

GESTLABS

Laboratorio Materiali e Servizi per l'Industria



Introduzione alla norma

CEI EN 60825-1

Novembre 2023

Enrico Galbiati

Lunghezza d'onda

L'intervallo di lunghezza d'onda da considerare ai fini della sicurezza laser è compreso tra **180 nm e 1 mm**.

Questo intervallo non comprende tutte le radiazioni ottiche, le cui lunghezze d'onda vanno da 100 nm a 1 mm. La ragione di limitarsi a 180 nm è dovuta al fatto che le applicazioni laser per lunghezze d'onda inferiori a 180 nm sono molto rare.

Lunghezza d'onda

Nelle norme sulla sicurezza laser il limite superiore dell'intervallo della radiazione visibile è posto a **700 nm** invece che a 760 nm.

Il motivo è che, per la radiazione con lunghezza d'onda compresa tra 700 e 760 nm, la sensibilità visiva dell'occhio è molto bassa, impedendo l'attuarsi di reazioni di difesa (per esempio la chiusura delle palpebre), allo stesso modo della radiazione invisibile.

Grandezze radiometriche

Per misurare l'emissione della radiazione da un laser e/o valutare l'esposizione di una parte del corpo alla radiazione stessa si usano le seguenti grandezze radiometriche:

P = potenza radiante (W)

Q = energia radiante (J)

E = irradianza (W/m^2)

H = esposizione energetica (J/m^2)

Queste unità sono quelle usate dalla normativa.

Diametro del fascio

Nell'ambito della sicurezza laser, il diametro del fascio è definito come il diametro del più piccolo cerchio che contiene il **63%** della potenza (o dell'energia) totale del fascio stesso ed è spesso indicato con **d_{63}** .

Nel caso di fasci con profilo **gaussiano**, il diametro d_{63} corrisponde ai punti in cui l'irradianza (o l'esposizione radiante) scende a **$1/e$** del suo valore centrale di picco.

Divergenza del fascio

La divergenza è definita come l'angolo piano in **campo lontano (*far field*)** del cono determinato dal diametro del fascio. Nell'ambito della sicurezza laser, come diametro del fascio si prende il valore di d_{63} .

La divergenza si misura in radianti (rad) e si può indicare con ϕ_{63} .

Tuttavia, sia il diametro che la divergenza, quando sono riferiti al 63% della potenza o dell'energia contenuta, si indicano semplicemente con d e ϕ .

Divergenza del fascio

Se si conoscono i diametri d_{63} e d'_{63} in due punti separati da una distanza L , la divergenza ϕ può essere calcolata con la seguente formula:

$$\phi = 2 \left[\arctan \left(\frac{d_{63} - d'_{63}}{2L} \right) \right]$$

Per valori piccoli di ϕ , cioè se $(d_{63} - d'_{63})/L \ll 1$, si può usare una formula più semplice:

$$\phi \approx (d_{63} - d'_{63})/L$$

Divergenza del fascio

Nel caso di fasci con profilo gaussiano, i valori del diametro del fascio o della divergenza, calcolati considerando una diversa percentuale della potenza o dell'energia contenuta, per esempio 86% o 95%, corrispondenti ai punti in cui l'irradiazione (o l'esposizione energetica) scende, rispettivamente, a $1/e^2$ o $1/e^3$ del suo valore centrale di picco, si possono correlare a d_{63} e ϕ_{63} con le seguenti relazioni:

$$r_{86\%} = \sqrt{2} \, r_{63\%} \qquad d_{86\%} = \sqrt{2} \, d_{63\%}$$

$$r_{95\%} = \sqrt{3} \, r_{63\%} \qquad d_{95\%} = \sqrt{3} \, d_{63\%}$$

Caratteristiche dell'occhio

I metodi di misura e i requisiti della normativa sulla sicurezza laser sono legate alle caratteristiche dell'occhio.

Le caratteristiche dell'occhio che più sono legate alla sicurezza laser sono:

- **dimensione della pupilla**
- **distanza di focalizzazione**
- **dimensione della minima immagine retinica**

Dimensione della pupilla

La funzione della pupilla è quella di regolare la quantità di luce che raggiunge la retina.

Il diametro della pupilla varia con l'illuminazione dell'ambiente. Va da circa **2 mm (ambiente molto illuminato)** a circa **7 mm (ambiente scarsamente illuminato)**. Quest'ultimo valore è quello considerato dalla normativa, in quanto è quello più critico, perché permette ad una maggiore quantità di radiazione di raggiungere la retina.

Focalizzazione dell'occhio

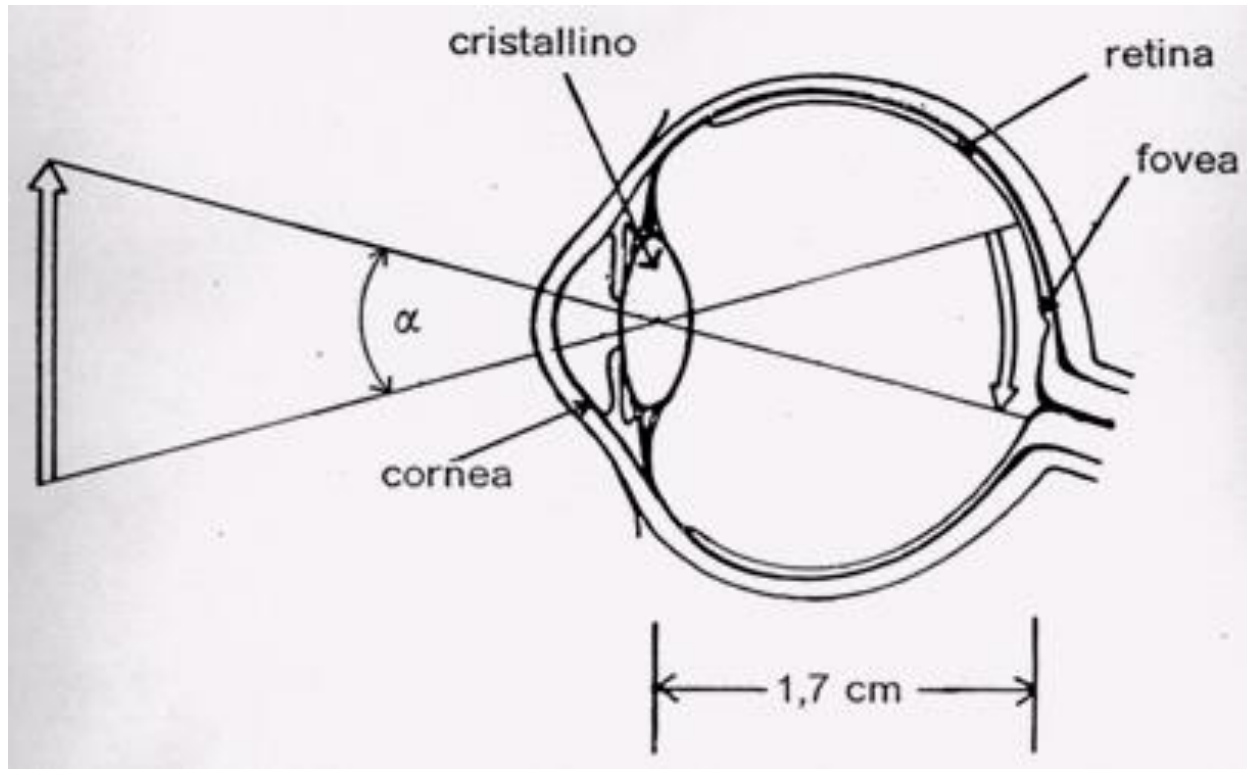


Immagine prodotta sulla retina da una sorgente il cui diametro sottende al cristallino un angolo α (questo angolo è uguale a quello sotteso al cristallino all'immagine stessa)

Distanza di focalizzazione

Con l'accomodamento l'occhio modifica la curvatura del cristallino, che ha le funzioni di una lente, modificandone la lunghezza focale.

L'accomodamento permette all'occhio di mettere a fuoco sulla retina oggetti a diversa distanza.

Un occhio normale può mettere a fuoco un oggetto da una distanza minima fino all'infinito.

Distanza di focalizzazione

La minima distanza a cui l'occhio è in grado di mettere a fuoco varia da individuo a individuo (dipende dall'età e da eventuali difetti di rifrazione, quali miopia, ipermetropia, ecc.).

La **minima distanza di focalizzazione** considerata dalla normativa è **100 mm**.

Distanza di focalizzazione

In un occhio normale, quando è rilassato, il cristallino ha una distanza focale di **17 mm** (cioè uguale alla distanza tra il cristallino e la retina).

Invece, per focalizzare un oggetto a 100 mm, la focale del cristallino deve essere uguale a **14,5 mm**.

Minima immagine retinica

Il sistema di focalizzazione dell'occhio non è perfetto e una sorgente puntiforme non viene focalizzata sulla retina in un punto, ma in una piccola superficie circolare il cui diametro è circa **25 μm** .

