Phys. Ed., 32, 197-200 (1997); D.AGRAWAL, J. MENON, *Life and temperature of incandescent lamp*, Phys. Ed., 33, 55-57 (1998); S. BOSIO, M. MICHELINI, L.SANTI, *Da una lampadina alle proprietà elettriche del tungsteno*, LFNs, XXXII, 235 (1999), D. MACISAAC, G. KANNER and G. ANDERSON, *Basic Physics of the Incandescent Lamp*, The Phys. Teach. 37, 520-523 (1999)

Nota 2. Incidentalmente va detto che molti generatori di segnale reperibili sul mercato non offrono una impedenza di uscita sufficientemente bassa da consentire di alimentare correttamente una lampadina. Per dovere di cronaca: l'utilità di un oscillatore a bassa frequenza da usare con CBL in esperimenti didattici di elettromagnetismo mi era stata segnalata per la prima volta da Lino De Santis.

grazie alla collaborazione tra ADT e la ditta MAD), mi sono deciso a fare una prova con la lampadina, e qui riporto i risultati.

L'apparato sperimentale

Per lavorare con basse tensioni e piccole potenze ho scelto una lampadina da 14 V e 5 W, di quelle solitamente usate nelle "luminarie", i festoni luminosi allestiti nelle feste popolari (che oltre ad avere caratteristiche elettriche particolarmente adatte a questo esperimento, offrono anche il vantaggio di costare molto poco). La resistenza *nominale* in tali lampadine è ricavabile dalla relazione che lega la potenza sviluppata alla tensione di alimentazione: $W=V^2/R$, da cui si ottiene $R=39\ \Omega$. La resistenza del filamento misurata a freddo è tuttavia molto minore: $3.7\ \Omega$. E questa osservazione preliminare con gli studenti già preannuncia un comportamento non lineare in funzione della corrente: la resistenza del filamento misurata con la piccola corrente erogata da un ohmetro è 10 volte minore di quella dello stesso filamento quando la lampada è usata per fare luce.

Il generatore di segnali a mia disposizione offre onda quadra, onda triangolare e sinusoidale con 20 V picco-picco, a frequenze variabili da 0.1 a 10.000 Hz.

Dato che il sensore di luce standard dell'interfaccia CBL è molto sensibile, non è necessario raggiungere la potenza nominale della lampada per misurare bene la luce emessa, anzi in condizioni di sotto-alimentazione è più facile evitare la saturazione del sensore.

Lo schema elettrico dell'apparato è illustrato in figura 1.

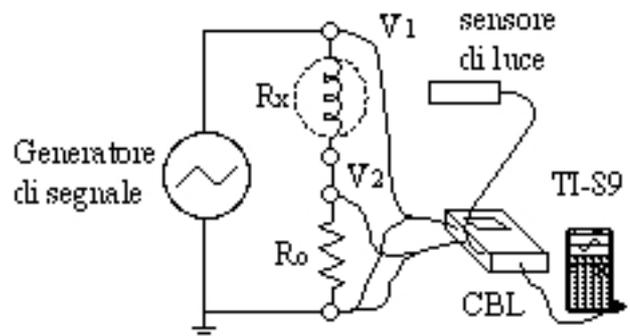


Fig. 1: schema dell'apparato

Con questo schema servono un sensore di luce e due sensori di tensione: uno che legge la tensione V_2 ai capi di una resistenza nota R_0 (con valore indipendente dalla corrente che la attraversa) posta in serie alla lampadina, che agisce da convertitore corrente-tensione ($i=V_2/R_0$) e uno che legge la tensione V_1 all'uscita del generatore di segnale.

I risultati e alcune considerazioni

Per evidenziare meglio l'andamento non lineare della resistenza del filamento con la corrente che lo

attraversa si è deciso di utilizzare come segnale di polarizzazione l'onda triangolare e una frequenza molto bassa: 0.1 Hz.

Dopo aver allestito il sistema (nell'ambito del programma PHYSICS) in modo da utilizzare 3 sonde, come schematizzato nella sequenza di figura 2, ed averle eventualmente calibrate mediante il tester, si può scegliere una tensione picco picco V_{pp} per l'onda triangolare e una frequenza a piacere.

