Effetto termoionico

L'effetto termoelettronico (detto impropriamente effetto termoionico) o effetto Edison (in quanto da questi scoperto nel 1843) consiste nell'emissione di elettroni di conduzione da parte di un metallo portato a temperatura sufficientemente elevata.

Questo fenomeno può essere messo in evidenza con la seguente esperienza. Un'ampolla vuota contiene un filamento **F** di tungsteno, portato all'incandescenza mediante il passaggio di corrente, e una placca metallica **P** isolata e collegata con l'elettroscopio **E**. Carichiamo il sistema placca-elettroscopio a filamento freddo, quando cioè in **F** non circola corrente. Indi riscaldiamo il filamento **F** facendovi passare la corrente mediante la batteria **B**. Quando il filamento si riscalda, l'elettroscopio **E** si scarica se era caricato positivamente, mentre mantiene la sua carica se era caricato negativamente. Ciò prova che il filamento emette elettroni. Infatti nel primo caso gli elettroni sono attratti dalla placca e ne neutralizzano la carica, nel secondo caso sono respinti verso il filamento e non varia la carica dell'elettroscopio. L'effetto termoionico è regolato dalla legge di Richardison-Fermi espressa dalla seguente relazione:

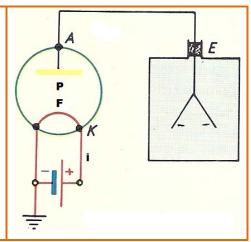
$$J = A \cdot T^2 \cdot e^{\frac{-\Phi}{KT}} \quad \text{dove} \quad J = \frac{q}{t \cdot S} = \frac{i}{S} = \text{densità della corrente termoelettronica} =$$

numero di elettroni emessi in un secondo attraverso l'unità di superficie del filamento

$$A = 6 \cdot 10^5 \frac{A}{m^2 \circ K^2}$$
 = costante uguale per tutti i metalli e = base dei logaritmi naturali

\mathbf{k} = costante di Boltzmann $\mathbf{\Phi}$ = lavoro di estrazione del metallo

Noi sappiamo che in prossimità della superficie esterna di un metallo ogni elettrone di conduzione incontra una barriera di potenziale che lo respinge verso l'interno. A temperatura ambiente l'energia cinetica degli elettroni di conduzione non è sufficiente a farli fuoruscire dalla superficie delimitante il metallo cui essi appartengono. Poiché con l'aumentare della temperatura cresce l'energia cinetica degli elettroni di conduzione, c'è da attendersi che, a temperature piuttosto elevate, gli elettroni di conduzione riescano a fuoruscire dalla superficie esterna del metallo. Edison osservò sperimentalmente che nel 1890 che un filamento metallico portato all'incandescenza posto nel vuoto emette elettroni spontaneamente.



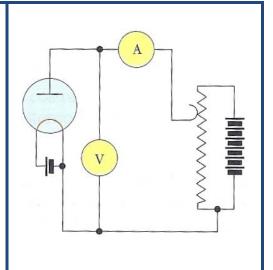
La spiegazione dell'effetto termoionico è la seguente. Alla superficie di un qualsiasi metallo esiste un doppio strato di cariche elettriche, negativo verso l'esterno e positivo verso l'interno,

poiché in ogni atomo la parte esterna è costituita da una nuvola elettronica negativa. A temperatura ambiente l'energia cinetica posseduta da ogni elettrone di conduzione non è in grado di farli uscire dal metallo. Aumentando la temperatura del metallo aumenta l'energia cinetica media dei ioni del reticolo e quindi anche quella degli elettroni di conduzione. Se l'elettrone di conduzione acquista una energia cinetica $\mathbf{T}_a > \mathbf{\Phi}$ esso viene espulso dal metallo.

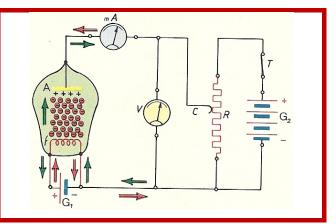
Diodo

Sull'effetto termoionico si basa il funzionamento del diodo, costituito da un'ampolla di vetro in cui è fatto il vuoto e nella quale si trovano due elettrodi, un filamento, detto catodo, e una superficie metallica, detta placca.

Schema di un circuito per lo studio della corrente che circola attraverso un diodo. Gli elettroni di conduzione di un metallo, pur soggetti all'agitazione termica, sono confinati all'interno del metallo da una barriera di potenziale. Se si fornisce agli elettroni, mediante riscaldamento, un'energia sufficiente a superare la barriera (energia di estrazione) si ha emissione di elettroni da parte del metallo: in questo consiste l'effetto termoionico.



Le frecce di colore verde indicano il verso del flusso termoelettronico, mentre quelle di colore rosso indicano il verso convenzionale della corrente.



In un'ampolla di vetro C è fissato un filamento F (per esempio di tungsteno) portato all'incandescenza da un accumulatore B_f la cui tensione può limitarsi a ($2 \longrightarrow 4$ volt).

Esso costituisce la batteria di accensione; la tensione che fornisce è la tensione di accensione. Il filamento è circondato da una placca P metallica. In C è fatto un vuoto estremamente spinto ($p \approx 10^{-7} \, mm_{Hg}$). Tra filamento e placca, mediante il potenziometro M_+M_- è applicata la d.d.p. $V_a = V_P - V_F$ (misurata dal voltmetro V e detta potenziale anodico o potenziale di placca) variabile, per esempio da $-200\,V$ e $+200\,V$ mediante la batteria di placca B_a . Nel circuito di placca FPM_+M_-F è inserito un amperometro A, abbastanza sensibile per misurare una eventuale corrente di placca i_a che attraversi lo spazio FP sotto l'azione del potenziale di placca V_a . L'ampolla, con i suoi elettrodi F e P dicesi diodo.

