UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DELLA REPUBBLICA
DI SAN MARINO

UNIVERSITÀ
DI PARMA

CORSO DI LAUREA
IN INGEGNERIA GESTIONALE

TESI DI LAUREA

Uso del laser per superfici antibatteriche

Relatore *Prof.* **Adrian H.A. Lutey**

Laureando Riccardo Simoncelli

anno accademico 2025-2026

Indice

1 **Introduzione** 1
1.1 Introduzione alla tecnologia laser 1
1.2 I principali ambiti applicativi del laser 2
1.3 Obiettivo della tesi e articolazione dell'elaborato 5
2 **La storia del laser** 6
2.1 Introduzione storica ed i primi fondamenti fisici: da Einstein al maser 6
2.2 Dal Maser al primo Laser e la nascita delle prime industrie 8
2.3 L'espansione tecnologica e la nascita di nuovi tipi di laser 12
2.4 Il laser nella società moderna 15
3 **Le sorgenti laser e i sistemi di supporto per la sicurezza** 17
3.1 Generazione di un fascio laser 17
3.1.1 Emissione spontanea e assorbimento 17
3.1.2 Emissione stimolata e inversione di popolazione 18
3.2 Il pompaggio 19
3.2.1 La risonanza ottica 20
3.3 Tipologie di sorgenti laser 21
3.3.1 Mezzo attivo allo stato gassoso 22
3.3.2 Mezzo attivo allo stato solido 23
3.3.3 Il diodo laser 24
3.3.4 Sorgenti laser in vetro in fibra e a disco 26
3.4 Quadro normativo e riferimenti legislativi 28
3.4.1 Norme tecniche per la sicurezza 28
3.5 Classificazione delle sorgenti laser e prescrizioni operative 29
3.5.1 Classi di pericolosità dei dispositivi laser e relative prescrizioni di sicurezza 29
3.6 Fonti di pericolo e rischi collaterali 31
3.6.1 Fonti primarie di pericolo 31
3.6.2 Rischi collaterali associati 32
3.7 Misure di sicurezza, protezione e prevenzione 33
3.7.1 Misure tecniche di prevenzione e DPI 33
4 **Le lavorazioni laser** 36
4.1 Taglio laser 36
4.1.1 Principi di funzionamento 36
4.1.2 Ambiti applicativi e regimi di funzionamento 37
4.1.3 Meccanismi di taglio laser 38
4.1.4 Principali vantaggi e svantaggi di un sistema a taglio laser 40
4.2 Saldatura laser 41
4.2.1 Metodi di saldatura tradizionali 42
4.2.2 La brasatura 42
4.2.3 Caratteristiche metallurgiche della saldatura laser 43
4.2.4 Modalità operative della saldatura laser 44

4.2.5 Vantaggi e svantaggi della saldatura laser 46
4.3 Trattamenti termici superficiali 47
4.3.1 Principali vantaggi 48
4.3.2 La tempra laser 48
4.3.3 Rifusione laser (LSM) 51
4.3.4 La ricottura laser 51
4.3.5 Altre tecnologie avanzate 54
4.4 Additive manufacturing (stampa 3D) 56
4.4.1 Principi generali e vantaggi 56
4.4.2 Tecnologie laser per l'additive manufacturing 57
5 **Stato dell'arte sulle superfici antibatteriche ottenute mediante laser** 62
5.1 Fondamenti delle superfici antibatteriche 62
5.1.1 Processo di formazione del biofilm 62
5.1.2 Limiti delle strategie antibatteriche tradizionali 63
5.1.3 Ruolo della testurizzazione laser 64
5.2 Meccanismi di azione antibatterica delle superfici testurizzate laser 65
5.2.1 Limiti delle strategie antibatteriche tradizionali 65
5.2.2 La bagnabilità 67
5.2.3 Superfici a comportamento anti-biofouling 69
5.2.4 Alterazione della chimica superficiale 70
5.3 Materiali di substrato e ambiti applicativi industriali 71
5.3.1 Utilizzo delle leghe di titanio nei vari ambiti 71
5.3.2 Substrati metallici convenzionali 72
5.3.3 Materiali polimerici e ceramici avanzati 72
5.4 Tecniche di processamento della LST 73
5.4.1 Laser-Induced Periodic Surface Structures (LIPSS) 74
5.4.2 Patterning di interferenza laser diretto (DLIP) 75
5.4.3 La scrittura laser diretta (DLW) 76
5.5 Meccanismi di interazione batterio-superficie 78
5.5.1 Differenze tra batteri Gram-negativi e Gram-positivi 78
5.5.2 Impatto della LST sull'adesione E.coli e S. aureus 79
5.5.3 Applicazione della testurizzazione laser per la prevenzione del biofouling marino 82
5.6 Sfide ingegneristiche e ottimizzazione del processo LST 84
5.7 Prospettive di mercato e impatto industriale 86
5.7.1 Industria 4.0 e sostenibilità 87
5.7.2 Nuove frontiere applicative e complessità tecnica 88
6 **Conclusioni** 90
Bibliografia 91

Capitolo 1

Introduzione

1.1 Introduzione alla tecnologia laser

La storia del laser è un esempio rilevante di come scienza e tecnologia siano riuscite ad integrarsi ed evolversi l'una grazie all'altra.
Dalla precedente speculazione teorica si è giunti a progettare e realizzare una nuova sorgente di radiazione che a sua volta ha permesso di avviare nuove ricerche scientifiche fino all'esplorazione di fenomeni naturali precedentemente ignorati.
Nel corso di tale processo sono state sviluppate svariate applicazioni pratiche, ognuna delle quali è divenuta base di ulteriori ricerche al fine di dimostrare come scienza e tecnologia siano indissolubilmente legate e necessitino l'una del contributo dell'altra.
L'acronimo LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation), divenuto parte fondamentale del moderno linguaggio scientifico e tecnologico, non solo rappresenta una tecnologia rivoluzionaria, ma anche un monumento alla creatività umana e alla ricerca scientifica.
Descritto brevemente il laser procederò con il chiarimento delle sue applicazioni e alla successiva evoluzione del concetto di laser, della sua storia, dei differenti tipi di lavorazione e del suo impatto sulla società moderna.
L'utilizzo del laser ha portato innovazione scientifica e tecnologica in svariati ambiti quali medici, comunicazioni, industria e astronomia.
Elencando alcuni dei suoi maggiori impieghi consideriamo:

- **Medicina**: Gli strumenti laser in ambito medico sono essenziali per tagliare e bruciare i tessuti con la massima precisione evitando danni ai circostanti,

o altresì per curare malattie specifiche quali distacco della retina o glaucoma.

- **Comunicazione**: In ambito di comunicazione i laser rilasciano segnali tramite fibre ottiche velocemente e precisamente, strumenti essenziali per la trasmissione ad alta velocità e lunghe distanze.
- **Industria**: Taglio, saldatura e marcatura risultano insostituibili grazie a precisione e ripetibilità in ambito automobilistico, elettronico e aerospaziale.
- **Ricerca scientifica**: impiegati in spettroscopia, manipolazione di atomi e molecole, generazione di specifici ambienti fisici.
- **Astronomia**: i laser vengono sfruttati per realizzare puntatori notturni e facilitano la correzione delle distorsioni atmosferiche nei telescopi terrestri.

Chiarite le modalità di funzionamento degli strumenti laser lo studio si sposta verso la progettazione di superfici ad azione antibatterica, ove viene limitata la proliferazione di agenti infettivi.

L'utilizzo di tali strumenti garantisce precisione per alterazione di rugosità superficiale e composizione chimica.

1.2 I principali ambiti applicativi del laser

Per superficie antibatterica si intende una superficie progettata e ingegnerizzata per ridurre l'adesione, ritenzione o sopravvivenza dei batteri durante la fase iniziale del contatto.

E' fondamentale precisare che non tutte le superfici antibatteriche agiscono allo stesso modo, alcune limitano la colonizzazione iniziale, ostacolando la formazione del biofilm, altre esercitano un'azione battericida o batteriostatica attraverso caratteristiche chimiche, topografiche o fotocatalitiche; difatti nel contesto delle superfici laser texturizzate, la loro capacità antibatterica deriva da una diversa

combinazione: quella morfologica e di bagnabilità (che determinano la capacità di una cellula di essere rimossa o meno).

Il risultato ultimo non dipenderà da un unico parametro ma dalla relazione tra morfologia superficiale, energia libera, bagnabilità e composizione del materiale.

Il primo ambito applicativo in cui vediamo utilizzare il laser per superfici micro-batteriche è in ospedale, dove la contaminazione superficiale è un serio problema per la diffusione delle infezioni legate all'assistenza.

Letti, strumenti, componenti metallici, dispositivi impiantabili e superfici che vengono toccati ripetutamente hanno bisogno di materiali capaci di mantenere le prestazioni igieniche nel tempo, anche quando la pulizia e la disinfezione avvengono ripetutamente.

Le ricerche sul titanio e sulle leghe di titanio dimostrano che la microtesturizzazione laser riduce la formazione di biofilm nella bocca e limita l'adesione dei batteri. Questo è un dato importante per il settore biomedicale e per chi sviluppa impianti.

Una revisione sistematica più recente conferma che il laser influenza in modo netto il comportamento dei batteri sulle superfici implantari, tuttavia mostra il continuo bisogno di uniformare i protocolli di prova e i parametri del processo.

L'efficacia biologica deve rimanere compatibile con la sterilizzazione, la manutenzione, la durata del componente e i costi di validazione.

Il secondo ambito applicativo è il settore agro-alimentare, dove il problema non riguarda solo la sicurezza del prodotto finito, ma anche l'igiene delle superfici di contatto lungo tutta la filiera.

Le superfici di contatto includono piani di lavorazione, nastri trasportatori, utensili, scambiatori, serbatoi e componenti di confezionamento.

In base a quanto emerge dalla revisione sul laser surface texturing, la funzionalizzazione della superficie può essere indirizzata non solo a fornire proprietà antibatteriche, ma anche a renderla più idrofila o più idrofoba, a controllare l'attrito e a migliorare la pulibilità.

I seguenti aspetti, nel settore alimentare, influiscono direttamente sui tempi di fermo dell'impianto, sul consumo d’acqua e sulla frequenza delle operazioni di sanificazione.

La convenienza della soluzione è correlata alla riuscita di unione di igiene, resistenza all’usura e continuità produttiva.

Micro e nano topografia non si limitano alla riduzione degli agenti patogeni ma fungono da strumento di progettazione multifunzionale.

Le superfici con finiture differenti mutano adesione cellulare, risposta biologica del tessuto ospite e interazione con i fluidi oltre al comportamento meccanico del componente.

Analisi precedenti hanno dimostrato come le superfici antibatteriche create con la texture laser abbiano un potenziale più ampio, confermando che la forma non sia un dettaglio secondario, ma il cuore della funzione delle superfici antibatteriche.

In un’ottica di ingegneria gestionale, la sfida si sposta sulla definizione di criteri oggettivi per validare la maturità industriale e la reale sostenibilità dei trattamenti laser.

Oltre alla performance tecnica, l’attenzione deve ricadere sull'integrazione del processo nel contesto produttivo: è necessario valutare metriche quali la durata dei cicli, l'efficienza energetica, l'incidenza dei costi unitari, la ripetibilità dei setup e la solidità dei controlli metrologici in linea.

Se da un lato il laser offre il vantaggio distintivo di eliminare la dipendenza da formulazioni chimiche complesse, dall'altro la sua effettiva sostenibilità deve essere misurata lungo l'intero *Life Cycle* del prodotto.

Tale valutazione non può prescindere da un'analisi rigorosa della stabilità delle prestazioni funzionali nel tempo, inclusi i costi associati alla manutenzione e la durata operativa del componente stesso.

1.3 Obiettivo della tesi e articolazione dell'elaborato

Delineate le informazioni necessarie per conoscere laser, superfici antibatteriche e relative applicazioni, il percorso della tesi si sviluppa con un approfondimento teorico al fine di giungere ad un'analisi dello stato dell'arte della Laser Surface Texturing, per l'ottenimento di superfici antibatteriche al fine di ottenere una risposta sulla fattibilità scientifica e sulla sua sostenibilità industriale.

Il primo capitolo si fonda sull'introduzione della storia del laser, aspetto fondamentale per analizzare i successivi.

Il secondo modulo presenta un approfondimento sulle sorgenti laser e i vari sistemi di supporto per realizzare con esso le lavorazioni.

La terza sezione esporrà le lavorazioni laser impiegate per applicazioni classiche o per superfici con funzionalità antibatteriche al fine di giungere al quarto capitolo cioè allo stato dell'arte che spiegherà il funzionamento e l'ottenimento di queste superfici, evidenziandone limiti e potenzialità delle tecniche.

Capitolo 2

La storia del laser

2.1 Introduzione storica ed i primi fondamenti fisici: da Einstein al maser

Tale capitolo permette di conoscere specificatamente il quadro storico e concettuale entro il quale si collocano la scoperta del laser e il suo uso futuro.
Prima di affrontare il tema delle superfici micro-batteriche è necessario chiarire come questa tecnologia sia nata, quali problemi scientifici abbia cercato di risolvere e perché abbia assunto un ruolo tanto ampio in ambito tecnico e produttivo.
La storia del laser non è infatti un semplice antefatto cronologico: mostra il passaggio da un'idea teorica ad uno strumento capace di trasformare misurazione, lavorazione dei materiali e progettazione delle superfici.
Il primo elemento concettuale del laser fu la proposta di Albert Einstein del 1916 secondo cui i fotoni potevano stimolare l'emissione di fotoni identici dagli atomi eccitati, essa si basa sull'esistenza dei coefficienti A e B connessi ai fenomeni di assorbimento ed emissione stimolata.
Il nome emissione stimolata è stato introdotto successivamente da Van Vleck nel 1924 (fino ad allora chiamata assorbimento negativo).
Sotto il profilo sperimentale, le prime indicazioni, sebbene indirette, dell'emissione stimolata emersero nel 1928 con gli studi di Rudolf Ladenburg e del suo gruppo.
I fisici notarono che l'indice di rifrazione del neon diminuiva nel momento in cui il gas veniva sollecitato da una scarica elettrica, un comportamento singolare che Ladenburg battezzò come "dispersione negativa".

Per un riscontro diretto del fenomeno fu necessario attendere il 1950, grazie al lavoro svolto da Edward Purcell e Robert Pound.
Attraverso tecniche di risonanza magnetica nucleare applicate a cristalli di fluoruro di litio (LiF), i due studiosi dimostrarono la possibilità di portare il sistema di spin in uno stato a "temperatura negativa".
Tale condizione, corrispondente a un'inversione di popolazione in cui i livelli ad alta energia risultano maggiormente popolati rispetto a quelli di base, fa sì che il materiale, se investito da una radiazione esterna, risponda emettendo fotoni: si trattava della prima osservazione sperimentale diretta dell'emissione stimolata.
Per lungo tempo questa intuizione rimase confinata all'ambito teorico.
Fu solo grazie ai successivi progressi nella fisica atomica e nello studio delle microonde che si arrivò all'effettiva ingegnerizzazione e costruzione del maser, vero e proprio precursore del laser.
Il funzionamento dei laser, e dei loro progenitori maser, sfrutta tre fenomeni fondamentali che avvengono nell'interazione di un'onda elettromagnetica (e.m.) Essi prendono il nome di: fenomeno di assorbimento, emissione spontanea ed emissione stimolata. (fig. 2.1)

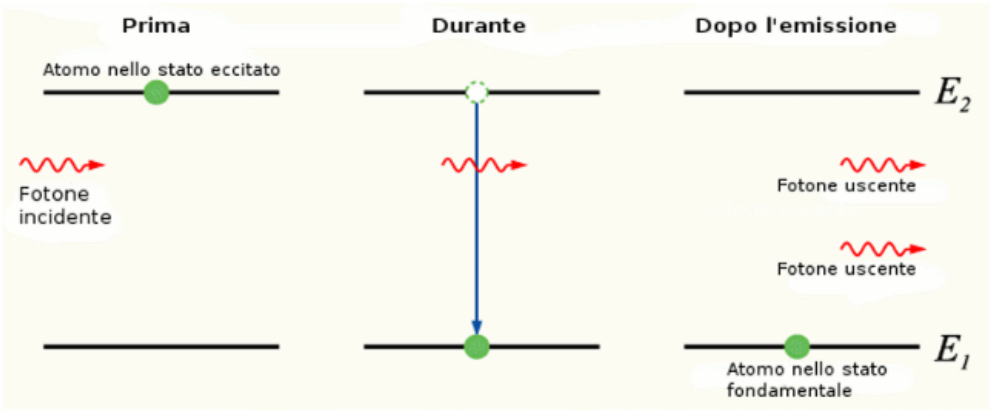

Figura 2.1 Schema grafico dell'emissione stimolata

Questi tre fenomeni furono trattati in maniera esaustiva in un famoso articolo di Einstein del 1916.

La paternità concettuale del dispositivo si deve principalmente alle pubblicazioni di Nikolai Gennadievich Basov e Aleksandr Mikhailovich Prokhorov presso l'Istituto Lebedev di Mosca.
Nei loro contributi, i due fisici illustrarono la proposta originale affiancandola a un rigoroso modello analitico, dimostrando la fattibilità pratica di un oscillatore a microonde basato proprio sul fenomeno dell'emissione stimolata.

2.2 Dal Maser al primo Laser e la nascita delle prime industrie

Parallelamente, nel 1954, Charles H. Townes e il suo gruppo di ricerca alla Columbia University ottennero la prima dimostrazione operativa di un simile generatore, sfruttando un fascio molecolare di ammoniaca come specie emissiva, opportunamente preparato dimostrando quindi il primo maser a microonde, dirigendo molecole di ammoniaca eccitate in una cavità risonante dove oscillavano a 24Ghz.
Seguì un'esplosione di sviluppo dei maser a microonde, ma alcuni fisici iniziarono a pensare di estendere il principio del maser a frequenze più alte.
Egli constatò che a quella specifica frequenza un sistema radar risultava inoperabile, poiché la radiazione veniva assorbita dal vapore acqueo presente nell'atmosfera.
Pur conducendo all'abbandono del progetto originale, tale evidenza non scalfì il suo interesse per la spettroscopia a microonde.
Con onde millimetriche, banda terahertz e infrarossi lontani in gran parte non sviluppati, ciò significava saltare a tre o quattro ordini di grandezza di frequenza rispetto alla gamma ottica.
Townes inizialmente scartò l'idea, ma nell'estate del 1957 cambiò idea e iniziò a indagare le prospettive nel suo tipico modo sistematico. Ha parlato con colleghi della Columbia University e, poco dopo il lancio dello Sputnik del 4 ottobre, si è

seduto con Gordon Gould, allora un 37-year vecchio dottorando che lavorava sotto Polykarp Kusch.

A questo punto Townes aveva essenzialmente formulato un problema fisico: come si poteva costruire un oscillatore ottico per generare luce coerente amplificando l'emissione stimolata? Per la sua tesi, Gould utilizzava la tecnica allora nuova del pompaggio ottico per misurare le proprietà del vapore di tallio. Townes pensava che il pompaggio ottico potesse produrre l'inversione della popolazione necessaria per il suo maser ottico, così chiese a Gould della sua lampada al tallio. Gould, a sua volta, chiese a Townes del suo progetto e, quando Townes glielo raccontò, Gould rispose che si era chiesto la stessa cosa.

Dopo una seconda, conversazione, i due si allontanarono separatamente per cercare di risolvere il problema della fisica.

Entrambi ebbero successo, Gould aveva sempre sognato di essere un inventore e aveva il vantaggio di aver lavorato in precedenza con l'ottica.

Si rifugiò nel suo appartamento con una pila di riferimenti, coniò la parola *laser* per la sua invenzione e abbozzò un progetto per il già familiare risonatore Fabry-Pérot in un quaderno che aveva autenticato il 13 novembre 1957.

Quel quaderno sarebbe diventato la base per una battaglia sui brevetti, che dopo 30 anni alla fine rese Gould multimilionario.

Townes collaborò poi con Arthur Schawlow, un ex collega di Columbia che aveva sposato la sorella di Townes e aveva lavorato sulla spettroscopia ottica. Insieme scrissero una proposta dettagliata per quello che chiamarono un "maser ottico" che *Physical Review* pubblicò nel dicembre 1958.

Il primo maser funzionante rilasciava una potenza di radiazione stimata intorno ai 0,01 μW. La svolta di tali analisi risale al 1964 con il rilascio del Premio Nobel per la Fisica a Townes, Basov e Prokhorov «per gli studi fondamentali nell'ambito dell'elettronica quantistica, che hanno aperto la strada alla realizzazione di oscillatori e amplificatori basati sul principio del maser e del laser». (fig. 2.2)



Figura 2[9]: Charles Townes con il suo Maser (1953)

Figura 2.2

Il primo laser a rubino fu inventato da Mainam il 16 maggio 1960 dove fu provato e testato per la prima volta, ma il resoconto più completo dei suoi esperimenti non è apparso fino al 1961. (fig. 2.3)

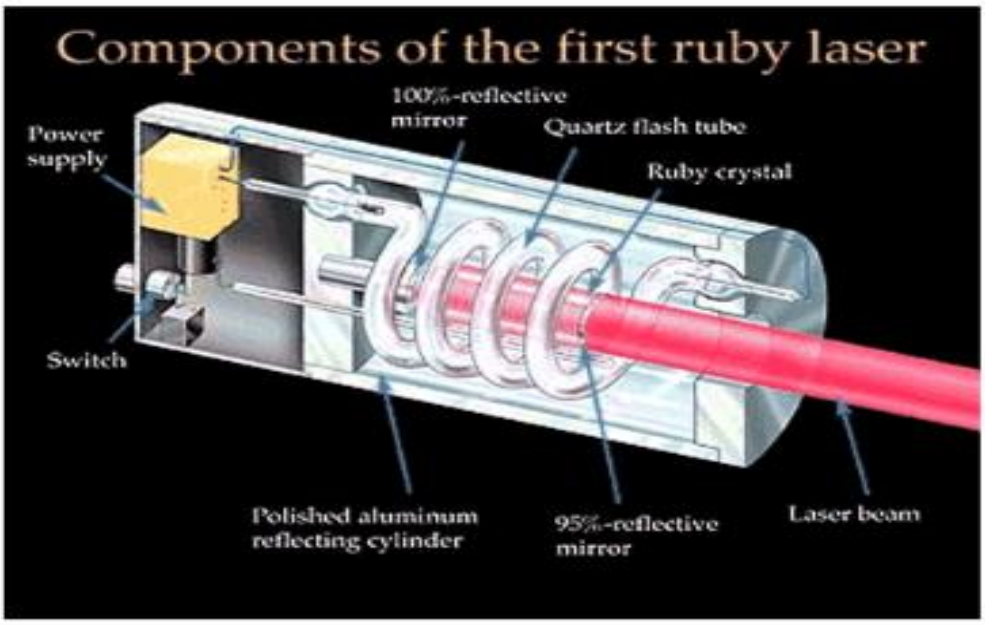

Figura 2.3 Il primo laser della storia costruito da Theodore Maiman.

Per la fisica dei laser, il 1960 viene considerato un annus mirabilis.

