

TECNOLOGIE MICROELETTRONICHE

[Fotocopie di Appunti PARTE 4]

A CURA DI ALESSANDRO PAGHI

PROFESSORE: Francesco Pieri (<http://unimap.unipi.it/cercapersone/dettaglio.php?ri=4932>)

LINK AL CORSO ANNO 2016/2017: <http://elearn.ing.unipi.it/enrol/index.php?id=785>

FREQUENTAZIONE: Consigliata.

MICROSCOPIA ELETTRONICA

SEM: Microscopi elettronici a scansione.

Possono essere divisi in:

- Scansione termionica
- Scansione a emissione di campo

TEM: Microscopio elettronico a trasmissione

MO: Microscopio ottico

	MO	SEM	TEM
Range di ingrandimento	$1 \div 1000$	$10 \div 10^4$	$10^3 \div 10^7$
Risoluzione ordinaria limite	5 μm 0,1 μm	0,1 μm 1 mm	5 mm 0,1 mm
Profondità di campo	0,1 mm 10x 1 μm 100x	10 mm 10x 1 mm 100x	limitata dallo spessore del film.

Profondità di campo: operante del campione che riesce a mettere a fuoco

Operazioni con SEM e TEM:

- morfologia superficie campione
- composizione chimica locale
- difettosità elettriche
- contaminazione superficie
- misura potenziale superficiali.

Un SEM permette di ottenere un'alta risoluzione, un alto ingrandimento e una grande profondità di campo con una semplice preparazione del campione.

In un SEM la risoluzione dipende:

- dal diametro della sonda primaria
- dall'energia degli elettroni primari
- dal materiale del campione
- dal rapporto segnale / rumore
- da vibrazioni e instabilità meccaniche ed

elettriche degli strumenti

- due tipi di regime utilizzato a causa del diverso volume di generazione.

ANALISI DELLE COMPONENTI DI UN SEM

CANNONE ELETTRONICO

SORGENTE A EMISSIONE

TERMOIONICA

una costante scarsezza nei
elettrici, le quali si usano
elettrici per oggetti
termionici. Tali

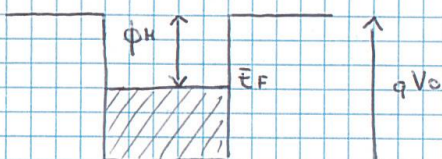
elettrici vengono accelerati

verso l'anodo per via di un

campo elettrico causato dalla applicazione di una
d.d.p. dell'ordine dei kV tra anodo e catodo

I catodi economici sono costituiti in tungsteno,
questi più costosi in evaporato di lantanio (LaBa)

Il metallo può essere formatizzato come una
microscopica laica di potenziale:

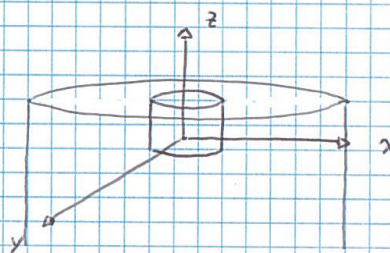


ϕ_K è l'energia minima
da fornire agli elettroni
per raggiungere lo stesso
del vuoto.

Condizione cinematica affinché un elettrone emerga
dal metallo:

Supponiamo che z sia l'asse di emissione e che
la velocità di un generico elettrone abbia componenti
(v_x, v_y, v_z)

Supponiamo di osservare il
moto di un elettrone per un
tempo $t = 1 \text{ sec}$.



U_z tale che esista tale che l'elettrone considerato si trovi all'interno del volume di emissione considerato.

Tutti gli elettroni all'interno del volume definito di emissione con velocità U_z , emergeranno.

$$p_z = U_z \cdot m \rightarrow U_z = p_z / m$$

Condizione energetica affinché un elettrone emerga dal metallo:

$$\bar{E}_c = \frac{1}{2} m U_z^2 = \frac{p_z^2}{2m} > q \cdot V_0$$

$$n = dq \cdot dp_z$$

Il volume n , nello spazio dei momenti, ha

forma di una colonna cilindrica e quindi:

$$V_n = 2\pi q dq dp_z$$

uno stato nello spazio dei momenti ha volume h^3 .

N_n : numero di stati in n

$$N_n = V_n / h^3$$

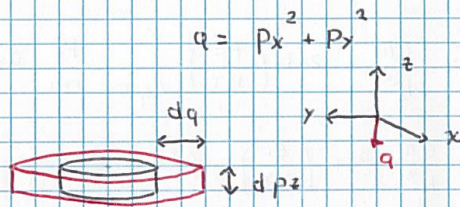
uno stato di energia E è occupato secondo la Fermi-Dirac:

$$f(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right)} = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{p_x^2 + p_y^2 + p_z^2}{2mkT}\right) \exp\left(-\frac{E_F}{kT}\right)}$$

$$\approx \exp\left(-\frac{p_x^2 + p_y^2 + p_z^2}{2mkT}\right) \exp\left(\frac{E_F}{kT}\right)$$