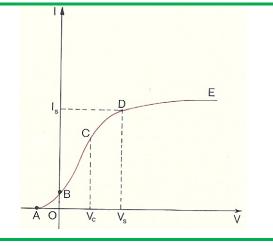
Le forme del filamento e della placca possono essere svariate. Molto comune è la simmetria cilindrica. Se nel filamento ${\bf F}$ non circola corrente, ${\bf A}$ non segnala passaggio di corrente anodica ${\bf i}_a$ anche se ${\bf V}_a$ crea tra ${\bf F}$ e ${\bf P}$ un campo elettrico la cui intensità può andare oltre il valore di ${\bf I}^{07} \frac{{\bf V}}{m}$. Se il filamento ${\bf F}$ è reso incandescente, e se è ${\bf V}_a>0$ (cioè ${\bf V}_P>{\bf V}_F$) il galvanometro ${\bf A}$ segnala una corrente di placca ${\bf i}_a$, che con le convenzioni solite, fluisce dalla placca ${\bf P}$ al filamento ${\bf F}$ attraverso il vuoto. La corrente ${\bf i}_a$ è dovuta al flusso di elettroni emessi per effetto termoelettronico dal filamento ${\bf F}$ e raccolti dall'anodo costituito dalla placca ${\bf P}$.

La funzione caratteristica $i_a = f(V_a)$, per una data temperatura T del filamento, ha la forma indicata in figura.

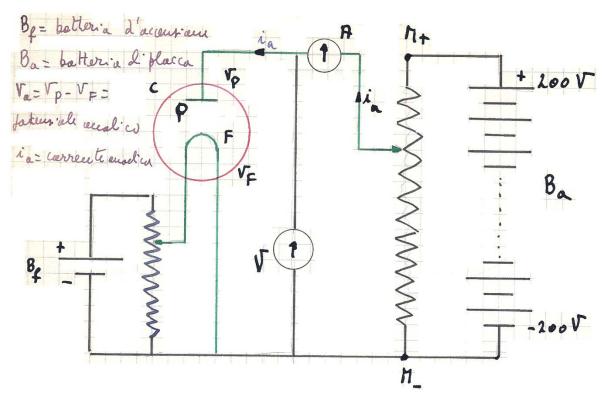
Curva caratteristica di un diodo

Nel tratto **ABC** la corrente termoelettronica è limitata dalla carica spaziale.

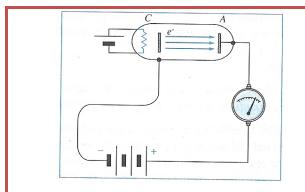
Il tratto **CD** è di transizione mentre il tratto **DE** corrisponde alla saturazione.



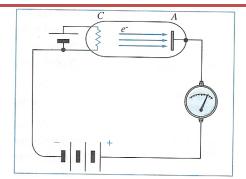
Si ha corrente i_a se è $V_a > 0$, e i_a fluisce dalla placca al filamento; i_a presenta il fenomeno della saturazione, cioè da un certo valore in poi, un aumento di V_a non produce più alcun sensibile aumento di i_a fino a campi dell'ordine di $10^7 \frac{V}{m}$.



Per quanto si renda $\mathbf{V}_{\mathbf{a}}$ negativo e molto grande in valore assoluto, non si è in grado di ottenere correnti $\mathbf{i}_{\mathbf{a}}$ nel verso filamento-placca. Insomma, si ha corrente solo se \mathbf{P} è anodo ed \mathbf{F} è catodo entro l'ampolla \mathbf{C} .



Diodo a catodo riscaldato. Il catodo è una piastra metallica che viene riscaldata da un circuito esterno



Diodo a catodo caldo. Il catodo è lo stesso filamento incandescente del circuito alimentato dall'esterno

Perciò V_a dicesi anche potenziale anodico e i_a è l'intensità di corrente anodica, F dicesi catodo e P dicesi anodo del diodo. B_a dicesi batteria anodica. (Per $V_a = 0$ si ha una lieve corrente di placca i_a). Al variare della temperatura T del filamento, muta la curva caratteristica << tensione di placca-corrente di placca). La corrente di saturazione $i_{a,sat}$ cresce rapidamente con la temperatura. Per un dato filamento, in un dato diodo, i_a è funzione di V_a e della temperatura T del filamento incandescente.

La corrente anodica che circola è regolata da due leggi:

1) Formula di Richardson (**FERMI**) $J_{sat} = A \cdot T^2 \cdot e^{\frac{-\Phi}{KT}}$ [1] dove:

 J_{sat} = densità superficiale di corrente di saturazione = intensità di corrente anodica di saturazione riferita alla superficie S del filamento = $\frac{i_{a,sat}}{S}$

A può considerarsi come una costante universale

T = temperatura assoluta del filamento

e = base dei logaritmi naturali

K = costante di Boltzmann

 Φ = lavoro di estrazione di un elettrone dal catodo

Il diagramma della formula di Richardson è indicato in figura.

