

Dosimetria a termoluminescenza: principio di funzionamento

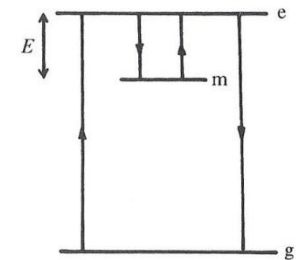
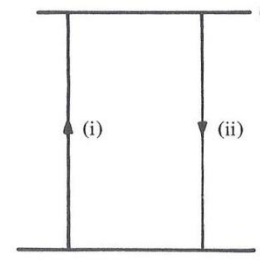
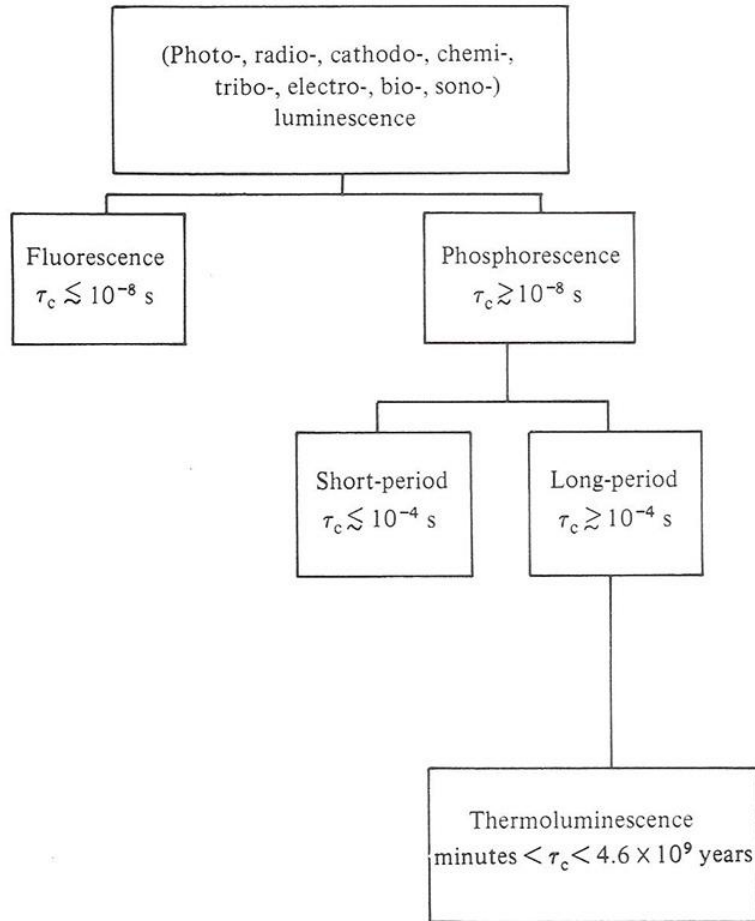
La luminescenza

La luminescenza è un fenomeno per cui un materiale emette luce quando un elettrone che si trovi in un livello di energia eccitato ritorni allo stato fondamentale.

L'elettrone può essere stato portato nello stato eccitato da una qualsiasi sorgente di eccitazione (radiativa, chimica, meccanica, etc.).

A seconda della probabilità di rilascio dell'elettrone dallo stato eccitato allo stato fondamentale, si può avere diversi fenomeni: spontanea (fluorescenza o fosforescenza) o stimolata (termicamente o otticamente).

Meccanismi di luminescenza



Rappresentazione cristallo ideale

+ - + - +
- + - + -
+ - + - +
- + - + -
+ - + - +
- + - + -

Cristallo ideale

Un cristallo ideale è rappresentato come una ripetizione periodica e infinita di una cella unitaria in assenza di vibrazioni termiche. Elettroni e lacune sono delocalizzati

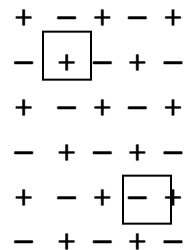
Rappresentazione cristallo reale

In un cristallo reale la periodicità è interrotta o disturbata dalle vibrazioni termiche, dalle superfici e dai difetti.

Difetti intrinseci:

assenza di uno ione positivo o negativo (difetto Schottky – centri F/V)

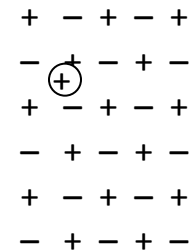
presenza di uno ione fuori posto nel reticolo (difetto Frenkel)



Difetti Schottky



Mancanza di ione alcalide



Difetto Frenkel



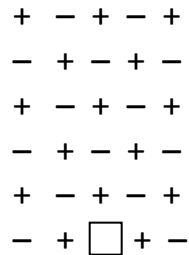
Presenza di uno ione fuori posto.

Difetti estrinseci:

un atomo (impurità) si sostituisce ad uno ione del reticolo

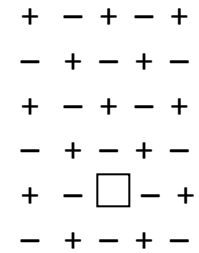
oppure si inserisce in una posizione non appartenente al reticolo

Trappole e centri di ricombinazione



Centro F

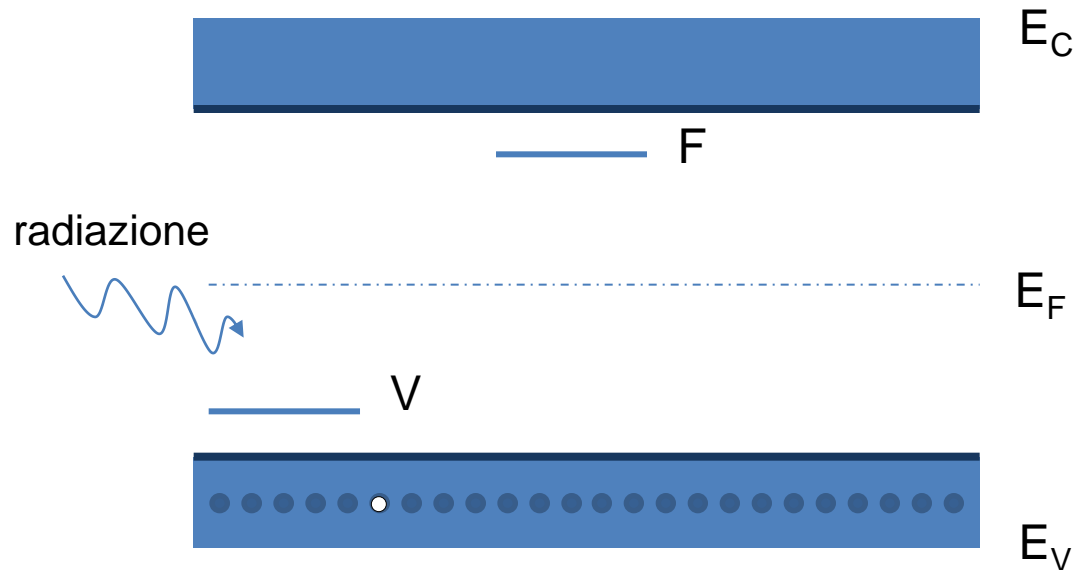
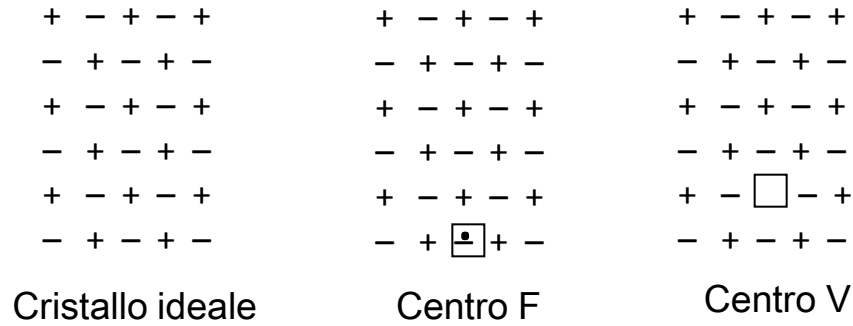
La mancanza nel reticolo di uno ione negativo determina un eccesso locale di carica positiva che può agire come trappola per gli elettroni (centro F) o centro di ricombinazione per lacune.



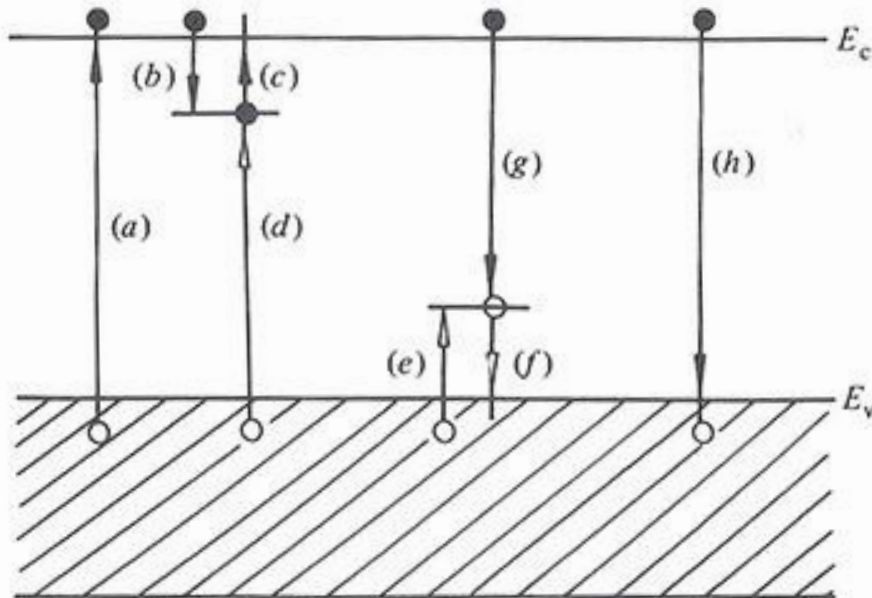
Centro V

Analogamente, la mancanza di uno ione positivo è una trappola per lacune (centro V) o centro di ricombinazione per elettroni.

