



# Applicazioni Industriali

## Tecnologia LASER

**Marco Raimondi**

e-mail: [mramondi@liuc.it](mailto:mramondi@liuc.it)

## **LASER – Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation**

- **Laser è l'acronimo di Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation, ovvero Amplificazione di Luce tramite Emissione Stimolata di Radiazioni e indica un dispositivo in grado di emettere un fascio di luce coerente e monocromatica, concentrata in un raggio rettilineo estremamente collimato. Inoltre la luminosità (brillanza) delle sorgenti laser è elevatissima a paragone di quella delle sorgenti luminose tradizionali**
- **Queste tre proprietà (coerenza, monocromaticità e alta brillantezza) sono alla base del vasto ventaglio di applicazioni che i dispositivi laser hanno avuto e continuano ad avere in diversi ambiti**
- **Il laser è uno strumento universale utilizzato in ambito industriale per tagliare, saldare, marcare, forare e deformare**
- **Esso lavora in assenza di contatto e senza usura. Le applicazioni più svariate si avvalgono dei molteplici vantaggi offerti dal laser nella lavorazione dei materiali.**
- **In primo piano, tra i vantaggi di tale tecnologia ci sono sempre l'elevata versatilità, la velocità e la qualità di lavorazione, al pari della semplificazione della catena di processo nel suo insieme.**

## Teoria corpuscolare della luce

- I presupposti del laser si basano sulla relazione tra radiazioni elettromagnetiche e materia data dall'equazione:

$$h \cdot f = E_2 - E_1$$

- Ove:
  - h è la costante di Planck
  - f è la frequenza della radiazione
  - E sono i livelli energetici di un atomo

# Teoria corpuscolare della luce

- **Vi sono tre fenomeni di interazione luce-materia in cui la legge è valida:**
  - **Emissione spontanea:** un atomo passa spontaneamente da un livello di energia maggiore ad uno minore emettendo in fotone di frequenza  $f$
  - **Assorbimento:** un fotone di frequenza  $f$  interagisce con un atomo e lo porta da un livello di energia inferiore ad uno superiore
  - **Emissione stimolata:** un atomo ad un livello energetico superiore, se stimolato da un fotone di frequenza  $f$  tende a decadere emettendo un fotone della stessa frequenza nella stessa direzione
- **Tale ultimo comportamento è quello che sta alla base del principio di funzionamento del laser**

# Principio di funzionamento

- Il funzionamento del laser si basa sull'emissione stimolata di radiazione da parte degli atomi di una sostanza opportuna, detta materiale attivo.
- Gli atomi vengono dapprima “eccitati”, ovvero portati a un livello energetico superiore mediante una sorgente energetica esterna (pompaggio), quindi vengono “stimolati” a emettere l'energia immagazzinata per mezzo di una radiazione esterna di frequenza determinata. I fotoni che costituiscono la radiazione emessa hanno la frequenza caratteristica degli atomi da cui sono stati emessi, e viaggiano in fase con i fotoni stimolatori
- L'amplificazione della luce è ottenuta mediante successive riflessioni dei fotoni in una cavità risonante, essenzialmente costituita da due specchi paralleli posti alle estremità dello strumento, di cui uno totalmente e l'altro parzialmente riflettente. Durante il percorso fra uno specchio e l'altro, i fotoni colpiscono altri atomi eccitati, che a loro volta emettono nuovi fotoni, caratterizzati dalla medesima frequenza e fase dei fotoni già presenti, generando quindi una radiazione monocromatica, estremamente coerente e di alta intensità. Parte di questa radiazione (circa il 10%) viene poi fatta filtrare all'esterno attraverso lo specchio semiargentato
- Il processo di emissione stimolata fu descritto su basi teoriche da Einstein nel 1917

## **Tipi di Laser**

- **I laser vengono classificati, a seconda della natura del materiale attivo utilizzato, in:**
- **Laser a stato solido**
- **Laser a gas**
- **Laser a semiconduttore**
- **Laser a liquido**
- **Laser a elettroni liberi**