2) Formula di Child-Langmuir

Nel tratto OP della curva di equazione $\mathbf{i}_a = \mathbf{f}(\mathbf{V}_a)$ che precede il flesso che preannunzia l'esistenza di una saturazione della corrente la densità superficiale di corrente anodica \mathbf{J} che attraversa il diodo è ben rappresentata dalla formula di Child-Langmuir: $\mathbf{J} = \frac{\mathbf{i}_a}{S} = \mathbf{K} \cdot \mathbf{V}_a^{\frac{3}{2}}$ [2]

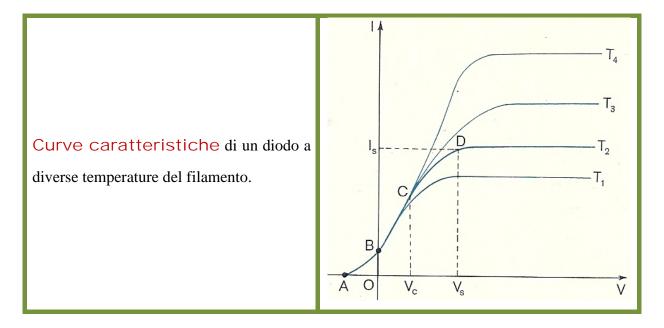
ove K è una costante dipendente dalla natura del filamento incandescente e dalla forma geometrica del diodo, ma non dipende dal diodo.

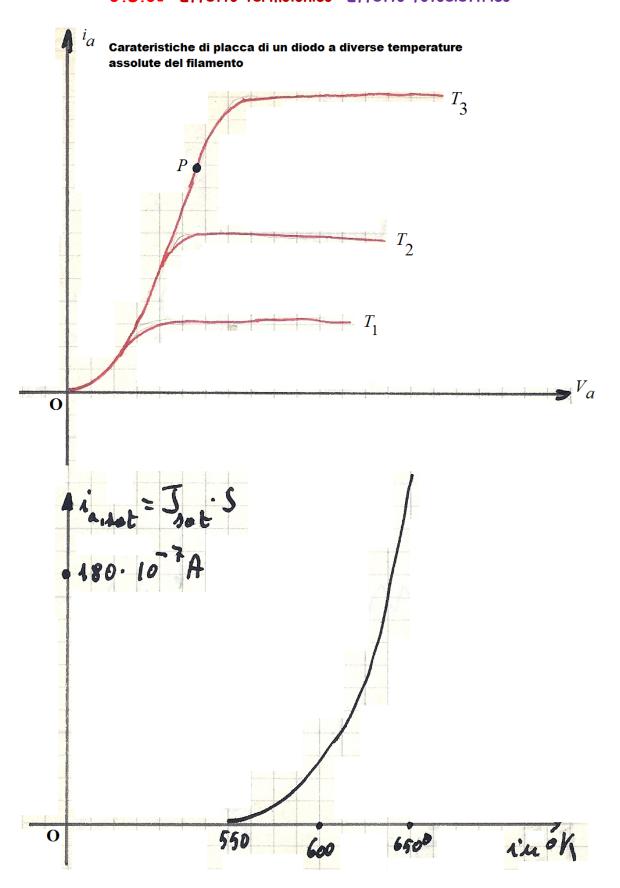
La [1] governa il regime di saturazione o di **Richardson** al variare della temperatura.

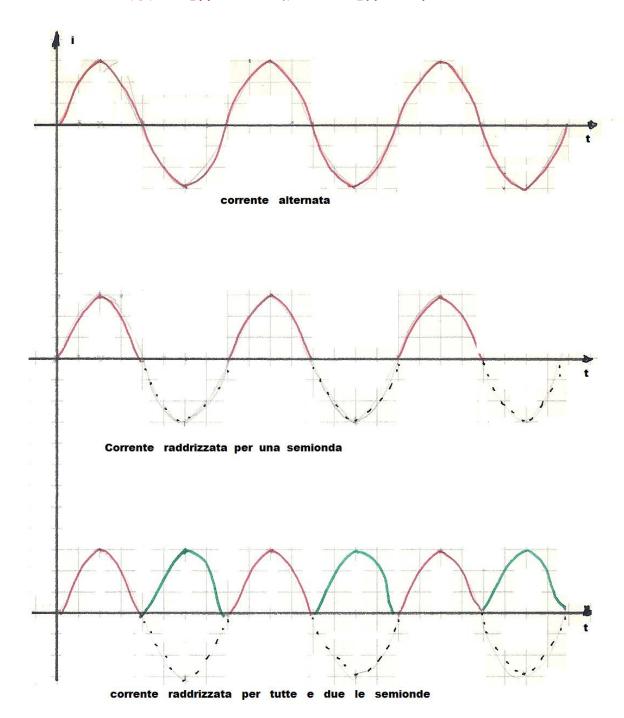
La [2] governa il regime detto di carica spaziale o di Child-Langmuir al variare del potenziale di placca. Il funzionamento del diodo si giustifica in base alle seguenti considerazioni. Il filamento **F** portato all'incandescenza emette elettroni. L'uscita degli elettroni dal filamento **F** lascia quest'ultimo con un eccesso di carica positiva.

Gli elettroni sono attratti da **F** e formano una specie di nuvola di cariche negative. Se vicino al conduttore che emette elettroni si pone un secondo conduttore a potenziale più elevato, gli elettroni sono attratti da esso e finchè viene mantenuta una certa d.d.p. fra i due conduttori, si ha un flusso continuo di elettroni dall'emettitore detto catodo al conduttore che riceve gli elettroni detto anodo. Se V_a non è sufficientemente elevata solo pochi elettroni raggiungono la placca in quanto la maggior parte penetrano poco nella scarica spaziale e ricadono sul catodo. Aumentando V_a aumenta il numero di elettroni che cadono sulla placca. A questo punto un ulteriore aumento del potenziale di placca V_a non porta ad un aumento della corrente, per cui si dice che il diodo è in saturazione.