$N_{n, occ}$: numero di stati occupati in n

$$N_{n, occ} = 2 \cdot f(E) \cdot N_n = 2 \cdot \exp\left(-\frac{p_x^2 + p_y^2 + p_z^2}{2mkT}\right) \exp\left(\frac{E_F}{kT}\right) \cdot \frac{2\pi q dq dp_z}{h^3}$$



dN_{occ} : numero infinitesimo di elettroni che occupano i livelli da n

$$dN_n = U_z \cdot N_{occ} = \frac{P_z}{m} \cdot 2 \cdot \frac{2\pi q dq dp_z}{h^3} \exp\left(-\frac{q^2 + p_z^2}{2mkT}\right) \exp\left(\frac{E_F}{kT}\right)$$

$$= \frac{4\pi}{h^3} \exp\left(\frac{E_F}{kT}\right) \frac{P_z}{m} \exp\left(-\frac{P_z^2}{2mkT}\right) dp_z \cdot q \cdot \exp\left(-\frac{q^2}{2mkT}\right) dq$$

$$\int x e^{-x^2/a} = -\frac{1}{2} a e^{-x^2/a}$$

$$J = \frac{4\pi}{h^3} \exp\left(\frac{E_F}{kT}\right) \int_{qV_0}^{\infty} \frac{P_z}{m} \exp\left(-\frac{P_z^2}{2mkT}\right) dp_z \cdot \int_0^{\infty} q \exp\left(-\frac{q^2}{2mkT}\right) dq$$

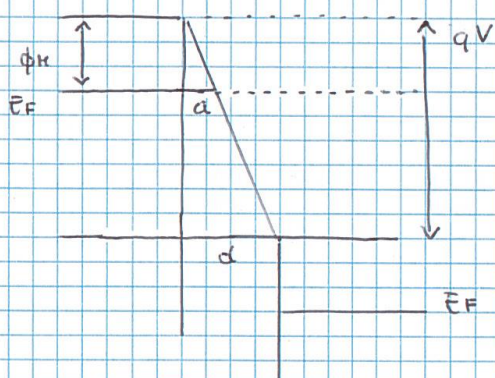
$$= \frac{4\pi}{h^3} \exp\left(\frac{E_F}{kT}\right) kT \cdot \left[\exp\left(-\frac{E_c}{kT}\right) \right]_{qV_0}^{\infty} \cdot m kT \left[-\exp\left(-\frac{q^2}{2mkT}\right) \right]_0^{\infty}$$

$$= \frac{4\pi}{h^3} \exp\left(\frac{E_F}{kT}\right) kT \exp\left(-\frac{qV_0}{kT}\right) m kT$$

$$= \frac{4\pi m (kT)^2}{h^3} \exp\left(-\frac{qV_0 - E_F}{kT}\right) = \frac{4\pi m (kT)^2}{h^3} \exp\left(-\frac{\phi_H}{kT}\right) \quad \left(\frac{\phi_H}{T} \downarrow \uparrow \right)$$

SORGENTE A EMISSIONE DI CAMPO

Viene sfruttato l'effetto tunnel



$$\frac{a}{d} = \frac{\phi_H}{qV}$$

$$a = \frac{\phi_H d}{qV} = \frac{\phi_H}{q \cdot E}$$

$$T = \exp\left(-\frac{q}{3\hbar} \sqrt{2m} \sqrt{qE} a^{\frac{3}{2}}\right)$$

J : densità di corrente di tunneling

$$J = K \exp\left(-\frac{q}{3\hbar} \sqrt{2m} \sqrt{qE} \left(\frac{\phi_H}{qE}\right)^{\frac{3}{2}}\right) = K_1 \frac{E^2}{\phi_H} \exp\left(-K_2 \left(\frac{\phi_H}{qE}\right)^{\frac{3}{2}}\right)$$

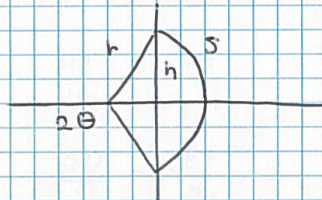
$$= K_1 \cdot \frac{V^2}{a^2 \phi_H} \exp\left(-K_2 \frac{\phi_H^{\frac{3}{2}} \cdot a}{qV}\right) \quad \left(\frac{\phi_H}{V} \downarrow \uparrow \right)$$

L'emissione di campo può essere in condizioni di freddo (deve avvenire in vetro sotto vuoto per non avere ossidi e contaminanti) o in condizioni di caldo (il Tungsteno viene bruciato superficialmente con ZrO_2).

BRILLANZA

Densità di corrente emessa per unità di angolo solido.

$$\beta = \frac{J}{\omega}$$



ω : steradiani

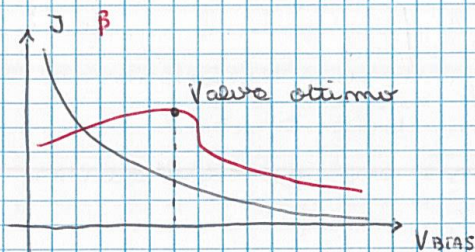
$$\omega = \frac{S}{r^2} = \frac{2\pi r h}{r^2} = \frac{2\pi r r(1 - \cos\theta)}{r^2} = \frac{2\pi r^2(1 - (1 - 2\sin^2\frac{\theta}{2}))}{r^2} = 4\pi \sin^2\frac{\theta}{2} \approx 4\pi \left(\frac{\theta}{2}\right)^2 = \pi\theta^2$$

$$\rightarrow \beta = \frac{J}{\pi\theta^2}$$

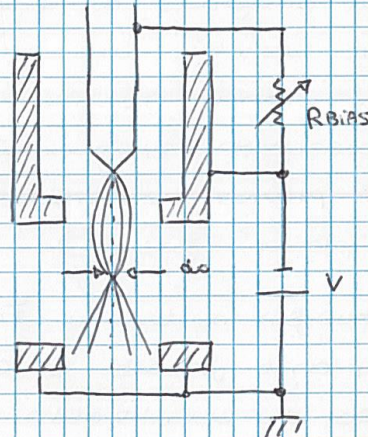
θ : semiapertura dell'angolo solido

ELETTRODO DI WEKNELT

È uno strumento necessario per aumentare l'efficienza della sonda, intesa come numero di elettroni che raggiungono la sonda primaria.

