

DOMANDA DI INVENZIONE NUMERO	102020000006880
Data Deposito	01/04/2020
Data Pubblicazione	01/10/2021

Classifiche IPC

Sezione	Classe	Sottoclasse	Gruppo	Sottogruppo
G	01	B	11	02

Titolo

Sistema ottico combinato per misure dimensionali e termiche, e relativo procedimento di funzionamento

DESCRIZIONE dell'invenzione industriale dal titolo:
"Sistema ottico combinato per misure dimensionali e termiche, e relativo procedimento di funzionamento"
di: ADIGE S.p.A., nazionalità italiana, Via per Barco 11, 38056 Levico Terme (TN); e

POLITECNICO DI MILANO, nazionalità italiana,
piazza Leonardo da Vinci 32, 20133 MILANO

Inventori designati: Simone DONADELLO, Barbara PREVITALI

Depositata il: 1 aprile 2020

* * *

DESCRIZIONE

La presente invenzione riguarda in generale le misure ottiche e in particolare le misure ottiche di oggetti o materiali sottoposti a processi di lavorazione industriale. Più specificamente l'invenzione riguarda un sistema ottico combinato ed un procedimento per la determinazione della temperatura della superficie di un oggetto o materiale e della sua distanza, secondo il preambolo della rivendicazione 1 e della rivendicazione 19, rispettivamente.

Secondo un ulteriore aspetto, la presente invenzione riguarda una macchina per la lavorazione laser di un pezzo o materiale, secondo il preambolo

della rivendicazione 20.

Nella descrizione e nelle rivendicazioni che seguono, il termine "oggetto" indica un prodotto finito in misurazione o un pezzo in lavorazione. Nell'applicazione a macchine utensili ed in particolare a macchine per la lavorazione laser, il termine "pezzo" e, nella forma di realizzazione preferita, "pezzo metallico" è utilizzato per individuare un qualsiasi manufatto, quale una lastra o un profilo allungato avente sezione trasversale indifferentemente chiusa - ad esempio di forma circolare, rettangolare o quadrata cava - o aperta - ad esempio una sezione piatta o una sezione a forma di L, C, U ecc.. Il termine "materiale" o "materiale precursore" nella produzione additiva identifica la materia prima, generalmente in polvere, sottoposta a sinterizzazione o fusione localizzata mediante il fascio laser.

Nei processi industriali è frequente che un utensile di lavorazione approcci un oggetto - senza venirne a contatto - o un materiale per operarne una lavorazione a distanza, ad esempio mediante emissione di radiazioni o di fluidi di lavoro. E' anche noto che uno strumento di misura approcci un pezzo o un materiale in lavorazione nel corso di un

processo di fabbricazione di un prodotto, o anche il prodotto finito per rilevarne alcune caratteristiche geometriche o proprietà fisiche durante la sospensione, nel corso o al termine di un processo di lavorazione.

A puro titolo di esempio di un processo di lavorazione industriale, nei processi di lavorazione laser di materiali, e di lastre e profilati metallici in particolare, una radiazione laser è utilizzata come utensile termico per una grande varietà di applicazioni che dipendono dai parametri di interazione del fascio laser con il pezzo in lavorazione, specificamente dalla densità di energia per volume di incidenza del fascio laser sul pezzo, e dall'intervallo di tempo di interazione.

La differenza tra i diversi tipi di lavorazione che può essere eseguita su un materiale è sostanzialmente riconducibile alla potenza del fascio laser impiegato ed al tempo di interazione tra il fascio laser ed il materiale sottoposto a lavorazione. Ad esempio, indirizzando una bassa densità di energia (dell'ordine delle decine di W per mm² di superficie) per un tempo prolungato (dell'ordine dei secondi) su un pezzo metallico si realizza un processo di tempra, mentre indirizzando una elevata

densità di energia (dell'ordine delle decine di MW per mm² di superficie) per un tempo dell'ordine dei femtosecondi o picosecondi sullo stesso pezzo metallico si realizza un processo di foto-ablazione. Nella gamma intermedia di densità di energia crescenti e tempo di lavorazione decrescente il controllo di questi parametri permette di realizzare processi di saldatura, taglio, perforazione, incisione, marcatura. Questi processi avvengono emettendo il fascio laser da una testa di lavorazione che opera discosta dal pezzo sottoposto al processo.

Nei processi additivi il materiale può, ad esempio, venire apportato sotto forma di filamento, sotto forma di polvere emessa da un ugello o ancora in alternativa può essere presente nella forma di letto di polvere. Il materiale viene quindi fuso da radiazione laser, ottenendo una stampa tridimensionale a seguito della ri-solidificazione del materiale stesso.

Nel settore della lavorazione laser di materiali, uno strumento di lavorazione portato da una macchina è atto a generare un fascio laser focalizzato ad alta potenza avente una prestabilita distribuzione di potenza trasversale in corrisponden-

za di almeno un piano di lavorazione del materiale ed a governare la direzione e la posizione di incidenza del fascio lungo il materiale, nonché a controllare - ove necessario - la direzione di un flusso di gas di assistenza che ha funzioni meccaniche di propulsione del fuso, oppure funzioni chimiche di assistenza alla combustione, o ancora funzioni tecnologiche di schermatura dall'ambiente circostante della regione di lavorazione.

Nei processi industriali in cui uno strumento di lavorazione approccia un oggetto o un materiale i risultati della lavorazione dipendono dalla corretta distanza tra lo strumento di lavorazione e l'oggetto o il materiale e dalla potenza del fascio laser di lavorazione. Ad esempio, nella lavorazione laser di un materiale, e specificamente nel controllo della lavorazione laser di un materiale metallico per il taglio, la foratura o la saldatura laser di detto materiale, o la fabbricazione additiva di predeterminate strutture a partire da un materiale precursore in polvere, è importante che lo strumento di lavorazione sia mantenuto ad una distanza controllata dal pezzo o materiale e che la potenza del fascio laser focalizzato sulla superficie di lavorazione sia controllata nell'intervallo

di energia atto ad ottenere il tipo di lavorazione desiderata.

La distanza dello strumento di lavorazione dal materiale di lavorazione può essere misurata mediante sonde o sensori di misurazione, ad esempio laser scanner a tempo di volo, triangolatori laser, interferometri.

La potenza del fascio laser di lavorazione che incide sulla superficie del pezzo o del materiale ne determina il riscaldamento e conseguentemente l'emissione di radiazione ottica in banda termica (infrarosso o visibile) per effetto della temperatura di lavorazione raggiunta dal pezzo o materiale allo stato fuso, che si mantiene anche per un certo tempo (tipicamente tra un decimo di secondo e qualche secondo) allo spegnimento del fascio laser di lavorazione. E' dunque possibile acquisire informazioni sulla temperatura del pezzo o materiale in lavorazione, ed indirettamente sulla potenza del fascio laser di lavorazione, attraverso la radiazione ottica emessa termicamente dalla superficie del pezzo o materiale, ad esempio mediante pirometri (termometri ad irraggiamento), meglio pirometri bicolore che permettono di determinare la temperatura di un corpo solido o fuso senza conoscerne

l'emissività.

Svantaggiosamente, la conduzione di queste misure, entrambe essenziali per il controllo del processo industriale, comporta l'impiego di due dispositivi differenti, i cui ingombri possono non essere compatibili con gli spazi a disposizione in uno strumento di lavorazione od in prossimità di esso, ad esempio per l'integrazione con una testa di lavorazione di una macchina per la lavorazione laser di un pezzo o materiale. Ciò inoltre comporta un elevato costo e complessità del sistema che include dispositivi differenti.

La presente invenzione si prefigge lo scopo di fornire un sistema ottico per la determinazione della temperatura e della distanza di una superficie diffusiva, quale la superficie di un oggetto o materiale, rispetto ad un predeterminato punto di riferimento associato al sistema, che sia realizzabile con un ridotto numero di componenti e quindi sia facilmente integrabile in uno strumento di lavorazione di una macchina di lavorazione industriale, quale ad esempio una macchina per la lavorazione laser di un pezzo o materiale, senza penalizzazione dell'accuratezza di misura.

Ulteriore scopo dell'invenzione è quello di

fornire un siffatto sistema ottico per la determinazione sostanzialmente simultanea della temperatura e della distanza della superficie di un oggetto o materiale.

Un ulteriore scopo dell'invenzione è quello di effettuare una misura termica senza aggiungere complessità ad un apparato per la misura di distanza.

Un ulteriore scopo della presente invenzione è quello di fornire un siffatto sistema ottico per la determinazione della temperatura della superficie di un oggetto o materiale e della sua distanza che possa essere facilmente installato in una macchina di lavorazione industriale preesistente.

Ancora un ulteriore scopo dell'invenzione è quello di fornire un sistema ottico di misurazione combinata atto ad essere installato in una testa di lavorazione di una macchina per la lavorazione laser di un pezzo o materiale, in allineamento con il fascio laser di lavorazione, per consentire l'esecuzione di una misurazione coassiale della distanza di separazione tra la testa di lavorazione e la superficie del pezzo o materiale e della temperatura del materiale fuso, localmente all'area di lavorazione corrente del fascio laser.

Secondo la presente invenzione tali scopi ven-

gono raggiunti grazie ad un sistema ottico combinato avente le caratteristiche richiamate nella rivendicazione 1.

Modi particolari di realizzazione formano oggetto delle rivendicazioni dipendenti, il cui contenuto è da intendersi come parte integrale della presente descrizione.

E' oggetto dell'invenzione anche un procedimento per la determinazione della temperatura della superficie di un oggetto o materiale e della sua distanza rispetto ad un predeterminato punto di riferimento associato a detto sistema ottico combinato, avente le caratteristiche richiamate nella rivendicazione 19.

Forma ulteriore oggetto dell'invenzione una macchina per la lavorazione laser di un pezzo o materiale che comprende detto sistema ottico combinato, come rivendicata.

In sintesi, la presente invenzione si basa sulla realizzazione di un sistema ottico combinato in cui la misura di distanza di un oggetto o materiale, ottenuta mediante rilevamento di una radiazione di sonda diffusa dalla superficie dell'oggetto o del materiale, e la misura della sua temperatura superficiale, ottenuta mediante rilevamento di

una radiazione ottica emessa termicamente dalla superficie dell'oggetto o del materiale, avvengono in tempi alternati correlati alla attivazione, rispettivamente disattivazione di una sorgente di una radiazione di sonda. Il rilevamento della radiazione di sonda diffusa dalla superficie dell'oggetto o del materiale e della radiazione ottica emessa termicamente dalla superficie dell'oggetto o del materiale avviene presso dispositivi di rilevamento dedicati o - più vantaggiosamente in una forma integrata - presso un dispositivo di rilevamento comune.

Più specificamente, il sistema ottico combinato oggetto dell'invenzione comprende mezzi sorgenti di radiazione ottica atti ad emettere almeno una radiazione ottica di sonda ad una predeterminata lunghezza d'onda o in un predeterminato intervallo di lunghezze d'onda. I mezzi sorgenti di radiazione ottica possono essere una singola sorgente, ad esempio un diodo emettitore di luce quale un diodo laser o un diodo superluminescente, o una coppia di sorgenti distinte atte ad emettere rispettivi fasci di radiazione ottica a differenti lunghezze d'onda o ad intervalli alterni, sebbene sia anche possibile emettere fasci di radiazione ottica a differenti

lunghezze d'onda o ad intervalli alterni attraverso una singola sorgente, ad esempio variando la corrente di eccitazione o la temperatura della sorgente nel primo caso, oppure utilizzando una sorgente il cui fascio è suddiviso lungo due percorsi ottici diversi, commutando fra un percorso e l'altro, ad esempio mediante dispositivi quali cristalli liquidi o otturatori meccanici che bloccano o lasciano passare alternativamente il fascio di un percorso o dell'altro.

Mezzi di controllo dei mezzi sorgenti di radiazione ottica, ad esempio mezzi elettronici di controllo quali un processore o simili, sono predisposti per controllare selettivamente la commutazione di detti mezzi sorgenti da una condizione operativa in cui essi emettono almeno una radiazione ottica di sonda ad una condizione non operativa in cui essi non emettono alcuna radiazione ottica. Vantaggiosamente, i mezzi di controllo sono predisposti per controllare alternatamente la commutazione dei mezzi sorgenti di radiazione ottica dalla condizione operativa alla condizione non operativa secondo una frequenza di commutazione predeterminata. In una forma di realizzazione in cui i mezzi sorgenti di radiazione ottica comprendono un diodo

emettitore di luce avente una regione attiva suscettibile di emettere fotoni a frequenze ottiche in seguito a ricombinazione radiativa dei portatori di carica in essa confinati in conseguenza di una condizione di inversione di popolazione, i mezzi di controllo sono predisposti per controllare selettivamente l'attivazione e la disattivazione della corrente di eccitazione di detto diodo emettitore di luce, atta ad alterare l'equilibrio termodinamico delle popolazioni dei portatori di carica. In condizioni di frequenza di commutazione elevata (dell'ordine di 1-100kHz) ed in applicazione ad un processo industriale il cui tasso di avanzamento è inferiore le due misure possono essere considerate sostanzialmente simultanee, ed il sistema può essere definito come sistema di misurazione ibrida continua.

Mezzi di rilevamento ottici comprendenti almeno un fotorivelatore o una disposizione lineare o bidimensionale di fotorivelatori o simili sensori ottici, sono atti a rilevare almeno una radiazione ottica diffusa ed una radiazione ottica emessa termicamente dalla superficie di detto oggetto o materiale (tipicamente nella gamma dell'infrarosso alla temperatura ambiente, ma in un intervallo di lun-

ghezze d'onda tipicamente rilevabile nel vicino infrarosso e nel visibile nel caso di materiale metallico fuso).