In pochi mesi dalla realizzazione del primo dispositivo ad opera di Maiman, il settore registrò un'ampia diversificazione delle soluzioni tecnologiche: dai sistemi

a stato solido impieganti svariati materiali attivi, ai laser a gas attualmente utilizzati nella ricerca fondamentale, sino ai primi modelli a diodo semiconduttore.
Per quanto riguarda quest'ultimo, già nel 1953, John von Neumann abbozzò l'idea di produrre emissioni stimolate nei semiconduttori, ma la sua proposta fu pubblicata quasi 30 anni dopo la sua morte.
Sebbene i laser a diodo rappresentino una svolta importante, tutti i primi dispostivi erano a omogiunzione ad area ampia, che funzionavano solo quando raffreddati a temperatura di azoto liquido e spinti sopra la soglia da potenti impulsi di corrente.
Le aziende più e meno moderne hanno fatto ingresso nel mercato dei dispositivi laser tramite vendita degli stessi o ricerche.
Tra le più note ricordiamo Hughes Aircraft, American Optical, TRG (ufficialmente Technical Research Group), AT&T (tramite Bell Labs) e Raytheon. In qualità di monopolio telefonico regolamentato, AT&T era obbligata tramite accordi legali a concedere in licenza i propri brevetti limitando così il suo ruolo nell'industria laser.
La nuova tecnologia ha anche dato il via a un'ondata di piccole aziende.
Maiman fu uno dei primi, inizialmente fondando un gruppo laser presso una società di breve durata chiamata Quantatron a Santa Monica, California, per poi portare il suo gruppo laser a formare il nucleo della Korad Inc., con finanziamenti di Union Carbide.
Il laser non era un dispositivo inventato per soddisfare specifiche esigenze applicative, come il telefono.
Più che un'invenzione fu una scoperta, un metodo per generare luce coerente che ci si aspettava trovasse utilizzo in ricerca e comunicazioni.
Con la nascita di nuovi laser e applicazioni quest'ultimo attirò l'attenzione del pubblico che lo accolse in un periodo di grande sviluppo tecnologico, particolare successo ebbe negli Stati Uniti.

2.3 L’espansione tecnologica e la nascita di nuovi tipi di laser

Sempre nel 1960 ci fu un altro importante traguardo nello sviluppo del laser: il primo laser a gas operante in regime continuo.
Questo avvenne nel 1959 grazie ad Ali Javan della Bell che pensò di utilizzare come mezzo attivo un gas invece di un cristallo: leggendo una pubblicazione di John Sanders, un collega dell’università di Oxford.
La formalizzazione scientifica del primo laser a gas approdò sulle pagine di Physical Review Letters il 30 dicembre 1960. Poco dopo, il 31 gennaio 1961, il dispositivo venne presentato ufficialmente come laser ad elio-neon (He-Ne), nome scelto riferendosi agli elementi chimici che componevano la sua miscela attiva (Fig. 2.4).

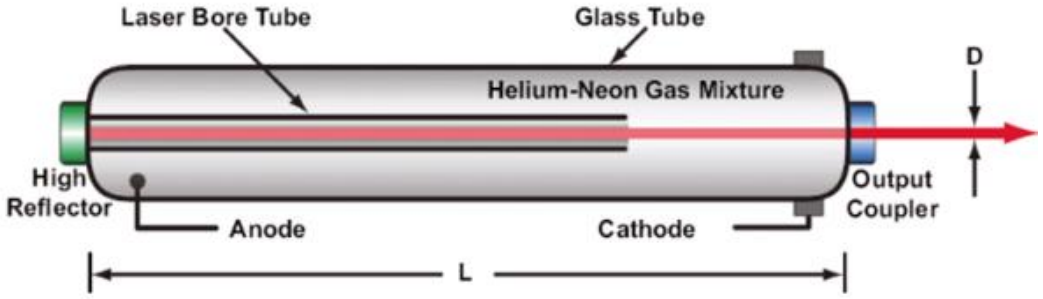

Figura 2.4 Setup sperimentale del primo laser a gas.

Successivamente a metà degli anni '60 nacquero anche i laser chimici che operavano sulle transizioni IR delle molecole prodotte da reazioni chimiche.
Dopo aver scoperto che alcuni prodotti di reazione molecolare emettevano luce infrarossa, il chimico dell'Università di Toronto John Polanyi propose che quell'effetto potesse essere usato in un laser. G. V. C. Kasper e George C. Pimentel a Berkeley dimostrò il primo laser chimico nel 1965, usando una lampada torcia per

innescare una reazione chimica tra idrogeno e cloro, produsse molecole eccitate di cloruro di idrogeno che si spargevano su 3.7μm.

Un'altra invenzione sempre a metà degli anni '60 fu il laser a colorante organico, in cui il mezzo attivo è una soluzione contenente un colorante che fuoresce nel visibile o nell'infrarossi vicino.

Peter Sorokin si è interessato ai coloranti dopo aver osservato la fluorescenza durante i test per i laser a rubino Q-switching. Lui e John Lankard posizionarono una cella di colorante in una cavità laser, la illuminarono con un laser a rubino e produssero un raggio laser che bruciò la loro pellicola fotografica. Fritz P. Schaefer presso il Max Planck Institute realizzò in modo indipendente un laser simile a colorante pompato a rubino poco dopo. Seguì il pompaggio della torcia.

Il funzionamento dei primi laser di colorante si basava sull'emissione di una lunghezza d'onda fissa al picco della curva di guadagno del colorante.

Era l'ano 1967 quando Bernard Soffer e B. B. McFarland di Korad sostituirono lo specchio a cavità posteriore con un laser a colorante dotato di griglia di diffrazione rotanti per selezionare una lunghezza d'onda all'interno della curva di guadagno da oscillare nella cavità laser.

I laser a coloranti furono i primi ampiamente sintonizzabili e portatori di progressi nella spettroscopia laser.

I laser a stato solido si sono evoluti in diversi modi, la scelta della fonte della pompa e della disposizione del pompaggio erano di importanza critica, come dimostrava il successo di Maiman con la lampada torcia.

Anche i requisiti applicativi erano importanti, come il funzionamento a pulsi rispetto a onde continue, la necessità di determinate lunghezze d'onda e la dissipazione del calore.

Nei primi giorni dei laser, le scelte erano limitate.

La lampada a spirale usata da Maiman fu sostituita per la maggior parte degli usi da una o talvolta due lampade a pompa lineari montate parallele alla barra laser in una cavità ellittica, ma le lampade erano le fonti di pompa più luminose e migliori disponibili grazie alla loro elevata potenza di picco.

Lampade ad arco intense potevano alimentare l'emissione a onde continue, ma ospiti cristallini come YAG erano necessari per dissipare il calore di scarto depositato nel materiale laser, e risultavano poco pratici con alcuni ioni laser.
Il pompaggio laser dimostrava l'azione in materiali con stretti tubi di pompaggio ma l'applicazione pratica era limitata dal basso rendimento dei laser a pompa.
I laser a diodo garantivano maggiore efficienza interna, nel 1963 Roger Newman analizzò la possibilità di pompaggio diodo-laser notando che gli ioni neodimio nei solidi assorbivano ampiamente l'emissione laser a diodo GaAs vicino 800nm.
Diciamo che a quei tempi, i laser, Nd-YAG e vetro Nd-erano i migliori a stato solido disponibili dopo un decennio di sviluppo.
L'uscita diretta a lunghezze d'onda inferiori al rubino era sfuggente, ma il neodimio poteva essere raddoppiato in frequenza nel verde.
Un'altra invenzione che avvenne negli anni 70' fu il laser a elettrone libero.
Nel 1971, John M. J. Madey propose di estrarre energia da un fascio di elettroni ad alta energia piegandone i percorsi avanti e indietro mentre passavano attraverso una serie di magneti con polarità alternata.
In linea di principio, un laser a elettroni liberi potrebbe generare un potente fascio laser, e l'uso di un anello di accumulo potrebbe migliorare l'efficienza riciclando ripetutamente gli elettroni attraverso il wiggler. (fig.2.5)



Figura 2.5. John M. J. Madey (a sinistra) e Luis Elias (a destra) lavorano a un primo esperimento con laser a elettroni liberi a Stanford.

Inoltre, la lunghezza d'onda dipende dall'energia degli elettroni e dalla spaziatura del magnete, quindi è possibile la sintonizzazione, e il principio può essere

applicato dalle microonde ai raggi X, anche se in pratica la portata di un singolo laser a elettroni liberi è limitata.
Tuttavia, queste attrazioni erano compensate dalla necessità di un potente acceleratore di elettroni, e i progressi furono lenti.

2.4 Il laser nella società moderna

Dopo il susseguirsi di innumerevoli invenzioni in questo campo gli anni '80 videro i laser emergere molto più all'occhio del pubblico, sia come parti integranti dell'economia dei consumi, sia come potenziale difesa contro attacchi nucleari.
Lo sviluppo di prodotti laser prodotti in massa iniziò all'inizio degli anni '70 utilizzando laser al neon a elio rosso.
Il primo a raggiungere il mercato fu lo scanner laser per supermercati, che iniziò la sua prima sperimentazione sul campo in un supermercato Marsh a Troy, Ohio, nel 1974.
L'adozione fu inizialmente lenta e i sistemi dovettero essere progettati per tenere il fascio di scansione lontano dai clienti, così che le casse non richiedessero etichette di sicurezza, ma all'inizio degli anni '80 gli scanner dei supermercati divennero comuni.
I successivi grandi prodotti furono i dischi ottici. MCA e Phillips hanno trascorso anni a sviluppare il lettore video disk Laser Vision, che utilizzava laser elio-neon per riprodurre 60min di video per lato da 30-cm dischi.
Al termine di questo breve excursus sulla storia del laser, possiamo dire che questo strumento è diventato parte integrante della nostra società tecnologica.
I laser sono al cuore stesso di Internet, inviando segnali attraverso le fibre ottiche che costituiscono la spina dorsale della rete globale di telecomunicazioni.
Nel 1988 iniziò l’utilizzo del cavo sottomarino TAT-8, il primo in fibra ottica ad attraversare l’Oceano Atlantico e a segnare una svolta nelle comunicazioni globali.

Successivamente i cavi vennero sempre più potenziati tanto che quando il TAT-8 subì un guasto nel 2002 venne ritirato data l'inutilità della sua riparazione.
É grazie a tale rete globale se oggi è possibile girare il mondo su internet.
La visionaria ricerca di Charles Kao nello sviluppo delle comunicazioni in fibra ottica gli è valso il Premio Nobel per la Fisica nel 2009, ma quel premio è anche un tributo al successo della comunità laser nell'aiutare a sviluppare una tecnologia che rende il mondo accessibile alla maggior parte delle sue persone.

Capitolo 3

Le sorgenti laser e i sistemi di supporto per la sicurezza

3.1 Generazione di un fascio laser

Una sorgente laser si configura come un apparato in grado di emettere un fascio di radiazione elettromagnetica, i meccanismi elementari su cui si basa la generazione di un fascio laser sono 3: emissione stimolata, inversione di popolazione e risonanza ottica.

3.1.1 Emissione spontanea e assorbimento

Il fenomeno dell'assorbimento avviene quando l'interazione fotone e atomo genera un trasferimento energetico verso quest'ultimo.
Per la riuscita della transizione, l'energia ceduta deve coincidere perfettamente con il divario tra due livelli quantizzati ammessi dal sistema.
In tale contesto, l'emissione spontanea agisce come un naturale bilanciamento: nel momento in cui un atomo abbandona uno stato eccitato E_1 per ripiegare su un livello di energia inferiore E_0, la quantità energetica in eccesso viene liberata sotto forma di fotone, la cui frequenza risulta direttamente proporzionale all'ampiezza del salto energetico.
Estendendo questo comportamento a un mezzo materiale ad alta densità atomica, i fenomeni di assorbimento e di emissione spontanea finiscono per sovrapporsi, svolgendosi in un ciclo continuo e simultaneo. (fig. 3.1.1 e fig. 3.1.2)

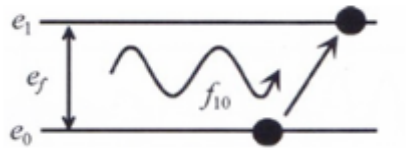

Figura 3.1.1. Assorbimento

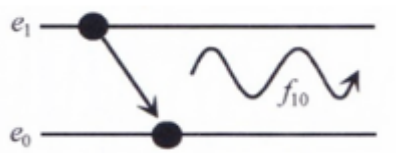

Figura 3.1.2 Emissione spontanea

3.1.2 Emissione stimolata e inversione di popolazione

A questi due fenomeni va affiancato quello dell'emissione stimolata.
Esso avviene quando un atomo si trova già allo stato energetico e1 e che questo atomo viene raggiunto da un fotone di frequenza f10.
In questo caso non si ha assorbimento, ma interviene un fenomeno particolare denominato emissione stimolata: l'atomo decade dal livello e1 al livello e0 rilasciando due fotoni, entrambi di energia e f10.
Non vi è nulla di particolarmente sorprendente in questo aspetto dell'emissione stimolata: l'atomo al livello eccitato sarebbe comunque decaduto prima o poi al livello inferiore rilasciando un fotone.
La particolarità del fenomeno dell'emissione stimolata risiede nel fatto che i due fotoni emessi possiedono, oltre alla stessa frequenza f10, anche la stessa direzione e la stessa fase che, tra l'altro, sono uguali a quelle del fotone incidente. (fig. 3.2)

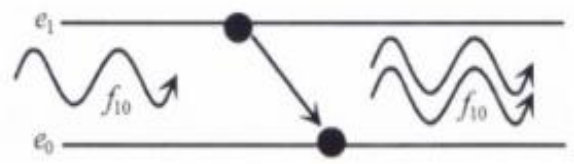

Figura 3.2 Emissione stimolata

Successivamente farà parte della composizione della sorgente laser la cosiddetta inversione di popolazione e quando ci troviamo in questa situazione il mezzo è detto attivo. (fig.3.3)

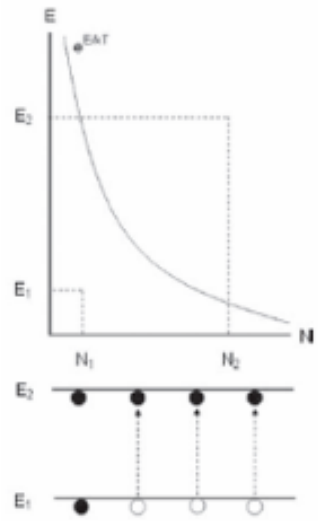

Figura 3.3 Inversione di popolazione

3.2 Il pompaggio

Trovati in questa situazione (nella fase di inversione di popolazione) per fare avvenire ciò, è importante sfruttare il fenomeno del pompaggio.
Affinché il processo risulti efficace, l'atomo promosso al livello energetico E_1 deve stazionare in tale stato per un intervallo di tempo sufficientemente prolungato. Un decadimento prematuro innescherebbe infatti prevalentemente l'emissione spontanea, la quale non contribuisce alla formazione del fascio coerente.
Per questo motivo, il mezzo attivo impiegato deve presentare la caratteristica della metà stabilità: i suoi livelli superiori devono cioè garantire un tempo di vita medio adeguato a far sì che l'emissione stimolata prevalga sui decadimenti spontanei.
La schematizzazione di Fig. 3.4 illustra la dinamica attraverso cui l'energia fornita dal sistema di pompaggio viene trasformata in radiazione elettromagnetica.

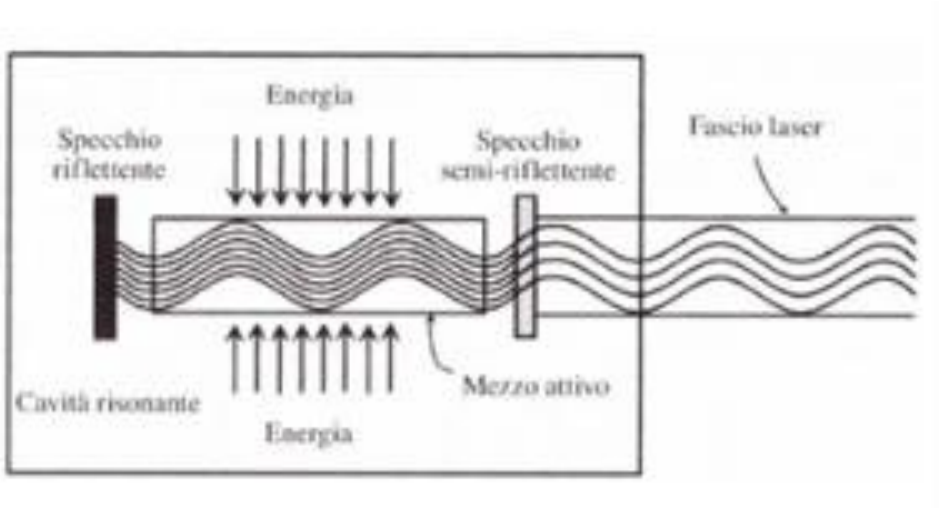

Figura 3.4 Architettura di una sorgente laser

3.2.1 La risonanza ottica

L'energia immessa nel sistema, interagendo con un mezzo attivo, che può trovarsi allo stato solido, gassoso o liquido, determina la generazione del fascio laser.
La configurazione degli specchi della cavità ottica incide in modo determinante sulla qualità della radiazione emessa; tali elementi presentano di norma la propria concavità orientata verso il mezzo attivo, condizionando direttamente anche la struttura e la distribuzione dei modi elettromagnetici trasversali e il profilo di densità dipendono dagli specchi.
Gli specchi stessi riflettendo fotoni contribuiscono all'amplificazione del fascio stesso, rendendolo più intenso.
Questo fenomeno si chiama risonanza ottica.
Quando viene attivato il sistema di pompaggio energetico, inizia nel mezzo l'inversione di popolazione.

Contemporaneamente in diversi punti del mezzo attivo avverrà un'emissione spontanea che viene seguita in brevissimo tempo da diverse emissioni stimolate diffuse e dirette in maniera casuale nello spazio.
Il flusso di fotoni che procede in direzione normale agli specchi viene riflesso e reinviato nel mezzo attivo, dove subisce un'ulteriore amplificazione.
In brevissimo tempo (il tempo necessario alla radiazione elettromagnetica per compiere alcuni viaggi tra gli specchi della cavità) si ottiene un flusso di fotoni di notevole intensità che viaggia tra gli specchi, mentre tutte le emissioni in direzioni differenti da quella normale agli specchi vengono smorzate e annullate.
A causa della natura ondulatoria della radiazione elettromagnetica, l'amplificazione è esaltata quando la distanza tra gli specchi è pari a un multiplo intero della lunghezza d'onda del fascio, così come accade in altre forme di risonanza.
Prima di partire a descrivere i vari tipi di sorgenti usati industriali bisogna chiarire che il mezzo attivo all'interno della cavità ottica può trovarsi allo stato solido, liquido e gassoso.
Però l'interesse industriale è legato alle sorgenti allo stato solido e gassoso (in quanto sono applicate molto nel settore manifatturiero taglio, marcatura, saldatura...) offrendo maggior efficienza e stabilità nel tempo.
Mentre i laser allo stato liquido trovano maggiori applicazioni in altri ambiti, tipo quello medicale.

3.3 Tipologie di sorgenti laser

Le sorgenti laser si distinguono in varie categorie in base allo stato aggregativo e dalle proprietà del mezzo attivo per la generazione del fascio luminoso.

3.3.1 Mezzo attivo allo stato gassoso

Uno dei mezzi attivi allo stato aeriforme più utilizzato nelle applicazioni industriali nell'ambito meccanico è quello alla CO_2.
Ad oggi grazie alla continua evoluzione in questo settore questo mezzo attivo è diventato poco utilizzato, quasi obsoleto ma è comunque importante descriverne brevemente il funzionamento.
Le potenze erogabili da queste sorgenti variano da pochi watt fino a circa 40 kW. Anche se è possibile almeno teoricamente raggiungere valori più elevati, le criticità legate alla dissipazione termica fungono da limite e divieto di superare tali soglie. Il mezzo attivo è composto prevalentemente da biossido di carbonio (CO_2), combinato con azoto (N_2) ed elio (He) (Fig. 3.5).

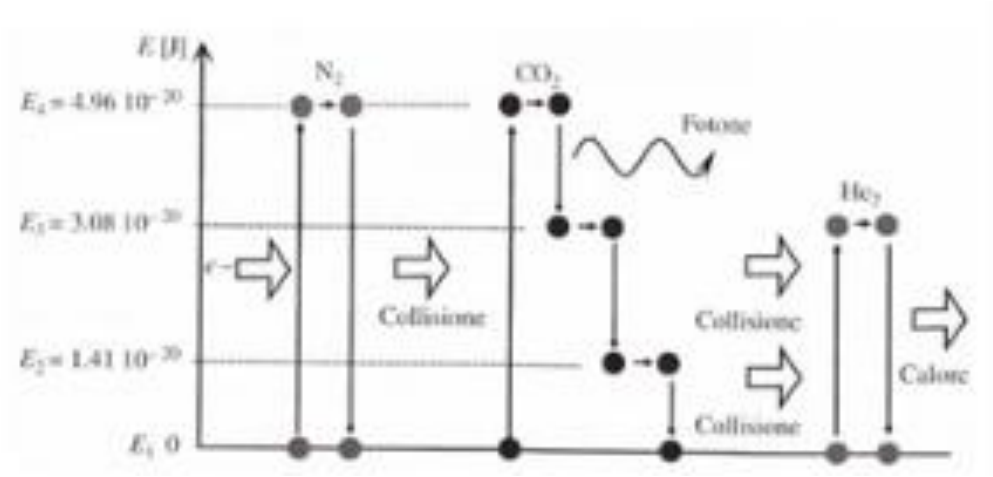

Figura 3.5 Schema di una sorgente CO_2

Una sorgente a CO_2 è costituita solitamente da un tubo in vetro contenente la miscela gassosa e due elettrodi, e la scarica fornisce il passaggio di carica indispensabile per ottenere l'inversione di popolazione.
A seconda dell'architettura costruttiva, si distinguono quattro principali tipologie di sorgenti per laser a CO_2:

- **Sorgenti sigillate (sealed):** contraddistinte da dimensioni particolarmente contenute e compatte. La miscela gassosa viene introdotta e sigillata in fase di fabbricazione, garantendo un'operatività tipica di circa 10.000 ore prima di richiedere la sostituzione o il ricambio del gas.
- **Sorgenti a flusso assiale**: impiegate per estrarre livelli di potenza superiori rispetto alle versioni sigillate.
- **Sorgenti slab**: dotate di una cavità a forma di parallelepipedo e di elettrodi costituiti da lamine in rame. Questa scelta costruttiva permette un efficace raffreddamento del mezzo attivo per scambio termico convettivo sulle superfici metalliche.
- **Sorgenti a flusso trasversale**: caratterizzate dall'impiego di una turbina che muove la miscela gassosa e da un involucro esterno a sezione circolare. Sebbene consentano di raggiungere potenze nell'ordine dei 10 kW, la qualità del fascio risultante si discosta in modo significativo dal profilo gaussiano ideale.

3.3.2 Mezzo attivo allo stato solido

Il secondo tipo di mezzo attivo è chiamato laser Nd: Yag ed è una sorgente allo stato solido anch'essa come quella a CO_2 è diventata praticamente obsoleta.
Essa è costituita da un misto di materiali tra granato di ittrio e alluminio ed è la più usata e diffusa nelle applicazioni industriali.
La struttura cristallina dello YAG è a struttura cubica, inoltre questi cristalli sono stabiliti dalle basse temperature fino alla temperatura di fusione.
Inoltre, si riesce anche a lavorare facilmente.
Tale sorgente è molto diffusa nelle applicazioni industriali, perché può lavorare in modalità continua ed impulsiva ed inoltre può raggiungere potenze dell'ordine di 6 kW.

