

LASER A CO₂

Funzionamento e principi fisici



Schema semplificato di una sorgente laser CO₂

1. Cos'è un laser CO₂

Il laser a CO₂ è un laser a gas che utilizza una miscela di anidride carbonica (CO₂), azoto (N₂) ed elio (He) come mezzo attivo. È uno dei laser industriali più diffusi per il taglio, l'incisione e la saldatura dei materiali, grazie alla sua efficienza elevata (10-20%) e alla possibilità di generare potenze molto alte, da pochi Watt fino a decine di kW.

La lunghezza d'onda emessa è 10,6 μm, nella regione dell'infrarosso lontano, non visibile all'occhio umano.

2. Principio fisico: l'emissione stimolata

Il funzionamento si basa sul fenomeno dell'emissione stimolata di radiazione (da cui l'acronimo LASER: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation).

Ruolo dei tre gas

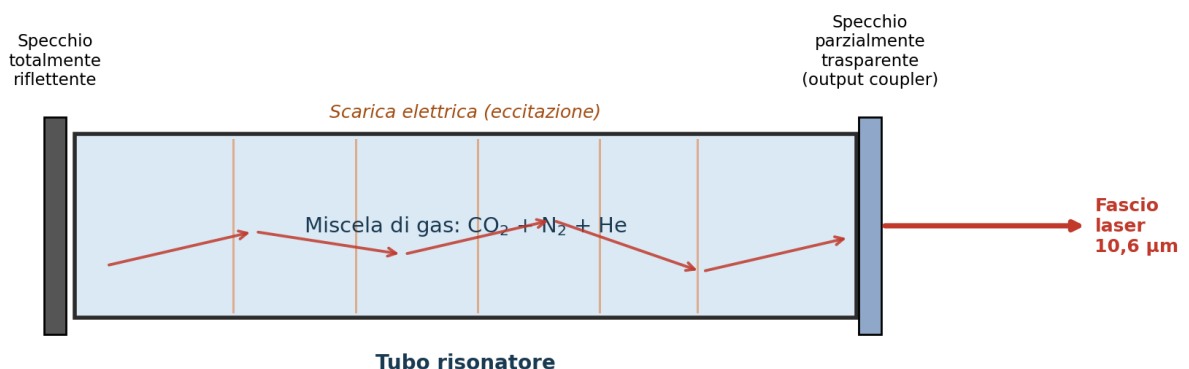
- Azoto (N₂): viene eccitato per collisione elettronica nella scarica elettrica e trasferisce efficacemente energia vibrazionale alle molecole di CO₂ (i livelli energetici dei due gas sono quasi coincidenti — "risonanza quasi perfetta").
- Anidride carbonica (CO₂): è il vero mezzo attivo. Riceve energia dall'azoto e passa a uno stato eccitato; ritornando allo stato fondamentale emette un fotone a 10,6 μm.
- Elio (He): ha un'elevata conducibilità termica e favorisce il raffreddamento del gas e lo svuotamento rapido dei livelli energetici bassi della CO₂, aumentando l'efficienza e permettendo il funzionamento continuo.

3. La cavità risonante

Il gas è contenuto in un tubo (o in una cavità più complessa nei laser ad alta potenza) chiuso da due specchi: uno specchio totalmente riflettente e uno specchio parzialmente trasparente (output coupler), da cui esce il fascio.

Gli elettroni accelerati da una scarica elettrica (in corrente continua, RF o a impulsi) eccitano le molecole di N₂ e CO₂. I fotoni emessi rimbalzano tra i due specchi, stimolando l'emissione di altri fotoni identici in fase, direzione e lunghezza d'onda: si crea così un'amplificazione coerente della luce.

Schema della cavità risonante di un laser CO₂



Configurazioni costruttive

- Laser sigillati (sealed tube): economici, usati nelle macchine di piccola/media potenza (marcatura, incisione, taglio leggero).
- Laser a flusso assiale/trasversale (fast axial/transverse flow): il gas viene fatto circolare e raffreddato continuamente, per potenze medio-alte.
- Laser eccitati in RF (slab laser): eccitazione a radiofrequenza, elevata qualità del fascio, usati nell'industria del taglio metalli.

4. Percorso ottico del fascio

Una volta generato, il fascio deve raggiungere il pezzo da lavorare attraverso un sistema di specchi e una lente (o specchio parabolico) di focalizzazione:

- Specchi di deviazione: guidano il fascio dalla sorgente alla testa di taglio, spesso lungo assi mobili (X-Y).
- Lente di focalizzazione: concentra il fascio in un punto molto piccolo (spot size), tipicamente tra 0,1 e 0,3 mm di diametro, aumentando enormemente la densità di potenza (irradianza), che può superare 10^6 – 10^7 W/cm².

La qualità del fascio (parametro M^2 , vicino a 1 per i laser CO₂ ben progettati) determina quanto piccolo e definito può essere lo spot focale.

Percorso ottico del fascio: dalla sorgente alla testa di taglio

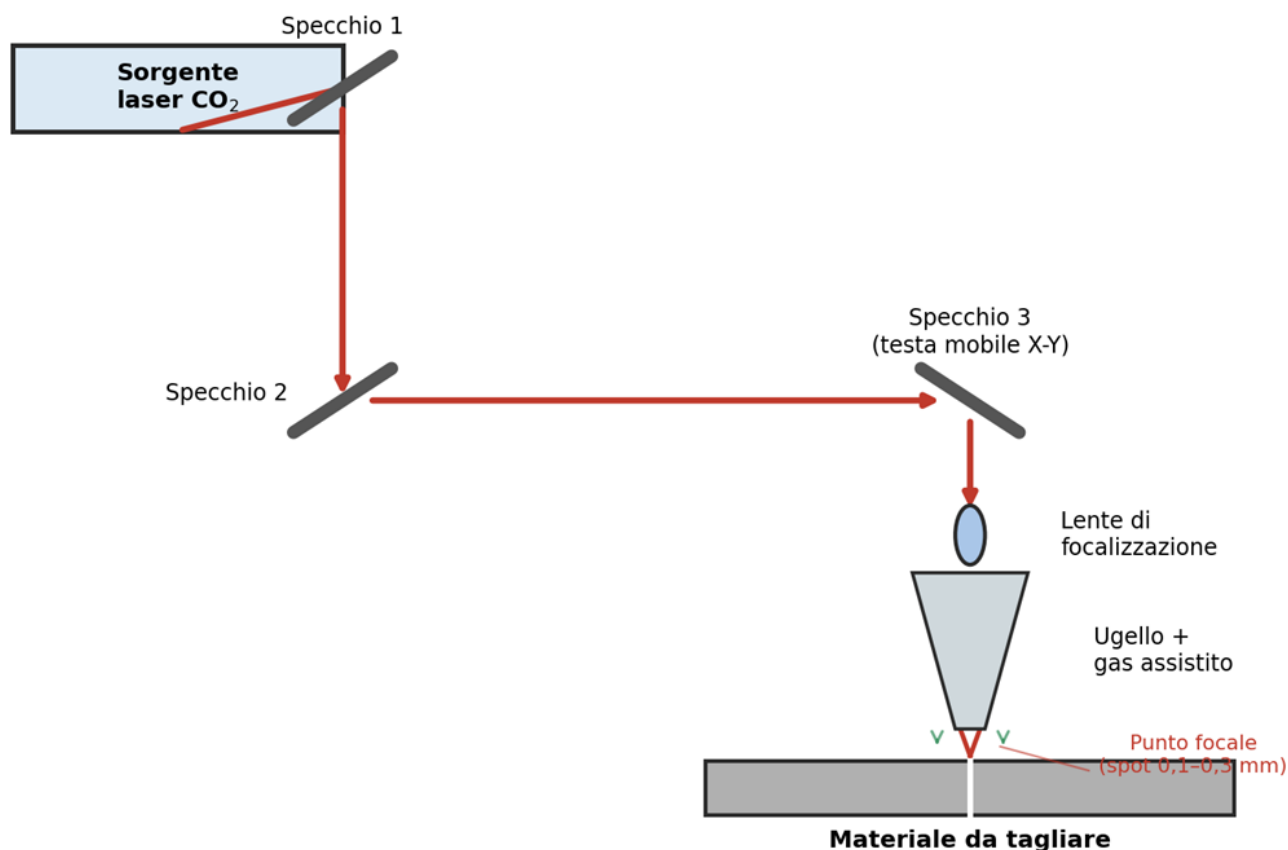


Figura 2 — Percorso ottico del fascio dalla sorgente alla testa di taglio

5. Come avviene il taglio

Il taglio non è un fenomeno puramente termico semplice, ma combina diversi meccanismi:

- Assorbimento: l'energia del fascio viene assorbita dalla superficie del materiale, che si riscalda rapidamente.
- Fusione e/o vaporizzazione: a seconda del materiale e della potenza, si forma un bagno di fuso o il materiale sublima direttamente.
- Espulsione del materiale fuso tramite gas assistito: un ugello coassiale al fascio soffia un gas ad alta pressione nel punto di taglio.