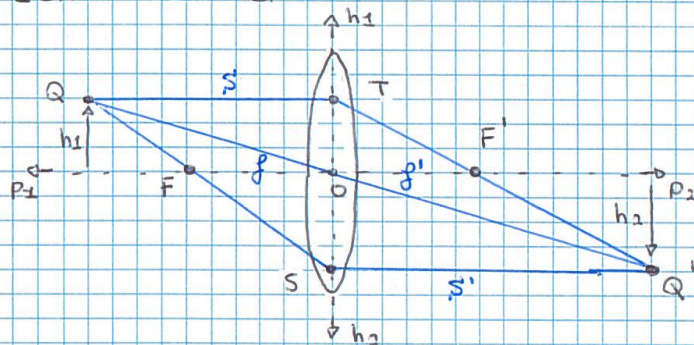


$$\beta = \frac{I}{\pi\theta^2 \left(\frac{d_0}{2}\right)^2 \pi} = \frac{4I}{\pi^2 \theta^2 d_0^2}$$



COLONNA DI OTTICA ELETTRONICA

LENTI SOTTILI



F, F' : punti
coniugati della lente.

$$\frac{TS}{SQ'} = \frac{TO}{OF'} \rightarrow \frac{TS}{S'} = \frac{TO}{f'}$$

$$\frac{TS}{QT} = \frac{OS}{FO} \rightarrow \frac{TS}{S} = \frac{OS}{f}$$

$$\frac{TS}{S} + \frac{TS}{S'} = \frac{TO}{f} + \frac{OS}{f'} \rightarrow TS \left(\frac{1}{S} + \frac{1}{S'} \right) = (TO + OS) \cdot \frac{1}{f}$$

$$\text{con } f = f'$$

Equazione fondamentale delle lenti sottili:

$$\left(\frac{1}{S} + \frac{1}{S'} \right) = \frac{1}{f} \quad (TO + OS = TS)$$

Demagnificazione di una lente:

$$K = \frac{h_2}{h_1} = \frac{S'}{S}$$

Un sistema con lenti è costituito da:

- una sorgente di emissione (luce o elettroni)
- una lente
- un piano focale (tramite un diaframma è possibile selezionare un solo spot)
- un piano immagine (su cui si ricostruisce il piano focale)

La trasformata di Fourier ottica di un seno sul piano focale è costituita da 2 spot, mentre quella di un'onda quadra è costituita da molteplici spot.

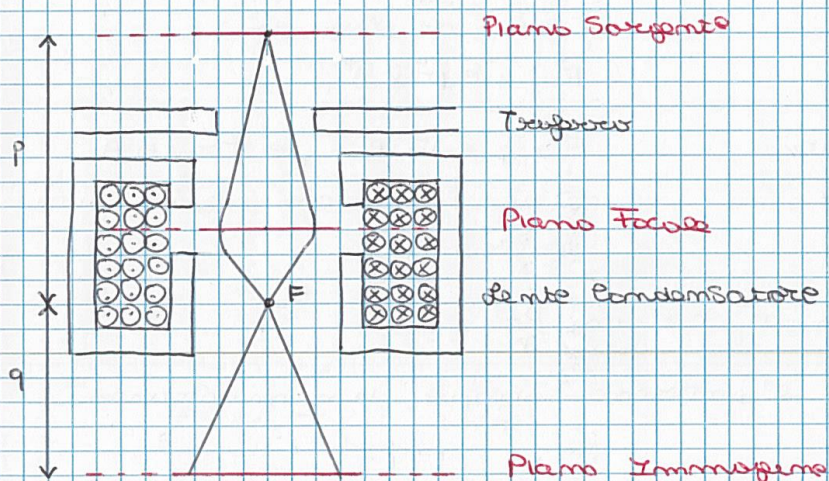
Se R_0 è quindi un reticolo con immagine sinusoidale, due piani focali si presentano 2 S di DIRAC e due piano immagine R_0 di nuova estratta da sinusoidale.

LENTI ELETTROMAGNETICHE

R_0 Supo principale del sistema di lenti è portato a dimensioni del pennello elettronico da $10 \pm 100 \mu m$ allo sorgente a $1 mm \pm 1 \mu m$ che compie.

Si usano più lenti in cascata per ridurre con maggiore accuratezza le dimensioni del pennello.

Schema di una lente:



Demagnificazione: $M = \frac{P}{q}$

Il SEM è costituito da 3 di questi blocchi in cascata.

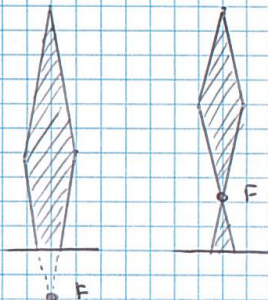
Il diametro del trasformatore aumenta avvicinandosi al campione, mentre diminuisce il diametro della sonda di elettroni da $30 \mu m$ allo sorgente $\rightarrow 1 \mu m$ al primo fuoco $\rightarrow 0,3 \mu m$ al secondo fuoco $\rightarrow 30 nm$ al terzo fuoco. La terza lente si chiama anche lente obiettivo in quanto è possibile regolare la

esistente che ci porta al fine di appiattare
 il fuoco sul compimento.

