

ITALIAN PATENT OFFICE

Document No.

102011901938572A1

Publication Date

20121021

Applicant

ADIGE S.P.A.

Title

METODO PER IL CONTROLLO DI UN PROCESSO DI TAGLIO LASER E
SISTEMA DI TAGLIO LASER IMPLEMENTANTE TALE METODO

DESCRIZIONE dell'invenzione industriale dal titolo:
"Metodo per il controllo di un processo di taglio
laser e sistema di taglio laser implementante tale
metodo"

Di: ADIGE S.p.A., nazionalità italiana, Via per
Barco 11, 38056 Levico Terme (Trento)

Inventori designati: Maurizio SBETTI, Stefano BER-
TOLDI, Daniele COLOMBO, Barbara PREVITALI, Giovanni
RIVA, Matteo DANESI, Lorenzo MOLINARI TOSATTI, Die-
go PARAZZOLI

Depositata il: 21 Aprile 2011

DESCRIZIONE

La presente invenzione riguarda in generale il
campo dei processi di taglio laser, e più precisa-
mente un metodo per il controllo di un processo di
taglio laser, nonché un sistema di taglio laser im-
plementante tale metodo.

Con l'espressione "processo di taglio laser" è
da intendersi, ai fini della presente invenzione,
un processo tale per cui un fascio laser focalizza-
to sulla superficie di un pezzo in lavorazione, o
nelle vicinanze di essa, produce una trasformazione
del materiale del pezzo in lavorazione investito
dal fascio laser stesso per l'ottenimento inizial-

mente di un foro passante e quindi di una linea di taglio a partire da tale foro passante. La movimentazione relativa tra il fascio laser e il pezzo in lavorazione determina l'area complessiva, o il volume, di materiale interessati dal processo. Generalmente, la trasformazione del materiale dovuta al processo è una trasformazione di tipo meccanico (deformazione) o una trasformazione di tipo fisico (transizione di fase per fusione, evaporazione o sublimazione) ed è dovuta ai seguenti due fattori principali, combinati in proporzioni variabili:

- a) l'apporto termico fornito dal fascio laser focalizzato; e
- b) l'apporto termico fornito da una reazione chimica operata da un gas cosiddetto di assistenza, laddove tale reazione sia esoenergetica (tipicamente una reazione di combustione, o più genericamente una reazione di combinazione tra il gas di assistenza e il materiale del pezzo in lavorazione).

Nel caso in cui l'apporto termico sopra indicato con b) deve risultare assente, il gas di assistenza è un gas inerte (quale ad esempio N_2 , Ar, He) e ha funzione di schermatura o di propulsione meccanica (cioè serve a soffiare via il materiale fuso, evaporato o sublimato per effetto dell'appor-

to termico fornito dal fascio laser).

Nel caso in cui invece l'apporto termico sopra indicato con b) deve essere pari o superiore al 40% dell'apporto energetico totale, il gas di assistenza è un gas reattivo e agisce come mezzo di cessione di energia o come comburente. Il ruolo del gas di assistenza nel processo di lavorazione laser è dunque in questo caso quello di apportare energia al processo tramite reazione esoenergetica, con due effetti contemporanei sul processo stesso: 1) aumento della temperatura del volume di materiale coinvolto, con conseguente variazione fisica di stato per effetto termico (plasticizzazione, fusione, evaporazione o sublimazione); e 2) autosostentamento della reazione, nel senso che la temperatura del volume di materiale coinvolto e l'energia termica disponibile garantiscono le condizioni necessarie all'innesco e al mantenimento della reazione esoenergetica stessa. Un esempio di gas di assistenza di tipo reattivo è l'ossigeno (O_2), che viene usato nelle lavorazioni laser su leghe di acciaio al carbonio, in quanto è in grado di sostenere una reazione di ossidazione del ferro contenuto nell'acciaio.

La foratura laser (*piercing*) come fase prepa-

ratoria al taglio viene eseguita usualmente senza movimentazione relativa fra il fascio laser e il pezzo in lavorazione ed è finalizzata a produrre uno "sfondamento" nella parete di materiale in vista del successivo processo di taglio. In quanto tale, la foratura laser viene eseguita con una configurazione ottica e una posizione del fuoco rispetto al materiale che devono essere compatibili anche con il processo di taglio che avviene immediatamente dopo lo sfondamento della parete di materiale. La foratura laser si svolge in un volume che rimane chiuso fino alla conclusione del processo. Come schematicamente illustrato nella figura 1 dei disegni allegati, il processo di foratura laser coinvolge dapprima la superficie S del pezzo in lavorazione P, poi evolve creando un cilindro che comprende, partendo dall'asse ottico A del fascio laser, un ambiente che raccoglie materiale evaporato/sublimato, fuso e riscaldato, in un'atmosfera che comprende il gas di assistenza, eventuali sottoprodotti derivanti da reazioni chimiche tra il materiale del pezzo in lavorazione e i gas componenti, nonché eventuali altri gas contenuti nell'aria in cui si trova il pezzo in lavorazione, presenti come contaminanti.

A differenza della foratura, il processo di taglio laser prevede un movimento relativo tra fascio laser focalizzato e pezzo in lavorazione. Inoltre, come schematicamente mostrato nella figura 2 dei disegni allegati, il processo di taglio laser si svolge in un volume aperto individuato da tre superfici, e precisamente da una coppia di superfici piane S1, S2 che si estendono parallelamente alla direzione del movimento relativo tra fascio laser focalizzato e pezzo in lavorazione, e da una terza superficie S3 che collega le precedenti due e che rappresenta il fronte di avanzamento del taglio. Come schematicamente mostrato nella figura 3 dei disegni allegati, che rappresenta una vista in sezione di una parete di materiale sottoposta a taglio laser secondo un piano di sezione parallelo alla direzione di avanzamento del taglio, il fronte di avanzamento del taglio è formato da diversi strati di materiale riscaldato, fuso ed evaporato/sublimato, in un'atmosfera che comprende il gas di assistenza, eventuali sottoprodotti derivanti da reazioni chimiche tra il materiale del pezzo in lavorazione e i gas compresenti, nonché eventuali altri gas contenuti nell'aria in cui si trova il pezzo in lavorazione, presenti come contaminanti.

Ciò premesso, scopo della presente invenzione è proporre un metodo per il controllo di un processo di taglio laser del tipo sopra identificato, sia con gas reattivo sia con gas inerte, sia con tecnologia laser CO2 sia con tecnologia laser a stato solido (Nd:YAG, laser in fibra, laser a disco, laser a diodi), che permetta di minimizzare il rischio che il processo vada fuori controllo ed entri in regime parossistico nel caso di processo utilizzando gas reattivo come gas di assistenza, che permetta di minimizzare il rischio di chiusura del solco, con conseguente interruzione della lavorazione, e che permetta inoltre di migliorare la qualità del risultato finale della lavorazione rispetto a quella ottenibile con i metodi di controllo oggi utilizzati per il controllo di processi di taglio laser.

Tale scopo è pienamente raggiunto secondo la presente invenzione grazie a un metodo per il controllo di un processo di taglio laser comprendente i passi specificati nell'annessa rivendicazione indipendente 1.

Secondo un ulteriore aspetto della presente invenzione, tale scopo è pienamente raggiunto grazie a un sistema di taglio laser avente le caratte-

ristiche specificate nell'annessa rivendicazione indipendente 10.

Modalità di attuazione vantaggiose del metodo di controllo secondo l'invenzione e forme di realizzazione vantaggiose del sistema di taglio laser secondo l'invenzione formano oggetto delle rivendicazioni dipendenti, il cui contenuto è da intendersi come parte integrale e integrante della descrizione che segue.

In sintesi, l'invenzione si fonda sull'idea di controllare il processo di taglio laser, compresa la fase di foratura iniziale, utilizzando come segnale di riferimento una o più righe di emissione specifiche della radiazione emessa da un gas (sia esso gas di assistenza o gas contaminante) o, più in generale, da un qualsiasi elemento emettitore presente nel volume coinvolto dall'irraggiamento del fascio laser focalizzato e regolando, sulla base di tale segnale di riferimento, almeno uno dei seguenti parametri di controllo del processo: la potenza del laser, la frequenza e il *duty cycle* dell'impulso laser, la pressione del gas di assistenza, la velocità di avanzamento relativa fra il laser e il pezzo in lavorazione, la distanza fra la testa laser e la superficie del pezzo in lavorazio-

ne, e la distanza fra il fuoco del fascio laser e la superficie del pezzo in lavorazione.

Il metodo di controllo del processo secondo l'invenzione prevede quindi l'implementazione di un anello di regolazione comprendente i seguenti passi:

- la radiazione proveniente dal volume interessato dal processo laser viene rilevata da mezzi sensori operanti in una banda centrata su una lunghezza d'onda preventivamente scelta come la più indicativa per controllare il processo;
- il segnale così rilevato viene opportunamente filtrato e manipolato e quindi immesso come ingresso in un'unità di controllo elettronica; e
- l'unità di controllo elettronica interpreta il segnale ricevuto in ingresso e, se necessario, modifica uno dei parametri di controllo del processo sopra indicati.

Preferibilmente, le righe di emissione specifiche della radiazione monitorata ai fini del controllo del processo (di qui in avanti indicata come radiazione di controllo) sono comprese nell'intervallo da 180 a 2000 nm e sono rilevate con una larghezza di banda non superiore a 100 nm.

Preferibilmente, come gas emettitore viene u-

tilizzato l'ossigeno o l'azoto. In linea generale, è possibile utilizzare come gas emettitore un gas in grado di emettere nella banda compresa fra 180 nm e 2000 nm, quando presente all'interno del volume coinvolto dal processo di lavorazione laser, per effetto della temperatura, dell'interazione diretta con il laser, di transizioni allo stato ionizzato o di transizioni fra modi roto-vibrazionali di eventuali composti prodotti dal processo a seguito della combinazione fra il gas e il materiale in lavorazione. Il gas utilizzato come gas emettitore può indifferentemente essere gas di assistenza o gas contaminante. In questo secondo caso, il gas può essere indifferentemente un gas normalmente presente nell'atmosfera circostante il pezzo in lavorazione o un gas appositamente introdotto allo scopo nel volume interessato dalla lavorazione laser.

Nel caso di utilizzo di un gas come elemento emettitore di radiazione da rilevare, il metodo di controllo del processo si basa sulle seguenti considerazioni.

Se il gas svolge un ruolo prevalentemente reattivo, le sue emissioni possono essere interpretate come indicazione del livello d'intensità con cui il processo di reazione sta avvenendo: un li-

vello troppo basso significa che il processo di reazione non sta avvenendo con la velocità che sarebbe possibile, mentre un livello troppo alto significa che il processo di reazione sta avvenendo con un'eccessiva velocità, con il rischio dunque che s'innesci una situazione di processo incontrollato o di tipo esplosivo. Nel caso di sollecitazione impulsata da parte del laser, la derivata del segnale o il livello minimo raggiunto a laser spento prima dell'impulso successivo possono fornire l'indicazione di un processo che tenderà a ridurre o aumentare la sua intensità, da una parte diventando inefficiente, dall'altra diventando incontrollato o esplosivo. La stessa informazione può essere ottenuta anche nel caso di sollecitazione continua da parte del laser, introducendo una sovramodulazione sulla potenza del laser e confrontando le derivate nel tempo del segnale emesso dal gas, tra la fase di sottomodulazione e quella di sovramodulazione. Un altro tipo di controllo può essere ottenuto confrontando i livelli di emissione di radiazione ad almeno due diverse lunghezze d'onda, che indichino la presenza o la trasformazione di almeno due specifiche specie chimiche o composti all'interno del volume interessato dalla lavorazione laser.

