

PREMIO DI LAUREA

SECONDA EDIZIONE

PER LAVORI SULLE SOLUZIONI APPLICATIVE DEL LASER NELL'INDUSTRIA

PubliTec e la rivista

L A S E R

in collaborazione con importanti aziende del settore
operanti in Italia, mette in palio tre

Premi GIUSEPPE MASSARO

Per tesi di laurea magistrale e di dottorato di ricerca che riguardino soluzioni applicative realizzate con la tecnologia laser, negli aspetti sia tradizionali, sia innovativi. Gli elaborati dovranno essere sviluppati con attinenza alla realtà industriale.

Ogni Premio GIUSEPPE MASSARO sarà pari a **Euro 3.000,00**. Ciascun Premio è destinato a un lavoro ed è quindi da intendersi in un'unica assegnazione, anche se l'elaborato viene svolto in gruppo. Possono concorrere ai Premi coloro che abbiano conseguito, in Italia, una laurea magistrale o un dottorato di ricerca, tra il **1° agosto 2007 e il 31 luglio 2009**, presso una Facoltà di Ingegneria. Le tesi, i progetti o gli elaborati (esclusivamente in formato PDF o Word), dovranno pervenire a PubliTec (Via Passo Pordoi 10, 20139 Milano - E-mail: premiogiuseppemassaro@publitec.it) entro il **31 agosto 2009**, accompagnati da una copia del certificato di laurea e da una eventuale presentazione del relatore.

La commissione giudicatrice, presieduta dal professor Edoardo Capello del **SITEC - Laboratorio per le Applicazioni Laser** del Politecnico di Milano, assegnerà i Premi GIUSEPPE MASSARO a suo insindacabile giudizio, dandone comunicazione entro il 31 ottobre 2009. I vincitori saranno premiati in occasione di una cerimonia che si svolgerà nell'ambito di EXPO/laser 2009. I premiati avranno l'opportunità di presentare una sintesi del loro lavoro a una platea costituita da rappresentanti di aziende del settore.

Le sintesi delle tesi saranno pubblicate sulla rivista

L A S E R

SPONSORIZZANO I PREMI DI LAUREA "GIUSEPPE MASSARO"





Le lavorazioni **LASER**

a cura di **Edoardo Capello** e **Daniele Colombo**

Le sorgenti laser commerciali

Sorgenti a gas CO₂

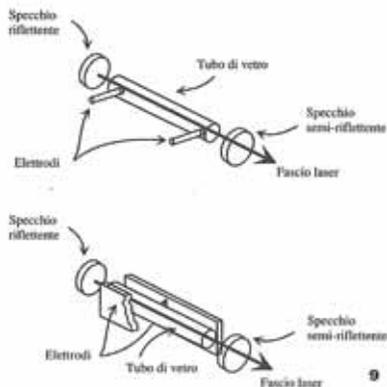
In una sorgente laser a CO₂ il mezzo attivo è costituito dal biossido di carbonio, anche se la cavità risonante ospita anche elio e azoto, che hanno un ruolo fondamentale per il funzionamento della sorgente. L'emissione di una sorgente CO₂ avviene a una lunghezza d'onda λ di 10.6 μm , che è situata nella regione del medio infrarosso. L'efficienza energetica di una sorgente di questo tipo (intesa come rapporto tra energia rilasciata al fascio laser divisa per l'energia assorbita dalla rete elettrica) è estremamente limitata e si attesta indicativamente intorno al 10%.

La più semplice sorgente CO₂ è costituita da un tubo di vetro che ospita la miscela di gas e da due elettrodi tra i quali si ha il passaggio di corrente necessario per pompare energia nel mezzo attivo (Figura 9). Esistono due soluzioni per quan-

to riguarda la modalità di eccitazione: nel primo caso gli elettrodi vengono alimentati in corrente continua (*Direct Current*, DC), nel secondo caso agli elettrodi (esterni al tubo) viene applicata una tensione alternata con frequenza elevata (*Radio Frequency*, RF).

Esistono diverse tipologie di sorgenti laser CO₂ disponibili commercialmente che vengono impiegate per le lavorazioni industriali.