Il diodo trova applicazione come regolatore di corrente e come raddrizzatore di corrente alternata. Il diodo si comporta da regolatore di corrente se il potenziale $V_a = V_p - V_F$ oscilla, mantenendosi però sempre così elevato da dar luogo costantemente alla corrente di saturazione. In questo caso si trae dal diodo una corrente i_a indipendente dalla tensione. Il diodo si comporta da raddrizzatore se fra la placca ed il filamento applichiamo una d.d.p. alternata. In questo caso il diodo conduce l'elettricità solo durante i semiperiodi nei quali la placca è positiva. Si ottiene in tal modo nel circuito di placca una corrente raddrizzata per una semionda. Utilizzando un diodo a due placche (equivalente a due diodi) otteniamo una corrente in cui sono raddrizzate tutte e due le semionde.







Triodo

Il triodo è un diodo al quale si aggiunge, tra filamento e placca, un griglia G che è di rete metallica, a maglie notevolmente larghe o è costituita, più semplicemente, da un filo metallico sottile avvolto ad elica attorno al filamento. Le spire dell'elica sono abbastanza rade da non costituire un apprezzabile ostacolo meccanico per gli elettroni che dal catodo (Filamento F) fluiscono alla placca P. L'ampolla C, nella quale è fatto un vuoto estremamente spinto, ha, dunque, tre elettrodi fondamentali: F, G, P e dicesi valvola a tre elettrodi, o tubo termoelettronico a tre elettrodi, o triodo o audion. Invero il filamento F ha due elettrodi $^{\bigcirc}$ che vanno alla batteria di accensione $\mathbf{B_f}$ che genera il riscaldamento. Fissata la temperatura del filamento, e quindi l'intensità del flusso elettronico che ne può sgorgare, sono ancora parametri caratteristici del triodo il potenziale di placca $V_a = V_p - V_F$, il potenziale di griglia $V_g = V_G - V_F$ fornito ad esempio da una batteria di pile (batteria di griglia \mathbf{B}_{g}), la corrente di griglia \mathbf{i}_{g} , la corrente di placca \mathbf{i}_{a} . \mathbf{i}_{g} è costituita solo dagli elettroni che sono captati dalla griglia, e ia è costituita solo dagli elettroni che giungono alla placca. Le frecce indicano il verso di \mathbf{i}_a e \mathbf{i}_g secondo la consueta convenzione. Nel dispositivo della figura si distinguono un: (1) circuito di placca costituito da B, da P e da F. La corrente passa quando **P** è positivo.

 i_a = corrente di placca o corrente anodica

 $V_a = V_P - V_F = potenziale di placca o potenziale anodico$

- (2) circuito di accensione del filamento
- (3) circuito di griglia costituito da $\mathbf{B}_{\mathbf{g}}$, \mathbf{G} , \mathbf{F} .

$$\mathbf{V}_{\mathrm{g}} = \mathbf{V}_{\mathrm{G}} - \mathbf{V}_{\mathrm{F}} =$$
 potenziale di griglia $\mathbf{i}_{\mathrm{g}} =$ corrente di griglia

I poli negativi di \mathbf{B}_a , \mathbf{B}_g , \mathbf{B}_f sono collegati fra loro e messi a terra. La corrente in \mathbf{X}_o sia \mathbf{i}_o . Per la conservazione dell'elettricità abbiamo: $\mathbf{i}_o = \mathbf{i}_a + \mathbf{i}_g$ dove \mathbf{i}_o , al massimo, può essere la corrente elettronica di saturazione emessa da \mathbf{F} . Il reostato \mathbf{R} serve a fare variare entro certi limiti la temperatura del filamento.

La presenza della griglia modifica la corrente \mathbf{i}_a . Infatti potendo rendere \mathbf{V}_g variabile mediante il dispositivo potenziometrico indicato in figura, si verifica che gli elettroni emessi dal filamento sono

accelerati quando \mathbf{V}_g è positivo, sono ritardati quando \mathbf{V}_g è negativo. Pertanto col triodo possiamo variare la corrente anodica \mathbf{i}_a variando il potenziale di griglia \mathbf{V}_g . Se \mathbf{V}_g non è negativo, la griglia intercetta un certo numero di elettroni emessi dal filamento e nel circuito di griglia circola una corrente di griglia \mathbf{i}_g . Un triodo è individuato dai seguenti fasci di caratteristiche: $\mathbf{i}_a = \mathbf{f}\left(\mathbf{V}_g, \mathbf{V}_a\right)$ caratteristiche di placca

 $\mathbf{i}_{g} = \mathbf{f}(\mathbf{V}_{g}, \mathbf{V}_{a})$ caratteristiche di griglia

Come parametro si assume di regola V_a . Particolarmente importanti sono le cosiddette caratteristiche statiche $i_a = f(V_g)$ per $V_a = costante$.

In figura sono indicate, per un certo valore di $\mathbf{V}_{\mathbf{a}}$ (ad esempio 100V) la caratteristica di placca $\mathbf{i}_{\mathbf{a}} = \mathbf{f}\left(\mathbf{V}_{\mathbf{g}}\right)$ e la caratteristica di griglia $\mathbf{i}_{\mathbf{g}} = \mathbf{f}\left(\mathbf{V}_{\mathbf{g}}\right)$.