## Laser a stato solido

- I materiali più comuni impiegati nei laser a stato solido sono barrette di cristallo di rubino o di vetro drogati con neodimio
- Le estremità delle barrette sono costituite da due superfici parallele ricoperte con uno strato sottile di materiale non metallico, altamente riflettente
- I laser a stato solido offrono la più alta potenza d'uscita e solitamente generano sequenze di impulsi luminosi molto intensi e di brevissima durata
- Il pompaggio si ottiene mediante luce proveniente da tubi flash a xeno, lampade ad arco o lampade a vapori di metallo
- La gamma di frequenze dei laser a stato solido oggi è stata estesa dal caratteristico infrarosso (IR) all'ultravioletto (UV), utilizzando cristalli di diidrofosfato di potassio che funzionano da “moltiplicatori” della frequenza luminosa; se i fotoni vengono fatti interagire con un bersaglio di cristalli di ittrio posto all'interno della cavità risonante, la frequenza della luce laser in uscita può essere aumentata fino a quella caratteristica dei raggi X.

## Laser a gas

- Il materiale usato in questi laser può essere costituito da un gas puro, una miscela di gas o da vapori metallici, e solitamente è contenuto in un tubo cilindrico di vetro o di quarzo
- Due specchi sono posti alle estremità del tubo per formare la cavità risonante. I laser a gas vengono pompati mediante luce ultravioletta, fasci di elettroni, corrente elettrica o reazioni chimiche
- Il laser a elio-neon è noto per l'alta stabilità di frequenza, la purezza del colore e l'alto grado di collimazione del fascio prodotto
- I laser a diossido di carbonio sono i più efficienti e potenti laser a onda continua
- I laser ad anidride carbonica sono quelli più utilizzati in ambito industriale



## Laser a semiconduttore

- Di dimensioni particolarmente compatte, i laser a semiconduttore sono basati su una giunzione tra semiconduttori dotati di diversa conducibilità elettrica.
- La cavità risonante è confinata alla zona di giunzione per mezzo di due pareti riflettenti. Il semiconduttore più usato e più efficiente è l'arseniuro di gallio.
- Questi laser sono pompati mediante l'applicazione diretta di corrente elettrica alla giunzione, e possono operare in modalità a onda continua con un rendimento superiore al 50%. I laser a semiconduttore vengono comunemente impiegati nei lettori di compact disc (CD) e nelle stampanti laser.
- I più recenti sviluppi in questo settore sembrano promettere la realizzazione a breve di laser di dimensioni talmente piccole da poter essere inclusi in un chip di silicio. Costituiti da nanofili di solfuro di cadmio, i *nanolaser* potrebbero consentire un ulteriore sviluppo della microcomponentistica elettronica.

## Laser a liquido

- **Nei laser a liquido il materiale attivo è costituito generalmente da un colorante inorganico, chiuso in un recipiente in vetro**
- **Sono pompati con potenti lampade flash per operare nella modalità a impulsi oppure con un laser a gas ausiliario per operare nella modalità a onda continua**
- **La frequenza caratteristica di questi laser può essere regolata utilizzando un prisma posto all'interno della cavità.**