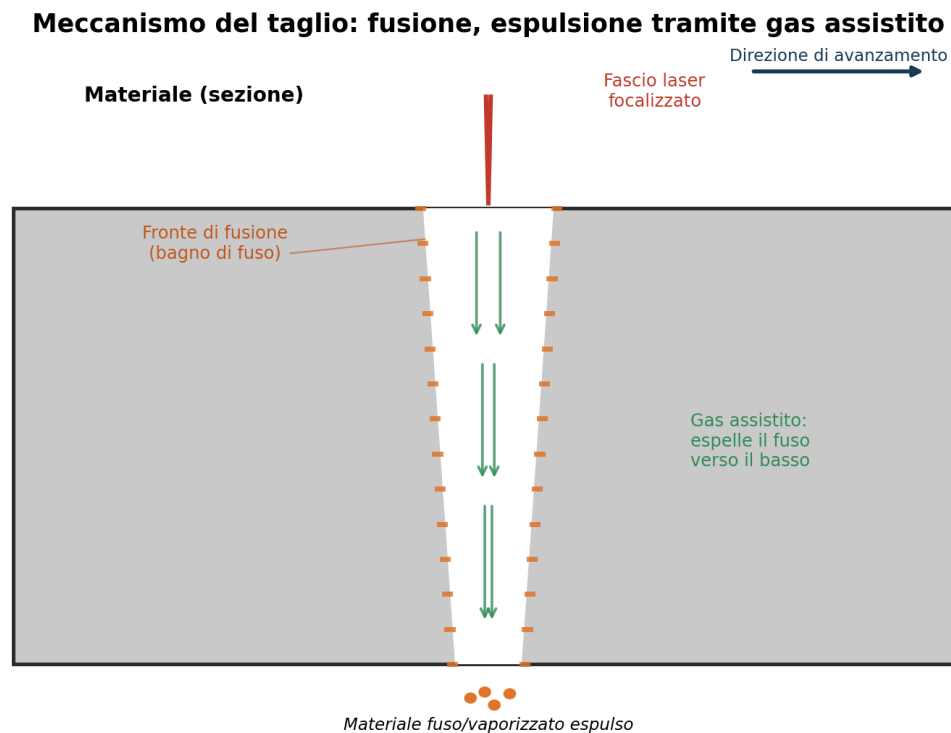


Figura 3 — Meccanismo del taglio: fusione ed espulsione tramite gas assistito

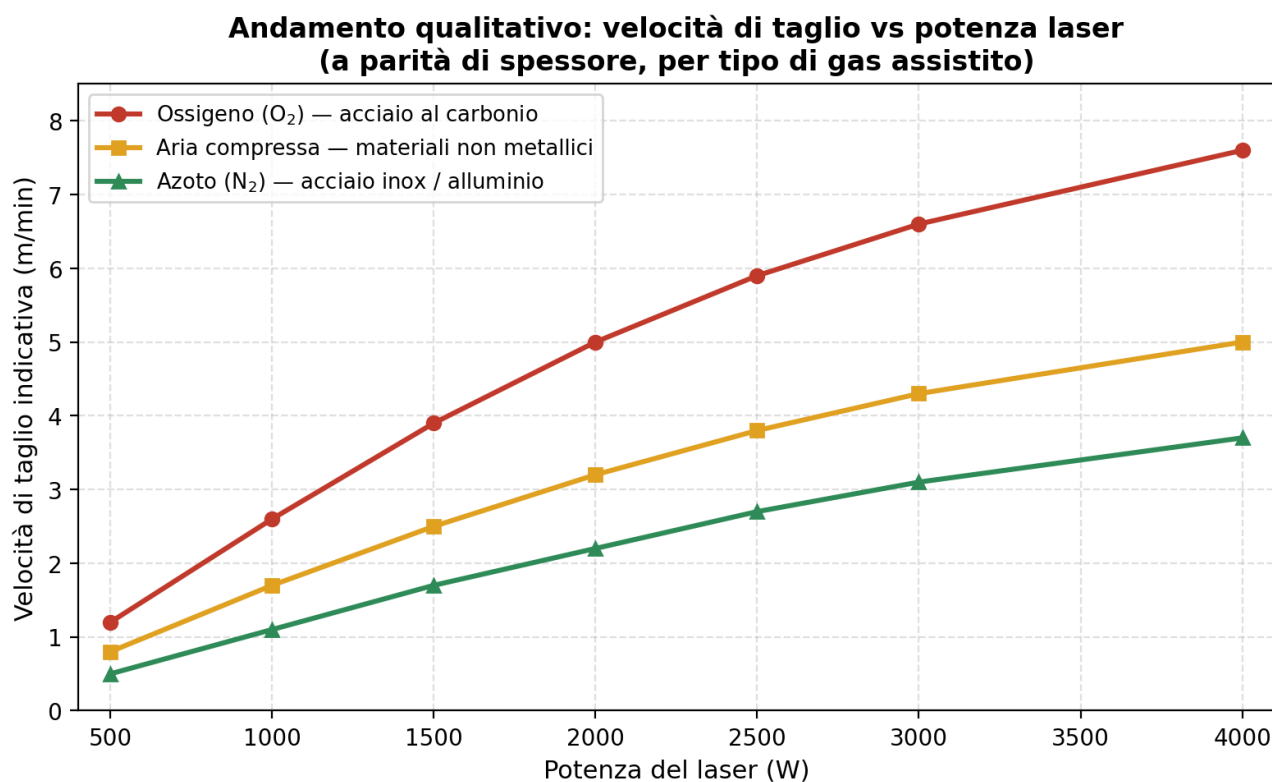
Tipologie di gas assistito

Gas	Materiali tipici	Caratteristiche
Ossigeno (O ₂)	Acciaio al carbonio	Reazione esotermica: più veloce, bordo leggermente ossidato
Azoto (N ₂)	Acciaio inox, alluminio	Gas inerte, bordi puliti senza ossidazione, richiede più potenza
Aria compressa	Legno, plastica, tessuto, plexiglass	Economica, per materiali non metallici

6. Parametri di processo principali

Parametro	Effetto principale
Potenza laser (W)	Energia disponibile per fondere/vaporizzare il materiale
Velocità di taglio	Tempo di esposizione del materiale al fascio
Posizione del fuoco	Determina dove si concentra la massima densità di energia
Pressione del gas assistito	Espulsione del fuso e controllo dell'ossidazione
Frequenza di impulso (PPI)	Nei laser pulsati, regola il duty cycle e la qualità del bordo
Diametro dell'ugello	Influenza la forma del getto di gas e la qualità del taglio

Il grafico seguente illustra, in modo qualitativo, come la velocità di taglio tenda ad aumentare con la potenza del laser, con un andamento diverso a seconda del gas assistito impiegato:



Nota: curve didattiche illustrative, non dati di macchina reali.

Figura 4 — Andamento qualitativo della velocità di taglio in funzione della potenza (curve didattiche illustrative)

7. Materiali lavorabili

Il laser CO₂ è particolarmente efficace su materiali non metallici (perché assorbono bene la lunghezza d'onda 10,6 μm): legno, acrilico, tessuti, carta, cuoio, alcune plastiche, vetro, ceramica.

Sui metalli funziona ma con minore efficienza rispetto ai laser a fibra (1,06 μm), che sono oggi preferiti nell'industria metalmeccanica per la loro maggiore assorbanza nei metalli e minori costi di esercizio.

8. Vantaggi e limiti

Vantaggi	Limiti
Fascio di alta qualità e buona focalizzabilità	Minore efficienza rispetto ai laser a fibra sui metalli
Ottimo per materiali organici e non metallici	Necessità di manutenzione della cavità ottica
Precisione elevata, zona termicamente alterata ridotta	Consumo di gas e, nei sistemi a flusso, energia di circolazione
Nessun contatto meccanico con il pezzo	

9. Sicurezza

I laser CO₂ ad alta potenza rientrano generalmente in classe 4: possono causare danni oculari e ustioni anche per riflessione diffusa. È necessario l'uso di:

- Occhiali di protezione specifici per 10,6 μm
- Cabine schermate e interblocchi di sicurezza
- Sistemi di aspirazione fumi (i materiali vaporizzati possono essere tossici, specie plastiche e materiali trattati)

LASER A FIBRA OTTICA

Funzionamento e principi fisici



1000 W

Come una sorgente laser trasforma la luce in un fascio capace di tagliare il metallo: dalla generazione del fascio alla zona di taglio.

1 Cos'è il taglio laser a fibra

Il taglio laser a fibra (fiber laser cutting) è una tecnologia di taglio industriale che usa un fascio di luce laser, generato in una fibra ottica drogata con terre rare, per fondere o vaporizzare localmente un materiale — tipicamente lamiera metallica. Rispetto al laser a CO₂, la sorgente a fibra ha un'efficienza elettrica più alta, richiede meno manutenzione e taglia molto bene i metalli riflettenti come alluminio e ottone.

2 Schema generale del sistema

Un impianto di taglio laser a fibra è composto da quattro blocchi principali: la **sorgente laser**, che genera il fascio; il **cavo in fibra ottica**, che lo trasporta; la **testa di taglio**, che lo focalizza sul pezzo; e il **sistema CNC**, che muove la testa lungo il profilo da tagliare.