Se il gas svolge il ruolo di contaminante, sia esso usualmente presente nell'atmosfera circostante il pezzo in lavorazione, sia esso introdotto appositamente nel processo a tale scopo, le sue emissioni possono essere interpretate come segnale di controllo anche nel caso di processo di taglio laser utilizzando come gas di assistenza un gas inerte. Nel caso della foratura laser preparatoria al taglio, il segnale emesso dal gas contaminante fornisce l'informazione che il cilindro di foratura è ancora chiuso e che quindi il processo non si è ancora concluso. Una volta formatasi l'apertura nel materiale, il segnale di controllo si riduce significativamente ed è indice che il processo si è concluso. Nel caso del taglio laser, un aumento del segnale emesso dal gas contaminante fornisce l'informazione che il fronte di avanzamento del taglio sta tendendo a orientarsi parallelamente alla superficie del pezzo in lavorazione, espellendo di conseguenza meno materiale, meno sottoprodotti e meno gas contaminante, e che quindi la velocità di avanzamento del taglio è troppo alta, mentre una diminuzione del segnale emesso dal gas contaminante fornisce l'informazione che il fronte di avanzamento del taglio sta tendendo a orientarsi perpendico-

lamente alla superficie del pezzo in lavorazione, e quindi la velocità di avanzamento del taglio è troppo bassa.

Preferibilmente, il metodo di controllo secondo l'invenzione prevede il monitoraggio della riga di emissione a 777 nm. Tale lunghezza d'onda comprende una forte emissione dall'ossigeno ionizzato, facilmente rilevabile anche quando l'ossigeno si presenta solo come contaminante nel processo, e specificatamente fornisce le informazioni necessarie al controllo sia della foratura laser preparatoria al taglio sia del taglio laser. Nel caso di processo di foratura laser in ossidazione, con utilizzo dello stesso ossigeno come gas di assistenza, tale lunghezza d'onda fornisce un'anticipazione molto sensibile sulla rampa di salita del tenore di ossigeno ionizzato presente nel volume di processo, rampa che prelude al fenomeno di esplosione. Nel caso di processo di foratura laser in fusione, con utilizzo di azoto come gas di assistenza, tale lunghezza d'onda fornisce un'informazione molto sensibile circa la presenza di un volume ancora chiuso che si sta fondendo prima di aprirsi. Nel caso di processo di taglio laser, sia in ossidazione sia in fusione, tale lunghezza d'onda rappresenta una fon-

te ricca d'informazione, dato che fornisce sia un'anticipazione del rischio di esplosione o diffusione laterale del processo di ossidazione, con conseguente deterioramento della qualità finale del taglio, sia un'informazione anticipatoria circa il fenomeno di chiusura del solco di taglio, e relativa sua perdita, indipendentemente dalle cause a monte che hanno determinato la chiusura.

Oltre a segnali emessi da gas, siano essi gas di assistenza o gas contaminanti, è possibile utilizzare secondo l'invenzione anche segnali emessi dagli elementi metallici contenuti nel materiale in lavorazione, siano essi elementi caratterizzanti del materiale o elementi presenti come contaminanti. Ad esempio, è possibile utilizzare come elementi emettitori ferro, nichel, cromo, alluminio o rame.

Il monitoraggio del segnale emesso da un gas o da un altro elemento emettitore presente nel volume di materiale coinvolto dal processo di lavorazione laser permette quindi di ottenere informazioni sullo stato del processo e di controllare quindi il processo stesso mediante regolazione dei parametri di controllo del processo sopra menzionati.

Per quanto concerne il sistema di taglio laser

implementante il metodo di controllo secondo l'invenzione, esso comprende fundamentalmente:

- una sorgente laser, che può essere indifferentemente di tipo CO2 o di tipo a stato solido (Nd:YAG, laser in fibra, laser a disco, laser a diodi);
- una testa laser comprendente un dispositivo di focalizzazione per focalizzare il fascio laser generato dalla sorgente laser e un ugello di adduzione del gas di assistenza;
- un percorso ottico predisposto per trasportare il fascio laser generato dalla sorgente laser al dispositivo di focalizzazione della testa laser;
- un dispositivo di movimentazione predisposto per movimentare la testa laser e il pezzo in lavorazione l'una rispetto all'altro con una velocità di avanzamento regolabile, nonché per comandare la pressione del gas di assistenza, per regolare distanza dell'ugello dalla superficie del pezzo in lavorazione e per regolare la posizione del fuoco del fascio laser rispetto alla superficie del pezzo in lavorazione; e
- un dispositivo di controllo del processo comprendente mezzi sensori atti a rilevare almeno una predeterminata banda in lunghezza d'onda della ra-

di radiazione emessa da un dato gas o un dato materiale presente nel volume di materiale coinvolto dall'irraggiamento del fascio laser focalizzato, mezzi di elaborazione del segnale atti a elaborare il segnale rilevato dai mezzi sensori, e mezzi di controllo atti a controllare, sulla base del segnale ricevuto dai mezzi di elaborazione del segnale, la sorgente laser e/o il dispositivo di movimentazione per regolare almeno uno dei seguenti parametri di controllo del processo: la potenza del laser, la frequenza e il *duty cycle* dell'impulso laser, la pressione del gas di assistenza, la velocità di avanzamento relativa fra la testa laser e il pezzo in lavorazione, la distanza fra l'ugello della testa laser e la superficie del pezzo in lavorazione, e la distanza fra il fuoco del fascio laser e la superficie del pezzo in lavorazione.

Secondo una forma di realizzazione, i mezzi sensori comprendono un fotodiodo atto a rilevare la/e banda/e in lunghezza d'onda predeterminata/e, un dispositivo riflettore/deflettore predisposto per indirizzare sul fotodiodo la radiazione emessa dal processo di lavorazione laser e un dispositivo di filtraggio ottico interposto fra il fotodiodo e il dispositivo riflettore/deflettore per seleziona-

re la/e banda/e in lunghezza d'onda predeterminata/e.

Secondo una forma di realizzazione, i mezzi sensori comprendono una pluralità di fotodiodi atti a rilevare la/e banda/e in lunghezza d'onda predeterminata/e, una corrispondente pluralità di dispositivi riflettori/deflettori predisposti per indirizzare ciascuno su un rispettivo fotodiodo la radiazione emessa dal processo di lavorazione laser e una corrispondente pluralità di dispositivi di filtraggio ottico interposti ciascuno fra un rispettivo fotodiodo e un rispettivo dispositivo riflettore/deflettore per selezionare la/e banda/e in lunghezza d'onda predeterminata/e.

Indipendentemente dal numero di fotodiodi, di dispositivi riflettori/deflettori e di dispositivi di filtraggio ottico previsti come mezzi sensori, il (o ciascun) dispositivo di filtraggio ottico può operare in trasmissione o in riflessione. In questo secondo caso, il (o ciascun) dispositivo di filtraggio ottico può coincidere con il dispositivo riflettore/deflettore predisposto per indirizzare sul fotodiodo la radiazione emessa dal processo di lavorazione laser. I mezzi sensori possono essere posizionati indifferentemente al disopra o al di-

sotto del dispositivo di focalizzazione della testa laser.

Nel caso di sorgente laser di tipo a stato solido (Nd:YAG, laser in fibra, laser a disco, laser a diodi), il percorso ottico comprende una fibra di trasporto e la testa laser comprende inoltre un dispositivo di collimazione, che è collegato all'estremità finale della fibra di trasporto e comprende una o più lenti di collimazione.

In questo caso, il dispositivo riflettore/deflettore può comprendere, fra il dispositivo di collimazione e il dispositivo di focalizzazione, un deflettore a 90° predisposto per riflettere almeno il 99,9% della radiazione laser e per trasmettere invece la radiazione nella/e banda/e in lunghezza d'onda predeterminata/e. In questo caso, i mezzi sensori comprendono inoltre preferibilmente una lente di focalizzazione disposta fra il deflettore e il fotodiodo per focalizzare sul fotodiodo il segnale rilevato. Inoltre, preferibilmente il dispositivo di filtraggio ottico è disposto fra il deflettore e la lente di focalizzazione e comprende un primo filtro ottico predisposto per abbattere la radiazione laser e un secondo filtro ottico predisposto per selezionare la/e banda/e in lunghezza

d'onda predeterminata/e. Tutto ciò vale anche ove siano previsti una pluralità di fotodiodi, di dispositivi riflettori/deflettori e di dispositivi di filtraggio ottico, nel qual caso ciascun dispositivo riflettore/deflettore comprenderà un rispettivo deflettore e fra ciascun deflettore e il rispettivo fotodiodo sarà prevista una rispettiva lente di focalizzazione.

In alternativa a un deflettore a 90° , può essere previsto un dispositivo di derivazione disposto lungo il percorso ottico e configurato in modo da permettere al fascio laser generato dalla sorgente laser di essere completamente trasportato alla testa laser tramite la fibra di trasporto e alla radiazione che viene emessa dal processo di lavorazione laser e trasportata tramite la fibra di trasporto di essere indirizzata sul fotodiodo.

Secondo una forma di realizzazione, il dispositivo di derivazione è integrato in un dispositivo di accoppiamento ottico mediante cui il laser generato dalla sorgente laser viene lanciato nella fibra di trasporto e in particolare comprende un *beam splitter* disposto fra una lente di collimazione e una lente di focalizzazione e lancio del dispositivo di accoppiamento ottico in modo da permettere al

fascio laser generato dalla sorgente laser di entrare completamente nella lente di focalizzazione e lancio e alla radiazione che viene emessa dal processo di lavorazione laser e trasportata tramite la fibra di trasporto di essere indirizzata sul fotodiode.

Secondo una forma di realizzazione, il dispositivo di derivazione comprende una fibra secondaria saldata alla fibra di trasporto. Nel caso in cui è previsto un dispositivo di accoppiamento ottico mediante cui il laser generato dalla sorgente laser viene lanciato nella fibra di trasporto, la fibra secondaria è saldata alla fibra di trasporto in un punto di quest'ultima posizionato a valle del dispositivo di accoppiamento ottico. In alternativa, è possibile eliminare il dispositivo di accoppiamento ottico e saldare la fibra secondaria nel medesimo punto in cui la fibra di trasporto è saldata alla sorgente laser. In quest'ultimo caso, è particolarmente vantaggioso se la fibra secondaria è saldata a un combinatore ottico cui sono saldate una pluralità di fibre collegate ciascuna a un rispettivo modulo laser facente parte della sorgente laser e in grado di emettere un fascio laser in modo indipendente rispetto agli altri moduli laser.

Ulteriori caratteristiche e vantaggi dell'invenzione risulteranno più chiaramente dalla descrizione dettagliata che segue, data a puro titolo di esempio non limitativo con riferimento ai disegni allegati, in cui:

la figura 1 mostra schematicamente il volume di materiale interessato da un processo di foratura laser;

le figure 2 e 3 mostrano schematicamente il volume di materiale interessato da un processo di taglio laser;

la figura 4 mostra schematicamente un dispositivo di controllo del processo per un sistema di taglio laser secondo l'invenzione;

le figure 5A e 5B sono rispettivamente una vista dall'alto e una vista in sezione di un insieme di deflettori e fotodiodi facenti parte dei mezzi sensori di un dispositivo di controllo del processo quale quello della figura 4; e

le figure dalla 6 alla 11 mostrano schematicamente ciascuna una rispettiva variante di realizzazione dei mezzi sensori utilizzabile nel dispositivo di controllo del processo per un sistema di taglio laser secondo l'invenzione.