Da questo diagramma si scorge che i_a varia da zero ad un valore massimo della corrente di saturazione e vi è un tratto per cui i valori di i_a variano proporzionalmente con le variazioni del potenziale di griglia, cioè lungo il tratto rettilineo obliquo della curva $i_a = f(V_g)$, sopra al «ginocchio» M. In quanto alla corrente di griglia, essa è nulla finché il potenziale V_g è negativo perché in tal caso gli elettroni sono respinti al filamento, oppure attraversano la griglia e giungono alla placca. Poi col crescere di V_g anche i_g cresce ed il suo valore massimo dipende dalla temperatura del filamento e dal potenziale di griglia, ma in ogni caso è sempre minore di i_a . In particolare, si osservi che per V_g fortemente negativo (nel nostro caso $V_g < -10 \, \text{Volt}$) si ha $i_a = 0$, $i_g = 0$, cioè la griglia respinge tutti gli elettroni. Per V_g debolmente negativo (nel nostro caso $-10 \, \text{Volt} < V_g < 0 V$) gli elettroni non possono fissarsi sulla griglia, cioè $i_g = 0$; alcuni sono frenati, altri pochi ne passano alla placca e si ha i_a debole dapprima, e poi cresce rapidamente (oltre i -5 V) e proporzionalmente alle variazioni di V_g . Il valore $V_g = -10 \, \text{V}$ (punto D della curva) per cui $i_a = 0$ dicesi potenziale di interdizione. Per V_g crescente per valori positivi (nel nostro caso $0 < V_g < 10 \, \text{Volt}$), i_g cresce quasi proporzionalmente, i_a cresce dapprima proporzionalmente, poi meno rapidamente sino ad un

valore di saturazione; gli elettroni sono accelerati da $\mathbf{V}_{\mathbf{g}}$ e in parte assorbiti dalla griglia. Per $\mathbf{V}_{\mathbf{g}}$ sufficientemente grande (nel nostro caso $V_{\mathbf{g}} > 20\,\mathrm{volt}$), $\mathbf{i}_{\mathbf{g}}$ e $\mathbf{i}_{\mathbf{a}}$ sono a regime di saturazione: tutti gli elettroni emessi da \mathbf{F} sono accelerati dalla griglia e in parte formano la corrente di griglia , mentre gli altri formano la corrente di placca.

Queste considerazioni valgono per un determinato valore di \mathbf{V}_{a} (nel nostro caso 100V), ma variando questo si avrebbero altre curve sostanzialmente simili a quelle descritte, ma coi tratti ricurvi a gomito e con valori di saturazione alquanto diversi.

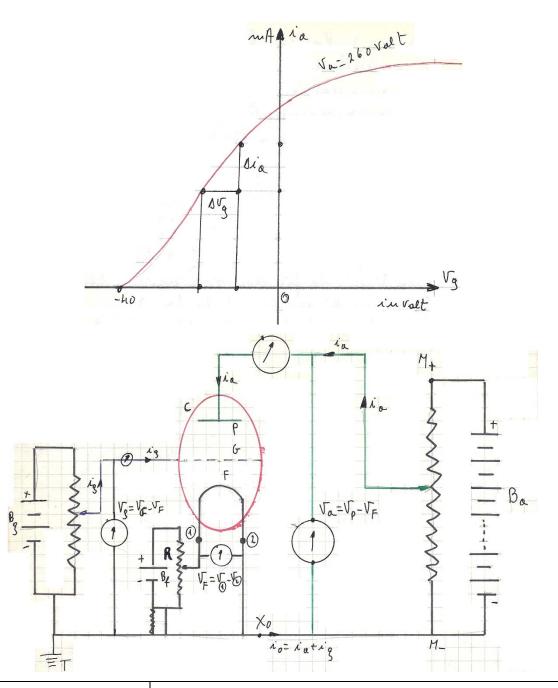
Le relazioni esistenti fra i vari potenziali degli elettrodi e le correnti che circolano nel triodo sono espresse comunemente in funzione dei coefficienti caratteristici del triodo. I più utili sono il coefficiente di amplificazione μ , la resistenza di placca o anodica o resistenza interna, la conduttanza di placca o impedenza o conduttanza mutua, la trasconduttanza. Il coefficiente di amplificazione μ è il rapporto cambiato di segno tra una piccola variazione nel valore della tensione anodica ed una piccola variazione nel potenziale di griglia capace di mantenere costante la corrente di placca: μ =- $\left(\frac{\Delta V_a}{\Delta V_g}\right)_{i=0}^{i}$

La resistenza di placca (o anodica o interna) \mathbf{r}_p (oppure $\boldsymbol{\rho}$) è il rapporto tra una piccola variazione nel valore della tensione anodica ed una piccola variazione di corrente anodica che essa produce, quando viene mantenuta costante la tensione di griglia: $\boldsymbol{\rho} = \mathbf{r}_p = \left(\frac{\Delta V_a}{\Delta i_a}\right)_{V_a = costante}$

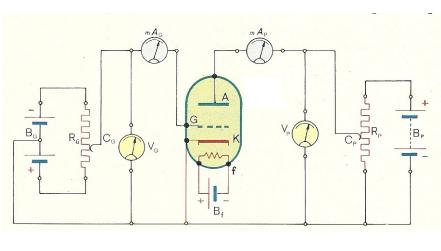
La conduttanza di placca (o pendenza o conduttanza mutua) g_p è il rapporto tra una variazione di corrente anodica e la corrispondente variazione della tensione di griglia per $1 \quad \left(\Delta i_{a}\right)$

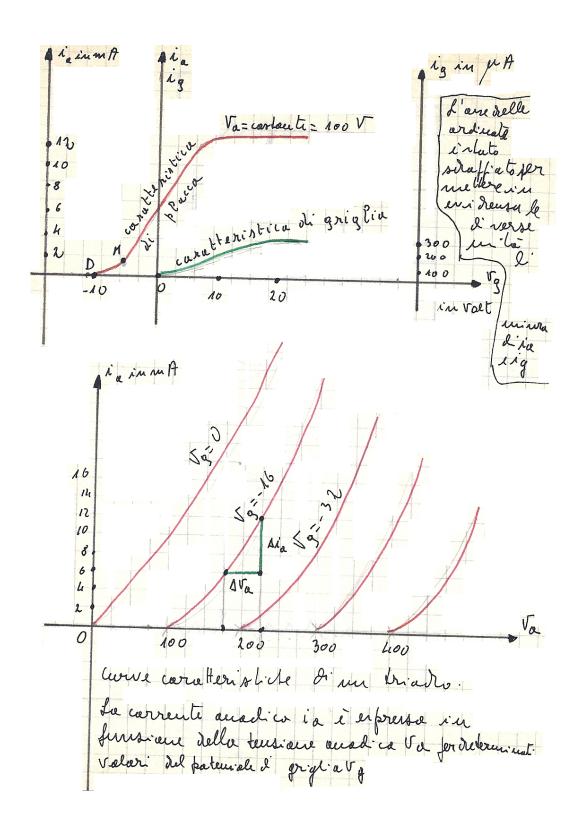
$$V_a = costante$$
. $g_p = \frac{1}{r_p} = \left(\frac{\Delta i_a}{\Delta V_g}\right)_{V_a = costante}$