Considerando la distanza tra cristallino e retina uguale 17 mm, il diametro di 25 μm sottende al cristallino un angolo di **1,5 mrad**. Questo angolo è utilizzato dalle norme e chiamato α_{min} .

Minima immagine retinica

La dimensione dell'immagine retinica è un importante parametro di cui si tiene conto nella normativa. Infatti se una stessa energia viene distribuita su un'area maggiore si ha un danno minore.

Per questo motivo i limiti per la classificazione o la valutazione dell'esposizione nell'intervallo da 400 nm a 1400 nm dipendono dalla dimensione dell'immagine retinica.

Focalizzazione

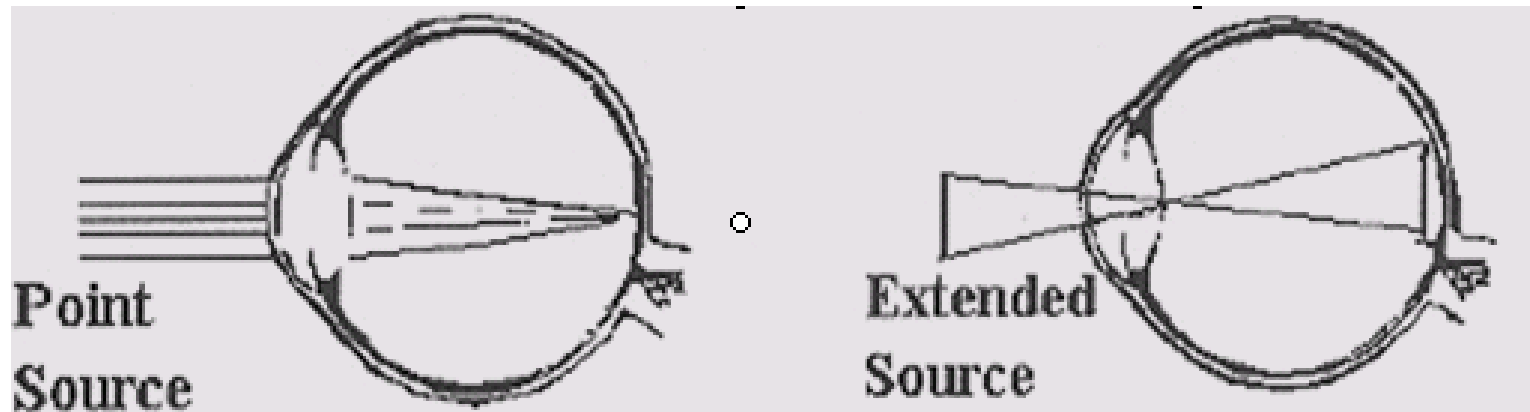
L'angolo che l'immagine retinica sottende al cristallino è spesso indicato con α .

Una sorgente si definisce “**sorgente puntiforme**” (***point source***) se produce un'immagine retinica che sottende un angolo α **uguale a** α_{\min} .

Una sorgente si definisce invece “**sorgente estesa**” (***extended source***) se produce un'immagine retinica che sottende un angolo α **maggiore di** α_{\min} .

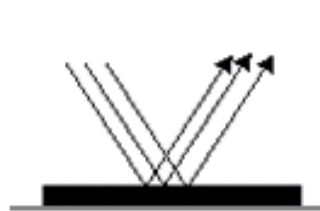
Focalizzazione

Un esempio di sorgente puntiforme è dato da un **fascio collimato**. Invece, un esempio di sorgente estesa è dato da una riflessione su una **superficie diffondente** sufficientemente grande e vicina all'occhio.

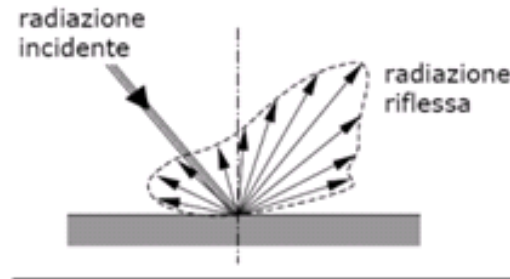


Tipi di riflessione

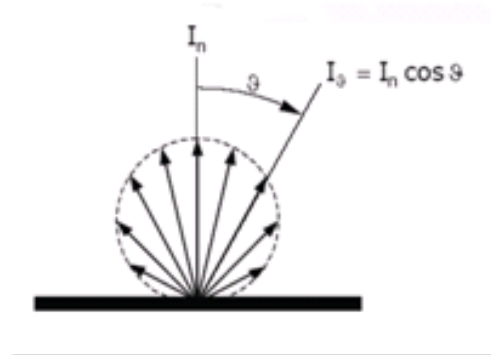
Riflessione
speculare



Riflessione
mista



Riflessione
lambertiana



Effetto della focalizzazione

La focalizzazione dell'occhio può rendere l'irradiazione sulla retina maggiore di quello sulla cornea anche di un fattore dell'ordine di **10^5** .

Per esempio, considerando una pupilla con apertura di 7 mm di diametro e un fascio con sezione di diametro maggiore di 7 mm, se tutta la radiazione che passa attraverso la pupilla viene concentrata in un'immagine retinica di 25 μm di diametro, l'aumento dell'irradiazione retinico rispetto a quello corneale è dato dal fattore:

$$(7 \times 10^3 / 25)^2 = 7,84 \times 10^4$$

Focalizzazione

La capacità dell'occhio di concentrare, attraverso la focalizzazione, molta potenza in una piccola superficie retinica rende particolarmente critiche le esposizioni alla radiazione che può raggiungere la retina (cioè visibile e IR-A).

Infatti, con questa radiazione anche esposizioni che causano un irradimento corneale relativamente basso potrebbero essere in grado di provocare lesioni alla retina.

Sorgente apparente

Con il termine “**sorgente apparente**” si intende la sorgente reale o virtuale in grado di formare la più piccola immagine retinica.

In realtà, è proprio la sorgente apparente, e non quella fisica, a determinare la dimensione dell’immagine retinica e quindi l’irradiazione sulla retina.

Quindi è la sorgente apparente che determina la pericolosità di un fascio laser.

Sorgente apparente

La determinazione della sorgente apparente è particolarmente semplice nel caso di radiazione proveniente da **riflessioni da superfici diffondenti o trasmessa attraverso diffusori**, in modo che la sorgente si possa considerare simile ad una **sorgente lambertiana** (sorgente ideale la cui emissione è uniforme in tutte le direzioni).

Infatti in questo caso la sorgente apparente **coincide con la superficie che emette la radiazione**, per quanto riguarda sia la dimensione che la posizione.

Sorgente apparente

In generale, nel caso di fasci non provenienti da sorgenti diffondenti o non trasmessi attraverso diffusori, la determinazione della sorgente apparente non è semplice.

Inoltre, anche la presenza di ottiche (lenti, specchi, ecc.) può modificare sia la sua dimensione che la sua posizione.

In questo caso è difficile determinare la sorgente apparente, ed errori nella sua valutazione spesso portano a sovrastimare, anche di molto, la dimensione dell'immagine retinica, sottostimando il reale rischio.

Sorgente apparente

Al fine di evitare valutazioni errate del rischio che possano compromettere la sicurezza, è importante determinare con cura la dimensione e la posizione della sorgente apparente.

In particolare, bisogna ricordare che generalmente, tranne alcune eccezioni, valgono le seguenti considerazioni:

- La sorgente apparente **non si può identificare con l'apertura del laser**
- La sorgente apparente **non si può identificare con il punto più stretto del fascio (*beam waist*).**

Sorgente apparente (caso generale)

La radiazione laser segue la legge di propagazione dei fasci **gaussiani**. Questa caratteristica rende inapplicabile l'ottica geometrica ai fasci laser.

Una delle conseguenze di questo particolare tipo di propagazione è che la sorgente apparente generalmente **non** coincide con la sorgente fisica della radiazione, né in termini di **posizione**, né in termini di **dimensione**.

Dato che è proprio la sorgente apparente a determinare l'immagine retinica, è evidente l'importanza di poterla identificare correttamente.

Sorgente apparente (posizione e dimensione)

La sorgente apparente di un fascio laser ha le seguenti caratteristiche:

posizione → si trova nel **centro di curvatura** che ha il fascio laser alla cornea

dimensione → la sua dimensione è quella del **fascio laser** in corrispondenza di quel **centro di curvatura**

Sorgente apparente

Nel caso di un **fascio collimato**, la sorgente apparente è posta ad una **distanza molto grande** (teoricamente all'infinito), mentre la sua dimensione è molto piccola e in pratica si può considerare **puntiforme**.

Invece, nel caso di un **fascio molto divergente**, con una buona approssimazione la sorgente apparente può essere considerata **coincidente con quella fisica**, sia per quanto riguarda la posizione che la dimensione.

