

*Appunti dalle lezioni del corso di*

# MODELLISTICA ELETTROMAGNETICA DEI MATERIALI

*(prof G. Lupò)*

## CAPITOLO VI

### CONDUZIONE E SCARICA NELL'ALTO VUOTO

#### §VI.I Proprietà elettriche dell'alto vuoto

L'interesse sull'argomento in campo elettrotecnico si è rivelato piuttosto sostenuto negli ultimi anni ed ha contribuito ad affiancare apparecchiature di vasto uso anche industriale a quelle tradizionali dell'area della Fisica Sperimentale. Isolamenti per AT in vuoto spinto (pressioni inferiori a  $10^{-5}$  Pa, cui corrisponde una densità dell'ordine di  $10^{12}$  particelle/cm<sup>3</sup>) debbono essere studiati per applicazioni quali:

- interruttori ;
- valvole termoioniche;
- acceleratori e separatori di particelle;
- apparecchiature per la Fusione Termonucleare Controllata;
- condensatori a basse perdite per alta frequenza;
- voltmetri elettrostatici;
- generatori elettrostatici.

I fenomeni che si possono sperimentalmente osservare in esperimenti su elettrodi collocati in ampolle in cui si è fatto il vuoto spinto sono:

- *corrente stazionaria di fondo*, dovuta essenzialmente ad emissione di elettroni per effetto termoionico e/o di campo;

- *microscariche*, ad andamento aleatorio ( 1-50 ms di durata, qualche  $\mu\text{C}$  di valore integrale e anche 200  $\mu\text{A}$  di cresta) particolarmente indesiderate in quanto non solo disturbano le misure, ma inducono anche fenomeni secondari quali emissione di raggi X, ionizzanti per le regioni esterne. Il meccanismo di queste microscariche non è ancora definitivamente chiarito, ma si è notata l'influenza del condizionamento (vedi appresso) e delle imperfezioni degli elettrodi.

- *fenomeni secondari*: emissione fotoelettronica, emissione per bombardamento ionico, elettronico o molecolare, emissione causata da atomi metastabili.

## §VI.2 Emissione di elettroni da superfici metalliche

All'interno del metallo gli elettroni sono praticamente "liberi" e la loro energia è distribuita su livelli discreti (il livello di energia massima prende il nome, com'è noto, di 'livello di Fermi'). Per abbandonare definitivamente il metallo, l'elettrone che si trovi al livello di Fermi dovrà acquisire energia in misura sufficiente ; il salto energetico strettamente necessario a ciò ossia la barriera di potenziale viene anche detto *funzione di lavoro*  $\Phi$  [work function] (3-5 eV) (fig.VI.1).

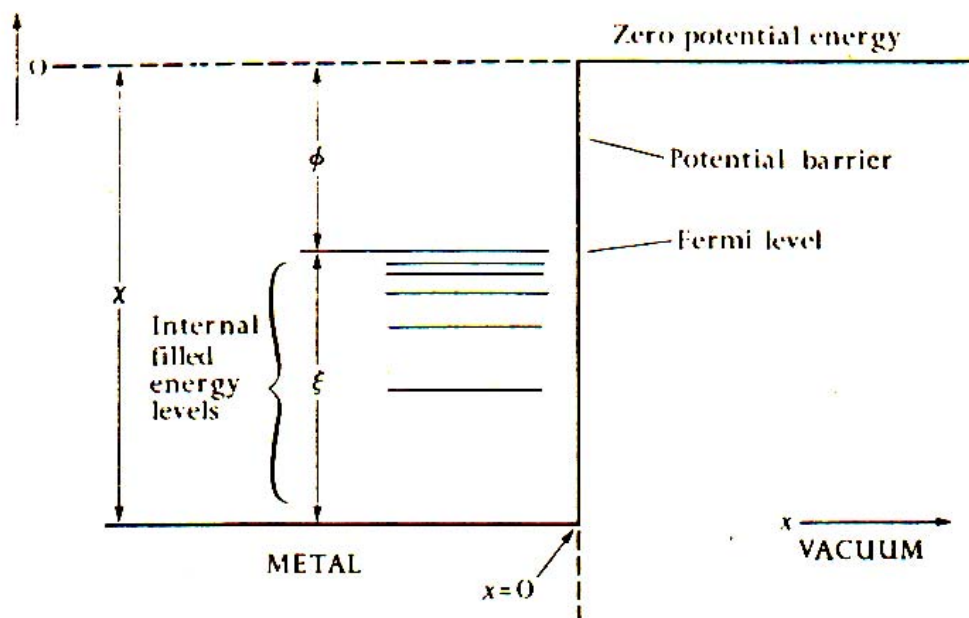


Fig. VI.1 - Livelli energetici per elettroni

L'elettrone che si trovi a distanza  $x$  dalla superficie del metallo sarà attratto verso questo (di ugual carica positiva) dalla forza  $F = -q^2/(4\pi\epsilon_0(2x)^2)$ ; l'energia potenziale corrispondente vale  $W = -q^2/(16\pi\epsilon_0 x)$ . Se tra gli elettrodi v'è un campo uniforme  $E$ , l'energia potenziale viene incrementata della quantità  $-qEx$ . Si ottiene quindi un abbassamento della barriera di potenziale, con valore massimo del potenziale pari a  $W^* = q^{3/2} (E/\pi\epsilon_0)^{1/2}$  alla distanza  $x^* = (q/\pi\epsilon_0 E)^{1/2}/4$  (fig.VI.2). Il valore di  $\Phi$  dipende dal metallo e dal suo stato di ossidazione superficiale (tab.VI.I)