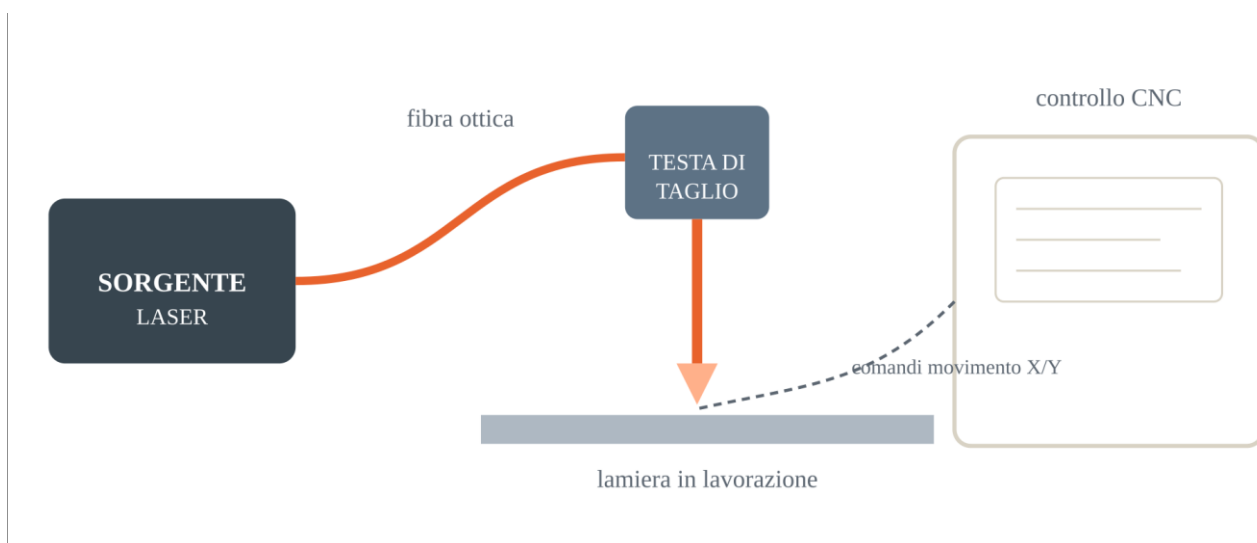


Fig. 1 — Percorso del fascio dalla sorgente alla lamiera, con il CNC che guida la traiettoria di taglio.

3 Come si genera il fascio

Il cuore della sorgente è un tratto di fibra ottica il cui nucleo è drogato con ioni di **itterbio (Yb^{3+})**. Diversi **diodi laser di pompa** (a semiconduttore) iniettano energia luminosa nella fibra: gli ioni di itterbio assorbono questa luce e la riemettono a una lunghezza d'onda specifica, circa **1064–1080 nm** (infrarosso vicino). Specchi (reticoli di Bragg) posti alle estremità della fibra formano una cavità risonante che amplifica progressivamente la luce a ogni passaggio, fino a produrre un fascio coerente e ad altissima densità di potenza.

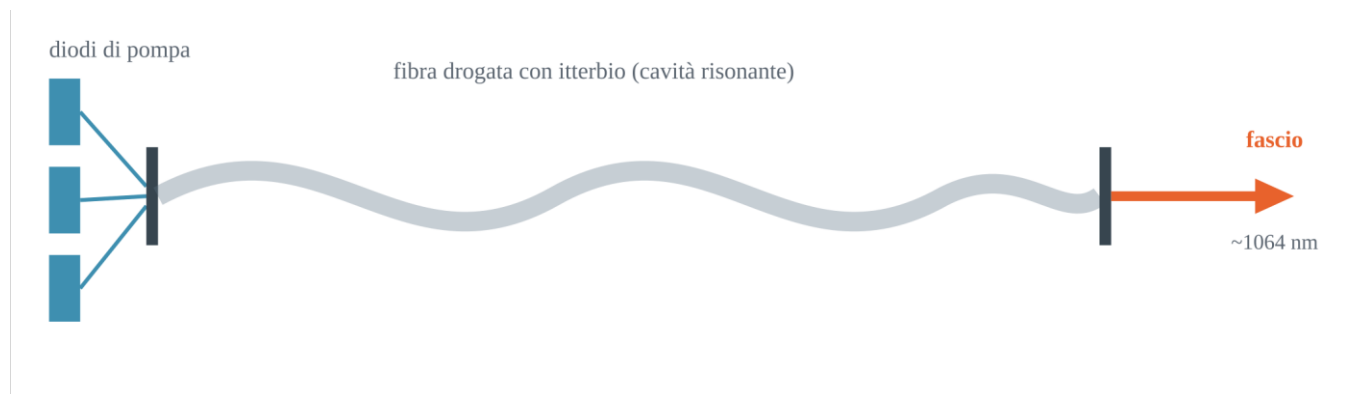


Fig. 2 — Schema del risuonatore: i diodi di pompa eccitano la fibra attiva, che amplifica la luce fino al fascio in uscita.

4 La testa di taglio

Il fascio, ancora relativamente largo, arriva alla testa di taglio dove una **lente di collimazione** lo rende parallelo e una **lente di focalizzazione** lo concentra in un punto di pochi decimi di millimetro. Attorno al fascio focalizzato, un **ugello** soffia un getto di **gas di assistenza** coassiale, che espelle il materiale fuso dal taglio e protegge le lenti dagli spruzzi.

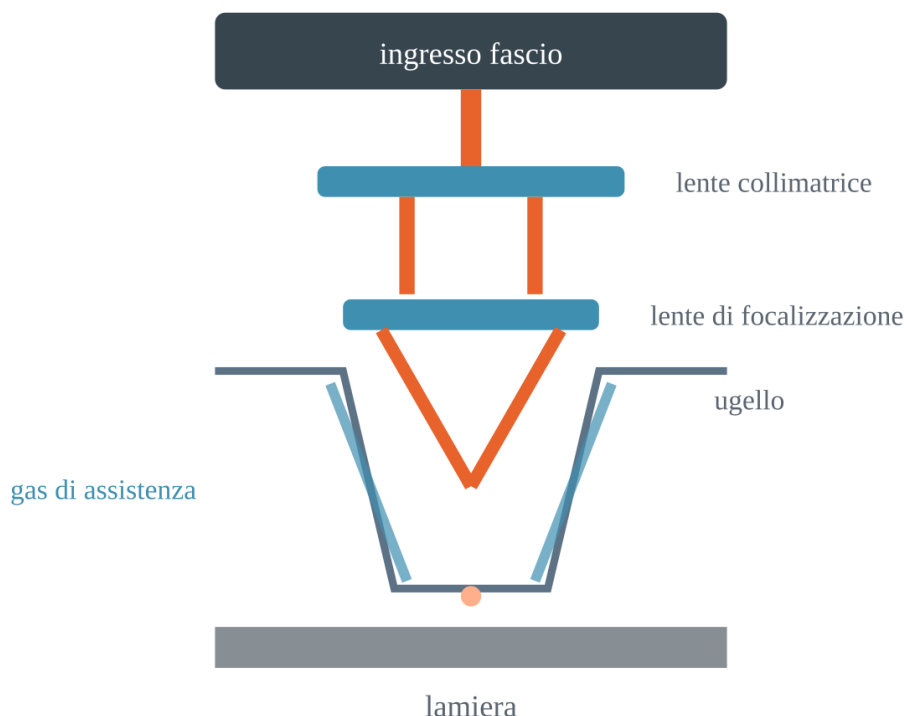


Fig. 3 — Sezione della testa di taglio: collimazione, focalizzazione e getto di gas coassiale al fascio.

5 Il processo di taglio

Nel punto di focalizzazione la densità di potenza raggiunge diversi milioni di W/cm², sufficiente a fondere (o vaporizzare) quasi istantaneamente il materiale. Il gas di assistenza espelle il fuso dal basso verso l'alto del taglio, mentre la testa si sposta lungo il profilo programmato, generando una fessura di taglio detta **kerf**, larga in genere 0,1–0,3 mm.

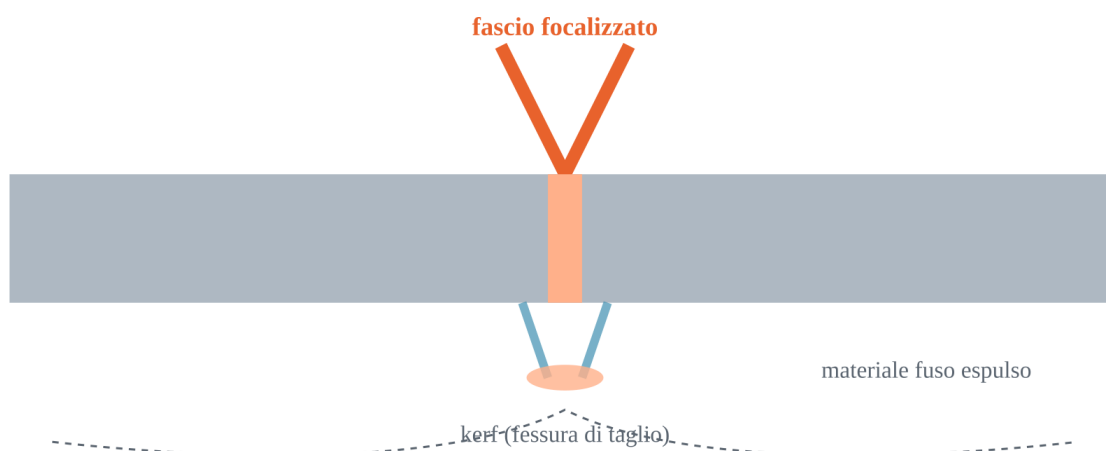


Fig. 4 — Zona di taglio: fusione locale del materiale ed espulsione tramite il getto di gas.