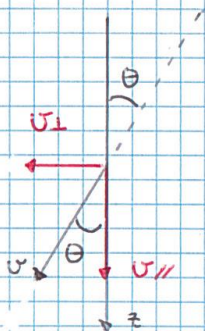
Compimento e fuoco



Compimento fuori fuoco



Traiettoria semplificata:



z : asse principale della banda

v : velocità elettronica

Forza di Lorentz:

$$\vec{F} = +e \vec{v} \times \vec{B}$$

$$F = +e v_{\perp} B = +e v \sin \theta B$$

è la forza che agisce sull'elettrone.

$$F = m a = m \omega^2 r = m \frac{v_{\perp}^2}{r}$$

in quanto l'elettrone compie un movimento circolare.

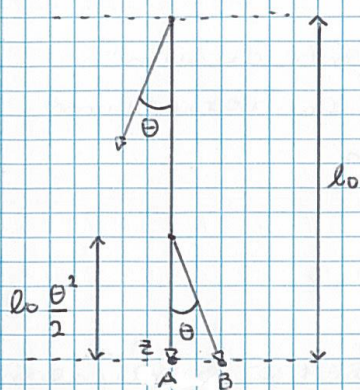
$$e v_{\perp} B = m \frac{v_{\perp}^2}{r} \rightarrow r = m \frac{v_{\perp}}{eB}$$

$$F = m a = m \omega^2 r = m \omega^2 m \frac{v_{\perp}}{eB} = m^2 \omega^2 \frac{v_{\perp}}{eB}$$

$$\rightarrow m^2 \omega^2 \frac{v_{\perp}}{eB} = e v_{\perp} B$$

$$\rightarrow \omega = \frac{eB}{m} = \frac{2\pi}{T}$$

$$\rightarrow T = \frac{2\pi m}{eB}$$



$$v_{\parallel} = v \cos \theta$$

$$l = v_{\parallel} \cdot T = v \cdot \cos \theta \cdot \frac{2\pi m}{eB}$$

l : distanza percorsa lungo l'asse principale dalla sorgente da un elettrone

$$l = l_0 \cdot \cos \theta \approx l_0 \left(1 - \frac{\theta^2}{2} \right)$$

$$l_0 = \frac{2\pi m}{eB} \cdot v$$

$\overline{AB}$: raggio di confusione

$$\overline{AB} = l_0 \cdot \frac{\theta^2}{2} \tan \theta \approx l_0 \cdot \frac{\theta^3}{2} := c_s \theta^3$$

$$\text{ABERRAZIONE SFERICA} : ds := c_s \theta^3$$

$$\text{ABERRAZIONE CROMATICA} : dc = c_c \frac{\Delta E}{E_0} \theta$$

Dovuta alla dispersione dell'energia degli elettroni

$$dc = \overline{AB}$$

E_0 : valore medio di energia di emissione di un elettrone

ΔE : variazione di energia intorno a E_0

$$\text{ABERRAZIONE DOVUTA A DIFFRAZIONE} : dd = c_d \cdot \frac{\lambda}{\theta}$$

$$dd = \overline{AB}$$

λ : lunghezza d'onda dell'elettrone

$$p = \hbar k = \hbar \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \rightarrow \lambda = \frac{2\pi \hbar}{p} = \frac{2\pi \hbar}{\sqrt{2mE}}$$

$$\lambda(\text{nm}) = \frac{1,226}{\sqrt{E(\text{eV})}}$$

CONTRASTO

Il contrasto tra due punti adiacenti di un'immagine può essere definito come la variazione relativa di luminosità tra di essi

L : luminosità

$$Ct = \frac{\Delta L}{L}$$

RUMORE

Il rumore N in un'immagine SEM è principalmente dovuto alla fluttuazione del numero di elettroni primari emessi dalla sorgente

$$\text{Rapporto tollerabile} : \frac{N}{S} \leq \frac{1}{5} Ct$$

Ct : contrasto che si vuole ottenere

m : numero di elettroni emessi per unità di tempo
 m v.a. distribuita secondo Poisson ($\sigma^2 = \bar{m}$)

$$P(m) = \frac{\bar{m}^m \exp(-\bar{m})}{m!}$$

$$\overline{m(m-1)} = \sum_{m=1}^{\infty} m(m-1) P(m) = \sum_{m=1}^{\infty} m(m-1) \cdot \frac{\bar{m}^m \exp(-\bar{m})}{m!}$$

$$= \bar{m}^2 \sum_{m=2}^{\infty} \frac{\bar{m}^{(m-2)} \exp(-\bar{m})}{(m-2)!} = \bar{m}^2 \underbrace{\left[\sum_{k=0}^{\infty} \frac{\bar{m}^k \exp(-\bar{m})}{k!} \right]}_1 = \bar{m}^2$$

$$\overline{m(m-1)} = \overline{m^2} - \bar{m} = \bar{m}^2 - \bar{m} = \bar{m}^2$$

$$\sigma^2 = \overline{m^2} - \bar{m}^2 = \bar{m} = 1$$

$$\sigma = \sqrt{1}$$

$$\frac{N}{S} = \frac{\sqrt{1}}{\sqrt{1}} = \frac{1}{\sqrt{1}} \leq \frac{1}{5} Ct$$

$$\sqrt{\bar{m}} \geq \frac{5}{Ct} \Rightarrow \bar{m} \geq \frac{25}{Ct^2} \approx \frac{100}{Ct^2}$$