- **Sorgenti sigillate:** sono le sorgenti più piccole e compatte della famiglia dei laser a CO₂. La sorgente è costituita sostanzialmente da un tubo di vetro contenente la miscela di gas, con un'architettura del tutto simile a quella riportata in Figura 9. Il termine "sigillate" sta a indicare che la miscela gassosa nella cavità risonante viene immessa nella sorgente all'atto della produzione di quest'ultima. La sorgente viene quindi sigillata e può funzionare per un tempo relativamente elevato (circa 5-10.000 ore) prima di richiedere la sostituzione della miscela. Una volta raggiunto questo termine, la sorgente viene aperta, la miscela sostituita e il tubo nuovamente sigillato. In

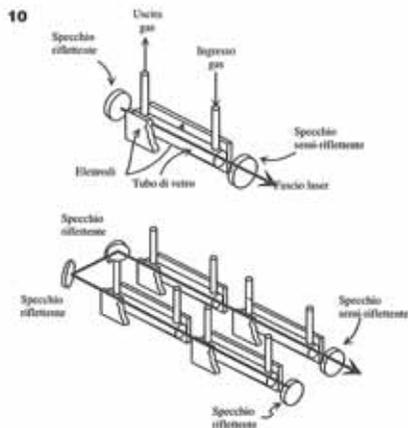


9. A sinistra lo schema di funzionamento di una sorgente CO₂ sigillata. A destra, una sorgente commerciale (cortesia Refin).

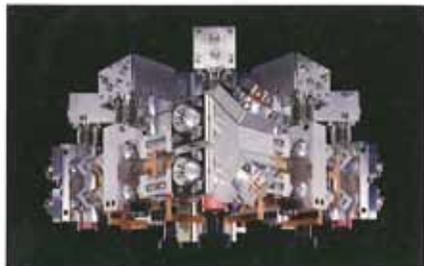
10. Schema di funzionamento di una sorgente CO₂ a flusso assiale (alto) e "ripiegamento" della sorgente per contenerne le dimensioni (basso).

questa tipologia di sorgenti la dissipazione di calore avviene solo per convezione naturale della miscela di gas con le pareti del tubo e quindi il limite massimo di potenza ottenibile è piuttosto basso. Le potenze di uscita tipiche variano tra i 15 e i 200 W, ma è possibile ottenere potenze maggiori (generalmente fino a 500 W) accoppiando otticamente due o più sorgenti di potenza più bassa. L'applicazione industriale tipica di queste sorgenti è la marcatura di componenti o il taglio di materiali non metallici, quali stoffe, pelli, cartone, ecc ...

• **Flusso assiale:** queste sorgenti sono costituite da un tubo di vetro in cui viene immessa la miscela di gas da una estremità ed estratta dall'altra (Figura 10). Una volta estratta, la miscela viene raffreddata e di nuovo pompata nella sorgente: la miscela di gas nella cavità viene quindi continuamente rinnovata con miscela a bassa temperatura, consentendo quindi di estrarre una maggiore potenza rispetto alle sorgenti sigillate. Di sorgenti a flusso assiale ne esistono di due tipi: a *flusso lento* e a *flusso veloce*. Nel caso di flusso assiale lento il gas fluisce all'interno della cavità con una velocità di circa 1 m/s e in questo modo è possibile estrarre circa 60 - 80 W per metro di lunghezza della sorgente. Per ottenere potenze elevate senza avere sorgenti eccessivamente ingombranti è necessario ripiegare la cavità su se stessa più volte (Figura 10). Nonostante questo accorgimento la potenza massima ottenibile è in generale limitata a circa 1,5 kW. La qualità del fascio è molto buona (nel senso che la densità di potenza è simile a una gaussiana, $M^2 \approx 1$, anche se variazioni di temperatura durante il funzionamento possono portare a un'instabilità del profilo spaziale. Le sorgenti a flusso assiale veloce, invece, sono dotate di un potente sistema di pompaggio del gas che consente di spingere la miscela a circa 200 m/s e in questo modo è possibile ottenere circa 800 W di potenza al fascio per metro lineare di sorgente. La potenza massima è di circa 20 kW, mentre la dimensione più diffusa è di 2,5 kW. La qualità del fascio è in generale buona, anche se leggermente più bassa rispetto alla sorgente con flusso assiale lento (Figura 11). L'applicazione tipica delle sorgenti a flusso assiale è il taglio di lamiera e la saldatura, applicazioni che richie-



