

Effetto fotoelettrico: applicazioni

Andrea Biancalana

giugno 2008

L'effetto fotoelettrico è uno dei fatti sperimentali alla base dello sviluppo della fisica *moderna*¹.

Gli studi sperimentali di Lenard, Hertz, Millikan e l'interpretazione teorica data da Einstein condussero infatti alla nascita del concetto di "fotone".

I libri di testo trattano in modo esauriente l'effetto *fotoelettrico esterno* ma tralasciano in genere gli aspetti applicativi scientifici e tecnologici dell'effetto fotoelettrico nelle sue varie forme.

effetto fotoelettrico esterno

L'effetto fotoelettrico esterno permette la realizzazione dei fotodiodi a vuoto ma anche di dispositivi decisamente più sofisticati.

fotodiodi

Il fotodiodo a vuoto il dispositivo illustrato in tutti i libri di testo per spiegare le "leggi" che governano questo fenomeno. Si basano sulla estrazione di elettroni dalla superficie di un metallo irraggiato con radiazione di lunghezza d'onda "abbastanza" piccola.

I fotodiodi a vuoto sono caratterizzati da una corrente di saturazione che viene raggiunta polarizzando opportunamente il (foto)catodo e l'anodo (con tensioni dell'ordine delle decine di Volt).

La sensibilità dei fotodiodi a vuoto è piuttosto bassa. La delicatezza (ampolla di vetro) e l'ingombro di questi dispositivi sono i motivi per cui attualmente non hanno applicazioni di interesse tecnologico².

La sensibilità di questo tipo di fotodiodi può essere aumentata introducendo nell'ampolla una ben dosata miscela di gas a bassa pressione: con opportuna tensione di polarizzazione (tipicamente $> 40 V$) si ottiene un evidente incremento della fotocorrente poiché gli elettroni emessi dal catodo e accelerati possono produrre, per urto, emissione di elettroni secondari da parte degli atomi del gas; gli elettroni secondari, a loro volta accelerati, possono produrre ulteriore emissione con un *effetto a valanga* che permette una amplificazione della corrente elettrica raccolta sull'anodo.

Fotodiodi a vuoto e a gas sono stati ampiamente utilizzati prima dell'avvento dell'elettronica a *stato solido* in tutti i dispositivi in cui era richiesta la rivelazione e/o la misura di luce piuttosto intensa: fotometri, esposimetri, spettrometri (in luce assorbita), polarimetri, rivelatori di segnali luminosi modulati in ampiezza (per es. vecchie pellicole cinematografiche con registrazione ottica dell'audio), ...

¹che ormai ha cent'anni.

²nessun cancello o ascensore usa questo tipo di fotodiodo...

La corrente generata da fotodiodi a vuoto con intensità di luce *normali*³ è dell'ordine di $5 \mu A$; con i fotodiodi a gas alimentati a tensioni opportunamente alte (per es. $100 V$) si possono ottenere correnti anche 10 volte più intense.

fotomoltiplicatori

Una notevole applicazione dell'effetto fotoelettrico esterno consiste nella realizzazione di dispositivi ad altissima sensibilità particolarmente importanti sia dal punto di vista scientifico che dal punto di vista tecnologico.

I *tubi fotomoltiplicatori* sono valvole a vuoto in cui è presente il fotocatodo, l'anodo e un certo numero⁴ di *dinodi*.

Come nel fotodiodo a vuoto il catodo viene mantenuto a un potenziale negativo rispetto all'anodo; gli elettrodi intermedi vengono mantenuti a potenziali crescenti che si avvicinano gradualmente al potenziale dell'anodo.

Grazie alla differenza di potenziale presente tra ogni coppia di dinodi (tipicamente $100 \div 200 V$) e alla particolare configurazione geometrica della valvola, gli elettroni emessi per effetto fotoelettrico dal catodo vengono accelerati e urtano contro il primo dinodo con energia sufficiente a estrarre altri due, tre o più elettroni secondari⁵; il processo di accelerazione e amplificazione si ripete anche sul secondo dinodo e sui successivi.

Se γ è il fattore di moltiplicazione degli elettroni su ogni dinodo e il fotomoltiplicatore è dotato di n dinodi si raggiunge un *guadagno in corrente* complessivo:

$$G = \gamma^n$$

Si realizzano fotomoltiplicatori con fattori di amplificazione anche superiori a 10^7 .