Fasci molto divergenti

Nel caso di fasci **molto divergenti**, la propagazione dei fasci laser si può approssimare, con un errore trascurabile, a quella definita dall'ottica geometrica, considerando il **beam waist** del fascio laser come sorgente apparente del fascio, sia in termini di posizione, sia in termini di dimensione.

Per i fasci molto divergenti, il beam waist è coincidente con la **sorgente fisica** o, nel caso di utilizzo di ottiche, con una sua **immagine**. Generalmente la sorgente apparente di questi fasci è molto piccola e può essere considerata puntiforme ($\alpha = \alpha_{\min}$).

Fasci collimati

Nel caso di fasci **collimati** o con bassissima divergenza, applicando la propagazione dei fasci gaussiani si trova che la sorgente apparente non varia in modo apprezzabile variando il punto di osservazione del fascio e rimane sempre posizionata ad una distanza molto grande.

Riguardo alla sua dimensione, si trova che praticamente è sempre puntiforme, ad eccezione di casi rarissimi, in cui comunque eccede di poco α_{\min} .

Quindi, data anche la difficoltà nel determinare con precisione la reale dimensione della sorgente apparente, si può senz'altro considerarla puntiforme (cioè $\alpha < \alpha_{\min}$).

Strumenti ottici

L'utilizzo di strumenti ottici (lenti, microscopi, binocoli, ecc.), aumenta, spesso anche in modo notevole, la pericolosità della radiazione laser.

Infatti, rispetto all'occhio nudo, uno strumento ottico permette di raccogliere più radiazione, a causa delle maggiori dimensioni dell'obiettivo rispetto all'apertura della pupilla (come nel caso del binocolo o del telescopio), oppure perché permette di mettere a fuoco una sorgente ad una distanza minore di 100 mm (come nel caso del microscopio o della lente di ingrandimento).

Normativa

Lo standard internazionale sulla sicurezza laser è la pubblicazione **IEC 60825**, emessa dalla International Electrotechnical Commission (IEC); questa pubblicazione è suddivisa in diverse parti (1, 2, ecc.).

Tra queste, la principale è la **IEC 60825-1** (pubblicazione base).

Normativa

La pubblicazione IEC 60825-1 è stata recepita come norma europea, emessa dal CENELEC (ente di normazione europeo) come **EN 60825-1**.

Poi la norma CENELEC, tradotta in italiano, è stata recepita dall'Italia ed emessa dal Comitato Elettrotecnico Italiano (CEI) diventando **CEI EN 60825-1**.

Lo stesso percorso è stato seguito dalle altre parti della IEC 60825.

CEI EN 60825-1

Gli argomenti della CEI EN 60825-1 sono:

- definizioni
- descrizione delle classi
- prescrizioni per il costruttore ed etichettatura
- metodi di misura
- limiti di emissione accessibile (LEA)
- livelli di esposizione massima permessa (EMP)
- distanza nominale di rischio oculare (DNRO) *

*Nell'attuale edizione della norma CEI EN 60825-1 questa distanza è chiamata "distanza nominale di pericolo oculare (DNPO)", anche se è più conosciuta come DNRO.

EMP

Il valore di **EMP** è il livello massimo di radiazione a cui gli occhi o la pelle possono essere esposti senza che vi siano danni.

L'EMP è però da considerarsi riferita ad **esposizioni accidentali**, non ad esposizioni continuative o ripetute nel tempo. Infatti, i valori di EMP indicati nelle tabelle sono riferiti ad esposizioni di durata fino a 30000 s (poco più di 8 ore, che rappresentano una giornata lavorativa) e non si considerano effetti dovuti ad ulteriori esposizioni oltre quel limite di tempo. In realtà, l'esposizione alla radiazione laser deve essere sempre la più bassa possibile.

EMP

I valori di EMP sono diversi a seconda se sono riferiti agli **occhi** o alla **pelle** e dipendono da:

- **lunghezza d'onda**
- **durata dell'esposizione**
- **dimensione della zona irradiata**

I valori di EMP sono ricavati a partire dalle soglie di danneggiamento, espresse come **ED₅₀** (livello in corrispondenza del quale si ha una probabilità del 50% di avere un danno del tessuto biologico).

Esempio di EMP

Un particolare andamento dei valori di EMP in funzione della durata dell'esposizione è quello relativo al caso in cui l'occhio esposto a radiazione con lunghezza d'onda compresa tra **400 e 1400 nm** e durate di esposizione comprese tra **13 μ s e 10 s**.

Questo particolare andamento dell'EMP riflette quello della soglia di danno della retina dovuto all'effetto termico. In questo caso, il valore di EMP, espresso in esposizione energetica, risulta **proporzionale a $t^{0,75}$** , mentre, espresso in irradimento, risulta **proporzionale a $t^{-0,25}$** , dove t è la durata dell'esposizione.

LEA

Dai valori di EMP si ricavano i LEA. In particolare, i LEA sono basati sui valori di **EMP dell'occhio**.

I valori dei LEA e i relativi metodi di misura si basano sui fattori che maggiormente hanno effetto sull'esposizione, considerandoli nel caso di maggiore pericolosità:

- dimensione del fascio
- diametro della pupilla
- durata dell'esposizione
- eventuale uso di strumenti ottici

Distanza di sicurezza

La **distanza nominale di rischio oculare (DNRO)** è la distanza alla quale l'irradiazione o l'esposizione energetica del fascio è uguale al valore di EMP. Quindi è la **minima distanza** a cui si può stare senza che vi siano pericoli per gli occhi.

Distanza di sicurezza “estesa”

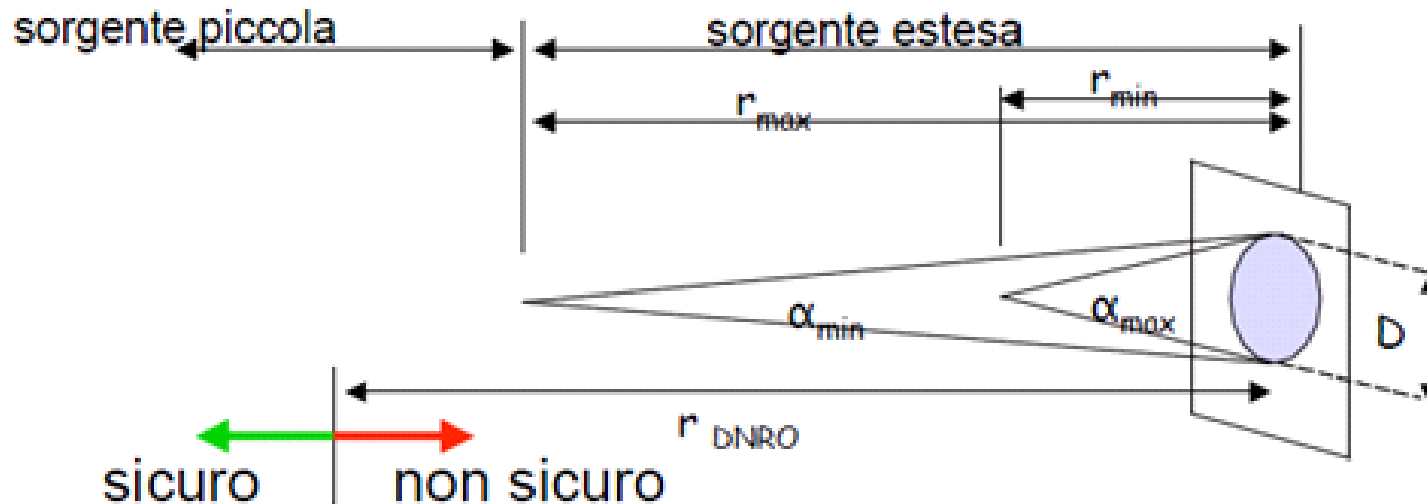
Se la DNRO comprende la possibilità di visione assistita (cioè con **strumenti ottici**), viene chiamata “**DNRO estesa**”. La DNRO estesa va considerata solo per le lunghezze d’onda che possono essere trasmesse da un sistema ottico, cioè quelle da 302,5 a 4000 nm.

La **zona nominale di rischio oculare (ZNRO)** è la regione in cui si è ad una distanza inferiore alla DNRO.

*Nell’attuale edizione della norma CEI EN 60825-1 questa distanza è chiamata “zona nominale di pericolo oculare (ZNPO)”, anche se è più conosciuta come ZNRO.

Sorgente puntiforme e sorgente estesa

Allontanandosi dalla sorgente apparente, questa può passare da estesa a puntiforme.



L'angolo sotteso dalla sorgente apparente $e > \alpha_{min}$ per $r > r_{max}$.

Classificazione

La classificazione secondo la norma CEI EN 60825-1 comprende **8 classi**, che in ordine di pericolosità crescente sono: **1, 1C, 1M, 2, 2M, 3R, 3B e 4**.

