

DISPENSE DEL CORSO

SICUREZZA LASER

INDICE

<u>1.</u>	<u>INTRODUZIONE AI LASER</u>	3
<u>2.</u>	<u>DESCRIZIONE DEI PRINCIPALI TIPI DI LASER</u>	7
<u>3.</u>	<u>CLASSIFICAZIONE DELLE SORGENTI LASER SECONDO LA NORMA CEI 76-2</u>	8
<u>4.</u>	<u>EFFETTI BIOLOGICI DELLA RADIAZIONE LASER</u>	9
<u>5.</u>	<u>PRINCIPALI APPLICAZIONI DEI LASER</u>	11
<u>6.</u>	<u>MISURE DI SICUREZZA, RISCHI, PROCEDURE E CONTROLLO DEI RISCHI</u>	12

1. INTRODUZIONE AI LASER

Nel 1905 Einstein postulò che la radiazione elettromagnetica, e quindi anche la luce, viene emessa, viene assorbita e si propaga nello spazio sotto forma di pacchetti di energia chiamati *quanti* o *fotoni*. Praticamente, l'energia dell'onda, in luogo di essere uniformemente distribuita con continuità su tutto il fronte dell'onda, è concentrata in pacchetti discreti. Nel 1913 Bohr completò il modello nucleare dell'atomo introducendo i seguenti postulati:

- un sistema atomico può esistere solo in determinati stati energetici, chiamati anche *stati stazionari*, in quanto il sistema non irradia energia;
- ogni processo di emissione o di assorbimento di fotoni associati ad una radiazione elettromagnetica di qualsiasi frequenza avviene in modo discontinuo ed implica una variazione del contenuto energetico del sistema atomico, ossia una transizione fra due stati stazionari;
- la frequenza della radiazione emessa o assorbita è legata ai valori E_i ed E_f dell'energia dell'atomo negli stati iniziale e finale dalla relazione $\nu = \frac{E_i - E_f}{h}$, dove h è una costante, chiamata costante universale di Plank, pari a $6.62 \cdot 10^{-34}$ J*s.

Assorbimento. La Fig. 1-a illustra un sistema atomico nel più basso di due possibili stati, di energie E_1 e E_2 , in presenza di radiazione con spettro continuo. Un fotone di questa radiazione si avvicina e interagisca con l'atomo a due livelli ed abbia una frequenza ν tale che:

$$h\nu = E_2 - E_1$$

Il risultato è che il fotone scompare e il sistema atomico si trasferisce nel suo stato di energia più alta. Questo processo si dice *assorbimento*.