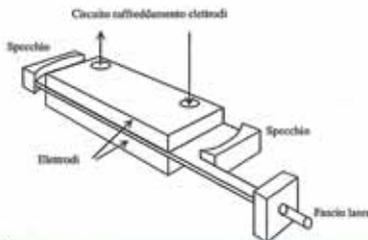
11. Sopra una sorgente a flusso assiale veloce (cortesia Trumpf), sotto una sorgente a flusso assiale lento (cortesia EL.En.).



dono una distribuzione di densità di potenza prossima alla gaussiana.

• **Slab:** queste sorgenti sono costituite da una cavità di geometria parallelepipedica di basso spessore (Figura 12). Le due facce di maggiore estensione della camera sono realizzate in rame e costituiscono i due elettrodi tra cui avviene la scarica elettrica in DC necessaria per generare l'inversione di popolazione. La presenza dei due elettrodi di grandi dimensioni in rame consente di raffreddare la miscela di gas mediante la sola convezione naturale con gli elettrodi (questi ultimi sono raffreddati). In questo modo, non vi è la ne-

cessità di mettere in moto il gas mediante turbine o di rinnovare continuamente grandi quantità di miscela di gas per asportare calore. La cavità è delimitata in direzione assiale da due specchi, di cui uno ha un'estensione minore dell'altro: è proprio da questa apertura che viene spillato il fascio laser dalla cavità. La potenza massima che può essere ricavata da questo tipo di sorgenti raggiunge oggi gli 8 kW e la qualità del fascio viene migliorata con dispositivi ottici all'uscita dalla cavità, consentendo di generare un fascio pressoché circolare e con una distribuzione di densità di potenza molto vicina alla gaussiana o, inserendo un opportuno dispositivo ottico, una distribuzione TEM₀₁, adatta per il taglio degli elevati spessori o per la saldatura per sovrapposizione.



12



Grazie all'assenza di diversi componenti (principalmente la turbina per movimentare la miscela di gas), le sorgenti capillari sono, a parità di potenza del fascio, meno costose rispetto alle altre tipologie di sorgenti in commercio e, in linea di principio, necessitano di una minore manutenzione.

- **Flusso trasversale:** nelle sorgenti a flusso trasversale il gas fluisce circolarmente all'interno di un tamburo sospinto dall'azione di una turbina. Sebbene le potenze massime ottenibili siano estremamente elevate (alcune decine di kW), la qualità del fascio è molto bassa e queste sorgenti sono oggi utilizzate per specifiche applicazioni di saldatura.

Sorgenti allo stato solido

- **Diodi laser:** il funzionamento di un diodo laser è differente dal funzionamento delle sorgenti viste finora. Infatti, il pompaggio energetico avviene in maniera diretta e la sua piena compressione richiede conoscenze della struttura dei solidi quantici e, in particolare, dei semiconduttori, che vanno al di là della finalità dei presenti fascicoli. Semplificando, è possibile immaginare un diodo laser come un LED di potenza, in quanto i due (diodi e LED) sono "parenti stretti".

I diodi laser vengono utilizzati sia in maniera diretta che accoppiati in fibra per lavorazioni di saldatura e trattamento superficiale. Il ruolo dei diodi nel settore è però più ampio, in quanto i diodi vengono utilizzati anche per pompare energia in altri mezzi attivi come, per esempio, il neodimio o l'itterbio (che verranno descritti più avanti) che a loro volta generano un fascio laser. La principale caratteristica dei diodi laser è la ridotta dimensione della sorgente stessa: un diodo laser da 6 kW è grande poco più di una scatola da scarpe (Figura 13). Questo fatto facilita grandemente l'automatizzazione delle lavorazioni che vedono coinvolto un laser di potenza: infatti, è relativamente semplice movimentare la sorgente (per esempio attraverso un robot) al di sopra del pezzo per ottenere il risultato desiderato. A oggi non è possibile focalizzare i diodi laser su una piccola area (la dimensione minima è indicativamente dell'ordine di 2x1 mm) e, in più, la distribuzione di potenza è prossima alla distribuzione uniforme. Di conseguenza, le applicazioni dei diodi laser sono limitate a lavorazioni particolari, come la saldatura per conduzione e i trattamenti termici e, comunque, non possono essere utilizzati per il taglio.