Per ogni classe sono definiti specifici limiti e sono indicati particolari requisiti che il prodotto laser deve soddisfare.

Generalmente i valori di LEA sono basati sui valori di EMP dell'occhio.

Classificazione

Classe 1

Laser che nelle normali condizioni di utilizzo non presentano rischi né a breve né a lungo termine, sia per l'osservazione ad occhio nudo, sia per l'osservazione con strumenti ottici come binocoli o telescopi. Non è garantita invece la sicurezza nel caso di visione con ingranditori, come ad esempio lenti di ingrandimento.

Classificazione

Classe 1M

Laser che nelle normali condizioni di utilizzo non presentano rischi né a breve né a lungo termine, se però non si utilizzano strumenti ottici come binocoli e telescopi. Non è garantita la sicurezza nel caso di visione con ingranditori, come ad esempio lenti di ingrandimento.

Classificazione

Classe 2

Laser che emettono nell'intervallo di lunghezza d'onda da 400 nm a 700 nm (quindi nell'intervallo visibile) e che non presentano rischi per esposizioni oculari temporanee (il tempo massimo dell'esposizione considerato ai fini della classificazione è 0,25 s), sia per l'osservazione ad occhio nudo, sia per l'osservazione con strumenti ottici come binocoli o telescopi. Non è garantita la sicurezza nel caso di visione con ingranditori, come ad esempio lenti di ingrandimento.

Classificazione

Classe 2M

Laser che emettono nell'intervallo di lunghezza d'onda da 400 nm a 700 nm (quindi nell'intervallo visibile) e che non presentano rischi per esposizioni oculari temporanee (il tempo massimo dell'esposizione considerato ai fini della classificazione è 0,25 s), se però non si utilizzano strumenti ottici come binocoli e telescopi. Non è garantita la sicurezza nel caso di visione con ingranditori, come ad esempio lenti di ingrandimento.

Classificazione

Classe 1M e classe 2M

Queste classi sono applicabili solo all'intervallo di lunghezza d'onda da 302,5 nm a 4000 nm, cioè nell'intervallo in cui la radiazione ottica può essere trasmessa attraverso la maggior parte dei materiali vetrosi usati negli strumenti ottici.

Classificazione

Classe 3R

Laser che, nel caso di osservazione diretta del fascio, possono superare i valori EMP.

Nell'intervallo da 400 nm a 700 nm, i LEA di questa classe sono 5 volte i LEA della classe 2. Per lunghezze d'onda minori di 400 nm o maggiori di 700 nm, i LEA sono 5 volte i LEA della classe 1.

Classificazione

Classe 3B

Laser che sono pericolosi nel caso di esposizione oculare diretta del fascio. I rischi per la pelle sono minimi.

Normalmente non ci sono problemi per l'osservazione di riflessione diffuse. Per valori di emissione prossimi al limite di questa classe, ci possono essere pericoli per l'occhio se l'esposizione dell'occhio è maggiore di 10 s e la distanza dalla superficie diffondente è inferiore a 13 cm.

Classificazione

Classe 4

Laser che sono pericolosi nel caso di esposizione degli occhi o della pelle alla radiazione diretta o a riflessioni diffuse.

Questi laser possono causare rischi di incendio.

IEC 60825-1

Classe 1C

E' una nuova classe che comprende i laser usati per applicazioni sulla pelle o su tessuti diversi dall'occhio.

Durante il funzionamento la radiazione accessibile dall'occhio non supera i LEA (limiti di emissione accessibile) della classe 1.

Tuttavia, la pelle o i tessuti non oculari possono essere esposti a radiazione che supera l'EMP (esposizione massima permessa).

Fattore di correzione C_6

Per le lunghezze d'onda comprese tra 400 nm e 1400 nm (intervallo retinico), per la classificazione (calcolo dei LEA) e per la valutazione dell'esposizione dell'occhio (calcolo dell'EMP per l'occhio), si applica il fattore di correzione C_6 , che è dato da:

$$C_6 = 1 \quad \text{per } \alpha \leq \alpha_{\min}$$

$$C_6 = \alpha / \alpha_{\min} \quad \text{per } \alpha_{\min} < \alpha \leq \alpha_{\max}$$

$$C_6 = \alpha_{\max} / \alpha_{\min} \quad \text{per } \alpha > \alpha_{\max}$$

C_6 non si applica ai limiti relativi all'effetto fotochimico e non si usa per i limiti della classe 3B.

Dimensione della sorgente

Fattore di correzione C_6

Il valore di α_{\min} è fisso ed è di 1,5 mrad, mentre quello di α_{\max} varia a seconda del tempo t (nel caso della classificazione, t è la base dei tempi, mentre per il calcolo dell'EMP t è la durata dell'esposizione).

$$\alpha_{\max} = 5 \text{ mrad} \quad \text{per } t < 625 \text{ } \mu\text{s}$$

$$\alpha_{\max} = 200 t^{0,5} \quad \text{per } 625 \text{ } \mu\text{s} \leq t \leq 0,25 \text{ s}$$

$$\alpha_{\max} = 100 \text{ mrad} \quad \text{per } t > 0,25 \text{ s}$$

Dimensione della sorgente

Fattore di correzione C_6

Questo Il fattore tiene conto del fatto che la dimensione della zona irradiata influisce sulla dispersione del calore.

Per questo motivo C_6 si applica solo ai limiti riguardanti l'effetto termico, mentre non si applica all'effetto fotochimico, la cui soglia di danno non dipende dalla dimensione della zona interessata.

Impulsi ripetitivi

Fattore di correzione C_5

Il fattore di correzione C_5 , tiene conto degli effetti termici dovuti alla ripetizione di impulsi e il suo valore dipende dal numero di impulsi nel tempo applicabile.

Per la classificazione, l'intervallo di tempo applicabile è il valore minimo tra T_2 e la base dei tempi. Per il calcolo dell'EMP, l'intervallo di tempo è il valore minimo tra T_2 e la durata dell'esposizione.

C_6 non si applica ai limiti relativi all'effetto fotochimico e non si usa per i limiti della classe 3B.

Impulsi ripetitivi

Fattore di correzione C_5

Il valore del fattore C_5 dipende, oltre che dal numero di Impulsi N , anche da altri parametri:

- lunghezza dell'intervallo di tempo T_i
- lunghezza dell'intervallo di tempo T_2
- base dei tempi o durata dell'esposizione
- dimensione angolare α della sorgente apparente

A loro volta, la base dei tempi, T_i e T_2 dipendono dalla lunghezza d'onda della radiazione.

Etichettatura

Etichette alternative con pittogrammi

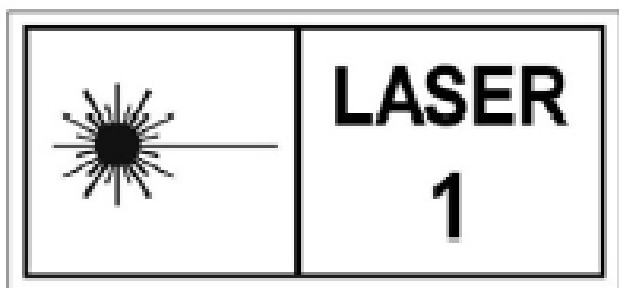
La nuova edizione dello standard permette l'utilizzo di pittogrammi in alternativa alle avvertenze di pericolo.

Tuttavia, le avvertenze di pericolo possono essere sostituite completamente dai pittogrammi solo per le classi inferiori alla classe 3B.

Infatti, per la classe 3B e la classe 4, le etichette alternative devono contenere, oltre ai pittogrammi, le frasi di avvertenza riguardo al tipo di rischio causato dal laser.

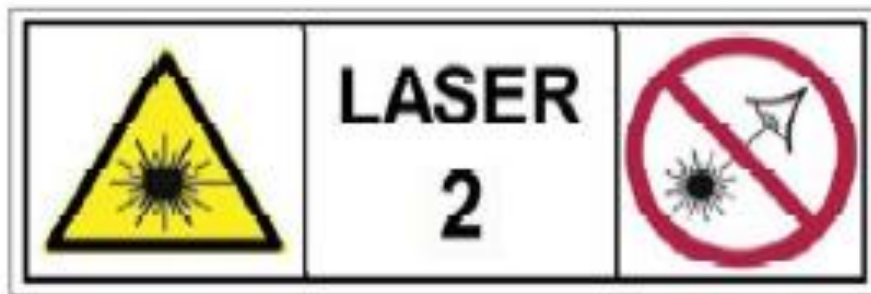
Etichettatura

Esempi di etichette alternative con pittogrammi della norma CEI EN 60825-1 (2017)



Etichettatura

Esempi di etichette alternative con pittogrammi della norma CEI EN 60825-1 (2017)



Etichettatura

Esempi di etichette alternative con pittogrammi della norma CEI EN 60825-1 (2017)



Utilizzo di protezioni

Per quanto possibile si deve evitare che le persone si possano trovare ad una distanza inferiore alla DNRO, oppure alla DNRO estesa se si prevede l'uso di strumenti ottici che possano aumentare il rischio.