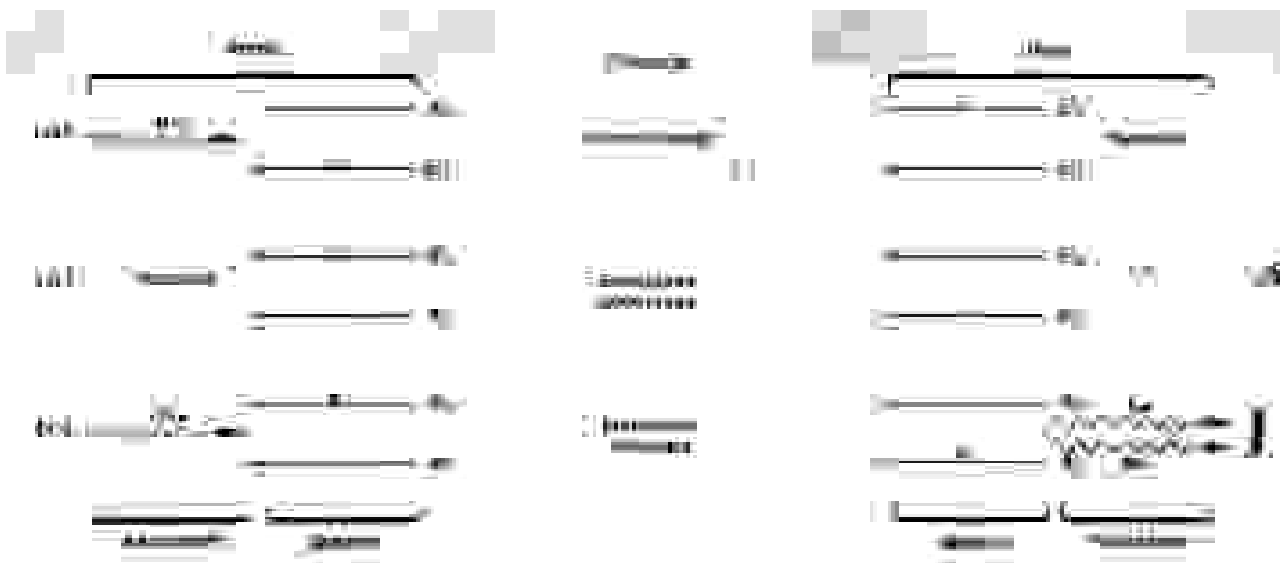


Fig.1

Emissione spontanea. In Fig. 1-b il sistema atomico si trova nel suo stato di energia più alta e non c'è radiazione nelle vicinanze. Dopo un certo intervallo di tempo, questo sistema atomico (isolato) si trasferisce spontaneamente nello stato di energia più bassa, emettendo nel processo un fotone di energia $h\nu$. Questo processo si dice *emissione spontanea*, in quanto l'emissione non è indotta da alcuna influenza esterna.

Generalmente la vita media per l'emissione spontanea da parte di atomi eccitati è 10^{-8} s. In qualche caso, però, vi sono stati per i quali è molto maggiore, anche 10^{-3} s. Questi stati, detti *metastabili*, hanno un ruolo fondamentale nel funzionamento del laser.

La luce di una lampada a filamento incandescente è prodotta per emissione spontanea. I fotoni emessi in questo modo sono totalmente indipendenti gli uni dagli altri. In particolare essi hanno direzioni e fasi diverse. In altri termini, la luce che essi emettono ha un basso grado di coerenza. Per produrre precise frange d'interferenza mediante la luce emessa da un filamento di tungsteno, è necessario porre davanti al filamento uno schermo dotato di un forellino o di una stretta fenditura e utilizzare soltanto la luce che attraversa questa apertura.

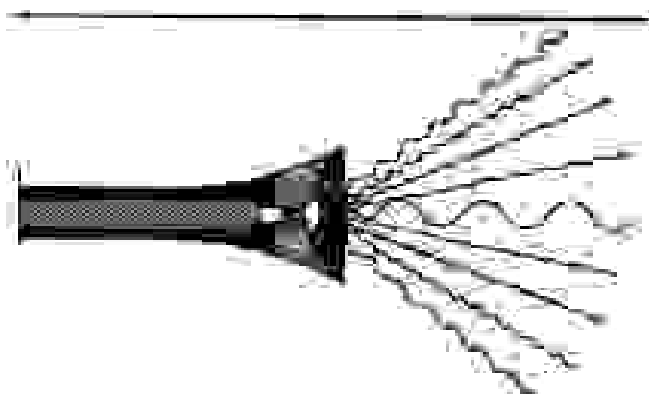


Fig. 18.7 (a) La luce emessa da una lampada incandescente è incoerente, cioè i fotoni emessi in ogni direzione sono indipendenti gli uni dagli altri.

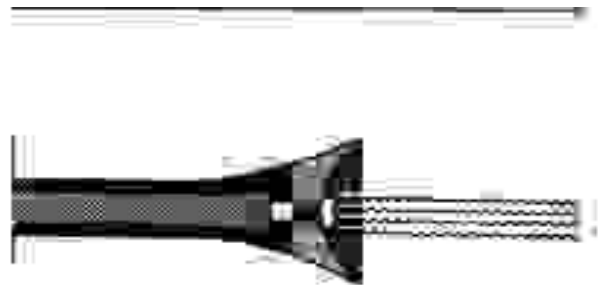


Fig. 18.7 (b) La luce emessa da una lampada incandescente è incoerente, cioè i fotoni emessi in ogni direzione sono indipendenti gli uni dagli altri. La luce emessa da una lampada incandescente è incoerente, cioè i fotoni emessi in ogni direzione sono indipendenti gli uni dagli altri.