Irraggiamento di un cristallo (quasi) reale



Meccanismi di ricombinazione



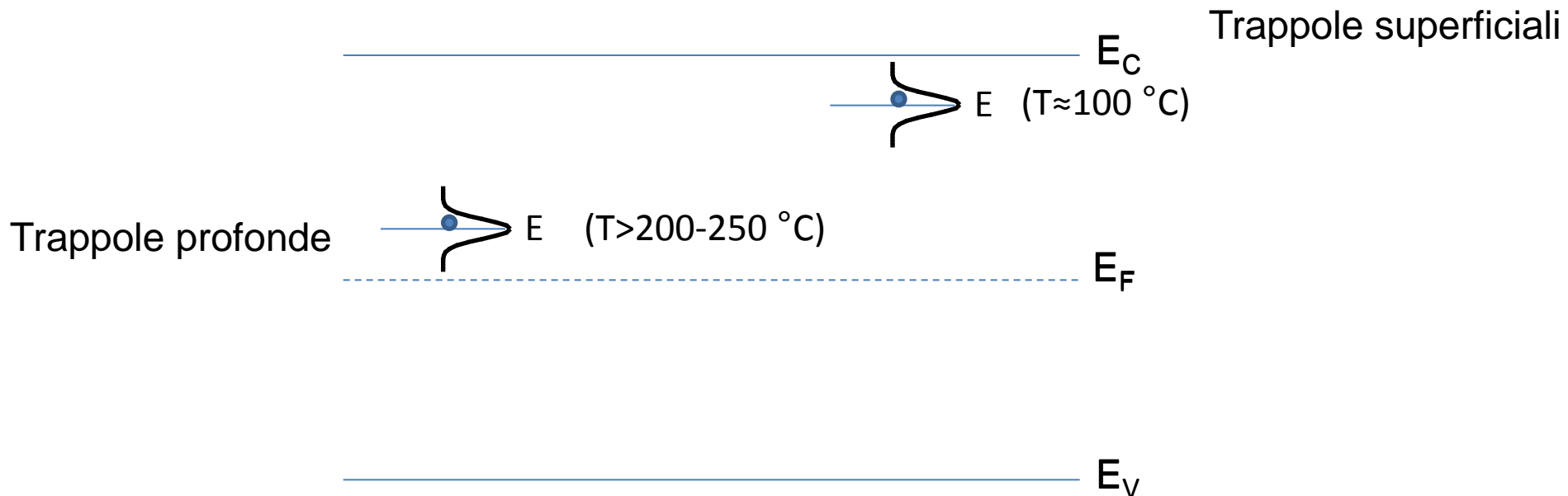
Un centro localizzato può agire da trappola o da centro di ricombinazione.
Se $A(c) > A(d) \Rightarrow$ (c) è una trappola, altrimenti è un centro di ricombinazione

Probabilità di svuotamento delle trappole

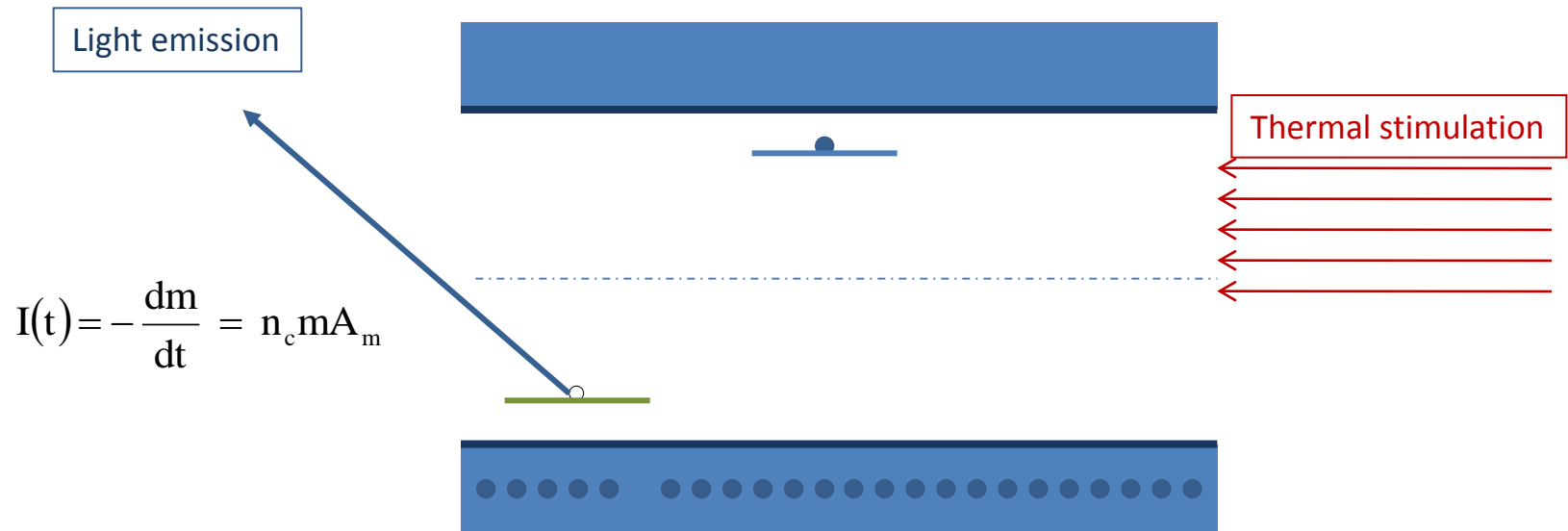
Probabilità per unità di tempo di rilascio di un elettrone dalla trappola :

s = costante dipendente dal tipo di trappola (frequency factor or attempt-to-escape factor)

$$p = s \exp(-E/kT)$$



Il fenomeno della termoluminescenza



— Trap of electrons

— Recombination center for electrons or trap for holes

Stimolazione termica

La stimolazione termica avviene attraverso un aumento costante di temperatura:

$$T = T_0 + \beta t$$

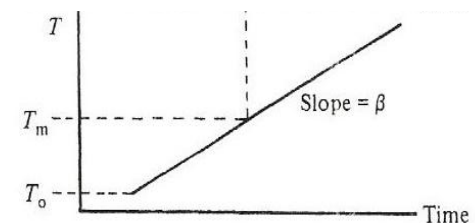
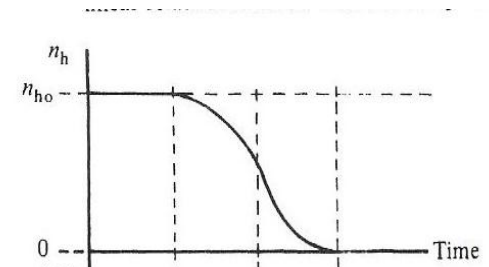
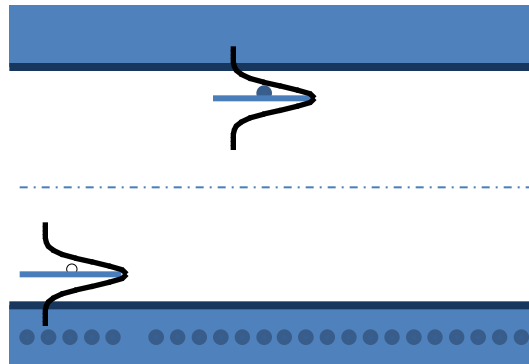
T_0 = temperatura a cui si trova inizialmente il TLD

β = rateo di crescita della temperatura di stimolazione

t = tempo di riscaldamento

Esempio di modello semplice a trappola singola.

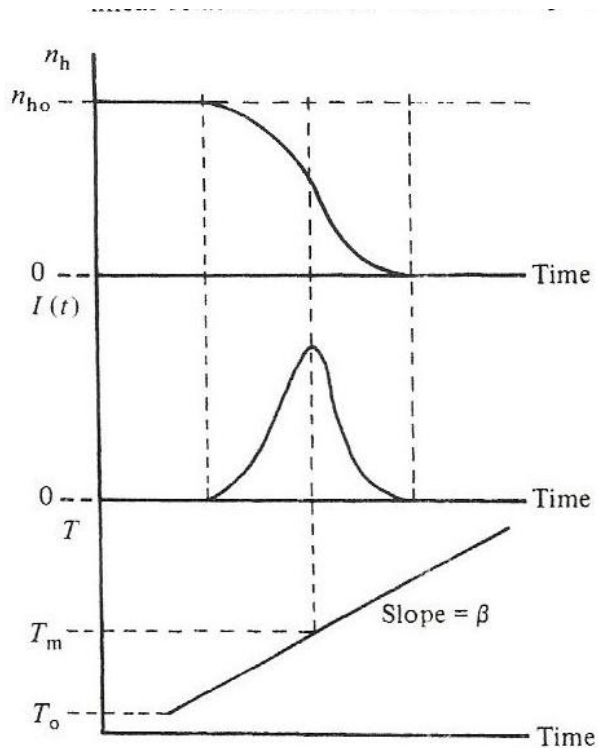
Al crescere della temperatura la trappola si svuota



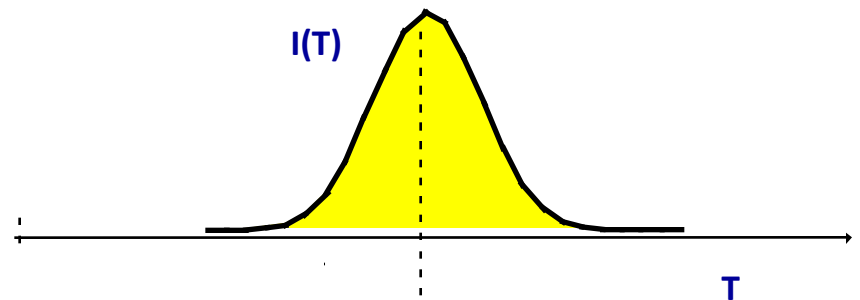
Segnale TL

L'intensità della luce emessa è proporzionale alla quantità di elettroni che sfuggono dalla(e) trappola(e) per unità di tempo.

$$I(t) = - \frac{dm}{dt}$$



Se il riscaldamento avviene a rateo costante questa curva ha la stessa forma anche in funzione della temperatura. La $I(T)$ è chiamata “glow curve”.



Equazione della glow curve

$$I(t) = - \frac{dm}{dt} = n_c m A_m$$

The rate of recombination will be proportional to the concentration of free electrons in the conduction band n_c and the concentration of holes m , through the constant A_m , the recombination probability expressed in units of volume per unit time which is assumed to be independent of the temperature.