Il sistema comprende ulteriormente mezzi elettronici di elaborazione, quali un processore, i quali sono predisposti per determinare una distanza della superficie dell'oggetto o del materiale rispetto a un punto di riferimento di un sistema di riferimento del sistema ottico o ad esso stabilmente associato sulla base della radiazione ottica di sonda diffusa dalla superficie di detto oggetto o materiale e ricevuta dai mezzi di rilevamento, ad esempio in funzione della posizione di incidenza (che è funzione della direzione di incidenza), della intensità o della fase incidente sul fotorivelatore o sulla disposizione lineare o bidimensionale di fotorivelatori o su un simile complesso di sensore ottico. I mezzi elettronici di elaborazione sono inoltre predisposti per determinare una temperatura locale della superficie dell'oggetto o del materiale sulla base della radiazione ottica di emissione termica dalla superficie di detto oggetto o materiale, ricevuta da detti mezzi di rilevamento, ad esempio in funzione dell'intensità di emissione in un predeterminato intervallo spettrale op-

pure della distribuzione spettrale in lunghezza d'onda della radiazione ottica di emissione termica. Per temperatura locale si intende la temperatura della superficie del pezzo in corrispondenza dell'area su cui è diretta la radiazione di sonda, nell'applicazione ad un processo industriale sostanzialmente l'area di lavorazione corrente.

I mezzi elettronici di elaborazione sono sincronizzati con i mezzi di controllo dei mezzi sorgenti in modo tale da determinare la distanza dell'oggetto o del materiale sulla base della radiazione ottica di sonda diffusa ricevuta dai mezzi di rilevamento quando i mezzi sorgenti di radiazione ottica sono operativi, e da determinare una temperatura locale della superficie dell'oggetto o del materiale sulla base della radiazione ottica di emissione termica ricevuta dai mezzi di rilevamento quando i mezzi sorgenti di radiazione ottica non sono operativi.

In una forma di realizzazione compatta i mezzi di rilevamento ottici includono mezzi fotorivelatori aventi una gamma spettrale di rilevamento comprendente la predeterminata lunghezza d'onda (o il predeterminato intervallo di lunghezze d'onda) della radiazione ottica di sonda diffusa dalla super-

ficie dell'oggetto o del materiale ed almeno una lunghezza d'onda della radiazione ottica di emissione termica dalla superficie di detto oggetto o materiale.

I suddetti mezzi fotorivelatori possono essere disposti separatamente dai mezzi sorgenti.

Vantaggiosamente, in una forma di realizzazione integrata, i mezzi di rilevamento ottici includono almeno un dispositivo fotorivelatore di monitoraggio normalmente accoppiato ad una sorgente di radiazione ottica quale un diodo laser o un diodo superluminescente, tipicamente integrato nel relativo packaging, atto a rilevare una radiazione ottica secondaria o parziale emessa da detta sorgente, rappresentativa della radiazione ottica principale. Ad esempio, nel caso in cui i mezzi sorgenti di radiazione ottica comprendono un diodo emettitore di luce che presenta un'area principale di emissione di radiazione ed un'area secondaria di emissione di radiazione, il dispositivo fotorivelatore di monitoraggio è affacciato all'area secondaria di emissione di radiazione, generalmente la faccia posteriore del diodo emettitore di luce, opposta alla faccia di emissione della radiazione luminosa.

In accordo a questa configurazione, la radia-

zione ottica di sonda principale diffusa coassialmente dalla superficie di detto oggetto o materiale è almeno parzialmente raccolta dall'area principale di emissione del diodo emettitore di luce (la parte ricevuta entro la sua apertura numerica) e da qui retropropagata entro la regione attiva del diodo fino al dispositivo fotorivelatore di monitoraggio. In questo modo, la radiazione ottica di sonda principale diffusa dalla superficie di detto oggetto o materiale è almeno parzialmente sovrapposta alla radiazione ottica secondaria o parziale emessa dal diodo su una regione di incidenza comune del dispositivo fotorivelatore di monitoraggio. Il dispositivo fotorivelatore di monitoraggio è atto a rilevare un motivo di frange di interferenza tra la radiazione ottica secondaria o parziale e la radiazione ottica di sonda principale ed i mezzi di elaborazione sono predisposti per determinare la distanza della superficie di detto oggetto o materiale rispetto ai mezzi sorgenti di radiazione ottica sulla base del motivo di frange di interferenza, secondo una tecnica nota come "self-mixing interferometry".

In un differente aspetto dell'invenzione i mezzi di rilevamento ottici includono primi mezzi

fotorilevatori atti ad intercettare almeno parte della radiazione ottica di sonda diffusa dalla superficie dell'oggetto o del materiale e secondi mezzi fotorivelatori atti ad intercettare almeno parte della radiazione ottica di emissione termica dalla superficie di detto oggetto o materiale. I primi mezzi fotorivelatori comprendono una disposizione di fotorivelatori estesa lungo almeno una direzione spaziale, ossia una disposizione di fotorivelatori lineare o bidimensionale, e ad essi sono accoppiati mezzi di filtraggio di lunghezze d'onda atti a trasmettere la predeterminata lunghezza d'onda o il predeterminato intervallo di lunghezze d'onda della radiazione ottica di sonda diffusa dalla superficie di detto oggetto o materiale, ed a bloccare lunghezze d'onda della radiazione ottica di emissione termica dalla superficie di detto oggetto o materiale o altre lunghezze d'onda di radiazioni spurie ambientali. Eventualmente, mezzi di filtraggio di lunghezze d'onda possono essere anche anteposti ai secondi mezzi fotorivelatori per selezionare una predeterminata porzione dello spettro di lunghezza d'onda dell'emissione termica.

In questo caso i mezzi sorgente ed i primi mezzi fotorilevatori assumono diverse forme di rea-

lizzazione dipendentemente dalle tecniche applicate per l'analisi della radiazione diffusa.

Le tecniche preferite per l'analisi della radiazione diffusa per la determinazione della distanza sono tecniche di triangolazione ed interferometria ottica (a luce coerente, a bassa coerenza nel dominio del tempo, della frequenza o dello spazio, "self-mixing interferometry").

In una tecnica di triangolazione, una disposizione di fotorivelatori è disposta in modo tale da ricevere la radiazione ottica di sonda diffusa dalla superficie dell'oggetto o del materiale secondo una direzione di osservazione ad un angolo non nullo rispetto alla direzione di emissione della radiazione ottica di sonda, ed i mezzi di elaborazione sono predisposti per determinare la distanza della superficie dell'oggetto o del materiale rispetto ai mezzi sorgenti sulla base della posizione di incidenza della radiazione ottica di sonda diffusa lungo almeno una direzione di estensione della disposizione di fotorivelatori.

Alternativamente, i mezzi sorgenti di radiazione ottica sono accoppiati a mezzi conformatori di fascio a valle atti a conformare la radiazione ottica di sonda in un fascio avente una distribu-

zione di potenza trasversale predeterminata variabile lungo l'asse di propagazione. I mezzi di elaborazione sono predisposti per determinare la distanza della superficie dell'oggetto o del materiale rispetto ai mezzi sorgenti sulla base della distribuzione di potenza trasversale della radiazione ottica di sonda diffusa rilevata dalla disposizione di fotorivelatori.

Alternativamente, i mezzi sorgenti di radiazione ottica sono atti ad emettere un primo ed un secondo fascio di radiazione ottica di sonda coassiali aventi differenti distribuzioni trasversali di potenza, ed i mezzi di elaborazione sono predisposti per determinare la distanza della superficie dell'oggetto o del materiale rispetto ai mezzi sorgenti sulla base del confronto differenziale tra la distribuzione di potenza trasversale del primo fascio di radiazione ottica di sonda diffuso e la distribuzione di potenza trasversale del secondo fascio di radiazione ottica di sonda diffuso, rilevate dalla disposizione di fotorivelatori.

Il primo ed il secondo fascio di radiazione ottica di sonda presentano polarizzazioni differenti, preferibilmente polarizzazioni ortogonali, oppure differenti lunghezze d'onda oppure sono emessi

ad intervalli alterni. Vantaggiosamente, per poter emettere un primo ed un secondo fascio di radiazione ottica di sonda a lunghezze d'onda differenti oppure ad intervalli alterni i mezzi sorgenti di radiazione ottica comprendono una coppia di sorgenti di radiazione ottica distinte.

Secondo una ulteriore alternativa in cui il metodo di triangolazione è omnidirezionale, i mezzi sorgenti di radiazione ottica sono atti ad emettere una radiazione ottica di sonda comprendente una pluralità di fasci collimati o focalizzati disposti simmetricamente rispetto ad un asse di propagazione, ed i mezzi di elaborazione sono predisposti per determinare la distanza della superficie dell'oggetto o del materiale rispetto ai mezzi sorgenti sulla base del confronto tra la posizione reciproca di incidenza di detta pluralità di fasci della radiazione ottica di sonda diffusa sulla disposizione di fotorivelatori.

In una tecnica di interferometria, i mezzi sorgenti di radiazione ottica sono atti ad emettere un primo fascio di radiazione ottica di sonda ed un secondo fascio di detta radiazione ottica di riferimento. Il primo fascio di radiazione ottica di sonda è condotto verso la superficie dell'oggetto o

del materiale ed il fascio riflesso o diffuso dalla superficie dell'oggetto o del materiale è condotto verso mezzi sensori ottici interferometrici, attraverso un percorso ottico di misurazione. Il secondo fascio di radiazione ottica di riferimento è condotto verso detti mezzi sensori ottici interferometrici attraverso un percorso ottico di riferimento di lunghezza ottica predeterminata, preferibilmente equivalente entro la lunghezza di coerenza della radiazione alla lunghezza ottica del percorso ottico di misurazione in una condizione operativa nominale in cui la posizione della superficie dell'oggetto o del materiale è una posizione nominale predeterminata rispetto ad un predeterminato sistema di riferimento. Il primo e il secondo fascio sono sovrapposti su una regione di incidenza comune dei mezzi sensori ottici interferometrici formando un motivo di frange di interferenza ed i mezzi di elaborazione sono predisposti per determinare la distanza della superficie dell'oggetto o del materiale rispetto ai mezzi sorgenti sulla base del motivo di frange di interferenza.

Convenientemente, nella determinazione della temperatura i mezzi di elaborazione sono predisposti per normalizzare la radiazione ottica di emis-

sione termica intercettata dai mezzi fotorivelatori in funzione della distanza dalla superficie dell'oggetto o del materiale determinata. Ciò consente di ottenere una corretta stima della temperatura nel caso di illuminazione dell'oggetto o del materiale per mezzo di fasci focalizzati, per cui l'area di illuminazione sul pezzo varia lungo l'asse di propagazione, nonché per compensare la morfologia dell'oggetto.

Il sensore ottico combinato oggetto dell'invenzione ed il procedimento di misurazione ibrida o combinata che lo utilizza possono essere vantaggiosamente impiegati nel controllo ad anello chiuso avanzato di processi di lavorazione industriale come la lavorazione laser di pezzi o materiale, ad esempio per il taglio, la saldatura, la fabbricazione additiva, dove è necessario acquisire misure di distanza e di temperatura. La acquisizione della temperatura di lavoro può essere utilizzata per stabilizzare processi termici in atto mentre l'acquisizione della distanza può essere utilizzata per verificare o migliorare l'accuratezza dimensionale e la precisione di posizionamento della lavorazione in atto. Il sistema oggetto dell'invenzione ovvia allo svantaggio di disporre di strumenti di misura-

zione separati, quali pirometri e sensori di distanza, a favore di una soluzione più compatta, al limite integrata con la medesima sorgente di emissione della radiazione di sonda, che permette di rilevare la radiazione termica emessa dalla superficie in misurazione in un'area corrispondente all'area di superficie della quale è misurata la distanza.

Ulteriori caratteristiche e vantaggi dell'invenzione verranno più dettagliatamente esposti nella descrizione particolareggiata seguente di una sua forma di attuazione, data a titolo di esempio non limitativo, con riferimento ai disegni allegati, nei quali:

la figura 1 è una rappresentazione schematica di una condizione di incidenza di un fascio di radiazione ottica di sonda in un'area di misurazione di un pezzo o di un materiale in lavorazione, con relativa retrodiffusione di un fascio di radiazione di sonda ed emissione di un fascio di radiazione termica;

la figura 2 è uno schema a blocchi di un sistema ottico combinato oggetto dell'invenzione;

la figura 3 mostra diagrammi che rappresentano l'andamento temporale della radiazione ottica di

sonda, della radiazione ottica di sonda diffusa e della radiazione ottica emessa termicamente dalla superficie di un oggetto o materiale in misurazione;

le figure 4a e 4b mostrano rispettivamente un complesso di una sorgente di radiazione ottica quale un diodo laser secondo la tecnica nota ed uno schema di catena ottica di un tale complesso;

la figura 5 mostra lo schema a blocchi del sistema ottico combinato oggetto dell'invenzione in una condizione operativa di misurazione della distanza;

la figura 6 mostra lo schema a blocchi del sistema ottico combinato oggetto dell'invenzione in una condizione operativa di misurazione della temperatura;

la figura 7 è uno schema di misurazione della distanza per triangolazione con sorgente della radiazione di sonda e rivelatore della radiazione di sonda diffusa fuori asse, secondo la tecnica nota;

la figura 8 è uno schema di misurazione della distanza per triangolazione coassiale con fasci di radiazione ottica di sonda aventi differenti conformazioni;

la figura 9 mostra l'applicazione dello schema

di misurazione della distanza per triangolazione coassiale di figura 8 in un processo di taglio laser;

la figura 10 è uno schema di misurazione della distanza per triangolazione coassiale con fasci di radiazione ottica di sonda multipli disposti simmetricamente all'asse di propagazione;

le figure 11a e 11b mostrano l'applicazione di uno schema di misurazione della distanza per triangolazione ad un processo di lavorazione laser;

la figura 12 è uno schema di misurazione della distanza per interferometria a bassa coerenza applicato ad un processo di lavorazione laser; e

la figura 13 è uno schema a blocchi di un sistema elettronico di controllo di una macchina per la lavorazione laser di un pezzo o di un materiale.