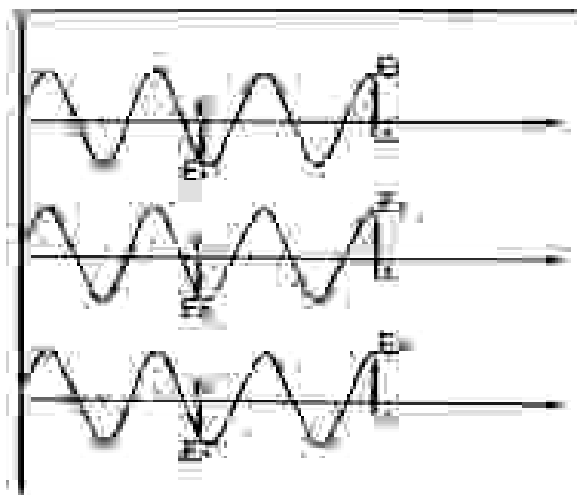


Fig. 18.8 (a) Tre onde incoerenti, ciascuna con una fase e un'ampiezza diverse dalle altre.

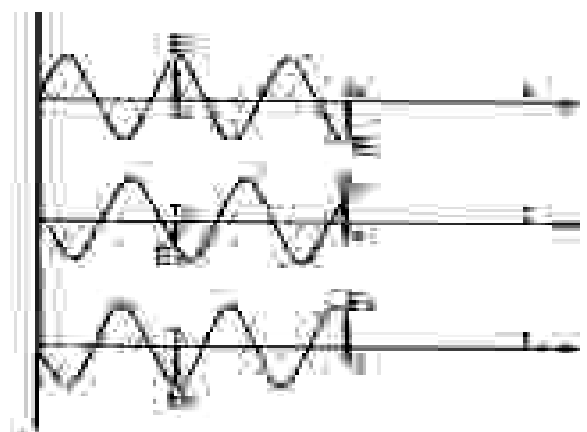


Fig. 18.8 (b) Tre onde coerenti, ciascuna con una fase e un'ampiezza simili alle altre.

Emissione stimolata. In Fig. 1-c il sistema atomico è ancora nel suo stato di maggiore energia, ma questa volta in presenza di radiazione di frequenza data dall'eq. $h\nu = E_2 - E_1$. Come nell'assorbimento, un fotone di energia $h\nu$ interagisce con il sistema. Il risultato è che il sistema passa al suo stato di energia minore ed ora vi sono due fotoni mentre prima ce n'era uno solo.

Il fotone emesso in Fig. 1-c è del tutto identico al fotone che inizia questo meccanismo, cioè «stimolante». Ha la stessa energia, direzione, fase e stato di polarizzazione. Per questo motivo la luce laser acquista le caratteristiche già citate. Il processo di Fig. 1-c si dice *emissione stimolata*. Si può ben capire che un evento di questo tipo può essere utilizzato per produrre una reazione a catena di processi simili. A ciò si riferisce la parola «amplificazione» nella sigla «laser» (il termine “laser” è la sigla di light amplification by stimulated emission of radiation). Si consideri ora un gran numero di sistemi atomici a due livelli. All'equilibrio termico molti di essi sarebbero nello stato di minore energia, come in Fig. 2-a. Solo pochi si troverebbero nello stato di energia maggiore, mantenuti dall'agitazione termica del sistema di atomi alla loro temperatura di equilibrio T .

Se si espone alla radiazione un sistema come quello di Fig. 2-a, il processo dominante è l'assorbimento, semplicemente perché lo stato di minore energia è molto più popolato. Ma se le popolazioni dei livelli fossero invertite, come in Fig. 2-b, il processo dominante in presenza della radiazione sarebbe l'emissione stimolata e pertanto la produzione di luce laser.