3.3.3 Il diodo laser

Il terzo tipo di sorgente laser che descriverò in questa tesi è il diodo laser.
Il fascio da un diodo può essere prodotto sfruttando l'unione di due semiconduttori "drogati".
Con tale espressione si definisce l'inserimento di ioni appartenenti a un elemento differente rispetto a quelli che costituiscono il reticolo cristallino del semiconduttore.
Questa integrazione altera la configurazione del materiale di base, promuovendo il passaggio e la mobilità degli elettroni al suo interno.
In generale questo tipo di sorgente ha efficienze quantiche prossime all'unità in quanto il pompaggio avviene in modo diretto e l'efficienza globale si attesta a valori del 30%.
Sul mercato, l'offerta di diodi laser tende a gravitare principalmente attorno a due bande d'onda di lavoro: la prima compresa tra 790 e 860 nm, la seconda posizionata nell'intervallo 940–980 nm.
In base al profilo di potenza e alla qualità del fascio richiesti dalle differenti lavorazioni industriali, i chip a semiconduttore vengono integrati in diverse configurazioni architetturali:

- **Emettitore singolo**: rappresenta il modulo fondamentale ed è basato su un'unica giunzione p-n. Sviluppa potenze nell'ordine dei 2 W in regime continuo (CW) e, per via della geometria della sua zona emissiva, si presta in modo naturale all'accoppiamento diretto con la fibra ottica (Fig. 3.6).
- **Array monodimensionale (barra laser):** progettata per superare i vincoli d'uscita del singolo elemento, questa struttura raccoglie una serie di emettitori allineati su un'unica barra monolitica (solitamente della lunghezza standard di 1 cm). Il blocco è fissato su un supporto sottostante che svolge sia una funzione di ancoraggio meccanico sia di smaltimento del carico termico (Fig. 3.7).

- **Array bidimensionale (stacked array):** costituisce l'evoluzione a matrice della versione monodimensionale. La struttura si realizza impilando più barre in senso verticale o affiancandole in orizzontale, consentendo la somma spaziale dei singoli fasci e permettendo così al sistema di erogare potenze complessive particolarmente elevate.
- **Superficie emettitrice:** Il metodo dell'imballaggio di più barre contenenti diodi, ha un processo tecnologico complesso che aumenta i costi di produzione.

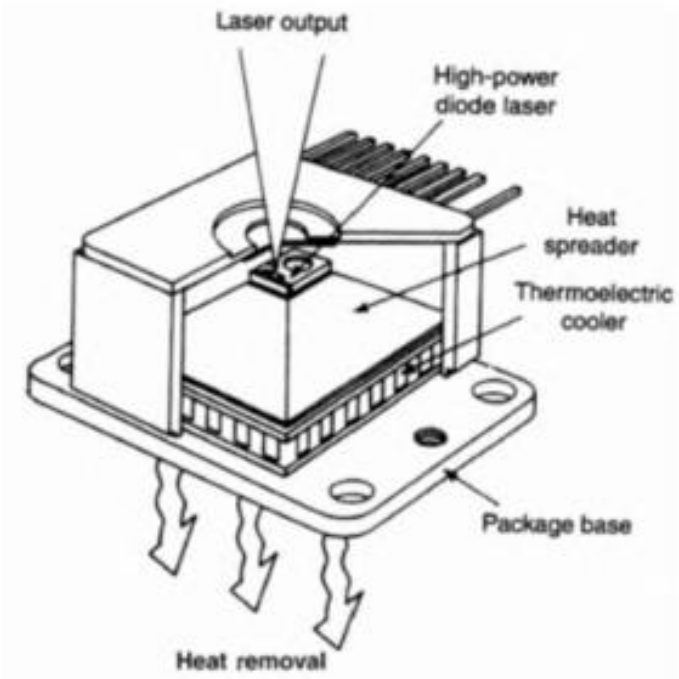

Figura 3.6 Emettitore singolo

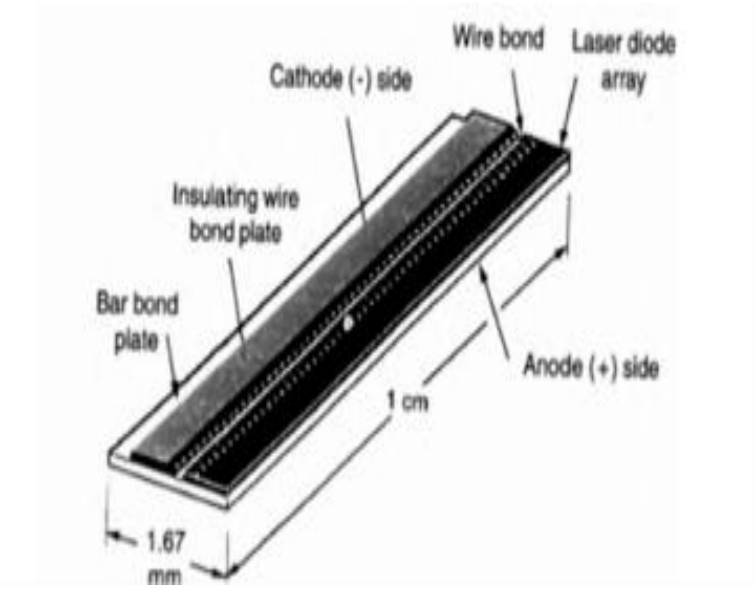

Figura 3.7 Serie monodimensionale di diodi

3.3.4 Sorgenti laser in vetro in fibra e a disco

Infine, ci sono altri due tipi di sorgenti laser quella Yb (sorgente in vetro in fibra) e la Yb:Yag a disco.

La prima sorgente è stata messa a punto recentemente e la sua particolare caratteristica, è un'architettura maggiormente innovativa rispetto a prima.

Analogamente alle sorgenti Nd:YAG, nelle sorgenti Yb:vetro vi è un elemento attivo (l'itterbio -Yb) che viene ospitato in un solido (il vetro).

La lunghezza d'onda di emissione dell'itterbio è del tutto simile a quella del neodimio (A = 1.08 μm), ma l'itterbio può essere ospitato nel vetro in percentuale decisamente maggiore rispetto al neodimio.

Nelle sorgenti in fibra il mezzo attivo è il "core" di una normale fibra ottica che viene drogato con ioni itterbio (Yb), mentre il rivestimento più esterno è analogo a quello di una normale fibra di vetro.

La fibra di Yb:vetro così ottenuta (che ha quindi geometria filiforme) viene "pompata" tramite la radiazione emessa da una serie di diodi che, in particolare,

viene inviata nel rivestimento esterno della fibra che avvolge il "core": in questo modo la radiazione "di pompa" attraversa più volte il mezzo attivo, stimolando l'emissione di un fascio di elevata. (fig. 3.8)

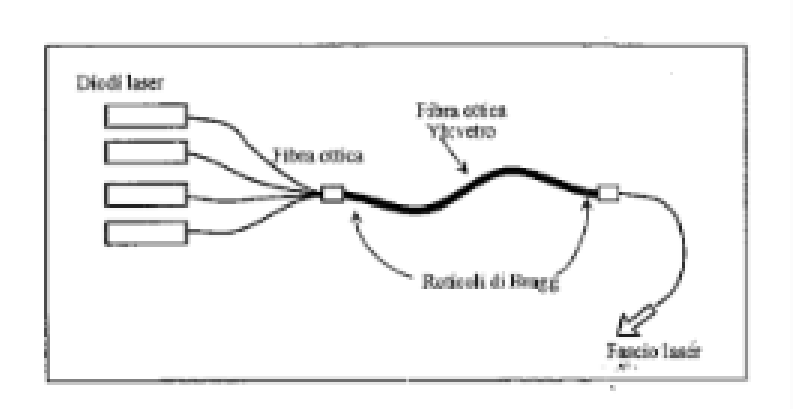

Figura 3.8 Schema di una sorgente Yb:vetro in fibra

Mentre la seconda sorgente è costituita da un elemento attivo (l'itterbio -Yb) inserito all'interno di un disco di YAG.

La lunghezza d'onda di emissione è quindi analoga ai laser in fibra, e anche in queste sorgenti il pompaggio avviene attraverso dei diodi laser.

La conformazione a disco, rispetto a quella classica a barretta, consente un migliore scambio termico e quindi un migliore raffreddamento dell'elemento attivo.

In particolare, una delle due facce piane del disco è in contatto diretto con un elemento raffreddante, fatto che, tra l'altro, consente di ridurre anche l'effetto di lente termica.

Attualmente queste sorgenti non sono disponibili sul mercato, ma la loro commercializzazione è prevista in tempi relativamente brevi.

Si può dunque concludere che lo studio delle sorgenti laser non rappresenta un passaggio meramente descrittivo, ma il fondamento tecnico per comprendere sia le prestazioni della lavorazione sia i vincoli che essa impone all'impianto.

A ogni incremento di densità di potenza, precisione e complessità del sistema corrisponde infatti una maggiore esigenza di controllo delle condizioni operative:

schermature, interblocchi, aspirazione dei fumi e dei particolari, dispositivi di protezione individuale, procedure di allineamento e classificazione del rischio diventano parte integrante del processo.
Il capitolo, quindi, prosegue con la descrizione delle normative di riferimento che regolano l'impiego delle lavorazioni laser.

3.4 Quadro normativo e riferimenti legislativi

Le disposizioni di sicurezza e le procedure di controllo da osservare durante l'impiego e la taratura dei dispositivi laser sono disciplinate dal quadro normativo sulla prevenzione degli infortuni sul lavoro, le cui basi storiche si rifanno al D.P.R. n. 547 del 1955; norme per la prevenzione degli infortuni sul lavoro DPR del 1956 n. 303; norme generali per l'igiene del lavoro. D.P.R. del 1996 n. 459; regolamento per l'attuazione delle Direttive 89/392/CEE; regolamentazione tecnica sulla sicurezza delle macchine.

3.4.1 Norme tecniche per la sicurezza

Il quadro tecnico di riferimento per la gestione in sicurezza dei sistemi laser si fonda primariamente sulla norma CEI-EN 60825-1 (unitamente al documento 1381G), che fissa le direttive operative generali per l'esercizio degli impianti. Per le attività di sperimentazione, un riferimento specifico è invece rappresentato dalla guida CEI 76 (fascicolo 3850R del 1998), concepita per l'impiego degli apparati all'interno dei laboratori di ricerca.
L'impianto regolatorio ha successivamente trovato un organico aggiornamento con l'introduzione della quarta edizione della CEI EN 60825-1 (fascicolo CEI 6822, risalente al febbraio 2003), testo centrale che disciplina la classificazione formale delle apparecchiature e stabilisce i requisiti di tutela legati a ciascuna categoria.

3.5 Classificazione delle sorgenti laser e prescrizioni operative

Da qui per iniziare precisamente a introdurre i pericoli del laser, i rischi e quindi di conseguenza i sistemi di messa in sicurezza dovremmo suddividere la sorgente laser in varie classi.

3.5.1 Classi di pericolosità dei dispositivi laser e relative prescrizioni di sicurezza

Classe 1 (Laser esenti): Questi dispositivi sono considerati totalmente privi di rischi. I livelli di radiazione emessa, infatti, si mantengono costantemente al di sotto dei limiti previsti dalla Massima Esposizione Permessa (MPE).
Prescrizioni consigliate: Per l'uso di questi apparecchi non è richiesta l'adozione di alcuna misura di sicurezza aggiuntiva in quanto tendono a essere relativamente innocui.
Classe 2 (Laser a bassa potenza in onda continua nel visibile): Questi sistemi operano a potenze molto ridotte, causando danni solamente qualora l'esposizione diretta si prolunghi per oltre 0,25 secondi, anche se potrebbero emettere radiazioni potenzialmente nocive.
Prescrizioni consigliate: È assolutamente vietato puntare il raggio verso gli occhi di chiunque.
Classe 3A: Questa tipologia di laser diventa pericolosa nel caso in cui il raggio raggiunga un occhio sprovvisto di protezioni. Questo può avvenire sia in forma diretta che in seguito al rimbalzo su superfici riflettenti (come orologi o anelli).
Prescrizioni aggiuntive: Oltre a rispettare le indicazioni valide per la Classe 2, è necessario:

1. Escludere l'impiego di teodoliti o altri strumenti ottici.

2. Eseguire le procedure di allineamento affidandosi esclusivamente a metodologie elettroniche o meccaniche.
3. Posizionare la traiettoria del raggio a un'altezza nettamente superiore o inferiore rispetto al livello degli occhi degli operatori.

Classe 3B (Laser a media potenza): Comprende i laser con potenza media variabile tra 5 mW e 500 mW. Costituiscono una seria minaccia per la vista (se non si usano appositi DPI) e possono causare lesioni cutanee. Anche l'esposizione ai riflessi diffusi rappresenta una fonte di rischio.

Prescrizioni aggiuntive:

1. L'impiego è consentito solo in ambienti dove l'accesso è strettamente supervisionato e non è possibile stazionare lungo la linea del fascio.
2. È obbligatorio indossare occhiali protettivi e scongiurare la formazione di riflessi speculari.
3. Il personale deve essere sottoposto a sorveglianza sanitaria periodica per monitorare l'eventuale insorgenza di danni oculari.
4. I pannelli o le coperture che vengono rimosse durante la manutenzione e devono essere dotati di interblocchi di sicurezza, in modo da impedire l'accensione e l'esposizione accidentale alla radiazione a macchina aperta.

Classe 4 (Laser ad alta potenza): Rappresentano i sistemi a più alto livello di rischio. Provocano lesioni gravi agli occhi e alla pelle anche solo tramite la radiazione diffusa. Inoltre, fungono da potenziale innesco per incendi, possono generare fumi o materiali tossici e operano con tensioni e amperaggi elettrici estremamente pericolosi.

Prescrizioni aggiuntive:

1. È obbligatorio cercare di scongiurare qualsiasi danno oculare e cutaneo derivante sia dal fascio principale che dalle sue riflessioni (speculari o diffuse), questo tramite un progetto che controlli l’intero percorso del fascio laser.

3.6 Fonti di pericolo e rischi collaterali

Per capire quali sistemi di sicurezza attuare in laboratorio oltre al tipo di sorgente dobbiamo essere a conoscenza delle probabili fonti di pericolo per evitare danneggiamenti dell'operatore.

3.6.1 Fonti primarie di pericolo

Le principali fonti possono essere:

- **Radiazione laser**: È una fonte di pericolo unica nel suo genere.
  Gli organi più esposti a questo tipo di danno sono ovviamente quelli esterni, cioè gli occhi e la pelle, che possono subire un danno più o meno rilevante e che, nei casi peggiori, è di tipo permanente.
  Inoltre, per le lavorazioni industriali, a causa delle elevate potenze in gioco, vi è pericolo non solo per la radiazione diretta ma anche per quella riflessa (ad esempio dal pezzo in lavorazione).
- **Fumi e particolato**: Durante alcune lavorazioni laser (principalmente taglio e saldatura per profonda penetrazione) il materiale vaporizza, disperdendosi nell'atmosfera circostante.
  I fumi generati, oltre a essere asfissianti (riducono la percentuale di ossigeno nell'aria), possono essere più o meno tossici per l'uomo.
  Inoltre, durante la lavorazione vengono generate delle particelle di piccolo diametro (o particolato) che, se respirate, possono depositarsi nei polmoni e generare vari tipi di patologie.
- **Organi in movimento**: I sistemi di lavorazione laser sono di fatto delle macchine utensili in cui, per far avvenire la lavorazione, vengono messi in movimento alcuni elementi.

Questo tipo di pericolo è quindi analogo a quello che si trova in un tradizionale ambiente di produzione meccanica, amplificato però dal fatto che spesso le velocità e le accelerazioni in gioco nelle lavorazioni laser sono estremamente elevate e non sono comparabili con le velocità di reazione del corpo umano.

- **Circuiti elettrici ad alta tensione**: Per far emettere un fascio laser ad una sorgente è necessario fornire una energia di "pompaggio"; questa energia nelle sorgenti industriali viene fornita attraverso circuiti elettrici, il più delle volte ad elevata tensione.
  Nasce quindi un pericolo di elettrocuzione, anche se tale pericolo è limitato alla fase di manutenzione della sorgente che, generalmente, viene effettuata da personale esperto.
- **Pericoli criogenici**: Il personale a causa dell'utilizzo di gas liquefatti a bassissime temperature (elio, azoto ecc….) rischia gravi ustioni da freddo.
- **Rischio chimico**: Questo rischio è dovuta all'interazione non prevista tra reagenti diversi che può innescare violente esplosioni. Questo avviene tra sostanze importanti per il funzionamento di macchinari specifici che entrano in contatto con altri composti dello stesso ambiente.
- **Riflessione accidentale dei fasci**: Una minaccia frequentemente trascurata è costituita dai piccoli oggetti personali (gioielli, bracciali, orologi) e dalle stesse superfici dei tavoli da lavoro. Questi elementi riflettenti possono agire da specchi, intercettando e deviando il raggio e causando così un'esposizione imprevista per gli operatori.

3.6.2 Rischi collaterali associati

Queste fonti di pericolo possono portare a codesti rischi collaterali:

- **Radiazioni ottiche secondarie**: Durante l'attività non ci si deve proteggere solo dal raggio primario. Il sistema genera emissioni collaterali, tra cui i raggi ultravioletti (UV) sprigionati dalle lampade flash e dai tubi a scarica.

A questi si sommano le radiazioni nello spettro del visibile e dell'infrarosso (IR) prodotte dall'hardware di pompaggio, dai tubi flash e dalla naturale luminescenza sprigionata dal bersaglio quando viene colpito dal laser.

- **Elettricità**: Maggior parte dei laser ad alto voltaggio, banchi di condensatori per laser pulsati.
- **Refrigeranti criogenici**: Ustioni da freddo, esplosione (gas a pressione) incendio, asfissia (condensazione dell'ossigeno atmosferico), intossicazione (CO_2).
- **Eventi esplosivi**: Questo rischio non è legato solo alle reazioni chimiche dei gas presenti in laboratorio, ma si estende all'hardware, in particolar modo nei dispositivi ad alta potenza. Un eventuale sovraccarico o guasto strutturale può infatti far esplodere la batteria dei condensatori o l'impianto di pompaggio ottico.
- **Incendio**: Fasci laser di energia elevata, apparati elettrici.
- **Rumore (inquinamento acustico)**: Condensatori di laser pulsati di potenza molto elevata e interazione fascio-materiale.

3.7 Misure di sicurezza, protezione e prevenzione

Per l'impiego di dispositivi con classe di rischio superiore alla 3A, la normativa prevede l'obbligo di avvalersi della consulenza di un Tecnico esperto in Sicurezza Laser (TSL). Questa figura professionale ha il compito di verificare la piena conformità del laboratorio alle direttive di riferimento (in particolare la Guida CEI 1384 G – CT-76 e la Guida E del CEI) e di stabilire i protocolli di prevenzione necessari.

3.7.1 Misure tecniche di prevenzione e DPI

Queste ultime riguardano solitamente:

- **Protezione sulla sorgente:** Segnali, di avvertimento, schermi protettivi, cartelli di avvertimento connettore di blocco a distanza collocato a <5m dalla zona in cui si svolge l'attività chiave di comando, per un utilizzo dell'apparecchio solo delle persone autorizzate.
- **Sistemi di schermatura del raggio:** Il percorso della radiazione deve essere circoscritto mediante materiali dotati di adeguate proprietà termiche e protettive. E sono necessari dispositivi di blocco automatico capaci di interrompere l'emissione qualora la potenza superi le soglie prefissate.
- **Protezione oculare individuale:** All'interno delle zone a rischio legate all'uso di laser di Classe 3 e 4, è obbligatorio indossare Dispositivi di Protezione Individuale (DPI) specifici per le lunghezze d'onda emesse. La selezione degli occhiali va effettuata conformemente a quanto stabilito dagli standard EN 166, EN 207 ed EN 208. Questi filtri per occhiali possono essere:

1. Filtri in vetro: offrono un livello di schermatura elevato abbinato a un'ottima trasparenza visiva (trasmittanza).
2. Filtri in policarbonato: questo filtro garantisce un'elevata ergonomicità e buone doti di schermatura. In questa categoria rientrano anche gli occhiali destinati alle procedure di allineamento, idonei a gestire radiazioni a bassa potenza.

- **Abbigliamento di sicurezza**: Nel caso che l'irraggiamento cutaneo superi la Massima Esposizione Permessa (EMP), il personale deve indossare indumenti tecnici protettivi. Questo requisito diventa critico in presenza di sistemi di Classe 4, dove il reale rischio di innesco di incendi richiede tessuti ad alta resistenza termica o ignifughi.
- **Addestramento del personale**: Visto il pericolo costituito dalle classi 3 e 4, è importantissimo fornire una formazione specifica a tutto il personale presente nell'area di lavoro. Fondamentale per ridurre i rischi professionali.

- **Sorveglianza sanitaria**: I lavoratori impiegati con apparati di Classe 3 e 4 devono essere sottoposti a controlli medici mirati, ponendo maggior attenzione agli esami oculistici preventivi e periodici.

Capitolo 4

Le lavorazioni laser

4.1 Taglio laser

La prima lavorazione nonché la più utilizzata e diffusa in gran parte delle aziende in Italia e nel mondo è il taglio laser, in grado di ottenere dei bordi di taglio di elevata qualità, garantendo al contempo stesso un'alta produttività e un'eccellente riproducibilità dei risultati.

4.1.1 Principi di funzionamento

Trattandosi a tutti gli effetti di una lavorazione di natura termica, l'asportazione del materiale dipende direttamente dalla quantità di energia trasmessa dalla sorgente laser alla zona d'interazione.
Un fattore determinante per l'efficienza dell'operazione è la minimizzazione dell'ampiezza dell'intaglio (o kerf): un solco di taglio particolarmente stretto permette infatti di penetrare spessori maggiori mantenendo elevate velocità di avanzamento.
Per raggiungere questo risultato si impiegano solitamente fasci laser con uno spot focale molto contenuto e un profilo di intensità di tipo gaussiano, una combinazione che semplifica le operazioni di focalizzazione e assicura elevati valori di irradianza lungo l'asse del raggio.
Sotto l'azione diretta del raggio, il materiale subisce un processo di fusione o di vaporizzazione locale, a seconda delle proprietà fisiche del pezzo e della densità di potenza erogata.

Contemporaneamente, un flusso di gas di assistenza erogato in modo coassiale al fascio provvede a espellere il metallo fuso dalla zona di lavoro. Si viene così a generare un canale di penetrazione verticale definito comunemente keyhole, che attraversa la lamiera per tutto il suo spessore, determinando la separazione meccanica delle parti.

Poiché la quantità di materiale asportato tende a ridursi man mano che la radiazione penetra in profondità, la geometria del solco risulterà leggermente conica, con una larghezza al margine d'ingresso superiore rispetto a quella misurabile sul lato d'uscita.