La descrizione che segue riguarda in generale le configurazioni e il funzionamento di un sistema ottico combinato secondo l'invenzione per la determinazione della temperatura di un oggetto o materiale e della sua distanza rispetto ad un predeterminato punto di un sistema di riferimento associato al sistema ottico combinato. Più in particolare, il sistema ottico combinato oggetto dell'invenzione è atto a determinare la temperatura e la distanza

della superficie di detto oggetto o materiale. In un esempio applicativo il sistema oggetto dell'invenzione è descritto in accoppiamento con una macchina per la lavorazione laser di un pezzo o materiale ed il sistema di riferimento associato al sistema ottico combinato è stabilmente associato anche al sistema di riferimento di una testa di lavorazione della macchina di lavorazione laser, per cui la determinazione della distanza della superficie di un oggetto o materiale rispetto ad un punto del sistema ottico combinato che esegue la misura è riconducibile, con semplici trasformazioni di roto-traslazione, alla determinazione della distanza della superficie di detto oggetto o materiale rispetto alla testa di lavorazione della macchina di lavorazione laser.

In figura 1 è mostrata una rappresentazione schematica di una condizione di misurazione della distanza e della temperatura di un'area della superficie di un oggetto o di un materiale, con particolare riferimento alla lavorazione laser di un pezzo o materiale WP. Con A è indicata un'area di lavorazione corrente, sulla quale incide secondo una direzione di propagazione Z predeterminata un fascio laser di lavorazione B impiegato per il ta-

glio, la saldatura o la sinterizzazione, in conseguenza del quale la temperatura dell'area si innalza rispetto all'ambiente. Sono omesse rappresentazioni di eventuale materiale di apporto o gas di assistenza, che un tecnico del ramo potrà facilmente contemplare in funzione della lavorazione prevista, non significative per lo scopo della presente descrizione.

In una forma di realizzazione preferita, coassialmente al fascio laser di lavorazione B una radiazione ottica di sonda P incide sull'area A e da essa viene riflessa emergendo come radiazione ottica di sonda diffusa D. Contemporaneamente, la superficie del pezzo WP nell'area A di lavorazione corrente emette anche una radiazione termica T.

Più in generale, e da un punto di vista geometrico, la radiazione ottica di sonda può essere un fascio singolo o un involuppo di fasci multipli, ad esempio un fascio singolo collimato - che può essere approssimato come singolo raggio ottico - coassiale oppure inclinato rispetto all'asse di propagazione del fascio laser di lavorazione, una pluralità di fasci incidenti sulla superficie del pezzo in posizioni differenti o con differenti angoli di inclinazione rispetto all'asse di propagazione del

fascio laser di lavorazione, uno o più fasci conformati, ad esempio fasci focalizzati o fasci la cui distribuzione di potenza trasversale è controllata secondo una forma predeterminata (ad esempio, anulare), ad esempio una forma predeterminata variabile lungo l'asse di propagazione.

In generale, dipendentemente dalle proprietà della superficie del pezzo o del materiale in lavorazione la retrodiffusione del fascio di radiazione di sonda P determina un fascio di radiazione di sonda retropropagato D diffuso secondo un angolo di diffusione maggiore della distribuzione trasversale del fascio incidente. Il fascio della radiazione di emissione termica T è a sua volta diffuso secondo un angolo ancora più ampio.

In figura 2 è mostrato uno schema a blocchi di un sistema ottico combinato oggetto dell'invenzione.

Con 10 è indicato un complesso di una sorgente di radiazione ottica di sonda, che include in questa forma di realizzazione una sorgente di radiazione ottica di sonda nella forma di un diodo emettitore di luce 12 quale un LED, un diodo superluminescente o un laser, comprendente una regione attiva a semiconduttore suscettibile di emettere fotoni

a frequenze ottiche in seguito a ricombinazione radiativa dei portatori di carica in essa confinati in conseguenza di eccitazione o di una condizione di inversione di popolazione. Il diodo emettitore di luce 12 presenta un'area principale di emissione di una radiazione ottica di sonda principale P, ad esempio una faccia frontale della regione attiva, ed un'area secondaria di emissione di una radiazione ottica secondaria P' correlata a detta radiazione ottica di sonda principale, ad esempio una faccia posteriore della regione attiva opposta alla faccia frontale.

Con 14 è indicato un dispositivo fotorivelatore di monitoraggio normalmente accoppiato al diodo emettitore di luce, affacciato all'area secondaria di emissione di radiazione del diodo per rilevare l'intensità della radiazione secondaria indicativa dell'intensità di emissione reale del diodo 12.

Una unità elettronica di controllo dell'attivazione e della disattivazione del diodo emettitore di luce 12 è indicata con 16, ed è predisposta per controllare alternatamente (iterativamente) la commutazione del diodo emettitore di luce 12 da una condizione operativa ad una condizione non operativa secondo una frequenza predeterminata attraverso

un segnale di pilotaggio S_P .

Un dispositivo di suddivisione/ricombinazione del fascio 18 è interposto lungo il percorso di propagazione della radiazione di sonda P (che può essere in aria libera o almeno parzialmente guidato) in modo tale da essere attraversato dalla radiazione di sonda P proveniente dalla sorgente 12 senza apprezzabile perdita o per estrarre un fascio di riferimento della radiazione di sonda per misure di distanza basate su tecniche interferometriche.

Conformemente alla rappresentazione di figura 1 il pezzo in lavorazione è contrassegnato WP. In conseguenza dell'incidenza della radiazione di sonda P esso retrodiffonde una radiazione di sonda diffusa D, ed in conseguenza dell'incidenza di un fascio laser di lavorazione (non illustrato) esso diffonde una radiazione ottica di emissione termica T. Entrambe la radiazione di sonda diffusa D e la radiazione di emissione termica T si propagano attraverso il dispositivo di suddivisione/ricombinazione del fascio 18 dal quale vengono indirizzate verso il complesso sorgente 10 presso il quale è il dispositivo fotorivelatore 14 e verso mezzi rivelatori 20 della radiazione di sonda diffusa, esterni al complesso sorgente 10. Nel caso di

fasci polarizzati (ottenibili interponendo nel cammino di propagazione elementi ottici per la manipolazione della polarizzazione del fascio quali polarizzatore o lamine di ritardo a quarto d'onda) l'indirizzamento del fascio della radiazione ottica di sonda e del fascio della radiazione ottica di sonda diffusa può essere ottenuto convenientemente separando le due radiazioni sfruttando un criterio di selezione della polarizzazione.

A monte dei mezzi rilevatori 20 può essere disposto un filtro ottico 22 atto a trasmettere la lunghezza d'onda o l'intervallo di lunghezze d'onda della radiazione ottica di sonda diffusa dalla superficie del pezzo WP ed a bloccare lunghezze d'onda della radiazione ottica di emissione termica proveniente dalla superficie di detto pezzo WP.

Una unità elettronica di elaborazione 30 è accoppiata al complesso sorgente 10 ed ai mezzi rivelatori 20 ed è predisposta per ricevere un segnale S_D indicativo della radiazione di sonda diffusa D rilevata dai mezzi rilevatori 20 ed un segnale S_T indicativo della radiazione termica T rilevata dal dispositivo fotorivelatore 14. L'unità di elaborazione 30 è predisposta per (i) applicare un predeterminato algoritmo o modello di calcolo basato

sull'analisi delle proprietà della radiazione diffusa - quali fase, posizione, direzione, distribuzione di potenza trasversale - per determinare la distanza della superficie del pezzo WP rispetto ad un predeterminato punto di riferimento del sistema, ad esempio la posizione della sorgente della radiazione di sonda 12 in un sistema di riferimento predeterminato, stabilmente associato alla macchina di lavorazione laser, sulla base del segnale indicativo della radiazione ottica di sonda diffusa D, e per (ii) applicare un predeterminato algoritmo o modello di calcolo per determinare la temperatura locale della superficie del pezzo WP sulla base del segnale indicativo della radiazione di emissione termica T.

L'unità di elaborazione 30 è inoltre accoppiata all'unità elettronica di controllo 16 per operare in sincronismo con l'attivazione e la disattivazione del diodo emettitore di luce 12, in modo tale da determinare la distanza della superficie del pezzo WP quando il diodo emettitore di luce è attivo e determinare la temperatura locale della superficie di detto pezzo WP quando il diodo emettitore di luce è disattivato.

Il funzionamento del sistema e dell'unità di

controllo 16 in particolare è descritto meglio con riferimento ai diagrammi di figura 3 che rappresentano l'andamento temporale della radiazione ottica di sonda emessa dal diodo 12, della radiazione ottica di sonda diffusa dalla superficie del pezzo WP e della radiazione ottica emessa termicamente dalla superficie del pezzo WP.

Il primo diagramma mostra l'andamento temporale di un segnale di pilotaggio S_P del diodo emettitore di luce 12, e quindi rappresenta l'andamento temporale nominale della radiazione ottica di sonda. Il segnale di pilotaggio S_P oscilla alternatamente tra periodi di attivazione dell'emissione della radiazione di sonda - indicati con ON - e periodi di disattivazione dell'emissione della radiazione di sonda - indicati con OFF. La forma d'onda di segnale ad onda quadra è puramente indicativa di una forma d'onda di controllo periodica ed altre forme d'onda possono essere contemplate, ad esempio sinusoidali.

Il secondo diagramma mostra l'andamento del segnale S_D indicativo della radiazione di sonda diffusa D rilevata dai mezzi rilevatori 20 e 14 e del segnale S_T indicativo della radiazione termica T rilevata dal dispositivo fotorivelatore 14. Gli

istanti di tempo t_T e t_D indicano rispettivamente gli istanti di campionamento della radiazione termica T per la determinazione della temperatura e gli istanti di campionamento della radiazione di sonda diffusa D per la determinazione della distanza del pezzo.

Il procedimento per la determinazione della temperatura locale della superficie del pezzo WP e della sua distanza si fonda sul controllo selettivo iterativo in commutazione della sorgente di radiazione ottica di sonda, rispettivamente tra una condizione operativa in cui è emessa la radiazione ottica di sonda ed una condizione non operativa in cui non è emessa la radiazione ottica di sonda, e sulla acquisizione dei segnali indicativi della radiazione ottica di sonda diffusa dalla superficie del pezzo WP quando la sorgente di radiazione ottica di sonda è operativa, ossia quando si stabilisce detta radiazione di sonda diffusa, e sulla acquisizione dei segnali indicativi della radiazione di emissione termica dalla superficie del pezzo WP quando la sorgente di radiazione ottica di sonda non è operativa, ossia quando detta radiazione di emissione termica è l'unica radiazione presente (a meno della radiazione laser del processo di lavora-

zione e di eventuali radiazioni spurie ambientali).

In pratica, quando il diodo emettitore di luce 12 (la sorgente di radiazione ottica di sonda) è attivo, ossia negli intervalli indicati ON in figura 3, la radiazione ottica di sonda diffusa è diretta ai mezzi rilevatori 20 per la misura di distanza. I mezzi rilevatori 20 possono coincidere con il dispositivo fotorivelatore 14 del complesso sorgente della radiazione ottica di sonda quando è applicata una tecnica di "self mixing interferometry". Quando il diodo emettitore di luce 12 (la sorgente di radiazione di sonda) non è attiva, ossia negli intervalli indicati OFF in figura 3, il dispositivo fotorivelatore 14 del complesso sorgente rileva l'emissione termica su un intervallo spettrale predeterminato per la stima della temperatura.

In questo modo si ottiene efficacemente una combinazione delle due misure.

Una frequenza di commutazione ripetitiva della emissione della radiazione ottica di sonda, compresa nell'intervallo tra 1 e 100 kHz, è ritenuta dagli inventori sufficientemente elevata da poter approssimare le misure come simultanee e continue nel corso di un processo di lavorazione laser. vantag-

giosamente, questa configurazione ibrida consente una misura ottica remota e rapida di temperatura e distanza di un pezzo caldo attraverso un singolo sistema ottico. Altrettanto vantaggiosamente, il sistema ottico combinato, ed in particolare il complesso sorgente della radiazione ottica di sonda, può essere allineato coassialmente al fascio laser di processo e la temperatura del materiale fuso può essere facilmente determinata attraverso un approccio pirometrico. In questo modo, i parametri di un processo di lavorazione laser, ad esempio per il taglio, la saldatura, la fabbricazione additiva, possono essere controllati efficientemente in tempo reale ed il controllo di processo risulta migliorato.

Inoltre, poiché nel caso di fascio di sonda non collimato la radiazione di emissione termica ricevuta dal dispositivo fotorivelatore 14 varia con la distanza è possibile operare una normalizzazione della lettura dell'intensità della radiazione di emissione termica a partire dalla determinazione della distanza avvenuta nel periodo di campionamento precedente, ad esempio per compensare la variabilità dell'apertura numerica di raccolta, corrispondente alla variabilità dell'apertura numerica

della catena ottica del fascio di misura.

Si noti che la sincronizzazione dell'unità elettronica di elaborazione 30 con l'unità elettronica di controllo 16 permette di riconoscere e separare le letture della radiazione di sonda diffusa e della radiazione di emissione termica attraverso tecniche di demodulazione analoghe a quelle impiegate in amplificatori del tipo lock-in, oppure mediante discriminazione per via digitale da parte del sistema di acquisizione, se la frequenza di campionamento è molto maggiore di quella di commutazione.

In configurazioni compatte possono essere inoltre impiegati mezzi fotorilevatori con un ampio intervallo spettrale di rilevamento e quindi atti a acquisire una radiazione ottica su un ampio spettro di lunghezze d'onda che include sia la lunghezza d'onda o l'intervallo di lunghezze d'onda della radiazione di sonda, sia intervallo di interesse delle lunghezze d'onda di emissione termica per la lavorazione in esecuzione.

La funzione dei mezzi rivelatori 20 sopra descritti per conferire generalità alla trattazione può essere assunta dal dispositivo fotorivelatore 14 in una configurazione integrata del sistema in

cui il dispositivo fotorivelatore 14 è incaricato anche del rilevamento della radiazione di sonda diffusa D oltre che della radiazione di emissione termica T. Questo è possibile, ad esempio, se si utilizza un complesso sorgente della radiazione ottica del tipo mostrato in figura 4a.