La trasconduttanza $\mathbf{g_m}$ è il rapporto tra la piccola variazione della corrente anodica e la piccola variazione della tensione di griglia che la produce, quando viene mantenuta costante la tensione di placca: $\mathbf{g_m} = \left(\frac{\Delta i_a}{\Delta V_g}\right)_{V=costante}$



Triodo o valvola a tre elettrodi. Nell'ampolla a vuoto spinto sono posti tre elettrodi: il catodo \mathbf{K} col filamento f alimentato dal generatore $\mathbf{B_f}$, la placca \mathbf{A} che fa da anodo e la griglia \mathbf{G} . Sono presenti un generatore di corrente continua $\mathbf{B_p}$, un milliamperometro $\mathbf{mA_p}$, un voltmetro $\mathbf{V_p}$.





Il triodo può essere usato come: (1) Voltmetro termoelettronico (2) Amplificatore per tensione alternata (3) raddrizzatore (4) oscillatore

Effetto fotoelettrico

L'effetto fotoelettrico (o fotoelettronico) è detto anche effetto Hertz - Hallwachs dai nomi di chi lo scoprì (Hertz 1887) e di chi lo studiò a fondo e ne definì bene le cause (Hallwachs nel 1899). Esso consiste nell'emissione di elettroni da parte di una superficie metallica quando su di essa incide luce (onde elettromagnetiche) di frequenza v sufficientemente elevata (cioè di lunghezza d'onda λ sufficientemente piccola), come raggi ultravioletti, raggi X o raggi γ . L'esperienza si esegue facilmente con certi metalli. Una lastra di zinco \mathbf{P} , a superficie ben pulita, è fissata all'asta di un elettroscopio E caricato negativamente. Indi si illumina la lastra con luce contenente radiazioni ultraviolette (arco voltaico ad elettrodi di carbone, oppure lampada a vapori di mercurio con ampolla di quarzo). Questo prova che da parte dello zinco si ha una emissione di elettroni. Diamo una spiegazione di questo fenomeno, cioè dell'espulsione di elettroni da parte di alcuni metalli quando su di essi incide luce (onde elettromagnetiche) di opportuna frequenza. Gli effetti dell'interferenza e della diffrazione conducono alla inevitabile conclusione sulla natura ondulatoria della luce. L'accordo tra la velocità della luce misurata e la velocità della luce calcolata delle onde elettromagnetiche, indica a sua volta che le onde luminose sono onde elettromagnetiche. L'effetto fotoelettrico è in contrasto con la teoria elettromagnetica classica della luce. Secondo la teoria moderna (dei metalli) un conduttore metallico è formato da un reticolo di ioni positivi immersi in un <<mare>> di elettroni liberi in moto disordinato. Uno di questi elettroni che si avvicina alla superficie non può attraversarla a causa della barriera di potenziale (cioè a causa della d.d.p. esistente fra l'interno del metallo e lo spazio circostante). Se tuttavia della luce di lunghezza d'onda sufficientemente piccola incide sulla superficie del metallo, alcuni elettroni possono acquistare una energia sufficiente per superare la barriera di potenziale ed essere raccolti da un corpo carico positivamente.

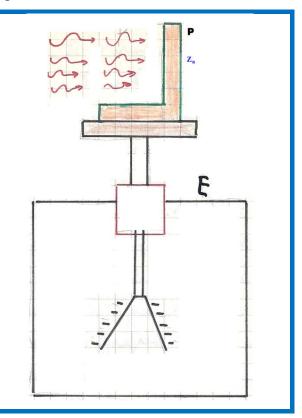
Le leggi dell'effetto fotoelettrico dedotte dall'esperienza sono le seguenti:

- 1) L'emissione degli elettroni dalla superficie del metallo non presenta direzioni privilegiate; l'emissione è uniformemente diffusa
- 2) La velocità degli elettroni emessi non dipende dall'intensità della radiazione incidente (intensità della luce) ma dipende soltanto dalla sua frequenza v. Questo è in contrasto con la teoria classica dell'elettromagnetismo.

- 3) L'emissione di elettroni da parte di un determinato metallo si ha quando la frequenza \mathbf{v} della radiazione incidente è maggiore di un certo valore \mathbf{v}_0 detto soglia fotoelettrica. Il valore \mathbf{v}_0 varia da metallo a metallo. Secondo la teoria classica dell'elettromagnetismo l'effetto fotoelettrico si dovrebbe verificare sempre. Infatti secondo questa teoria l'energia incidente si distribuisce uniformemente tra tutti gli elettroni della superficie metallica e quindi, pur di attendere un tempo necessario, questi elettroni, assorbita una energia pari al lavoro di estrazione, dovrebbero essere espulsi, cioè ogni elettrone di conduzione dovrebbe essere espulso dal metallo quando ha assorbito una dose sufficiente di energia.
- 4) Il numero di elettroni emessi per unità di tempo ed unità di superficie è proporzionale all'intensità della radiazione incidente (illuminamento)
- 5) Il fenomeno di emissione ha inizio e cessa non appena la luce incide sulla superficie metallica. Anche in questo caso c'è contrasto con la teoria elettromagnetica della luce. Infatti se l'intensità luminosa è abbastanza piccola ci dovrebbe essere un ritardo di tempo misurabile fra l'arrivo della luce sulla superficie e l'emissione del fotoelettrone. Durante questo intervallo di tempo l'elettrone dovrebbe assorbire energia dal fascio di luce incidente finché non ne ha accumulata abbastanza per uscire dal metallo. Invece non è stato mai misurato alcun ritardo, nemmeno con luce incidente pochissimo intensa.