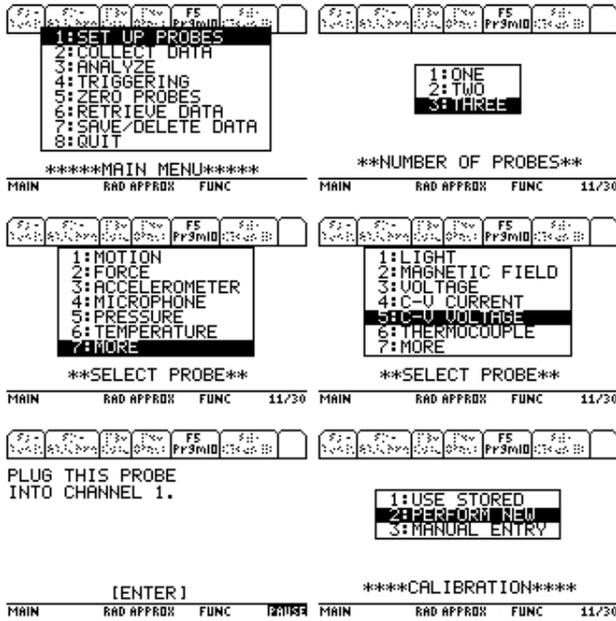


Fig. 2: sequenza per l'allestimento del sistema

Per iniziare si è scelta la frequenza di 0.1 Hz e $V_{pp} = 14$ V, e in figura 3 è riportata una registrazione delle tensioni V_1 e V_2 .

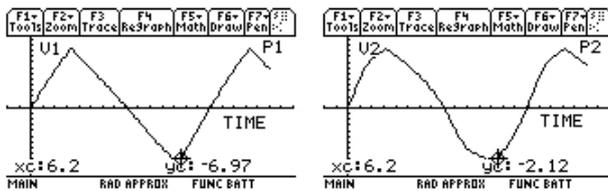


Fig. 3: Segnale della tensione del generatore (V_1) e della tensione V_2

Dal confronto tra i grafici si vede subito che la corrente ($i=V_2/R_0$) non segue linearmente l'andamento della tensione V_1 del generatore. Questo si spiega con il fatto che, al crescere della corrente, aumenta la potenza sviluppata per effetto Joule e il filamento si scalda; di conseguenza la sua resistenza cresce, mentre la resistenza R_0 fa il suo dovere mantenendo costante il valore nominale di 10Ω , e quindi il rapporto $V_2/V_1=R_0/(R_0+R_x)$ non resta costante in un ciclo. Il grafico della corrente si ricava immediatamente, in ambiente Data/Matrix Editor, dalla relazione $i=V_2/R_0$ e

quello della resistenza R_x del filamento si può ricavare dai valori di V_1 e V_2 : $R_x=(V_1-V_2)R_0/V_2$. I grafici così ottenuti sono mostrati in figura 4.

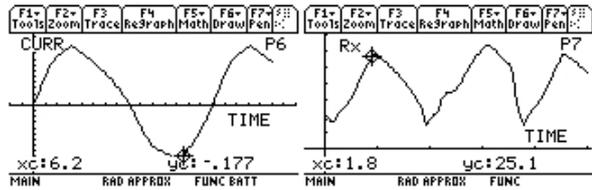


Fig. 4: corrente calcolata e resistenza calcolata

In figura 5 è riportata la registrazione del segnale fornito dal sensore di luce (una leggera asimmetria nell'onda triangolare fornita dal generatore viene riflessa nella asimmetria dei picchi di luce prodotti nel semiperiodo positivo e negativo), e il grafico della resistenza calcolata verso la corrente.

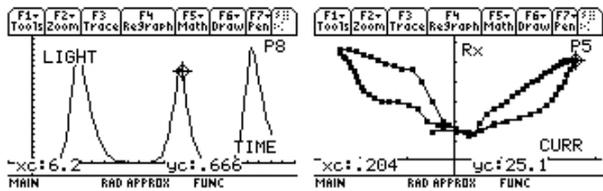


Fig. 5: Resistenza del filamento verso la corrente

La resistenza del filamento varia tra 18Ω e 28Ω : al crescere della corrente essa aumenta fino a raggiungere un massimo e poi torna a calare quando la corrente diminuisce. Tuttavia i valori di R_x , al calare della corrente, restano sempre maggiori dei valori corrispondenti alla stessa corrente quando questa stava crescendo. Si osserva cioè un ciclo di isteresi, sia per valori positivi che negativi della corrente. Ricordando che il filamento può essere pensato come un termometro a resistenza (dato che il valore di R_x cresce circa linearmente con la temperatura³), questo grafico ci dice che la temperatura (e di conseguenza l'intensità della luce emessa) resta in ritardo rispetto alla corrente erogata.