Nel caso che questo non sia possibile, occorre che le persone stesse indossino adeguate protezioni per gli **occhi** e, se la potenza della radiazione lo richiede, anche per la **pelle**.

Densità ottica

La densità ottica, indicata con **D** oppure con **OD** (***optical density***), è così definita:

$$D = -\log_{10}\tau$$

dove τ è il **fattore di trasmissione** o **trasmittanza** (***transmittance***), definito come il rapporto tra la potenza trasmessa e quella incidente (varia da 0 a 1).

Occhiali di protezione

Gli occhiali di protezione devono essere scelti in base alla lunghezza d'onda e alla potenza della radiazione accessibile. In particolare devono:

- avere una **densità ottica** sufficiente ad evitare esposizioni che superino i livelli di EMP
- essere sufficientemente **resistenti** per non essere danneggiati dall'esposizione alla radiazione, per evitare che la loro funzione di protezione venga compromessa
- permettere una buona **visibilità**

Occhiali di protezione

Generalmente la densità ottica degli occhiali di protezione dipende molto dalla **lunghezza d'onda**.

Se gli occhiali di protezione devono coprire un intervallo di lunghezze d'onda, bisogna conoscere il valore minimo misurato di densità ottica all'interno dell'intervallo e tenerlo in considerazione nella valutazione dell'idoneità degli occhiali stessi.

Occhiali di protezione

Il valore minimo della densità ottica necessaria per assicurare un'adeguata protezione può essere calcolato con la seguente formula, nel caso in cui il valore di EMP sia espresso in esposizione energetica:

$$D = \log_{10}(H_0/H_{EMP})$$

dove:

H_0 = livello di radiazione previsto per l'occhio non
protetto

H_{EMP} = valore di EMP

Occhiali di protezione

Il valore minimo della densità ottica necessaria per assicurare un'adeguata protezione può essere calcolato con la seguente formula, nel caso in cui il valore di EMP sia espresso in irradiazione:

$$D = \log_{10}(E_0/E_{EMP})$$

dove:

E_0 = livello di radiazione previsto per l'occhio non protetto

E_{EMP} = valore di EMP

DNRO

Nel caso in cui il valore di EMP sia espresso in irradiazione, la DNRO si può calcolare con la seguente formula:

$$DNRO = \frac{1}{\phi} \sqrt{\frac{4 k P_0}{\pi E_{EMP}}} - \frac{a}{\phi}$$

P_0 = potenza del fascio laser

E_{EMP} = valore di EMP espresso in irradiazione

a = diametro iniziale del fascio (all'uscita dal laser)

ϕ = divergenza del fascio

k = fattore dipendente dalla forma del fascio

DNRO

Nel caso in cui il valore di EMP sia espresso in esposizione energetica, la DNRO si può calcolare con la seguente formula:

$$\text{DNRO} = \frac{1}{\phi} \sqrt{\frac{4 k Q_0}{\pi H_{\text{EMP}}}} - \frac{a}{\phi}$$

Q_0 = energia del fascio laser

H_{EMP} = valore di EMP espresso in esposizione energetica

a = diametro iniziale del fascio (all'uscita dal laser)

ϕ = divergenza del fascio

k = fattore dipendente dalla forma del fascio

DNRO

Il valore di k deve essere scelto in base al profilo del fascio.

Per i fasci gaussiani, k deve essere posto uguale a 1.

Invece, per fasci non gaussiani è spesso molto difficile o addirittura impossibile calcolare il corretto valore di k .

Quando non è noto il tipo di profilo o comunque non è possibile calcolare il corretto valore di k , questo deve essere posto uguale a 2,5. Questo permette di avere un certo margine di sicurezza nel definire la DNRO.

DNRO estesa

Nel caso in cui si debba calcolare la DNRO estesa, è indispensabile tener conto degli strumenti ottici che possono aumentare la DNRO, cioè dei binocoli o dei telescopi.

In questo caso bisogna considerare che, essendo l'obiettivo del binocolo o del telescopio maggiore del diametro della pupilla, l'uso di tali strumenti aumenta la radiazione che entra nell'occhio.

L'uso di un binocolo o di un telescopio aumenta la potenza o l'energia che raggiunge l'occhio di un fattore chiamato “**guadagno ottico**”, indicato con “G”.

Guadagno ottico

Per le lunghezze d'onda nell'intervallo retinico (cioè da 400 nm a 1400 nm), si dovrà tener conto del guadagno ottico relativamente all'aumento della potenza o dell'energia della radiazione che passa attraverso la pupilla, in quanto la maggiore criticità è data dal danno alla retina.

Invece, per le altre lunghezze d'onda (cioè da 302,5 nm a 400 nm e da 1400 nm a 4000 nm), il guadagno ottico andrà considerato relativamente all'aumento dell'irradiazione o dell'esposizione energetica alla cornea, dato che i tessuti maggiormente interessati sono quelli della cornea e del cristallino.

Guadagno ottico

Per le lunghezze d'onda nell'intervallo da 400 nm a 1400 nm, se il diametro del fascio di uscita dall'oculare è maggiore del diametro della pupilla, cioè se è maggiore di 7 mm, il guadagno ottico è dato dalla seguente formula:

$$G = \tau \left(\frac{D_0}{d_0} \right)^2$$

τ = coefficiente di trasmissione del sistema ottico alla lunghezza d'onda considerata

D_0 = diametro dell'obiettivo

d_0 = diametro dell'oculare

Guadagno ottico

Per le lunghezze d'onda nell'intervallo da 400 nm a 1400 nm, se il diametro del fascio di uscita dall'oculare è minore del diametro della pupilla, cioè se è minore di 7 mm, il guadagno ottico è dato dalla seguente formula:

$$G = \tau \frac{D_0^2}{49 \text{ mm}^2}$$

dove:

τ = coefficiente di trasmissione del sistema ottico alla
lunghezza d'onda considerata

D_0 = diametro dell'obiettivo

Guadagno ottico

Per le lunghezze d'onda nell'intervallo cioè da 302,5 nm a 400 nm e da 1400 nm a 4000 nm, indipendentemente dal diametro del fascio di uscita dall'oculare, il guadagno ottico è dato dalla seguente formula:

$$G = \tau \left(\frac{D_0}{d_0} \right)^2$$

τ = coefficiente di trasmissione del sistema ottico alla
lunghezza d'onda considerata

D_0 = diametro dell'obiettivo

d_0 = diametro dell'oculare

Guadagno ottico

Il guadagno ottico è dato dalla seguente formula:

$$G = \tau \left(\frac{D_0}{d_0} \right)^2$$

τ = coefficiente di trasmissione del sistema ottico alla lunghezza d'onda considerata (normalmente si pone uguale a 1, per non rischiare di sottostimare l'esposizione)

D_0 = diametro dell'obiettivo

d_0 = diametro dell'oculare

DNRO estesa

Le formule per il calcolo della DNRO estesa, a seconda se il valore di EMP sia espresso in irradiazione o esposizione energetica, sono seguenti:

$$\text{DNRO (estesa)} = \frac{1}{\phi} \sqrt{\frac{4 k G P_0}{\pi E_{\text{EMP}}}} - \frac{a}{\phi}$$

$$\text{DNRO (estesa)} = \frac{1}{\phi} \sqrt{\frac{4 k G Q_0}{\pi H_{\text{EMP}}}} - \frac{a}{\phi}$$

Fibre ottiche multimodo

Nel caso di un fascio laser emesso da una fibra multimodo, la DNRO e la DNRO estesa si possono calcolare considerando l'apertura numerica NA (*Numerical Aperture*) della fibra ottica nel modo seguente:

$$\text{DNRO} = \frac{1,7}{2 \text{ NA}} \sqrt{\frac{4 k P_0}{\pi E_{\text{EMP}}}} \quad \text{DNRO (estesa)} = \frac{1,7}{2 \text{ NA}} \sqrt{\frac{4 k G P_0}{\pi E_{\text{EMP}}}}$$

$$\text{DNRO} = \frac{1,7}{2 \text{ NA}} \sqrt{\frac{4 k Q_0}{\pi H_{\text{EMP}}}} \quad \text{DNRO (estesa)} = \frac{1,7}{2 \text{ NA}} \sqrt{\frac{4 k G Q_0}{\pi H_{\text{EMP}}}}$$