Il tipo di gas usato cambia il risultato: **ossigeno** favorisce una reazione esotermica che accelera il taglio dell'acciaio al carbonio ma ossida il bordo; **azoto** produce bordi puliti senza ossidazione, adatto ad acciaio inox e alluminio; **aria compressa** è economica ed è usata su materiali sottili.

6 Parametri di taglio principali

Parametro	Effetto
Potenza del laser	Determina lo spessore massimo tagliabile e la velocità possibile
Velocità di taglio	Se troppo alta lascia il materiale non tagliato; se troppo bassa allarga il kerf e brucia i bordi
Posizione del fuoco	Va regolata in base allo spessore per ottenere un taglio pulito su tutto lo spessore
Pressione del gas	Deve essere sufficiente a espellere il fuso senza creare turbolenza

7 Fibra vs CO₂: perché si è affermata

	Laser a fibra	Laser a CO ₂
Efficienza elettrica	~30–45%	~10–15%
Metalli riflettenti (Al, Cu, Ottone)	Ottima	Difficile
Manutenzione	Bassa (stato solido)	Più alta (specchi, gas)
Materiali non metallici	Limitato	Migliore (legno, plastica, tessuti)

8 Spessore tagliabile in singola passata con laser da 1000W

Materiale	Spessore Massimo (1000W)	Gas di Assistenza Tipico	Note Tecniche e Dinamica di Taglio
Acciaio al Carbonio (S235, S355, ecc.)	10 mm - 12 mm	Ossigeno (O2)	Il processo sfrutta la reazione esotermica dell'ossidazione per apportare calore extra, permettendo di tagliare spessori nettamente superiori rispetto agli altri metalli.
Acciaio Inossidabile (AISI 304, 316, ecc.)	4 mm - 5 mm	Azoto (N2)	Taglio per pura fusione. L'azoto inerte ad alta pressione espelle il fuso e previene l'ossidazione dei bordi, garantendo una finitura lucida che non richiede riprese meccaniche.
Alluminio e Leghe	3 mm - 4 mm	Azoto (N2) o Aria compressa	L'alluminio è un ottimo conduttore termico e, allo stato solido, altamente riflettente alla lunghezza d'onda della fibra. L'energia viene assorbita efficacemente solo quando si innesca la fusione locale (keyhole).
Lamiere Zincate	3 mm - 4 mm	Azoto (N2)	Prestazioni simili all'acciaio inox. Il punto di vaporizzazione dello zinco è molto più basso di quello di fusione dell'acciaio: richiede parametri ottimizzati per evitare micro-esplosioni del rivestimento o l'inquinamento delle lenti protettive.
Ottone	2 mm - 3 mm	Azoto (N2)	Metallo altamente riflettente. La testa di taglio deve preferibilmente essere dotata di sensori o sistemi di protezione contro le riflessioni di ritorno (back-reflection) per salvaguardare il risonatore.
Rame	1 mm - 1.5 mm	Ossigeno (O2) ad alta pressione	Tra i materiali più complessi da tagliare a causa della conducibilità termica estrema e dell'altissima riflettività infrarossa. L'ossigeno aiuta ad aumentare l'assorbimento superficiale rispetto all'azoto.

Confronto Laser: Fibra vs CO2

Taglio laser CO2 vs Taglio laser fibra

Il laser a CO2 e il laser a fibra ottica sono le due tipologie di laser più utilizzate nel settore industriale e una tra le tecniche che hanno rivoluzionato il mondo della carpenteria.



I laser CO2 possono tagliare i metalli, ma solo se si tratta di macchinari industriali con potenze nell'ordine dei **Kilowatt** (tipicamente dai 1500W ai 6000W), non con i piccoli sistemi da 90W usati per legno o acrilico.

Fino a una decina di anni fa, prima che la tecnologia a fibra ottica dominasse il mercato, i grandi laser CO2 erano lo standard assoluto per il taglio industriale della lamiera.

Tuttavia, il taglio dei metalli con il CO2 presenta dinamiche fisiche molto diverse rispetto alla fibra:

- **Il problema della riflessione:** Il laser CO2 lavora a una lunghezza d'onda di $10,6\ \mu\text{m}$ (infrarosso lontano). A questa frequenza, i metalli si comportano quasi come specchi. Per "bucare" la superficie e innescare il taglio serve un'enorme densità di potenza iniziale. La fibra ($1,06\ \mu\text{m}$) viene invece assorbita dai metalli con un'efficienza molto maggiore.
- **Limiti sui materiali:** Un CO2 industriale da 4000W taglia in modo eccellente l'acciaio al carbonio e l'acciaio inox. Tuttavia, fatica enormemente con metalli altamente riflettenti come l'alluminio, e **non può tagliare rame o ottone**. Il rischio è che il raggio venga riflesso all'indietro dalla lastra di rame, risalendo il percorso ottico e distruggendo le lenti e il risonatore della macchina.
- **Gas di assistenza obbligatorio:** Come per la fibra, per tagliare l'acciaio al carbonio serve ossigeno ad alta pressione per innescare una reazione esotermica (bruciare il metallo), mentre per l'inox si usa l'azoto per spazzare via il fuso senza ossidare i bordi.
- **Complessità e Costi:** A differenza del laser a fibra (che trasporta la luce in un cavo flessibile senza manutenzione), il laser CO2 richiede una miscela di gas (Elio, Azoto, CO2) per generare il raggio e un delicato sistema di specchi volanti per portarlo fino alla testa di taglio. Consuma inoltre molta più energia elettrica a parità di resa.

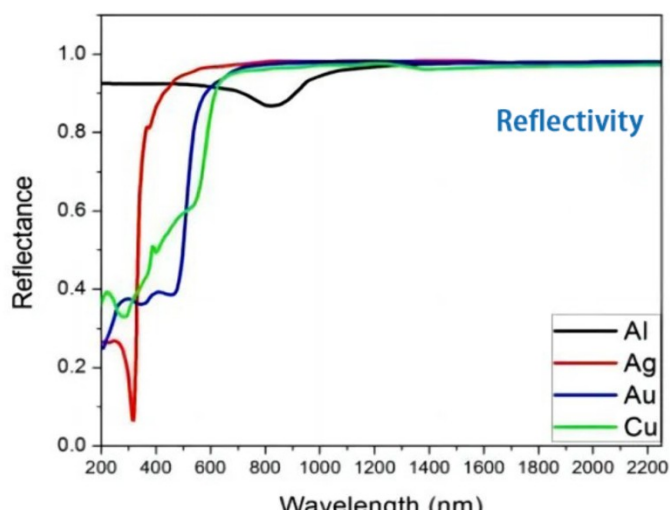
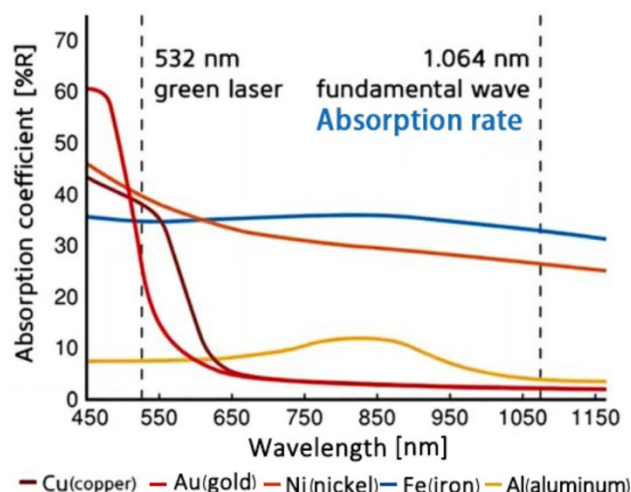
Materiale	Spessore Massimo (1000W)	Gas di Assistenza Tipico	Note Tecniche e Dinamica di Taglio
Acciaio al Carbonio (S235, S355, ecc.)	10 mm - 12 mm	Ossigeno (O2)	Il processo sfrutta la reazione esotermica dell'ossidazione per apportare calore extra, permettendo di tagliare spessori nettamente superiori rispetto agli altri metalli.
Acciaio Inossidabile (AISI 304, 316, ecc.)	4 mm - 5 mm	Azoto (N2)	Taglio per pura fusione. L'azoto inerte ad alta pressione espelle il fuso e previene l'ossidazione dei bordi, garantendo una finitura lucida che non richiede riprese meccaniche.
Alluminio e Leghe	3 mm - 4 mm	Azoto (N2) o Aria compressa	L'alluminio è un ottimo conduttore termico e, allo stato solido, altamente riflettente alla lunghezza d'onda della fibra. L'energia viene assorbita efficacemente solo quando si innesca la fusione locale (keyhole).
Lamiere Zincate	3 mm - 4 mm	Azoto (N2)	Prestazioni simili all'acciaio inox. Il punto di vaporizzazione dello zinco è molto più basso di quello di fusione dell'acciaio: richiede parametri ottimizzati per evitare micro-esplosioni del rivestimento o l'inquinamento delle lenti protettive.
Ottone	2 mm - 3 mm	Azoto (N2)	Metallo altamente riflettente. La testa di taglio deve preferibilmente essere dotata di sensori o sistemi di protezione contro le riflessioni di ritorno (back-reflection) per salvaguardare il risonatore.
Rame	1 mm - 1.5 mm	Ossigeno (O2) ad alta pressione	Tra i materiali più complessi da tagliare a causa della conducibilità termica estrema e dell'altissima riflettività infrarossa. L'ossigeno aiuta ad aumentare l'assorbimento superficiale rispetto all'azoto.