Con riferimento inizialmente alla rappresenta-

zione schematica fornita nella figura 4, un sistema di taglio laser secondo l'invenzione comprende fondamentalmente:

- una sorgente laser 10, che può essere indifferentemente di tipo CO₂ o di tipo a stato solido (Nd:YAG, laser in fibra, laser a disco, laser a diodi);
- una testa laser che è indicata complessivamente con 12 e comprende un dispositivo di focalizzazione 14 per focalizzare il fascio laser generato dalla sorgente laser 10 e un ugello 16 per l'adduzione di un gas di assistenza (che può essere indifferentemente un gas inerte, quale ad esempio azoto, o un gas reattivo, quale ad esempio ossigeno), l'ugello 16 avendo un foro di uscita preferibilmente di sezione circolare;
- un percorso ottico (non illustrato, ma comunque di tipo per sé noto) predisposto per trasportare il fascio laser generato dalla sorgente laser 10 al dispositivo di focalizzazione 14 della testa laser 12, il percorso ottico potendo essere formato o da un insieme di specchi o da una fibra di trasporto;
- un dispositivo di movimentazione (non illustrato, ma comunque di tipo per sé noto) predispo-

sto per movimentare la testa laser 12 e il pezzo in lavorazione l'una rispetto all'altro con una velocità di avanzamento regolabile, nonché per comandare la pressione del gas di assistenza, per regolare la distanza dell'ugello 16 dalla superficie del pezzo in lavorazione e per regolare la posizione del fuoco F del fascio laser rispetto alla superficie del pezzo in lavorazione, il dispositivo di movimentazione essendo controllato da un controllo numerico 18; e

- un dispositivo di controllo del processo predisposto per controllare la sorgente laser 10 e/o il dispositivo di movimentazione (tramite il controllo numerico 18) in modo da regolare almeno uno dei seguenti parametri di controllo del processo: la potenza del laser, la frequenza e il *duty cycle* dell'impulso laser, la pressione del gas di assistenza, la velocità di avanzamento relativa fra la testa laser 12 e il pezzo in lavorazione, la distanza fra l'ugello 16 e la superficie del pezzo in lavorazione, e la distanza fra il fuoco F del fascio laser e la superficie del pezzo in lavorazione.

Più specificamente, il dispositivo di controllo del processo comprende mezzi sensori atti a ri-

levare almeno una predeterminata banda in lunghezza d'onda della radiazione emessa da un dato gas o un dato materiale presente nel volume di materiale coinvolto dall'irraggiamento del fascio laser focalizzato (di qui in avanti indicato, più semplicemente, come volume di processo), mezzi di elaborazione del segnale atti a elaborare il segnale rilevato dai mezzi sensori, e mezzi di controllo atti a controllare, sulla base del segnale ricevuto dai mezzi di elaborazione del segnale, la sorgente laser e/o il dispositivo di movimentazione per regolare almeno uno dei parametri di controllo del processo sopra menzionati.

I mezzi sensori comprendono un fotodiodo 20 atto a rilevare, preferibilmente con un *range* dinamico di almeno una decade, la/e banda/e in lunghezza d'onda predeterminata/e, un dispositivo riflettore/deflettore 22 predisposto per indirizzare sul fotodiodo 20 la radiazione emessa dal volume di processo e un dispositivo di filtraggio ottico 24 interposto fra il fotodiodo 20 e il dispositivo riflettore/deflettore 22 per selezionare la/e banda/e in lunghezza d'onda predeterminata/e. Il dispositivo di filtraggio ottico 24 può operare in trasmissione o in riflessione. In questo secondo caso, il

dispositivo di filtraggio ottico 24 può coincidere con il dispositivo riflettore/deflettore 22. La radiazione emessa dal volume di processo viene quindi indirizzata dal dispositivo riflettore/deflettore 22, attraverso il dispositivo di filtraggio ottico 24, al fotodiodo 20, che rileva la/e banda/e in lunghezza d'onda predeterminata/e. Come mostrato nelle figure 5A e 5B, i mezzi sensori possono comprendere una pluralità di fotodiodi 20 (nell'esempio illustrato quattro fotodiodi), nonché altrettanti dispositivi riflettori/deflettori 22 e dispositivi di filtraggio ottico 24, disposti in maniera tale per cui ciascun dispositivo riflettore/deflettore 22 indirizza su un rispettivo fotodiodo 20, attraverso un rispettivo dispositivo di filtraggio ottico 24, la radiazione emessa dal volume di processo in un dato intervallo angolare. I mezzi sensori possono essere posizionati indifferentemente al disopra o al disotto del dispositivo di focalizzazione 14 della testa laser 12.

I mezzi di elaborazione del segnale comprendono una scheda di amplificazione e filtraggio del segnale 26, che è ad esempio direttamente connessa al fotodiodo 20, e una scheda di acquisizione del segnale 28 connessa alla scheda di amplificazione e

filtraggio del segnale 26 per acquisire il segnale da questa proveniente.

I mezzi di controllo comprendono un'unità di controllo elettronica 30 (ad esempio un PC industriale) su cui è installato un software di controllo che esegue un algoritmo di controllo descritto in dettaglio più avanti. L'unità di controllo elettronica 30 è connessa da un lato alla scheda di acquisizione del segnale 28 e dall'altro, tramite una linea di comunicazione con interfaccia di input e output, sia alla sorgente laser 10 sia al controllo numerico 18, in modo da essere in grado di comandare direttamente la sorgente laser 10 per regolare la potenza, la frequenza e il *duty cycle* del laser, e indirettamente, tramite il controllo numerico 18, il dispositivo di movimentazione per regolare i rimanenti parametri di controllo del processo sopra menzionato, e cioè la velocità di avanzamento, la pressione del gas di assistenza, la distanza dell'ugello dal materiale e la posizione del fuoco rispetto al materiale.

La regolazione dei suddetti parametri di controllo del processo viene effettuata sulla base del segnale relativo alla/e banda/e in lunghezza d'onda predeterminata/e rilevato dai mezzi sensori. Come

banda in lunghezza d'onda predeterminata è utilizzata, secondo l'invenzione, una banda in lunghezza d'onda tale da includere almeno una riga di emissione di un elemento emettitore (che può essere gas o un metallo) presente nel volume di processo. Preferibilmente, le righe di emissione monitorate ai fini del controllo del processo sono comprese nell'intervallo da 180 a 2000 nm e sono rilevate con una larghezza di banda non superiore a 100 nm. Preferibilmente, nel caso in cui come elemento emettitore sia utilizzato un gas, tale gas è ossigeno o azoto.

La radiazione emessa dall'ossigeno ha righe di emissione alle seguenti lunghezze d'onda (in nm): 948, 845, 823, 795 e 777. Preferibilmente, il metodo di controllo secondo l'invenzione prevede il monitoraggio di quest'ultima riga di emissione, e quindi l'acquisizione del segnale a 750 nm, con una banda passante di ± 50 nm. Come già detto nella parte introduttiva della descrizione, tale lunghezza d'onda comprende una forte emissione dall'ossigeno ionizzato, facilmente rilevabile anche quando l'ossigeno si presenta solo come contaminante nel processo, e specificatamente fornisce le informazioni necessarie al controllo del taglio laser, nonché al

controllo della fase di foratura preparatoria al taglio. Tale lunghezza d'onda è utilizzata secondo l'invenzione da un lato come informazione circa la tendenza alla crescita del tenore di ossigeno ionizzato nel volume di processo, tendenza che è tipicamente anticipatoria di un'esplosione della foratura o del taglio, e dall'altro lato come indice di ristagno o accumulo di un contaminante, e quindi come indice di foratura non avvenuta o di tendenza alla chiusura del solco di taglio.

Nel caso dell'azoto, la radiazione emessa ha righe di emissione alle seguenti lunghezze d'onda (in nm): 1358, 1246, 939, 870, 860, 745 e 576. In tal caso, si tratterà di monitorare, con una banda passante di ± 50 nm, le seguenti lunghezze d'onda (in nm): 1350, 1250, 950, 850, 750 e 550.

Oltre a segnali emessi da gas, siano essi gas di assistenza o gas contaminanti, è possibile utilizzare anche segnali emessi da elementi metallici contenuti nel volume di processo, siano essi elementi caratterizzanti del materiale o elementi presenti come contaminanti.

A questo proposito, il metodo di controllo secondo l'invenzione prevede preferibilmente il monitoraggio della radiazione emessa dal ferro. Nel ca-

so di pezzo in lavorazione fatto di acciaio al carbonio, la radiazione emessa dal ferro contenuto nel materiale del pezzo ha righe di emissione in una prima banda a 517-521 nm e in una seconda banda a 550-600 nm. In tal caso, sarà sufficiente monitorare, con una banda passante di ± 50 nm, la lunghezza d'onda a 550 nm. Nel caso di pezzo in lavorazione fatto di acciaio inossidabile, la radiazione emessa dal ferro contenuto nel materiale del pezzo ha righe di emissione comprese, oltre che nelle due bande sopra riportate, in una terza banda a 480-500 nm.

Il monitoraggio della lunghezza d'onda a 550 nm, con una banda passante di ± 50 nm, è utilizzabile anche nel caso in cui il materiale in lavorazione è alluminio o lega di alluminio, dal momento che la radiazione emessa dall'alluminio ha righe di emissione comprese in una banda a 518-548 nm.

E' anche possibile utilizzare come elemento emettitore il nichel, la cui radiazione emessa ha righe di emissione alle seguenti lunghezze d'onda (in nm): 361, 352, 349 e 341. In tal caso, sarà sufficiente monitorare, con una banda passante di ± 50 nm, la lunghezza d'onda a 350 nm.

Inoltre, è possibile utilizzare come elemento

emettitore il cromo, la cui radiazione emessa ha righe di emissione alle seguenti lunghezze d'onda (in nm): 427 e 359. In tal caso, sarà sufficiente monitorare, con una banda passante di ± 50 nm, le lunghezze d'onda a 450 nm e a 350 nm.

Nel caso della scelta del rame come elemento emettitore, la cui radiazione emessa ha una riga di emissione a 325 nm, sarà sufficiente monitorare, con una banda passante di ± 50 nm, la lunghezza d'onda a 350 nm.

Ai fini dell'esecuzione della foratura laser preparatoria al taglio, un esempio di algoritmo di controllo utilizzabile dai mezzi di controllo del sistema di lavorazione laser per regolare i parametri di controllo del processo prevede i passi qui di seguito descritti.

a) Innanzitutto, viene verificata l'esistenza del materiale in cui realizzare il foro. A tale scopo, viene inviato tramite la testa laser un primo treno di impulsi laser sul materiale e viene rilevato tramite i mezzi sensori il segnale relativo alla banda/e in lunghezza d'onda predeterminata/e. Se il segnale rilevato risulta troppo basso rispetto a una soglia prefissata, tale informazione viene interpretata dai mezzi di controllo come indice di

assenza del materiale o come indice di foro già realizzato in precedenza.

b) Una volta confermata la presenza del materiale, il processo di lavorazione laser viene avviato con opportuni valori dei parametri di controllo del processo sopra indicati. In particolare, la sorgente laser viene accesa per un certo periodo di tempo prefissato, alla fine del quale la sorgente laser viene spenta. In particolare, se il processo avviene in ambiente ricco di ossigeno (usato come gas di assistenza), allora il tempo di accensione della sorgente laser varia nell'intervallo da 0,5 a 5 msec (preferibilmente 1 msec). Se invece l'ossigeno è presente solo come gas contaminante, allora il tempo di accensione della sorgente laser varia nell'intervallo da 0,5 a 100 msec (preferibilmente 50 msec).

c) Trascorso un certo tempo (tempo di rilassamento) dallo spegnimento della sorgente laser, viene rilevata tramite i mezzi sensori la radiazione emessa nella/e banda/e in lunghezza d'onda predeterminata/e e ne viene monitorato l'andamento. Se il segnale rilevato è sceso sotto una data soglia di re-innesco, allora viene ripetuto il passo b), cioè viene riaccesa la sorgente laser. Durante il moni-

toraggio del segnale di controllo, i mezzi di controllo possono anche misurare la derivata temporale di tale segnale e utilizzare tale derivata come indicazione di robustezza del funzionamento della regolazione.