Fibre ottiche multimodo

Le formule per la DNRO sono basate sulle seguenti ipotesi:

$$NA = n \sin \frac{\alpha}{2}$$

n = indice di rifrazione del mezzo

α = angolo che contiene il 95% della potenza dell'energia

Il diametro del fascio in uscita dalla fibra è molto piccolo rispetto alla divergenza del fascio, quindi relativo termine è stato trascurato. Infatti:

$$\frac{a}{2 NA / 1,7} \approx 0$$

Fibre ottiche monomodo

Nel caso di un fascio laser emesso da una fibra monomodo (singolo modo), la DNRO si può calcolare con le seguenti formule:

$$\text{DNRO} = \frac{\pi \omega}{2 \sqrt{2} \lambda} \sqrt{\frac{4 k P_0}{\pi E_{\text{EMP}}}}$$

$$\text{DNRO} = \frac{\pi \omega}{2 \sqrt{2} \lambda} \sqrt{\frac{4 k Q_0}{\pi H_{\text{EMP}}}}$$

dove:

λ = lunghezza d'onda

ω = diametro del campo modale calcolato a $1/e^2$

Fibre ottiche monomodo

Nel caso di un fascio laser emesso da una fibra monomodo, la DNRO estesa si calcola con le seguenti formule:

$$\text{DNRO (estesa)} = \frac{\pi \omega}{2 \sqrt{2} \lambda} \sqrt{\frac{4 k G P_0}{\pi E_{\text{EMP}}}}$$

$$\text{DNRO (estesa)} = \frac{\pi \omega}{2 \sqrt{2} \lambda} \sqrt{\frac{4 k G Q_0}{\pi H_{\text{EMP}}}}$$

Fibre ottiche monomodo

Anche nel caso di un fascio laser emesso da una fibra monomodo, Il diametro del fascio in uscita dalla fibra è molto piccolo, quindi il relativo termine è stato trascurato. Infatti:

$$\frac{a}{2 \sqrt{2} \lambda / (\pi \omega)} \approx 0$$

DNRO

Le formule più precise per il calcolo della DNRO sono le seguenti:

$$DNRO = \frac{1}{\operatorname{tg}(\varphi/2)} \sqrt{\frac{k P_0}{\pi E_{EMP}}} - \frac{a}{2 \operatorname{tg}(\varphi/2)}$$

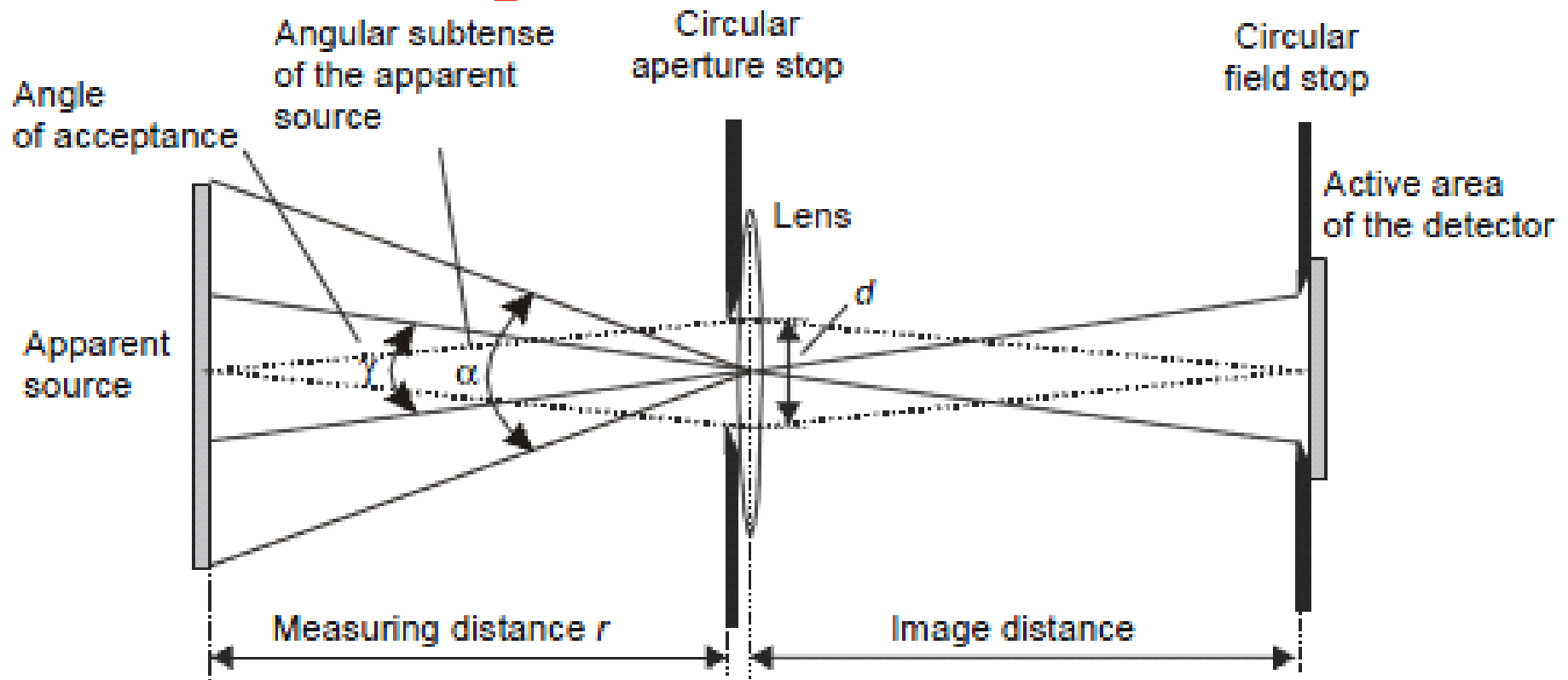
$$DNRO = \frac{1}{\operatorname{tg}(\varphi/2)} \sqrt{\frac{k Q_0}{\pi H_{EMP}}} - \frac{a}{2 \operatorname{tg}(\varphi/2)}$$

Calcolo dell'EMP

Per determinare correttamente la potenza o l'energia da confrontare con il valore di MPE della CEI EN 6085-1, occorre che il metodo di misura rispetti due requisiti fondamentali:

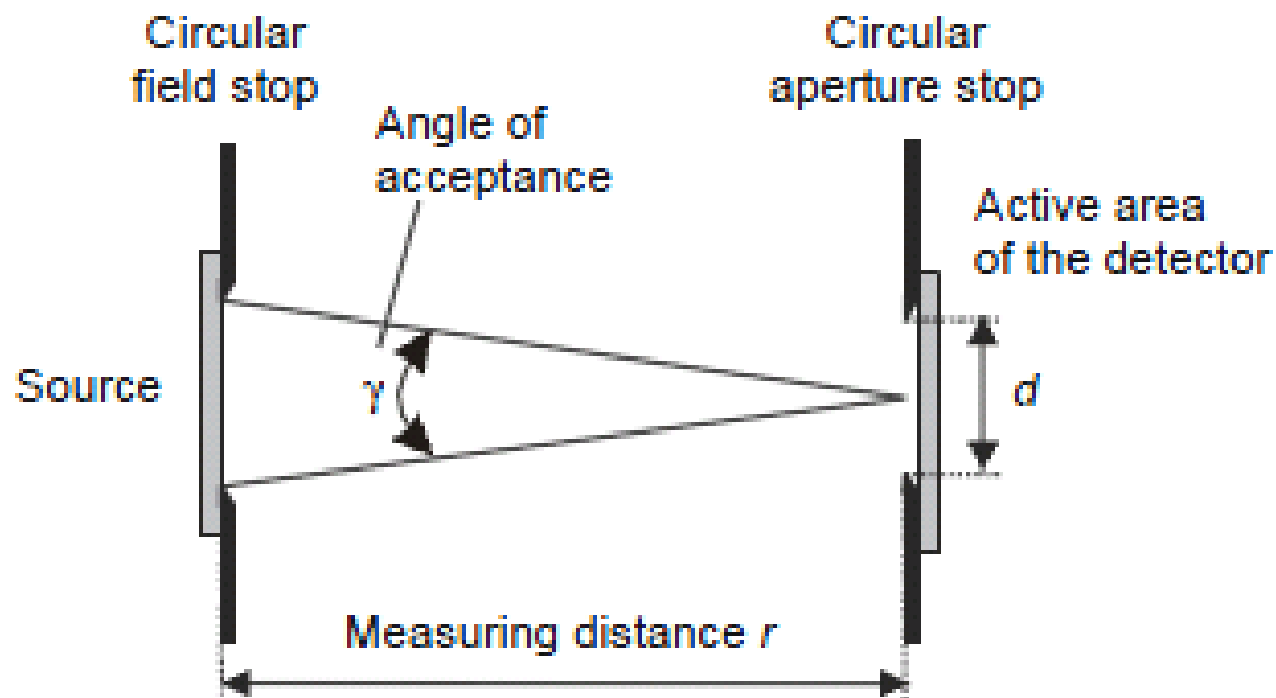
- la radiazione sia raccolta entro un diaframma con un'apertura circolare di un definito diametro
- la radiazione sia raccolta entro un determinato angolo di accettazione