Metallo	Funzione di lavoro (eV)
Ag	4.74
Al	2.98-4.43
Cu	4.07-4.7
Fe	3.91-4.6
W	4.35-4.6

Tab. VI.I – Valori della barriera di potenziale per l'estrazione di elettroni dai metalli

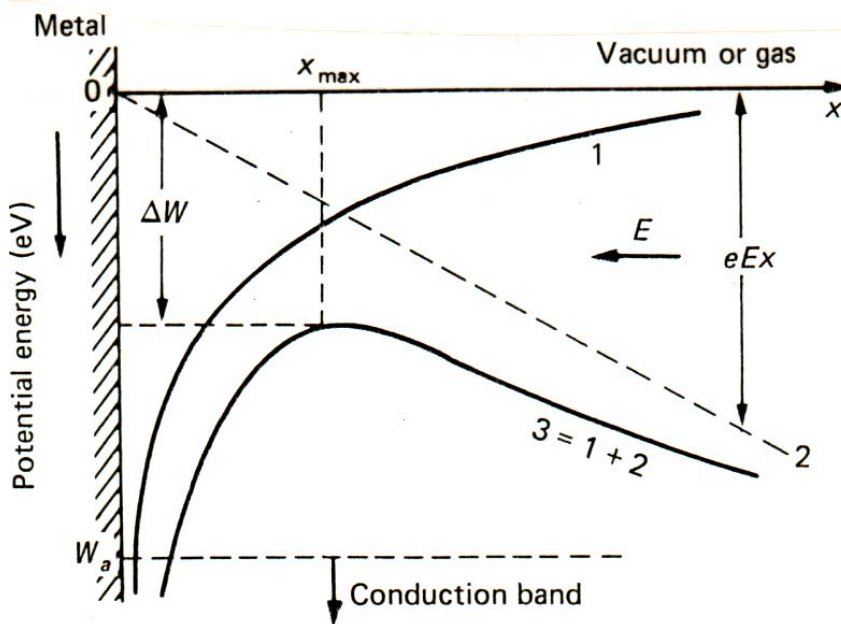


Fig. VI.2- Emissione per effetto di campo

Per superare la barriera di potenziale si può:

- 1) riscaldare l'elettrodo (emissione termoionica, trascurabile alle temperature ordinarie). La corrente emessa per unità di superficie riscaldata alla temperatura  $T$  è data dalla legge di Richardson:

$$J = k T^2 \exp (-\Phi/kT);$$

- 2) illuminare sufficientemente l'elettrodo (emissione fotoelettrica);
- 3) riscaldare l'elettrodo in presenza di sollecitazione elettrica (*effetto Schottky*)

$$J' = k' T^2 \exp (-\Phi'/kT);$$

dove  $k' = 4\pi m q k^2 / h^2 = 1.2 \cdot 10^6$  [A/m<sup>2</sup>K<sup>2</sup>].

- 4) applicando sollecitazioni intense ( $>10^5$  V/cm) si può avere la cosiddetta *emissione per effetto di campo*:

$$J'' = k'' E^2 \exp (-\Phi''/kT);$$

in tale teoria si prevede che gli elettroni possano superare la barriera di potenziale anche per effetto tunnel (fig.VI.3).

Se sugli elettrodi sono presenti protuberanze locali dovute a difetti di lavorazione o a depositi accidentali, il campo viene localmente incrementato di un fattore  $m$  che può essere anche notevole (figg. VI.4 e VI.5); potendosi così innescare microscariche, possono aver luogo locali significativi aumenti della temperatura e ulteriore emissione elettronica per effetto Schottky.