Materiale	Laser a Fibra	Laser CO2	Dinamica Operativa
Acciaio al Carbonio	Eccellente	Eccellente	Entrambi ottimi. La fibra è nettamente più veloce su spessori sottili e medi. Il CO2 mantiene storicamente una qualità del bordo leggermente più liscia su lamiere molto spesse (oltre 15-20 mm).
Acciaio Inox	Eccellente	Buono	La fibra offre velocità di taglio notevolmente superiori e penetrazione più rapida. Entrambi richiedono l'uso di azoto ad alta pressione come gas di assistenza.
Alluminio	Ottimo	Scarso	L'alluminio riflette pesantemente la lunghezza d'onda di 10,6 µm del CO2, riducendo drasticamente l'efficienza e rallentando il processo. La fibra lo lavora senza alcuna difficoltà.
Rame e Ottone	Buono	Non lavorabile	Rischio critico di back-reflection: la quasi totalità del raggio CO2 viene riflessa dal materiale come uno specchio, con il rischio di distruggere il risonatore e le lenti interne. La fibra è l'unica opzione industriale.

Parametro	Laser a Fibra	Laser CO2
Lunghezza d'onda	~1.06 μm (Infrarosso vicino)	10.6 μm (Infrarosso lontano)
Assorbimento energetico (Metalli)	Molto elevato	Basso (richiede enormi potenze di innesco per compensare)
Velocità di taglio (Spessori < 5 mm)	Altissima (fino a 3-4 volte più rapida)	Moderata
Efficienza elettrica (Wall-plug)	30% - 40% (Bassi consumi)	8% - 10% (Alti consumi, forte dispersione termica)
Trasporto del raggio	Cavo in fibra ottica sigillato	Sistema aperto di specchi volanti e soffiati
Costi operativi e Manutenzione	Bassi (sorgente a stato solido senza parti mobili)	Alti (sostituzione specchi, lenti, manutenzione turbine, consumo di gas laser elio-azoto-CO2)

L'**assorbimento energetico** indica la percentuale di luce laser che il metallo "assorbe" e converte in calore, rispetto a quella che invece respinge come se fosse uno specchio (riflessione).

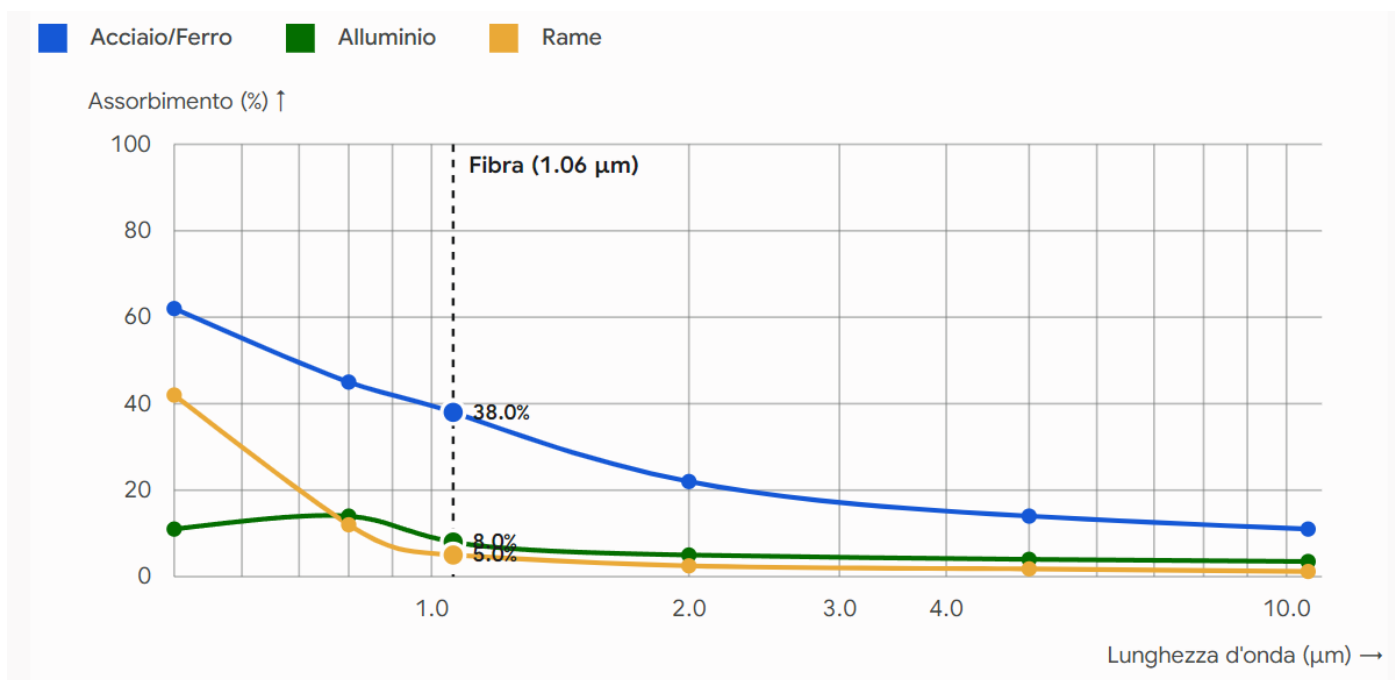
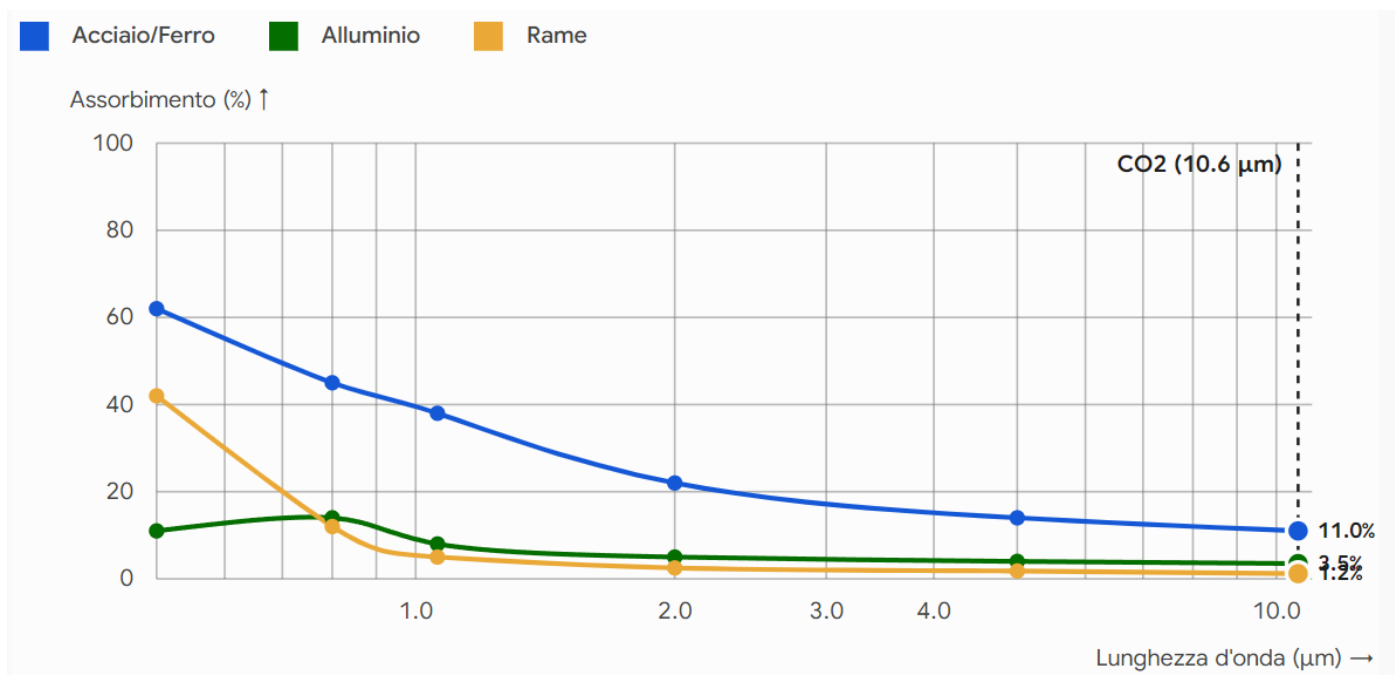
Il principio fisico alla base è che **la riflettività di un metallo dipende fortemente dalla lunghezza d'onda della luce che lo colpisce**.