In figura 4a con 50 è indicato generalmente un complesso di una sorgente di radiazione ottica in un packaging TO-CAN secondo la tecnica nota, includente un diodo laser 52 disposto su un supporto 54 dispersore di calore e circondato da un involucro protettivo 56, disposto su una base 58 recante i collegamenti elettrici 60 per il pilotaggio del diodo. Nell'ingrandimento è mostrato il diodo laser 52 e sono identificate un'area principale di emissione di radiazione 62, affacciata ad una finestra 64 di fuoriuscita della radiazione, ed un'area secondaria di emissione di radiazione 66, rivolta posteriormente al diodo laser 52 rispetto alla finestra di fuoriuscita della radiazione 64. Affacciato all'area secondaria di emissione di radiazione 66, posteriormente al diodo laser 52, è disposto un dispositivo fotorivelatore di monitoraggio 68.

Uno schema di catena ottica di un complesso di sorgente 50 è mostrato in figura 4b. Il fascio di

radiazione ottica di sonda principale P emesso dall'area principale di emissione di radiazione 62 del diodo laser 52 attraversa diversi elementi ottici per la sua collimazione o focalizzazione e incide su una superficie diffusiva da analizzare di un pezzo WP in corrispondenza dell'area A di lavorazione corrente, eventualmente coassiale al sistema ottico di propagazione del fascio di lavorazione laser (non illustrato). Contemporaneamente, il fascio di radiazione ottica secondaria P' rappresentativa della radiazione ottica di sonda principale è emesso in senso opposto verso il dispositivo fotorivelatore di monitoraggio 68. Considerando la reversibilità del percorso ottico, la radiazione ottica D riflessa o diffusa dalla superficie del pezzo WP è almeno parzialmente accoppiata in senso opposto lungo la medesima direzione di propagazione nella misura in cui essa giace entro l'apertura numerica della catena ottica e ripercorre a ritroso la catena fino ad attraversare il diodo laser 52 ed incidere sul dispositivo fotorivelatore di monitoraggio 68, ove interferisce con il fascio di radiazione ottica secondaria P' formando un motivo di frange di interferenza il quale rende possibile l'applicazione della tecnica di analisi interfero-

metrica nota come "self-mixing interferometry". Questa tecnica trova impiego in un'ampia gamma di applicazioni, dalla misurazione di vibrazioni a misure di profondità, ad esempio in processi di ablazione laser.

Nelle figure 5 e 6 sono mostrate le configurazioni di rilevamento della radiazione ottica diffusa e della radiazione ottica emessa termicamente dalla superficie del pezzo WP con riferimento allo schema a blocchi del sistema ottico combinato oggetto dell'invenzione rappresentato in figura 2.

Specificamente, in figura 5 è mostrata una configurazione in una condizione operativa di misurazione della distanza del pezzo WP, nella quale l'unità di controllo 16 applica un segnale di pilotaggio S_P al diodo emettitore di luce nell'intervallo tempo ON e l'unità di elaborazione 30 acquisisce un segnale S_D indicativo della radiazione di sonda diffusa D rilevata dai mezzi rilevatori 20, mentre in figura 6 è mostrata una configurazione in una condizione operativa di misurazione della temperatura del pezzo WP, nella quale l'unità di controllo 16 non applica alcun segnale di pilotaggio S_P al diodo emettitore di luce nell'intervallo di tempo OFF e l'unità di elaborazione 30 acquisisce

un segnale S_T indicativo della indicativo della radiazione termica T rilevata dal dispositivo fotorivelatore 14.

Nelle figure da 7 a 11 sono mostrate alcune configurazioni della radiazione di sonda e del sistema ottico combinato oggetto dell'invenzione utilizzate nell'applicazione di tecniche di triangolazione per la determinazione della distanza del pezzo WP dalla sorgente della radiazione di sonda.

Il principio della triangolazione può essere sfruttato per determinare la distanza del pezzo a partire da considerazioni geometriche. Ad esempio, in una configurazione di triangolazione classica mostrata in figura 7 con la sorgente di radiazione 12 ed i mezzi rilevatori della radiazione diffusa 20 fuori asse, se con Z è indicato l'asse lungo il quale è misurata la distanza, la posizione dell'area di incidenza della radiazione sonda proiettata nel piano $X-Y$ dipende dalla distanza del pezzo se il fascio della radiazione di sonda presenta un angolo di inclinazione non nullo rispetto alla direzione di osservazione. La misura può dunque essere eseguita rilevando la radiazione di sonda diffusa dal pezzo su una disposizione di fotorilevatori PD lineare oppure bidimensionale. Sia nel caso di un

singolo fascio della radiazione di sonda, che nel caso di molteplici fasci della radiazione di sonda, se essi sono inclinati rispetto all'asse di osservazione la loro posizione apparente sulla disposizione di fotorivelatori PD dipende linearmente dalla distanza. In questi casi è preferibile utilizzare un singolo fascio collimato come radiazione di sonda sebbene tale configurazione possa introdurre fenomeni di anisotropia se lungo la direzione di propagazione il percorso ottico del fascio è ostruito, oppure se varia la riflettività in funzione dell'inclinazione della superficie in esame, o ancora se il fascio di misura esce dalla zona di misura stessa al variare della distanza.

Nel caso più generale di impiego di un fascio di radiazione di sonda a conformazione controllata, in cui il fascio presenta una forma variabile lungo l'asse di propagazione Z (ad esempio con variazione del diametro del fascio focalizzato) la distanza del pezzo lungo l'asse di rotazione Z può essere determinata a partire dall'osservazione della forma del fascio della radiazione di sonda diffusa proiettata sulla disposizione di fotorilevatori PD, eventualmente in combinazione con la conoscenza della posizione dell'area di incidenza. In tali ca-

si la distanza può essere determinata se è nota la forma del fascio della radiazione di sonda, ad esempio in seguito ad una calibrazione preliminare.

Con riferimento alla figura 8, è possibile utilizzare simultaneamente due fasci della radiazione di sonda che presentano forme differenti, ad esempio fasci collimati in modo differente. I due fasci possono essere allineati o preferibilmente sovrapposti coassialmente in modo tale da incidere sulla stessa area della superficie del pezzo. Uno dei due fasci (preferibilmente un fascio collimato) può essere considerato come fascio di riferimento in modo tale da ottenere una misura di distanza assoluta a partire dal confronto tra le forme dei due spot di incidenza dei fasci sulla disposizione di fotorivelatori PD. Tale misurazione differenziale non richiede alcuna calibrazione assoluta e fornisce pertanto risultati più affidabili. In figura 8 è mostrato un primo fascio di sonda P1 ed un secondo fascio di sonda P2 coassiali, in cui il primo fascio P1 presenta un andamento della distribuzione di potenza trasversale variabile lungo l'asse di propagazione Z mentre il secondo fascio P2 presenta un andamento della distribuzione di potenza trasversale costante. In figura 8 è mostrato il con-

fronto tra le dimensioni trasversali dei due fasci in corrispondenza di due differenti distanze di propagazione.

In figura 9 è mostrata un'area di incidenza di una coppia di fasci di radiazione sonda coassiali su una superficie di un pezzo in lavorazione in corrispondenza di un'area di lavorazione del pezzo sulla quale incide un fascio laser di lavorazione, indicato con B, che genera un intaglio K nel pezzo. Vantaggiosamente, la simmetricità della coppia di fasci permette di ovviare alla presenza dell'intaglio K. Una simile tecnica trova vantaggiosamente applicazione anche nel caso di fasci laser per la saldatura o per la perforazione.

Diverse modalità possono essere considerate per distinguere tra i due fasci in una tecnica di misura differenziale come descritta sopra. Ad esempio, i due fasci possono possedere differenti polarizzazioni e possono essere distinti utilizzando due sensori atti a rilevare polarizzazioni ortogonali separate per mezzo di un dispositivo divisore di fascio secondo la polarizzazione. Secondo altri esempi, i due fasci possono presentare differenti lunghezze d'onda e quindi essere distinti utilizzando due sensori atti a rilevare differenti regio-

ni spettrali per mezzo di specchi dicroici o filtri di spettro. Secondo ancora un altro esempio possono essere utilizzati due fasci impulsati, ossia due fasci che sono selettivamente ed alternatamente attivati in modo tale da essere letti da un singolo sensore e correlando nel dominio del tempo la lettura dei medesimi con un segnale di comando della sorgente.

Con riferimento alla figura 10 è mostrata una pluralità di fasci di radiazione di sonda P1-P8 focalizzati disposti inclinati simmetricamente rispetto al comune asse di propagazione Z, rispettivamente secondo una vista laterale nella figura in alto ed in sezione nella figura in basso. L'utilizzo di molteplici fasci disposti simmetricamente intorno all'asse di propagazione lungo cui avviene la misura, o simmetrici rispetto tale asse, è particolarmente vantaggioso poiché consente una misura della distanza isotropa ed indipendente dalla direzione di misurazione. Una configurazione di fasci isotropa è conveniente nelle applicazioni a macchine di lavorazione laser in cui la radiazione di sonda può essere utilizzata coassiale all'asse di propagazione del fascio laser di lavorazione ottenendo una misura di distanza che non dipende da di-

rezioni preferenziali ed è priva di aree cieche.

Infine, con riferimento alle figure 11a e 11b è mostrata una configurazione di triangolazione quasi coassiale. Elementi comuni alla figura 2 sono indicati con i medesimi riferimenti numerici. In figura 11a è mostrata una vista del sistema di triangolazione in cui la radiazione di sonda è focalizzata sul pezzo in lavorazione, mentre in figura 11b è mostrato uno schema semplificato in cui il pezzo in lavorazione è arretrato rispetto al piano di focalizzazione. I mezzi rilevatori 20 sono rappresentati nella forma di una telecamera di fronte alla quale è disposta una lente 20a di focalizzazione, a valle di un filtro passa banda 20b atto a trasmettere la lunghezza d'onda o l'intervallo delle lunghezze d'onda della radiazione di sonda diffusa. Il percorso della radiazione di sonda di sonda P e della radiazione di sonda diffusa D è allineato al percorso del fascio laser di lavorazione B attraverso uno specchio dicroico M ed una lente di focalizzazione L è disposta per focalizzare i fasci sul pezzo WP.

La figura 11b mostra il fascio di radiazione di sonda P, il quale a seguito della focalizzazione attraverso la lente L incide sul pezzo WP ad un an-

golo α . Nel caso la distanza del pezzo WP dal piano di focalizzazione F sia non nulla il fascio inclinato incide sul pezzo WP in una posizione y_1 rispetto all'asse che è funzione della distanza z del pezzo lungo l'asse Z , secondo la relazione $y_1 = f(z)$. La rispettiva radiazione di sonda diffusa D catturata dalla lente di focalizzazione L è condotta ai mezzi rilevatori 20 attraverso l'ulteriore lente di focalizzazione 20a e su di essi incide a distanza y_2 rispetto all'asse, la quale è a sua volta correlata alla distanza z del pezzo lungo l'asse Z , secondo la relazione $y_2 = f(z)$. E' pertanto possibile determinare la distanza z invertendo la relazione, ossia $z = f^{-1}(y_2)$.

Nella figura 12 è mostrata una configurazione del sistema ottico combinato oggetto dell'invenzione utilizzata nell'applicazione di tecniche di interferometria per la determinazione della distanza del pezzo WP dalla sorgente della radiazione di sonda. Elementi comuni alla figura 2 sono indicati con i medesimi riferimenti numerici.

Una configurazione interferometrica sfrutta il fenomeno di interferenza che si verifica tra fasci di radiazione coerente o parzialmente coerente per misurare una distanza o in generale una differenza

tra cammini ottici. Una tipica configurazione interferometrica comprende due bracci, rispettivamente un braccio di misurazione ed un braccio di riferimento, lungo i quali è indirizzata una radiazione ottica comune. Il fascio di radiazione ottica che percorre un cammino ottico del braccio di misurazione - ed è retrodiffuso dal pezzo WP interposto lungo il braccio di misurazione - e il fascio di radiazione ottica che percorre un cammino ottico del braccio di riferimento - ed è riflesso da uno specchio fisso, sono ricombinati su una regione di incidenza comune di mezzi sensori interferometrici, ove sono sovrapposti originando un fenomeno di interferenza che genera un motivo di frange per interferenza rispettivamente costruttiva o distruttiva in funzione della differenza di cammino ottico tra i due bracci. I mezzi sensori interferometrici possono essere un fotorivelatore o una disposizione di fotorivelatori quale una schiera lineare di fotorivelatori o una matrice bidimensionale di fotorivelatori, eventualmente combinati con uno spettrometro o altri elementi ottici in funzione della specifica tecnica di interferometria, che può essere una tecnica di interferometria nel dominio del tempo, nel dominio della frequenza o nel dominio

dello spazio. I mezzi sensori interferometrici sono in grado di rilevare il motivo di interferenza in funzione delle variazioni (nel dominio dello spazio, nel dominio della frequenza o nel dominio del tempo) della lunghezza geometrica o dell'indice di rifrazione del cammino ottico lungo il braccio di misurazione, mentre tipicamente il cammino ottico del braccio di riferimento è costante e riferito a condizioni operative nominali.