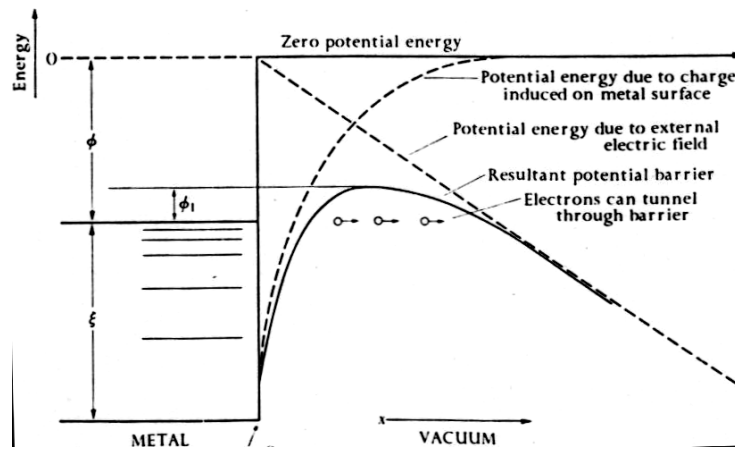


fig.VI.3-Estrazione di elettroni da un metallo con effetto tunnel

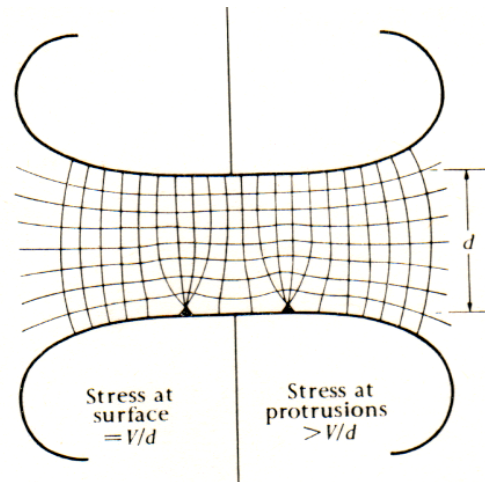


fig. VI.4 Protuberanze superficiali

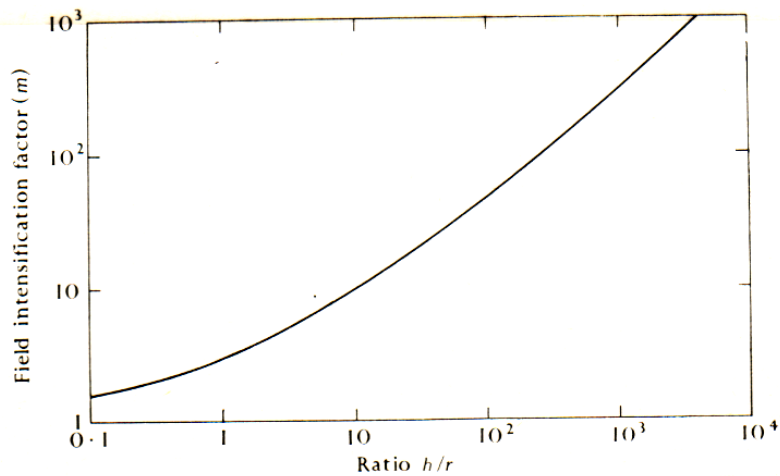


fig.VI.5 – Intensificazione del campo in funzione della forma della protuberanza (di forma cilindrica di altezza  $h$  e raggio  $r$ )

### §VI.3 Tensione di scarica

Prima di considerare le varie ipotesi avanzate per individuare il meccanismo di innesco della scarica in uno spazio interelettrodico "vuoto", è necessario evidenziare i fattori che hanno influenza sul processo fisico.

Si può idealmente definire "tensione di scarica" per l'alto vuoto come quella appena superiore alla massima tenuta per sollecitazione permanente. Nella pratica, la tensione di scarica può essere valutata diversamente caso per caso. Ad esempio, per un interruttore a vuoto, la tensione di scarica è quella minima per la quale si verificano, anche alla prima sollecitazione, fenomeni di una certa rilevanza, dovendo tali apparecchiature "tenere" sollecitazioni permanenti; per un acceleratore di particelle, invece, dove le scariche sono ripetute e si rilevano valori via via più elevati della tensione applicata finché gli elettrodi non risultano condizionati, è proprio la tensione limite ad essere indicata come tensione di scarica nominale.

#### Distanza elettrodica

Per spazi interelettrodici ("gaps") di misura inferiore ad 1 mm si è trovato che la tensione di scarica è proporzionale alla distanza medesima e il campo critico dell'ordine del MV/cm (fig.VI.6); tale comportamento induce a ritenere preponderante, nel fenomeno di scarica, l'emissione di elettroni per effetto del campo elettrico. Il valore del campo critico però diminuisce, anche notevolmente, per distanze superiori ad 1 mm (a 100 mm è dell'ordine di 10 kV/cm) . Si può quindi esprimere la tensione di scarica mediante l'espressione

$$V_s = k d^a \quad (4.1)$$

dove k dipende essenzialmente dagli elettrodi (natura, stato chimico- fisico superficiale, etc), ed a è uguale ad 1 per distanze interelettrodiche inferiori ad 1 mm, è uguale a 0.5 per distanze superiori, come mostrato teoricamente da Cranberg e come si può praticamente riscontrare dai dati sperimentali riassunti nel diagramma in scala logaritmica di fig.VI.7.