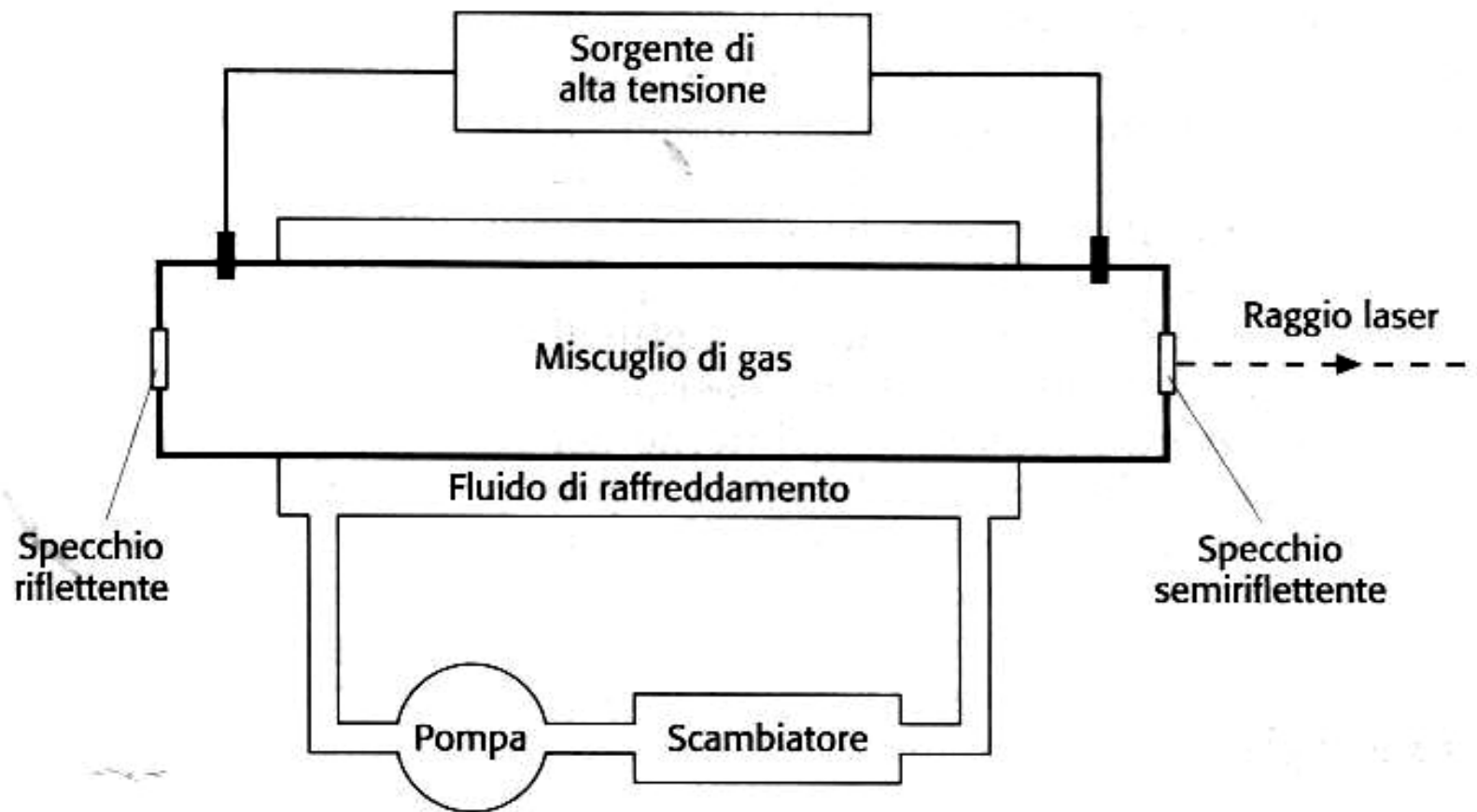
## Laser a elettroni liberi

- **Questi laser producono la luce utilizzando gli elettroni liberi di un plasma, i quali si muovono a spirale (e quindi emettono radiazione perché accelerati) seguendo le linee di un campo magnetico**
- **Furono sviluppati nel 1977 e oggi sono largamente utilizzati nella ricerca. La loro frequenza è regolabile come per i laser a colorante, ma può coprire l'intera porzione dello spettro che va dai raggi infrarossi ai raggi X**
- **Si ritiene che in poco tempo saranno in grado di generare radiazioni ad alta potenza a costi ragionevoli, mentre per ora la loro applicazione resta limitata proprio per motivi economici.**