Fig.2

Un'inversione di popolazione, come quella di Fig. 2-b, è ben diversa dalla situazione che si verifica normalmente, in quanto non è una situazione di equilibrio. Quindi per produrla occorrono delle tecniche raffinate. La Fig. 3 mostra schematicamente come si può ottenere un'inversione di popolazione tale che si possa realizzare il meccanismo laser, detto anche «lasing». Gli atomi vengono «pompati», con qualche meccanismo, dallo stato fondamentale E_1 allo stato eccitato E_3 . Una possibilità, nota come *pompaggio ottico*, è l'assorbimento di energia luminosa proveniente da una intensa sorgente a spettro continuo disposta in modo da circondare il materiale lasing.

Gli atomi si diseccitano rapidamente dallo stato E_3 in uno stato di energia E_2 . Perché si verifichi il lasing, questo stato deve essere metastabile, cioè deve avere una vita media relativamente lunga, prima di diseccitarsi per emissione spontanea. Se queste condizioni sono soddisfatte, lo stato E_2 può allora diventare più popolato dello stato E_1 , procurando quindi la necessaria inversione di

popolazione. Un singolo fotone dell'energia giusta può allora dare inizio ad una valanga di eventi di emissione stimolata, ottenendo la produzione di luce laser. Un certo numero di laser che utilizzano solidi cristallini (come il rubino) come materiale lasing, operano secondo questo schema a tre livelli, le cui caratteristiche essenziali sono illustrate in Fig. 3.

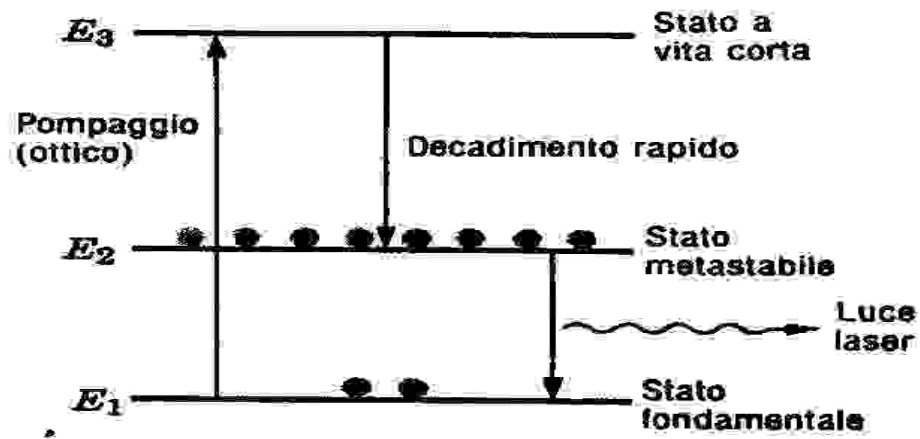


Fig. 3

Vediamo ora di descrivere brevemente un dispositivo laser, per esempio un laser a rubino, che rappresenta il primo laser a stato solido. L'apparato schematizzato in Fig. 4 è essenzialmente formato da una cavità speculare nel cui interno sono inserite una lampada flash e una sbarretta di rubino.

La sorgente, detta lampada di pompaggio, serve per innescare mediante un lampo di luce molto intenso l'eccitazione iniziale. Il cristallo di rubino, opportunamente dimensionato, rappresenta il materiale otticamente attivo, ossia il mezzo da eccitare; esso è delimitato da due specchi paralleli, uno perfettamente riflettente, l'altro semitrasparente per consentire la parziale emissione della radiazione coerente che si forma nella cavità.



Fig. 4

2. DESCRIZIONE DEI PRINCIPALI TIPI DI LASER

Un laser è costituito tipicamente da un cilindro allungato di materiale attivo, in grado cioè di amplificare la radiazione che lo attraversa, inserito fra una coppia di specchi contrapposti che rinviano continuamente la radiazione attraverso il materiale stesso. Uno dei due specchi è parzialmente trasparente per consentire l'estrazione del fascio.