Il processo viene terminato quando il segnale rilevato scende sotto una data soglia di fine processo. Preferibilmente, il controllo di fine processo viene effettuato durante il periodo di tempo in cui la sorgente laser è accesa.

I valori delle soglie di re-innesco e di fine processo dipendono dal materiale e dallo spessore del pezzo in lavorazione. Preferibilmente, tali valori non sono fissi, ma vengono modificati dinamicamente dai mezzi di controllo nel caso in cui questi rilevino, dalla misura della derivata temporale del segnale di controllo, una condizione di processo poco robusto.

Ai fini dell'esecuzione di una lavorazione di taglio laser, un esempio di algoritmo di controllo utilizzabile dai mezzi di controllo del sistema di lavorazione laser per regolare i parametri di controllo del processo prevede i passi qui di seguito descritti.

a') Inizialmente, i parametri di controllo del

processo vengono impostati sui valori tipicamente scelti sulla base della sorgente laser utilizzata, nonché sulla base del materiale e dello spessore del pezzo in lavorazione.

b') I mezzi sensori rilevano il segnale corrispondente alla/e bande in lunghezza d'onda predeterminata/e della radiazione emessa dal volume di processo. Nel caso in cui almeno uno dei segnali monitorati oltrepassa una data soglia, i mezzi di controllo interpretano questo eccesso di emissione o come una parziale chiusura del solco di taglio nel caso di taglio con gas inerte o come un inizio di perdita di controllo del processo reattivo nel caso di taglio con gas reattivo, e in un caso o nell'altro modificano opportunamente almeno uno dei parametri di controllo del processo sopra indicati, privilegiando dove possibile la potenza del laser e la velocità di avanzamento. Nel caso in cui almeno uno dei segnali monitorati scende sotto una data soglia, i mezzi di controllo interpretano questa riduzione di emissione come processo troppo lento e modificano opportunamente almeno uno dei parametri di controllo del processo sopra indicati, privilegiando dove possibile la potenza del laser e la velocità di avanzamento.

Inoltre, se i mezzi sensori del sistema di lavorazione comprendono più fotodiodi disposti in modo tale da mantenere una correlazione spaziale con la parte del volume di processo che genera la radiazione rilevata da ciascuno dei fotodiodi, allora preferibilmente i mezzi di controllo correlano spazialmente il segnale rilevato con la direzione di avanzamento del taglio, consentendo di ottenere un'informazione sull'anisotropia di comportamento in tutte le direzioni di taglio consentite. Tale informazione fornisce una misura di quanto il fascio laser risulta fuori asse rispetto al centro dell'ugello della testa laser, cioè rispetto alla direzione del flusso di uscita del gas di assistenza, e permette quindi di movimentare opportunamente il baricentro della lente di focalizzazione o dell'ugello.

Sono ovviamente implementabili, nell'ambito della presente invenzione, algoritmi di controllo diversi da quelli sopra descritti, fermo restando il principio di regolare almeno uno dei parametri di controllo del processo precedentemente menzionati sulla base del segnale relativo alla radiazione emessa dal volume di processo in almeno una banda in lunghezza d'onda predeterminata, tale banda di

lunghezza d'onda predeterminata includendo almeno una riga di emissione di un gas o altro elemento emettitore presente nel volume di processo durante la lavorazione laser.

Si descriveranno ora, con riferimento alle figure dalla 6 alla 11, in cui a componenti identici o corrispondenti a quelli delle figure 4 e 5 sono stati attribuiti i medesimi numeri di riferimento, alcune possibili forme di realizzazione dei mezzi sensori utilizzabili nel dispositivo di controllo del processo di un sistema di taglio laser secondo l'invenzione.

Nella forma di realizzazione della figura 6, il sistema di taglio laser comprende una sorgente laser (non mostrata) di tipo a stato solido (Nd:YAG, laser in fibra, laser a disco, laser a diodi), nel qual caso il percorso ottico comprende una fibra di trasporto 32 e la testa laser 12 comprende inoltre un dispositivo di collimazione 34, che è collegato all'estremità finale della fibra di trasporto 32 e comprende una o più lenti di collimazione. Anche in questo caso, i mezzi sensori (fotodiode 20, dispositivo riflettore/deflettore 22 e dispositivo di filtraggio ottico 24) possono essere disposti al disopra o al disotto del dispositivo di

focalizzazione 14. Nel primo caso, i mezzi sensori saranno disposti fra il dispositivo di focalizzazione 14 e il dispositivo di collimazione 34, come mostrato nella figura 6.

Secondo la forma di realizzazione della figura 7, che si riferisce sempre al caso di un sistema di taglio laser utilizzando una sorgente laser di tipo a stato solido, il dispositivo riflettore/deflettore 22 è formato da un deflettore a 90° , che è posizionato fra il dispositivo di collimazione 34 e il dispositivo di focalizzazione 14 ed è configurato in modo da riflettere almeno il 99,9% della radiazione laser e per trasmettere invece la radiazione nella/e banda/e in lunghezza d'onda pre-determinata/e. Nell'esempio proposto i mezzi sensori comprendono inoltre una lente di focalizzazione 36 disposta fra il deflettore 22 e il fotodiode 20 per focalizzare su quest'ultimo il segnale rilevato. Inoltre, nell'esempio proposto il dispositivo di filtraggio ottico 24 è disposto fra il deflettore 22 e la lente di focalizzazione 36 e comprende, nell'ordine dal deflettore 22 alla lente di focalizzazione 36, un primo filtro ottico 38 predisposto per abbattere la radiazione laser e un secondo filtro ottico 40 predisposto per selezionare la/e

banda/e in lunghezza d'onda predeterminata/e. La medesima configurazione dei mezzi sensori può essere ottenuta anche con una pluralità di fotodiodi, di dispositivi riflettori/deflettori e di dispositivi di filtraggio ottico, nel qual caso ciascun dispositivo riflettore/deflettore comprenderà un rispettivo deflettore e fra ciascun deflettore e il rispettivo fotodiodo sarà prevista una rispettiva lente di focalizzazione.

Secondo le forme di realizzazione delle figure dalla 8 alla 11, che si riferiscono sempre al caso di un sistema di taglio laser utilizzante una sorgente laser di tipo a stato solido, è previsto, in alternativa a un deflettore a 90° , un dispositivo di derivazione disposto lungo il percorso ottico e configurato in modo da permettere al fascio laser generato dalla sorgente laser di essere completamente trasportato alla testa laser tramite la fibra di trasporto e alla radiazione che viene emessa dal volume di processo e trasportata tramite la fibra di trasporto di essere indirizzata sul fotodiodo.

Più specificamente, secondo la forma di realizzazione della figura 8, lungo il percorso ottico è previsto un dispositivo di accoppiamento ottico 42 mediante cui il laser generato dalla sorgente

laser viene lanciato nella fibra di trasporto 32, il dispositivo di accoppiamento ottico 42 comprendendo una lente di collimazione 44 e una lente di focalizzazione e lancio 46. In questo caso, il dispositivo di derivazione è integrato nel dispositivo di accoppiamento ottico 42 e comprende un *beam splitter* 48 disposto fra la lente di collimazione 44 e la lente di focalizzazione e lancio 46 in modo da permettere al fascio laser generato dalla sorgente laser di entrare completamente nella lente di focalizzazione e lancio 46 e alla radiazione emessa dal volume di processo e trasportata tramite la fibra di trasporto 32 di essere indirizzata sul fotodiodo 20. Come nella forma di realizzazione della figura 7, i mezzi sensori comprendono inoltre una lente di focalizzazione 36 disposta fra il *beam splitter* 48 e il fotodiodo 20 per focalizzare su quest'ultimo il segnale rilevato. Anche in questo caso, inoltre, il dispositivo di filtraggio ottico 24 è disposto fra il *beam splitter* 48 e la lente di focalizzazione 36 e comprende un primo filtro ottico 38 predisposto per abbattere la radiazione laser e un secondo filtro ottico 40 predisposto per selezionare la/e banda/e in lunghezza d'onda predeterminata/e.

Nelle forme di realizzazione delle figure dalla 9 alla 11, invece, il dispositivo di derivazione comprende una fibra secondaria 50 saldata alla fibra di trasporto 32.

Più specificamente, secondo la forma di realizzazione della figura 9, in cui il percorso ottico comprende un dispositivo di accoppiamento ottico (non mostrato) mediante cui il laser generato dalla sorgente laser viene lanciato nella fibra di trasporto, la fibra secondaria 50 è saldata alla fibra di trasporto 32 in un punto di quest'ultima posizionato a valle del dispositivo di accoppiamento ottico. Anche in questo caso, i mezzi sensori comprendono nell'ordine, oltre alla fibra secondaria 50, una lente di collimazione 52, un dispositivo di filtraggio ottico 24, una lente di focalizzazione 36 e un fotodiodo 20, il dispositivo di filtraggio ottico 24 comprendendo a sua volta un primo filtro ottico 38 predisposto per abbattere la radiazione laser e un secondo filtro ottico 40 predisposto per selezionare la/e banda/e in lunghezza d'onda predefinita/e.

Secondo la forma di realizzazione della figura 10, manca il dispositivo di accoppiamento ottico lungo il percorso ottico e la fibra secondaria 50 è

saldata alla fibra di trasporto 32 nel medesimo punto in cui la fibra di trasporto è saldata a una fibra di uscita 54 della sorgente laser. Per quanto concerne i mezzi sensori, vale quanto sopra detto con riferimento alla figura 9.

Infine, secondo la forma di realizzazione della figura 11, la sorgente laser 10 comprende una pluralità di moduli laser 10.1, 10.2, ..., 10.N in grado di emettere un fascio laser in modo indipendente l'uno rispetto all'altro, e una corrispondente pluralità di fibre di uscita 54.1, 54.2, ..., 54.N uscenti ciascuna da un rispettivo modulo laser. Le fibre di uscita sono connesse in ingresso a un combinatore ottico 56, cui è connessa in uscita la fibra di trasporto 32. In questo caso, la fibra secondaria 50 è saldata al combinatore ottico 56. Per quanto concerne i mezzi sensori, vale quanto sopra detto con riferimento alla figura 9.

Naturalmente, fermo restando il principio dell'invenzione, le modalità di attuazione del metodo di controllo e le forme di realizzazione del sistema di taglio laser potranno essere ampiamente variati rispetto a quanto è stato descritto e illustrato a puro titolo di esempio non limitativo, senza con ciò fuoriuscire dall'ambito dell'inven-

zione come definito nelle annesse rivendicazioni.