Ecco perché il laser CO2 ha un assorbimento definito "basso" rispetto alla fibra:

- **Il limite dell'infrarosso lontano (CO2):** Il laser CO2 emette luce a una lunghezza d'onda di **10.6 micrometri (μm)**. A questa specifica frequenza, quasi tutti i metalli a temperatura ambiente si comportano come specchi perfetti. Riflettono fino al 90-95% della luce (e nel caso del rame o dell'oro, anche il 98%). Questo significa che solo il 5-10% dell'energia generata dal CO2 entra nel metallo per riscaldarlo.
- **Il vantaggio dell'infrarosso vicino (Fibra):** Il laser a fibra emette a **1.06 micrometri (μm)**, una lunghezza d'onda dieci volte più corta. A questa frequenza, l'acciaio e il ferro assorbono naturalmente circa il 30-40% dell'energia già a freddo.
- **La dinamica del calore brutto:** Poiché il CO2 viene per lo più riflesso, l'unico modo per fargli tagliare il metallo è "forzare" la situazione sparando potenze enormi (migliaia di Watt). Una volta che quella piccola frazione assorbita (il 5-10%) riesce finalmente a far *fondere* il primissimo strato superficiale del metallo, la fisica cambia: il metallo liquido perde improvvisamente la sua riflettività e inizia ad assorbire l'80-90% dell'energia, permettendo al taglio di procedere.

In sintesi, il laser CO2 consuma tantissima energia e impiega più tempo nelle frazioni di secondo iniziali perché deve "sfondare" il muro di riflessione iniziale del metallo allo stato solido.



IL LASER A DIODI (70W)

Funzionamento e principi fisici



Schema semplificato di un diodo laser di potenza

1. Cos'è un laser a diodi

Il laser a diodi è un laser a semiconduttore: la luce non nasce da un gas eccitato, come nel laser CO₂, ma direttamente dalla ricombinazione di elettroni e lacune all'interno di un materiale semiconduttore (tipicamente GaN, gallio-nitruro, per i diodi blu usati nel taglio/incisione hobbistico).

Nei laser hobbistici e semi-professionali da 20-30 W, la sorgente è quasi sempre un modulo composto da più diodi ("multi-emitter" o array di diodi) combinati otticamente per sommare la potenza, poiché il singolo diodo emette in genere pochi Watt.

La lunghezza d'onda tipica è 450 nm circa (luce blu visibile), molto diversa dai 10,6 µm del laser CO₂: questo cambia radicalmente quali materiali il fascio può essere assorbito e lavorato.

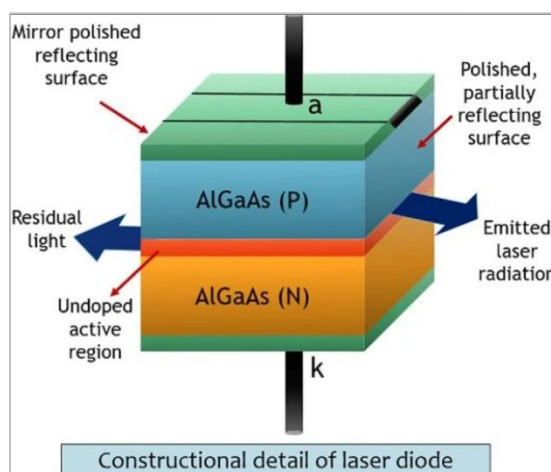
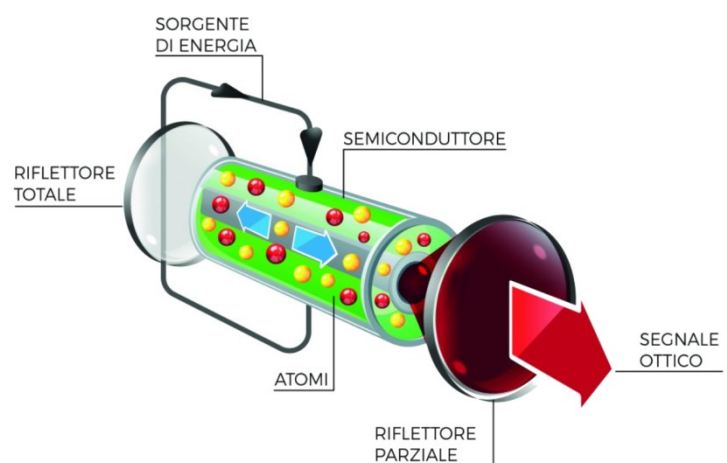
2. Principio fisico: emissione da giunzione p-n

Il funzionamento si basa sull'elettroluminescenza stimolata in una giunzione p-n polarizzata direttamente. Applicando una corrente elettrica, gli elettroni della zona n e le lacune della zona p si ricombinano nella zona attiva, liberando energia sotto forma di fotoni.

A differenza di un LED, nel diodo laser la zona attiva è racchiusa tra due superfici semi-riflettenti (i piani di clivaggio del cristallo stesso), che formano una microcavità risonante: i fotoni vengono amplificati per emissione stimolata prima di uscire come fascio coerente.

Caratteristiche del fascio emesso

- Fascio molto divergente rispetto al laser CO₂, e fortemente asimmetrico (ellittico): richiede ottiche di collimazione dedicate.
- Qualità del fascio (M²) generalmente inferiore rispetto a un laser CO₂ o a fibra, che si traduce in uno spot focale meno definito.
- Nei moduli multi-diodo, più chip vengono combinati (via fibra o in free-space) per sommare potenza, a scapito della qualità del fascio.



3. Il modulo laser

A differenza della cavità a gas del laser CO₂, qui non c'è alcuna miscela gassosa né tubo risonatore: l'elemento attivo è un piccolo chip a stato solido montato su un dissipatore metallico (spesso con ventola o, nei moduli di fascia alta, con cella Peltier/TEC) per smaltire il calore generato, dato che solo una parte dell'energia elettrica si converte in luce.

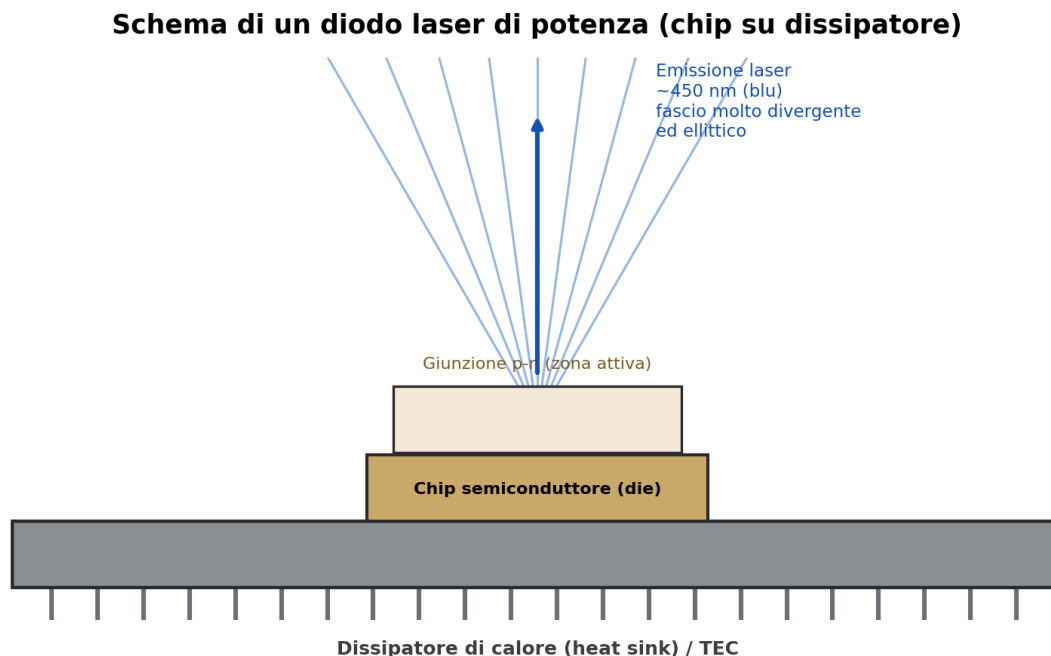


Figura 1 — Schema di un diodo laser di potenza montato su dissipatore

Non essendoci una cavità risonante estesa come nel laser CO₂, il modulo è estremamente compatto: l'intera sorgente, con collimazione integrata, sta spesso in pochi centimetri cubi ed è montata direttamente sulla testa mobile della macchina.