I diversi tipi di laser si distinguono per consuetudine in base allo stato di aggregazione del materiale attivo. Si hanno così:

- laser a stato solido, a cristalli e vetri o a semiconduttori
- laser a liquidi
- laser a gas (ulteriormente suddivisi in laser ad atomi neutri, laser a ioni, laser molecolari, laser ad eccimeri e laser ad elettroni liberi)

3. CLASSIFICAZIONE DELLE SORGENTI LASER SECONDO LA NORMA CEI 76-2

La grande varietà di lunghezze d'onda, energie e caratteristiche d'impulso dei laser e sistemi che includono laser, e delle applicazioni e dei modi di impiego di tali sistemi, rendono indispensabile, ai fini della sicurezza, il loro raggruppamento in categorie, o classi, di pericolosità. E' risultato molto utile pertanto l'introduzione di un nuovo parametro chiamato Limite di Emissione Accettabile (LEA), che descrive i livelli di radiazione emergente da un sistema laser, la cui valutazione permette la collocazione dell'apparecchio nell'opportuna categoria di rischio. La determinazione del LEA deve essere effettuata nelle condizioni più sfavorevoli ai fini della sicurezza.

Si sono individuate 5 classi: 1, 2, 3A, 3B e 4, con indice di pericolosità crescente con il numero di classe.

Nella Classe 1 vengono raggruppati i laser cosiddetti intrinsecamente sicuri, poiché il livello di esposizione massima permesso non viene mai superato, o quei sistemi laser non pericolosi grazie alla loro progettazione ed ingegnerizzazione: involucri fissi e sicurezze intrinseche come ad esempio sistemi che bloccano definitivamente l'emissione in caso di guasto o di apertura involontaria o volontaria dell'apparato. I LEA per la classe 1 sono le condizioni di esposizione massima permessa più rigide e limitative per ciascuna lunghezza d'onda e durata di esposizione.

Di classe 2 sono quelle sorgenti o sistemi che emettono radiazione nell'intervallo 400 e 700 nm (cioè nel visibile) a bassa potenza.

La classe 3A comprende i laser con potenze di uscita non inferiori a 5 mW.

Per la classe 3B i livelli, sia per radiazione visibile che per quella non visibile, non devono superare i 500 mW.

I laser di classe 4 sono i più potenti e pericolosi. La classe 4 comprende tutti quei sistemi che superano i livelli imposti alla classe 3B.

4. EFFETTI BIOLOGICI DELLA RADIAZIONE LASER

L'occhio, per la sua configurazione anatomofunzionale e per il suo comportamento ottico, è l'organo più vulnerabile nei confronti della luce laser e rappresenta pertanto l'organo "critico" per eccellenza. A seconda della radiazione ottica (ultravioletto 100-400nm, visibile 400-760 nm, infrarosso 760-1mm) e dell'intensità di dose si possono avere diversi tipi di danno a carico di questo organo quali: danni retinici di natura fotochimica, alterazioni retiniche caratterizzate da piccoli addensamenti di pigmento, discromie, effetti catarattogeni di origine fotochimica e termica, fotocheratocongiuntivite, ustioni corneali.

Di minore importanza è l'eventuale danno a carico della cute e i più comuni sono: eritemi, ustioni cutanee, superficiali e profonde, la cui gravità sarà in rapporto, oltre che all'energia calorica incidente, al grado di pigmentazione, all'efficienza dei fenomeni locali di termoregolazione, alla capacità di penetrazione nei vari strati delle radiazioni incidenti. Laser di potenza notevolmente elevata possono danneggiare seriamente anche gli organi interni.

Le classi di rischio possono essere anche riassunte nel seguente modo:

Classe 1 : sono intrinsecamente sicuri perché di bassa potenza.

Classe 2: non sono intrinsecamente sicuri, ma la protezione dell'occhio è normalmente facilitata dal riflesso di ammiccamento. Bisogna evitare di guardare nel fascio.

Classe 3A: la protezione dell'occhio è facilitata dal riflesso di ammiccamento. Bisogna evitare di guardare nel fascio, né osservare direttamente con strumenti ottici.

Classe 3B: la visione diretta nel fascio è sempre pericolosa, mentre non è a rischio la visione di radiazioni non focalizzate, mediante riflessione diffusa.

Classe 4 : il loro uso richiede un'estrema prudenza. Sono pericolosi anche per riflessione diffusa. Essi possono causare danni a carico della cute e presentano anche un rischio di incendio. E' necessario evitare l'esposizione dell'occhio e della pelle alla radiazione diretta o diffusa.