(fig. 4.1)

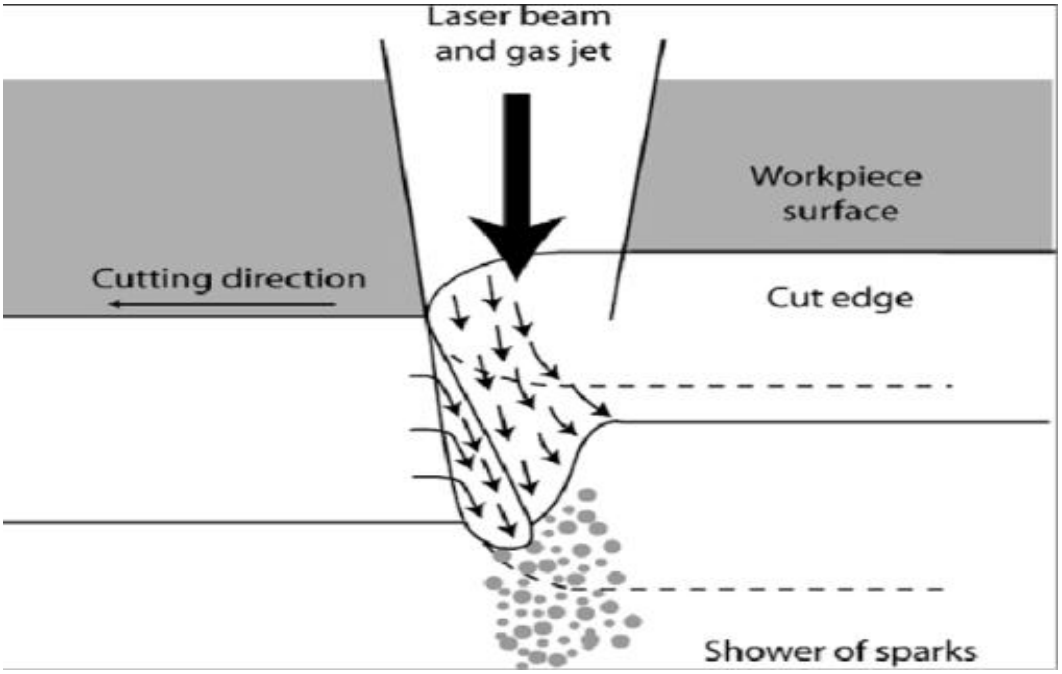

Figura 4.1 Schema del processo per taglio laser

4.1.2 Ambiti applicativi e regimi di funzionamento

Attualmente, la tecnologia di taglio laser trova impiego in vari ambiti nel panorama industriale sia per lavorazioni come la sagomatura di lamiera piana, con spessori che spaziano da poche frazioni di millimetro fino a circa 30 mm e sia per la

lavorazione di componenti tridimensionali dalla geometria articolata, in quanto questa tecnologia rende più semplice l'integrazione in sistemi automatizzati.
La capacità di focalizzare densità energetiche estremamente elevate in spot di dimensioni ridottissime ha permesso di consacrare il laser come "lo" strumento per eccezione nel campo delle microlavorazioni.
Si registra infatti un ricorso sempre più frequente a questo processo per la fabbricazione di dettagli di scala sub-millimetrica mediante operazioni di micro-taglio (laser microcutting) e micro-foratura (laser microdrilling).
Per quanto riguarda le architetture delle sorgenti, nell'ambito del taglio prevalgono gli impianti a CO_2 e quelli a stato solido (in particolare a cristallo Nd:YAG o a fibra Yb:YAG): solo queste famiglie tecnologiche, infatti, garantiscono l'impiego di potenze adeguate unitamente a un diametro del punto focale idoneo alle tolleranze richieste.
L'emissione della radiazione può essere gestita secondo due modalità distinte:

1. Regime continuo (CW): per un apporto di energia ininterrotto nel tempo.
2. Regime impulsato: in cui la sorgente sprigiona picchi di elevata potenza concentrati in frazioni di secondo estremamente brevi.

L'adozione del regime impulsato consente di portare a vaporizzazione pressoché qualunque tipologia di materiale pur lavorando con potenze medie relativamente contenute.
Ciò offre il notevole vantaggio di limitare l'alterazione termica indotta sul pezzo, riducendo al minimo tensioni residue e deformazioni.
Dal punto di vista cinematico, in questa modalità il solco di taglio viene generato attraverso la parziale sovrapposizione di una sequenza continua di singoli micro-fori prodotti da ogni singolo impulso.

4.1.3 Meccanismi di taglio laser

L'operazione di taglio mediante fascio laser può svilupparsi attraverso differenti meccanismi fisico-chimici:

- **Taglio per vaporizzazione**: In questo processo, il materiale esposto al raggio passa istantaneamente dallo stato solido a quello aeriforme, riducendo al minimo la fase di fusione liquida. Questa dinamica limita drasticamente la formazione di bava e garantisce solchi di elevata qualità geometrica. Poiché la transizione di fase diretta richiede densità di potenza eccezionalmente elevate (pari a circa 10^6 \text{ W/cm}^2 per i materiali ferrosi), si impiegano principalmente sorgenti ad alte prestazioni (come i laser Nd:YAG) gestite in regime impulsato.
- **Taglio per degradazione chimica**: Sfrutta l'innalzamento termico localizzato indotto dalla radiazione per spezzare le catene molecolari del substrato. È il meccanismo principale attraverso cui si lavorano polimeri, materiali organici e determinati compositi.
- **Taglio reattivo (od ossi-taglio laser):** Il fascio riscalda il metallo fino alla temperatura di innesco, punto in cui un getto di ossigeno avvia una reazione di ossidazione fortemente esotermica. L'energia termica rilasciata dalla combustione del metallo si somma a quella del raggio, incrementando in modo significativo la velocità di avanzamento. Di contro, il bordo di taglio presenta uno strato d'ossido marcato che spesso richiede trattamenti secondari di pulizia, come la spazzolatura meccanica o il decapaggio chimico.
- **Taglio per fusione con gas inerte**: La radiazione laser fonde localmente la matrice metallica, mentre un flusso di gas inerte erogato ad alta pressione (tipicamente azoto, elio o argon) spinge il bagno fuso fuori dall'intaglio. L'azoto rappresenta il fluido di assistenza più comune per evitare l'ossidazione dei bordi, sebbene la sua presenza ad elevate temperature possa talvolta favorire la formazione di nitruri o fasi microstrutturali che alterano parzialmente le proprietà meccaniche della zona termicamente alterata.

4.1.4 Principali vantaggi e svantaggi di un sistema a taglio laser

L'adozione del taglio laser nel settore manifatturiero offre rilevanti benefici operativi e produttivi, sebbene presenti alcuni vincoli applicativi ed economici che vanno opportunamente valutati.

I punti di forza del processo sono:

- **Elevata produttività**: Le velocità di avanzamento ottenibili si posizionano ai vertici tra le lavorazioni a fascio d'energia, con prestazioni particolarmente elevate nell'ambito dei bassi spessori.
- **Minimizzazione degli scarti**: La dimensione estremamente ridotta della sezione di taglio (kerf) consente di affiancare i pezzi in fase di nidificazione (nesting), riducendo al minimo la produzione di sfrido.
- **Elevata qualità dei bordi**: La finitura dei lembi tagliati è tale da rendere quasi sempre superflue le successive operazioni di sbavatura o rifinitura meccanica.
- **Assenza di sollecitazioni meccaniche**: Operando in totale assenza di contatto fisico, il processo non trasferisce forze di taglio sul pezzo. Ciò semplifica o elimina la necessità di complessi sistemi di staffaggio e bloccaggio.
- **Eliminazione dell'usura dell'utensile**: Non essendoci un componente meccanico soggetto a degrado per strofinamento, si azzerano i fermi macchina necessari per la sostituzione degli utensili usurati, garantendo al contempo un'elevata riproducibilità nel tempo.
- **Contenimento dell'impatto acustico**: Rispetto ai metodi convenzionali di tranciatura o asportazione, la rumorosità generata durante la lavorazione è estremamente ridotta.

Invece i principali svantaggi e limiti applicativi sono:

- **Elevato capitale d'investimento**: L'acquisizione di un impianto laser richiede un impegno finanziario cospicuo, a cui si sommano le spese di

gestione e manutenzione specializzata. Per questa ragione, l'ammortamento economico del sistema è legato alla presenza di volumi di produzione sufficientemente elevati.

- **Limitazioni sullo spessore massimo**: Rispetto ad altre tecnologie da taglio termico o meccanico (come il plasma o il waterjet), il fascio laser mostra un decadimento di efficacia al crescere della sezione del pezzo, ponendo una soglia limite allo spessore lavorabile.
- **Insorgenza di alterazioni termiche**: Trattandosi di un processo basato sull'apporto di calore localizzato, la zona circostante il taglio può subire shock termici, con conseguente formazione di una Zona Termicamente Alterata (ZTA), deformazioni geometriche o modifiche indesiderate delle proprietà microstrutturali del materiale.

4.2 Saldatura laser

La seconda tecnologia presa in esame è la saldatura, una lavorazione chiave nei processi di fabbricazione volta a congiungere stabilmente due o più componenti, di norma metalli o loro leghe garantendone la continuità meccanica e funzionale.
Si tratta, nello specifico, di una giunzione di natura metallurgica in cui la fusione localizzata dei lembi porta alla formazione del cosiddetto cordone di saldatura.
I componenti da unire, definiti materiali base, condividono solitamente una composizione chimica analoga o coincidente.
Il processo può essere condotto mediante differenti metodologie, ognuna caratterizzata da specifiche peculiarità operative e vincoli applicativi, legati in particolare all'estensione della Zona Termicamente Alterata (ZTA), all'entità delle distorsioni termiche, alla tenuta del giunto e alla lavorabilità dei materiali più complessi.

4.2.1 Metodi di saldatura tradizionali

Tra le soluzioni tradizionali rientrano la saldatura ossiacetilenica, che sfrutta il calore generato dalla combustione di una miscela di ossigeno e acetilene, e le varie tecniche ad arco elettrico.
A quest'ultimo gruppo appartengono la saldatura a elettrodo rivestito (MMA), la saldatura in atmosfera inerte con elettrodo infusibile (TIG) e quelle a filo continuo (MIG/MAG), tutte accomunate dall'impiego della scarica elettrica come sorgente di fusione.
Sebbene trovino ampissima applicazione industriale, questi metodi presentano alcuni limiti strutturali non trascurabili:

1. Elevato apporto termico: genera un'estesa ZTA (spesso indicata con l'acronimo inglese HAZ, Heat-Affected Zone) e induce marcate deformazioni residue nei pezzi.
2. Preparazione dei giunti: richiede frequentemente lavorazioni preliminari complesse per la sagomatura dei cianfrini.
3. Criticità sui materiali speciali: si riscontrano notevoli difficoltà operative in presenza di metalli caratterizzati da elevata riflettività, alta conducibilità termica o scarsa saldabilità intrinseca, come le leghe di alluminio, di rame o di magnesio.

4.2.2 La brasatura

A differenza dei processi di saldatura tradizionali, la brasatura permette di unire i componenti senza dover fondere i lembi del materiale base: a liquefarsi è infatti esclusivamente il metallo d'apporto. Quest'ultimo presenta una composizione chimica differente e, soprattutto, una temperatura di fusione più bassa rispetto a quella dei pezzi da congiungere.

Sebbene un giunto brasato non eguagli le prestazioni meccaniche di una saldatura autogena, questa tecnica ha il grande pregio di poter accoppiare materiali dissimili o difficilmente saldabili per via classica, allargando in modo significativo le possibilità d'impiego nel manifatturiero.
Nel loro complesso, però, i metodi tradizionali, che spaziano dalla saldatura ossiacetilenica a quella ad arco, fino alla stessa brasatura mostrano limiti tecnici ed esecutivi evidenti. È proprio dalla necessità di superare questi ostacoli che nasce la spinta verso soluzioni più evolute, prima fra tutte la saldatura laser, ormai affermata come uno dei processi più precisi e performanti del settore.

4.2.3 Caratteristiche metallurgiche della saldatura laser

Questa tecnologia di giunzione avanzata impiega una radiazione luminosa coerente caratterizzata da una concentrazione energetica estremamente elevata. Grazie a questa peculiarità e a un'eccezionale accuratezza esecutiva, la saldatura laser rappresenta la risposta ideale per superare le criticità strutturali dei metodi convenzionali.
La tecnologia laser consente un riscaldamento e un raffreddamento rapidi, riducendo la zona termicamente alterata (ZTA è la regione del materiale base adiacente alla Zona fusa che anche se non raggiunge lo stato liquido durante la fase di saldatura, subisce comunque un elevato apporto termico). Mentre la Zona fusa (ZF) è l’area del giunto saldato, in cui il materiale di base riesce a raggiungere lo stato liquido, per poi solidificarsi al termine del processo termico.
Questa regione è caratterizzata da una microstruttura distinta rispetto al materiale base e alla zona termicamente alterata (ZTA, a causa delle trasformazioni metallurgiche indotte dal riscaldamento e dal raffreddamento rapido), il materiale in questa zona, non raggiunge il punto di liquefazione, ma subisce comunque gli effetti di un ciclo termico severo, caratterizzato da un rapido innalzamento della temperatura seguito da un altrettanto rapido raffreddamento.

Questo fenomeno, pur mantenendo inalterato lo stato solido della matrice, induce riorganizzazioni nella microstruttura cristallina e genera uno stato di tensioni residue nell'area interessata.
L'elevata ripetibilità del ciclo e la precisione nella gestione del raggio rendono questa tecnologia ideale per l'integrazione in isole robotizzate e linee automatiche, indispensabili per garantire standard qualitativi alti sui componenti.
A questo si affianca una notevole flessibilità operativa: il laser lavora bene su un ampio spettro di materiali, dagli acciai convenzionali fino alle leghe leggere o speciali come alluminio, titanio e nichel.
Questa versatilità lo rende uno strumento centrale nell'industria manifatturiera attuale.

4.2.4 Modalità operative della saldatura laser

La saldatura laser si articola principalmente in tre modalità operative: la saldatura per profonda penetrazione (keyhole mode), la saldatura per conduzione (melt-in mode) e per trasmissione.
La prima modalità per profonda penetrazione è caratterizzata da densità di potenza elevate (> 104W/mm2). (fig. 4.2)
Valori energetici così elevati assicurano la transizione del metallo allo stato gassoso; la rapida evaporazione crea un micro-capillare saturato di vapore che guida il raggio in profondità.
In sostanza, il keyhole si innesca con il passaggio di stato immediato del materiale colpito dal fascio: la violenta spinta dei gas espelle la materia dalla zona d'incidenza, liberando il passaggio per la radiazione.
La scomparsa del primo strato superficiale permette quindi al laser di investire il metallo sottostante senza ostacoli, alimentando un ciclo continuo di vaporizzazione lungo tutto lo spessore.

Tale iter conduce alla quasi istantanea creazione di un canale stretto e profondo chiamato keyhole, all'interno del quale il vapore metallico assorbe l'energia del fascio laser riscaldandosi tanto da ionizzarsi e trasformarsi in plasma.
Il keyhole presenta un diametro in decimi di millimetro e la sua lunghezza pari allo spessore del materiale da saldare, tipicamente nell'ordine dei millimetri.
Quando il pezzo e la sorgente si muovono l'uno rispetto all'altro, il processo si assesta su un equilibrio dinamico.
Il metallo che entra nella zona di impatto passa in rapida sequenza dal riscaldamento alla fusione, fino alla vaporizzazione; i gas che si generano all'interno della cavità mantengono una pressione elevata, sufficiente a contrastare la spinta del bagno fuso circostante e a impedire il crollo delle pareti del capillare.
Mentre una parte del plasma sfiata verso l'esterno del keyhole, il materiale liquido presente nella scia del raggio si solidifica rapidamente, dando forma al cordone di saldatura.
La presenza di questa colonna gassosa è cruciale per spingere la penetrazione in profondità: la radiazione viene assorbita dal plasma dentro il canale, che poi cede il calore direttamente alle pareti metalliche.
È una dinamica del tutto differente rispetto alla saldatura per conduzione, e consente di ottenere giunzioni con una sezione decisamente stretta e profonda.
Nel regime di conduzione, infatti, si lavora con densità di potenza inferiori (sotto i 10^3 \{W/mm} ^2), dove la fusione si limita agli strati superficiali per sola diffusione termica (Fig. 4.3).
Il comportamento è del tutto simile alle tecniche convenzionali: il raggio crea una pozza di metallo liquido sulla superficie e la trascina lungo il giunto al procedere del movimento relativo.
In questo scenario, l'azione del laser può essere schematizzata come quella di una semplice sorgente termica puntiforme.
La geometria del cordone in sezione è semicircolare, con un rapporto di forma (profondità / larghezza) circa 0.

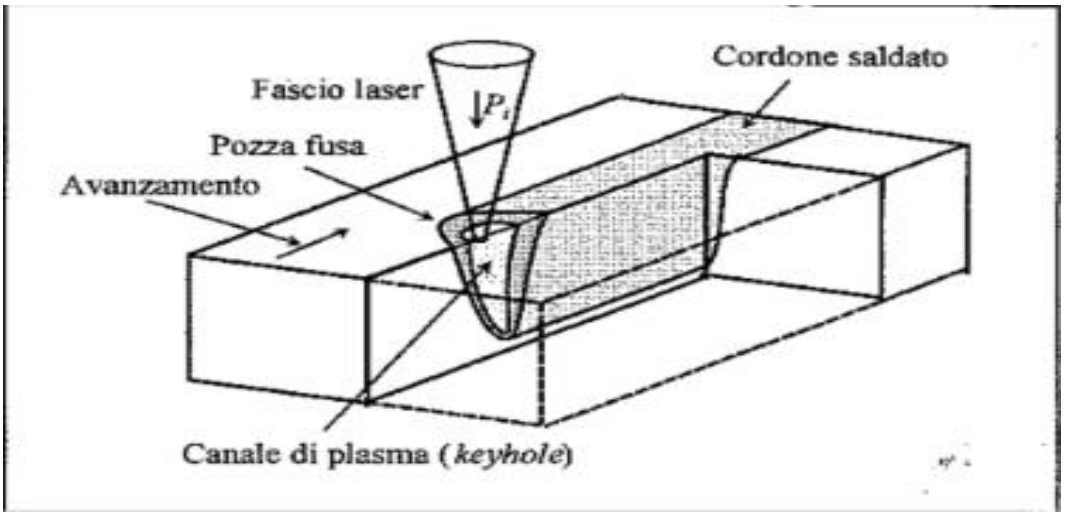

Figura 4.2 Meccanismo di funzionamento saldatura per profonda penetrazione

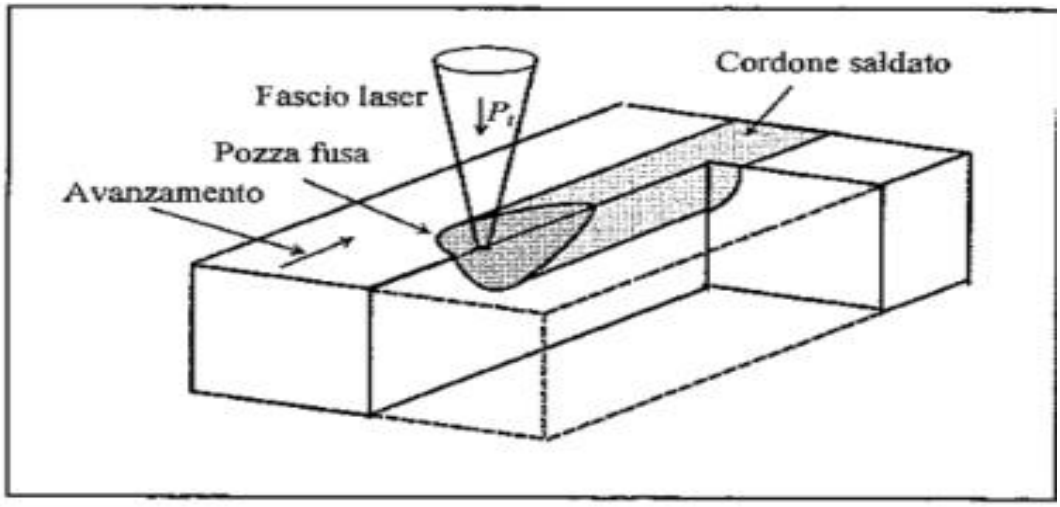

Figura 4.3 Meccanismo di funzionamento saldatura per conduzione

4.2.5 Vantaggi e svantaggi della saldatura laser

I punti di forza della saldatura laser in regime di conduzione risiedono essenzialmente nel contenuto ingombro del cordone e nella notevole rapidità con cui si porta a termine la lavorazione.

I principali vantaggi sono:

1. Elevata affidabilità.
2. Elevata velocità di processo.

3. Ottima qualità.
4. Buona capacità di realizzare forme complesse.
5. ZTA limitata.

Mentre i difetti di questa tecnica sono:

1. Deformazioni e tensioni residue.
2. Cricche a caldo: Si manifestano nella zona fusa quando il materiale saldato presenta un elevato contenuto di impurezze.
3. Cricche a freddo: Si manifestano a causa dell'eccessiva fragilità del cordone o dalle elevate tensioni residue durante il raffreddamento.
4. Porosità: Si presenta principalmente quando il rapporto di forma del cordone di saldatura è elevato, e gas e/o plasma rimane intrappolato nel cordone.
5. Incisioni marginali: Degli avvallamenti di piccole dimensioni che si estendono nella direzione di saldatura, posizionate ai lati del cordone.

4.3 Trattamenti termici superficiali

In questa sezione, passerò a descrivere la terza lavorazione che sfrutta il laser, cioè i trattamenti termici superficiali.

Il trattamento termico superficiale laser è un avanzato processo di ingegneria superficiale che adopera un raggio laser focalizzato per ottimizzare le proprietà superficiali dei metalli.

Questa pratica si sta diffondendo per via di precisione, efficienza e capacità di trattare aree localizzate senza modificare le proprietà del materiale.

La metodologia utilizza un fascio laser per riscaldare velocemente la superficie del metallo grazie all’assorbimento dell’energia laser.

La chiave del trattamento termico laser è la sua capacità di controllare la profondità di riscaldamento, raggiungendo temperature tra 900°C e 1400°C per trasformare la

struttura superficiale senza fonderla, seguita da una fase di auto-tempra che raffredda e indurisce rapidamente la superficie.

4.3.1 Principali vantaggi

Uno dei principali vantaggi del trattamento termico laser è la sua precisione.
La natura localizzata del raggio laser consente un trattamento mirato, che riduce al minimo la distorsione termica e preserva la geometria del componente.
Ciò è molto vantaggioso in settori produttivi in cui la precisione è essenziale come industria aerospaziale e automobilistica.
Il trattamento termico laser ottimizza la resistenza all'usura agendo sulla microstruttura della superficie.
Questo perfezionamento è indispensabile per i componenti soggetti a forte attrito e stress meccanico come ingranaggi e cuscinetti prolungandone vita operativa e affidabilità.
Il trattamento termico è più efficiente energicamente parlando perché l'applicazione diretta dell'energia alla superficie riduce la perdita di calore e il consumo energetico complessivo.
I trattamenti termici laser possono dividersi in 3 categorie, in base alla temperatura raggiunta: Tempra laser, rifusione laser e la ricottura laser.

4.3.2 La tempra laser

La tempra laser che è la prima di cui parlerò, in cui la temperatura raggiunta è elevata ma si trova sotto il punto di fusione. Questa lavorazione incrementa la durezza dello strato superficiale e la sua tenuta all'usura, lasciando pressoché inalterate le proprietà meccaniche nel cuore del componente.
Il ciclo operativo parte dalla scelta di leghe idonee essenzialmente acciai al carbonio, ghise e selezionate leghe di alluminio o titanio unita a una meticolosa

pulizia della superficie, fondamentale per prevenire disomogeneità nell'assorbimento della radiazione.

A livello di impianto si impiegano prevalentemente sorgenti a diodi, capaci di erogare potenze da 500 W fino ad alcuni kilowatt sia in regime continuo che impulsato.