In figura 12 è mostrata una configurazione interferometrica di Michelson adattata ad una tecnica di interferometria ottica a bassa coerenza nel dominio della frequenza in cui l'informazione di confronto tra la lunghezza del cammino ottico di misurazione ed il cammino ottico di riferimento è codificata nello spazio delle lunghezze d'onda. Specificamente, la tecnica di interferometria ottica nel dominio della frequenza è basata sulla relazione di trasformata di Fourier tra la funzione di densità spettrale e la correlazione incrociata dei fasci di misurazione e di riferimento, per mezzo della quale è possibile estrarre la misura differenziale di distanze nello spazio reale dal profilo spettrale delle lunghezze d'onda dei due fasci interferenti. Una singola acquisizione spettrale dei fasci di mi-

surazione e di riferimento sovrapposti è possibile utilizzando un reticolo di diffrazione ed una lente di focalizzazione a valle di esso per proiettare su un dispositivo sensore lineare, ad esempio una videocamera, la distribuzione spettrale dei fasci interferenti. Lo spettro dei due fasci interferenti mostra una modulazione periodica e la periodicità (frequenza) di tale modulazione nello spazio delle lunghezze d'onda varia al variare della differenza tra le lunghezze ottiche del cammino di misurazione e del cammino di riferimento. Un algoritmo di calcolo della trasformata di Fourier, ad esempio un algoritmo FFT, è applicato per estrarre la misura del picco di intensità di segnale in rapporto alla differenza tra i cammini ottici nello spazio reale. In figura, con P è indicata la radiazione di sonda che percorre il cammino ottico di misurazione, in cui è interposto il pezzo in lavorazione WP, e con P_R la radiazione di sonda che percorre il cammino ottico di riferimento, in cui è interposto uno specchio di riflessione RM, a seguito della suddivisione attraverso uno specchio dicroico o simile dispositivo divisore/combinatore di fascio BSC. La radiazione di sonda D diffusa dal pezzo WP e la radiazione di sonda di riferimento P_R sono ricombina-

te presso il dispositivo divisore/combinatore di fascio BSC e da qui indirizzate al complesso di mezzi sensori interferometrici, indicato genericamente con SENS.

Il sistema ottico combinato descritto è vantaggiosamente associato ad una macchina per la lavorazione laser di un pezzo o materiale, ad esempio stabilmente accoppiato ad una testa di lavorazione della macchina di lavorazione laser, per determinare la distanza della superficie di un pezzo rispetto alla testa e la temperatura del pezzo durante la lavorazione e, sulla base di tali parametri, eseguire un controllo di processo. Vantaggiosamente, la radiazione ottica di sonda può essere allineata al fascio laser di lavorazione per eseguire misure coassiali all'area di lavorazione, così da determinare la distanza di separazione reale della superficie di un pezzo dalla testa di lavorazione e la temperatura della porzione di materiale fuso sul pezzo in lavorazione.

In figura 13 è rappresentato uno schema a blocchi di un sistema elettronico di controllo di una macchina per la lavorazione laser di un pezzo o di un materiale.

Il sistema comprende mezzi elettronici di ela-

borazione e controllo indicati in figura nel complesso con ECU, che possono essere integrati in un'unica unità di elaborazione a bordo macchina o realizzati in forma distribuita, per cui comprendono moduli di elaborazione dislocati in diverse parti della macchina, tra cui, ad esempio, la testa di lavorazione.

Mezzi di memoria M associati ai mezzi elettronici di elaborazione e controllo ECU recano memorizzato un modello o programma di lavorazione prestabilito, ad esempio comprendente una traiettoria di lavorazione prestabilita sotto forma di istruzioni di movimentazione della testa di lavorazione e/o del pezzo in lavorazione, e parametri fisici di lavorazione indicativi della distribuzione di potenza del fascio ottico, intensità di potenza del fascio e tempi di attivazione del fascio laser in funzione della traiettoria di lavorazione.

I mezzi elettronici di elaborazione e controllo ECU sono predisposti per accedere ai mezzi di memoria M per acquisire una traiettoria di lavorazione e per controllare l'applicazione del fascio laser di lavorazione lungo detta traiettoria. Il controllo dell'applicazione del fascio laser di lavorazione lungo la predeterminata traiettoria di

lavorazione include il controllo dell'irradiazione di una predeterminata distribuzione di potenza del fascio laser verso un'area di lavorazione predeterminata per riferimento al modello o programma di lavorazione prestabilito, ossia secondo le informazioni di traiettoria di lavorazione e parametri di lavorazione acquisite dai mezzi di memoria, ed - in talune applicazioni - il controllo dell'erogazione di un flusso di gas di assistenza.

Un sistema ottico combinato S oggetto dell'invenzione come sopra descritto è predisposto a bordo macchina per rilevare in tempo reale la distanza tra la testa di lavorazione ed il pezzo in lavorazione, nonché l'evoluzione nel tempo di tale distanza, acquisendo la radiazione di sonda diffusa D, e la temperatura superficiale del pezzo in corrispondenza dell'area di lavorazione acquisendo la radiazione di emissione termica T.

I mezzi elettronici di elaborazione e controllo ECU sono predisposti per ricevere dal sistema ottico combinato S oggetto dell'invenzione un segnale indicativo della distanza, ossia della posizione reciproca, tra la testa di lavorazione ed il pezzo in lavorazione nel tempo, e un segnale relativi alla temperatura locale alla superficie del

pezzo in corrispondenza dell'area di lavorazione.

I mezzi elettronici di elaborazione e controllo ECU comprendono un primo modulo di controllo CM1 per il controllo dei parametri meccanici della lavorazione, predisposto per emettere primi segnali di comando CMD1 verso un complesso noto di mezzi attuatori, comprendente mezzi attuatori della movimentazione della testa di lavorazione lungo i gradi di libertà ad essa consentiti dalla specifica forma di realizzazione della macchina e mezzi attuatori della movimentazione del materiale in lavorazione rispetto alla posizione della testa di lavorazione, atti a cooperare con i mezzi attuatori della movimentazione della testa di lavorazione per presentare una programmata traiettoria di lavorazione sul materiale in lavorazione in corrispondenza dell'uscita del fascio laser della testa di lavorazione, in funzione della distanza, ossia della posizione reciproca, tra la testa di lavorazione ed il pezzo in lavorazione determinata. Questi mezzi attuatori non sono descritti in dettaglio perché noti nella tecnica.

I mezzi elettronici di elaborazione e controllo ECU comprendono un secondo modulo di controllo CM2 per il controllo dei parametri fisici della la-

vorazione, predisposto per emettere secondi segnali di comando CMD2 verso mezzi di controllo della generazione e trasmissione del fascio laser, ad esempio per il controllo dell'intensità e della distribuzione trasversale di potenza del fascio laser, in funzione delle condizioni istantanee di lavorazione, ossia della temperatura locale della superficie del pezzo in corrispondenza dell'area di lavorazione corrente.

Vantaggiosamente, il controllo in anello chiuso della posizione della testa di lavorazione e dei parametri fisici della lavorazione consente di aumentare la precisione della focalizzazione del fascio laser di lavorazione nelle lavorazioni di taglio e saldatura, la precisione nell'altezza di deposizione di materiale nei processi di fabbricazione additiva, la frequenza o il duty cycle di attivazione di un fascio laser di lavorazione impulsato, la pressione di un gas di assistenza, la velocità di traslazione della testa lungo una traiettoria di lavorazione (taglio o saldatura), la portata di polveri di materiale nei processi di fabbricazione additiva.

Inoltre, il controllo ad anello chiuso della temperatura può essere utilizzato in particolare

per la stabilizzazione termica, e quindi per la stabilizzazione del processo stesso.

Si noti che la realizzazione proposta per la presente invenzione nella discussione che precede ha carattere puramente esemplificativo e non limitativo della presente invenzione. Un tecnico esperto del settore potrà facilmente attuare la presente invenzione in realizzazioni diverse che non si discostano però dai principi qui esposti, e sono dunque ricomprese nel presente brevetto.

Ciò vale in particolare per quanto riguarda la possibilità di utilizzare mezzi rilevatori della radiazione ottica di sonda diffusa e della radiazione di emissione termica differenti dai dispositivi fotorivelatori, ad esempio videocamere o spettrometri.

Naturalmente, fermo restando il principio dell'invenzione, le forme di attuazione ed i particolari di realizzazione potranno essere ampiamente variati rispetto a quanto è stato descritto ed illustrato a puro titolo di esempio non limitativo, senza per questo allontanarsi dall'ambito di protezione dell'invenzione definito dalle rivendicazioni allegate.

RIVENDICAZIONI

1. Sistema ottico combinato per la determinazione della temperatura della superficie di un oggetto o materiale e della sua distanza rispetto ad un predeterminato punto di riferimento associato a detto sistema, caratterizzato dal fatto che comprende:

- mezzi sorgenti di radiazione ottica atti ad emettere almeno una radiazione ottica di sonda ad una predeterminata lunghezza d'onda o in un predeterminato intervallo di lunghezze d'onda;
- mezzi di controllo dei mezzi sorgenti di radiazione ottica, predisposti per controllare selettivamente la commutazione di detti mezzi sorgenti di radiazione ottica da una condizione operativa in cui emettono detta almeno una radiazione ottica di sonda ad una condizione non operativa in cui non emettono radiazione ottica di sonda;
- mezzi di rilevamento ottici atti a rilevare almeno una radiazione ottica diffusa ed una radiazione ottica emessa termicamente dalla superficie di detto oggetto o materiale;
- mezzi di elaborazione sincronizzati con detti mezzi di controllo e predisposti per:

determinare la distanza della superficie di detto oggetto o materiale rispetto a detto punto di

riferimento sulla base della radiazione ottica di sonda diffusa dalla superficie di detto oggetto o materiale e ricevuta da detti mezzi di rilevamento quando i mezzi sorgenti di radiazione ottica sono operativi; e

determinare la temperatura locale della superficie di detto oggetto o materiale sulla base della radiazione ottica di emissione termica dalla superficie di detto oggetto o materiale e ricevuta da detti mezzi di rilevamento quando i mezzi sorgenti di radiazione ottica non sono operativi.

2. Sistema secondo la rivendicazione 1, in cui detti mezzi di controllo sono predisposti per controllare alternatamente la commutazione di detti mezzi sorgenti di radiazione ottica da una condizione operativa ad una condizione non operativa secondo una frequenza predeterminata.

3. Sistema secondo la rivendicazione 1 o 2, in cui i mezzi sorgenti di radiazione ottica sono predisposti per emettere una radiazione ottica di sonda principale ed una radiazione ottica secondaria o parziale, rappresentativa di detta radiazione ottica di sonda principale, e detti mezzi di rilevamento ottici includono almeno un dispositivo fotorivelatore di monitoraggio normalmente accoppiato a

detti mezzi sorgenti di radiazione ottica per rilevare detta radiazione ottica secondaria o parziale.

4. Sistema secondo la rivendicazione 3, in cui la radiazione ottica di sonda principale diffusa dalla superficie di detto oggetto o materiale è almeno parzialmente sovrapposta a detta radiazione ottica secondaria o parziale su una regione di incidenza comune di detto dispositivo fotorivelatore di monitoraggio,

in cui detto dispositivo fotorivelatore di monitoraggio è atto a rilevare un motivo di frange di interferenza tra la radiazione ottica secondaria o parziale e la radiazione ottica di sonda principale diffusa dalla superficie di detto oggetto o materiale, ed

in cui i mezzi di elaborazione sono predisposti per determinare la distanza della superficie di detto oggetto o materiale rispetto a detti mezzi sorgenti di radiazione ottica sulla base di detto motivo di frange di interferenza.

5. Sistema secondo la rivendicazione 3 o 4, in cui detti mezzi sorgenti di radiazione ottica comprendono un diodo emettitore di luce il quale presenta un'area principale di emissione di radiazione ed un'area secondaria di emissione di radiazione, e

detto dispositivo fotorivelatore di monitoraggio è affacciato a detta area secondaria di emissione di radiazione, e la radiazione ottica di sonda principale diffusa dalla superficie di detto oggetto o materiale è almeno parzialmente raccolta da detta area principale di emissione.

6. Sistema secondo la rivendicazione 5, in cui detti mezzi di controllo sono predisposti per controllare selettivamente l'attivazione e la disattivazione della corrente di eccitazione di detto diodo emettitore di luce, atta ad alterare l'equilibrio termodinamico delle popolazioni dei portatori di carica.

7. Sistema secondo la rivendicazione 1 o 2, in cui detti mezzi di rilevamento ottici includono mezzi fotorivelatori aventi una gamma spettrale di rilevamento comprendente detta predeterminata lunghezza d'onda della radiazione ottica di sonda diffusa dalla superficie di detto oggetto o materiale ed almeno una lunghezza d'onda della radiazione ottica di emissione termica dalla superficie di detto oggetto o materiale.

8. Sistema secondo la rivendicazione 1 o 2, in cui detti mezzi di rilevamento ottici includono primi mezzi fotorilevatori atti ad intercettare al-

meno parte della radiazione ottica di sonda diffusa dalla superficie di detto oggetto o materiale e secondi mezzi fotorivelatori atti ad intercettare almeno parte della radiazione ottica di emissione termica dalla superficie di detto oggetto o materiale.

9. Sistema secondo la rivendicazione 8, in cui detti primi mezzi fotorivelatori comprendono una disposizione di fotorivelatori estesa lungo almeno una direzione spaziale e disposta in modo tale da ricevere detta radiazione ottica di sonda diffusa dalla superficie di detto oggetto o materiale secondo una direzione di osservazione ad un angolo non nullo rispetto alla direzione di emissione della radiazione ottica di sonda, ed i mezzi di elaborazione sono predisposti per determinare la distanza della superficie di detto oggetto o materiale rispetto a detti mezzi sorgenti di radiazione ottica sulla base della posizione di incidenza della radiazione ottica di sonda diffusa dalla superficie di detto oggetto o materiale lungo detta almeno una direzione di estensione della disposizione di fotorivelatori.

10. Sistema secondo la rivendicazione 8, in cui detti primi mezzi fotorivelatori comprendono una

disposizione di fotorivelatori estesa lungo almeno una direzione spaziale, detti mezzi sorgenti di radiazione ottica sono accoppiati a mezzi conformatori di fascio a valle atti a conformare detta almeno una radiazione ottica di sonda in un fascio avente una distribuzione di potenza trasversale predeterminata variabile lungo l'asse di propagazione, ed i mezzi di elaborazione sono predisposti per determinare la distanza della superficie di detto oggetto o materiale rispetto a detti mezzi sorgenti di radiazione ottica sulla base della distribuzione di potenza trasversale della radiazione ottica di sonda diffusa dalla superficie di detto oggetto o materiale rilevata dalla disposizione di fotorivelatori.