$$\beta = \frac{4I}{\pi^2 \theta^2 d_m^2}$$

$$d_m = \overline{AB}$$

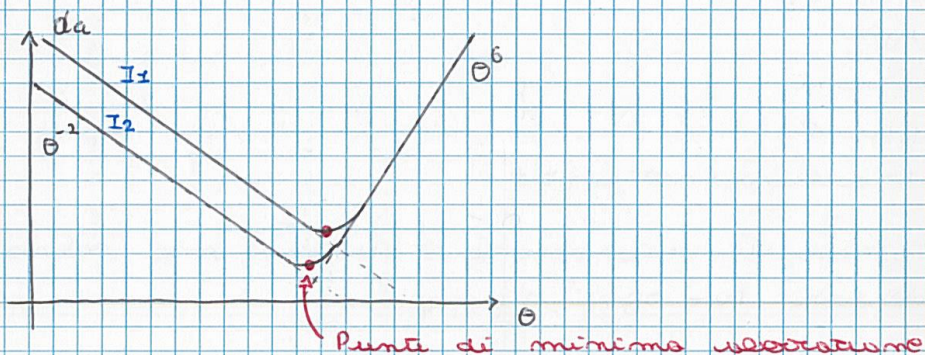
d_m : aberrazione dovuta ad aberrazione

$$d_m^2 = \frac{4I}{\pi^2 \theta^2 \beta} = \frac{400}{(1 \pm \pi^2 \theta^2 \beta)}$$

Da conclusione:

$d_a = \overline{AB}$ aberrazione totale

$$d_a^2 = \underbrace{d_m^2}_{\theta^{-2}} + \underbrace{d_c^2}_{\theta^2} + \underbrace{d_s^2}_{\theta^{-2}} + \underbrace{d_s^2}_{\theta^6}$$



Curve Irideano di natura della corrente nella
Donda.

ASTIGMATISMO

Gli sistemi hanno punti focali diversi a seconda
del piano di osservazione

Un oggetto spesso appare sdoppiato in una
direzione e si trasforma in un ellissoide.

Per accorgersi della presenza di astigmatismo la
focalizzazione non deve essere ovunque preferenziale.

La causa dell'astigmatismo, nella parte
ottica, è dovuta alla non perfetta simmetria.

Sfocata della lente: i raggi che passano attraverso un piano fanno fuoco diverso rispetto a quelli che passano attraverso il piano perpendicolare.

Nei microscopio elettronico, l'astigmatismo viene corretto inserendo apposite lenti elettromagnetiche, dette stigmatizzatori, le quali fanno il compito di mettere il fuoco nelle due direzioni perpendicolari.

EMISSIONE DEL CAMPIONE

Una volta che il campione viene colpito da un fascio di elettroni primari, esso emette sui elettroni che energia sottoforma di radiazioni:

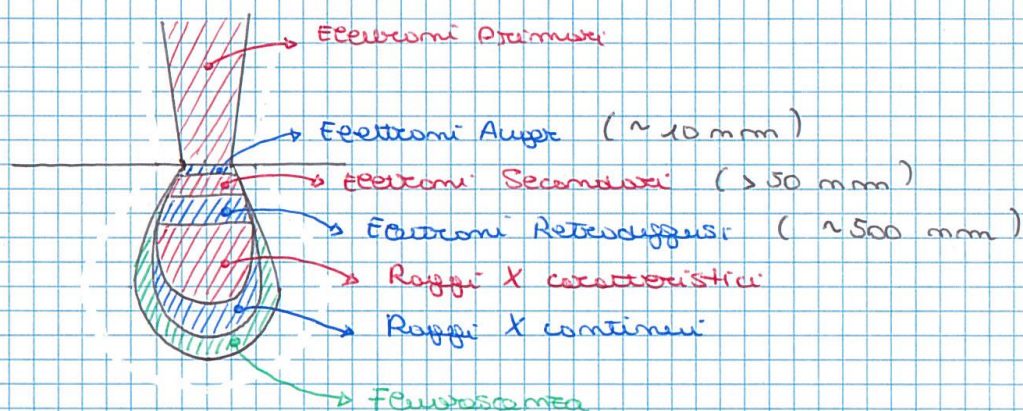
- elettroni
- secondari
- retrodiffusi
- Auger

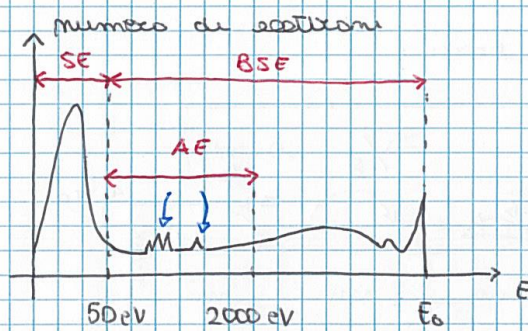
Radiazioni:

- Raggi X
- Catodoluminescenza

Il sistema di rilevazione è unico, ma serve un rivelatore per ogni segnale.