Nella successiva fase di riscaldamento, il fascio innalza la temperatura locale tra i 900 °C e i 1400 °C in tempi brevissimi: questo picco termico induce la trasformazione austenitica della matrice metallica senza però intaccare lo stato solido del pezzo.

La traiettoria del raggio, gestita di norma da bracci robotizzati, garantisce un controllo rigoroso dello spessore temprato, che varia solitamente tra 0,1 mm e 2 mm in base alle specifiche di progetto.

Al passaggio del laser, la zona trattata subisce un'auto-tempra (self-quenching): la rapida dissipazione del calore verso la massa fredda sottostante converte l'austenite in martensite, la fase microstrutturale responsabile dell'elevata resistenza meccanica finale.

Questo metodo elimina la necessità di mezzi di tempra esterni, che possono causare distorsioni. (fig. 4.4)

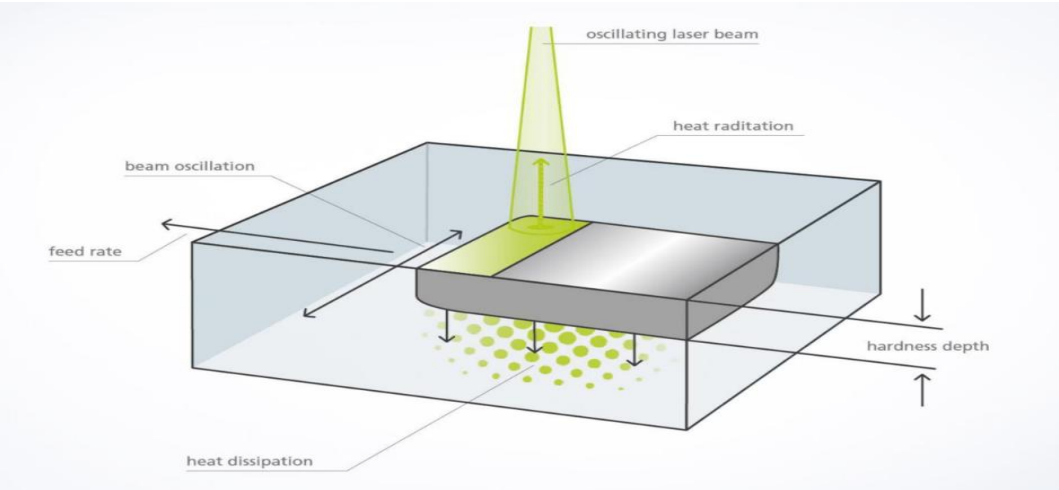

Figura 4.4 Schema di funzionamento della tempra laser

I benefici della tempra laser risiedono anzitutto nella sua spiccata selettività spaziale: il fascio permette di trattare solo le zone d'interesse senza surriscaldare il materiale adiacente.
Questo contenimento dell'apporto termico riduce al minimo le deformazioni geometriche del pezzo, un requisito essenziale nella produzione di componenti ad alta precisione destinati ai settori automobilistico e aerospaziale.
Il processo è versatile, applicabile ad una gamma di materiali in forte crescita e sempre più utilizzato in nei componenti fabbricati in modo additivo oltre che eco-efficiente in quanto non necessita di fluidi per lo spegnimento.
La trasformazione in martensite aumenta la durezza della superficie e la resistenza all'usura, aspetto vantaggioso per parti soggette ad attrito e stress meccanico.
Per ottenere buoni risultati è essenziale controllare la densità di energia bilanciando potenza e velocità del laser oltre che utilizzare un materiale con sufficiente contenuto di carbonio, generalmente superiore a 0,3%.
I processi di post trattamento come rettifica o lucidatura possono servire a ripristinare la finitura superficiale senza compromettere la durezza.
Lo studio dei principi metallurgici è la base di tale procedura, il cuore della tempra laser si basa sul riscaldamento di acciaio o ghisa a 900°-1.200° trasformando le strutture ferritico-perlitiche in austenite.
La tempra rapida facilita la dissipazione del calore nel più freddo substrato, converte l'austenite in martensite, fase dura e resistente all'usura, processo che migliora la superficie senza alterare il materiale di base
La risposta al trattamento risulta ottimale su acciai al carbonio, inossidabili ad alto tenore di carbonio, ghise e particolari bronzi all'alluminio: in queste leghe si innesca infatti la transizione verso la fase martensitica, prerequisito fondamentale per incrementare la durezza e contrastare l'usura meccanica.
Al contrario, i materiali privi della capacità di formare strutture martensitiche, tra cui spiccano gli acciai inossidabili austenitici non traggono alcun beneficio da questa tecnologia, rimanendo di fatto esclusi dal campo applicativo.

La tempra laser permette di controllare precisamente la microstruttura della superficie trattata e il processo può raggiungere una durezza superficiale fino a 1.000 Hv, migliorando la resistenza all'usura, tuttavia, a scapito della duttilità.
La profondità di tempra, usualmente inferiore a 1,5 mm varia in modo inversamente proporzionale alla durezza, l'equilibrio tra i due parametri è fondamentale.
Dato il particolare ciclo termico richiesto, la tempra laser non è applicabile indistintamente a qualsiasi metallo.

4.3.3 Rifusione laser (LSM)

Il secondo processo viene denominato laser surface melting (o rifusione laser, LSM) è uno dei processi di alterazione superficiale in cui la superficie del substrato viene fusa e rapidamente solidificata per formare una microstruttura fine e migliorare le proprietà meccaniche senza modificare le proprietà del bulka e senza l'aggiunta di alcun elemento metallico, esso avviene sopra il punto di fusione.
Il pistone, la valvola e le parti di scorrimento sono realizzati in leghe di magnesio, impiegate nei componenti automobilistici e come materiale a risparmio energetico.
L'applicazione e la limitazione delle leghe di magnesio sono determinate dalle proprietà.
Al fine di migliorare le proprietà tribologiche e meccaniche, il processo di laser surface melting è focalizzato sulla lega di magnesio.
Nei tradizionali trattamenti termici delle leghe HSS sono presentati l'austenite trattenuta, che si trasforma in martensite fragile durante l'esercizio. Tuttavia, la vita dell'acciaio per utensili ad alta velocità aumenta utilizzando LSM.

4.3.4 La ricottura laser

Il terzo e ultimo processo è la ricottura laser, questo processo ha una temperatura media ed avviene sotto la fusione.

Il termine annealing può generare equivoci terminologici: in metallurgia classica, infatti, equivale alla ricottura massiva, un trattamento condotto in forno sull'intero pezzo tramite cicli termici prolungati, con l'obiettivo di abbatterne la durezza e distendere le tensioni interne.
Nell'ambito della marcatura laser, invece, il concetto indica un fenomeno del tutto differente.
L'effetto è infatti confinato a uno strato pellicolare di pochi micrometri di profondità e non altera minimamente le proprietà meccaniche o la microstruttura del cuore del componente.
Attraverso questo processo (noto come laser annealing o marcatura per ricottura), il calore concentrato del fascio innesca un'ossidazione superficiale controllata.
Il risultato è un contrasto visivo visibile come una virata cromatica solitamente verso toni scuri, ma variabile in base alla specifica lega metallica che traccia il segno grafico lasciando intatta la superficie. (fig. 4.5)

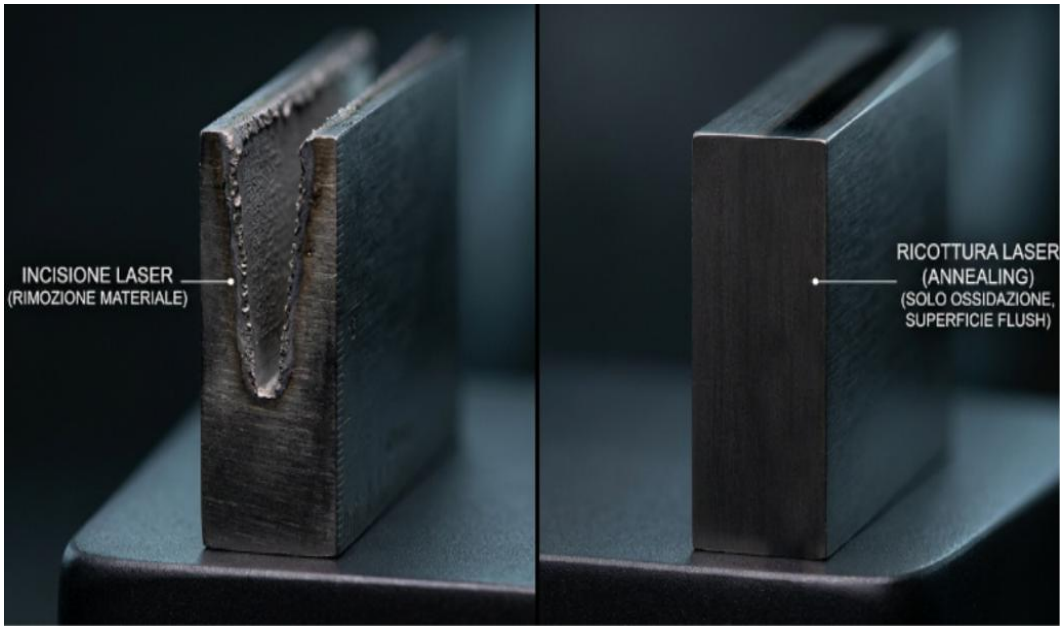

Figura 4.5 Differenza della superficie tra l’uso della ricottura laser o dell’incisione laser

Il meccanismo non prevede rimozione di materiale: la superficie rimane invariata mentre cambia la composizione chimica dello strato esterno dove si formano gli ossidi metallici.

Il processo di annealing sfrutta la zona immediatamente successiva al punto di fuoco in cui l'energia non è concentrata al massimo della sua densità, in questa condizione chiamata defocus il fascio distribuisce energia su un'area maggiore rispetto al punto di fuoco rendendo la densità di potenza istantanea.

Questa modalità è ottimale per un riscaldamento controllato della superficie invece che rimozione del materiale: lo scopo è innescare una reazione di ossidazione localizzata e non vaporizzare o fondere metalli.

Occorre precisare che lo sfocamento (defocus) è solo un accorgimento operativo per calibrare la densità di potenza nei valori adatti alla marcatura, e non la causa fisica che da sola genera il risultato.

La formazione dell'ossido superficiale deriva infatti dall'azione coordinata di più fattori: l'assorbimento del materiale, la conduzione del calore e la modulazione dell'impulso.

L'interazione parte dall'assorbimento ottico del metallo, guidato dalla lunghezza d'onda emessa dal laser e dal coefficiente proprio della lega.

Finitura superficiale e composizione chimica determinano la quota di luce riflessa: un materiale altamente riflettente richiede un apporto energetico superiore per raggiungere la temperatura soglia rispetto a uno con elevata assorbitività.

Quando la radiazione viene catturata e convertita in calore, il processo entra nel suo snodo fondamentale, incentrato sulla gestione del gradiente termico.

Il calore generato dal fascio si disperde all'interno del materiale seguendo meccanismi di diffusione variabili da conducibilità termica e capacità termica specifica della lega.

Una lega con elevata conducibilità termica disperde maggior calore verso le zone limitrofe ostacolando il mantenimento di temperatura localizzato e ripetibile; una lega con minore conducibilità trattiene il calore facilitando la formazione dello

strato ossidato ma accresce il rischio di un’estensione della zona termicamente alterata.
L'omogeneità e la tonalità della colorazione dipendono dal bilanciamento tra l'energia depositata, la velocità di conduzione termica verso la massa sottostante e la durata del contatto tra la radiazione e la superficie.
Questo tipo di lavorazione richiede un controllo millimetrico dell'apporto energetico piuttosto che l'asportazione di materia tipica dell'incisione.
Ciò che separa una sorgente da annealing da una destinata al taglio o allo scavo profondo è la capacità di calibrare profilo e ampiezza dell'impulso, evitando accumuli termici e surriscaldamenti locali oltre la soglia desiderata.
Nel campo industriale, i laser che fungono da standard di riferimento sono quelli in fibra.
Essi hanno un’ampiezza d'impulso fissa nell'ordine dei nanosecondi, determinata dall'architettura della cavità ottica.
Queste sorgenti offrono un ottimo compromesso tra stabilità, costi di esercizio e prestazioni, coprendo la maggior parte delle applicazioni su acciaio inossidabile e leghe metalliche comuni.
Il vincolo principale di questa configurazione sta nell'impossibilità di regolare la durata dell'impulso.
Tale rigidità limita l'intervallo di spessori dell'ossido realizzabili e, di conseguenza, lo spettro di sfumature cromatiche riproducibili in modo costante: uscire dalla finestra operativa ideale porta, infatti, a marcature poco contrastate per difetto di ossidazione, oppure a una perdita di nitidezza sui contorni a causa dell'eccesso termico.

4.3.5 Altre tecnologie avanzate

Nel momento in cui diventa necessario effettuare dei controlli specifici sui parametri di processo, la scelta verso le sorgenti MOPA (Master Oscillator Power Amplifier) è quasi obbligata.

Le caratteristiche principali e che rendono unica questa architettura si basano soprattutto, nella possibilità di separazione fisica tra il modulo che genera l'impulso (l'oscillatore) e lo stadio che ne aumenta la potenza; ciò permette di variare sia la durata dell'impulso che la frequenza di ripetizione. (fig. 4.6)



Figura 4.6 Laser MOPA

Tale flessibilità estende in misura significativa l'intervallo di spessori dell'ossido che si possono formare con la medesima sorgente, ampliando la varietà di sfumature cromatiche riproducibili sulla stessa lega.

Nell'ambito della produzione di serie, questo garantisce una finestra di lavoro più ampia e stabile: il sistema MOPA riduce la variabilità del colore tra i diversi lotti, un fattore che nelle applicazioni di alta precisione è fondamentale quanto la qualità del contrasto sul singolo componente.

Laddove invece si debba contenere al minimo la Zona Termicamente Alterata (ZTA) come nella marcatura di dispositivi biomedicali o di leghe particolarmente reattive al calore, si impiegano sorgenti ad impulsi ultracorti, in particolare i laser ai picosecondi.

Il ricorso a questa tecnologia nel settore medicale risponde a precise ragioni fisiche: quando la durata dell'impulso è inferiore al tempo tipico di diffusione termica del metallo, l'energia viene erogata prima che il calore riesca a propagarsi al materiale circostante.
A parità di energia trasferita, questo fenomeno limita drasticamente la propagazione del calore e riduce l'estensione della ZTA rispetto ai regimi d'impulso più lunghi.
Nel campo degli strumenti chirurgici e degli impianti, l'utilità di questo approccio va ben oltre la resa estetica: la drastica riduzione dello stress termico evita la degradazione microstrutturale della superficie, salvaguardando sia la resistenza alla corrosione che i requisiti di biocompatibilità del componente.

4.4 Additive manufacturing (stampa 3D)

Dopo aver descritto in maniera dettagliata tutte le varie tipologie di processo riguardante i trattamenti superficiali possiamo passare alla descrizione dell'ultima lavorazione che sfrutta il laser cioè la stampa 3d o additive manufacturing.

4.4.1 Principi generali e vantaggi

La manifattura additiva, o additive manufacturing (AM), è un processo di fabbricazione che prevede l'ottenimento di una geometria attraverso un'aggiunta progressiva di materiale, essa, dunque, si distingue dalla manifattura sottrattiva, o subtractive manufacturing (SM).
La stampa 3D è una tecnologia di fabbricazione digitale: attraverso l'addizione di materiale viene reso concreto un oggetto precedentemente modellato digitalmente tramite un software di modellazione CAD.
Si tratta di una tecnologia emergente, che sta rapidamente prendendo piede in numerosissimi settori dell'industria 4.0 per via delle sue forti potenzialità, poiché non solo offre una grande libertà dal punto di vista della customizzazione del

prodotto senza la produzione di stampi o casseforme abbattendo; quindi, costi e sprechi di materiale se non si tratta si produzione su larga scala, ma si sta sviluppando anche in numerose direzioni differenti.
Ad oggi sono tante le tecnologie di stampa 3D disponibili sul mercato; esse differiscono tra loro per materiale stampato come: plastica, metallo, argilla, malte cementizie.
Quindi si va dalla stampa di grandi dimensioni, adatta all'architettura, alla stampa di precisione, adatta per protesi mediche e per modalità di fabbricazione.
L'additive manufacturing sta prendendo piede nel settore industriale soprattutto per la versatilità che offre in termini di personalizzazione: un oggetto può essere plasmato ad hoc ed essere prodotto con cavità la stampa 3D è una tecnologia di fabbricazione digitale: attraverso l'addizione di materiale viene reso concreto un oggetto precedentemente modellato digitalmente tramite un software di modellazione CAD.
Si può dire che l'additive manufacturing si sta diffondendo molto rapidamente nel settore costruttivo e sempre più aziende investono in questo tipo di tecnologia.
Le ragioni di questo fenomeno sono da ricercarsi nei vantaggi che la stampa 3D porta rispetto ai metodi costruttivi tradizionali, come:

1. Tempi di produzione inferiori.
2. Riduzione della manodopera necessaria.
3. Possibilità di realizzare forme customizzate più o meno complesse senza la necessità di casseforme o stampi, con conseguente riduzione degli scarti di fabbricazione.
4. Possibilità di intervenire in luoghi difficilmente accessibili, con conseguente aumento della sicurezza sul lavoro.

4.4.2 Tecnologie laser per l'additive manufacturing

Le principali tecnologie sono a base laser sono due, la Fusione a letto di polvere (Laser Power Bed Fusion) e Deposizione diretta di energia.

La fusione a letto di polvere (Laser Power Bed Fusion) è una categoria di produzione additiva che utilizza l'energia termica per fondere in modo selettivo materiali granulari in forme 3D solide.
Nel processo di fusione su letto di polvere, l'energia di una sorgente concentrata, tipicamente un raggio laser o un fascio di elettroni viene diretta in modo selettivo sulle zone da consolidare, procedendo per sovrapposizione di strati successivi.
La frazione di polvere che non viene fusa rimane attorno alla geometria in crescita, agendo essa stessa da sostegno naturale e consentendo la realizzazione di forme particolarmente complesse o sottosquadri senza dover ricorrere a strutture di supporto dedicate.
La classificazione delle tecnologie a letto di polvere si basa essenzialmente sulla natura della sorgente termica impiegata:

- **Fusione su letto di polvere con raggio laser**: Sfrutta un'emissione ad alta densità di potenza per unire i granuli della carica, dimostrandosi estremamente versatile ed efficace sia su matrici polimeriche che su materiali metallici.
- **Fusione a fascio di elettroni**: adopera un fascio di carica negativa in una camera a vuoto, solitamente adatta ad applicazioni metalliche di fascia alta in cui resistenza meccanica e termica sono fondamentali.
- **Fusione termica a base di agente**: lampade ad infrarossi applicano calore su un fluido spruzzato su un letto di polvere, quest'ultima si fonde nei punti in cui l'agente è stato posto, formando il pezzo.

Questo processo può essere esplicato mediante un iter: il primo passaggio è la distribuzione di un sottile strato di polvere preriscaldata sul Piatto di costruzione, successivamente una fonte di energia termica fonde la polvere permettendo l'abbassamento del Piatto di costruzione e l'aggiunta di un nuovo strato di polvere. (fig. 4.7)

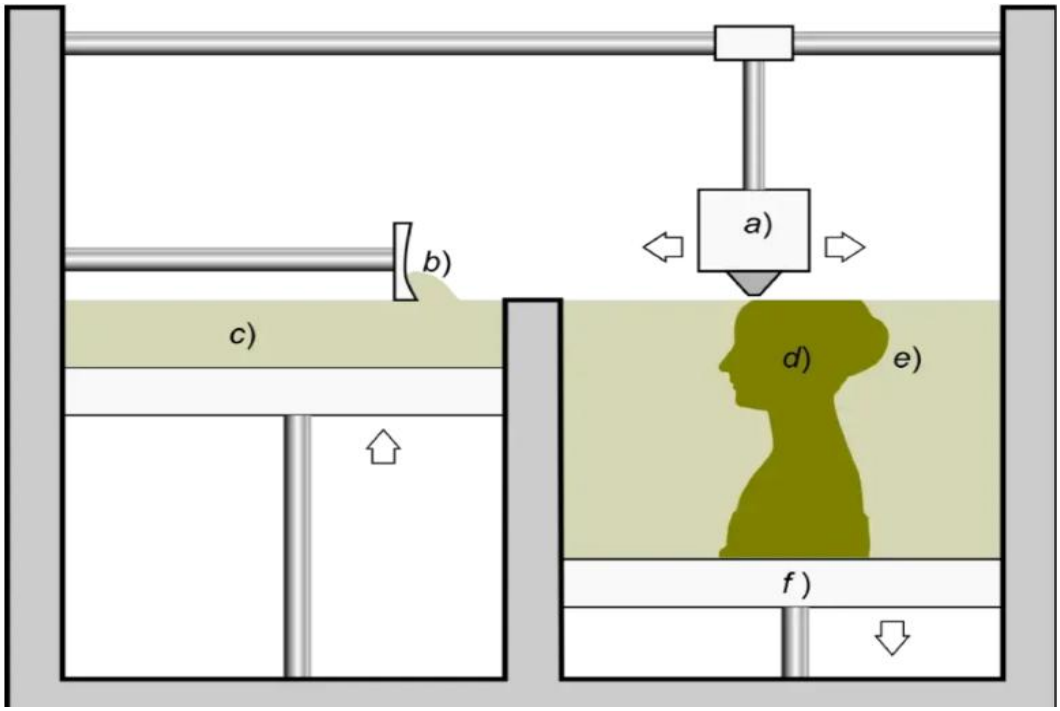

Figura 4.7 Schema del processo Fusione a letto di polvere

L'architettura tipica di un impianto per fusione a letto di polvere comprende i seguenti elementi fondamentali:

1. Sorgente termica di fusione (laser o fascio di elettroni)
2. Dispositivo di stesura e livellamento della polvere (recoater a lama o a rullo)
3. Serbatoio o sistema di dosaggio della polvere vergine
4. Componente in fase di accrescimento
5. Letto di polvere confinato con funzione di supporto
6. Piattaforma di lavoro ad abbassamento micrometrico

L'aggiunta sequenziale di materiale prosegue secondo questa logica strato su strato fino all'ottenimento della geometria finale.

A fabbricazione ultimata, i pezzi rimangono immersi nella matrice di polvere per il tempo necessario a garantire un raffreddamento omogeneo.

Una volta estratto il blocco, la carica non consolidata viene recuperata e setacciata per essere riutilizzata nelle lavorazioni successive.
Infine, in base alle tolleranze dimensionali e alle specifiche estetiche del componente, si eseguono le opportune operazioni di post-processing, quali la sabbiatura, la tintura o la levigatura chimica a vapore.
La seconda tecnologia prende il nome di Directed Energy Deposition (DED), nota anche come Deposizione diretta di energia.
Essa genera parti fondendo i materiali e depositandoli sul pezzo, questa tecnica di produzione additiva è fondamentale per materiali in polvere metallica o filo.
Altre tecniche includono sagomatura della rete con laser, fabbricazione a luce diretta, deposizione diretta di metallo, saldatura a deposizione laser e rivestimento laser 3D.
Oltre alla possibilità di generare parti da zero la DED può aggiustare parti danneggiate come pale di turbine o eliche.
La maggior parte dei sistemi DED (Directed Energy Deposition) si configura come impianti industriali dalle dimensioni imponenti, la cui operatività richiede un'atmosfera strettamente controllata e confinata.
Il panorama dei materiali lavorabili mediante questa tecnologia additiva è particolarmente ampio: comprende principalmente titani, leghe a base nichel, alluminio e rame, oltre a un'articolata gamma di acciai (inossidabili, da utensili e legati).
Va tuttavia evidenziato che le diverse sotto-tecnologie che compongono la famiglia DED non sono equivalenti, ma presentano vincoli operativi e compatibilità metallurgiche specifiche per ciascuna variante di processo.
La deposizione diretta di energia combina differenti vantaggi, l’applicazione localizzata permette di riparare precisamente i danni senza esporre alla temperatura l’intero oggetto.
I sistemi DED talvolta offrono tassi di deposizione elevati e flessibilità di installazione poiché il processo non è sempre legato ad una camera fissa.