## Laser ad anidride carbonica

- **Il laser ad anidride carbonica (laser CO<sub>2</sub>) è stato uno dei primi modelli di laser a gas ad essere inventato nel 1964, ed è oggi uno dei più usati in assoluto in campo medico e industriale**
- **I laser CO<sub>2</sub> sono i più potenti laser ad onda continua disponibili attualmente, e sono anche fra i più efficienti: il rapporto fra potenza di pompaggio e potenza emessa dal laser può arrivare al 20%**
- **Questo tipo di laser emette un fascio di luce infrarossa la cui lunghezza d'onda principale è centrata fra i 9.4 e i 10.6 micrometri**

# Schema del LASER a CO<sub>2</sub>



# Funzionamento

- **Il mezzo laser attivo (generatore laser/mezzo di amplificazione) è un tubo a scarica di gas raffreddato ad aria (o ad acqua nelle applicazioni ad alta potenza). Il gas all'interno del tubo laser è costituito da:**
  - Anidride carbonica (CO<sub>2</sub>) (circa 10-20%)
  - Azoto (N<sub>2</sub>) (circa 10-20%)
  - Idrogeno (H<sub>2</sub>) e/o (Xe) (1-2%)
  - Elio (He) (il resto della miscela gassosa)
- **La necessaria inversione di popolazione nel mezzo laser è ottenuta facendo passare una scarica elettrica nella miscela gassosa, che innesca la seguente catena di eventi:**
  - **Gli impatti degli elettroni eccitano i modi vibrazionali della molecola di azoto. Poiché questa è una molecola omonucleare, non può liberarsi dell'energia acquisita emettendo un fotone e il suo stato eccitato è perciò metastabile, cioè permane per un tempo molto lungo. Le collisioni fra molecole del gas trasferiscono l'energia dalle molecole eccitate di azoto a quelle di CO<sub>2</sub>, con efficienza sufficiente a generare la desiderata inversione di popolazione**
  - **La molecola di CO<sub>2</sub> eccitata ritorna allo stato fondamentale emettendo un fotone e contribuendo prima all'instaurazione e poi all'emissione del fascio laser.**

## Correttivi

- **Oltre all'anidride carbonica, nella cavità sono dunque presenti anche:**
  - **Azoto, che ha la funzione di migliorare l'efficienza del processo in quanto si trova ad uno stato energetico simile al superiore dell'anidride carbonica e qualora eccitato tende a trasferire energia all'anidride carbonica**
  - **Elio, che migliora la fase di diseccitazione delle molecole di anidride carbonica grazie a fenomeni di collisione**

## Costruzione

- Poiché i laser CO2 funzionano nell'infrarosso ad una lunghezza d'onda a cui il vetro non è più trasparente, sono necessari materiali speciali per la loro costruzione. Generalmente gli specchi sono fatti di silicio rivestito o di molibdeno, mentre le lenti e le finestre di uscita sono di germanio; per applicazioni ad alta potenza si usano specchi d'oro e finestre e lenti di seleniuro di zinco. Storicamente si sono usate anche finestre e lenti di sale, ma anche se molto economiche queste lenti si deterioravano con l'umidità atmosferica.
- La forma più semplice di laser CO2 laser consiste di un tubo a scarica di gas (riempito con la miscela vista) con uno specchio totalmente riflettente a una estremità ed uno specchio semiriflettente di seleniuro di zinco rivestito all'estremità di uscita
- La riflettività dello specchio accoppiatore di uscita è di solito del 5-15%
- Il laser CO2 può essere progettato per potenze che vanno da pochi milliwatt a diverse centinaia di kilowatt (kW). Vista l'alta potenza ottenibile (e il costo ragionevole del laser), i laser CO2 sono ampiamente usati in lavorazioni industriali per taglio e saldatura