Equazione della glow curve (cont'd)

$$-\frac{dn}{dt} = np - n_c(N - n)A_n$$

$$\left| \frac{dn_c}{dt} \right| \ll \left| \frac{dn}{dt} \right|; \quad \left| \frac{dn_c}{dt} \right| \ll \left| \frac{dm}{dt} \right|.$$

$$I(t) = -\frac{dn}{dt} = -\frac{d}{dt} (s \exp(-E/kT))$$

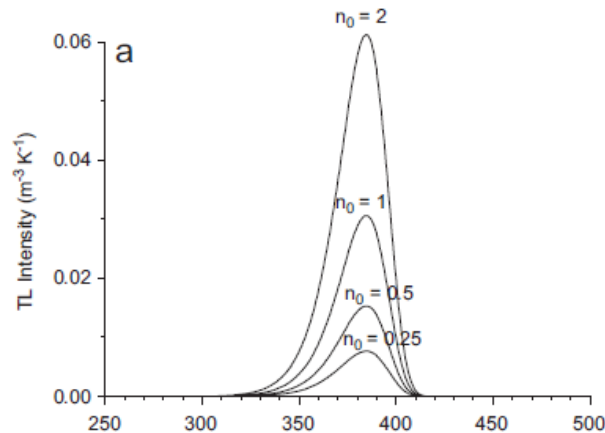
In termoluminescenza, $T=T(t)$ quindi la derivata diventa:

$$I(t) = -\frac{dn}{dt} = n_0 s \exp \left\{ -\frac{E}{kT(t)} \right\} \\ \times \exp \left\{ -s \int_0^t \exp \left\{ -\frac{E}{kT(t')} \right\} dt' \right\}$$

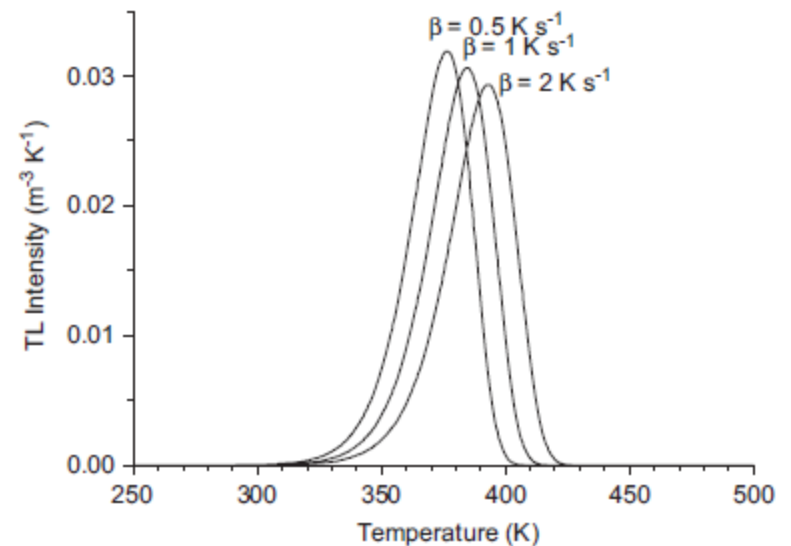
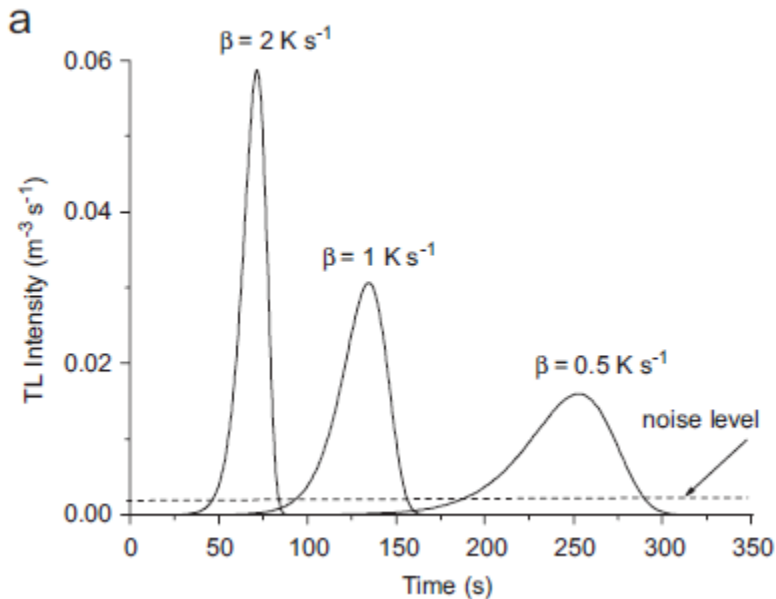
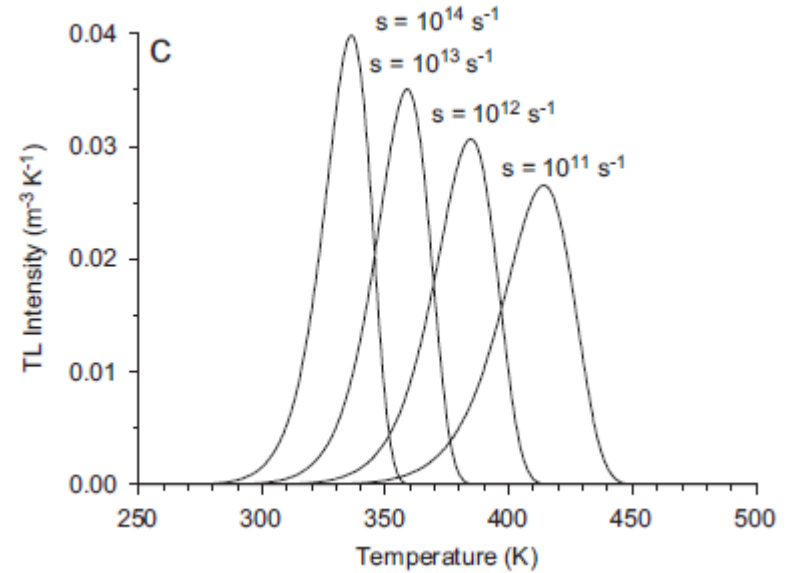
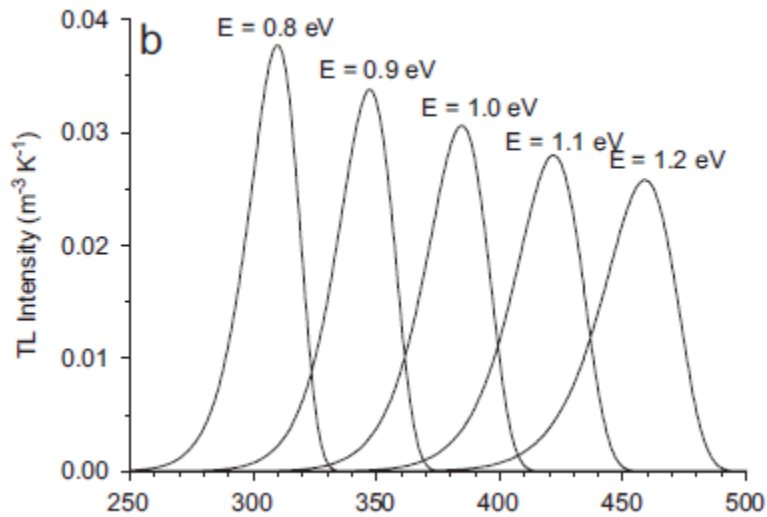
Equazione della glow curve (cont'd)

Poiché $T = T_0 + \beta t$:

$$I(T) = -\frac{1}{\beta} \frac{dn}{dt} = n_0 \frac{s}{\beta} \exp\left\{-\frac{E}{kT}\right\} \\ \times \exp\left\{-\frac{s}{\beta} \int_{T_0}^T \exp\left\{-\frac{E}{kT'}\right\} dT'\right\}$$

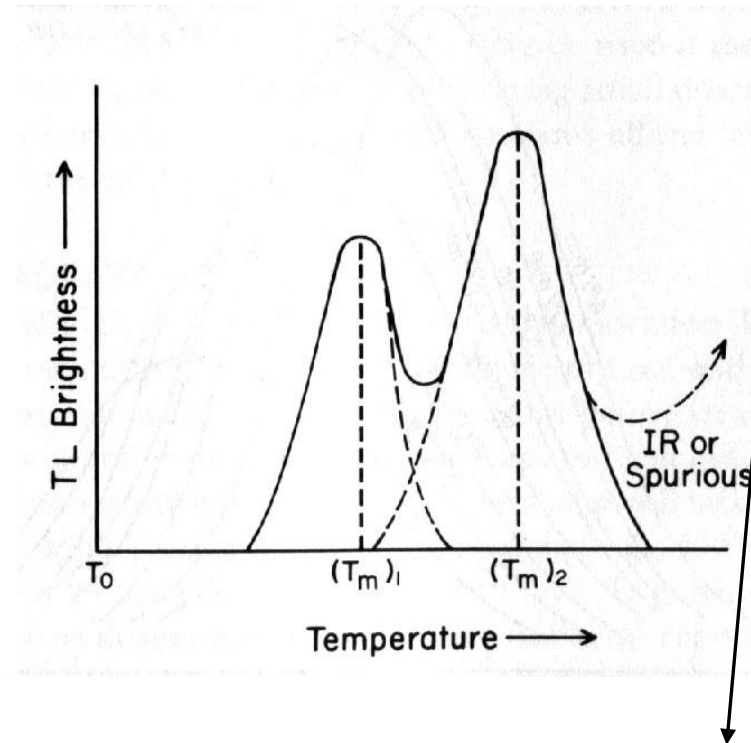
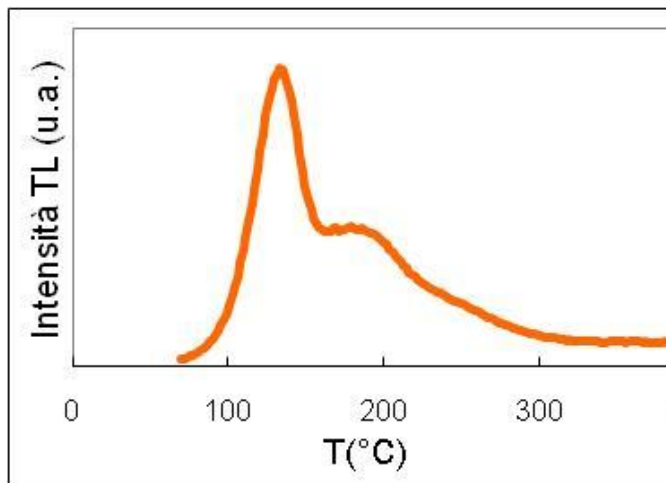


Equazione della glow curve (cont'd)



Glow curve

Nel caso di più trappole l'espressione più complessa e la glow curve è formata dalla somma di più curve.