Alcuni sistemi guidano il getto o la torcia con l'aiuto di un robot industriale, in modo da poter applicare con relativa facilità anche superfici curve o contorni complessi. (fig. 4.8)

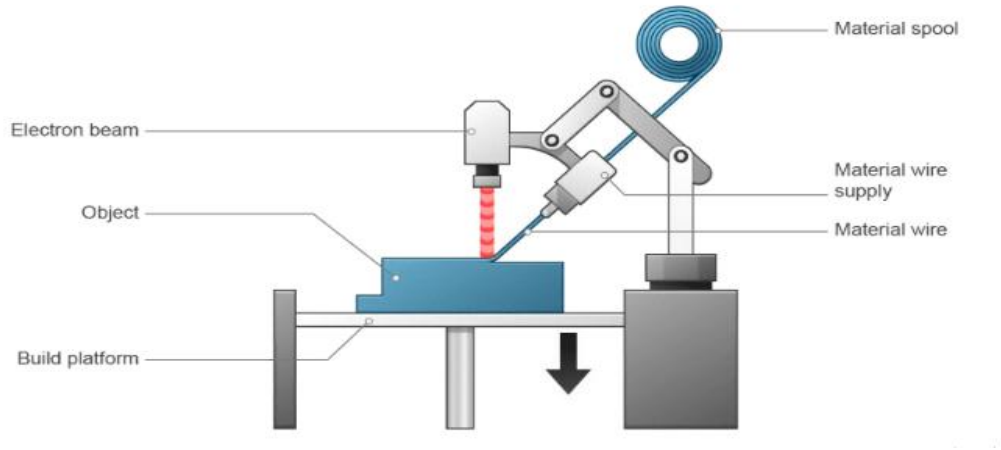

Figura 4.8 Schema di una stampa 3D a Deposizione diretta di energia

Al termine della descrizione delle 4 lavorazioni principali del laser si definire una linea comune tra taglio, saldatura, trattamenti superficiali e stampa 3D: difatti in tutti i casi il vantaggio competitivo del laser risiede nella capacità di trasferire energia in modo selettivo, preciso e altamente controllabile.

Può cambiare l'obiettivo del processo, separare, unire, rifinire oppure costruire ma resta costante il principio secondo cui modificando e regolando diversamente i parametri del laser si andranno a modificare la struttura ed il comportamento e le proprietà del materiale.

Proprio questa continuità apre il passaggio allo stato dell'arte delle superfici antibatteriche.

Nel capitolo successivo, quindi, l'attenzione si sposterà dalla descrizione dei processi alla loro applicazione più avanzata sul piano funzionale, mostrando come la modifica laser della micro e nanotopografia possa contribuire alla riduzione dell'adesione batterica senza ricorrere esclusivamente a rivestimenti chimici o agenti biocidi.

Capitolo 5

Stato dell'arte sulle superfici antibatteriche ottenute mediante laser

5.1 Fondamenti delle superfici antibatteriche

Per superfici antibatteriche si intendono quelle superfici costituite da un qualsiasi materiale che prevengano o limitino la crescita e la proliferazione batterica.
Il crescente problema della resistenza batterica e microbica agli antibiotici è strettamente legato alla capacità di tali microrganismi di formare biofilm, costituiti da complesse comunità microbiche incorporate in una matrice extracellulare (EPS).

5.1.1 Processo di formazione del biofilm

Infatti, il quorum sensing (un sistema di comunicazione batterica) è fondamentale per molte funzioni biologiche, come la formazione di biofilm e consente ai batteri di coordinare i propri comportamenti all'interno dei biofilm, aumentando ulteriormente la loro resistenza alle minacce esterne rispetto alle forme libere, complicando così il trattamento con antibiotici convenzionali.
In dettaglio, la formazione di un biofilm si sviluppa come un processo a più stadi: inizia con l'adsorbimento di molecole organiche che formano un film condizionante, seguito dall'adesione iniziale delle cellule batteriche al materiale.
Successivamente, i batteri iniziano a dividersi e a produrre la matrice EPS, portando alla maturazione di una complessa struttura tridimensionale eterogenea.
Infine, avviene la dispersione di cellule pronte a colonizzare nuove aree.

Poiché la disintegrazione di un biofilm maturo è un processo estremamente ostico a causa della forte protezione fornita dalla sua architettura 3D, intervenire durante le primissime fasi di adesione batterica iniziale rappresenta la strategia clinica e ingegneristica più promettente per ostacolare l'insorgenza di infezioni.
Pertanto, la formazione di biofilm è strettamente legata alla resistenza antimicrobica (AMR), che aumenta significativamente le minacce per la salute e i costi per il sistema sanitario pubblico.

5.1.2 Limiti delle strategie antibatteriche tradizionali

Gli agenti antibatterici tradizionali, come i rivestimenti a base di ioni d'argento, i materiali fotocatalitici, i biocidi a rilascio graduale e le catene polimeriche, hanno mostrato alcune limitazioni, quali la resistenza dei patogeni, problemi di durata e potenziali rischi per la salute.
Ad esempio, anche nell'ambito medico per impedire l'adesione batterica agli impianti medici sono state impiegate strategie che prevedono l'uso di elementi antibatterici naturali, come l'argento.
Nell'ambito medico tradizionale, sono state impiegate diverse strategie chimiche per impedire l'adesione batterica agli impianti.
Queste includono il rivestimento delle superfici con peptidi antibatterici, composti di ammonio quaternario, idrogel porosi (capaci di intrappolare e distruggere fisicamente porzioni di membrana cellulare) o ioni metallici.
Tra quest'ultimi spiccano i composti a base di argento, e in particolare le nanoparticelle di argento (AgNPs), la cui elevata area superficiale garantisce un'interazione letale compromettendo la respirazione batterica.
Tuttavia, la loro efficacia è limitata dagli effetti collaterali tossici e perdono le loro proprietà antibatteriche man mano che si dissolvono dalla superficie dell'impianto.
Sfide quali la natura temporanea dei rivestimenti, la loro durata e la potenziale lisciviazione di ioni metallici rimangono una preoccupazione significativa e

sottolineano l'urgente necessità di tecnologie efficaci per lo sviluppo di superfici artificiali con proprietà antibatteriche. (fig. 5.1)

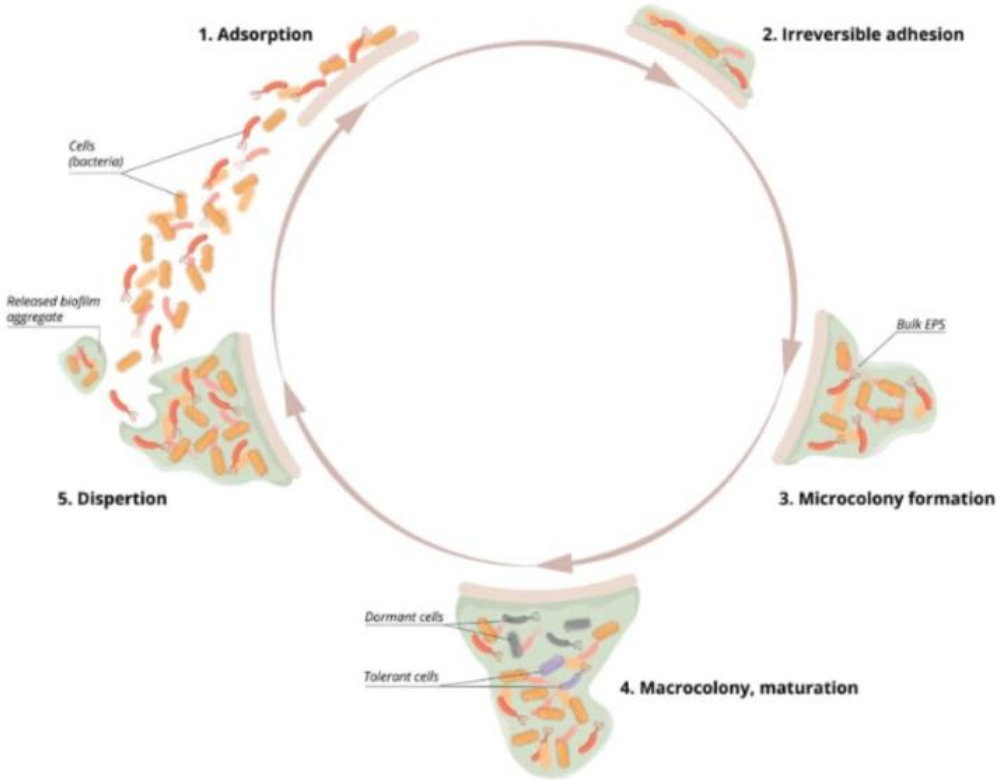

Figura 5.1 Diagramma stadi di formazione del biofilm

5.1.3 Ruolo della testurizzazione laser

In risposta a queste sfide, la testurizzazione laser delle superfici (LST) si è affermata come un'alternativa antibatterica promettente e sostenibile che consiste nel modificare le superfici su scala micro e nanometrica per inibire la colonizzazione batterica o distruggere le membrane batteriche.

L'LST può impedire l'adesione batterica e il biofouling oppure, d'altra parte, favorire l'azione biocida dopo l'adesione batterica.

L'obiettivo dello stato dell'arte riguardante specificatamente le superficie antibatteriche trattate al laser, è come l'uso di questo processo influenzi il

comportamento di ceppi batterici e anche come l'uso di ciò possa impedire l'adesione batteriche nei vari ambiti industriali (ospedialiero, navale ecc).
La sfida di contrastare la proliferazione batterica abbraccia molteplici settori, richiedendo quindi strategie flessibili in grado di inibire o eliminare l'adesione batterica in contesti molto diversi.
Sia le incrostazioni microbiche che quelle macrobiotiche rappresentano un problema rilevante nell'industria marittima e aerospaziale, dove la formazione di biofilm, sia sotto forma di microrganismi che di organismi più grandi, aumenta il peso delle imbarcazioni, la resistenza aerodinamica e le emissioni inquinanti dei veicoli, contribuendo a un maggiore consumo di carburante e a costi di manutenzione più elevati.

5.2 Meccanismi di azione antibatterica delle superfici testurizzate laser

Una delle soluzioni più promettenti per risolvere i problemi in quasi tutti gli ambiti industriali è la testurizzazione superficiale laser (LST), che consiste nel modificare in modo controllato la topografia superficiale dei materiali su scala micro e nanometrica, imitando alcune superfici antimicrobiche presenti in natura.
Le superfici testurizzate al laser con proprietà antibatteriche possono essere classificate in due categorie distinte, ovvero battericide e anti-biofouling (antincrostazione biologica), a seconda del modo in cui esprimono la loro azione antibatterica.

5.2.1 Superfici a comportamento battericida

Il comportamento battericida si basa sulla promozione dell'adesione batterica alla superficie per danneggiare e distruggere successivamente le membrane extracellulari.

Questo avviene attraverso specifiche proprietà fisiche e/o chimiche della superficie, mirando così a distruggere i batteri al contatto e portandoli alla morte. Per questo motivo, uno dei fattori principali che gioca un ruolo critico in questo processo è la topografia della superficie.

Quando i batteri si avvicinano e cercano di attaccarsi a queste superfici strutturate, nel tentativo di replicarsi e sopravvivere, tendono ad aumentare l'area di contatto a causa dei punti di ancoraggio accessibili, che risultano più distanziati rispetto a una superficie liscia.

Perciò la membrana batterica può allungarsi notevolmente superando il limite di sopportazione delle pareti cellulari provocando una potenziale morte irreversibile.

Anche una parziale adesione delle membrane batteriche ai bordi delle microstrutture testurizzate può generare una lacerazione delle cellule e conseguente morte.

Ad esempio, è stato dimostrato che le ali di cicala possiedono array regolari di nano pilastri (con altezze di circa 200 nm) capaci di generare un'estrema tensione sulla membrana dei batteri Gram-negativi, causandone la rottura meccanica nello spazio sospeso tra i pilastri.

Un'efficacia ancora maggiore è stata osservata nelle ali di libellula, le cui nanostrutture disposte in modo casuale riescono a perforare e uccidere anche i batteri Gram-positivi (dotati di parete cellulare più spessa), sfruttando le forze di taglio (shear forces) generate dal microrganismo stesso nel tentativo di migrare sulla superficie.

Pertanto, l'ingegneria delle superfici mira a una maggiore rugosità, e le specifiche proprietà geometriche delle nanostrutture (tra cui spaziatura, profondità e rapporto d'aspetto) possono influenzare significativamente il potenziale di tali superfici nell'indurre l'uccisione dei batteri, principalmente attraverso lo stress meccanico.

Fortemente legato, e generalmente conseguente allo stress meccanico indotto dalla topografia, è lo stress ossidativo.

Questo si riferisce a uno squilibrio tra la produzione di specie reattive dell'ossigeno (ROS) indotta dalla testurizzazione laser e la capacità delle cellule di neutralizzarle utilizzando i propri sistemi antiossidanti.
Dipende dalla formazione di ossidi metallici indotta dal laser che possono generare ROS catalizzando reazioni di tipo Fenton, oppure grazie alle loro proprietà fotocatalitiche, come esemplificato dalla nano Titania (le cui proprietà antibatteriche sono attribuite alla fase rutilo del biossido di titanio, TiO_2).

5.2.2 La bagnabilità

Un ulteriore fattore che influenza le proprietà battericide è la bagnabilità.
Questa è definita come la capacità di un liquido di mantenere il contatto con una superficie ed è generalmente descritta dall'equazione di Young.
Essa quantifica il cosiddetto angolo di contatto (CA) formato dalla linea di separazione dell'interfaccia solido-liquido e dalla tangente all'interfaccia liquido-aria.
Quando il CA è < 90°, la superficie è considerata *idrofila* (la *superidrofilia* si verifica quando il CA è vicino a 0°), mentre l'*idrofobicità* si osserva quando il CA > 90° (con la *superidrofobicità* che si verifica quando il CA > 150°).
Pertanto, minore è il CA, migliore è la bagnabilità della superficie e maggiore è la tendenza dell'acqua ad aderirvi.
Di conseguenza, le cellule microbiche contenute in mezzi acquosi, aderendo a superfici (super)idrofile, possono subire danni alla membrana a causa di perforazione, deformazione e rottura causate dalle spigolosità artificiali indotte dal laser.
L'idrofilia della superficie gioca un ruolo cruciale anche favorendo la formazione di ossidi metallici superficiali attraverso l'assorbimento dell'acqua, la sua ritenzione e un'aumentata reattività.

Tali ossidi operano come catalizzatori nelle reazioni di Fenton in cui il perossido di idrogeno (H_2O_2) proveniente dall'ambiente circostante o generato durante il processo reagisce con i metalli per produrre radicali ossidrilici (OH) e altri ROS.
Le superfici idrofile sono coinvolte anche in attività fotocatalitica ottimizzando l'assorbimento di molecole di ossigeno e acqua sulla superficie dell'ossido, fondamentali per reazioni che generano ROS sotto irradiazione UV.
può attaccare le membrane cellulari batteriche, causando danni al DNA e alle proteine, e portando infine all'arresto del ciclo di vita cellulare.
Inoltre, in seguito al trattamento LST (Laser Surface Texturing) su superfici metalliche, gli ossidi formatisi potrebbero anche rilasciare ioni metallici che hanno un naturale effetto antibatterico (es. rame o oro), attaccando le membrane cellulari e/o il metabolismo.
È stato inoltre riportato che la formazione di ossidi metallici è persino potenziata dalla rugosità e dalla nanostruttura indotte dal laser, evidenziando ulteriormente l'importanza della morfologia superficiale nella sua capacità finale di uccidere i batteri. (fig. 5.2)

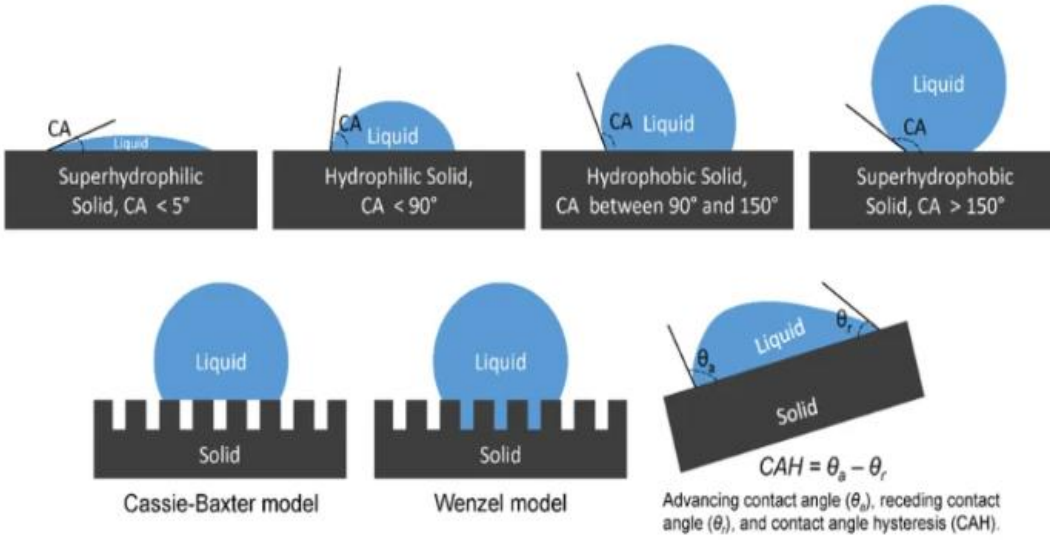

Figura 5.2 Confronto tra i vari modelli di bagnabilità

5.2.3 Superfici a comportamento anti-biofouling

Il comportamento anti-biofouling è invece legato alla capacità di prevenire l'adesione batterica e la loro crescita incontrollata (ovvero la formazione di biofilm), rendendo la superficie inospitale e poco attraente per l'attacco batterico. Anche in questo caso, la topografia superficiale specialmente in termini di dimensioni laterali e profondità delle caratteristiche generate artificialmente gioca un ruolo cruciale, soprattutto se in relazione a uno specifico batterio in esame.
Caratteristiche di dimensioni micrometriche (come, ad esempio, scanalature e pilastri) più grandi di una cellula batterica causano un'adesione potenziata.
Inoltre, la formazione di biofilm è favorita dall'allineamento dei batteri lungo queste strutture, che fungono da punti di ancoraggio per le cellule e migliorano le comunicazioni intercellulari.
Ciononostante, esistono alcune caratteristiche micrometriche (es. la morfologia a "pelle di squalo") che sono in grado di ridurre l'attacco dei batteri, probabilmente grazie a specifiche proprietà topografiche come la riduzione della resistenza idrodinamica (anti-drag), che fanno sì che le cellule batteriche non rimangano sulla superficie ma scivolino via.
Un altro possibile approccio consiste nell'indurre un efficace comportamento anti-biofouling generando superfici con trame più fini e fitte rispetto alle dimensioni geometriche dei batteri, impedendone così l'allineamento e la proliferazione.
Indurre un peculiare comportamento di bagnatura, ovvero una super idrofobicità descrivibile dal modello di Cassie-Baxter, si è rivelato molto efficace per le applicazioni anti-biofouling.
La testurizzazione laser è un metodo eccellente per controllare la risposta di bagnatura del materiale, poiché induce modifiche della chimica superficiale e morfologie peculiari (es. micro e nano-strutture o strutture gerarchiche multi-scala). Tali caratteristiche superficiali sono tipicamente contraddistinte dalla presenza di sacche d'aria all'interno delle strutture, che conferiscono alla superficie un carattere super idrofobico simile a quello della foglia di loto.

In questo caso, le gocce d'acqua si raggruppano e rotolano via senza lasciare residui (effetto Cassie-Baxter).
Di conseguenza, questa natura idrorepellente impedisce l'adesione delle gocce e riduce al minimo il contatto di soluzioni acquose in cui potrebbe verificarsi la colonizzazione batterica.
Ciò porta anche a una significativa riduzione dei punti di ancoraggio per i flagelli batterici e per le appendici filamentose elicoidali, che di solito facilitano un'efficace motilità per nuoto e sciamatura.
Questo inibisce fortemente la capacità di trasporto passivo dei liquidi da parte dei batteri e il loro nuoto attivo verso la superficie.
Così, il tempo necessario affinché i batteri accedano alla superficie si allunga, portandoli piuttosto a scivolare sulle bolle d'aria.

5.2.4 Alterazione della chimica superficiale

La testurizzazione laser comporta anche cambiamenti nella chimica superficiale, con importanti influenze sull'anti-biofouling.
È stato dimostrato che le superfici super idrofobiche, trattate al laser sono caratterizzate da una bassa energia libera superficiale (un indice della forza delle interazioni intermolecolari).
La conseguente riduzione della forza di adesione inibisce le interazioni dei batteri con il materiale, rendendone difficile l'adesione.
Inoltre, la già citata formazione di uno spesso strato di ossido riduce i legami insaturi disponibili, diminuendo ulteriormente la probabilità di interazione con i batteri.
Le variazioni della composizione chimica indotte dal laser possono anche minimizzare le interazioni elettrostatiche che in linea di principio potrebbero facilitare l'adesione batterica grazie alla diminuzione del potenziale superficiale e alla formazione di uno strato barriera di carica elettrostatica dovuto all'ossido.

Da questo quadro risulta chiaro che vari meccanismi possono essere impiegati per sviluppare un comportamento antibatterico su superfici testurizzate al laser, sebbene sia stato dimostrato che un'azione antimicrobica altamente efficace derivi quasi certamente dall'interazione di molteplici meccanismi, piuttosto che da uno solo.

5.3 Materiali di substrato e ambiti applicativi industriali

Uno dei punti di forza della tecnologia LST è la sua capacità di poter modificare in modo controllato la rugosità, la chimica superficiale e la bagnabilità senza alterare le caratteristiche o proprietà del substrato.
Questo ha permesso di estendere l'uso del Laser Surface Texturing a un'ampia varietà di materiali, ognuno riferito ai rispettivi ambiti applicativi.

5.3.1 Utilizzo delle leghe di titanio nei vari ambiti

Le leghe di titanio sono ampiamente utilizzate nella riparazione e sostituzione dei tessuti duri grazie alla loro eccellente biocompatibilità e alle loro peculiari proprietà meccaniche, quali elevata resistenza alla trazione, resistenza agli effetti avversi dei fluidi corporei, eccezionale resistenza alla corrosione ed elevato rapporto resistenza-peso.
Di conseguenza, vengono impiegate nella fabbricazione di protesi articolari artificiali per ginocchio e anca, impianti dentali, viti per il fissaggio di fratture e protesi cardiovascolari.
Le caratteristiche di bagnabilità e le proprietà anti-biofouling delle leghe di titanio le rendono ampiamente utilizzate nei tubi dei condensatori per le centrali nucleari raffreddate ad acqua di mare, grazie alla loro bassa suscettibilità al biofouling in ambiente marino, contrastata mediante lo sviluppo di superfici super idrofobiche.