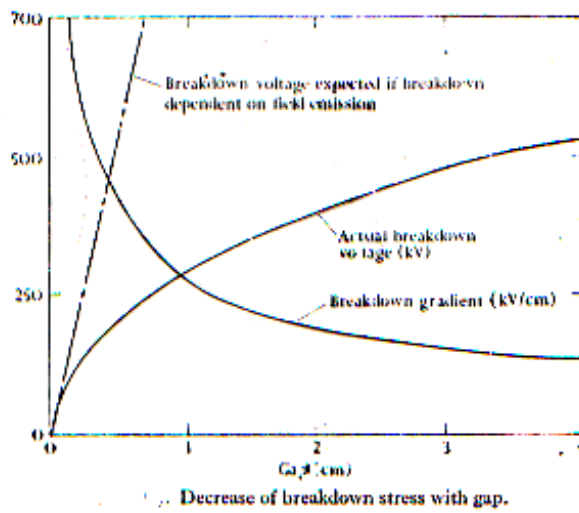


fig. VI.6 – Tensione di scarica in condizioni di alto vuoto

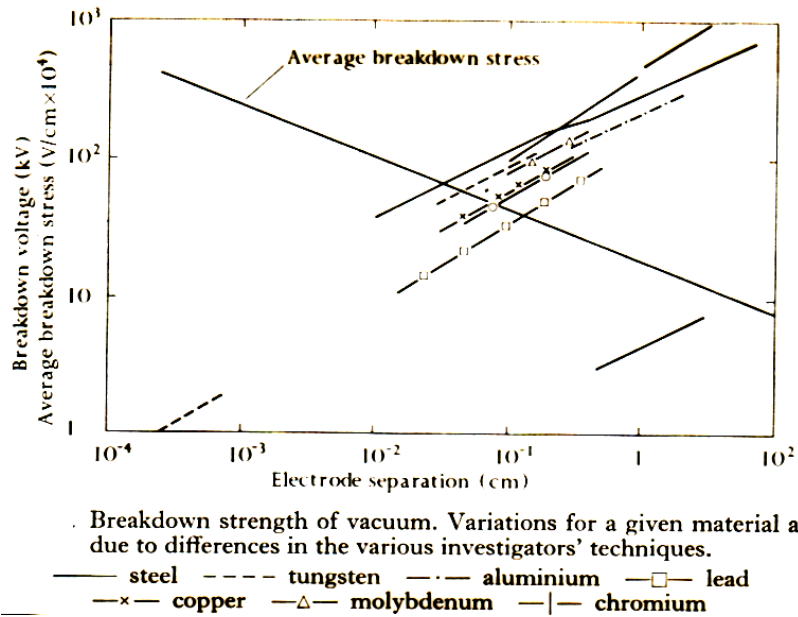


fig.VI.7 Tensione di scarica in alto vuoto per i vari materiali elettrodici

### Condizionamento degli elettrodi

Come si è già detto, il valore della tensione di scarica si assesta solo dopo un consistente ripetersi dei fenomeni disruptivi fino al cosiddetto condizionamento degli elettrodi (fig.VI.8). Tale comportamento può essere ascrivito al processo di lavorazione del materiale elettrodico che lascia residui metallici superficiali e polveri. Un buon condizionamento può essere ottenuto anche riscaldando fortemente gli elettrodi o investendo gli

elettrodi con ioni idrogeno (in tal caso si limitano fortemente il numero di scariche necessario per raggiungere la tensione di scarica standard).

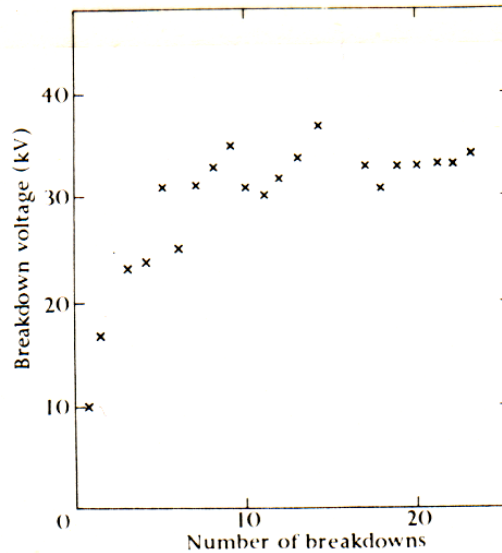


Fig. VI.8: Conditioning effect. Uniform field electrodes. Gap = 1 mm.

fig.VI.8 – Processo di condizionamento

### Natura degli elettrodi

Per quanto detto innanzi sulla estrazione di elettroni, è da aspettarsi una significativa dipendenza della tensione di scarica dalla natura degli elettrodi (fig.VI.7). In Tab.VI.2 sono riportati i valori medi della tensione di scarica per elettrodi puliti e condizionati, sulla distanza di 1 mm:

ELETTRODO	TENSIONE DI SCARICA (kV)
acciaio	122
acciaio inox	120
nichel	96
alluminio	41
rame	37

Tab. VI.2

*Tensione di scarica; elettrodi di materiali diversi*

### Contaminazione superficiale



La formazione di uno strato di ossido e depositi delle reazioni con i vapori esistenti, anche organici (derivanti dall'impianto di vuoto), influenzano i processi di estrazione di elettroni e quindi la tensione di scarica, abbassandola anche oltre il 20%. Anche con elettrodi accuratamente sigillati si possono avere depositi superficiali, dovuti alla vaporizzazione degli stessi elettrodi.

### Effetto d'area e di curvatura

All'aumentare delle dimensioni (area  $A$ ) degli elettrodi, la tensione di scarica diminuisce, a parità di altre condizioni. Tale diminuzione si presenta praticamente lineare nei diagrammi  $\log V_s / \log A$ .

E' stato altresì notato che nel caso di elettrodi curvi, su distanze inferiori a 6 mm, la tensione di scarica è più elevata che non nel caso di elettrodi piani. E' stato riscontrato che la migliore tenuta, per tali casi è data dalla configurazione punta(positiva)-piano. Per configurazioni sfera-piano, la tensione di scarica aumenta al diminuire del raggio della sfera per distanze inferiori ad 1 mm; per distanze superiori ad 1 cm, invece, la tensione di scarica diminuisce al diminuire del raggio della sfera.

In ogni caso, per grandi distanze interelettrodiche, la configurazione di campo disuniforme porta a tensioni di scariche più elevate del caso di campo uniforme.