RISCHI COLLATERALI NEL FUNZIONAMENTO DEI LASER

- *CONTAMINAZIONE AMBIENTALE*
 - a) materiale bersaglio vaporizzato e prodotti provenienti da operazioni di taglio, perforatura e saldatura
 - b) gas provenienti da sistemi laser flussati a gas o da sottoprodotti di reazioni laser (bromo, cloro, acido cianidrico, etc.)
 - c) gas o vapori da criogenici (azoto, idrogeno ed elio allo stato liquido)
 - d) coloranti (p. es. cianina) e relativi solventi (dimetilsolfossido)
 - e) policlorodifenili (condensatori e trasformatori)
- *RADIAZIONI OTTICHE COLLATERALI (NON DA LUCE LASER)*
 - a) radiazioni UV provenienti da lampade flash e da tubi di scarica dei laser in continua (ottiche al quarzo)
 - b) radiazioni nel visibile e nell'IR emesse da tubi del flash, da sorgenti di pompaggio ottico e da reirradiazione emessa dai bersagli
- *ELETTRICITÀ*
 - a) maggior parte dei laser ad alto voltaggio (>1KV)
 - b) banchi di condensatori per laser pulsati
- *RADIAZIONI IONIZZANTI*
 - a) emissione di raggi X da tubi elettronici con voltaggi all'anodo maggiori di 5 KV
- *REFRIGERANTI CRIOGENICI*
 - b) ustioni da freddo
 - c) esplosione (gas a pressione)
 - d) incendio
 - e) asfissia (condensazione dell'ossigeno atmosferico)
 - f) intossicazione (CO₂, f)
- *ESPLOSIONI*
 - a) banco dei condensatori o sistema di pompaggio ottico (laser di alta potenza)
 - b) reazioni esplosive di reagenti nei laser chimici o di altri gas usati nel laboratorio
- *INCENDIO*
 - a) fasci laser di energia elevata
 - b) apparati elettrici
- *RUMORE*
 - a) condensatori di laser pulsati di potenza molto elevata
 - b) interazioni con il bersaglio

5. PRINCIPALI APPLICAZIONI DEI LASER

1. Lavorazioni di materiali

Foratura, taglio, saldatura, trattamenti termici, etc.

2. Misure industriali, civili ed ambientali

Settore industriale: interferometri laser per metrologia, misuratori di diametri di fili, granulometri, rugosimetri sistemi di rilievo di campi di deformazione.

Settore civile: sistemi laser di allineamento livelle laser, telemetri topografici e geodimetri.

Settore ambientale: Lidar e rilevatori di inquinamento.

Settore della presentazione: laser per la visualizzazione di ologrammi, pointer laser per conferenze, sistemi laser per la didattica.

Settore giochi di luce: laser per effetti speciali in discoteche, mostre spettacoli all'aperto e simili.

Settore beni durevoli: lettori al laser di codici a barre, lettori di compact disk, stampanti laser e simili.

3. Telecomunicazioni e fibre ottiche

Sorgenti laser a semiconduttore per applicazioni, tramite fibra ottica, nella trasmissione ed elaborazione ottica di dati.

4. Applicazioni mediche

Applicazioni dei laser in *Oftalmologia*

Applicazioni cliniche dei laser in *Chirurgia Generale*

Applicazioni cliniche dei laser in *Chirurgia con microscopio operatorio*

Applicazioni cliniche dei laser in *Chirurgia Endoscopica*

5. Applicazioni nei laboratori di ricerca

Ottica non lineare

Spettroscopia lineare e non lineare

Interazione radiazione materia

6. MISURE DI SICUREZZA, RISCHI, PROCEDURE E CONTROLLO DEI RISCHI

Nei laboratori dove si usano laser di classe superiore alla Classe 3 A, l'utilizzatore deve servirsi della consulenza specialistica di un Tecnico Laser con competenze specifiche relative ai problemi di sicurezza (TSL) per la verifica del rispetto della Normativa corrispondente (CEI 1384 G – CT-76 del CEI Guida E) e per l'adozione delle necessarie misure di prevenzione.