5.3.2 Substrati metallici convenzionali

Altri metalli e leghe, tra cui l'acciaio inossidabile, l'alluminio e il rame, sono stati scelti come materiali di substrato per sviluppare superfici testurizzate al laser con proprietà antibatteriche.

L'acciaio inossidabile, per via della sua convenienza economica e della sua vasta gamma di applicazioni, è particolarmente preferito per lo sviluppo di superfici antimicrobiche volte a prevenire il trasferimento da mano a superficie, comune negli ambienti ospedalieri, come su maniglie delle porte, piastre tattili, piani di lavoro e interruttori.

Esso è ampiamente utilizzato nei dispositivi medici e industriali per via della sua durezza, dell'elevata resistenza alla corrosione e all'usura e della finitura luci.

La lega di alluminio 7075 ha acquisito rilievo come materiale per lo sviluppo di superfici anti-biofouling grazie alla sua elevata resistenza, bassa densità, soddisfacente plasticità ed eccellente resistenza alla corrosione, che la rendono ampiamente impiegata nell'industria navale.

Il rame, insieme all'argento, è ampiamente documentato per le sue proprietà antimicrobiche e per la capacità di inattivare efficacemente vari microbi tramite contatto diretto.

In genere, il rame richiede da pochi minuti ad alcune ore per eradicare completamente diversi ceppi batterici.

La sua azione antibatterica ne ha portato all'uso diffuso negli ambienti ospedalieri per mitigare le infezioni nosocomiali.

5.3.3 Materiali polimerici e ceramici avanzati

Le ceramiche e i polimeri trovano sempre più impiego nelle applicazioni biomedicali, incluse protesi e impianti, grazie alla loro biocompatibilità.

Questi materiali offrono maggiore resistenza meccanica, all'usura e alla corrosione, aspetti importanti per i dispositivi medici oltre che per strumenti chirurgici e sistemi di rilascio di farmaci (drug delivery).
I polimeri sono molto utilizzati nelle applicazioni antibatteriche per via di versatilità nella sintesi e funzionalizzazione che consente integrazione di specifici gruppi funzionali ideati per impedire la crescita batterica.
Molti polimeri sono ingegnerizzati per il graduale rilascio di agenti antibatterici come antibiotici, ioni metallici o biocidi, assicurando una duratura protezione contro la contaminazione batterica.
I materiali ceramici come l'idrossiapatite (HAp) e la zirconia sono ampiamente usati nell'ingegneria tessutale, in particolare per sostenere i tessuti e promuovere la rigenerazione ossea, a causa della loro somiglianza compositiva con l'osso e della loro eccellente biocompatibilità.
Nel caso della zirconia, queste proprietà sono attribuite principalmente alla sua elevata stabilità chimica e alla composizione priva di metalli che aiuta a prevenire il rilascio di sostanze tossiche nei tessuti circostanti, all'elevata resistenza meccanica, all'eccellente inerzia chimica, alla superiore resistenza all'usura, alla bassa radioattività e all'eccellente tolleranza ai danni.

5.4 Tecniche di processamento della LST

La testurizzazione superficiale al laser (Laser Surface Texturing, LST) rappresenta una tecnica di lavorazione rapida e versatile per regolare finemente la morfologia superficiale dei materiali, creando pattern micro- e nanometrici con l'orientamento desiderato.
Inoltre, la LST altera altri fattori critici che influenzano l'attacco batterico, come la chimica superficiale e la bagnabilità, senza alterare le proprietà massive (*bulk*) del materiale.
Diversi studi hanno impiegato differenti tipi di laser per creare trame e migliorare le prestazioni della superficie, dimostrando che la tecnologia laser, grazie alla sua

natura senza contatto, all'elevata precisione nella creazione di microstrutture e alla flessibilità nella lavorazione di diversi materiali, è una delle tecniche di micromacchinazione più praticabili per modificare e trattare ampie aree superficiali.
La nano- e micro-testurizzazione laser si è affermata come una soluzione promettente per mitigare il biofouling riducendo al minimo l'impatto ambientale.
È stato dimostrato che le strutture superficiali a scala nano- e micrometrica prodotte artificialmente riducono l'energia superficiale, indebolendo così l'adesione dei microrganismi incrostanti.
Inoltre, l'aumento della rugosità superficiale e l'alterazione dell'energia superficiale e della bagnabilità delle strutture e delle sporgenze indotte dal laser potenziano l'attività fotocatalitica e favoriscono la generazione di specie reattive dell'ossigeno (ROS), portando alla distruzione fisica delle cellule batteriche.
La testurizzazione superficiale al laser comprende diverse tecniche, come le strutture superficiali periodiche indotte da laser (Laser-Induced Periodic Surface Structures, LIPSS), il patterning di interferenza laser diretto (Direct Laser Interference Patterning, DLIP) e la scrittura laser diretta (Direct Laser Writing, DLW).

5.4.1 Laser-Induced Periodic Surface Structures (LIPSS)

La fabbricazione di LIPSS su vari materiali, inclusi metalli, semiconduttori e dielettrici, si basa sulla generazione di modulazioni superficiali periodiche sub-lunghezza d'onda all'interno della macchia focale (*focal spot*), ottenendo un reticolo regolare mediante radiazione laser linearmente polarizzata.
Le LIPSS sono categorizzate in due tipi principali, a seconda del loro periodo spaziale o rispetto alla lunghezza d'onda del laser:

- **LSFL (Low-Spatial Frequency LIPSS):** Le profondità delle LSFL vanno generalmente da circa 100 nm a diverse centinaia di nanometri.

- **HSFL (High-Spatial Frequency LIPSS):** La profondità delle HSFL è tipicamente <100 nm.

Inoltre, è stato osservato che, impostando specifiche condizioni di irradiazione laser, è possibile produrre anche LIPSS bidimensionali (2D-LIPSS), ovvero strutture superficiali con periodicità lungo due direzioni. (fig. 5.3)

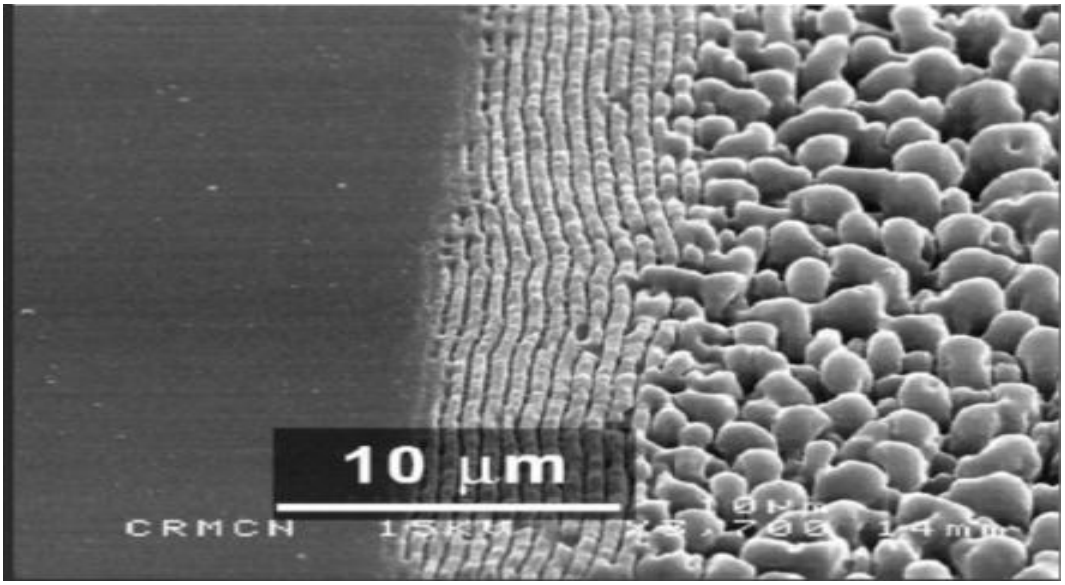

Figura 5.3 Rappresentazione delle LIPSS

5.4.2 Patterning di interferenza laser diretto (DLIP)

La Direct Laser Interference Patterning (DLIP) è una tecnologia alternativa molto valida.

Essa è utilizzata per realizzare micro e nanostrutture su substrati metallici.

Questo si ottiene sovrapponendo due o più fasci laser non collineari nello spazio e nel tempo sulla superficie del campione, il che si traduce nella formazione di un pattern di interferenza sul piano focale.

In questo modo, si possono produrre trame periodiche altamente regolari mediante fusione e/o ablazione della superficie in aree strette e localizzate dove i campi elettromagnetici dei fasci laser incidenti interferiscono costruttivamente, lasciando inalterate le restanti aree.

Il DLIP offre una grande flessibilità nella scelta del materiale target e della trama superficiale, ed è prodotto da due fasci laser linearmente polarizzati che si intersecano con un angolo theta.
Analizzando precisamente le energie degli impulsi laser, l'ablazione avviene nei picchi di interferenza mentre gli avvallamenti rimangono intatti.
Questo pattern è confinato a pixel DLIP di dimensioni micrometriche all'interno della sovrapposizione focale, ma la scansione attraverso la superficie consente di estendere tale tecnologia alla testurizzazione di grandi superfici.
Sebbene ciò aumenti la complessità del setup, consente la creazione di pattern di interferenza più sofisticati. Il DLIP è particolarmente vantaggioso per la lavorazione di polimeri troppo fragili e soggetti a fessurazione, o di polimeri elastomerici che si deformano sotto le pressioni di lavorazione convenzionali, garantendo alterazioni chimiche trascurabili durante e dopo il processo. (fig. 5.4)

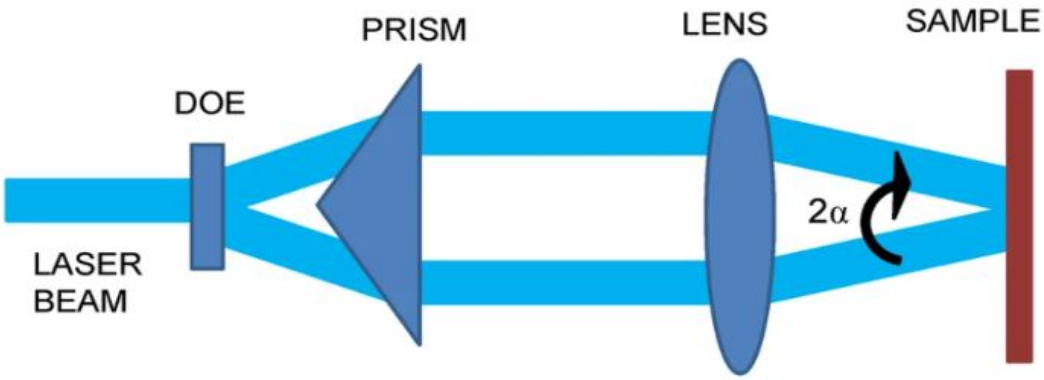

Figura 5.4 Schema del setup DLIP

5.4.3 La scrittura laser diretta (DLW)

Un'ulteriore tecnica basata sul laser per la testurizzazione superficiale è la Scrittura Laser Diretta (Direct Laser Writing, DLW).

Questo metodo si basa sull'ablazione diretta del materiale mediante irradiazione laser, al fine di fabbricare singole microstrutture con diverse forme, profondità e configurazioni spaziali.
A tal fine, viene solitamente utilizzato un galvoscanner controllato da PC dotato di una lente F-theta per focalizzare e movimentare il fascio laser sulla superficie del campione.
Alternativamente è possibile sfruttare obiettivi da microscopio per raggiungere dimensioni dello spot maggiormente focalizzate; in questo caso si adoperano assi motorizzati per rimuovere il campione sotto il fascio laser.
Scansionando il target strato alla volta vengono fabbricate le microstrutture desiderate.
Utilizzando sorgenti laser impulsive frequenza di ripetizione e velocità di scansione vengono calibrate per garantire un'adatta sovrapposizione impulso-impulso, diminuendo la soglia di fluenza e consentendo l'ablazione evitando accumulo eccessivo di calore.
La DLW viene generalmente eseguita leggermente al di sopra della soglia di fluenza del materiale per ottenere un'elevata precisione e riproducibilità.
Essa si distingue per flessibilità, efficienza e capacità di personalizzare direttamente le proprietà del materiale durante la fabbricazione, sebbene le dimensioni delle strutture prodotte siano maggiori (decine di micrometri) rispetto a DLIP e LIPSS.
Tramite la tecnica DLW sono state sviluppate varie microstrutture, come microscanalature e micro-fossette (*micro-dimples*), caratterizzate da zone termicamente alterate e danni termici circostanti pressoché trascurabili; e grazie alla flessibilità della tecnologia dei laser a femtosecondi, che consente processi di assorbimento non lineare come l'assorbimento a due fotoni (Two-Photon Absorption, TPA), la DLW può essere applicata a una vasta gamma di materiali, anche quelli difficili da lavorare con le tecniche convenzionali su scala microscopica.
Ciò consente la realizzazione di microstrutture precise e prive di difetti sia su materiali opachi che trasparenti.

5.5 Meccanismi di interazione batterio-superficie

Successivamente è importante definire la sfruttabilità di diverse superfici ottenute mediante LST, mettendo in evidenza i meccanismi che sono stati ritenuti responsabili della riduzione e/o della prevenzione dell'adesione batterica.

5.5.1 Differenze tra batteri Gram-negativi e Gram-positivi

I batteri Gram-negativi e Gram-positivi presentano differenze fisiologiche, genomiche e strutturali ben distinte, che influenzano la formazione del biofilm e i meccanismi di adesione.

I batteri Gram-negativi formano biofilm che contengono i curli, un tipo di proteina fibrosa amiloide che si assembla sulla superficie batterica, svolgendo un ruolo cruciale nel mantenimento dell'integrità strutturale della matrice del biofilm. Inoltre, i batteri Gram-negativi utilizzano anche i flagelli per la motilità, al fine di avvicinarsi alle superfici, e i polisaccaridi o lipopolisaccaridi secreti dalla loro membrana esterna, per facilitare l'adesione iniziale e rafforzare lo sviluppo e la struttura del biofilm.

Al contrario, i batteri Gram-positivi sono privi di membrana esterna e possiedono uno spesso strato di peptidoglicano e polimeri glicolici di superficie, essenziali per l'adesione iniziale alla superficie.

Lo S.aureus si avvicina alle superfici attraverso il moto browniano e utilizza adesine intercellulari polisaccaridiche e proteine ancorate alla superficie per l'attaccamento. La formazione del biofilm nei batteri Gram-positivi dipende da questi polimeri di superficie e può adattarsi a varie condizioni ambientali.

A differenza dei batteri Gram-negativi, i batteri Gram-positivi non usano il di-GMP ciclico (c-di-GMP) per regolare il biofilm ma si affidano a meccanismi polisaccaridi-dipendenti o indipendenti per mantenere i biofilm.

Queste diverse strategie riflettono i vari approcci che i batteri Gram-positivi e negativi utilizzano per stabilire e sostenere i biofilm influenzandone le capacità infettive.
In questo contesto, vengono presi in considerazione due batteri di riferimento: E.coli e S.aureus.
Il primo è Escherichia coli, un batterio che fa parte della grande famiglia delle Enterobatteriacee e rientra nel gruppo dei coliformi.
Questa famiglia costituisce il gruppo più numeroso e vario di batteri (del tipo Gram-negativi) importanti in campo medico.
Al suo interno si trovano sia batteri pericolosi in grado di causare malattie gravi (come la Salmonella, la Shigella o il batterio della peste), sia batteri innocui che vivono normalmente nel nostro corpo.
Questi ultimi, però, se le difese si abbassano o se si spostano in altre parti dell'organismo, possono cogliere l'occasione per provocare un'infezione.
Mentre il secondo cioè stafilococchi sono cocchi gram-positivi e catalasi-positivi, generalmente disposti in aggregati irregolari, a grappoli (il nome deriva infatti dal greco staphylé, grappolo).
L'habitat naturale in cui normalmente vivono gli stafilococchi è costituito dalla cute dei mammiferi.
Sono attualmente riconosciute una quarantina di specie stafilococciche ma è chiaro che il loro numero è molto più elevato.
Gli stafilococchi si possono distinguere in due specie, caratterizzate da colonie aurate e bianche o non pigmentate

5.5.2 Impatto della LST sull'adesione E.coli e S.aureus

A supporto delle differenze morfologiche e strutturali tra i due ceppi, uno studio di riferimento ha quantificato come la risposta di *E. coli* e *S. aureus* alle superfici

testurizzate vari in modo significativo a seconda dei precisi parametri topografici e di bagnabilità.

La ricerca ha analizzato campioni in acciaio inossidabile (AISI 316L) trattati con tecnologia laser a impulsi ultra-brevi, un metodo che consente di limitare i difetti termici e di creare architetture superficiali complesse a diverse scale dimensionali. Specificatamente, lo studio ha confrontato superfici di controllo (lucidate a specchio, con rugosità nell'ordine dei 30 nm) con tre precise morfologie generate dal laser: sporgenze micrometriche (denominate spikes, con distanza tra i picchi di 20-40 μm e comportamento super idrofobico con angolo di contatto di 160°), strutture LIPSS (pattern lineari con periodicità sub-micrometrica di 0,5-0,9 μm e angolo di contatto di 119°) e nano pilastri (strutture a reticolo di 0,8-1,3 μm e angolo di contatto di 140°).

L'analisi dei risultati ha rivelato che la progettazione di superfici antibatteriche richiede un bilanciamento complesso, smontando l'assunto secondo cui la superidrofobicità garantisca sempre una protezione universale contro il *biofouling*. L'impatto delle superfici laser-trattate è risultato infatti diametralmente opposto a seconda del fenotipo batterico in esame:

- **Dinamiche di ritenzione di *E. coli*:** La capacità di adesione di questo batterio Gram-negativo bastoncellare (lungo mediamente 1-2 μm e largo circa 0,5 μm) dipende quasi esclusivamente dal rapporto tra la topografia del materiale e le dimensioni della singola cellula. Sulle sporgenze micrometriche super idrofobiche, la ritenzione di E. coli non è diminuita, ma quasi triplicata rispetto alle superfici di controllo non trattate.

  Tale comportamento si verifica poichè la distanza tra i picchi delle spikes (20-40 μm) è un ordine di grandezza superiore alle dimensioni del batterio: le cellule si insediano e proliferano all'interno delle ampie "valli" tra le sporgenze, dove risultano protette dalle forze di taglio (shear forces) dei fluidi circostanti. Al contrario, le strutture su scala sub-micrometrica mostrano un'efficacia eccezionale, con le LIPSS e i nanopilastri capaci di ridurre la ritenzione rispettivamente del 99,8% e del 99,2%. La periodicità

delle LIPSS, essendo inferiore alla lunghezza del batterio, riduce l'area di contatto utile e il numero di punti di ancoraggio disponibili, costringendo la cellula in una configurazione meccanicamente instabile che non permette l'adesione irreversibile. In queste dinamiche iniziali, per *E. coli*, la bagnabilità ha mostrato un ruolo del tutto marginale.

- **Dinamiche di ritenzione di *S. aureus*:** L'adesione di questo batterio Gram-positivo sferico (con diametro generalmente inferiore al micrometro) ha mostrato meccanismi di ancoraggio nettamente differenti, risultando molto più sensibile alle variazioni di bagnabilità superficiale e di rugosità media.
  A differenza del ceppo Gram-negativo, *S. aureus* ha registrato una ritenzione minima sulle superfici lucidate a specchio (a causa dell'assenza di micro-appigli per l'ancoraggio cellulare) e ha subito una forte inibizione anche sulle sporgenze super idrofobiche.
  In quest'ultimo caso, l'effetto battericida o batteriostatico è imputabile al regime di Cassie-Baxter: l'intrappolamento di microscopiche sacche d'aria tra i picchi delle *spikes* riduce al minimo l'area di contatto reale tra la sospensione batterica e la superficie del metallo, ostacolando la sedimentazione delle cellule sferiche.
  Anche nei confronti di questo patogeno, tuttavia, le strutture finemente texturizzate si sono dimostrate altamente valide: le LIPSS e i nano pilastri hanno ridotto le unità formanti colonie vitali dell'84,7% e del 79,9%.
  Questa riduzione è il risultato sinergico di una rugosità superficiale ottimizzata per sfavorire il contatto e di una moderata idrofobicità del substrato.

In conclusione, l'estesa indagine dimostra che non esiste un singolo parametro fisico isolato (come la sola bagnabilità estrema o la bassa rugosità) capace di impedire l'adesione di tutti i ceppi microbici.

Il vero potenziale della testurizzazione laser ultra-breve risiede nel *design dimensionale*: le morfologie aventi una spaziatura comparabile o inferiore alle dimensioni fisiche dei batteri (come LIPSS e nano pilastri) rappresentano la

soluzione tecnologica più versatile, garantendo una drastica riduzione del biofouling iniziale su uno spettro microbiologico altamente eterogeneo.

5.5.3 Applicazione della testurizzazione laser per la prevenzione del biofouling marino

Oltre a *E. coli* e *S. aureus*, la testurizzazione superficiale al laser è stata ampiamente studiata come soluzione efficace per prevenire la contaminazione batterica e il biofouling da parte di vari altri batteri e microbi, in particolare quelli che proliferano negli ambienti marini. Cholkar et al. hanno studiato le proprietà anti-biofouling di superfici in lega di alluminio 7075 microtesturizzate con laser a femtosecondi, valutando cinque diversi pattern: linee parallele, tratteggio incrociato (*cross-hatching*), triangoli, stelle e rombi.

Il comportamento anti-biofouling è stato analizzato attraverso un'immersione di 3 ore in una sospensione colturale di 10 mL di Nitzschia ovalis, una tipologia di diatomea, organismo unicellulare microscopico appartenente del gruppo delle alghe.

È risultato che il comportamento antibatterico fosse connesso all'aumento della rugosità superficiale dei campioni in lega di alluminio successivamente alla testurizzazione laser.

Sono stati considerati due parametri di rugosità: l'Area Superficiale (SA), che valuta l'area totale della superficie, e il Profilo Superficiale (SP), strettamente correlato all'altezza delle caratteristiche superficiali indotte dal laser.

Entrambi i parametri morfologici sono stati considerati indicatori della capacità di *N. ovalis* di trovare punti di ancoraggio per colonizzare la superficie.

Le superfici testurizzate con linee parallele, tratteggio incrociato e triangoli, presentando bassi valori di SA e SP (rispettivamente 3.53 e 17.17 μm, 5.22 e 17.1 μm, 9.58 e 32.9 μm), si sono rivelate più inclini all'adesione del biofilm.

Al contrario, le superfici con pattern a stella e a rombo hanno mostrato valori di SA e SP più elevati (rispettivamente 13.45 e 37.4 μm, 12.17 e 33.2 μm), suggerendo un minor numero di punti di contatto disponibili e, di conseguenza, una minore tendenza alla formazione del biofilm.

In questo studio è stata valutata anche l'influenza della bagnabilità e dell'energia superficiale sul comportamento antibatterico.

Le misurazioni dell'angolo di contatto statico con l'acqua (WCA), effettuate a 30, 60, 90 e 120 giorni dalla testurizzazione laser, hanno mostrato che la bagnabilità è cambiata e diminuita nel tempo.

Inizialmente idrofile, come il campione liscio originale (WCA 85 ± 4°), le superfici sono gradualmente passate a uno stato idrofobico.