### Temperatura degli elettrodi

E' stato riscontrato, nel caso di elettrodi di nichel o acciaio, che la tensione di scarica non dipende dalla temperatura degli elettrodi per valori della stessa fino a circa 500 .C; riscaldando oltre tale valore l'anodo si ha una diminuzione della tensione di scarica, mentre se si tratta del catodo si ha un'aumento della stessa. Può pertanto ritenersi che i vapori e gas (in prevalenza organici) "penetrati" nello strato superficiale dell'elettrodo non influenzano il fenomeno di scarica in misura sostanziale; va comunque detto che l'assorbimento dei vapori, in particolare quelli organici, diminuisce fortemente passando da temperature ordinarie a temperature dell'ordine di 500.C .

Un' aumento della tensione di scarica si ottiene inoltre per raffreddamento sino alla temperatura dell'azoto liquido.

### Frequenza della tensione applicata

Com'era lecito attendersi, è stato riscontrato (fig.VI.9) che la tensione di scarica, a parità di altre condizioni, per sollecitazione costante è inferiore a quella ottenibile a frequenza industriale e ancor di più a quella riscontrata con sollecitazione impulsiva. In realtà però si è riscontrato che non esiste grande differenza nei valori della tensione di scarica passando da 50 Hz a 45 MHz.

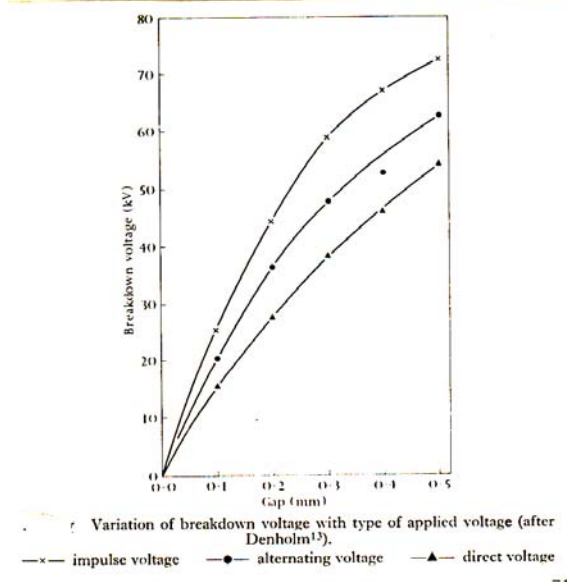


fig.VI.9 – Tensione di scarica in relazione al tipo di alimentazione

### Effetti della pressione residua

Nei casi di gap inferiori ad 1 mm, non esiste praticamente dipendenza della tensione di scarica dalla pressione di gas residua (nel campo  $10^{-7}$ - $10^{-4}$  torr). Per distanze superiori si possono avere effetti imprevisti in prima battuta, come l'esempio mostrato in fig.4.12, in cui all'aumentare della pressione, cioè peggiorando le condizioni di vuoto, si ha un aumento della tensione di scarica.

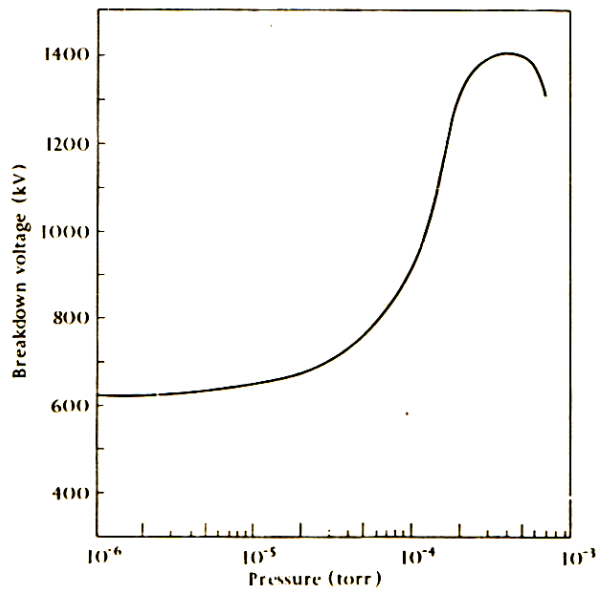


Fig.VI.10 Tensione di scarica in funzione della pressione residua

### Tempi di ritardo

Non vi sono studi completi sui tempi di ritardo statistico alla scarica; in realtà possono verificarsi scariche anche dopo giorni di tenuta a sollecitazione permanente.

Per quanto riguarda il tempo di formazione della scarica, è stato osservato essere dell'ordine di  $10^{-8}$  s per gap di circa 1 mm, decrescente all'aumentare della tensione e al diminuire della distanza. Sovrapponendo impulsi di tensioni ad una tensione continua prossima a quella di scarica, si osserva che il ritardo tra l'applicazione dell'impulso e l'aumento di corrente (di scarica) varia tra  $6.6 \times 10^{-9}$  s per gap da .25 mm e  $4.1 \times 10^{-8}$  s per gap da 1.45 mm.

### Circuito esterno

Il circuito esterno limita la corrente d'arco, che può essere non stabile se la corrente è inferiore a valori critici. Per ottenere risultati ripetitivi è necessario che il valore della resistenza in serie sia quanto più bassa possibile. Per valori opportuni dell'energia messa in gioco, può diminuire la rugosità superficiale degli elettrodi e quindi elevarsi la tensione di scarica.

### Recupero delle proprietà isolanti dopo la scarica

Gli studi sul recupero delle proprietà isolanti sono a tutt'oggi abbastanza limitati. Sono riportate velocità di recupero iniziali di 10 kV/ $\mu$ s per sollecitazione impulsiva e recupero totale di interruttori in 1-15 s per archi da 400 a 3200 A.