11. Sistema secondo la rivendicazione 8, in cui detti primi mezzi fotorivelatori comprendono una disposizione di fotorivelatori estesa lungo almeno una direzione spaziale, detti mezzi sorgenti di radiazione ottica sono atti ad emettere un primo ed un secondo fascio di radiazione ottica di sonda coassiali aventi differenti distribuzioni trasversali di potenza, ed i mezzi di elaborazione sono predisposti per determinare la distanza della superficie di detto oggetto o materiale rispetto a

detti mezzi sorgenti di radiazione ottica sulla base del confronto differenziale tra la distribuzione di potenza trasversale del primo fascio di radiazione ottica di sonda diffuso dalla superficie di detto oggetto o materiale e la distribuzione di potenza trasversale del secondo fascio di radiazione ottica di sonda diffuso dalla superficie di detto oggetto o materiale, rilevate dalla disposizione di fotorivelatori.

12. Sistema secondo la rivendicazione 11, in cui detti primo e secondo fascio di radiazione ottica di sonda presentano polarizzazioni differenti, preferibilmente polarizzazioni ortogonali.

13. Sistema secondo la rivendicazione 11, in cui detti primo e secondo fascio di radiazione ottica di sonda presentano differenti lunghezze d'onda.

14. Sistema secondo la rivendicazione 11, in cui detti primo e secondo fascio di radiazione ottica di sonda sono emessi ad intervalli alterni.

15. Sistema secondo la rivendicazione 8, in cui detti primi mezzi fotorivelatori comprendono una disposizione di fotorivelatori, detti mezzi sorgenti di radiazione ottica sono atti ad emettere una radiazione ottica di sonda comprendente una pluralità di fasci disposti simmetricamente rispetto ad

un asse di propagazione, ed i mezzi di elaborazione sono predisposti per determinare la distanza della superficie di detto oggetto o materiale rispetto a detti mezzi sorgenti di radiazione ottica sulla base del confronto tra la posizione reciproca di incidenza di detta pluralità di fasci della radiazione ottica di sonda diffusa dalla superficie di detto oggetto o materiale sulla disposizione di fotorevelatori.

16. Sistema secondo la rivendicazione 8, in cui detti mezzi sorgenti di radiazione ottica sono atti ad emettere un primo fascio di radiazione ottica di sonda ed un secondo fascio di detta radiazione ottica di riferimento,

il sistema includendo mezzi di propagazione di detto primo fascio di radiazione ottica di sonda sono atti a condurre detto fascio di sonda verso la superficie di detto oggetto o materiale ed a condurre il fascio riflesso o diffuso dalla superficie di detto oggetto o materiale verso detti mezzi sensori ottici interferometrici, attraverso un percorso ottico di misurazione,

il sistema includendo mezzi di propagazione di detto secondo fascio di radiazione ottica di riferimento sono atti a condurre detto fascio di rife-

rimento verso detti mezzi sensori ottici interferometrici attraverso un percorso ottico di riferimento di lunghezza ottica predeterminata, preferibilmente equivalente alla lunghezza ottica del percorso ottico di misurazione in una condizione operativa nominale in cui la posizione della superficie di detto oggetto o materiale è una posizione nominale predeterminata rispetto al predeterminato punto di riferimento associato al sistema;

in cui i mezzi di propagazione del primo e del secondo fascio sono predisposti per sovrapporre detto primo e secondo fascio su una regione di incidenza comune di detti mezzi sensori ottici interferometrici,

in cui detti primi mezzi rivelatori comprendono mezzi sensori ottici interferometrici includenti una disposizione di fotorivelatori estesa lungo almeno una direzione spaziale, atta a rilevare un motivo di frange di interferenza tra il fascio di misurazione ed il fascio di riferimento su detta regione di incidenza comune, ed

in cui i mezzi di elaborazione sono predisposti per determinare la distanza della superficie di detto oggetto o materiale rispetto a detti mezzi sorgenti di radiazione ottica sulla base di detto

motivo di frange di interferenza.

17. Sistema secondo la rivendicazione 8, in cui mezzi di filtraggio di lunghezze d'onda sono accoppiati in ingresso a detti primi mezzi rivelatori, detti mezzi di filtraggio essendo atti a trasmettere detta predeterminata lunghezza d'onda o detto predeterminato intervallo di lunghezze d'onda della radiazione ottica di sonda diffusa dalla superficie di detto oggetto o materiale, ed a bloccare lunghezze d'onda della radiazione ottica di emissione termica dalla superficie di detto oggetto o materiale.

18. Sistema secondo la rivendicazione 7 o 8, in cui detti mezzi di elaborazione sono inoltre predisposti per normalizzare la radiazione ottica di emissione termica intercettata da detti mezzi fotorevelatori in funzione della distanza della superficie di detto oggetto o materiale determinata.

19. Procedimento per la determinazione della temperatura della superficie di un oggetto o materiale e della sua distanza rispetto ad un predeterminato punto di riferimento associato ad un sistema ottico combinato secondo una qualsiasi delle rivendicazioni 1 a 18, caratterizzato dal fatto che comprende le fasi di:

- predisporre mezzi sorgenti di radiazione ottica atti ad emettere almeno una radiazione ottica di sonda ad una predeterminata lunghezza d'onda o in un predeterminato intervallo di lunghezze d'onda;
- controllare selettivamente la commutazione di detti mezzi sorgenti di radiazione ottica da una condizione operativa in cui emettono detta almeno una radiazione ottica di sonda ad una condizione non operativa in cui non emettono radiazione ottica di sonda;
- rilevare almeno una radiazione ottica diffusa ed una radiazione ottica emessa termicamente dalla superficie di detto oggetto o materiale;
- determinare la distanza della superficie di detto oggetto o materiale rispetto a detto punto di riferimento sulla base della radiazione ottica di sonda diffusa dalla superficie di detto oggetto o materiale, rilevata quando i mezzi sorgenti di radiazione ottica sono operativi; e
- determinare una temperatura della superficie di detto oggetto o materiale sulla base della radiazione ottica di emissione termica dalla superficie di detto oggetto o materiale, rilevata quando i mezzi sorgenti di radiazione ottica non sono operativi.

20. Macchina per la lavorazione laser di un pezzo o materiale, operante mediante un fascio laser di lavorazione emesso da una testa di lavorazione e condotto lungo una traiettoria di lavorazione sul pezzo o materiale comprendente una successione di aree di lavorazione, ed includente mezzi di controllo di parametri di lavorazione, caratterizzata dal fatto che comprende un sistema ottico combinato secondo una qualsiasi delle rivendicazioni 1 a 18, stabilmente accoppiato a detta testa di lavorazione per la determinazione della temperatura della superficie di detto pezzo o materiale e della sua distanza rispetto alla testa di lavorazione, detti mezzi di controllo di parametri di lavorazione agendo in funzione di un predeterminato progetto di lavorazione, della temperatura determinata della superficie di detto pezzo o materiale e della distanza determinata della superficie di detto pezzo o materiale rispetto alla testa di lavorazione.

21. Macchina secondo la rivendicazione 20, in cui detti parametri di lavorazione includono almeno uno tra l'intensità e la distribuzione trasversale di potenza del fascio laser di lavorazione, la posizione relativa tra detta testa di lavorazione e detto pezzo o materiale, l'altezza di deposizione

di materiale in un processo di fabbricazione additiva, la frequenza o il duty cycle di attivazione di un fascio laser di lavorazione impulsato, la pressione di un gas di assistenza, la velocità di traslazione della testa di lavorazione lungo una traiettoria di lavorazione, la portata di polveri di materiale nei processi di fabbricazione additiva.