RIVENDICAZIONI

1. Metodo per il controllo di un processo di taglio laser, il processo prevedendo l'irraggiamento di un pezzo in lavorazione (P) mediante fascio laser generato da una sorgente laser (10) e focalizzato da una testa laser (12), nonché l'emissione di un flusso di un gas di assistenza da un ugello (16) della testa laser (12),

il metodo di controllo comprendendo i passi di:

a) rilevare il segnale in lunghezza d'onda della radiazione emessa da un elemento emettitore presente nel volume di materiale coinvolto dall'irraggiamento del fascio laser focalizzato, e

b) regolare, sulla base del segnale rilevato, almeno uno dei seguenti parametri di controllo del processo: la potenza del laser, la frequenza e il *duty cycle* dell'impulso laser, la pressione del gas di assistenza, la velocità di avanzamento relativa fra la testa laser (12) e il pezzo in lavorazione (P), la distanza fra l'ugello (16) della testa laser (12) e la superficie (S) del pezzo in lavorazione (P), e la distanza fra il fuoco (F) del fascio laser e la superficie (S) del pezzo in lavorazione (P).

2. Metodo secondo la rivendicazione 1, in cui il

passo a) viene eseguito rilevando la radiazione emessa in almeno una banda in lunghezza d'onda predeterminata compresa nell'intervallo da 180 a 2000 nm e avente una larghezza di banda non superiore a 100 nm.

3. Metodo secondo la rivendicazione 1 o la rivendicazione 2, in cui come elemento emettitore è utilizzato il gas di assistenza.

4. Metodo secondo la rivendicazione 1 o la rivendicazione 2, in cui come elemento emettitore è utilizzato un gas contaminante presente nel volume di materiale coinvolto dall'irraggiamento del fascio laser focalizzato.

5. Metodo secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, in cui come elemento emettitore è utilizzato un elemento metallico contenuto nel materiale del pezzo in lavorazione (P) o presente come contaminante nel volume di materiale coinvolto dall'irraggiamento del fascio laser focalizzato.

6. Metodo secondo la rivendicazione 2, in cui detta almeno una banda in lunghezza d'onda predeterminata include la lunghezza d'onda a 777 nm.

7. Metodo secondo la rivendicazione 2 o la rivendicazione 6, in cui detta almeno una banda in lunghezza d'onda predeterminata include la banda in

lunghezza d'onda compresa fra 500 e 600 nm.

8. Metodo secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, in cui per l'esecuzione di una foratura propedeutica al processo di taglio detto passo b) comprende i seguenti sottopassi:

b1) accendere la sorgente laser (10) per un primo periodo di tempo prefissato che è compreso nell'intervallo da 0,5 a 5 msec nel caso in cui come gas di assistenza è utilizzato ossigeno, e che è compreso nell'intervallo da 0,5 a 100 msec nel caso in cui come gas di assistenza è utilizzato un gas diverso dall'ossigeno;

b2) spegnere la sorgente laser (10) al termine di detto primo periodo di tempo prefissato; e

b3) attendere finché il segnale in lunghezza d'onda rilevato non è sceso al disotto di una data soglia, e solo allora ripetere i sottopassi b1) e b2).

9. Metodo secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, in cui detto passo b) viene eseguito in maniera tale per cui se il segnale in lunghezza d'onda rilevato al passo a) oltrepassa una data soglia, ciò viene interpretato come una parziale chiusura del solco di taglio nel caso di taglio con gas inerte o come un inizio di perdita di

controllo del processo reattivo nel caso di taglio con gas reattivo, e almeno uno dei suddetti parametri di controllo del processo viene modificato di conseguenza, mentre se il segnale in lunghezza d'onda rilevato al passo a) scende al disotto di una data soglia, ciò viene interpretato come processo troppo lento, e almeno uno dei suddetti parametri di controllo del processo viene modificato di conseguenza.

10. Sistema di taglio laser comprendente:

- una sorgente laser (10);
- una testa laser (12) comprendente un dispositivo di focalizzazione (14) per focalizzare il fascio laser generato dalla sorgente laser (10) su un pezzo in lavorazione (P) e un ugello (16) per l'aduzione di un gas di assistenza;
- un percorso ottico predisposto per trasportare il fascio laser generato dalla sorgente laser (10) al dispositivo di focalizzazione (14) della testa laser (12);
- un dispositivo di movimentazione predisposto per movimentare la testa laser (12) e il pezzo in lavorazione (P) l'una rispetto all'altro con una velocità di avanzamento regolabile, nonché per comandare la pressione del gas di assistenza, per re-

regolare la distanza dell'ugello (16) dalla superficie (S) del pezzo in lavorazione (P) e per regolare la posizione del fuoco (F) del fascio laser rispetto alla superficie (S) del pezzo in lavorazione (P); e

- un dispositivo di controllo del processo comprendente mezzi sensori atti a rilevare almeno una predeterminata banda in lunghezza d'onda della radiazione emessa da un dato gas o un dato materiale presente nel volume di materiale coinvolto dall'irraggiamento del fascio laser focalizzato, mezzi di elaborazione del segnale atti a elaborare il segnale rilevato da detti mezzi sensori, e mezzi di controllo atti a controllare, sulla base del segnale ricevuto da detti mezzi di elaborazione del segnale, la sorgente laser (10) e/o il dispositivo di movimentazione per regolare almeno uno dei seguenti parametri di controllo del processo: la potenza del laser, la frequenza e il *duty cycle* dell'impulso laser, la pressione del gas di assistenza, la velocità di avanzamento relativa fra la testa laser (12) e il pezzo in lavorazione (P), la distanza fra l'ugello (16) della testa laser (12) e la superficie (S) del pezzo in lavorazione (P), e la distanza fra il fuoco (F) del fascio laser e la superficie

(S) del pezzo in lavorazione (P).

11. Sistema secondo la rivendicazione 10, in cui detti mezzi sensori comprendono un fotodiodo (20) atto a rilevare detta almeno una banda in lunghezza d'onda predeterminata, un dispositivo riflettore/deflettore (22) predisposto per indirizzare sul fotodiodo (20) la radiazione emessa dal volume di materiale coinvolto dall'irraggiamento del fascio laser focalizzato, e un dispositivo di filtraggio ottico (24) interposto fra il fotodiodo (20) e il dispositivo riflettore/deflettore (22) per selezionare detta almeno una banda in lunghezza d'onda predeterminata.

12. Sistema secondo la rivendicazione 11, in cui la sorgente laser (10) è una sorgente laser di tipo a stato solido, in cui il percorso ottico comprende una fibra di trasporto (32), in cui la testa laser (12) comprende un dispositivo di collimazione (34) collegato all'estremità finale della fibra di trasporto (32), e in cui il dispositivo riflettore/deflettore (22) è un deflettore a 90° predisposto per riflettere almeno il 99,9% della radiazione laser e per trasmettere la radiazione emessa in detta almeno una banda in lunghezza d'onda predeterminata.

13. Sistema secondo la rivendicazione 12, in cui detti mezzi sensori comprendono inoltre una lente di focalizzazione (36) disposta fra il dispositivo riflettore/deflettore (22) e il fotodiodo (20) per focalizzare su quest'ultimo la radiazione emessa in detta almeno una banda in lunghezza d'onda predeterminata, e in cui il dispositivo di filtraggio ottico (24) è disposto fra il dispositivo riflettore/deflettore (22) e la lente di focalizzazione (36) e comprende un primo filtro ottico (38) predisposto per abbattere la radiazione laser e un secondo filtro ottico (40) predisposto per selezionare detta almeno una banda in lunghezza d'onda predeterminata.

14. Sistema secondo la rivendicazione 10, in cui la sorgente laser (10) è una sorgente laser di tipo a stato solido, in cui il percorso ottico comprende una fibra di trasporto (32) e in cui detti mezzi sensori comprendono un fotodiodo (20) atto a rilevare detta almeno una banda in lunghezza d'onda predeterminata, un dispositivo di derivazione (48, 50) disposto lungo il percorso ottico (32) e configurato in modo da permettere al fascio laser generato dalla sorgente laser (10) di essere completamente trasportato alla testa laser (12) tramite la

fibra di trasporto (32) e alla radiazione che viene emessa dal processo di taglio laser e trasportata tramite la fibra di trasporto (32) di essere indirizzata sul fotodiodo (20), e un dispositivo di filtraggio ottico (24) interposto fra il fotodiodo (20) e il dispositivo di derivazione (48, 50) per selezionare detta almeno una banda in lunghezza d'onda predeterminata.

15. Sistema secondo la rivendicazione 14, in cui il percorso ottico comprende un dispositivo di accoppiamento ottico (42) con una lente di collimazione (44) e una lente di focalizzazione e lancio (46), e in cui il dispositivo di derivazione (48, 50) comprende un *beam splitter* (48) disposto fra la lente di collimazione (44) e la lente di focalizzazione e lancio (46) in modo da consentire al fascio laser generato dalla sorgente laser (10) di entrare completamente nella lente di focalizzazione e lancio (46) e alla radiazione che viene emessa dal processo di taglio laser e trasportata dalla fibra di trasporto (32) di essere indirizzata sul fotodiodo (20).

16. Sistema secondo la rivendicazione 14, in cui il percorso ottico comprende un dispositivo di accoppiamento ottico e in cui il dispositivo di deri-

vazione (48, 50) comprende una fibra secondaria (50) saldata alla fibra di trasporto (32) in un punto di quest'ultima posizionato a valle del dispositivo di accoppiamento ottico.

17. Sistema secondo la rivendicazione 14, in cui la fibra di trasporto (32) è saldata a una fibra di uscita (54) della sorgente laser (10) e in cui il dispositivo di derivazione (48, 50) comprende una fibra secondaria (50) saldata alla fibra di trasporto (32) nel medesimo punto in cui quest'ultima è saldata alla fibra di uscita (54).

18. Sistema secondo la rivendicazione 14, in cui la sorgente laser (10) comprende una pluralità di moduli laser (10.1, 10.2, ..., 10.N) in grado di emettere un fascio laser in modo indipendente l'uno rispetto all'altro e una corrispondente pluralità di fibre di uscita (54.1, 54.2, ..., 54.N) uscenti ciascuna da un rispettivo modulo laser (10.1, 10.2, ..., 10.N), in cui il percorso ottico comprende un combinatorio ottico (56) cui sono connesse in ingresso le fibre di uscita (54.1, 54.2, ..., 54.N) e cui è connessa in uscita la fibra di trasporto (32), e in cui il dispositivo di derivazione (48, 50) comprende una fibra secondaria (50) saldata al combinatorio ottico (56).

CLAIMS

1. Method for controlling a laser cutting process, the process providing for irradiation of a workpiece (P) by means of a laser beam generated by a laser source (10) and focussed by a laser head (12), as well as for emission of a flow of an assistance gas by a nozzle (16) of the laser head (12),

the control method comprising the steps of:

a) detecting the wavelength signal of the radiation emitted by an emitting element present in the volume of material irradiated by the focussed laser beam, and

b) adjusting, based on the detected signal, at least one of the following process control parameters: laser power, frequency and duty cycle of the laser pulse, pressure of the assistance gas, relative speed between the laser head (12) and the workpiece (P), distance of the nozzle of the laser head (12) from the surface (S) of the workpiece (P), and distance of the focus (F) of the laser beam from the surface (S) of the workpiece (P).

2. Method according to claim 1, wherein step a) is performed by detecting the radiation emitted in at least one predetermined wavelength band which

ranges from 180 to 2000 nm and has a bandwidth not larger than 100 nm.

3. Method according to claim 1 or claim 2, wherein the assistance gas is used as emitting element.

4. Method according to claim 1 or claim 2, wherein a contaminant gas present in the volume of material irradiated by the focussed laser beam is used as emitting element.

5. Method according to any of the preceding claims, wherein a metal element contained in the material of the workpiece (P) or present as a contaminant in the volume of material irradiated by the focussed laser beam is used as emitting element.