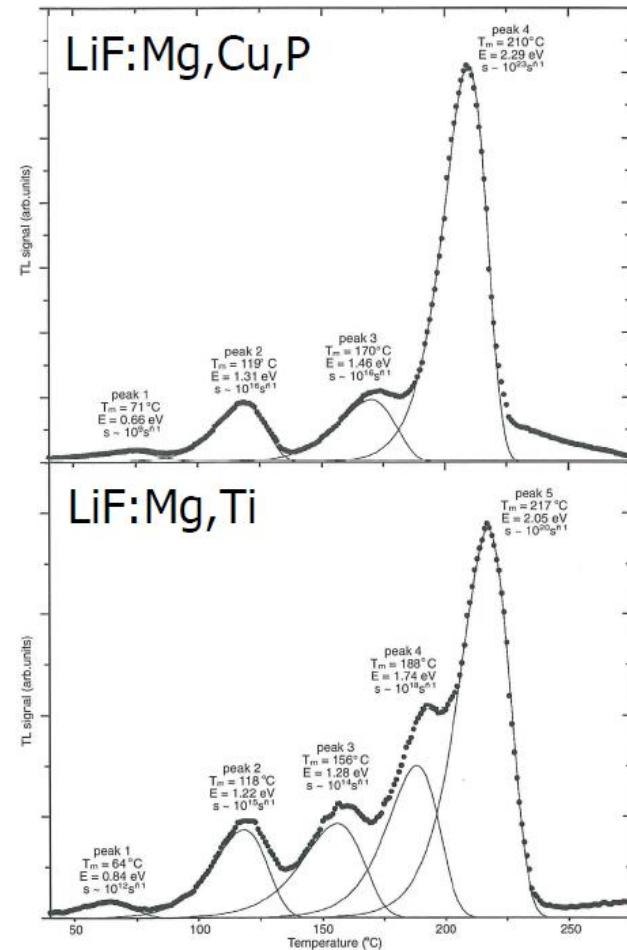


Emissione infrarosso dell'elemento riscaldante del lettore

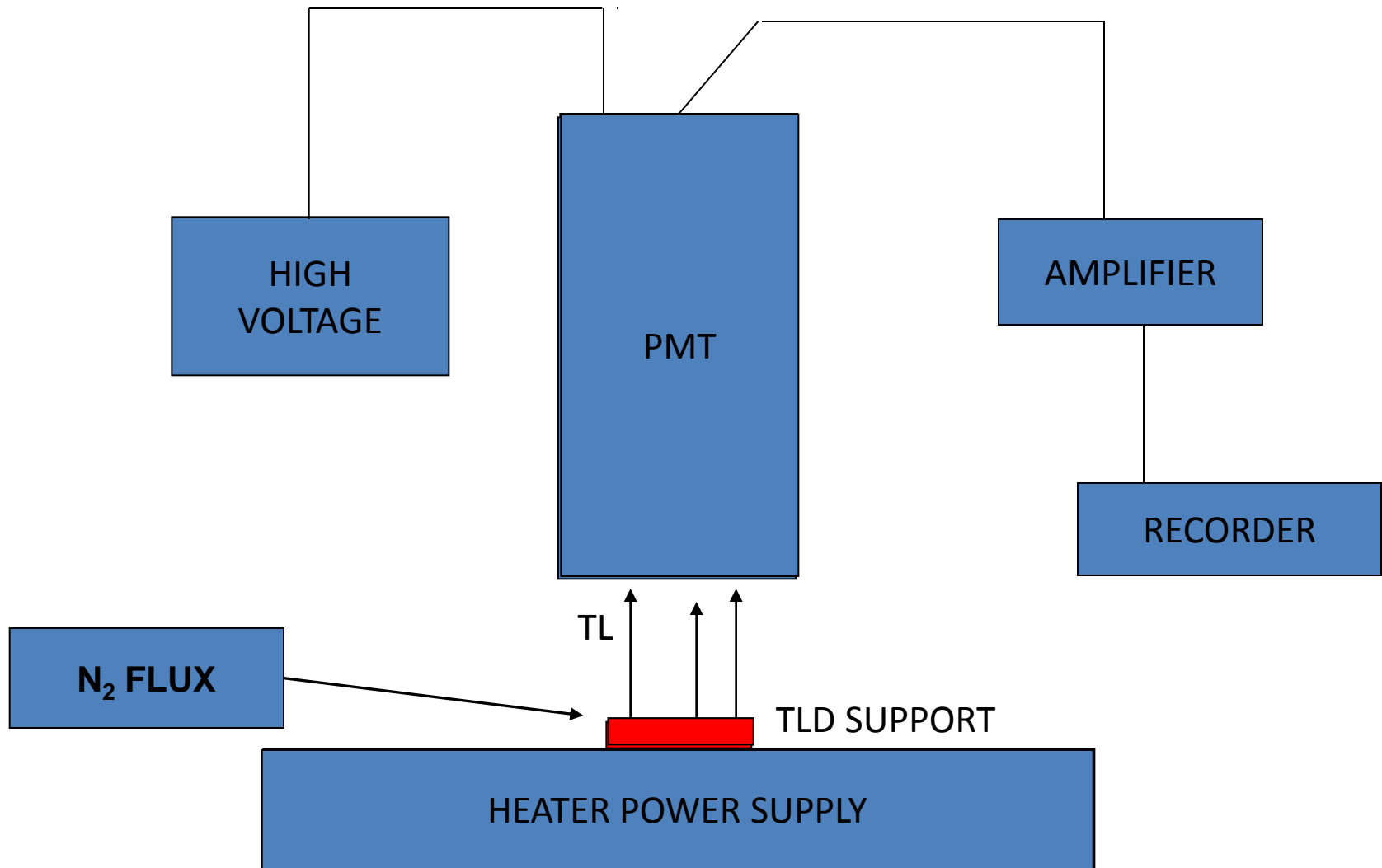
Quale parametro della glow curve si misura?

Dall'analisi della forma della glow curve è possibile calcolare l'energia di attivazione e fare ipotesi sulla natura dei centri.

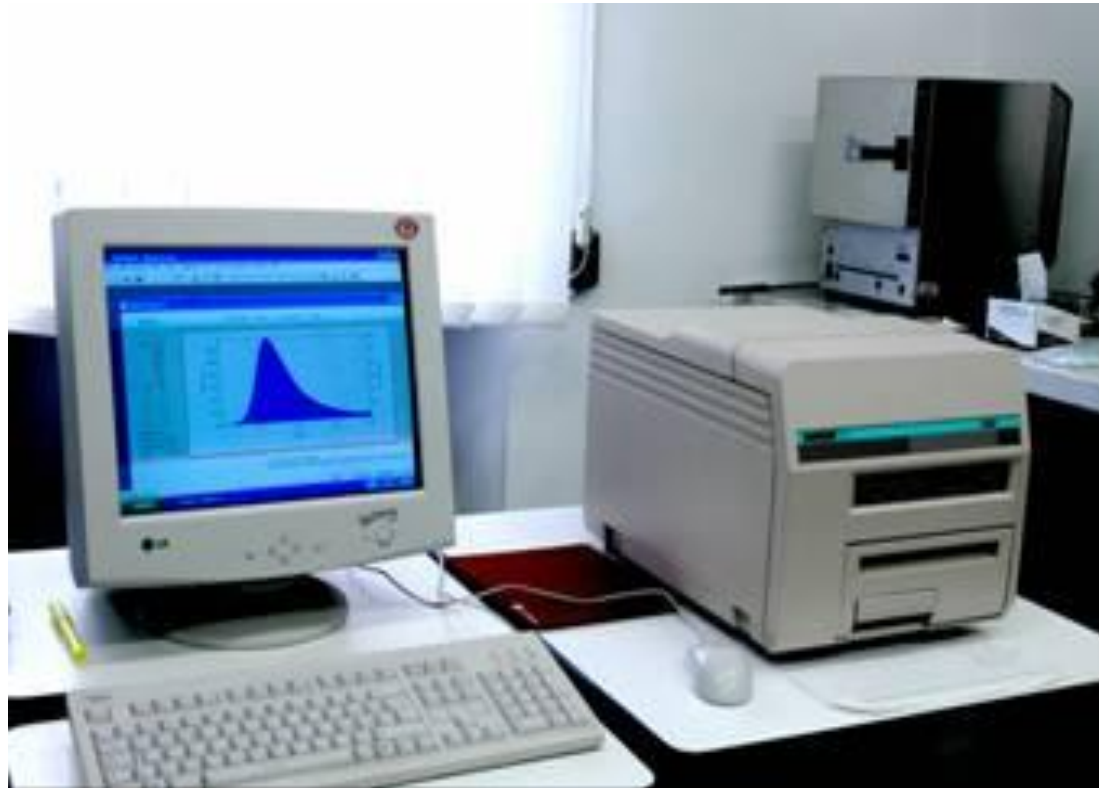
In dosimetria è sufficiente valutare i parametri direttamente correlati al numero di elettroni che sfuggono dalle trappole: ampiezza massima della glow curve, integrale della glow curve di tutta la glow curve o su un intervallo di temperatura.



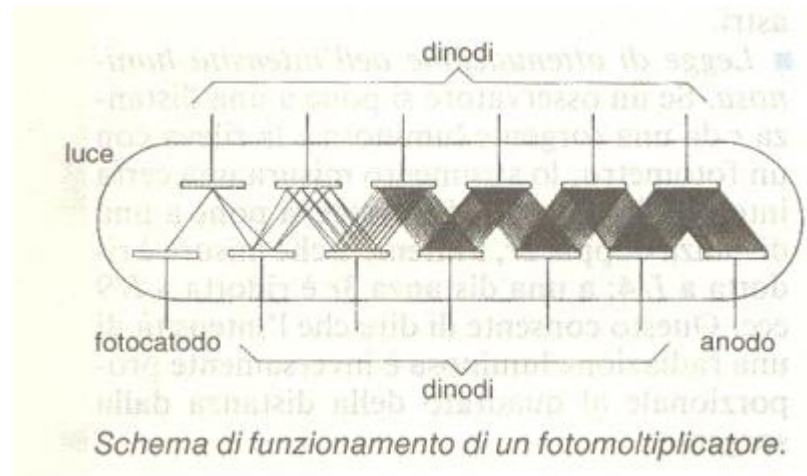
Schema generale di un lettore TL



Lettere TL



Fotomoltiplicatore



Strumento basato sull'effetto fotoelettrico, che permette di amplificare notevolmente un debole segnale luminoso, trasformandolo in una corrente elettrica.