4. Percorso ottico del fascio

Il percorso ottico di un laser a diodi è molto più semplice e compatto di quello di un laser CO₂, perché la sorgente stessa è integrata nella testa di lavoro e non richiede specchi di trasporto lungo assi lunghi:

- Lente collimatrice: raddrizza il fascio molto divergente emesso dal chip in un fascio pressoché parallelo.
- Lente di focalizzazione: concentra il fascio collimato in uno spot piccolo, tipicamente tra 0,05 e 0,15 mm, sulla superficie del materiale.
- Ugello di air assist: soffia un getto d'aria compressa coassiale al fascio per allontanare fumi e detriti e ridurre la carbonizzazione del bordo.

Percorso ottico di una testa laser a diodi

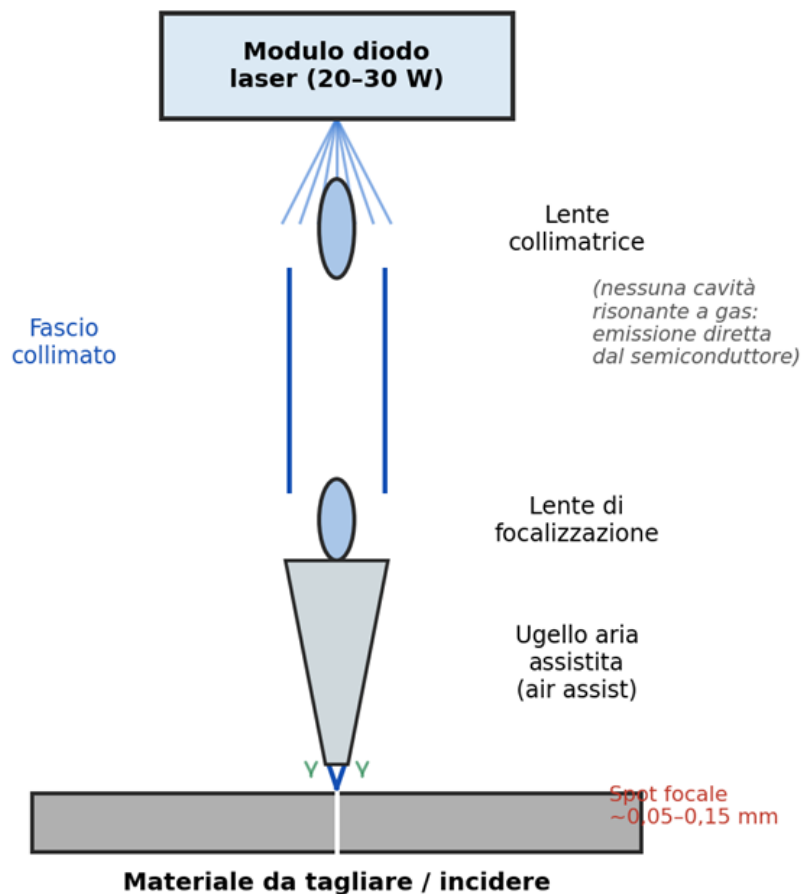


Figura 2 — Percorso ottico di una testa laser a diodi

5. Come avviene il taglio e l'incisione

Con soli 20-30 W concentrati su uno spot relativamente più grande di quello di un laser CO₂ industriale, la densità di potenza disponibile è molto inferiore. Il processo è quindi quasi sempre basato su vaporizzazione/carbonizzazione superficiale progressiva, spesso realizzata a più passate:

- Assorbimento: la luce blu (450 nm) è ben assorbita da materiali scuri od organici (legno, cuoio, cartone), meno da materiali trasparenti o riflettenti.
- Vaporizzazione/carbonizzazione: il materiale nel punto focale brucia o sublima; su materiali organici questo produce tipicamente un bordo leggermente annerito.
- Passate multiple: poiché la potenza è limitata, per tagliare materiali di pochi millimetri il fascio ripete più volte lo stesso percorso, approfondendo il taglio a ogni passaggio.
-