Un metallo, colpito da radiazioni luminose di frequenza sufficientemente elevata, emette elettroni. Consiste in questo l'effetto fotoelettronico detto anche effetto fotoelettrico.

L'interpretazione qualitativa del fenomeno è abbastanza semplice: gli elettroni di conduzione ricevono dalla luce l'energia necessaria per superare la barriera di potenziale superficiale ed uscire dal metallo.



La spiegazione dell'effetto fotoelettrico fu data per la prima volta da Einstein nel 1902. L'interpretazione quantistica di Einstein è la seguente. D'accordo con la teoria dei quanti di Planck, la luce incidente è costituita da granuli aventi, ciascuno, l'energia $\mathbf{h} \mathbf{v}$ (fotoni). Ciascun fotone o atomo di energia va pensato non dissimile da un proiettile avente la velocità della luce. Quando un fotone urta un elettrone alla superficie di un metallo, esso cede la sua energia all'elettrone. Questo trasferimento di energia è un processo <<tutto o niente>> in quanto l'elettrone o acquista tutta l'energia del fotone o non ne acquista affatto. Il fotone, nel primo caso, scompare. Pertanto un elettrone del metallo, se assorbe un fotone, può disporre del quantum di energia <<\\hd{h}\varphi>>. Però, penetrando la barriera di potenziale, l'elettrone perde l'energia Φ che è il lavoro di estrazione dell'elettrone dal metallo. Qualche elettrone libero può perdere una quantità di energia maggiore di $\Phi = hv_o$, se per esempio è colpito sotto la superficie metallica (cioè verso l'interno del metallo). La parte rimanente dell'energia del fotone $hv - \Phi = hv - hv_o$ si trasforma in energia cinetica dell'elettrone.

Quindi la massima energia cinetica di un elettrone emesso quando viene colpito da luce di frequenza \mathbf{v} è: $\frac{1}{2}\mathbf{m}\,\mathbf{v}_{\max}^2 = \mathbf{h}\mathbf{v} - \mathbf{\Phi} = \mathbf{h}\mathbf{v} - \mathbf{h}\mathbf{v}_{\mathrm{o}}$

Questa è l'equazione per l'effetto fotoelettrico data da Einstein e che è in perfetto accordo con i risultati sperimentali di Millikan. [*]

Le leggi fotoelettroniche su accennate valgono, in realtà, se è trascurabile l'energia cinetica posseduta dagli elettroni nel metallo prima dell'espulsione per azione dei fotoni, cioè se il metallo è a $\mathbf{O}^{\circ}\mathbf{K}$. Altrimenti un certo numero di fotoelettroni potrà presentare un'energia cinetica anche lievemente superiore al valore massimo $\mathbf{T}_{\text{max}} = \mathbf{h}\mathbf{v} - \mathbf{h}\mathbf{v}_{_{0}}$; e sarà anche possibile l'espulsione di qualche elettrone che risulti possedere energia superiore a $\mathbf{h}\mathbf{v}_{_{0}}$, necessaria al lavoro di estrazione, grazie al cumularsi dell'energia cinetica da esso posseduta nel metallo coll'energia $\mathbf{h}\mathbf{v}$ di un fotone di frequenza \mathbf{v} lievemente inferiore a $\mathbf{v}_{_{0}}$, in altri termini in un metallo <<caldo>> un debole effetto fotoelettronico si ha anche per radiazioni di frequenza lievemente inferiore alla frequenza limite $\mathbf{v}_{_{0}}$. Con queste ipotesi tutte le difficoltà inerenti alla spiegazione dell'effetto fotoelettronico mediante la teoria classica sono ora rimosse e facilmente comprese.

1) Più piccola è λ , più alta è \mathbf{v} ($\lambda \mathbf{v} = \mathbf{c}$), maggiore è l'energia associata al fotone e quindi maggiore è l'energia cinetica dell'elettrone emesso.

Se si aumenta l'intensità della luce (monocromatica) incidente di data frequenza \mathbf{v} , un maggiore numero di fotoni inside sul metallo nell'unità di tempo.

Quindi sono emessi più elettroni, ma l'energia cinetica massima di ogni fotoelettrone non aumenta in quanto ogni fotone possiede l'energia **hv** (legge N° 2)

- 2) Non è necessario attendere che l'energia si accumuli quando la luce incide sulla superficie in quanto un solo fotone, all'atto della collisione con l'elettrone, può cedergli l'energia sufficiente per l'emissione (legge N° 5)
- 3) Se $T_{\text{max}} = \frac{1}{2} \text{m } v_{\text{max}}^2 = 0$ si ha: $hv \Phi = hv hv_0 = 0$ $v = v_0$ cioè il fotone ha energia

appena sufficiente per estrarre fotoelettroni e quindi non possiede energia da comunicare sotto forma di energia cinetica.

Se $\mathbf{v} < \mathbf{v}_o$ i singoli fotoni, indipendentemente dal loro numero, non hanno energia sufficiente per estrarre fotoelettroni.