VOLUME DI EMISSIONE





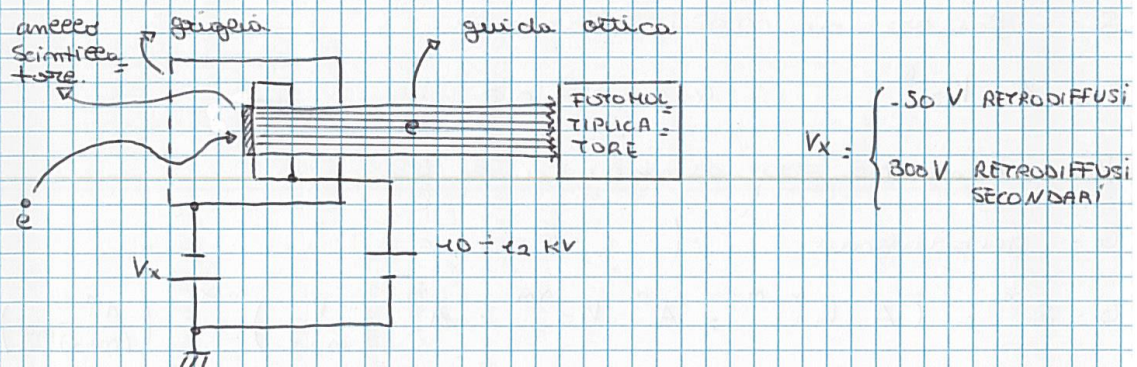
ELETTRONI SECONDARI

È un elettrone appartenente al campione, ionizzato dagli orbitali atomici a causa di un urto anelastico con un elettrone primario.

ELETTRONI RETRODIFFUSI

È un elettrone primario deviato a causa di un urto elastico col nucleo di un atomo.

Rilevatore di Secondari e Retrodiffusi:

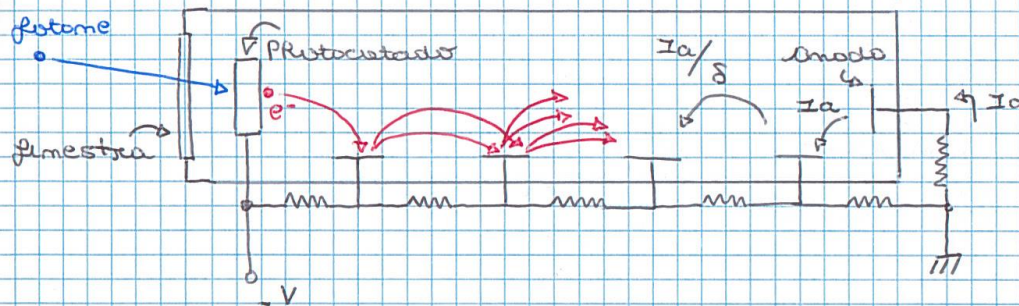


Gli elettroni attraversano la griglia e vengono accelerati verso l'anello scintillatore se questo emette fotoni una volta colpito.

I fotoni emessi vengono convogliati attraverso una guida ottica al fotomoltiplicatore.

Il fotomoltiplicatore è sostanzialmente un amplificatore di corrente.

Schema del fotomoltiplicatore:



I fotoni colpiscono il fotocattodo il quale emette elettroni. Questi elettroni vengono accelerati verso il primo dinodo, il quale, una volta colpito, emette altri elettroni.

Questo processo di generazione a cascata consente di aumentare la quantità di elettroni emessi dal fotocattodo e quindi aumentare la corrente della corrente.

I_a : corrente sull'anodo

S : fattore di moltiplicazione

$$S = A \cdot V_{is}^{\alpha}, \quad \alpha \approx 0,7 \div 0,8$$

V_{is} : tensione tra dinodo i e $i+1$

G : guadagno

$$G = S^m = (A \cdot V_{is}^{\alpha})^m = A^m \cdot V_{is}^{\alpha m} = A^m \cdot \left(\frac{V}{m+1} \right)^{m\alpha} = \left(\frac{A^m}{(m+1)^{m\alpha}} \right) \cdot V^m$$

$$m \approx 8 \div 13$$

stessa tensione su tutti i dinodi

$$G \approx 10^4 \div 10^6$$

MECCANISMI DI FORMAZIONE DI LUMINOSITÀ E CONTRASTO

CONTRASTO MORFOLOGICO

Riconato dalla generazione di elettroni secondari. Per aumentare l'emissione di questi, si procede ad inclinare il campione di un angolo θ rispetto all'asse di emissione z . Questo porta ad un incremento del numero di generazione di secondari con un conseguente aumento di emissione.

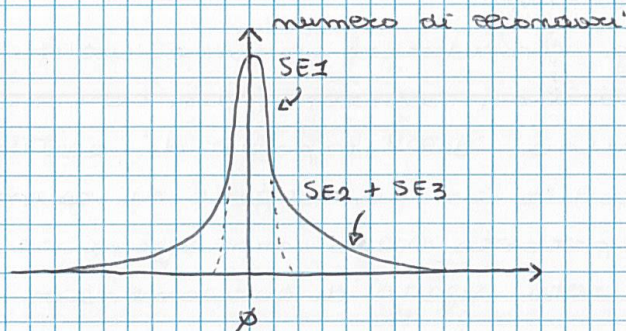
La tonalità di grigio risultata dipende dalla morfologia del campione: più sprofonda in profondità più la tonalità di grigio diventa scura.

La posizione del rivelatore contribuisce, inoltre, alla formazione di zone d'ombra. Inclinando il campione un distanza del rivelatore conviene anche per ridurre questo effetto.