13

12. Sopra lo schema di funzionamento di una sorgente slab; sotto la sorgente commerciale da 4.5 kW (cortesia Roфин).

13. A sinistra un diodo laser da 3 kW (cortesia Roфин); sotto diodi laser di bassa potenza accoppiati in fibra (cortesia IPG Fibertech).



- **Laser Neodimio (Nd:YAG)** le sorgenti laser al neodimio costituiscono oggi le sorgenti allo sta-

to solido più diffuse nelle applicazioni industriali, con sorgenti che operano in regime sia impulsato che continuo e con potenze che possono variare da pochi watt fino a circa 6 kW. Ma con l'arrivo di nuove tecnologie allo stato solido (laser in fibra e a disco), questo scenario è destinato a cambiare nei prossimi anni.

Il mezzo attivo nelle sorgenti Nd:YAG è costituito da ioni di neodimio (Nd^{3+}) che vengono ospitati in un cristallo sintetico di granato di ittrio e alluminio ($Y_3Al_5O_{12}$), anche se sono disponibili commercialmente anche sorgenti che utilizzano come cristallo ospitante un vanadato o un vetro. L'emissione della sorgente avviene con lunghezza d'onda λ pari a 1,064 μm ed è quindi situata nella regione del vicino infrarosso. Come si può notare, la lunghezza d'onda del fascio generato da una sorgente Nd:YAG è circa dieci volte più piccola di quella del fascio generato da una sorgente CO_2 .

Il pompaggio energetico viene effettuato mediante una sorgente luminosa ed è quindi di tipo ottico. Le sorgenti commerciali sono costituite da una o più barrette di Nd:YAG di sezione circolare di circa una decina di millimetri di diametro e un centinaio di lunghezza. Queste barrette sono poste all'interno di una camera che generalmente ha sezione a doppia ellissi in cui un fuoco è comune a due ellissi ed è occupato dalla barretta, mentre le lampade per il pompaggio sono posizionate nei due fuochi restanti (Figura 14). Disponendo più barrette in serie (dotandole delle rispettive lampade di pompaggio) è possibile aumentare la potenza della sorgente, modulandola in relazione alle necessità dettate dall'applicazione.

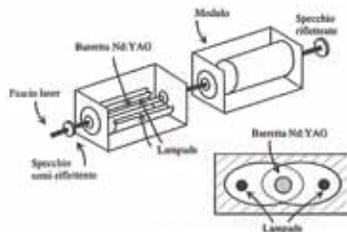
Attualmente, esistono in commercio due sistemi di pompaggio ottico differenti. Il primo, più tradizionale, prevede l'uso di lampade al tun-

gstenio per le sorgenti in continuo e allo xenon o kripton per le sorgenti impulsate. Il secondo, invece, prevede l'uso dei diodi laser descritti precedentemente. Il fascio laser generato dai diodi ha le caratteristiche adatte (principalmente la lunghezza d'onda) per pompare energia nel Nd:YAG in maniera molto efficiente. Nella maggior parte dei casi il diodo viene posizionato in maniera tale da illuminare una delle due estremità della barretta e il flusso di fotoni di eccitazione è quindi diretto assialmente e non trasversalmente come accade nelle sorgenti a lampade. Grazie alla monocromaticità del diodo laser rispetto alle lampade tradizionali e al conseguente elevato accoppiamento energetico tra sorgente di pompa e barretta YAG si ottiene un aumento dell'efficienza globale della sorgente rispetto alla tradizionale soluzione con lampade. Infatti, l'efficienza energetica delle sorgenti Nd:YAG si attesta al di sotto del 5% se pompate mediante lampade, mentre circa raddoppia se pompate mediante diodi laser.