Questo strumento è composto da un elettrodo fotosensibile (fotocatodo) che, colpito dalla luce, emette elettroni, a cui segue, in un'ampolla in cui è fatto il vuoto, una serie di elettrodi (dinodi) mantenuti a potenziali via via crescenti fino all'elettrodo finale (anodo).

Annealing

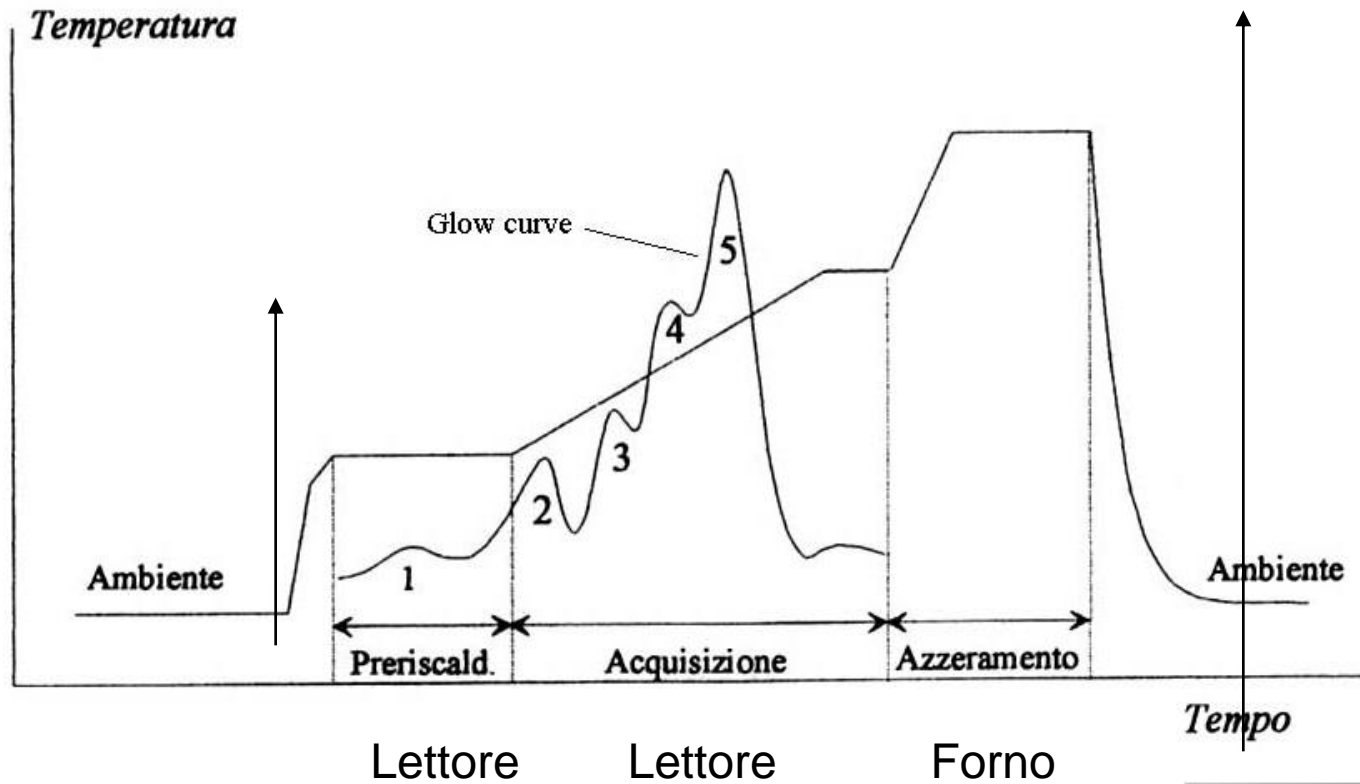
La forma e l'intensità della glow curve dipendono in maniera significativa dallo stato delle trappole al momento dell'irraggiamento e della misura.

Questo a sua volta dipende dal trattamento termico che il dosimetro ha ricevuto o riceverà prima e dopo l'irraggiamento e prima e dopo la misura.

Attraverso **opportuni cicli termici** è possibile far tornare le trappole allo stato originale oppure renderle più o meno sensibili alle radiazioni o addirittura renderle inerte.

Annealing: nel suo significato più generale è qualsiasi trattamento termico necessario per cancellare ogni memoria dell'irradiazione, ossia per riportare i difetti nello stesso identico stato a cui si trovavano prima dell'irraggiamento.

Ciclo completo di riscaldamento

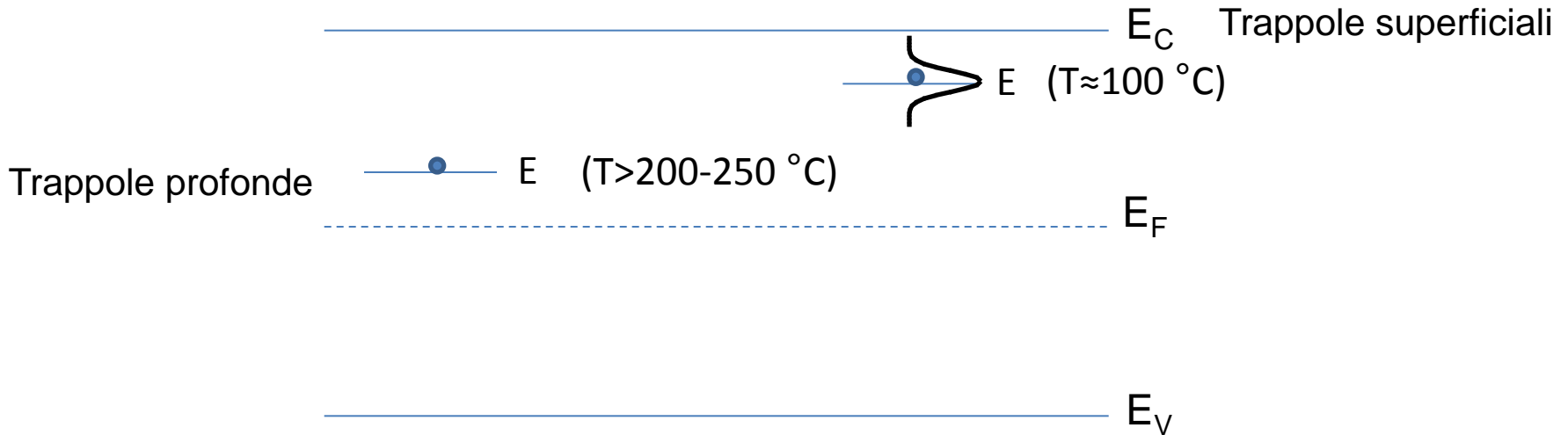


Non in scala!



Post-irradiation (pre-readout) annealing

Scopo: **svuotare le trappole a bassa temperatura**, se presenti nella glow curve.



Queste trappole sono soggette a un decadimento in tempo molto rapido così che il segnale TL del dosimetro dipende dal tempo intercorso tra l'irraggiamento e la misura. Per aumentare la stabilità in tempo della misura del dosimetro queste trappole devono essere azzerate prima della misura.

T, durata e rateo di crescita della temperatura dipendono dal tipo di dosimetro.

Per es. LiF: $T=100$ °C per 10 min

Pre-irradiation (post-readout) annealing (1)

Questo trattamento di annealing ha due scopi:

1) **Svuotare completamente le trappole** rimaste parzialmente piene dopo la lettura (*erasing treatment*)

Prima di irradiare nuovamente il dosimetro, lo si sottopone a un trattamento ad alta temperatura, senza acquisizione del segnale. La temperatura viene raggiunta attraverso una rampa di crescita relativamente lenta. Per questo trattamento si usa un forno esterno (non l'heater del lettore TL).

Per es. LiF: T tra i 300 e i 400 °C per 1 h

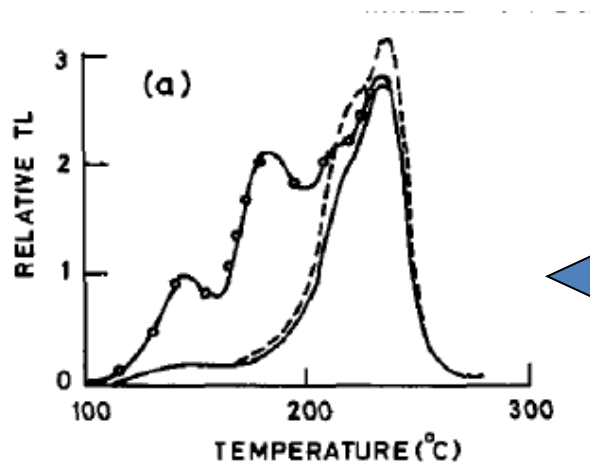
T, durata e rateo di crescita della temperatura dipendono dal tipo di dosimetro.

Pre-irradiation (post-readout) annealing (2)

2) **Stabilizzare le trappole a bassa temperatura** per aumentare le trappole più profonde e per ridurre il fading termico.

La T di annealing in questo caso è intorno a 70-100 °C (dipendentemente dal tipo di TLD) seguito da un raffreddamento del campione piuttosto lento. T, durata e rateo di crescita della temperatura dipendono dal tipo di dosimetro.

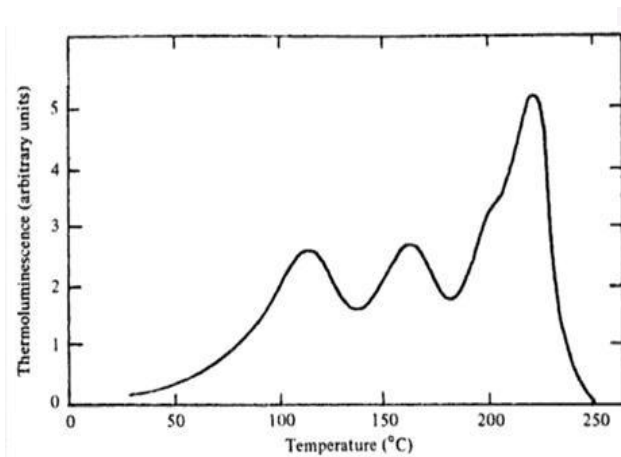
Per es. LiF: T 80°C per 24 h (o 100°C per 2 h).