Come per i fotodiodi a vuoto e a gas la sensibilità spettrale dipende dal materiale di cui è costituita (o rivestita) la superficie del fotocatodo: si realizzano fotomoltiplicatori sensibili fino al vicino infrarosso (per esempio fino a $\lambda = 900 nm$).

I fotomoltiplicatori sono caratterizzati (oltre che dalla estrema sensibilità) da tempi di risposta rapidissimi: un elettrone estratto dal catodo impiega tempi dell'ordine di $10 \div 20 ns$ per produrre la "valanga" di elettroni sull'anodo; inoltre gli elettroni della "valanga" raggiungono l'anodo tutti insieme in un intervallino di tempo tipicamente di ampiezza $2 \div 5 ns$.

Questo significa che l'arrivo di UN fotone che colpisce il fotocatodo e produce l'emissione di UN elettrone può essere rilevato come un segnale di 10^7 elettroni in un tempo $\delta t \approx 2 ns$; questo segnale corrisponde a un picco in corrente di intensità:

$$i = \frac{1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^7}{2 \cdot 10^{-9}} A \approx \cdot 10^{-3} A$$

un impulso in corrente di questa intensità (anche se, per la verità, estremamente breve) può essere facilmente misurato poiché dà un picco in tensione di $1 V$ su una resistenza da 1000Ω .

I tubi fotomoltiplicatori permettono quindi la rivelazione di singoli fotoni (*photon counting*) e permettono di sviluppare concretamente i ragionamenti tipici della fisica quantistica: per esempio da quale fenditura passa il singolo fotone nell'esperimento di

³per esempio a $30 cm$ da una lampadina da $25 W$

⁴in genere variabile fino a un massimo di 12

⁵il numero di elettroni secondari emessi sui dinodi dipende dal materiale con cui sono fatti i dinodi e dalla d.d.p. tra i dinodi.

Taylor sulla interferenza “alla Young” con luce a bassissimissima intensità? Oppure, da quale braccio dell’interferometro di Michelson passa il singolo fotone?

Per regimi di funzionamento ad “alte” intensità luminose i fotomoltiplicatori presentano una ottima linearità (proporzionalità tra la corrente anodica e l’intensità della luce incidente); tuttavia possono essere utilizzati fino a valori massimi della corrente anodica di alcune decine di μA altrimenti vengono irreversibilmente danneggiati.

Dal punto di vista applicativo e tecnologico i tubi fotomoltiplicatori (per approfondire si consiglia l’espressione inglese: *photomultiplier tubes*) vengono utilizzati in

- strumenti di analisi (spettrofotometria UV e visibile; spettrofotometria di assorbimento, di emissione, di fluorescenza; spettroscopia Raman);
- strumentazione per misura di radioattività (scintillatori);
- strumentazione medica nucleare e a raggi X;
- strumentazione fotografica (fotodensitometri; analizzatori di colore);
- fisica *delle alte energie* (contatori Cherenkov; calorimetria; rivelatori di decadimenti; ...);
- astronomia e astrofisica (misura dei deboli segnali luminosi provenienti dalle stelle, comete ecc.; misure spettroscopia stellare).

Questa è probabilmente una minima panoramica della attuali applicazioni dei fotomoltiplicatori (e quindi dell’effetto fotoelettrico esterno).

effetto fotoelettrico interno

Numerosi dispositivi funzionano grazie a diverse manifestazioni dell’effetto fotoelettrico: nei casi indicati di seguito NON si ha estrazione di elettroni e le leggi che governano il funzionamento di questi dispositivi NON sono quelle scoperte da Einstein per spiegare l’effetto fotoelettrico esterno.

fotoresistenze

Un tipo di effetto fotoelettrico viene utilizzato nelle fotoresistenze. Si tratta di materiali (per esempio CdS, solfuro di Cadmio) la cui resistività dipende (diminuisce) in modo marcato dall’irraggiamento luminoso.

Le fotoresistenze sono state ampiamente utilizzate come strumenti di misura negli esposimetri fotografici (adesso soppiantate dai fotodiodi al silicio).