Angolo di accettazione



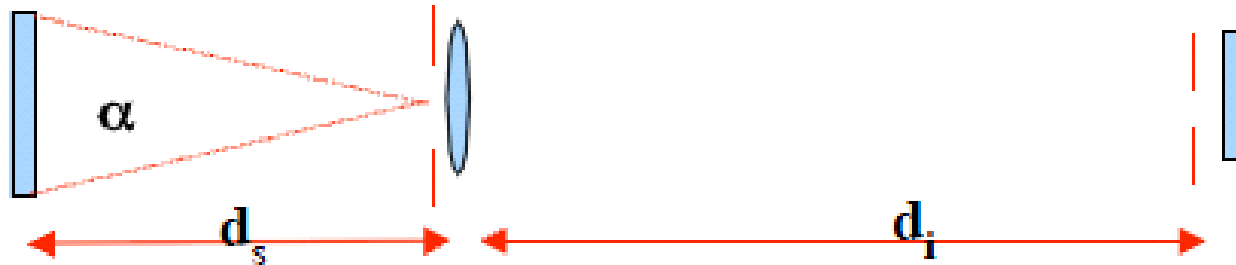
Metodo basato sulla rappresentazione della sorgente apparente sul piano del diaframma di campo

Angolo di accettazione

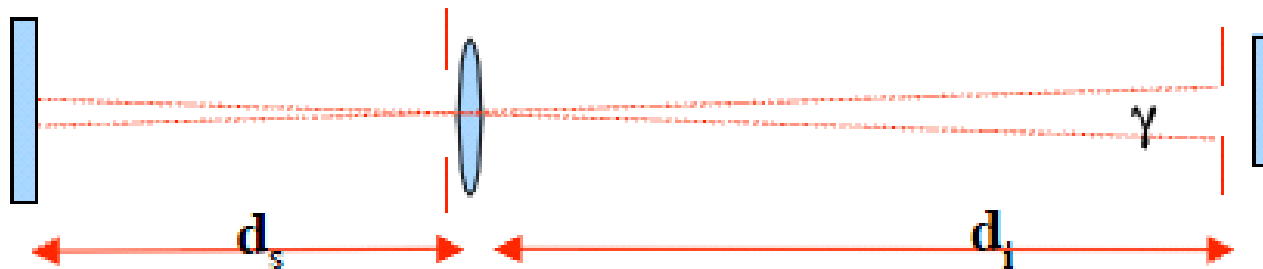


Metodo del diaframma sulla sorgente apparente

Diametro apparente e angolo di accettazione

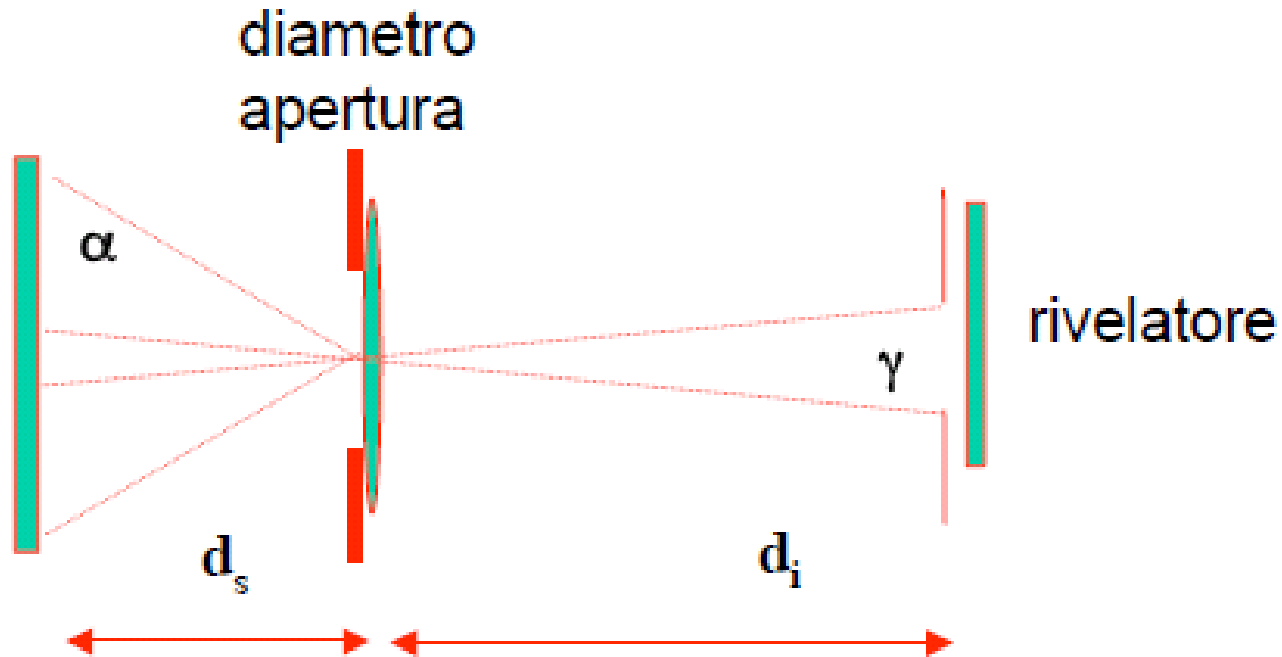


α = angolo sotteso dalla sorgente apparente



γ = angolo di accettazione (o accettanza)

Diametro apparente e angolo di accettazione



α = dimensione angolare della sorgente apparente
 γ = angolo di accettazione (γ)

Altri pericoli

All'uso di prodotti laser possono essere associati pericoli diversi da quelli causati dal fascio laser. I rischi che possono essere presenti dipendono dal tipo di laser. I principali tipi di pericolo sono:

- **elettrico**
- **ottico da radiazione secondaria**
- **chimico**
- **meccanico**
- **di incendio**
- **di emissione di radiazioni ionizzanti**

Altri pericoli

Pericolo elettrico

- alta tensione (anche decine di migliaia di volt)
- corrente elevata (anche centinaia di ampere)

Pericolo ottico da radiazione secondaria

- radiazione secondaria (per esempio radiazione ultravioletta generata dalle scariche elettriche usate per eccitare il materiale attivo, oppure radiazione ottica emessa da sorgenti di pompaggio)

Altri pericoli

Pericolo chimico

- gas o altre sostanze chimiche presenti nel laser
- fumi e particolato prodotti dall'interazione radiazione-materia

Pericolo meccanico

- parti in movimento (per esempio nei processi di taglio)
- frammenti di fibre ottiche (possibili ferite agli occhi o alla pelle)

Altri pericoli

Pericolo di incendio

- fuoco causato dall'interazione radiazione-materia

Pericolo di emissione di raggi X

- raggi X emessi dalle scariche nei gas a bassa pressione, usati come materiale attivo, per eccitarli (quando la tensione supera i 5 kV)
- raggi X emessi dall'interazione radiazione-materia

Valutazione del rischio

La valutazione del rischio (*risk assessment*) può essere suddivisa in 5 fasi:

- 1 - Analisi del tipo di pericolo e dei momenti in cui può manifestarsi
- 2 - Comprensione di chi può essere coinvolto e di come può esserlo
- 3 - Stima delle probabilità di incidente e analisi delle misure di sicurezza esistenti
- 4 - Registrazione dei dati
- 5 - Revisione della valutazione del rischio

Tipo di pericolo e sua manifestazione

Innanzitutto va esaminato quale tipo di pericolo (elettrico, chimico, ecc.) può essere presente.

Quindi si devono analizzare i diversi momenti in cui il pericolo potrebbe manifestarsi (per esempio l'installazione, l'assistenza, particolari operazioni critiche, ecc.). Ad ognuno di essi potrebbe corrispondere un diverso rischio e quindi richiedere precauzioni differenti.

Valutazione degli incidenti

E' necessario avere presente quali persone (utilizzatori, impiegati, visitatori, ecc.) potrebbero subire incidenti e/o involontariamente esserne causa. In particolare è importante conoscerne la preparazione tecnica e il livello di conoscenza dei rischi delle persone che potrebbero essere coinvolte.

E' necessario anche sapere come eventuali incidenti potrebbero verificarsi, cioè se in condizioni di corretto funzionamento dell'apparecchio laser o solo in caso di errori e/o guasti.

Valutazione degli incidenti

Per una corretta valutazione del rischio bisogna:

- stimare la probabilità di incidente, cioè la probabilità che ogni determinato pericolo possa causare danni alle persone
- esaminare l'adeguatezza delle misure di sicurezza esistenti
- capire cosa è lasciato privo di controllo o con un controllo insufficiente
- valutare se è necessario aggiungere altre misure di sicurezza per ridurre ulteriormente il rischio

Misure di sicurezza

Le misure di sicurezza possono essere di due tipi:

- **misure di sicurezza ingegneristiche (*engineering controls*)**, cioè derivate dal progetto del sistema o dell'apparecchiatura e basate su protezioni “fisiche”.
- **misure di sicurezza amministrative (*administrative controls*)**, cioè basate sul rispetto di regole di comportamento.