Il rivelatore è soggetto a forme di rumore come:

- cattura di secondari dovuti all'impatto di BSE con la lente (SE3)
- cattura di BSE (SE2)

Queste cause portano alla creazione di una coda nella distribuzione di secondari rivelati:



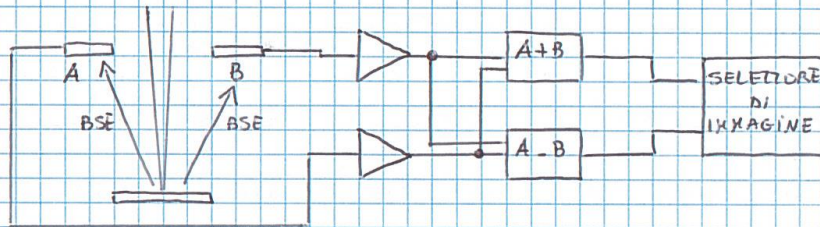
CONTRASTO COMPOSITIVO

Riconoscere la generazione di elettroni retrodiffusi, la differenza del segnale ottenuto con i secondari, e l'acquisizione di informazioni tramite BSE consente di apprezzare in maniera più nitida le variazioni compositive del campione.

La resa dei BSE deve essere molto maggiore della resa dei SE.

Per fare ciò, è necessario diminuire la componente morfologica del campione, utilizzando una superficie perfettamente piatta → preparazione metallografica.

Si usano due rivelatori a semiconduttore posti simmetricamente rispetto all'asse di emissione z :



I segnali ricevuti dai due rivelatori di BSE vengono in una prima fase preamplificati, poi sommati o sottratti ed infine selezionati.

$A+B$: contiene l'informazione compositiva

$A-B$: contiene l'informazione morfologica

EFFETTI DI CARICAMENTO

Se il campione considerato non è costituito da materiali conduttivi, avviene un caricamento della superficie a causa dell'impatto di elettroni primari. Si produce un effetto di grande luminosità riportato nelle immagini acquisite. Per evitare questo effetto di caricamento, si rende il campione conduttivo con una sottile metallizzazione.

CONTRASTO DI TENSIONE

Tramite l'applicazione di un campo elettrico prodotto dal rivelatore è possibile fornire una misura qualitativa della distribuzione statica:

$V_{1/2}$ colore chiaro

$V_{3/4}$ colore scuro

La tecnica può essere resa quantitativa e può essere estesa a frequenze > 100 kHz con risoluzione di tensione ± 10 mV e risoluzione spaziale $\pm 0,1 \mu\text{m}$.

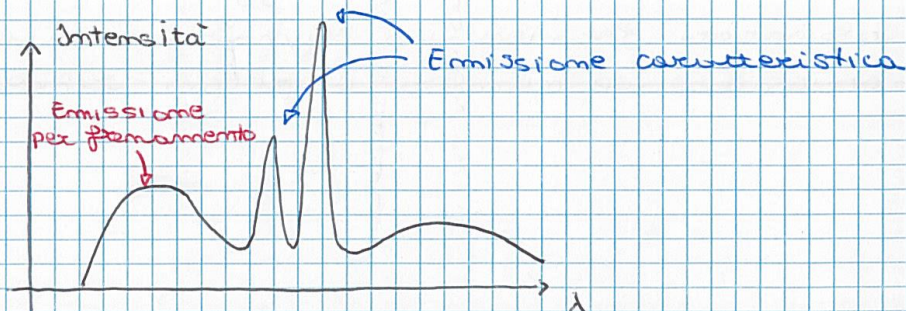
RAGGI X

A seguito di un rallentamento di un elettrone secondario, a causa di un urto con un primario, un elettrone di un guscio più esterno scende nel guscio più interno per occupare lo stato ad energia inferiore.

Durante questo fenomeno, viene emessa energia sottoforma di raggi X ed fine di ottenere il bilanciamento energetico.

L'energia emessa è caratteristica del tipo di atomo considerato ed il processo è definito EMISSIONE CARATTERISTICA.

L'EMISSIONE PER FRENAMENTO prevede l'emissione di raggi X, a seguito del rallentamento di un primario dovuto all'interazione col nucleo atomico.



l' emissione caratteristica fornisce informazioni
sui tipi di atomi presenti, ma con scarsa
risoluzione dato il grande numero di
emissioni.

l' emissione per frenamento è invece classificata
come forma di rumore in quanto non fornisce
alcuna informazione.

Legge di Moseley:

λ : lunghezza d'onda radiazione caratteristica

Z : numero atomico

σ : costante di schermo

$$\lambda = \frac{k_1}{(Z - \sigma)^2} \quad ; \quad (Z - \sigma) = k_2 \sqrt{f}$$

Esprime la dipendenza dei raggi X emessi
da un elemento chimico in funzione del
suo numero atomico

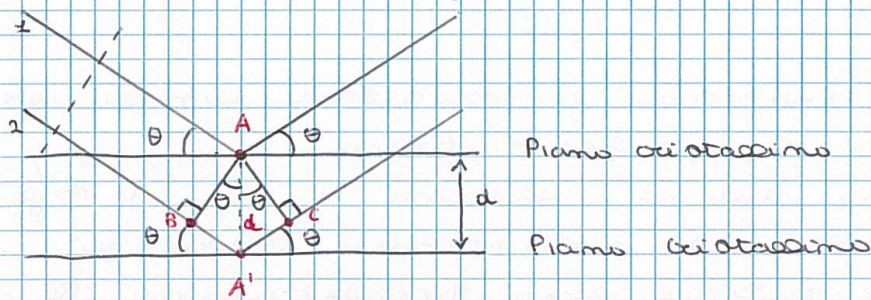
Per analizzare i raggi X è necessario uno
spettrometro, ovvero uno strumento che conti
il numero di fotoni emessi per unità di
intervallo di energia.

WDS (Spettrometro a dispersione di lunghezza d'onda)

È composto da un analizzatore seguito da un
rivelatore di raggi X, che oltre non fa che
contare il numero di elettroni.

l' analizzatore seleziona i raggi X ad una certa λ ,
il rivelatore fornisce un segnale elettrico
proporzionale al numero di fotoni rivelati.