## Elementi costitutivi

- **Generatore del fascio**
  - E' costituito da un mezzo attivo, da un sistema di raffreddamento e da un sistema di pompaggio
  - Emette un fascio luminoso monocromatico di diametro pari a circa 8 mm
  - Il fascio è racchiuso un tubo sotto vuoto per evitare fuoriuscita di luce nel campo dell'infrarosso e per evitare possibile dispersione a causa del pulviscolo atmosferico
- **Sistema di rinvio**
  - Costituito da uno specchio di rame raffreddato con aria o con una serpentina ad acqua
  - Consente di indirizzare il fascio ove necessario

## Elementi costitutivi

- **Sistema di focalizzazione**
  - **Riduce il fascio da 8 mm a pochi decimi**
  - **L'area di lavoro è generalmente assai piccola**
  - **Ciò che importa è la potenza specifica ( $P_s = P/S$ )**
  - **Esistono 2 sistemi base di focalizzazione:**
    - **Focale corta (potenza fino a 2,5 kW): si utilizza una lente di vetro drogato con arsenuro di gallio per ridurre l'assorbimento. La potenza specifica rimane elevata ma solo per basse profondità**
    - **Focale lunga: (potenza oltre i 2,5 kW) si utilizza un sistema di specchi concavi che consentono una profondità di azione dell'ordine di 3-4 mm**

## Elementi costitutivi

- **Gas**
  - Dopo la lente esiste un ugello per l'adduzione di gas
  - 2 scopi:
    - Raffreddamento della lente
    - Parte attiva nella lavorazione
      - Ossigeno per reagire con il metallo innalzando la temperatura (favorendo ad es. le saldature – ossitaglio al laser)
      - Azoto inerte per impedire all'aria circostante di reagire con il metallo (evita fenomeni di fragilità durante le saldature)
- **Tavola rotante**
  - Per la movimentazione del pezzo in lavorazione

## Caratteristiche

- **Il processo laser è caratterizzato da:**
  - un rendimento molto basso (max 13,5%)
  - un'alta flessibilità di utilizzo mediante le possibilità di regolazione a CN
  - un'alta affidabilità data dalla non usura
  - Diverse possibilità di impiego, primi tra tutti il taglio e la saldatura
- **Parametri essenziali sono:**
  - Lunghezza focale della lente
  - Tipo e portata del gas
  - Potenza specifica emessa
  - Lunghezza d'onda relativa tra fascio e pezzo

# Applicazioni industriali del LASER

- Il laser è caratterizzato da flussi termici elevatissimi ( $10^9$  W/cm<sup>2</sup>) se paragonato ad altre tecnologie: si pensi che il cannello ossiacetilenico è caratterizzato da potenze dell'ordine di  $10^4$  W/cm<sup>2</sup>
- Potenti fasci laser possono essere concentrati in zone piccolissime e quindi possono essere usati per riscaldare, fondere o vaporizzare una sostanza con grande precisione
- Sono utilizzati, ad esempio, per forare diamanti, rettificare parti di macchine, tagliare componenti elettronici di microcircuiti, trattare con il calore i chip semiconduttori, sintetizzare nuovi materiali e condurre esperimenti sulla fusione nucleare.
- I potenti e brevissimi impulsi prodotti da un laser rendono anche possibile la fotografia ad alta velocità, con tempi di esposizione dell'ordine del trilionesimo (un millesimo di miliardesimo) di secondo
- L'alta direzionalità del raggio laser è sfruttata per controllare la perfetta linearità di una strada o di un edificio
- Le due principali applicazioni rimangono comunque il taglio e la saldatura

## Saldatura laser

- I due pezzi da saldare sono semplicemente accostati l'uno all'altro
- La zona di saldatura è avvolta da un gas di protezione avente lo scopo di:
  - Proteggere la lente del laser dagli spruzzi
  - Evitare contaminazioni dal contatto con l'atmosfera
- Nell'impatto sul metallo i fotoni cedono energia agli atomi dello strato più esterno che aumentano la loro energia cinetica e quindi la loro temperatura
- Si manifesta il processo di creazione di isoterme "di fusione" tipico dei processi di saldatura