Meccanismo di taglio/incisione: ablazione per passate successive

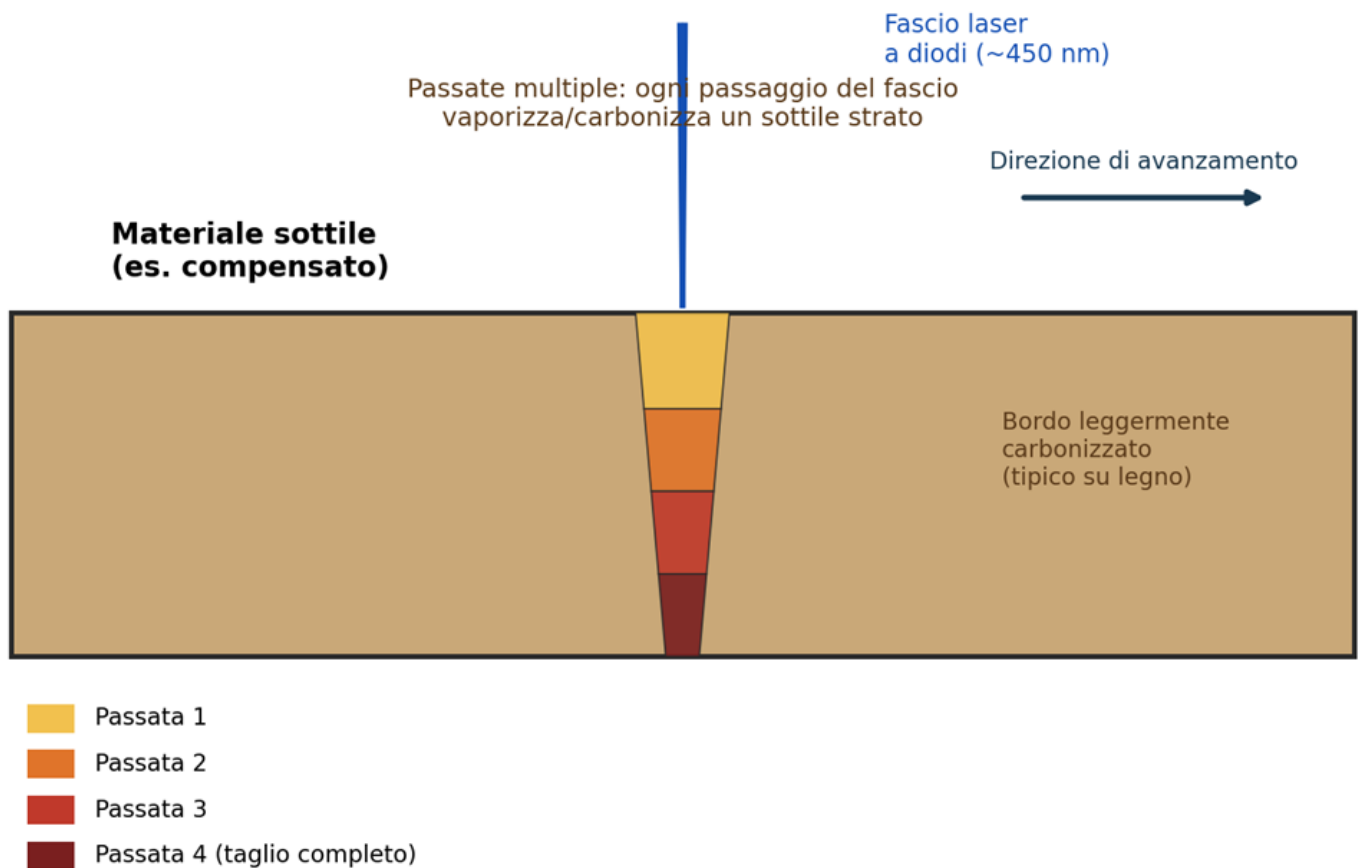


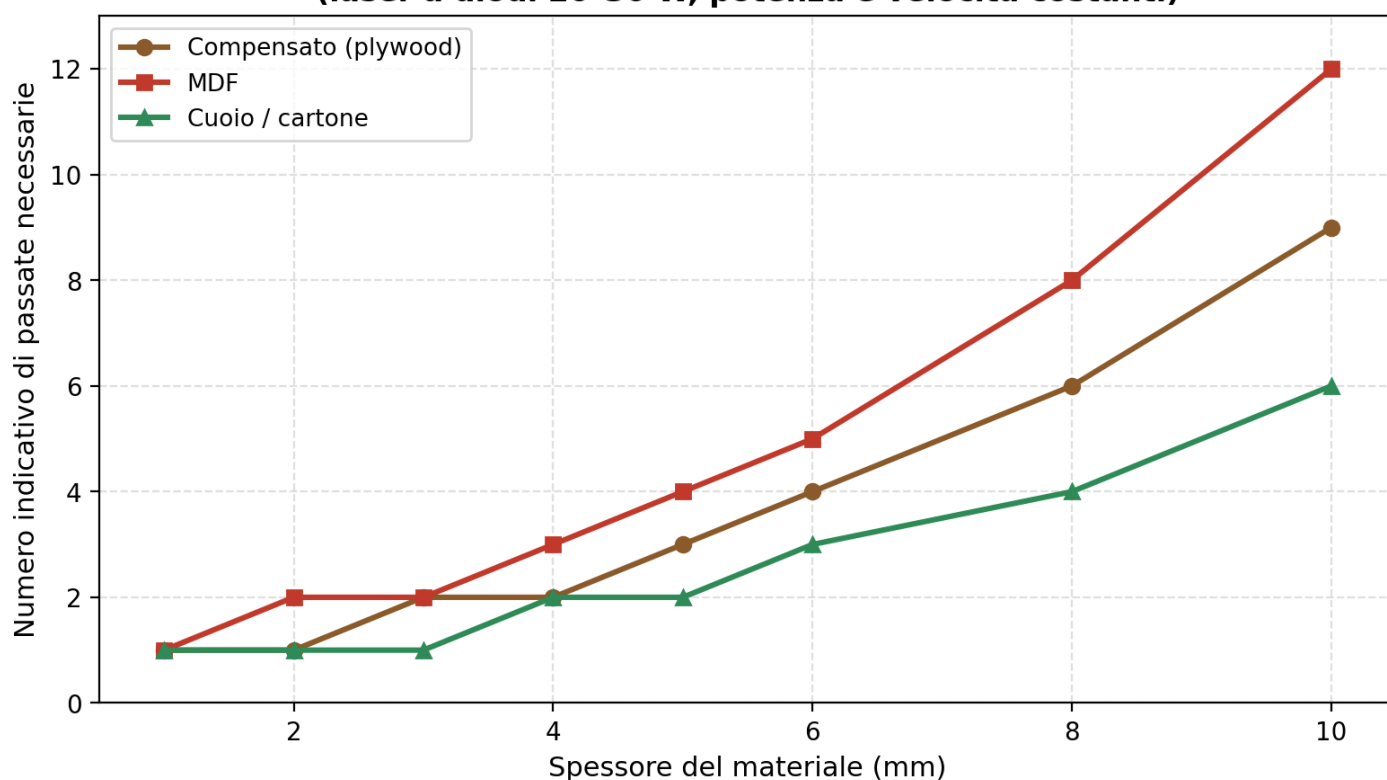
Figura 3 — Meccanismo di taglio/incisione per passate successive

6. Parametri di processo principali

Parametro	Effetto principale
Potenza del diodo (W)	Energia disponibile per vaporizzare/carbonizzare il materiale
Velocità di avanzamento	Tempo di esposizione del materiale al fascio per unità di lunghezza
Numero di passate	Compensa la bassa potenza: più passate = taglio più profondo
Distanza di focalizzazione	Posiziona lo spot minimo sulla superficie o in profondità
Air assist (aria compressa)	Rimuove fumi/detriti, riduce la carbonizzazione, raffredda il taglio
PWM / modulazione	Regola la potenza media del diodo per incisione a mezzitoni

Il grafico seguente mostra, in modo qualitativo, come il numero di passate necessarie cresca con lo spessore del materiale, a parità di potenza e velocità:

**Andamento qualitativo: passate necessarie vs spessore
(laser a diodi 20-30 W, potenza e velocità costanti)**



Nota: curve didattiche illustrative, non dati di macchina reali.

Figura 4 — Andamento qualitativo del numero di passate in funzione dello spessore (curve didattiche illustrative)

Confronto CO2 (90W) e DIODO (70W)

Materiale	Spessore (CO2 90W)	Spessore (Diodo 70W)	Gas di Assistenza	Note Tecniche e Dinamica di Taglio
Legno massello e Compensato	10 mm - 15 mm	20 mm - 25 mm	Aria compressa	I moduli a diodo da 70W (ottenuti accoppiando otticamente più laser) hanno uno spot molto più sottile del CO2. Questo garantisce una penetrazione superiore nel legno in singola passata, pur operando a velocità generalmente inferiori.
Acrilico (Scuri / Opaco)	15 mm - 20 mm	18 mm - 20 mm	Aria compressa	Il CO2 fonde i bordi restituendo un taglio "flame polished" lucido e perfettamente liscio. Il diodo taglia agevolmente l'acrilico nero o scuro, ma lascia un bordo opaco e leggermente più rigato.
Acrilico (Trasparente, Bianco o Blu)	15 mm - 20 mm	Non tagliabile	Aria compressa	Differenza critica di lunghezza d'onda. Il CO2 (infrarosso a 10,6 µm) viene assorbito da ogni colore e trasparenza. Il diodo emette luce blu visibile (~450 nm): attraversa l'acrilico trasparente o viene riflesso da quello blu e bianco senza depositare energia termica.
MDF (Medium-density)	8 mm - 10 mm	10 mm - 12 mm	Aria compressa ad alto flusso	L'elevata densità di colle dell'MDF ostacola il taglio e genera molti fumi. Un flusso d'aria molto potente è essenziale per entrambe le tecnologie per evitare fiammate e carbonizzazione eccessiva dei bordi.
Metalli (es. Acciaio Inossidabile)	Non tagliabile	0.05 mm (Lamierino a foglia)	Aria compressa	Nessuno dei due sostituisce un laser a fibra. Il CO2 da 90W non può tagliare metalli. L'altissima densità focale del diodo da 70W permette di fendere solo spessori "a foglia" (fino a 0.05 mm) in singola passata, ma non lamiere strutturali.
Pelle e Cuoio	5 mm - 8 mm	5 mm - 8 mm	Aria a bassa pressione	Entrambe le tecnologie tagliano perfettamente i pellami. Il CO2 risulta però nettamente più rapido nei movimenti e nella velocità di vaporizzazione del materiale, rendendolo superiore per produzioni in serie.

Parametri di influenza sulle prestazioni tra CO2 e Diodo:

- **Lunghezza d'onda:** Il CO2 lavora nel lontano infrarosso, eccellente per vaporizzare istantaneamente materiali organici e plastiche trasparenti. Il diodo lavora nello spettro visibile, rendendo l'assorbimento dell'energia fortemente dipendente dal colore del materiale (ottimo sui colori scuri, inefficace su quelli chiari o trasparenti).
- **Densità di potenza (Spot Size):** I moderni diodi da 70W concentrano l'energia in un punto focale ultra-sottile (es. 0.15 x 0.2 mm). Questo permette loro di "scavare" in profondità legni molto spessi meglio di un CO2 da 90W, il quale ha uno spot leggermente più ampio e diverge maggiormente nei materiali spessi.
- **Velocità di lavorazione:** Nonostante la capacità di penetrazione del diodo sui materiali spessi, per incisioni e tagli su spessori sottili (es. compensato da 3 mm), il CO2 garantisce velocità operative (mm/s) nettamente superiori.

7. Materiali lavorabili

La lunghezza d'onda blu (450 nm) è assorbita bene da materiali organici scuri, ma è in gran parte trasmessa da materiali trasparenti o chiari, e riflessa dai metalli lucidi: questo rende il laser a diodi molto diverso, nel campo di applicazione, da un laser CO₂.

Materiali	Taglio	Incisione
Compensato / balsa sottile ($\leq 4\text{-}5$ mm)	Sì, a più passate	Ottima
MDF sottile	Sì (più lento del compensato)	Buona
Cuoio, cartone, feltro	Sì	Buona
Carta, cartoncino	Sì, molto rapido	Ottima
Plastiche scure (non PVC)	Limitato	Buona
Acrilico trasparente	No (il fascio blu lo attraversa)	Scarsa
Metalli	No	Solo marcatura scura su superfici trattate/anodizzate

8. Vantaggi e limiti

Vantaggi	Limiti
Costo contenuto e ingombro ridotto	Potenza bassa: taglia solo materiali sottili
Nessun gas né ottica di cavità da allineare	Richiede più passate, quindi tempi più lunghi
Accensione istantanea, buona efficienza elettrica (~30-50%)	Bordi di taglio spesso carbonizzati (specie sul legno)
Ottimo per incisione di dettagli fini	Non taglia metalli e non incide bene l'acrilico trasparente
Manutenzione minima	Vita utile del diodo inferiore a un tubo/risonatore ben mantenuto

9. Sicurezza

Anche un laser a diodi da 20-30 W rientra in classe 4 ed è pericoloso per occhi e pelle, sia con raggio diretto sia riflesso. Un aspetto spesso sottovalutato: la luce blu-violetta a 450 nm penetra più in profondità nell'occhio rispetto all'infrarosso del CO₂ ed è particolarmente dannosa per la retina, quindi:

- Occhiali di protezione specifici per 450 nm (diversi da quelli usati per il CO₂: non sono intercambiabili tra le due lunghezze d'onda)
- Cabina o schermo di contenimento e interblocco che spenga il laser all'apertura
- Aspirazione dei fumi di combustione, spesso più critica che nel CO₂ per l'uso frequente su legno e materiali organici in ambienti non industriali
- Attenzione particolare in ambito hobbistico/scolastico, dove queste macchine sono diffuse anche senza cabina totalmente chiusa