### Elettrodi non metallici e rivestimenti superficiali

Per migliorare le caratteristiche di tenuta, gli elettrodi possono avere un rivestimento (impasto ceramico o vernice) parzialmente conduttivo. In tal caso, infatti, al passaggio della corrente di prescarica, si può considerare la presenza di una resistenza in serie di notevole valore, con conseguente diminuzione del campo elettrico alla superficie ed aumento in definitiva della tensione di scarica.

In alcuni casi, gli elettrodi sono stati ricoperti di un sottile strato isolante: ad esempio, con un sottile film (.025 mm) di teflon, la tensione di innesco delle correnti di prescarica può essere notevolmente aumentata (es da 8 a 24 kV); rivestendo elettrodi di alluminio con resina

epossidica di spessore .13 mm si è ottenuta una tensione di tenuta di 340 kV su una distanza di 5 mm.

#### §VI.4 Meccanismi di scarica

Le ipotesi fin qui avanzate per poter significativamente giustificare i fenomeni di scarica nell'alto vuoto possono inquadrarsi in tre categorie:

- 1) ipotesi di *interazione fra particelle elementari* (elettroni, ioni positivi e negativi etc) nascenti dai processi di emissione secondaria: la scarica può aver luogo quando queste interazioni sono auto-sostenute;
- 2) ipotesi di sorgenti di *fasci di elettroni* localizzate sulle asperità del catodo; il bombardamento dell'anodo può essere sufficiente a liberare per riscaldamento inclusioni gassose, aumentando quindi la pressione residua e favorendo una scarica "gassosa".
- 3) ipotesi di *estrazione di nuclei solidi* ("clumps") dagli elettrodi, dovuta essenzialmente a disomogeneità di aggregazione; tali nuclei, accelerati dal campo elettrico, possono, per bombardamento dell'elettrodo opposto, liberare gas occlusi e produrre microfrantumazioni superficiali.

#### Interazione tra particelle

Indicando con:

- A numero medio di ioni positivi prodotti da un elettrone libero per urto o impatto sull'anodo,
- B numero medio di elettroni secondari prodotti da uno degli A ioni positivi per impatto sul catodo,
- C numero medio di fotoni prodotto da un elettrone libero per urto o impatto sull'anodo,
- D numero medio di elettroni secondari prodotti da un fotone per impatto sul catodo,

la condizione di innesco della scarica potrebbe essere espressa dalla relazione

$$(A B + C D) \geq 1$$

La fig. VI.11 illustra questa ipotesi, dimostratasi poco significativa anche nel caso di acceleratori di particelle, dove pure è stato possibile ottenere una buona valutazione dei coefficienti indicati (Trump, Van de Graaf), in particolare per A  $[2 \times 10^{-3}]$  in condizioni

prossime alla scarica ] e B [2-20]. E' stato quindi proposto (McKibben, Boyer) di considerare anche l'effetto degli ioni negativi mediante i coefficienti

G numero medio di ioni negativi prodotti da uno ione positivo

H numero medio di ioni positivi prodotti da uno ione negativo per impatto

per cui, trascurando l'effetto dei fotoni, la condizione critica può essere scritta come

$$(A B + G H) \geq 1$$

Valutazioni sperimentali confermano, in buona misura, l'importanza dei coefficienti G e H.

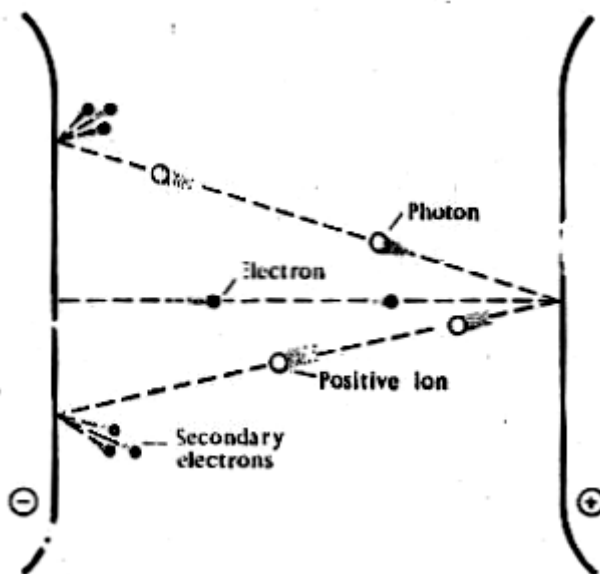


Fig.VI.11 – Interazione tra particelle

### Fasci di elettroni

Fasci di elettroni scaturenti da piccole imperfezioni catodiche possono bombardare e quindi riscaldare localmente l'anodo, liberando gas e vapori occlusi; le particelle di gas possono quindi essere ionizzate dagli elettroni per urto ed accelerate verso il catodo dando luogo sia ad estrazione di elettroni secondari per bombardamento sia ad un aumento di campo elettrico a causa della carica spaziale positiva e quindi alla estrazione di elettroni primari dal catodo (fig.VI.12). I fasci di elettroni possono essere costituiti anche da numerosi microfasci, come si è potuto evidenziare sperimentalmente. Il criterio di scarica va qui ricercato nel raggiungimento di una condizione critica per un gas a bassa pressione.