## Saldatura laser

- **I meccanismi di formazione del giunto sono 2**
  - **Per basse densità di potenza od elevate velocità non sussistono le condizioni per l'ebollizione del materiale e la saldatura avviene come negli altri casi per fusione del materiale**
  - **Per densità di potenza elevate o basse velocità si ha una saldatura per "key-hole" ove il metallo arriva alla vaporizzazione e viene forato completamente.**

## Saldatura laser

- **Se il processo di assorbimento cresce con la temperatura fino a giungere ad avere un “key hole” si ha un foro ove il metallo coesiste allo stato liquido e di plasma. Ciò avviene per potenze superiori a  $10^8$  W/cm<sup>2</sup>**
- **La potenza del fascio determina la pressione sulle pareti del foro che vede la presenza di vortici**
- **Al procedere del fascio se la pressione sulle pareti del metallo fuso è sufficientemente alta si ha un taglio, altrimenti una saldatura**



## Vantaggi

- **Possibilità di intervento termico su aree estremamente limitate**
- **Minime distorsioni termiche dei materiali in lavorazione**
- **Densità di potenza superiore ad ogni altra fonte di calore oggi disponibile**
- **Possibilità di operare senza contatto con il pezzo anche in zone di difficile accesso ed in qualunque posizione**
- **Possibilità di lavorare in qualunque atmosfera**
- **Facilità di automazione**

# Taglio laser

- **Esistono diverse modalità di taglio laser:**
  - **Taglio per vaporizzazione quando il materiale vaporizzato fuoriesce dal foro creato dall'effetto "key-hole" e questo rimane aperto al passaggio del fascio**
    - **Si è in presenza di gas inerte**
    - **Funziona per metalli con bassa temperatura di vaporizzazione**
    - **Il metallo vaporizza senza fondere**
    - **Il gas allontana il vapore prodotto**
    - **La superficie tagliata presenta un'ottima finitura**