Una spiegazione qualitativa può essere ricavata partendo da tre osservazioni:

- 1) il filamento, essendo poco accoppiato termicamente, può dissipare l'energia accumulata per effetto Joule sostanzialmente per convezione e irraggiamento;
- 2) esso ha una capacità termica non trascurabile che regola la variazione della temperatura in ragione della differenza tra il flusso di energia entrante e il flusso di energia uscente;
- 3) la temperatura si stabilizza solo quando si annulla tale differenza tra flussi di energia.

In altri termini: solo se la variazione della corrente elettrica è sufficientemente lenta, il fenomeno si svolge in regime di equilibrio dinamico, e la temperatura è uni-

vocamente determinata dall'equilibrio tra potenza prodotta per effetto Joule e la potenza dissipata nell'ambiente (e il grafico resistenza verso corrente non mostra isteresi). Altrimenti il ritardo tra variazione di potenza prodotta e variazione di temperatura (e quindi di resistenza del filamento) risulta osservabile. Quindi si può prevedere che questo fenomeno si accentui al crescere della frequenza della corrente alternata che alimenta la lampadina. Lo sfasamento tra i picchi di intensità di luce emessa e picchi nel quadrato della corrente che attraversa il filamento è mostrata meglio in figura 6, che riporta una registrazione effettuata a una frequenza maggiore (circa 50 Hz).

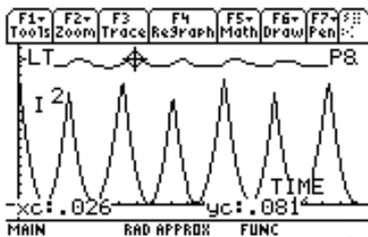


Fig. 6: confronto tra intensità luminosa e quadrato della corrente

Qui la resistenza varia di poco durante un ciclo (tra 22Ω e 25Ω), perchè il filamento resta sempre abbastanza caldo, non avendo il tempo sufficiente a raffreddarsi nei brevi istanti in cui la corrente è piccola. Invece si nota meglio che il picco di luce è in ritardo rispetto al picco nel segnale i^2 (proporzionale al valore istantaneo della potenza erogata $W=R_x i^2$).

Per effetto della capacità termica e della conducibilità termica la temperatura è quindi leggermente in ritardo rispetto alla corrente e questo effetto viene amplificato dal fatto che la potenza erogata a parità di corrente è maggiore se il filamento è più caldo (e quindi con maggiore valore della resistenza R_x).

Nota 3. Se ci si limita ad una approssimazione lineare per il tungsteno il coefficiente è circa $dR/RdT=0.005K^{-1}$

Tale effetto di retroazione positiva, specie se si considera che il filamento non è omogeneo e a sezione rigorosamente costante, spiega anche il meccanismo rapidissimo con cui si brucia il filamento: appena una regione del filamento risulta (per evaporazione del metallo o per effetti di deformazione plastica dovuti a fatica meccanica) di sezione sensibilmente inferiore al valor medio, la dissipazione per effetto Joule aumenta localmente (perchè maggiore è la resistenza per unità di lunghezza) e il raffreddamento per irraggiamento cala (perchè minore è la superficie emittente), e lì aumenta l'evaporazione del tungsteno. E la dipendenza della resistenza dalla temperatura spiega anche perchè di solito le lampadine consumate si bruciano *appena vengono accese*: infatti dato che esse vengono alimentate alla tensione nominale, quando il filamento è ancora freddo la corrente (iniziale) è molto maggiore della corrente a regime, ed è questa corrente in eccesso che riscalda localmente la sezione più consumata del filamento fino a farlo evaporare del tutto.

Conclusioni

Con un CBL, una calcolatrice grafica e una lampadina si può sviluppare con gli studenti un percorso didattico che tocca molti aspetti interessanti di un fenomeno che abbiamo sotto gli occhi quotidianamente ma che forse pochi hanno analizzato in dettaglio. L'impiego di un oscillatore a bassa frequenza facilita l'analisi e consente di esplorare anche le caratteristiche transienti del fenomeno, raramente affrontati nella didattica tradizionale.

Giacomo Torzo
CNR-ICTIMA, INFN e Dipartimento di Fisica,
Università di Padova