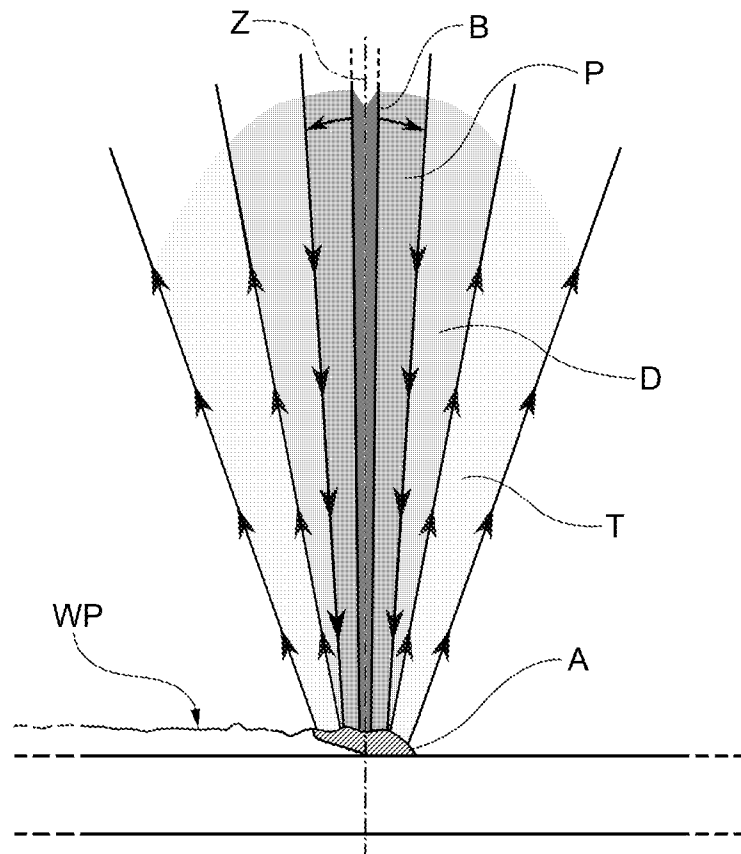


FIG. 1

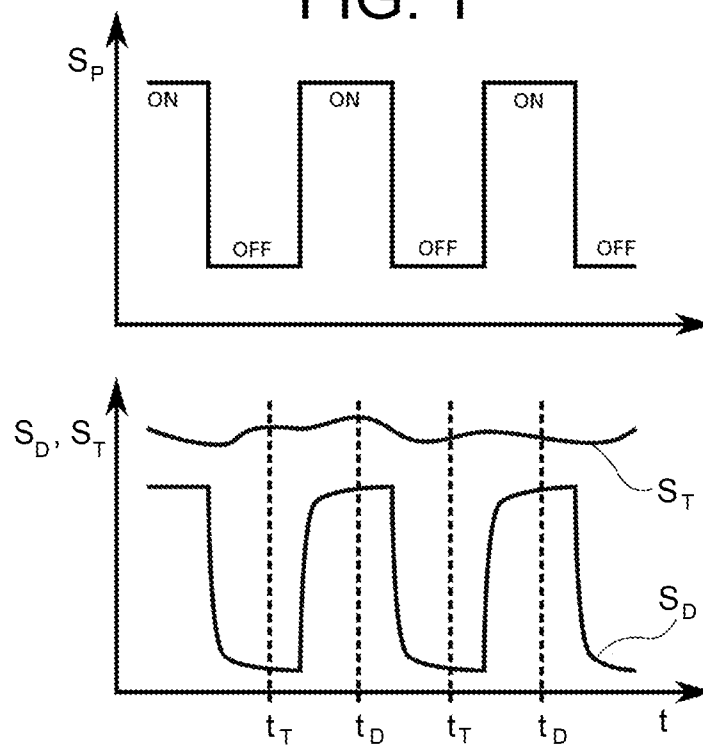


FIG. 3

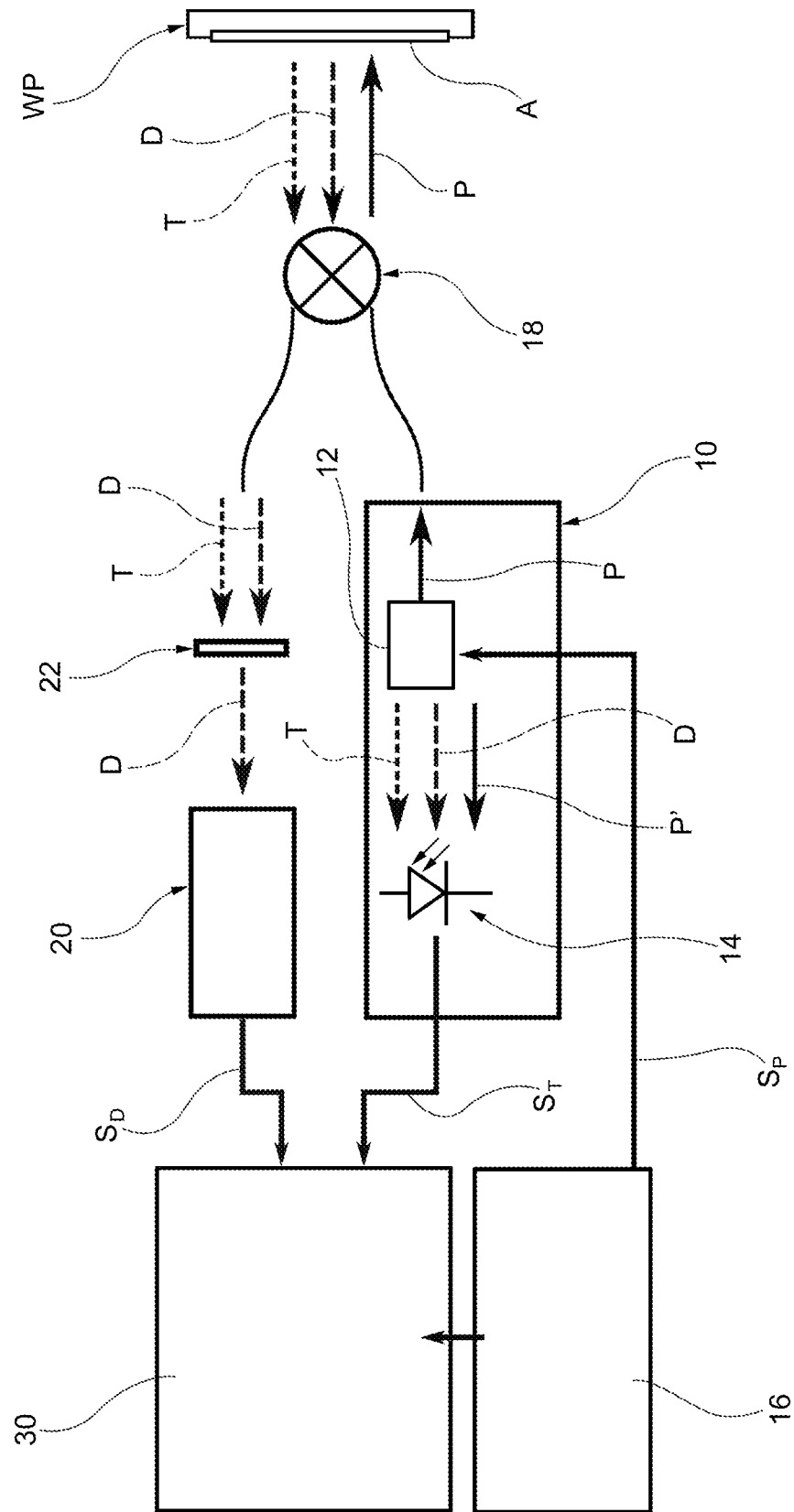


FIG. 2

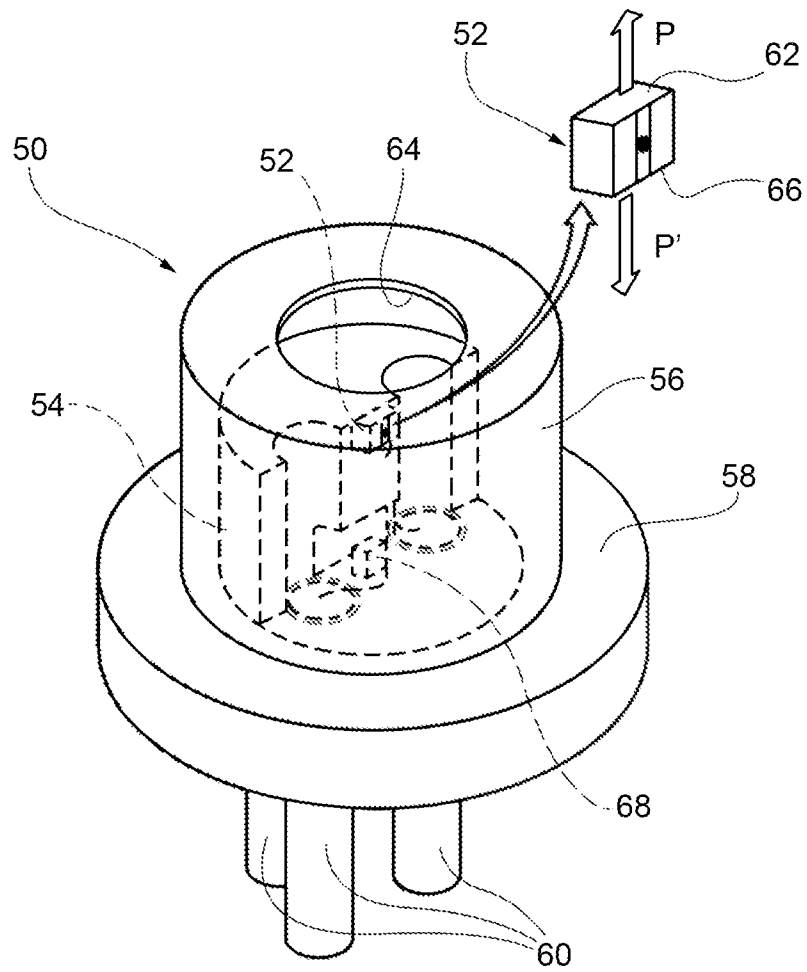


FIG. 4a

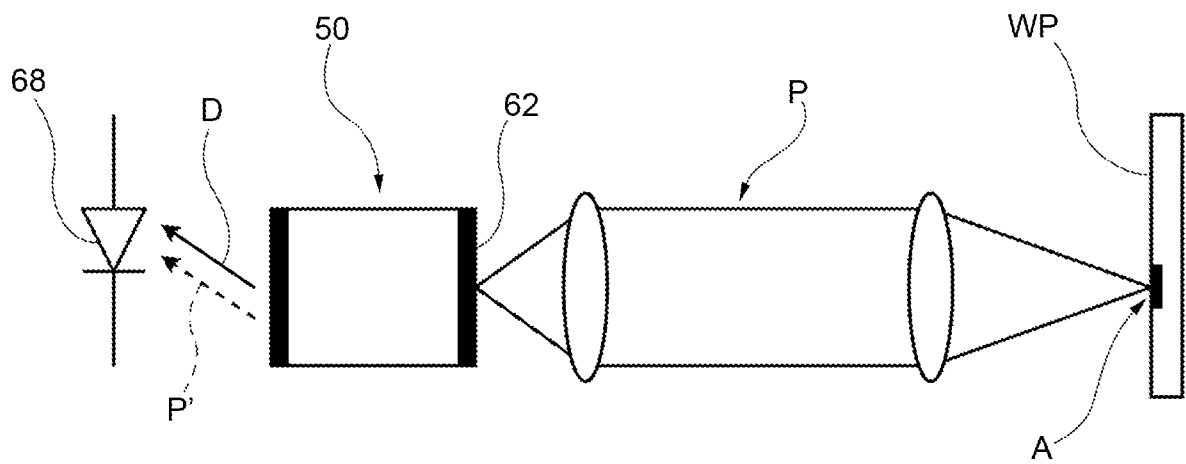


FIG. 4b

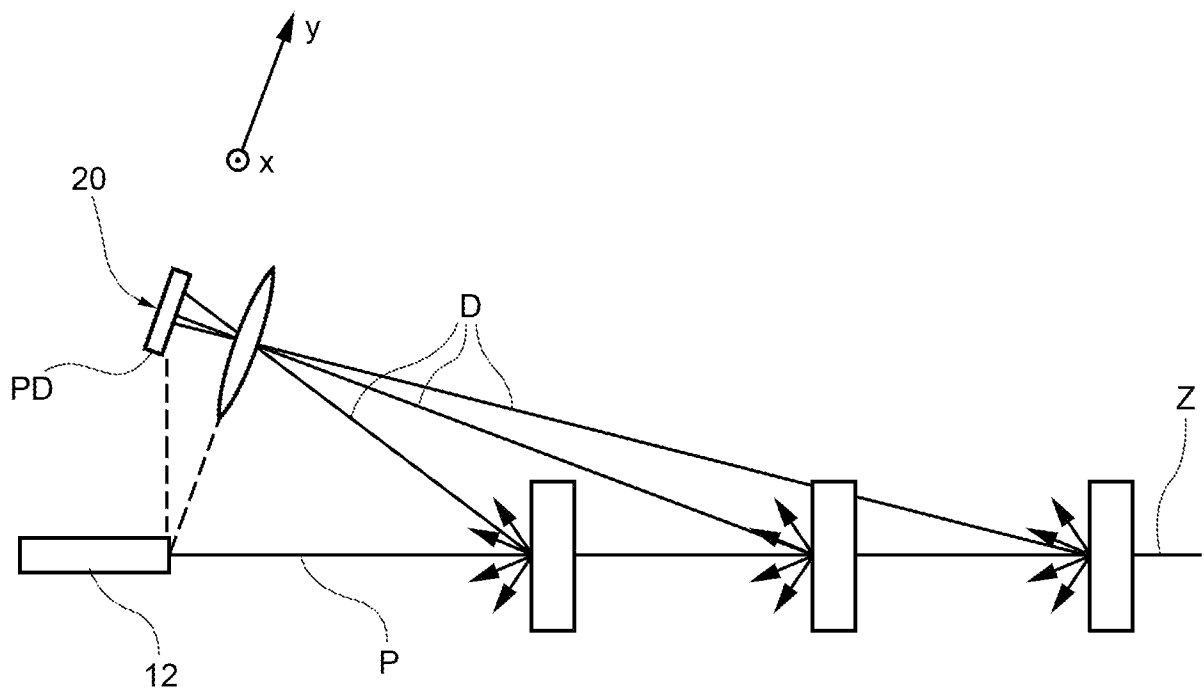


FIG. 7

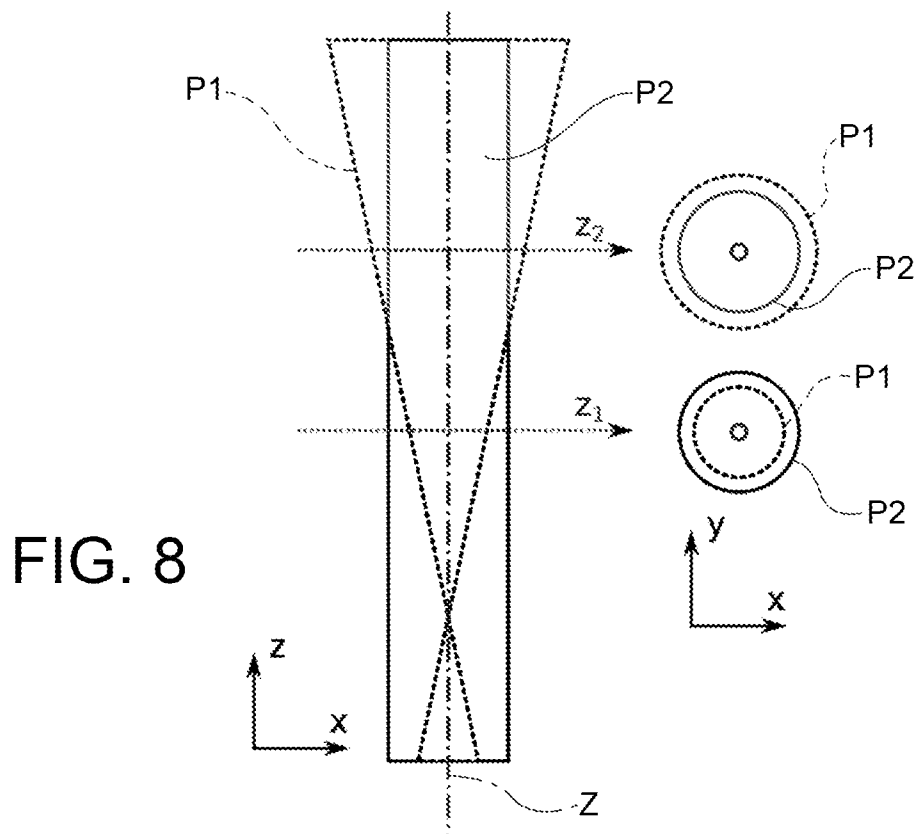