La qualità del fascio è generalmente peggiore, a parità di potenza, rispetto alle sorgenti CO_2 , con un fattore M^2 che spesso è superiore a 50 (ma facilmente raggiunge anche un valore di 100). In generale, le sorgenti Nd:YAG pompate mediante diodi presentano una qualità del fascio migliore (anche di un fattore cinque) rispetto alle sorgenti pompate a lampade. La distribuzione di irradianza è comunemente molto lontana dalla distribuzione gaussiana e, come verrà discusso più avanti, questo fatto ha importanti implicazioni sulla possibilità di focalizzazione del fascio stesso.

Va rilevato che nelle sorgenti allo stato solido non si utilizza l' M^2 ma il BPP. Il valore del BPP, il cui significato verrà spiegato più avanti, nelle sorgenti Nd:YAG aumenta con la potenza me-

14. A sinistra, schema di funzionamento di una sorgente Nd:YAG a barrette, a destra una sorgente commerciale (cortesia Trumpf).



14



dia del fascio: per una sorgente da 1 kW il BBP varia indicativamente tra 8 e 16 mm*mrad se pompata mediante diodi o tra 16 e 30 mm*mrad se pompata mediante lampade.

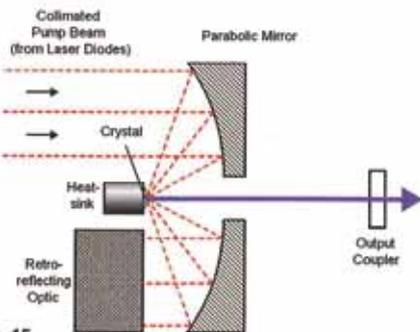
• **Laser a disco (Disklaser):** i laser a disco e i laser in fibra (descritti oltre) possono essere considerati come l'evoluzione dei laser Nd:YAG in cui sono stati effettuati due cambiamenti. Il primo riguarda il mezzo attivo, con il passaggio dal neodimio (Nd) all'itterbio (Yb), passaggio che ha comportato grandi vantaggi in termini di efficienza energetica e di incremento di densità di ioni itterbio posizionabili nell'unità di volume ospitante. Il secondo cambiamento riguarda la geometria della barretta dei sistemi YAG: per favorire il raffreddamento si è cercato di aumentare la superficie di scambio termico a parità di volume passando dalla geometria cilindrica a quella a disco (dando vita quindi ai laser a disco) o a quella a filo (dando origine ai laser in fibra). L'itterbio ha una lunghezza d'onda di emissione del tutto simile a quella del neodimio ($\lambda = 1,07 \mu\text{m}$) e viene efficacemente pompato tramite diodi

di laser. Lo schema della sorgente è riportato in Figura 15: come si può vedere, un sottile disco di YAG drogato con ioni itterbio viene montato con una delle due facce piane contro un supporto ad alta conducibilità termica (per contenere la temperatura del disco) mentre l'altra faccia viene esposta alla radiazione proveniente dal diodo laser di pompa.

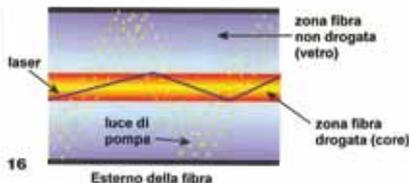
La qualità del fascio (in termini di distribuzione di potenza) così generato è molto buona (nel senso che è migliore di un laser Nd:YAG e in molti casi prossima alla gaussiana) e le potenze massime ottenibili sono oggi attorno ai 2 kW per singolo disco. È però possibile mettere in serie diverse cavità fino a giungere a 8 kW (anche se è previsto a breve un incremento fino a oltre i 15 kW).