6. Method according to claim 2, wherein said at least one predetermined wavelength band includes the 777 nm wavelength.

7. Method according to claim 2 or claim 6, wherein said at least one predetermined wavelength band includes the wavelength band ranging from 500 to 600 nm.

8. Method according to any of the preceding claims, wherein in order to perform a piercing in preparation of the cutting process said step b)

comprises the following sub-steps:

b1) switching on the laser source (10) for a first predetermined time interval ranging from 0,5 to 5 msec in case oxygen is used as assistance gas, and ranging from 0,5 to 100 msec in case a gas other than oxygen is used as assistance gas;

b2) switching off the laser source (10) at the end of said first predetermined time interval; and

b3) waiting until the detected wavelength signal has become lower than a given threshold, and only then repeating sub-steps b1) and b2).

9. Method according to any of the preceding claims, wherein said step b) is performed in such a manner that if the wavelength signal detected at step a) exceeds a given threshold, this is interpreted as a partial closure of the kerf in case of inert gas cutting or as the beginning of a loss of control of the reactive process in case of reactive gas cutting, and at least one of the aforesaid process control parameters is varied accordingly, whereas if the wavelength signal detected at step a) becomes lower than a given threshold, this is interpreted as meaning that the process is too slow, and at least one of the aforesaid process control parameters is varied accordingly.

10. Laser cutting apparatus comprising:

- a laser source (10);
- a laser head (12) comprising a focussing device (14) for focussing the laser beam generated by the laser source (10) onto a workpiece (P) and a nozzle (16) for dispensing an assistance gas;
- an optical path for carrying the laser beam generated by the laser source (10) to the focussing device (14) of the laser head (12);
- a moving device for moving the laser head (12) and the workpiece (P) with respect to each other with an adjustable speed, as well as for controlling the pressure of the assistance gas, for adjusting the distance of the nozzle (16) from the surface (S) of the workpiece (P) and for adjusting the position of the focus (F) of the laser beam with respect to the surface (S) of the workpiece (P); and
- a process control device comprising sensor means for detecting at least one predetermined wavelength band of the radiation emitted by a given gas or a given material present in the volume of material irradiated by the focussed laser beam, signal processing means for processing the signal detected by said sensor means, and control means

for controlling, on the base of the signal received by said signal processing means, the laser source (10) and/or the moving device to adjust at least one of the following process control parameters: laser power, frequency and duty cycle of the laser pulse, pressure of the assistance gas, relative speed between the laser head (12) and the workpiece (P), distance of the nozzle (16) of the laser head (12) from the surface (S) of the workpiece (P), and distance of the focus (F) of the laser beam from the surface (S) of the workpiece (P).

11. Apparatus according to claim 10, wherein said sensor means comprise a photodiode (20) for detecting said at least one predetermined wavelength band, a reflector/deflector device (22) arranged to direct the radiation emitted by the volume of material irradiated by the focussed laser beam on the photodiode (20), and an optical filter device (24) interposed between the photodiode (20) and the reflector/deflector device (22) to select said at least one predetermined wavelength band.

12. Apparatus according to claim 11, wherein the laser source (10) is a solid-state laser source, wherein the optical path comprises a transport fibre (32), wherein the laser head (12) comprises a

collimation device (34) connected to the final end of the transport fibre (32), and wherein the reflector/deflector device (22) is a 90-degree deflector arranged to reflect at least the 99,9% of the laser radiation and to transmit the radiation emitted in said at least one predetermined wavelength band.

13. Apparatus according to claim 12, wherein said sensor means further comprise a focussing lens (36) arranged between the reflector/deflector device (22) and the photodiode (20) to focus on this latter the radiation emitted in said at least one predetermined wavelength band, and wherein the optical filter device (24) is arranged between the reflector/deflector device (22) and the focussing lens (36) and comprises a first optical filter (38) arranged to bring down the laser radiation and a second optical filter (40) arranged to select said at least one predetermined wavelength band.

14. Apparatus according to claim 10, wherein the laser source (10) is a solid-state laser source, wherein the optical path comprises a transport fibre (32) and wherein said sensor means comprise a photodiode (20) for detecting said at least one predetermined wavelength band, a branching device

(48, 50) arranged along the optical path (32) and configured to allow the laser beam generated by the laser source (10) to be totally transported to the laser head (12) through the transport fibre (32) and the radiation which is emitted by the laser cutting process and is carried through the transport fibre (32) to be directed on the photodiode (20), and an optical filter device (24) interposed between the photodiode (20) and the branching device (48, 50) to select said at least one predetermined wavelength band.

15. Apparatus according to claim 14, wherein the optical path comprises an optical coupling device (42) comprising a collimation lens (44) and a focussing and launching lens (46), and wherein the branching device (48, 50) comprises a beam splitter (48) arranged between the collimation lens (44) and the focussing and launching lens (46) so as to allow the laser beam generated by the laser source (10) to pass entirely through the focussing and launching lens (46) and the radiation which is emitted by the laser cutting process and is carried by the transport fibre (32) to be directed on the photodiode (20).

16. Apparatus according to claim 14, wherein the

optical path comprises an optical coupling device and wherein the branching device (48, 50) comprises a secondary fibre (50) welded to the transport fibre (32) in a point of this latter which is positioned downstream of the optical coupling device.

17. Apparatus according to claim 14, wherein the transport fibre (32) is welded to an output fibre (54) of the laser source (10) and wherein the branching device (48, 50) comprises a secondary fibre (50) which is welded to the transport fibre (32) in the same point where this latter is welded to the output fibre (54).

18. Apparatus according to claim 14, wherein the laser source (10) comprises a plurality of laser modules (10.1, 10.2, ..., 10.N) able to emit a laser beam independently of each other and a corresponding plurality of output fibres (54.1, 54.2, ..., 54.N) associated each to a respective laser module (10.1, 10.2, ..., 10.N), wherein the optical path comprises an optical combiner (56) to which the output fibres (54.1, 54.2, ..., 54.N) are connected as inputs and to which the transport fibre (32) is connected as output, and wherein the branching device (48, 50) comprises a secondary fibre (50) welded to the optical combiner (56).