4) L'ipotesi del fotone cioè la teoria corpuscolare della luce sembra essere in contrasto con la teoria ondulatoria della luce necessaria per una corretta interpretazione di fenomeni quali l'interferenza, la diffrazione, la polarizzazione, Il punto di vista moderno è che la luce presenta un carattere duale dato che si comporta come un'onda in alcune circostanze e come particella in altre. In ogni caso, nei fenomeni di propagazione la luce si comporta come un'onda elettromagnetica, mentre nei fenomeni di interazione con la materia si comporta come un insieme di corpuscoli o fotoni. La luce appare pertanto a volte come fenomeno corpuscolare a volte come fenomeno ondulatorio.

Le ragioni di questo dualismo ed il modo con cui l'apparente contraddizione tra proprietà corpuscolari e ondulatorie sono eliminate se studiate nella fisica quantistica.

Cellula fotoelettrica

L'effetto fotoelettrico è messo bene in evidenza dalla cellula fotoelettrica o fotoelettronica o fototubo o cellula di Hallwachs costituita da un'ampolla di quarzo in cui viene fatto un vuoto estremamente spinto. In questa ampolla si hanno due elettrodi \mathbf{F} e \mathbf{P} . Un fascio di luce monocromatica attraversa la finestra L (che è in quarzo o in vetro di silice affinché si possa sperimentare anche con luce ultravioletta) ed incide sulla lastra metallica \mathbf{F} . La batteria di placca \mathbf{B}_a porta i due elettrodi ad una d.d.p. $\mathbf{V}_a = \mathbf{V}_P - \mathbf{V}_F$ nota e variabile mediante il dispositivo potenziometrico indicato in figura. Un sensibile galvanometro \mathbf{G} è in grado di segnalare

l'eventuale corrente di placca \mathbf{i}_a . Al buio \mathbf{i}_a è nulla. Se \mathbf{F} è illuminato con luce di lunghezza d'onda sufficientemente corta (e quindi di frequenza sufficientemente elevata) \mathbf{i}_a in generale non è nulla. Essa dipende dalla natura della superficie \mathbf{F} , dall'intensità e qualità della luce incidente. Tuttavia i valori di \mathbf{i}_a raramente superano i $\mathbf{10^{-6}\,A}$. Per una data superficie metallica \mathbf{F} , a costante illuminamento, al variare di \mathbf{V}_a si ha la caratteristica indicata in figura. La curva I si ha nelle cellule in cui la placca circonda quasi completamente l'elettrodo \mathbf{F} . La curva II si ha nelle cellule più comuni nelle quali questa condizione non è soddisfatta. La corrente \mathbf{i}_a comincia abbastanza bruscamente per un certo valore $\mathbf{V}_a = \mathbf{V}_0$.

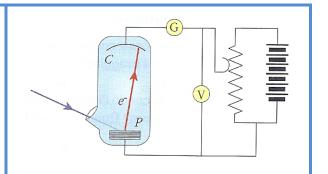
La corrente di saturazione si osserva già per tensioni di qualche volt, anche nel caso della curva II. La corrente \mathbf{i}_a si spiega con la emissione di fotoelettroni da parte della lastra \mathbf{F} colpita da radiazioni di opportuna frequenza. Se è $\mathbf{V}_a > \mathbf{0}$, \mathbf{V}_a è un potenziale acceleratore dei fotoelettroni. Quando \mathbf{V}_a è così forte che tutti i fotoelettroni emessi da \mathbf{F} sono raccolti da \mathbf{P} , nessun aumento di \mathbf{i}_a si ha con l'aumento di \mathbf{V}_a ; si ha la corrente di saturazione.

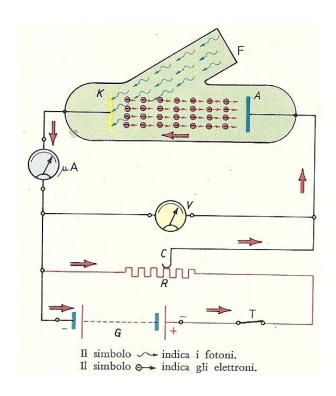
Ma per $V_a = 0$, i_a non è nulla; i fotoelettroni emessi da F con sufficiente velocità (normale alla superficie F), quindi con sufficiente energia cinetica, sono raccolti da P. Solo se V_a è minore di un certo valore $V_a < 0$, nessun fotoelettrone emesso da F viene raccolto da P. Non si ha passaggio di corrente.

Osservazione N°1: Nella teoria classica dell'elettromagnetismo l'energia di un treno d'onde luminose è distribuita su tutta la superficie d'onda. Secondo Einstein ad ogni lunghezza d'onda $\lambda = \frac{1}{v}$ corrisponde un fotone hv.

Osservazione N°2: Escono dal metallo con l'energia cinetica massima soltanto gli elettroni così fortunati da non avere subito successive perdite di energia oltre a quella dovuta al lavoro di estrazione. Un fotoelettrone sarà emesso con energia massima T_{max} quando tutta l'energia hv del fotone si trasforma nel lavoro di estrazione Φ e nella energia cinetica dell'elettrone emesso. (l'emissione di elettroni con energia inferiore a quella massima si ha quando parte dell'energia è assorbita da altri elettroni che restano nel metallo)..

Schema di un dispositivo per lo studio dell'effetto fotoelettrico. Il tubo, comprendente la placca P ed il collettore C, costituisce una cella fotoelettrica. Gli elettroni emessi dalla placca, investita da una radiazione di opportuna frequenza, generano una corrente elettrica di intensità $\mathbf{i}_{\mathbf{a}}$.





U.D.31 Effetto termoionico Effetto fotoelettrico