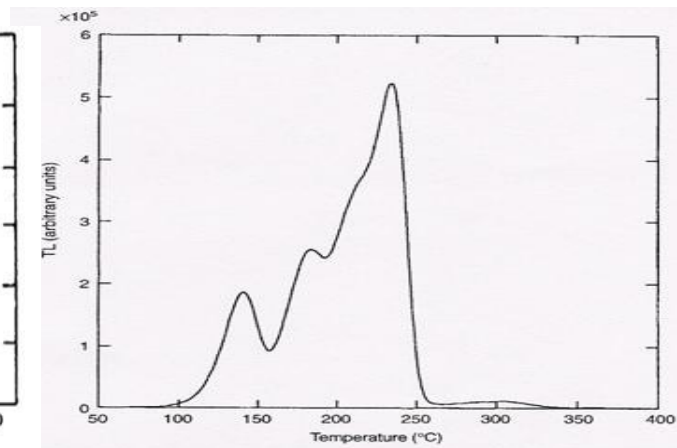
Effetto del pre-irradiation annealing a bassa temperatura sul segnale TL del LiF (punti: senza annealing; linea tratteggiata: con annealing)

Effetto del rateo di riscaldamento

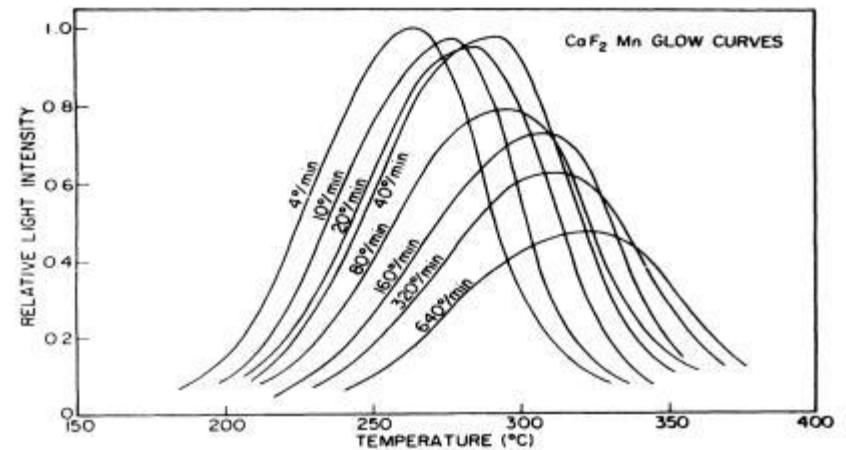
Il rateo di riscaldamento ha un'influenza sulla forma di riga della glow curve.



LiF:Mg, Ti – 3°C/s



LiF:Mg, Ti – 10°C/s



Bibliografia

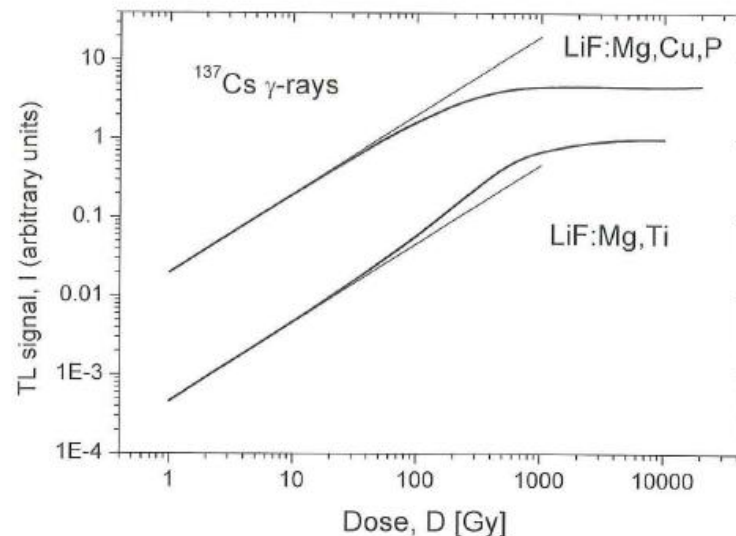
- Thermoluminescence of Solids. [S. W. S. McKeever](#)
- Handbook of Thermoluminescence. Claudio Furetta
- Questions And Answers On Thermoluminescence (TL) And Optically Stimulated . C. Furetta
- Theory of Thermoluminescence and Related Phenomena. Reuven Chen, S. W. S. McKeever
- A.J.J. Bos. Theory of thermoluminescence. Radiation Measurements 41 (2007) S45–S56
- Pawel Olko. Advantages and disadvantages of luminescence dosimetry. Radiation Measurements 45 (2010) 506–511

Dosimetria a termoluminescenza: proprietà dosimetriche

Risposta in dose

La curva di risposta in dose non è lineare per tutti i TLD. Può essere sotto o sopra lineare.

I fosfori tipicamente utilizzati in terapia hanno la risposta in dose lineare nella zona di interesse. In linea di principio potrebbero utilizzarsi anche curve non lineari applicando un'opportuna correzione.



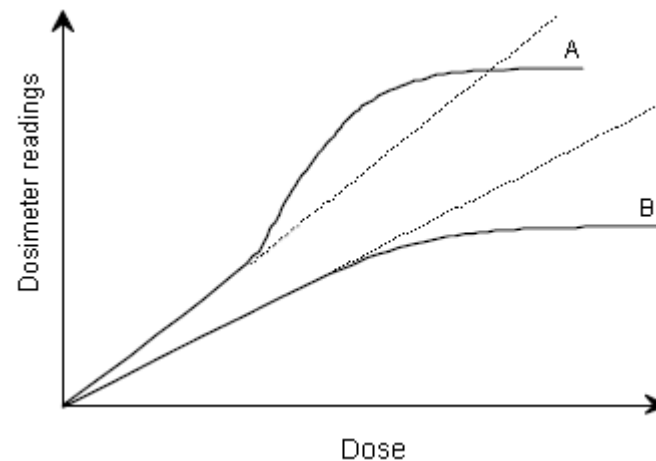
Spiegazione della sottolinearità: centri in competizione

Correzione per la sopralinearità

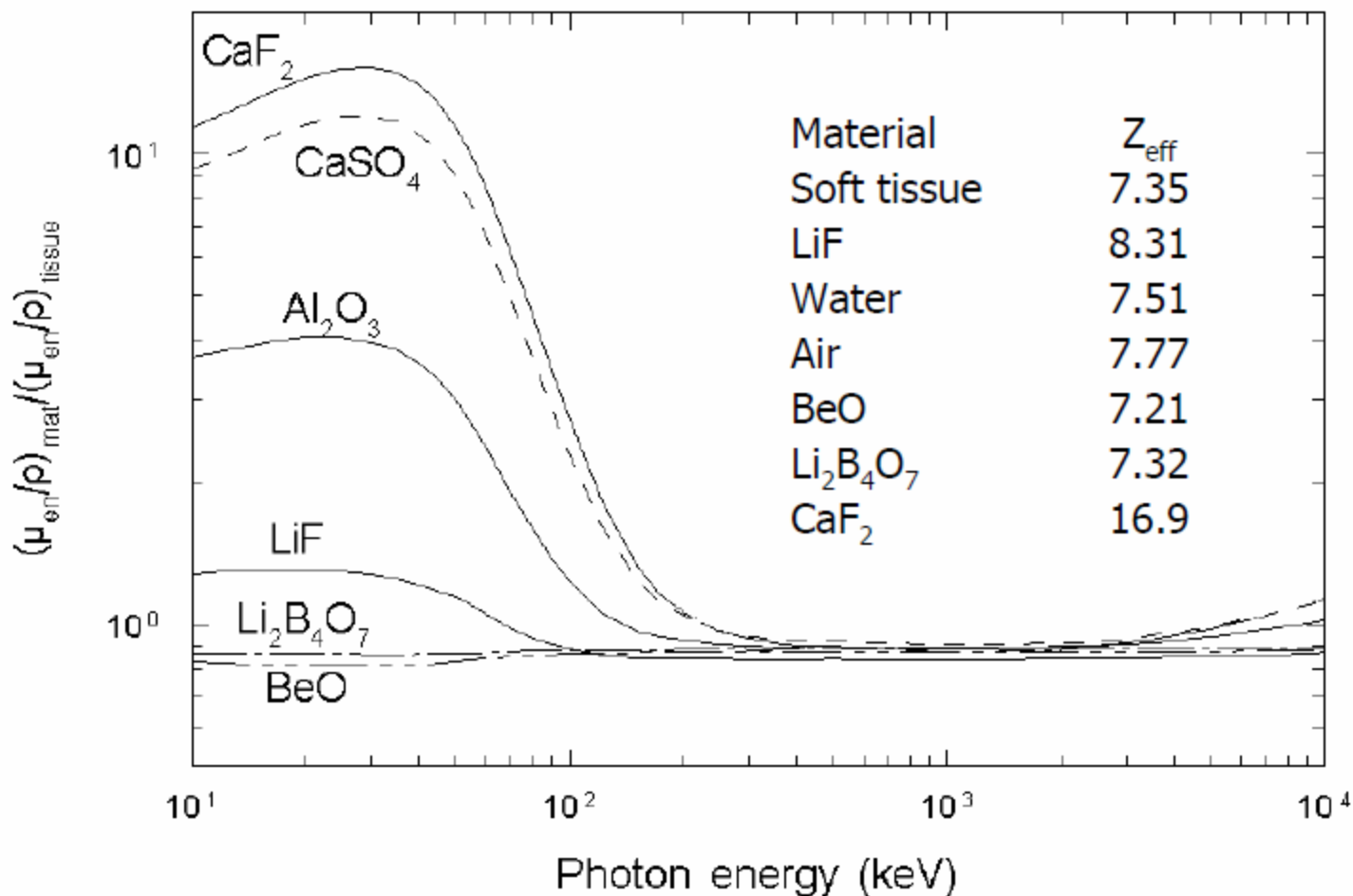
The supralinearity index $f(D)$ is defined as:

$$f(D) = \left[\frac{M(D) - b}{D} \right] / \left[\frac{M(D_1) - b}{D_1} \right]$$