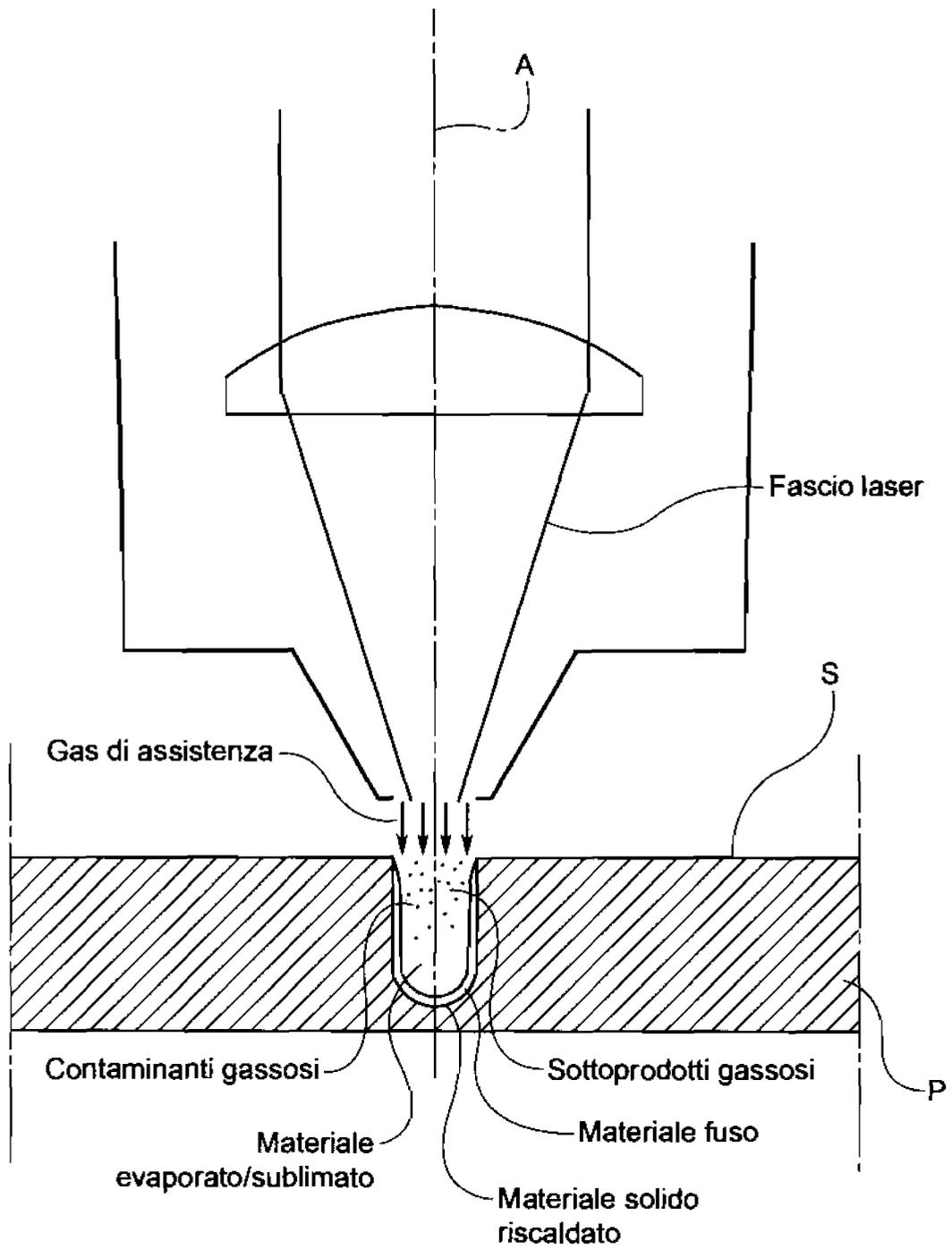


FIG. 1

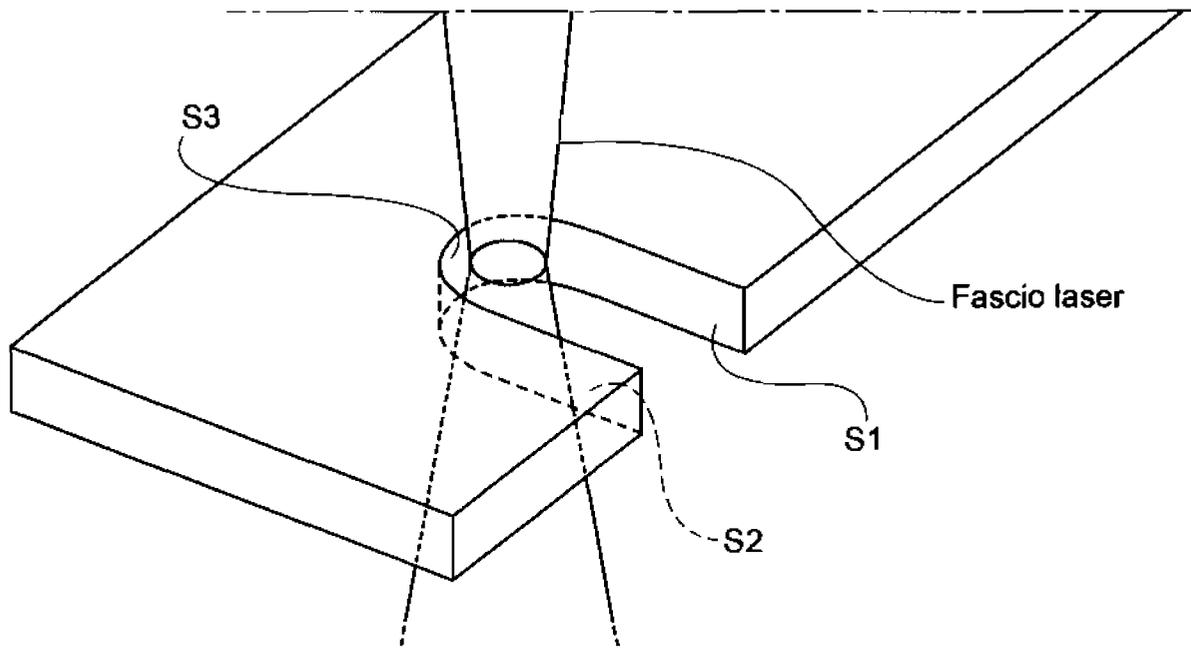


FIG. 2

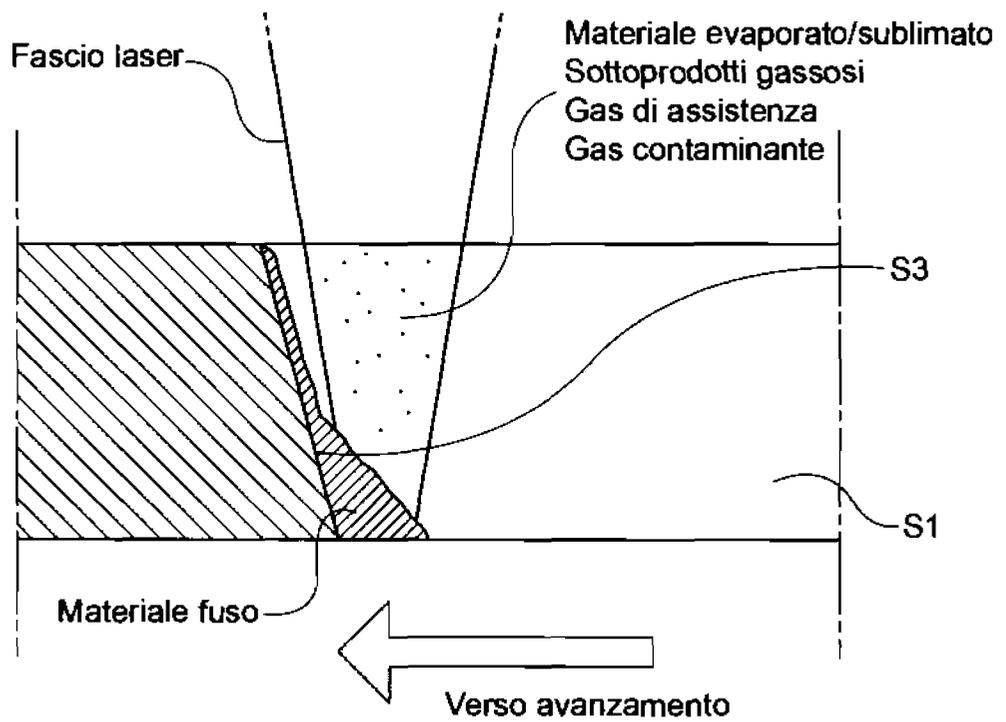


FIG. 3

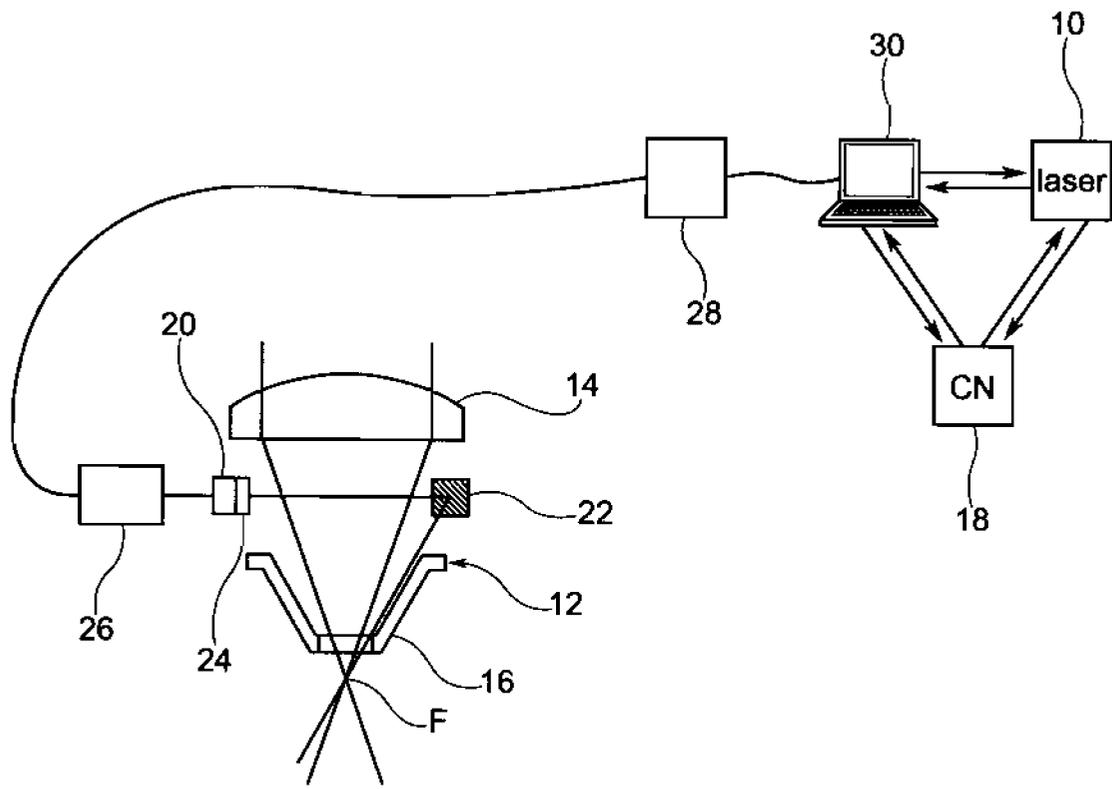


FIG. 4

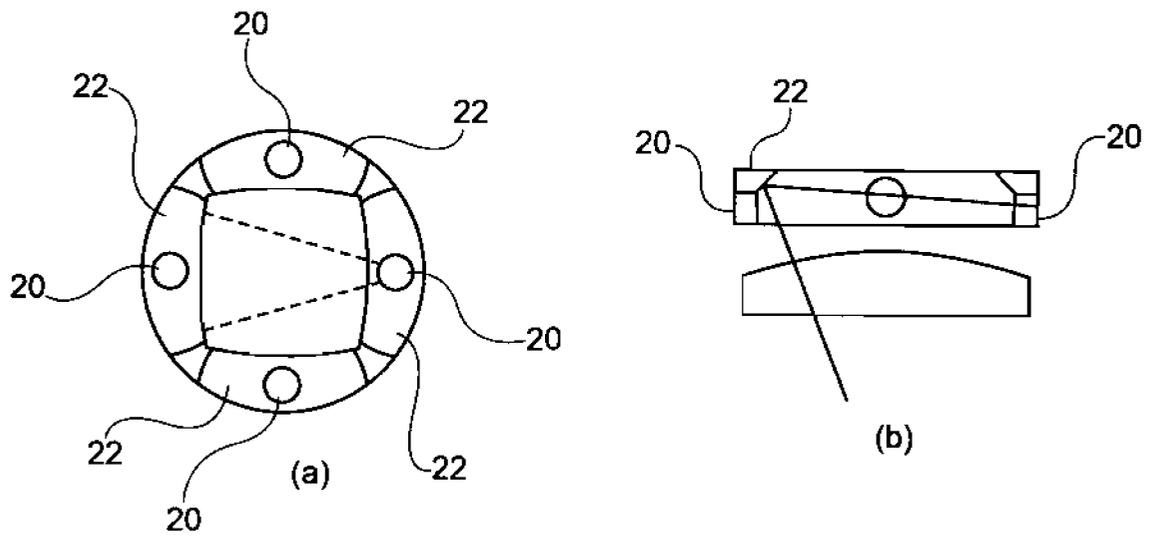


FIG. 5

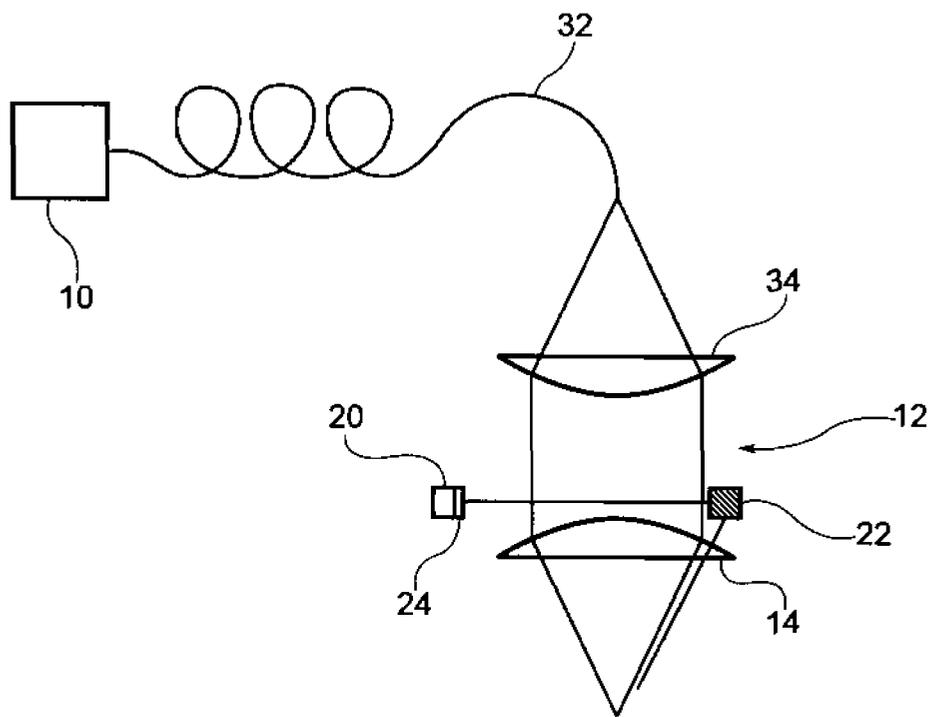