Dopo 90 giorni di invecchiamento, le superfici microtesturizzate con triangoli, stelle e rombi sono diventate altamente idrofobiche, con un WCA statico superiore a 150°.

Nello specifico, il campione con pattern a rombi ha mostrato il valore di WCA più alto, pari a circa 157°.

È stato dimostrato che la topografia della superficie ha influito notevolmente sulla capacità di adesione delle diatomee; il fattore di influenza principale è risultato essere la dimensione delle microstrutture superficiali rispetto alle dimensioni di *N. ovalis*.

Di fatto, non tutte le superfici testurizzate hanno dimostrato un comportamento antibatterico efficace.

Il campione non trattato presentava un'area di copertura cellulare del 21.6%, determinata tramite l'analisi di clustering K-means, suggerendo che le superfici lisce e piatte possono promuovere l'adesione delle diatomee fornendo potenziali punti di attacco.

Il campione con pattern a stella ha registrato l'area di copertura più bassa (4.63%), un risultato attribuito alla testurizzazione che ha comportato una riduzione dell'energia superficiale e dei siti di ancoraggio per le diatomee.

La superficie con testurizzazione a tratteggio incrociato, con un'area di copertura cellulare media del 10.30%, ha mostrato un'efficacia antibatterica leggermente inferiore rispetto al campione con pattern a stella, ma comunque significativa, grazie all'intrappolamento dell'aria all'interno della trama che ha ridotto l'adesione del biofilm.
Le superfici con testurizzazione triangolare e romboidale con coperture cellulari del 12.68% e 13.57%, mostrano una moderata riduzione dell'adesione del biofilm.
Al contrario, il pattern a linee parallele ha evidenziato la copertura cellulare più alta (24.32%) tra i campioni analizzati, superiore anche a quella della superficie liscia.

5.6 Sfide ingegneristiche e ottimizzazione del processo LST

Il texturing superficiale laser garantisce un valido potenziale in differenti applicazioni, tuttavia considerando le altrettante sfide, come la selezione del design ottimale della texture, la fluenza del laser, la frequenza di ripetizione degli impulsi e l'impiego di mezzi di lavoro idonei per le applicazioni desiderate.
Inoltre, le sfide relative alla scalabilità del processo, al rapporto costo-efficacia e alle emissioni di gas durante la lavorazione delle materie plastiche devono essere incorporate nel sistema di produzione.
Per affrontare queste problematiche, l'ottimizzazione dell'uso delle tecniche di texturing laser al fine di migliorare le prestazioni tribo logiche delle superfici ingegneristiche richiede una meticolosa ottimizzazione del processo, che comprende la selezione di adeguate coppie tribo logiche, dei parametri dei micro-crateri (*dimple*) e delle configurazioni di contatto.
La complessità nel comprendere come la texture superficiale e il design del suo pattern siano correlati con le proprietà meccaniche e le indagini microstrutturali ha rappresentato un significativo limite nella determinazione del design ottimale della texture.

I ricercatori hanno riservato notevoli sforzi per individuare pattern, densità e inclinazione della texture più idonei ad ottimizzare l'adesione dei rivestimenti e la lubrificazione.
Ciononostante, la sfida continua a causa delle variazioni nelle proprietà meccaniche tra i vari substrati e delle applicazioni variabili.
Valutare il design tramite prove sperimentali di texturing superficiale laser richiede molto tempo.
Pertanto, l'utilizzo di tecniche di modellazione computazionale e numerica come il metodo delle differenze finite, il metodo dei volumi finiti e il metodo degli elementi finiti può rivelarsi vantaggioso per lo studio dei comportamenti parametrici prima di effettuare studi sperimentali.
Inoltre, si può analizzare una rapida crescita della domanda di superfici multifunzionali.
Generare superfici che offrano simultaneamente proprietà come idrofobicità, caratteristiche antibatteriche, prestazioni tribologiche migliorate e una maggiore biocompatibilità rappresenta una sfida, ma offre un potenziale smisurato per svariate applicazioni.
L'esplorazione del texturing laser in materiali innovativi, come leghe avanzate, compositi, polimeri e biomateriali, rappresenta un'altra area di interesse.
L'adattamento delle texture superficiali per rispondere alle esigenze specifiche di diversi settori, come quello aerospaziale, automobilistico, dei dispositivi biomedici e delle applicazioni energetiche, presenta tante sfide quante opportunità.
Il LST (Laser Surface Texturing) non è un metodo economico da utilizzare per ottimizzare i parametri dei materiali.
Migliorare il rapporto costo-efficacia dei processi di texturing laser è essenziale per una maggiore adozione a livello industriale.
Ottimizzare l'efficienza energetica, ridurre i tempi di lavorazione e minimizzare gli sprechi di materiale sono sfide continue per rendere queste tecniche economicamente più vantaggiose. (fig.5.5)

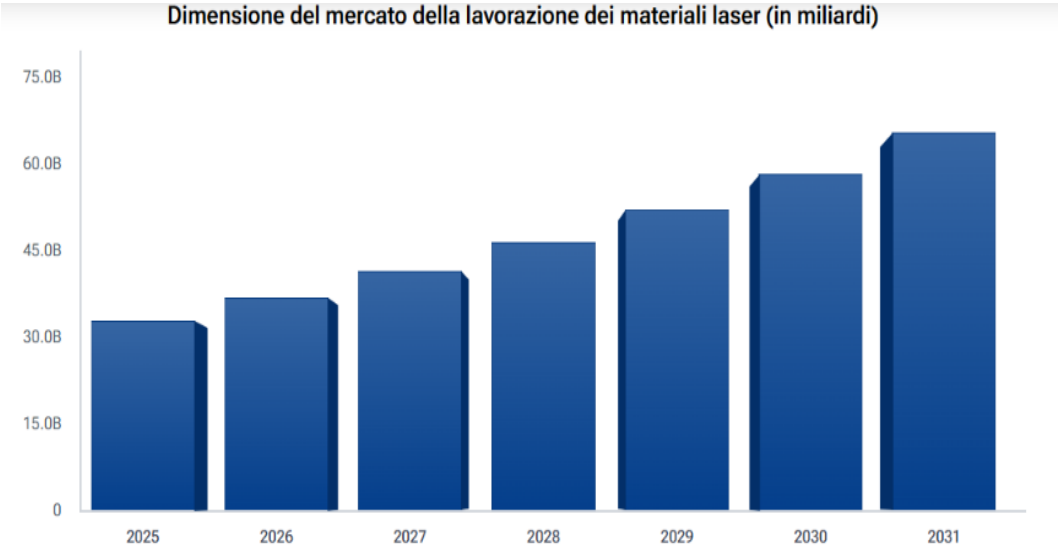

Figura 5.5 Proiezione della dimensione del mercato globale relativo alla lavorazione dei materiali mediante laser

5.7 Prospettive di mercato e impatto industriale

Il mercato globale della lavorazione dei materiali laser, valutato circa 29.400 milioni di dollari nel 2025, è pronto a una sostanziale espansione, con una previsione prevista di circa 82.400 milioni entro il 2034, mostrando un robusto tasso di crescita annuale composta (CAGR) del 12,1% nel periodo di previsione.
(fig. 5.6)

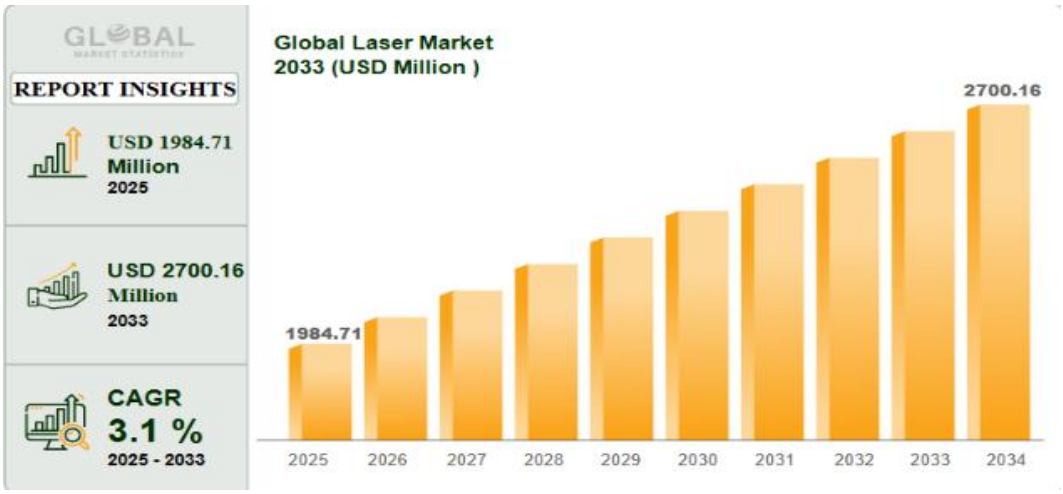

Figura 5.6 Evoluzione del mercato globale della tecnologia laser

5.7.1 Industria 4.0 e sostenibilità

Questa significativa traiettoria di crescita è sostenuta da una confluenza di progressi tecnologici, una crescente adozione industriale e la crescente domanda di manifattura di precisione in settori diversi.

L'affermazione del paradigma di Industria 4.0 connessa alla necessità di processi produttivi maggiormente automatizzati e digitalizzati, ha generato un aumento dello sviluppo delle sorgenti laser, specialmente ai sistemi in fibra ad alta potenza e ad impulsi ultracorti.

Capaci di variare dalle macro-lavorazioni strutturali fino alla micro-fabbricazione di massima accuratezza su svariati materiali, queste tecnologie si confermano un caposaldo dell'industria moderna.

In questo ambiente, la riduzione degli sprechi e attitudine a realizzare geometrie complesse determinano i principali fattori d'impulso per la loro adozione in ambiti all'avanguardia, come settore automobilistico, aerospaziale, elettronica di consumo e la biomedicina.

Al giorno d'oggi sostenibilità e adeguamento ai parametri ESG definiscono in modo sempre più significativo le scelte d'acquisto e l'innovazione tecnologica delle imprese.
Per adattarsi alle richieste di un mercato che necessita di cicli produttivi a basso impatto, le architetture laser di nuova generazione garantiscono prestazioni energetiche nettamente superiori rispetto alle lavorazioni convenzionali, determinando una positiva riduzione dell'impronta carbonica dell'intero sito produttivo.
Questa pressione sta accelerando lo sviluppo di tecnologie laser “verdi” e favorendo una cultura di innovazione responsabile in tutto il settore.

5.7.2 Nuove frontiere applicative e complessità tecnica

Il mercato della lavorazione laser è alla ricerca di nuove opportunità di sviluppo attraverso le sue applicazioni di espansione in aree emergenti come l'energia rinnovabile, i veicoli elettrici (EVS) e l'elettronica flessibile.
Inoltre, la crescente popolarità della tecnologia indossabile e dei display flessibili ha aperto le porte alla microlavorazione laser di materiali non tradizionali, portando avanti l'innovazione.
Nonostante il trend espansivo, una delle principali barriere alla diffusione dei sistemi laser di nuova generazione (in particolare quelli ultraveloci o ad architettura ibrida) risiede nell'elevata complessità tecnica dell'hardware e del software di controllo.
La conduzione, la manutenzione e l'integrazione di tali impianti nei flussi produttivi richiedono figure professionali dotate di elevate competenze specialistiche.
Tale skill gap genera inevitabilmente un incremento dei costi di formazione e rallenta l'adozione della tecnologia, penalizzando in modo particolare le piccole e medie imprese.
Ciononostante, il loro impiego appare fondamentale in settori industriali strategici:

- **Settore Automotive e Mobilità Elettrica**: il laser risulta indispensabile per la tranciatura ad alta precisione di componenti leggeri e per la saldata dei moduli e delle connessioni dei pacchi batteria.
- **Energia Solare**: la tecnologia viene impiegata per operazioni accurate di incisione (scribing) e taglio delle celle fotovoltaiche.
- **Elettronica Flessibile e Wearable**: la continua richiesta di dispositivi indossabili ha stimolato lo sviluppo di processi di microlavorazione su materiali non convenzionali o termosensibili.

Un'errata impostazione dei parametri di processo o una limitata padronanza della tecnologia possono tradursi in scarti onerosi o in danneggiamenti delle apparecchiature, confermando come la preparazione tecnica costituisca il fattore abilitante primario per il pieno sfruttamento del settore.

Conclusione

In conclusione, questo lavoro di tesi ha mostrato come la tecnologia laser si sia evoluta da fondamentale intuizione della fisica teorica a vero e proprio pilastro dell'ingegneria industriale e della medicina contemporanea.
Come evidenziato anche nel corso di questo lavoro, il laser è oggi uno strumento estremamente versatile, capace di alterare la materia con precisione assoluta.
L'analisi si è concentrata su una delle sfide ingegneristiche e mediche più attuali: il contrasto alla proliferazione batterica e alla formazione di biofilm.
Di fronte ai limiti dei tradizionali rivestimenti chimici spesso tossici, soggetti a rapido deterioramento e responsabili della resistenza antimicrobica il Laser Surface Texturing (LST) si impone come una soluzione innovativa, ecologica e sostenibile.
L'impiego del laser consente infatti di ridurre l'uso di sostanze chimiche e inquinanti, garantendo elevati standard di sicurezza, ripetibilità ed efficienza nel tempo.
Tuttavia, per un pieno consolidamento e una reale standardizzazione in ambito clinico e industriale, sono ancora necessari protocolli operativi condivisi e un'accurata caratterizzazione dei processi.
Colmare il divario tra i risultati di laboratorio e la produzione su scala industriale, in particolare, nella funzionalizzazione e nel trattamento delle superfici consentirà di trasformare l'approccio alla sicurezza microbiologica e alla prevenzione delle infezioni, unendo la tutela della salute pubblica a processi produttivi sempre più sostenibili.

Bibliografia

[1] F. Ghilini, D. E. Pissinis, A. G. Miñán, P. L. Schilardi. *How Functionalized Surfaces Can Inhibit Bacterial Adhesion and Viability*. ACS Biomaterials Science & Engineering, 2019.

[2] F. D. Ince, T. Özel. *Laser surface texturing of materials for surface functionalization: A holistic review*. Materials & Design / Optics & Laser Technology, 2025.

[3] A. H. A. Lutey, L. Gemini, L. Romoli, G. Lazzini, F. Fuso, M. Faucon, R. Kling. *Towards laser-textured antibacterial surfaces*. Scientific Reports, 2018.

[4] EC Laser Studio. *L'Evoluta Storia dell'Acronimo "LASER": Un Viaggio attraverso la Scienza e l'Innovazione*. Articolo divulgativo, EC Laser Studio, 2024. (https://www.eclaserstudio.com/acronimo-laser/)

[5] S. Simonatto. *Breve storia dello sviluppo del LASER*. Tesi di Laurea Triennale in Fisica, Università degli Studi di Padova, A.A. 2019/2020.

[6] S. Musazzi, U. Perini. *Laser e loro applicazioni industriali e scientifiche*. ENEA / CISE, Milano.

[7] M. Bertolotti. *The History of the Laser*. CRC Press / Taylor & Francis Group, 2004.

[8] J. Hecht. *A short history of laser development*. Applied Optics / Optical Engineering, 2010.

[9] E. Capello. *Le lavorazioni industriali mediante laser di potenza*. CLUP / Maggioli Editore, Milano, 2003.

[10] T. Limongi, A. Giugni, L. Palladino, B. Paponetti. *LASER: Analisi dei rischi e misure di sicurezza*. Università degli Studi dell'Aquila.

[11] Università degli Studi di Parma. *Norme di sicurezza per l'uso dei sistemi laser. Servizio Prevenzione e Protezione*, Università degli Studi di Parma, 2018.

[12] A. Castellani. *Analisi e ottimizzazione dei parametri del processo di marcatura laser*. Tesi di Laurea Magistrale, Politecnico di Torino, 2020.

[13] Stratasys. *Spiegazione della Stampa 3D con fusione a letto di polvere (Powder Bed Fusion*). Guida tecnica alla produzione additiva, Stratasys Direct Manufacturing.
(https://www.stratasys.com/it/resources/blog/stampa-3D-a-fusione-su-letto-di-polvere-nuove-possibilita-di-produzione/)

[14] Dassault Systèmes. *Deposizione di energia diretta (Directed Energy Deposition - DED)*: *cos'è e come funziona*? Guida alle tecnologie additive, Dassault Systèmes.
(https://www.3ds.com/it/make/guide/process/directed-energy-deposition)

[15] Dassault Systèmes. *Tecnologia di Deposizione di Energia Diretta (DED) nei processi di fabbricazione metallica*. Documentazione tecnica.
(https://3druck.com/it/corso-base-di-stampa-3d/panoramica-del-processo-di-stampa-3d/deposizione-di-energia-diretta/)

[16] N. Pagano. *Applicazione dei sistemi laser in processi di taglio innovativi*. Tesi di Dottorato di Ricerca, Università degli Studi di Napoli Federico II, 2010.

[17] Artizono. *Trattamento termico laser: Vantaggi e processo spiegati*. Guida tecnica ai trattamenti superficiali dei materiali, Artizono.
(https://artizono.com/it/vantaggi-del-trattamento-termico-laser-e-spiegazione-del-processo/)

[18] Guida Tecnica Industriale. *Annealing Laser: cos'è, come funziona e le applicazioni*. Approfondimento sui trattamenti di ricottura laser superficiale.
(https://www.evlaser.com/it/academy/annealing-laser/)

[19] I. Cavaliere. *Sviluppo e caratterizzazione di trattamenti e strutturazioni superficiali tramite laser*. Tesi di Dottorato, Politecnico di Bari.

[20] Guida Tecnologica. *Laser a Fibra Ottica: cos'è, come funziona, applicazioni e costi*. Scheda tecnica e di analisi economica sulle sorgenti laser.
(https://www.evlaser.com/it/academy/laser-a-fibra-ottica-per-applicazioni-industriali/)

[21] A. Ancona, Y. Mi, F. P. Mezzapesa et al. *Bacterial adhesion eradication and biofilm inhibition through laser surface texturing*. Applied Materials Toda, 2025.

[22] Microbiologia Italia. *Quorum sensing: sistemi di regolazione coinvolti in numerosi meccanismi*. Articolo scientifico divulgativo, Microbiologia Italia, 2022.
(https://www.microbiologiaitalia.it/didattica/quorum-sensing/)

[23] Microbiologia Italia. *Escherichia coli, Scheda batteriologica ed approfondimenti*. Scheda biologica, Microbiologia Italia. (https://www.microbiologiaitalia.it/batteriologia/escherichia-coli/)

[24] Microbiologia Italia. *Staphylococcus aureus, Scheda batteriologica ed approfondimenti*. Scheda biologica, Microbiologia Italia. (https://www.microbiologiaitalia.it/batteriologia/staphylococcus-aureus/)

[25] Market Research Report. *Dimensioni del mercato laser, quota e analisi di settore [Rapporto di previsione 2035]*. Analisi di mercato industriale. (https://www.globalmarketstatistics.com/it/market-reports/laser-market-14460)

[26] Market Research Report. *Dimensioni del mercato della lavorazione laser e analisi globale [Rapporto di previsione 2034].* Analisi di mercato e tendenze tecnologiche. (https://www.globalgrowthinsights.com/it/market-reports/laser-processing-market-120915)

Ringraziamenti

Siamo giunti alla fine di questa prima parte del mio percorso universitario, dopo tre anni che, a dire la verità, non sono sembrati neanche così lunghi.
Mi sembra ancora ieri di essere seduto a quel banco ad ascoltare la prima lezione di Analisi, che all'epoca sembrava davvero un ostacolo impossibile.
Questo percorso mi ha dato tantissime soddisfazioni: mi ha messo alla prova, mi ha insegnato cosa sia la pazienza e mi ha fatto superare esami su argomenti mai trattati prima.
Mi porto dietro anche la bellissima esperienza di Parma, la mia prima volta da solo lontano da casa, anche se la compagnia non è mai mancata.
Il caos della città è stato un bel cambiamento rispetto alla tranquillità della mia San Marino, facendomi crescere tanto.
Voglio cogliere l'occasione per ringraziare il mio relatore, il Prof. Adrian Lutey, per l'aiuto e la disponibilità che mi ha dimostrato durante questi mesi di stesura della tesi.
Lo ringrazio per la pazienza e per la professionalità con cui mi ha affiancato tempestivamente ogni volta che ne avevo bisogno, permettendomi di realizzare un lavoro preciso e ordinato.
Un ringraziamento enorme poi va a tutta la mia famiglia.
In primo luogo, ai miei genitori, che mi hanno sempre supportato in questo percorso, lasciandomi provare e sbagliare senza mai mettermi pressione.
Lasciare i propri spazi, a mio avviso, è la forma migliore di sostegno, e grazie a questo sono riuscito a superare subito anche esami difficili, a volte con il vostro stesso stupore.
Vi ringrazio anche per l'aiuto che mi avete dato a Parma, non facendomi mai mancare nulla e permettendomi di vivere appieno questa esperienza.
Un grazie di cuore va ai miei nonni, che mi hanno sempre ascoltato e portato pazienza nei giorni di ansia e difficoltà, dandomi consigli preziosi.

Il vostro affetto e la vostra dolcezza in questi tre anni sono stati davvero fondamentali e mi hanno aiutato a superare diversi ostacoli.
Al di fuori della mia famiglia, ma che ormai a tutti gli effetti ne fa parte, voglio ringraziare Miriam.
Ci conosciamo praticamente dall'inizio di questo percorso e sei ancora qui al mio fianco.
Scusami davvero per i continui monologhi sullo studio e per averti messo addosso ansie inutili per esami che poi, puntualmente, superavo senza problemi, senza pensare che a volte avevi anche tu le tue cose a cui pensare.
Ti ringrazio per tutta la pazienza che hai avuto nel sopportarmi in questi anni: grazie a te ho preso più consapevolezza nei miei mezzi e spero davvero che nei prossimi due anni riuscirò ad affrontare tutto in modo più naturale, senza farti sorbire altri sfoghi continui... altrimenti, giustamente, dovresti iniziare ad alzare la tariffa! Scherzi a parte, grazie ancora per tutto il supporto che mi hai dato e, cosa più importante, ti amo tanto.
Grazie anche a tutti i miei amici che, chi più chi meno, ho stressato prima degli esami, in particolare alla "Mans League" per tutto il supporto scolastico e non solo.
Voglio però dedicare qualche riga in più al mio migliore amico, Diego.
Sei stato il mio compagno di classe e di banco fin dalla prima superiore. Grazie per avermi ascoltato e riascoltato anche quando avevi solo voglia di giocare o riposarti: eri sempre pronto ad aiutarmi e a darmi consigli quando ne avevo bisogno.
Quelle chiacchierate serali mentre giocavamo mi hanno permesso di staccare la spina e di studiare nei giorni seguenti con molta più tranquillità.
Per questo ti ringrazierò sempre.
Infine, voglio salutare e ringraziare due persone che ora purtroppo non ci sono più, ma che dall'alto mi hanno sempre custodito e aiutato: il nonno Fabio e la nonna Pina.
La nonna Pina è riuscita a vedere solo l'inizio del mio percorso, mentre il nonno Fabio purtroppo neanche quello.

Sono sicuro però che, anche se avrebbero tanto voluto essere qua a vedermi con la corona in testa, da lassù stiano sorridendo e festeggiando con me, pronti a guardarmi e guidarmi verso i miei prossimi traguardi.
Ringrazio ancora una volta tutti per il supporto che mi avete dato, e non vedo l'ora di iniziare una nuova avventura.