MISURE DI SICUREZZA

Protezione sulla sorgente

- Segnali di avvertimento
- Schermi protettivi
- Cartelli di avvertimento
- Connettore di blocco a distanza collocato a <5m dalla zona in cui si svolge l'attività
- Chiave di comando, per un utilizzo dell'apparecchio solo delle persone autorizzate

Protezione dal fascio laser

- Arresto di fascio automatico in caso di radiazione eccedente i livelli prestabiliti
- Tragitto dei fasci su materiali con proprietà termiche e di riflessività adeguate e schermature
- Evitare assolutamente le riflessioni speculari

Protezione degli occhi

- Un protettore oculare previsto per assicurare una protezione adeguata contro le radiazioni laser specifiche deve essere utilizzato in tutte le zone pericolose dove sono in funzione laser della classe 3 e 4.

Vestiti protettivi

- Da prevedere nel caso il personale sia sottoposto a livelli di radiazione che superano le EMP (esposizione massima permessa) per la pelle (i laser di classe 4 rappresentano un potenziale di pericolo di incendio e i vestiti di protezione devono essere fabbricati con materiali appositi).

Formazione

- I laser di classe 3 e 4 possono rappresentare un pericolo non solo per l'utilizzatore, ma anche per altre persone, anche a considerevole distanza. Il personale, quindi, che opera in questi ambienti deve avere adeguata preparazione al fine di rendere minimo il rischio professionale.

Sorveglianza medica

- Esami oculistici di preimpiego dovrebbero essere eseguiti limitatamente ai lavoratori che utilizzano laser di Classe 3 e 4.

PROCEDURE E MEZZI DI CONTROLLO DEI RISCHI

Nella valutazione dei rischi e nell'applicazione delle misure di controllo vanno presi in considerazione tre aspetti:

- La possibilità per il laser o il sistema laser di nuocere alle persone
- L'ambiente nel quale il laser viene utilizzato
- Il livello di formazione del personale che fa funzionare il laser o che può essere esposto alla sua radiazione

PROTEZIONE PERSONALE

Classe 1

- a) Utilizzo senza prescrizioni

Classe 2

- a) Evitare una visione continua del fascio diretto
- b) Non dirigere il fascio laser deliberatamente sulle persone

Classe 3 A

- a) Evitare l'uso di strumenti ottici quali binocoli o teodoliti
- b) Affiggere un segnale di avvertimento laser
- c) Allineamento laser tramite mezzi meccanici o elettronici
- d) Terminare il fascio laser in una zona esterna al luogo di lavoro o delimitare tale zona
- e) Fissare la quota del raggio laser molto al di sopra o al di sotto dell'altezza dell'occhio
- f) Evitare che il fascio laser sia diretto verso superfici riflettenti
- g) Immagazzinare il laser portatile non in uso in un luogo inaccessibile alle persone non autorizzate

Classe 3 B

Può causare danni a un occhio non protetto. Valgono le precauzioni della classe 3 A e inoltre

- a) Funzionamento solo in zone controllate dagli operatori
- b) Evitare assolutamente riflessioni speculari
- c) Far terminare il fascio su un materiale atto a disperdere calore e riflessione
- d) Indossare le protezioni oculari

Classe 4

Causa danni a un occhio sia tramite il fascio diretto, riflessioni speculari e diffuse. Rappresentano anche un potenziale pericolo di incendio. Valgono le precauzioni della classe 3 B e inoltre

- a) Tragitti dei fasci protetti da un riparo
- b) Durante il funzionamento presenza solo di personale tecnico munito di protettori oculari e idonei vestiti protettivi
- c) Per evitare la presenza di personale sarebbe preferibile se fossero comandati a distanza
- d) Preferibili bersagli metallici non piani e adeguatamente raffreddati come coni e assorbitori
- e) Per evitare riflessioni indesiderate nella parte invisibile dello spettro per la radiazione laser situata nell'infrarosso lontano, il fascio e la zona di impatto dovrebbero essere avvolte da un materiale opaco per la lunghezza d'onda del laser

Altre precauzioni devono essere prese se il laser viene impiegato all'aperto