FIG. 6

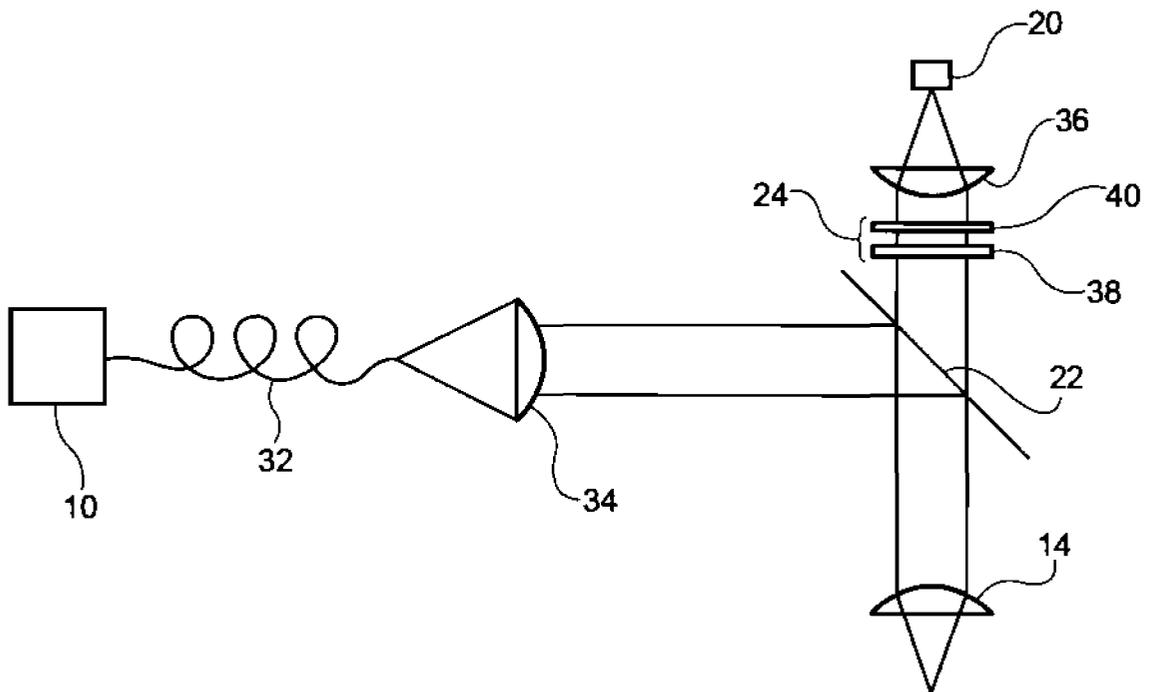


FIG. 7

5/6

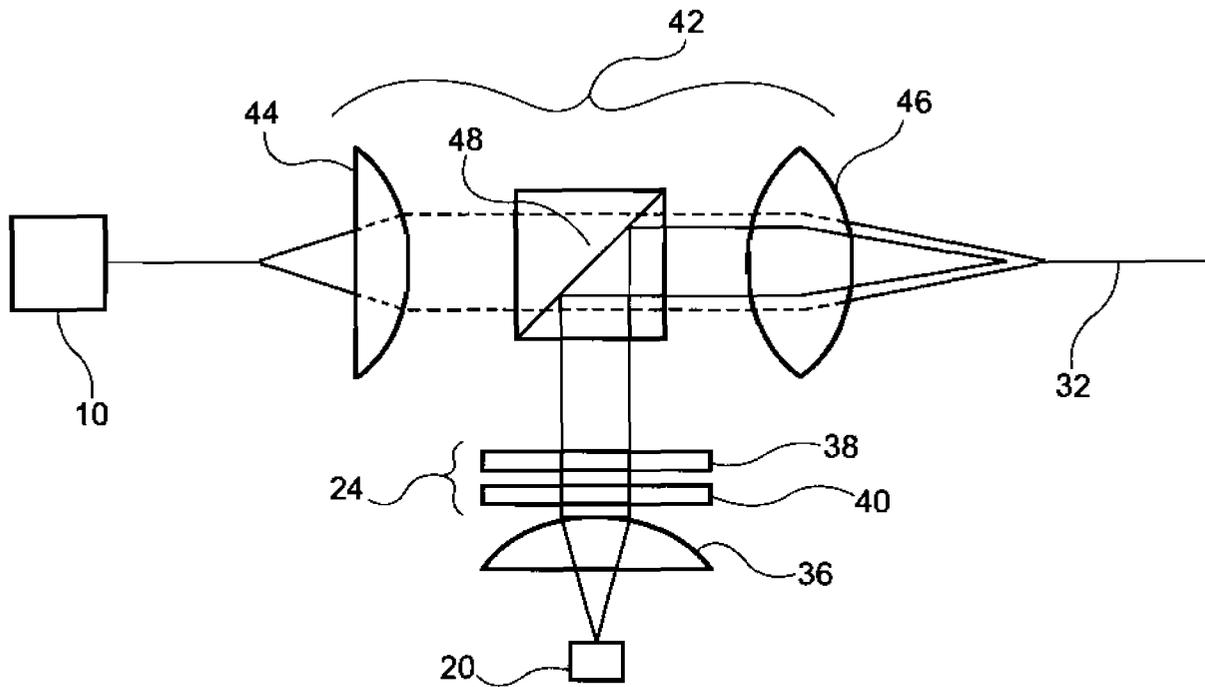


FIG. 8

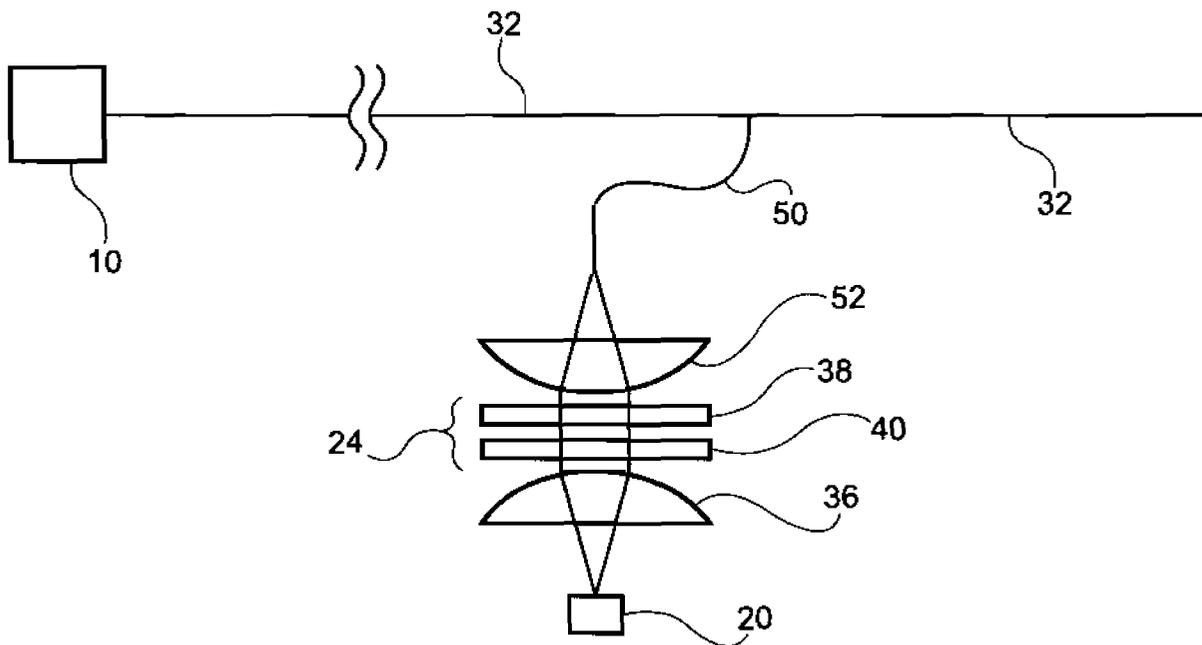


FIG. 9

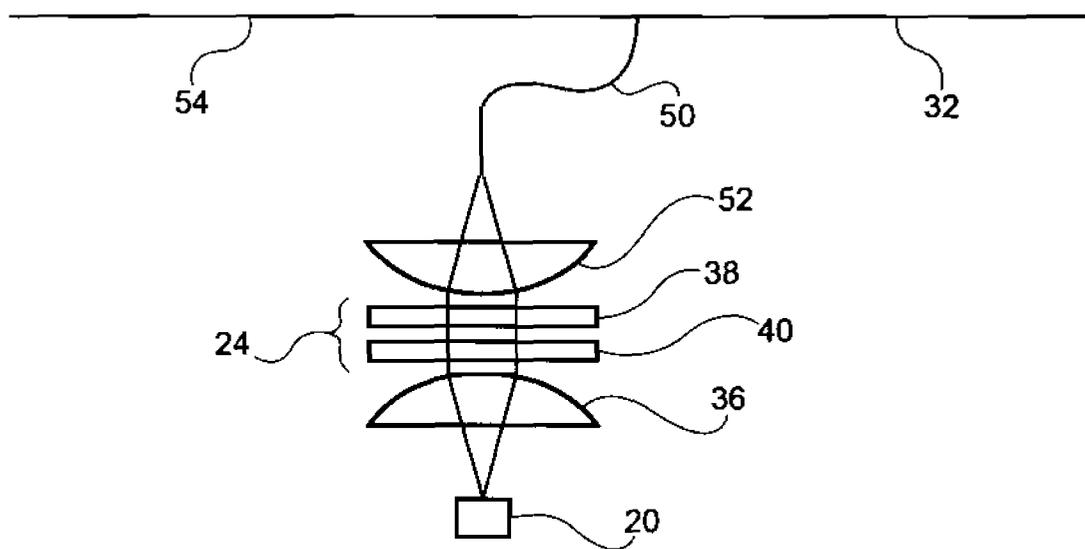


FIG. 10

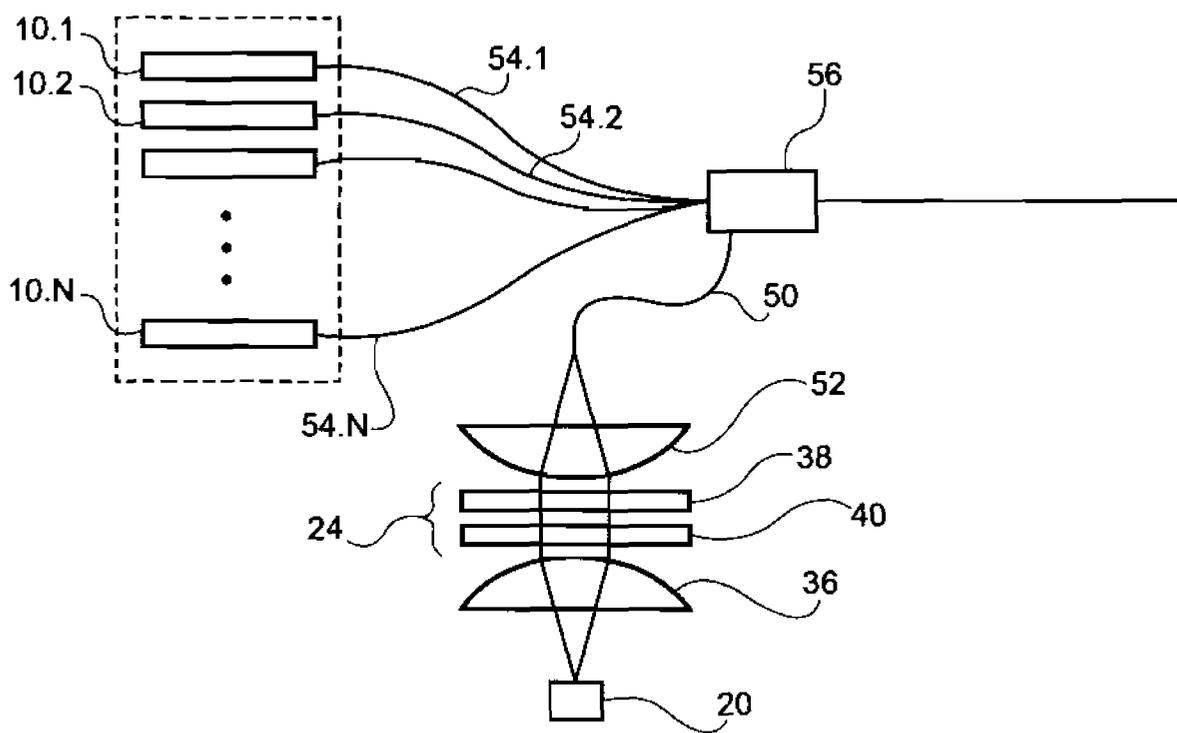


FIG. 11