Condizioni critiche possono essere raggiunte anche per vaporizzazione di zone catodiche (fig.VI.13): protuberanze catodiche danno luogo, in condizioni vicine a quelle critiche, per effetto di campo, a correnti di prescarica ; queste correnti danno luogo al

riscaldamento localizzato delle punte catodiche determinando la vaporizzazione dei gas occlusi e l'esplosione della protuberanza.

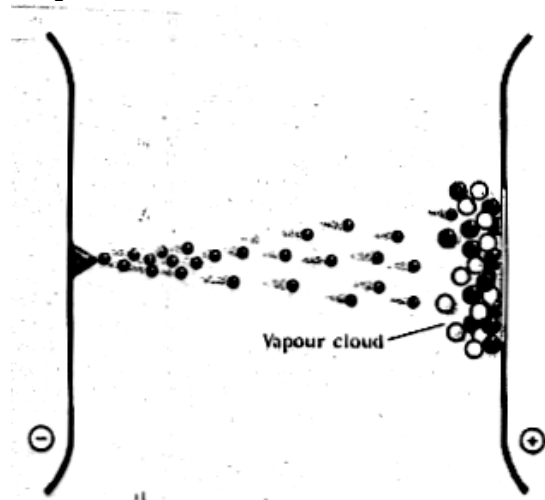


fig. VI.12 – fasci di elettroni catodici

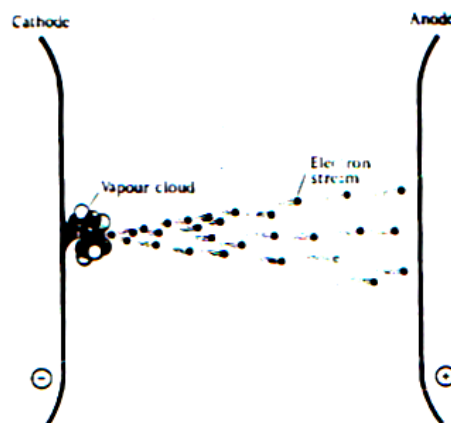


fig. VI.13 – Vaporizzazione catodica

### Estrazione di aggregati

L'importanza del contributo alla scarica di nuclei carichi costituiti da aggregati parzialmente disomogenei (fig.VI.14 a,b,c), già postulata in precedenza, è stata messa in particolare evidenza da Cranberg (1953) il quale assume che la condizione critica per la scarica sia raggiunta quando l'energia di impatto  $W$  per unità di superficie dei nuclei incidenti supera un valore  $K'$ , dipendente dalla configurazione elettrodica. Poiché  $W$  è data dal prodotto della tensione applicata  $V$  per la carica del nucleo, che a sua volta è proporzionale al campo elettrico  $E$  nel punto origine, il criterio di Cranberg potrà essere scritto come

$$V E = K''$$

dove  $K''$  è pari al prodotto di  $K'$  per i coefficienti geometrici del caso e il fattore  $m$  di intensificazione locale del campo teorico  $E$ , fattore legato al tipo di rugosità e imperfezione dell'elettrodo. Nel caso di elettrodi piani e paralleli a distanza  $d$  ritroviamo quindi la dipendenza già nota della tensione di scarica dalla distanza interelettrodica

$$V_s = (K'' \cdot d)^{0.5}$$

Un valore tipico di  $K''$  è circa  $100 \text{ MV}^2/\text{m}$ ; usando tale criterio, Cranberg valuta che il riscaldamento prodotto da un nucleo determina temperature ben al di sopra del punto di ebollizione degli elettrodi.

Slivkov (1957) avanza l'ipotesi che particelle cariche si distacchino dagli elettrodi anche con campi relativamente modesti, che collidano ed aderiscano all'elettrodo opposto a tensioni più elevate, che si distacchino di nuovo a campi ancora più intensi: la condizione critica viene raggiunta quando l'energia cinetica è sufficiente a vaporizzarle; solo queste particelle intervengono nel processo di scarica, e non il restante materiale costituente gli elettrodi.

La presenza dei suddetti nuclei ha avuto evidenza sperimentale nel 1960.



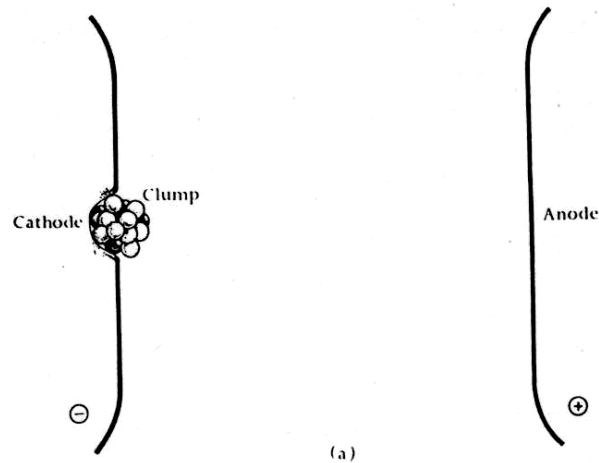


fig.VI.14 a – Presenza di aggregati carichi (clumps)