## Taglio laser

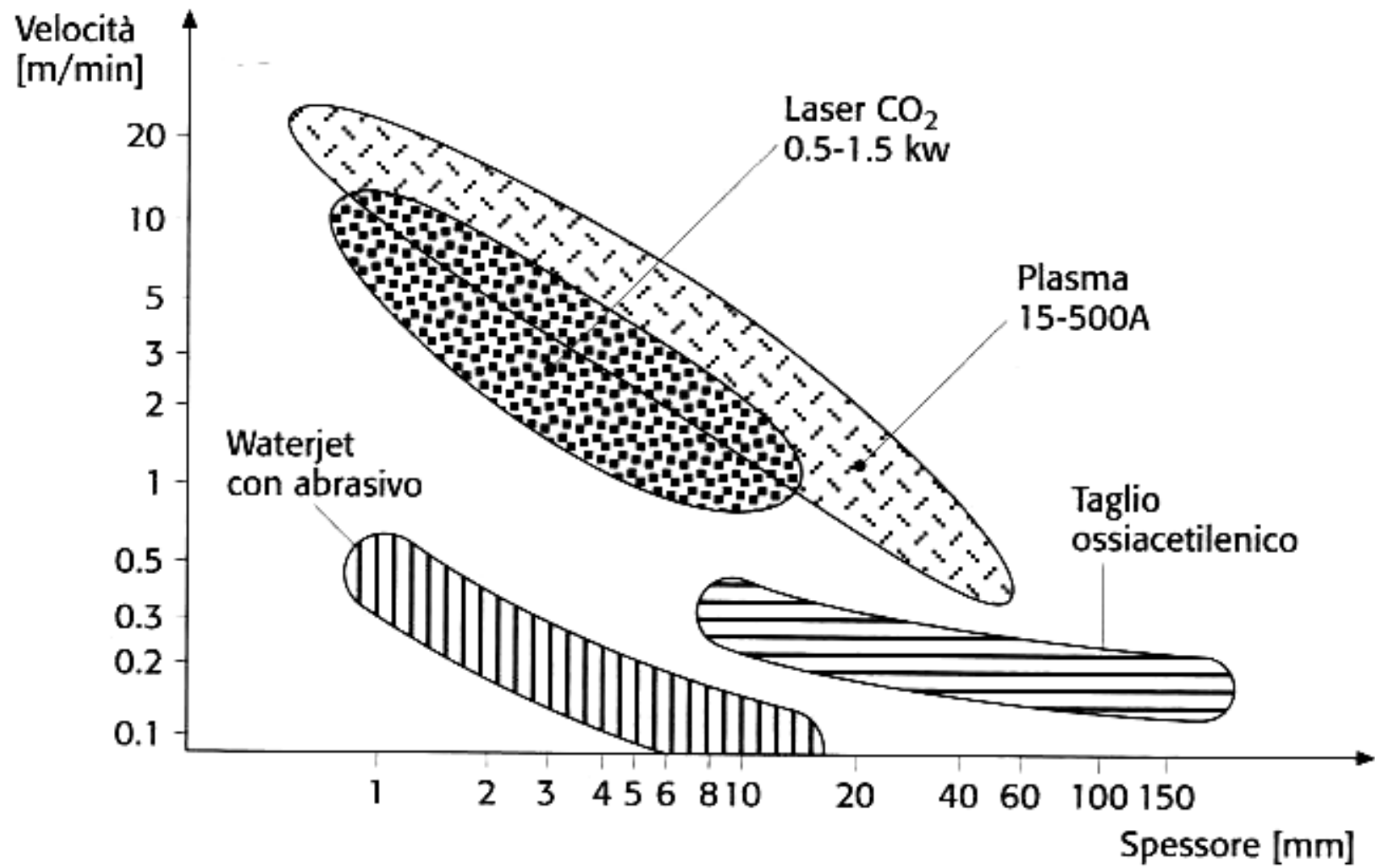
- **Taglio per ossidazione quando si è in presenza di ossigeno (ossitaglio) e si innesca una reazione esotermica che accresce il calore nell'area di processo:**
  - **La temperatura sale progressivamente e a 1300°C si innesca l'ossidazione che si propaga a 30 mm/sec, ovvero a velocità superiore al fascio fino a che la temperatura non scende sotto i 1300 °C**
  - **La superficie di taglio ha forma ondulata**
  - **Per velocità del fascio superiore a 30 mm/sec non si ha più ossitaglio**

## Taglio laser

- **Taglio per fusione** quando la potenza è inferiore, il metallo è fuso per tutto lo spessore ed è espulso generando il taglio
- **Taglio per frattura** in alcuni materiali fragili (vetro, ceramica, ecc...) quando il calore introdotto genera espansione del materiale nell'area interessata e dunque tensioni di trazione localizzate che provocano episodi di frattura

## **Vantaggi**

- **Larghezze del taglio molto ridotte**
- **Buona finitura delle superfici**
- **Assenza di bave**
- **Elevata velocità di lavorazione**
- **Assenza di usura di stampi e utensili**
- **Alta flessibilità ed automazione grazie all'uso di dispositivi CN**
- **Possibilità di agire su qualunque materiale**



## Laser allo stato solido

- Sono caratterizzati da potenze laser superiori a 6 Kwatt
- Il 20 per cento della potenza laser viene impiegato come riserva, in modo che sul pezzo da lavorare siano sempre disponibili le potenze laser specificate.
- I laser allo stato solido pompati a lampada sono apparecchiature laser ad emissione continua per la saldatura di cordoni ed il taglio
- I laser allo stato solido pompati a diodi hanno un grado di rendimento elevato. Con potenze laser fino a 4500 Watt sul pezzo si prestano ugualmente bene alla saldatura di cordoni ed al taglio.
- Il laser a dischi si distingue per una qualità del raggio particolarmente buona che permette di ottenere grandi distanze di lavoro ed applicazioni con ottiche di focalizzazione agili.