Misure di sicurezza ingegneristiche

Esempi di misure di sicurezza ingegneristiche:

- **barriere di protezione** per evitare l'accesso alla radiazione laser
- **interruttori di sicurezza** per lo spegnimento del laser
- **attenuatori** per ridurre la potenza della radiazione accessibile

Misure di sicurezza amministrative

Esempi di misure di sicurezza amministrative:

- **targhette** per avvertire della presenza di pericoli e/o dare indicazioni
- **procedure** per dare istruzioni sulle corrette modalità di lavoro e di utilizzo del laser
- **addestramento (*training*)** per fornire un'adeguata preparazione che permetta di evitare o ridurre i rischi
- **accessi controllati** per evitare che personale non autorizzato entri in luoghi a rischio

Scelta delle misure di sicurezza

Quando è possibile, è preferibile usare misure di sicurezza di tipo ingegneristico, in quanto sono praticamente **indipendenti dal fattore umano**.

Invece le misure di sicurezza di tipo amministrativo sono molto **dipendenti dal fattore umano** e potrebbero essere disattese o rese inefficaci da errori o da comportamenti scorretti. Quindi l'uso di misure di sicurezza di tipo amministrativo deve sempre essere accompagnato da un'adeguata istruzione.

Misure di sicurezza

Osservare le seguenti indicazioni permette di limitare i rischi:

- utilizzare la **minima energia/potenza** del laser necessaria per svolgere il lavoro
- **ridurre la radiazione accessibile** attraverso attenuatori, filtri, interruttori, ecc.
- **terminare i fasci** ogni volta che sia possibile
- preferire l'utilizzo di **schermi/oggetti opachi**
- tenere i fasci laser ad un **livello diverso da quello degli occhi**

Misure di sicurezza

Ulteriori indicazioni per limitare i rischi sono:

- tenere una **buona agibilità** del luogo di lavoro
- dove necessario, avere sempre disponibili e far indossare dai lavoratori e dagli eventuali visitatori adeguate **protezioni individuali** (occhiali, guanti, ecc.)
- assicurarsi che le persone che si trovano nel luogo di lavoro (lavoratori o visitatori) abbiano sempre un'adeguata **informazione dei rischi**
- curare molto l'**addestramento** del personale

Misure di sicurezza

Le misure di sicurezza devono essere sempre conformi ai **requisiti legali**.

La legislazione italiana, come quella di molti altre nazioni, dà solo indicazioni generiche e rimanda agli enti normatori (in Italia il CEI) per i requisiti specifici.

Quindi i requisiti indicati nelle norme e nelle guide CEI costituiscono i requisiti minimi da seguire.

Registrazione dei dati

Tutti i dati relativi alla sicurezza laser, incluse le valutazioni e i rapporti, devono essere registrati e disponibili in caso di ispezioni interne o esterne.

Anche il **programma di istruzione** deve essere documentato in modo adeguato.

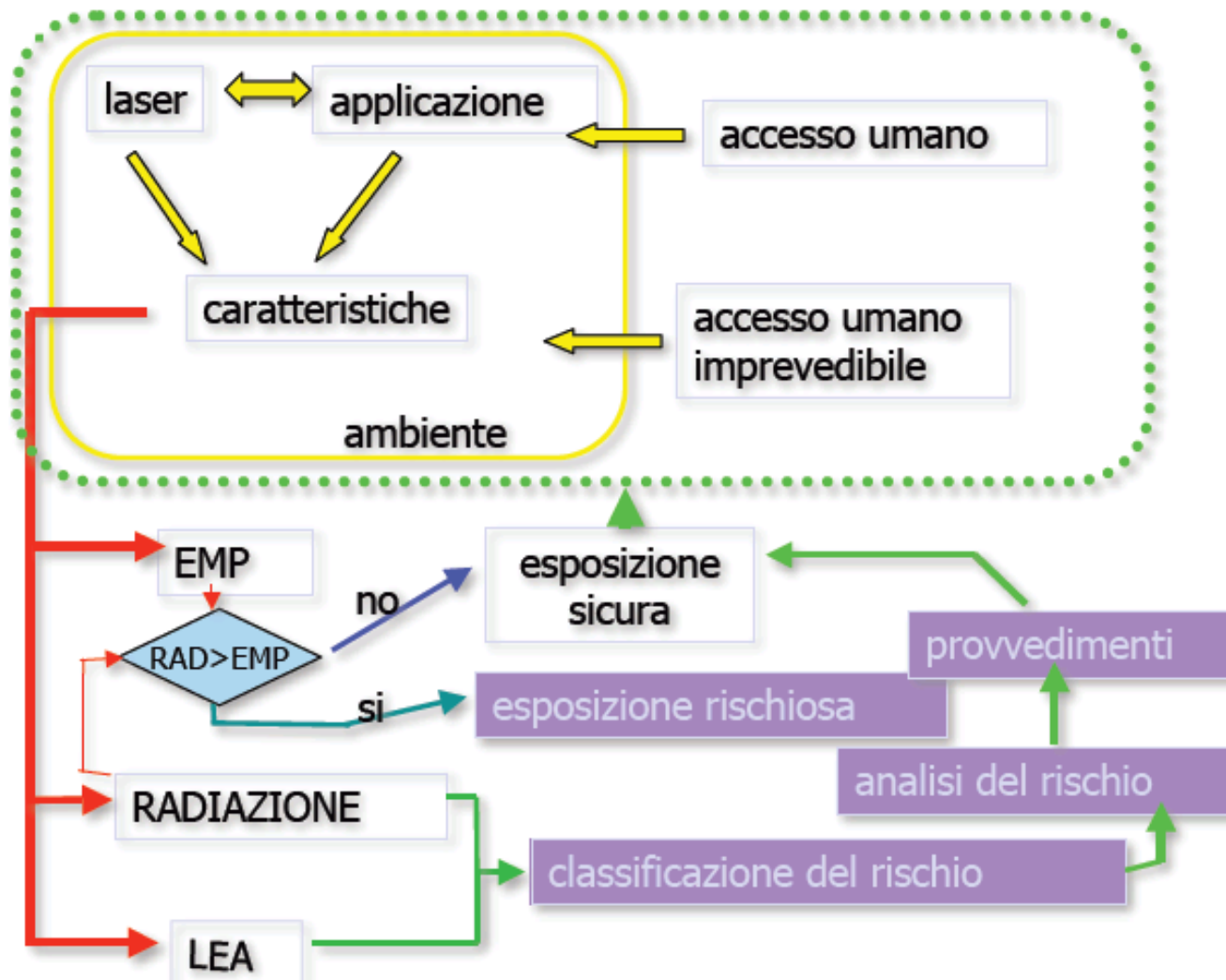
Naturalmente ogni segnalazione di incidente deve essere registrata anche in caso di assenza di danni alle persone, perché questo permette di valutare la reale efficacia delle misure di sicurezza e favorisce un'adeguata prevenzione .

Revisione della valutazione del rischio

La valutazione del rischio va rivista periodicamente. Infatti, dopo un certo tempo è importante verificare se le misure di sicurezza adottate si sono realmente rivelate efficaci o se invece necessitano di miglioramenti.

Inoltre, la revisione è necessaria ogni volta che siano state introdotte variazioni rispetto alla situazione iniziale (nuove lavorazioni, acquisizione di nuove apparecchiature, modifica di procedure, ecc.).

Valutazione del rischio



IEC/TR 60825-14

La guida per l'utilizzatore è la seguente:

IEC/TR 60825-14 “Safety of laser product – Part 14:
A user's guide”

Tra gli argomenti trattati dalla guida vi sono:

- Descrizione delle classi
- Misure di sicurezza per ognuna delle classi
- Tabelle con i valori di EMP
- Descrizione dei metodi di misura

La guida descrive i ruoli e le responsabilità delle persone coinvolte nell'attuazione delle misure di sicurezza (datore di lavoro, utilizzatore del laser, ecc.).

La guida fornisce anche dettagliate informazioni sulla funzione del Laser Safety Officer (LSO), sul Tecnico Sicurezza Laser (TSL) o Addetto Sicurezza Laser (ASL) e sulla sua attività, che dovrebbe essere nominato per tutti i laser delle classi 3B e 4.

Inoltre fornisce indicazioni sull'uso delle etichette di avvertimento, oltre che sulla necessità di addestramento e corsi di formazione per il personale.

IEC/TR 60825-14

Un importante argomento trattato è il Risk Assessment, in cui si esaminano i vari tipi di rischio considerando:

1. la loro identificazione
2. la loro valutazione in termini di frequenza e gravità
3. l'individuazione delle misure di sicurezza più adatte nei vari casi

Inoltre la guida descrive in dettaglio le misure di sicurezza, sia ingegneristiche che amministrative, e i dispositivi di protezione individuali.

La guida contiene anche esempi di calcolo dell'EMP e della distanza nominale di rischio oculare.