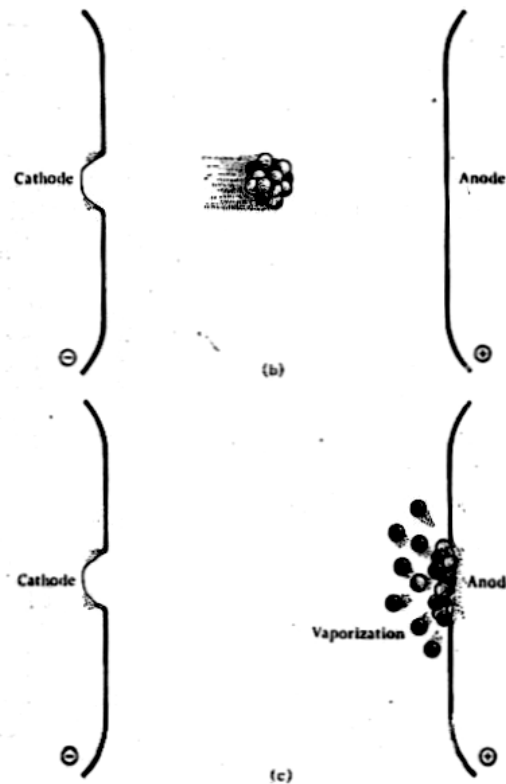


fig. VI.14 Distacco (b) ed impatto (c) di aggregati carichi

### §VI.5 Criterio di scarica

E' difficile dedurre, dai dati sperimentali e dalle ipotesi avanzate, un criterio di scarica di concreta utilità per un ampio campo di distanze interelettrodiche (1 mm - 1 m).

Un criterio empirico di progetto è stato proposto da Kilpatrick (1957) applicabile in un'ampio intervallo di valori di campo elettrico (90 kV/cm - 80 MV/cm), di distanze interelettrodiche (fino a 100 mm), di tensioni (fino a 1.2 MV) e frequenza (fino a 3 GHz, con

qualche riserva per sollecitazioni in continua), per elettrodi di qualsiasi natura, anche contaminati. La condizione critica è espressa dalla seguente relazione

$$W \cdot E_c^2 \cdot \exp(-K_a \cdot E_c) = K_b \quad (\text{criterio di Kilpatrick})$$

dove  $W$  (eV) è la massima energia possibile degli ioni incidenti sul catodo,  $E_c$  (V/cm) è il gradiente al catodo,  $K_a$  e  $K_b$  sono costanti che nelle dimensioni assunte valgono  $K_a = 1.7 \cdot 10^5$ ,  $K_b = 1.8 \cdot 10^{14}$ .

Si deve notare che il criterio di Kilpatrick è un criterio di "tenuta"; una significativa rappresentazione grafica è mostrata in fig.V.15, ricordando che  $W/E_c$  rappresenta la distanza interelettrodica nel caso di campo uniforme.

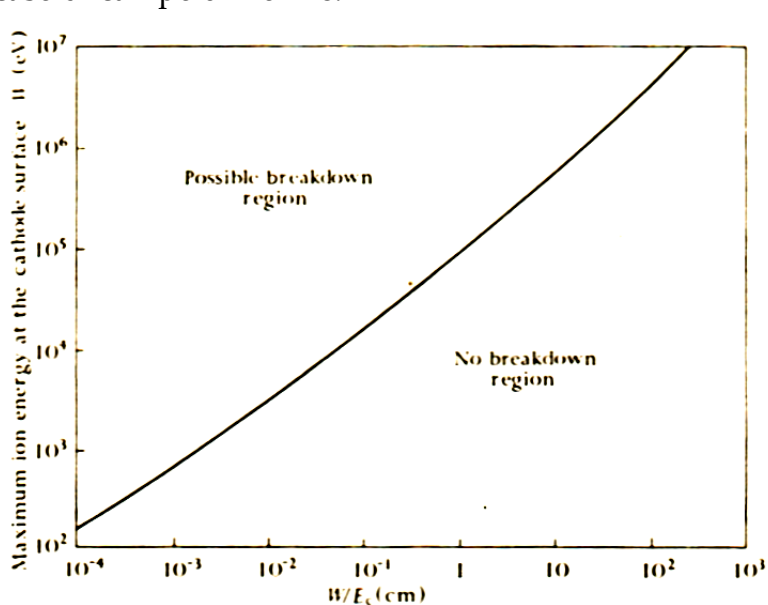


fig.VI.15 – Criterio di Kilpatrick

## §VI.6 Spaziatori

La presenza di isolatori distanziatori in un isolamento ad alto vuoto determina una consistente riduzione della tensione di scarica . La tensione di scarica dipende fortemente dal materiale costituente l'isolatore; ad esempio, nel caso di elettrodi piani e paralleli distanti 2.2 cm separati da isolatori cilindrici si sono ottenuti i risultati di tab. VI.3:

ELETTRODO	ISOLATORE	TENSIONE DI SCARICA (kV)
acciaio inox	vetro pyrex	41.0
rame	"	44.5
magnesio	"	37.0
alluminio	"	39.0
rame	steatite	50,0
rame	rulite	40,0
rame	biossido di Zr	40
rame	polistirene	75
rame	teflon	50

Tab. V.3

Numerosi accorgimenti in sede di montaggio degli isolatori sono realizzati al fine di migliorare le caratteristiche di tenuta: sagomature speciali agli attacchi, uso di vernici conduttrici al contatto isolatore elettrodo, etc.

Non esistono a tutt'oggi teorie significativamente assestate per l'analisi quantitativa dell'influenza dell'isolatore sui mecc