# Laser allo stato solido

- I laser allo stato solido si sono affermati nel corso di decenni in tutti settori merceologici, dalle apparecchiature di precisione, passando per l'elettronica, l'elettrotecnica, la medicina, fino alla realizzazione di utensili e stampi ed all'indotto dell'industria automobilistica, in virtù del loro rendimento ed affidabilità
- Grazie alla struttura modulare dell'ottica e ad una gamma vastissima di ottiche di lavorazione, essi si prestano a qualsiasi esigenza di lavorazione
- Un'apparecchiatura laser è in grado di saldare contemporaneamente in più punti tramite la ripartizione del raggio
- *Un laser a rubino è un laser che usa un cristallo di rubino sintetico come mezzo di amplificazione della luce: fu il primo tipo di laser inventato, nel 1960. Produce impulsi di luce visibile a una lunghezza d'onda di 694.3 nm, che appare rosso scuro all'occhio umano. Gli impulsi hanno durata dell'ordine del millisecondo.*
- *L'uso dei laser a rubino è andato decadendo con la scoperta di migliori materiali laser*



## Struttura ottica

- **La struttura dell'ottica all'interno di un apparecchio laser è un elemento fondamentale:**
  - **Grazie ad un sistema modulare di componenti ottici, è possibile suddividere, rinviare, commutare o bloccare o misurare il raggio.**
  - **Per ogni ciclo di lavorazione, si può combinare la struttura delle ottiche più adatta. Uno o più cavi ottici guidano la luce laser dalla sorgente al punto di lavorazione, dove le ottiche di focalizzazione provvedono a veicolarla in un fascio per la saldatura, il taglio o la foratura.**

## **Impianti automatizzati per il taglio laser**

- **Sono ormai diffusi impianti automatizzati per il taglio laser**
- **L'automazione coinvolge:**
  - **Il dispositivo di carico automatico dei fogli di lamiera**
  - **Il dispositivo di scarico automatico dei semilavorati**
- **Per diverse ore la macchina può lavorare in assenza di un operatore**

# Sviluppi della tecnologia laser

- **Le principali linee di sviluppo legate alla tecnologia laser in ambito industriale sono:**
  - **Lo sviluppo e sperimentazione di tecnologie laser per applicazioni alle lavorazioni meccaniche e al trattamento di materiali**
  - **La qualificazione del processo di saldatura laser attraverso prove di caratterizzazione microstrutturale e meccanica**
  - **Lo sviluppo di servizi di consulenza ad imprese per l'introduzione di processi innovativi con tecnologia laser**
  - **Lo sviluppo di laboratori sperimentali di applicazioni laser per assistere un ampio range di processi nelle applicazioni di potenza:**
    - **Il taglio (tecnologia ormai consolidata) su materiali metallici e ceramici sino a spessori dell'ordine dei 10-15 mm**
    - **La saldatura (tecnologia in forte crescita) con e senza materiale d'apporto su acciaio, alluminio e titanio con spessori fino a 10-15 mm**
    - **I trattamenti superficiali (tecnologia in fase introduttiva) consistenti in riporti in materiali duri su acciaio e titanio.**

## Altri sviluppi innovativi

- **Studi di applicazioni del fascio ottico a leghe leggere di alluminio per realizzazioni navali ed aerospaziali**
- **Saldatura di componenti strutturali impiegati nel settore aeronautico**
- **Sviluppo di componentistica e attrezzature ausiliarie**
- **Saldatura di elementi strutturali in acciaio e taglio di forme paraboliche per concentratori solari**
- **Attività di formazione in collaborazione con altri istituti e enti di ricerca**
- **Sperimentazione sul taglio di acciaio inossidabile, al carbonio e titanio estesa a diversi spessori;**
- **Ricerca sulla saldatura di leghe di titanio di piccolo spessore**
- **Studio di processi di rifusione superficiale di riporti sottili in lega di titanio nitrurata, eseguiti con tecnologia plasma su Titanio e Acciai INOX**