• **Sorgenti in fibra (Fiberlaser):** le sorgenti in fibra sono state messe a punto recentemente e le loro peculiarità, che derivano dalla particolare architettura profondamente innovativa rispetto alle tradizionali sorgenti laser, ne hanno consentito un'espansione estremamente rapida. Analogamente alle sorgenti a disco, nelle sorgenti in fibra si usa l'itterbio come elemento attivo che viene ospitato nella parte più interna di una fibra ottica a doppio strato, che è il "cuore" della sorgente (Figura 16). Mentre lo strato interno (denominato "core") è drogato con itterbio, il rivestimento più esterno è analogo a quello di una normale fibra. Questa fibra viene accoppiata con dei diodi laser e di conseguenza la radiazione emessa dal diodo attraversa più volte il core, pompando energia nell'itterbio che genera un fascio laser di elevata potenza.

La funzione che nelle sorgenti tradizionali viene svolta dagli specchi, nelle sorgenti in fibra viene svolta da due reticoli di Bragg opportunamente incisi nella fibra. Il risultato è che la cavità risonante è la fibra stessa e quindi il fascio nasce già all'interno di una fibra.



15

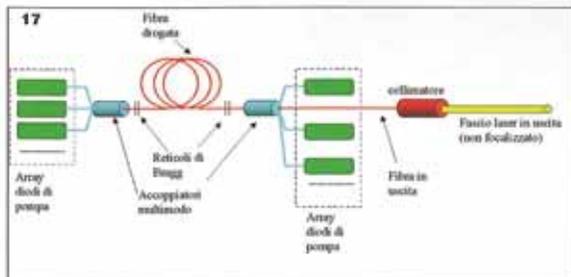


16

15. Sopra lo schema di funzionamento di una sorgente a disco, sotto la sorgente multi disco (cortesia Trumpf).

16. Fibra a doppio strato: la parte interna (core) è drogata con itterbio mentre l'esterno costituisce la guida d'onda per la radiazione di pompaggio.

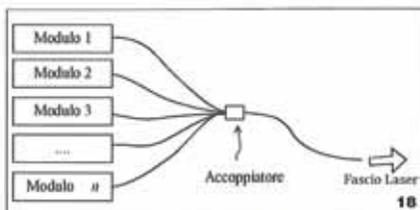
17. Sopra un modulo da 1 kW; sotto lo schema costruttivo della sorgente (cortesia IPG Fibertech).



18. A destra ottenimento di elevate potenze attraverso l'accoppiamento ottico di diversi moduli: sopra lo schema, sotto una sorgente da 30 kW ottenuta con 30 moduli da 1.000 W.

Lo schema di una sorgente in fibra è riportato in Figura 17, dove si possono riconoscere la fibra drogata, i diodi di pompa e i due reticoli di Bragg, che delimitano la porzione attiva della fibra. Il fatto che il fascio nasca all'interno della fibra fa sì che sia possibile avere un diametro della fibra particolarmente piccolo (dell'ordine di pochi micron) e che si generi un fascio con una distribuzione di densità di potenza di tipo gaussiano, cioè la fibra è monomodo.

Una sorgente di questo tipo è estremamente compatta, può essere facilmente raffreddata mediante convezione con l'aria (il modulo termico della fibra è particolarmente favorevole), ma ha un limite superiore nella potenza massima generabile di qualche centinaio di watt, tipicamente circa 2 kW. Ma la caratteristica che sicuramente



te è più interessante dal punto di vista applicativo è il fatto che la distribuzione di potenza all'interno del fascio sia di tipo gaussiano, cioè che il fascio possieda un'elevata qualità.

Il limite relativo alla potenza massima esprimibile da queste sorgenti viene superato ricorrendo a più moduli in parallelo: accoppiando otticamente le fibre ottiche che fuoriescono dai vari moduli è possibile sommare le potenze generate dai singoli moduli (Figura 18). Così una sorgente da 5 kW in fibra può essere costituita da cinque moduli in parallelo da 1 kW l'uno. In questo modo, è quindi possibile raggiungere potenze anche molto elevate (a oggi fino a circa 40 kW) e avere un'affidabilità della sorgente di elevato livello (se un modulo si guasta gli altri possono supplire fino alla manutenzione programmata). L'unico svantaggio che deriva dall'unione di più moduli è il peggioramento della qualità del fascio al crescere del numero dei moduli, cioè della potenza generata dalla sorgente.