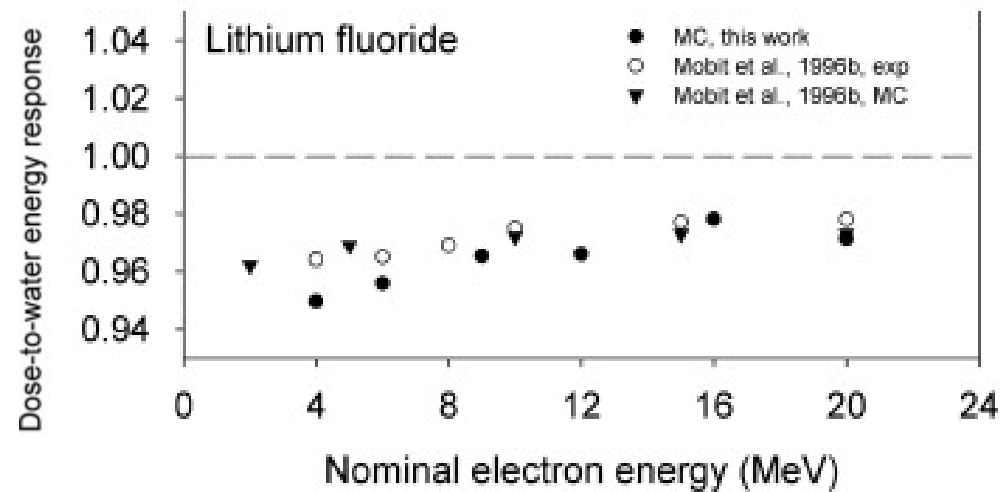
where D_1 is a dose chosen as the normalization dose in the linear range of the M vs D response. b is the intercept on the y -axis



Dipendenza dall'energia – fasci clinici raggi X



Dipendenza dall'energia – fasci clinici a elettroni



Stabilità del segnale

Un aspetto importante dei dosimetri passivi è la stabilità del segnale dopo irraggiamento se il dosimetro non viene misurato immediatamente.

Nel caso della termoluminescenza esistono tre vie per cui le trappole possono svuotarsi (e quindi il dosimetro perdere segnale):

- Fading termico
- Fading ottico
- Fading anomalo

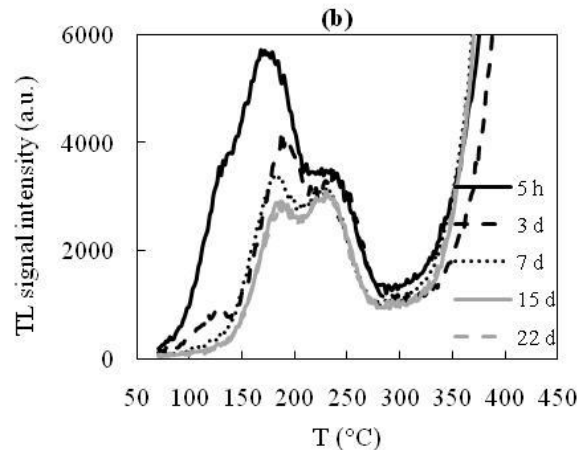
Fading termico

E' il meccanismo di ricombinazione più importante.

Se il dosimetro è conservato a temperatura costante ogni trappola si svuoterà secondo una legge esponenziale

$$p = s \exp(-E/kT)$$

Le trappole più superficiali avranno una probabilità più alta di svuotarsi.



In realtà la curva di decadimento $I(t)$ sarà un singolo esponenziale solo nel caso di trappole indipendenti e nel caso in cui la probabilità che l'elettrone ritorni nella trappola sia molto bassa (cinetica di primo ordine). La cinetica di secondo ordine si ha quando gli elettroni possono essere intrappolati nuovamente, senza ricombinarsi.

Altre modalità di fading

Anomalo: indipendente dalla temperatura di conservazione del dosimetro. Le trappole si svuotano attraverso effetto tunnel. E' un effetto molto lento, non rilevante nella dosimetria clinica.

Ottico: le trappole possono essere svuotate anche dall'esposizione alla luce. Questo tipo di fading dipende dalla frequenza, intensità e durata dell'esposizione. Il dosimetro deve essere sempre conservato al buio.

Sensibilizzazione del dosimetro

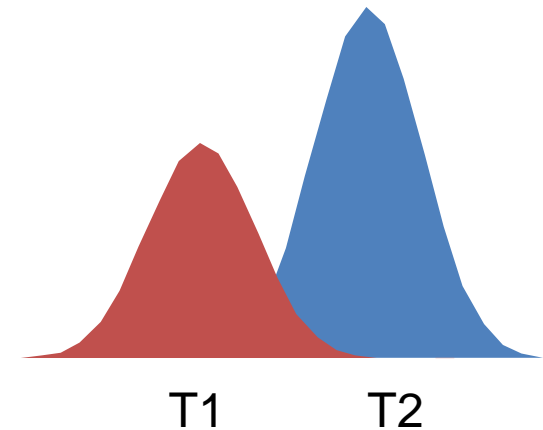
E' possibile aumentare la sensitività di uno specifico picco della glow curve irradiando e scaldando prima dell'uso.

Lo scopo è di fare in modo che durante l'irraggiamento le trappole responsabili degli altri picchi siano già completamente occupate.

Per esempio, nel caso di due picchi a T1 e T2:

- 1) si irradia il dosimetro a alte dosi in modo da riempire completamente tutte le trappole
- 2) si porta il dosimetro a temperatura T1 così che tutte le trappole più profonde di T1 rimarranno piene, mentre quelle a temperatura più bassa si svuoteranno.

In questo modo le trappole a $T > T1$ non potranno fungere da competitori per le trappole $< T1$.

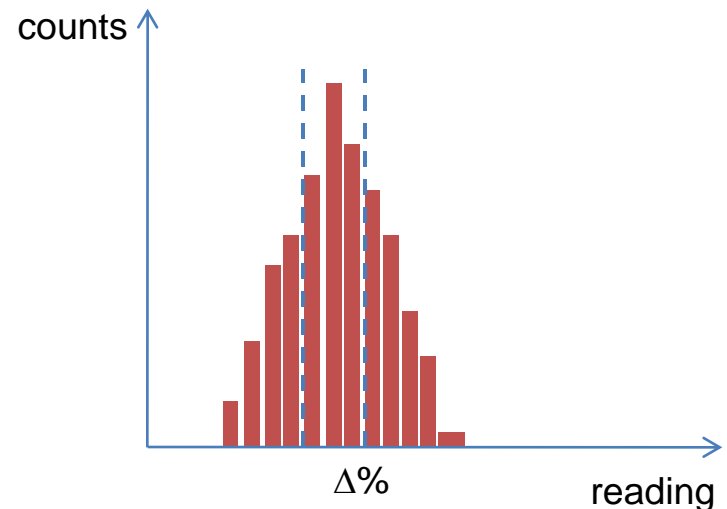


Batch di dosimetri

Un batch di dosimetri è un numero di TLD di identica composizione, ottenuti dallo stesso produttore e con la stessa storia di irraggiamento e riscaldamento.

I dosimetri appartenenti allo stesso batch devono essere analizzati prima del primo utilizzo per valutare la variabilità della sensibilità dei singoli dosimetri.

L'omogenietà tipica dei batch di TLD spesso non è sufficiente per le applicazioni cliniche, motivo per cui i singoli dosimetri sono tarati individualmente.



Calibrazione individuale

La dose D_i dell' i -esimo dosimetro sarà calcolata come:

$$D_i = Y_{i\text{-corr}} \times K_i$$

dove $Y_{i\text{-corr}}$ è la lettura TL del singolo dosimetro a cui sono state applicati coefficienti di correzione e K_i è il fattore di calibrazione individuale del dosimetro

$$Y_{\text{corr}} = Y_i \times FE \times FI \times FSL \times FF \times FT$$

- FE corregge la dipendenza della risposta del TLD dall'energia del fascio;
- FI corregge la dipendenza della risposta del TLD dalla direzione di incidenza della radiazione;
- FSL corregge la perdita di sensibilità del TLD in funzione del tempo fra azzeramento ed irraggiamento (*Sensitivity Loss*);
- FF corregge la variazione della risposta del TLD in funzione del tempo fra irraggiamento e lettura (*Fading*);
- FT corregge la dipendenza della risposta del TLD dalla temperatura durante lo *storage* e l'irraggiamento

Sorgenti di incertezza nella misura TL

Uncertainty of the corrected reading is determined by the law of propagation of the uncertainty and is called the combined uncertainty:

$$Y_{corr}(x_i, F_i, C_k) = f(x_i) \times \prod_i^N F_i + \sum_k^M C_k,$$

$$u(Y_{corr})^2 = \left[\frac{\partial f}{\partial a} \right]^2 u(a)^2 + \dots + \left[\frac{\partial f}{\partial n} \right]^2 u(n)^2 + \left[\frac{\partial f}{\partial F_1} \right]^2 u(F_1)^2 + \dots \\ + \left[\frac{\partial f}{\partial F_N} \right]^2 u(F_N)^2 + \left[\frac{\partial f}{\partial C_1} \right]^2 u(C_1)^2 + \dots + \left[\frac{\partial f}{\partial C_M} \right]^2 u(C_M)^2$$

Riproducibilità tipica del dosimetro:

1-2 % (se si usa il fattore di taratura individuale)

Reusability

Uno dei vantaggi dei TLD è che la lettura è distruttiva per cui possono essere riutilizzati.

Tuttavia, i cicli ripetuti di irraggiamento e di temperatura possono modificare la struttura delle trappole e quindi la sensibilità del dosimetro.

Per questo motivo, quando si acquista un nuovo batch o un nuovo tipo di dosimetro è necessario valutare su un campione di dosimetri preventivamente quanto diversi cicli influiranno sull'intensità di luminescenza.

Dimensioni del dosimetro

Gran parte dei dosimetri TL hanno forma quadrata, che rappresenta uno svantaggio per la risposta angolare del dosimetro.

Ora vengono prodotti anche dosimetri a simmetria cilindrica.