Interferometro di Bragg



d : distanza tra due piani cristallini

$$\overline{BA'} + \overline{A'C} = 2d \sin \theta$$

Due raggi incidenti 1 e 2 colpiscono il cristallo. La riflessione del cristallo fornisce la sommatoria in fase dei due raggi incidenti se: $m\lambda = 2d \sin \theta$

Viene quindi fornito in uscita una riflessione "rinforzata" se e solo se i raggi incidenti possiedono uno specifico θ ed uno specifico λ .

Si sa che, quindi, in funzione di λ .

La sorgente di raggi X, l'amplificatore e il rivelatore devono stare su un archio che prende il nome di cerchio di Rowland.

Per aumentare l'efficienza di raccolta il cristallo è curvato.

Per notare θ , fermo restando il punto di emissione, il cerchio di Rowland passa lungo una retta e il rivelatore si muove per mantenersi in posizione due cerchi.

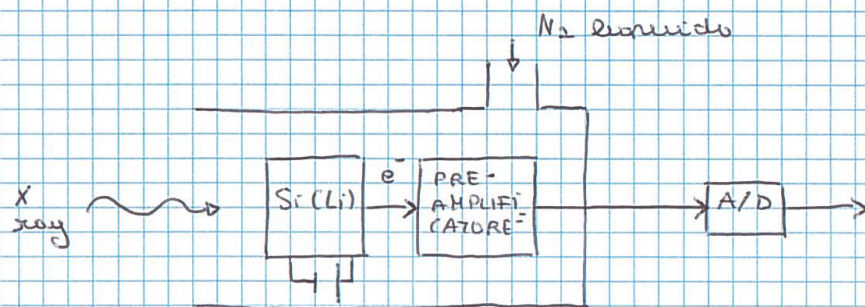
Per coprire tutti i θ , e quindi tutte le λ , di interesse è necessario utilizzare una serie di cristalli con d differenti.

Rivelatore a gas proporzionale sull'energia dei fotoni X.

I raggi X innescano un processo di ionizzazione e ricombinazione di un gas di Argon.

Si generano, quindi, elettroni e ioni di Argon. L'anodo polarizzato elettricamente, attira gli elettroni e genera una depolarizzazione che fornisce una misura dell'energia dei fotoni X. Per evitare la produzione di fotoni ionizzanti si utilizza una miscela di Ar + idrocarburi.

EDS (Spettrometro a dispersione di energia)



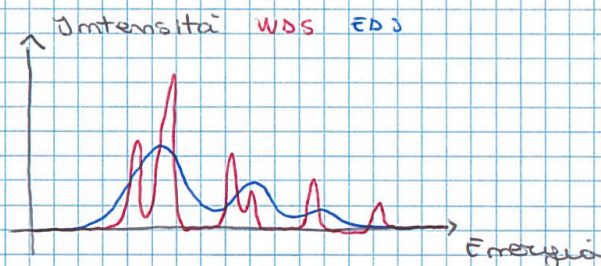
I fotoni X colpiscono un cilindro di Si + Li

(Li per eliminare le trappole nel silicio) e questo emette elettroni verso un preamplificatore. Il sistema è immerso in azoto liquido per evitare che Li fuoriesca da Si ed alterando il rumore termico del preamplificatore.

Il segnale viene poi convertito ed inviato al computer.

WDS Vs EDS

EDS molto più veloce ma molto meno accurato



ELETTRONI AUGER

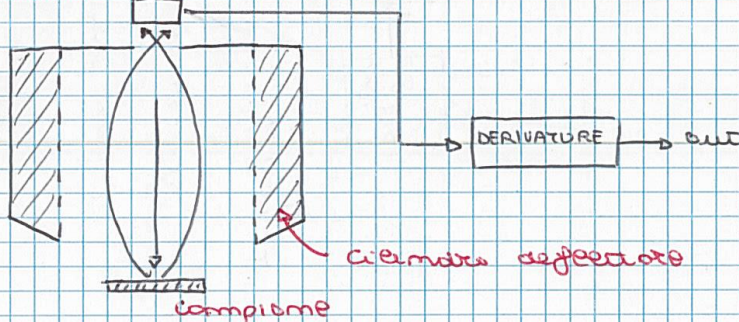
A seguito di un allontanamento di un elettrone secondario, a causa di un urto con un primario, un elettrone di un guscio più esterno salta nel guscio più interno per occupare lo stato ad energia inferiore. Durante questo fenomeno l'atomo emette un elettrone al fine di ottenere il riequilibrio energetico.

Al termine del processo l'atomo rimane doppiamente ionizzato in quanto il fenomeno coinvolge 2 elettroni e 3 elettroni.

Gli elettroni Auger danno segnali molto piccoli difficilmente distinguibili dal rumore di fondo.

Analizzatore a Specchio Cilindrico (CHA)

Rivelatore Δ



Gli elettroni emessi dal campione a seguito dell'impatto dei primari vengono condotti dai cilindri deflettori al rivelatore.

La geometria degli elettroni emessi deve essere tale che essi attraversino il foro per poter arrivare al rivelatore.

Si misura, adesso, la derivata del profilo degli elettroni rivelati, al fine di riconoscere i piccoli dovuti agli elettroni Auger.

CATODO LUMINESCENZA

Sono fotoni emessi dopo impatto del raggio che
causano il decadimento di elettroni da Bc a Bv