FIG. 8

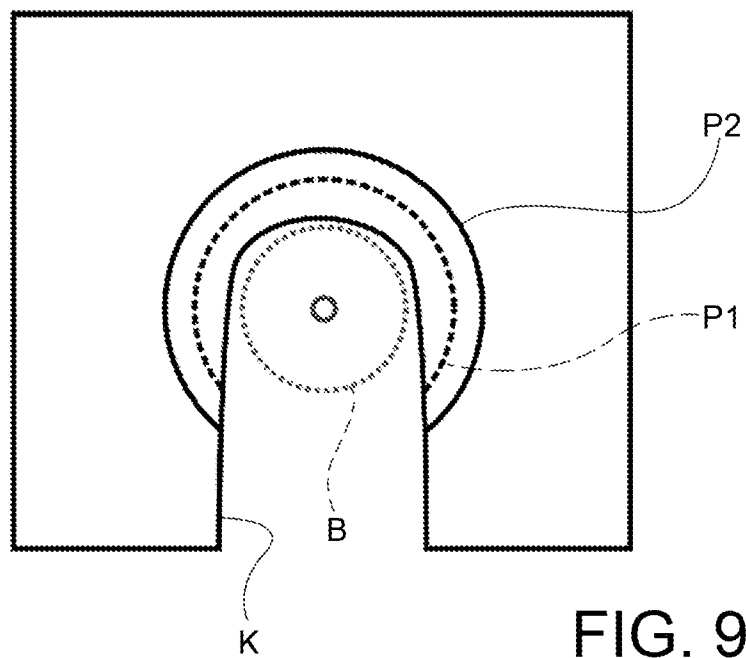


FIG. 9

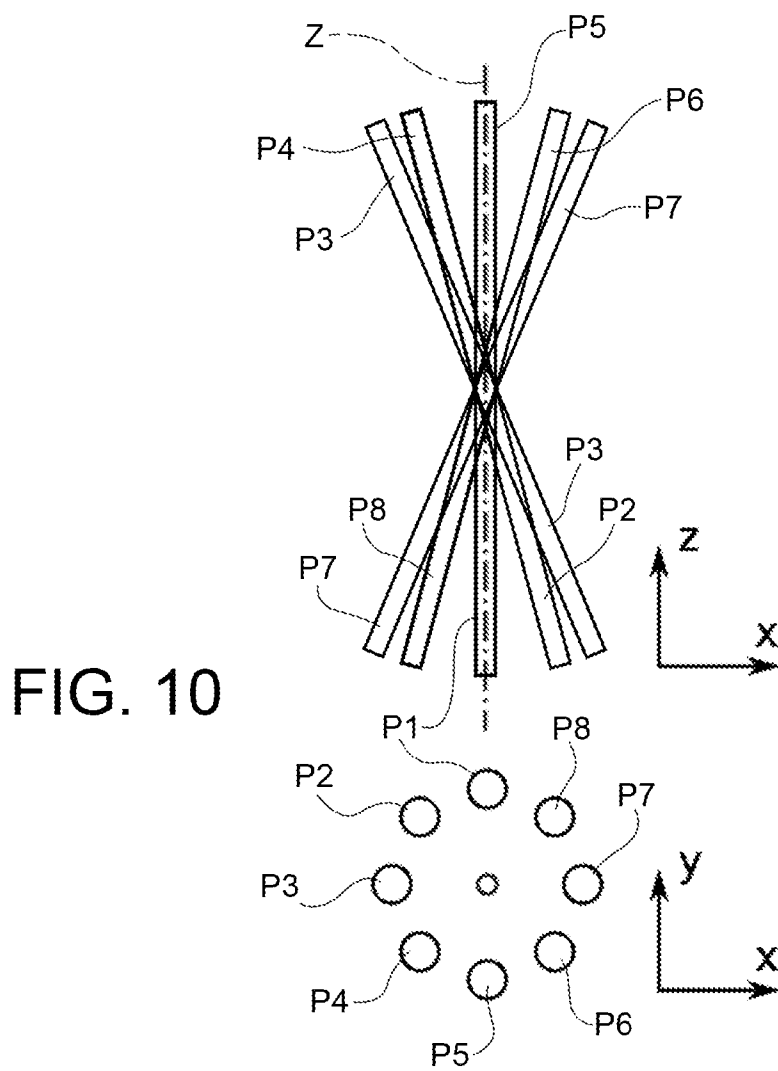


FIG. 10

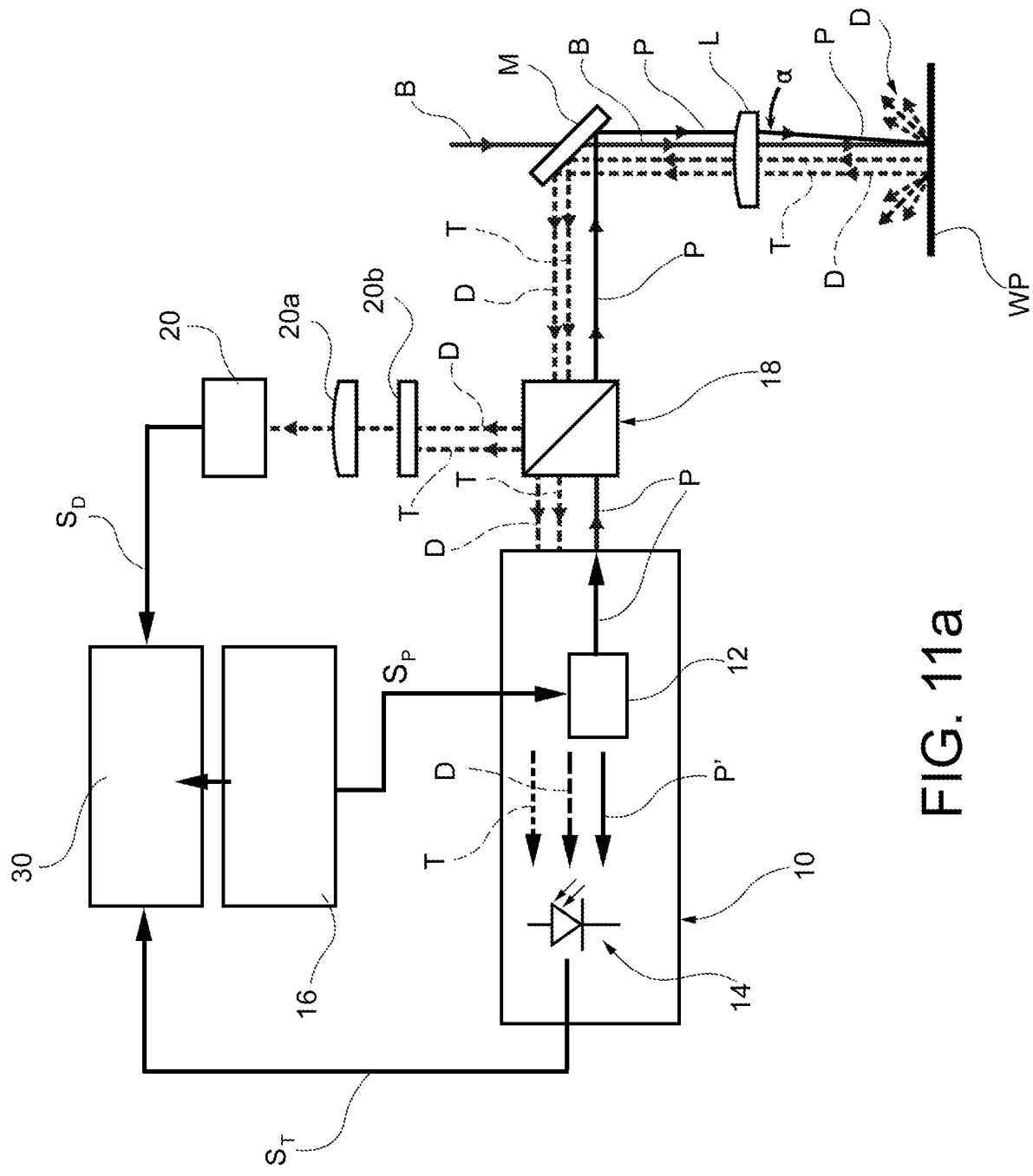


FIG. 11a

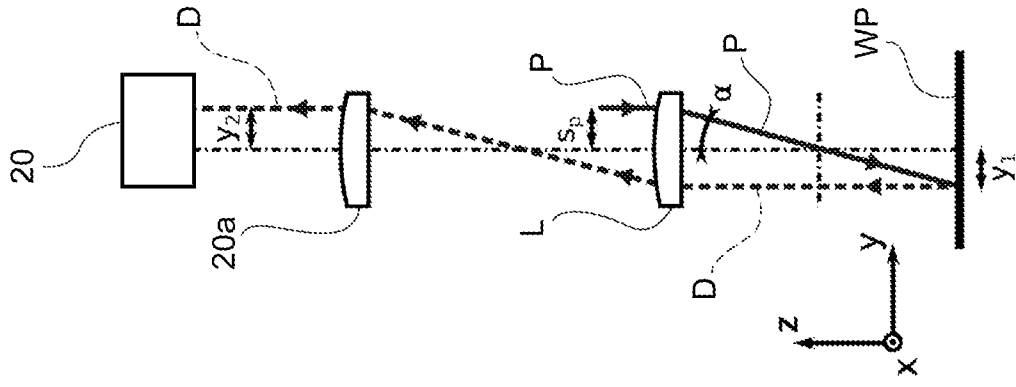


FIG. 11b

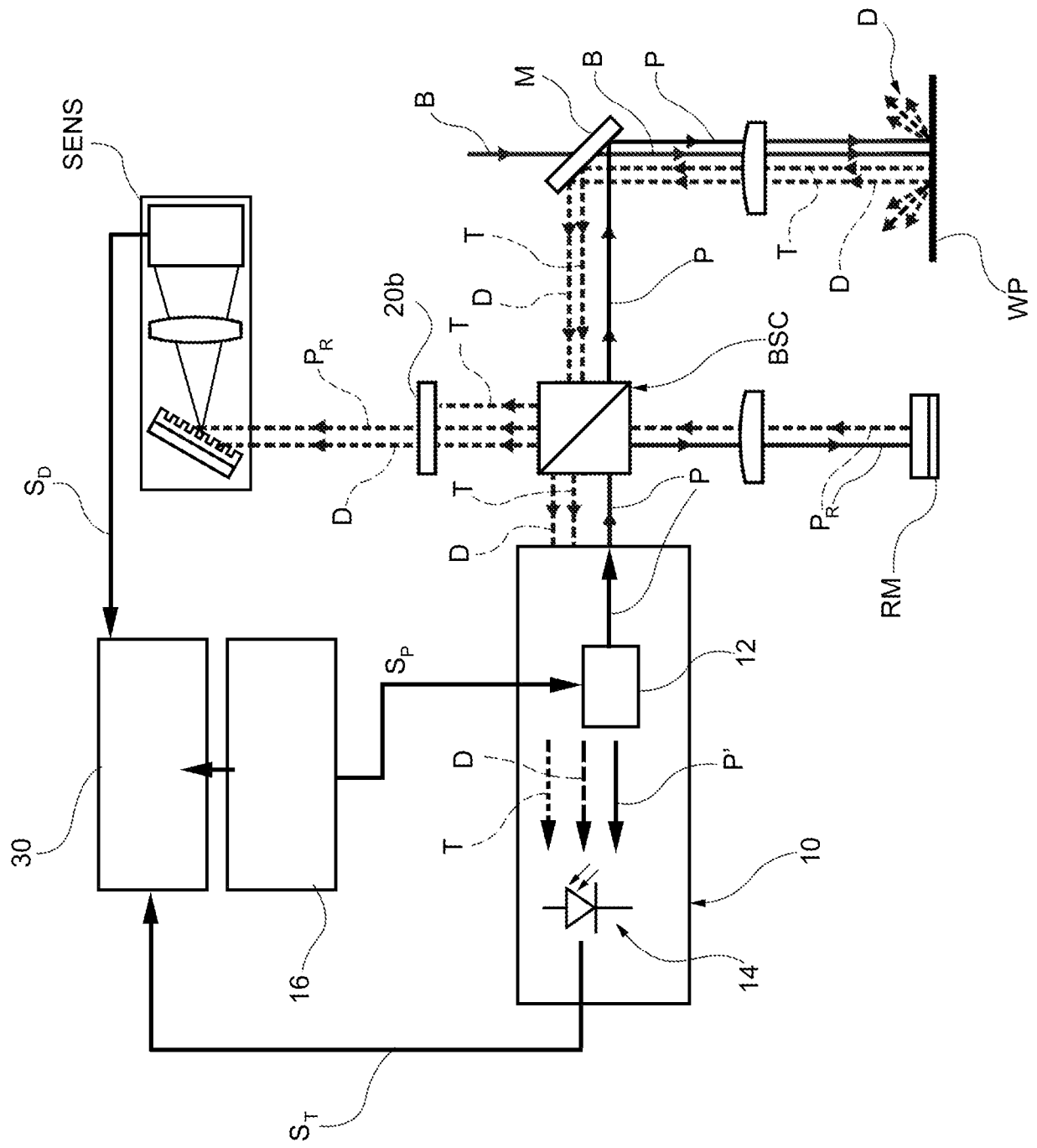


FIG. 12

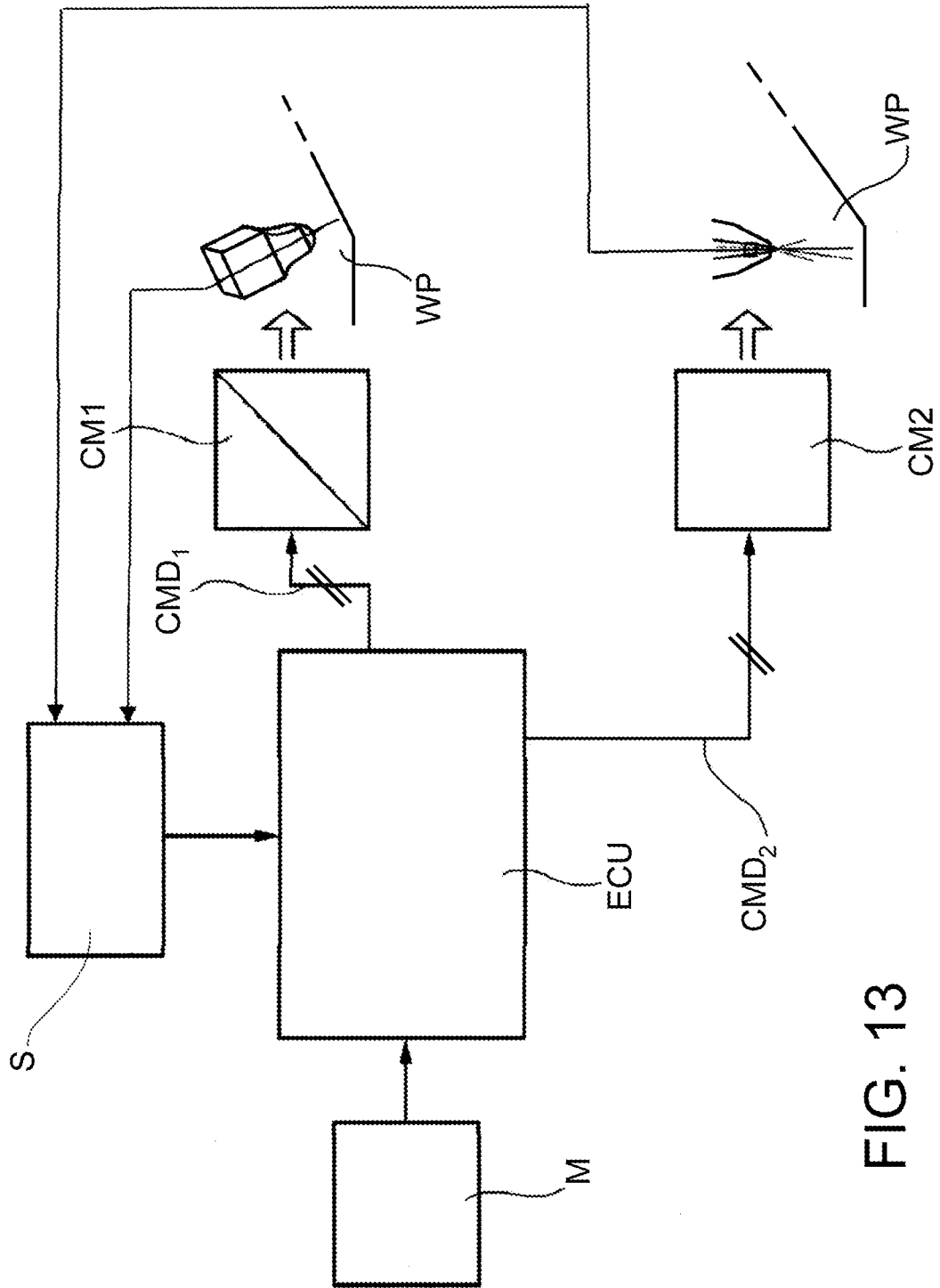


FIG. 13