Spessore: < 1 mm

Zero-dose reading

La lettura di zero-dose è data dal fondo dello strumento e dalla lettura del dosimetro non irradiato.

In TL il fondo dello strumento è dato da: corrente di fondo del tubo PM e dall'emissione IR dell'elemento riscaldante.

Il segnale dei dosimetri non irradiati è dato da segnali indotti da danni meccanici, stimolazione ottica, trappole non completamente svuotate dopo precedenti misure, radiazione di fondo.

Principali TL

LiF family

CaSO₄:RE (RE= Dy, Tm, Sm)

CaF₂:Mn

Li₂B₄O₇:Mn

MgB₄O₇:Dy,Na

Al₂O₃:C

BeO

Al₂O₃:C

BeO

SrS:Ce,Sm

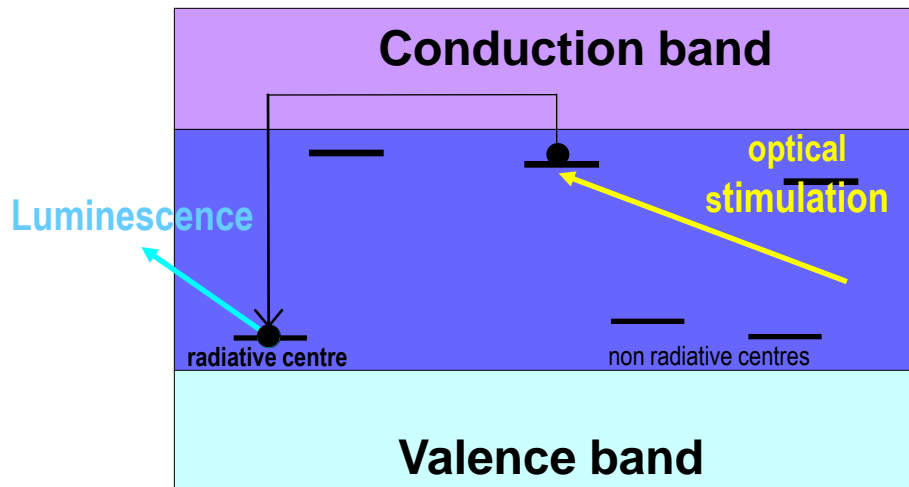
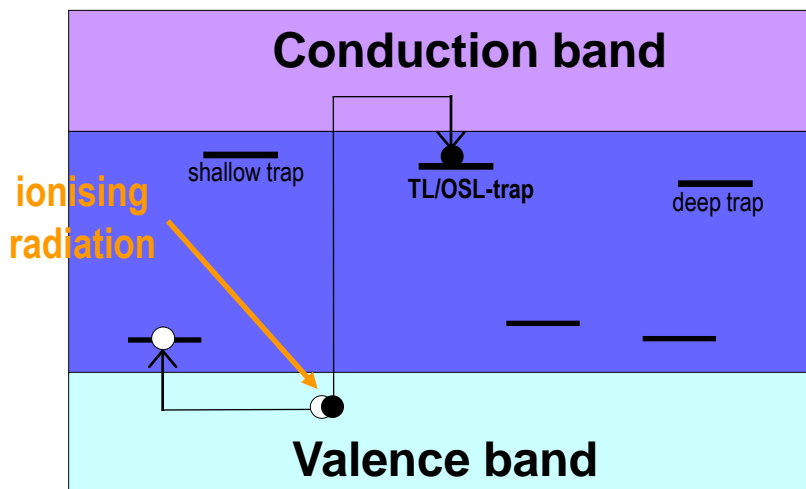
Riassunto proprietà di un TLD

- Intervallo di sensibilità: microGy a 10 Gy
- Lettura veloce (< 1 min) e automatica
- Lettura distruttiva. Si perde l'informazione, ma è possibile il riutilizzo del dosimetro.
- Forma e dimensioni: Chips, rods, powder, 1-2 mm
- Reproducibility of 1-2 %
- Accuratezza: 1-2 % con taratura individuale
- Variabilità della sensibilità: alta (intra batch e inter batch)
- Fading 5-10% anno
- Dipendenza dal LET ca. 2%
- Dipendenza dal rateo di dose debole

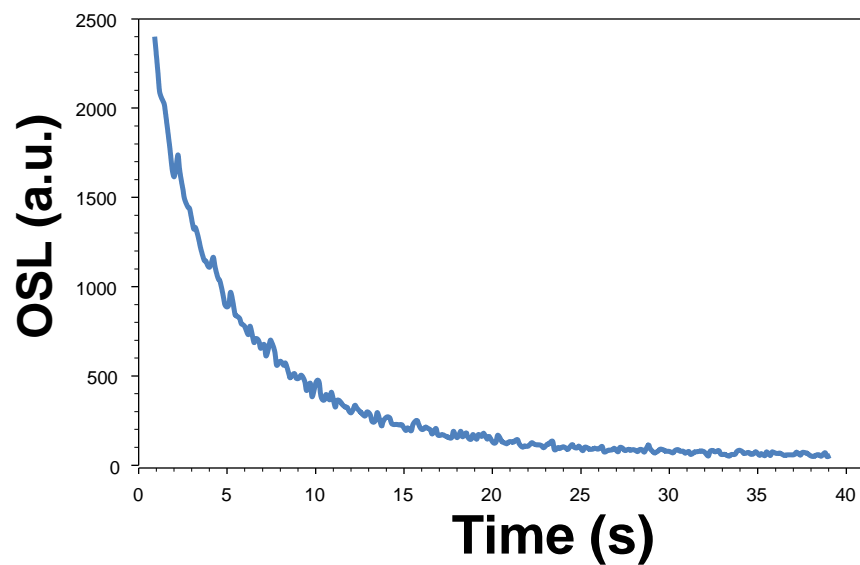
- Economici . Disponibili commercialmente
- Sensibile alla luce e alla temperatura
- Resistenti all'azione meccanica, ma se danneggiati generano segnali TL spuri
- Sensibili allo sporco e alle contaminazioni

Dosimetria a luminescenza otticamente stimolata

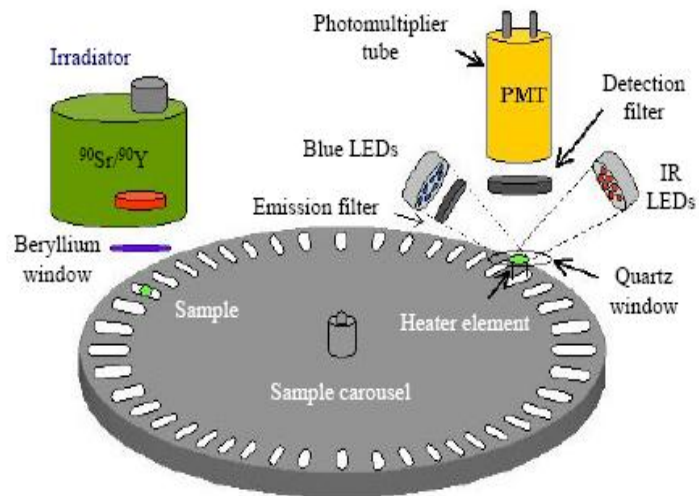
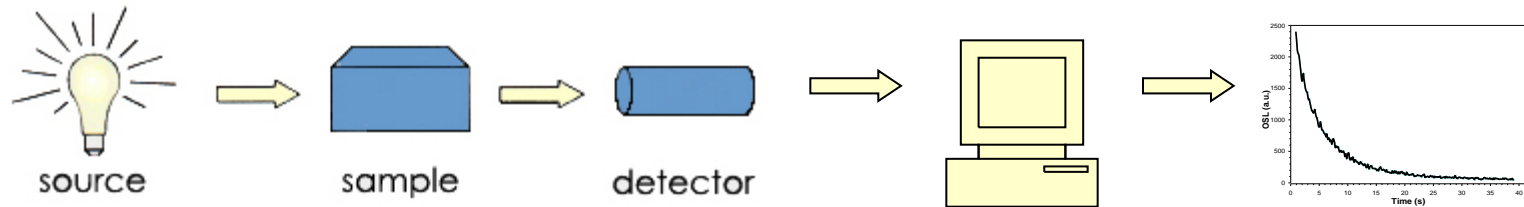
Basic principle of OSL



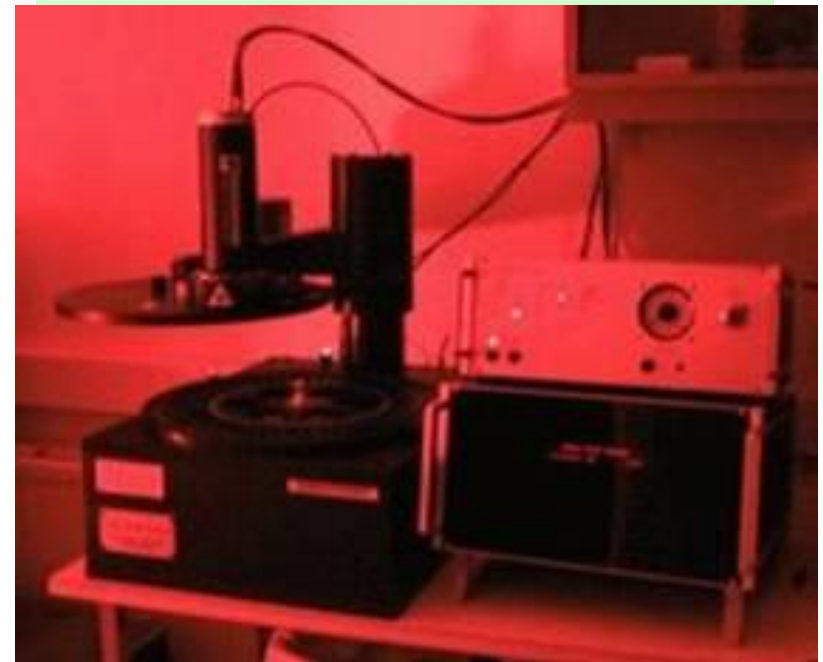
La luminescenza è misurata durante una stimolazione ottica a intensità costante. Il segnale OSL decresce nel tempo fino ad annullarsi (trappola vuota). Anche in questo caso si possono avere cinetiche di ordini diversi. L'area sotto la curva è proporzionale alla dose assorbita.



Strumentazione OSL



Schematic drawing of the Risø TL/OSL luminescence reader



Real-time OSL acquisition