Poiché si tratta di dispositivi resistivi possono essere utilizzati in modo estremamente semplice dal punto di vista elettronico (come elementi di un ponte); non richiedono di essere alimentate da tensioni particolarmente elevate; presentano un ingombro decisamente inferiore alle valvole (fotodiodi a vuoto o a gas) e maggiore robustezza meccanica. Possono sostituire convenientemente i fotodiodi a effetto fotoelettrico esterno quando non è richiesta una grande velocità di risposta né una perfetta proporzionalità del segnale elettrico rispetto alla intensità della luce incidente.

fotodiodi al silicio

I fotodiodi al silicio sono dispositivi fotosensibili estremamente versatili.

L'azione della luce nel semiconduttore "trasferisce" elettroni dalla banda di valenza alla banda di conduzione.

Producono segnali in corrente perfettamente proporzionali all'intensità della luce incidente: il segnale in corrente può essere amplificato e "trattato" utilizzando elettronica abbastanza semplice e poco costosa.

Hanno una risposta spettrale ampia e estesa verso l'IR.

Possano essere costruiti con grande superficie (e quindi grande sensibilità) oppure con grande rapidità di risposta.

Non presentano gli indesiderabili effetti di "memoria" o abbagliamento delle fotoresistenze.

Non sono ingombranti (esistono dispositivi integrati minuscoli che includono il fotodiodo e il relativo amplificatore di corrente).

I fotodiodi vengono largamente utilizzati

- negli strumenti di misura della luce (esposimetri fotografici, anche per luce flash) grazie alla linearità di risposta e alla velocità;
- barriere luminose (sistemi di sicurezza per bloccare la chiusura di cancelli, porte di ascensori ecc., fotocellule per cronometrare il movimento del carrello sulla guida a cuscino d'aria);
- misura di segnali ottici digitali (lettori CD e DVD, encoder ottici per posizionare con altissima precisione il carrello della stampante, nelle telecomunicazioni tramite fibre ottiche);
- sistemi di allarme passivi (sfruttando la sensibilità estesa verso l'IR per rivelare il movimento di corpi caldi);
- una infinità di applicazioni industriali ...

ccd

I sensori ccd utilizzati nelle fotocamere e telecamere digitali sono costituiti⁶ da una matrice di microscopici fotodiodi che, quando irraggiati, producono una corrente che viene accumulata in corrispondenza di ogni pixel. Un sistema elettronico sofisticato (registri a scorrimento) permette di fare una scansione e leggere la carica accumulata in ogni pixel dopo l'esposizione alla luce.

Si realizzano sensori ccd dotati di un numero estremamente grande di pixel (attualmente fino a decine di milioni).

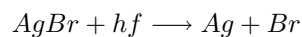
Come i fotodiodi presentano una grande sensibilità, la possibilità di accumulare (integrare) il segnale luminoso su lunghi tempi di esposizione, una *dinamica* molto ampia.

fotografia ai sali di argento

Per completare la rapida panoramica può essere opportuno sottolineare che anche il tradizionale processo fotografico agli alogenuri di argento è un tipo di effetto fotoelettrico.

⁶questa è una descrizione terribilmente grossolana.

In questo caso la luce produce una riduzione dell'alogenuro di argento (sospeso come granuli microscopici nell'emulsione sensibile) dissociando il sale in argento metallico e in bromo:



L'argento metallico forma un deposito (metallico) nero di densità più o meno intensa a seconda dell'intensità della luce incidente.

Nei processi di fotografia a colori l'argento metallico viene chimicamente rimosso e sostituito da opportuni coloranti: ma il principio di funzionamento, per quanto ci riguarda, continua a essere sostanzialmente lo stesso.

Nel processo classico di fotografia b/n i pochissimi atomi di argento metallico prodotti durante l'esposizione alla luce "catalizzano" la riduzione chimica che ha luogo nel successivo *sviluppo* della pellicola: con lo sviluppo si raggiunge un guadagno dell'ordine di 10^6 ; cioè un μ cristallo composto da un milione di molecole AgBr può essere annerito nel processo di sviluppo se solo una delle molecole è stata dissociata durante l'esposizione alla luce.

Le applicazioni della fotografia, anche in ambito scientifico e tecnologico, sono state numerosissime nel corso del '900. Attualmente sono in larga parte soppiantate dalla nuova tecnologia dei rivelatori ccd e simili.