



Università degli studi di Padova
Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi Industriali
Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione

Corso di laurea Triennale in Meccanica e Meccatronica,
curriculum Meccatronico

Il LASER industriale: panoramica e innovazioni

Relatore: Chiar.mo Prof. PAOLO TENTI

Laureando: VALERIO SGNAOLIN

Anno accademico: 2015/2016





36100 VICENZA - Stradella S.Nicola, 3 - Tel. +39-0444-998711 - Fax +39-0444-998888
P.I. 00742430283 – C.F. 80006480281

INDICE

| | |
|--|----|
| ABSTRACT | 1 |
| | |
| CAPITOLO 1 – Definizione di laser | 3 |
| 1. Definizione | 3 |
| 1.1.Cenni sulla fisica della luce | 3 |
| 2.Breve excursus storico | 5 |
| 3.Esempi di applicazioni | 6 |
| 4.Proprietà ottiche | 8 |
| | |
| CAPITOLO 2 – Principio di funzionamento | 9 |
| 1.I processi coinvolti | 9 |
| 2. Condizione necessarie al lasing | 13 |
| 2.1.Inversione di popolazione | 13 |
| 2.1.1.Sistemi a tre livelli di energia | 13 |
| 2.1.2.Sistemi a quattro livelli di energia | 15 |
| 2.2.Analisi delle condizioni necessarie | 16 |
| 2.3.Cavità ottica | 18 |
| | |
| CAPITOLO 3 – Modalità di funzionamento | 21 |
| 1.Generalità: modalità di funzionamento continua e impulsiva | 21 |
| 1.1.Funzionamento continuo..... | 21 |

| | |
|---|----|
| 1.2.Funzionamento impulsivo | 22 |
| 2.Tecniche particolari | 22 |
| 2.1.Q-switching | 22 |
| 2.2.Mode-Locking | 24 |
| CAPITOLO 4 – Tipologie di dispositivi laser | 27 |
| 1.Laser allo stato solido | 28 |
| 2. Laser a gas | 29 |
| 2.1.Laser a gas neutro | 30 |
| 2.2.Laser a gas ionizzato | 30 |
| 2.3.Laser a gas molecolare | 31 |
| 3.Laser a semiconduttore (a iniezione) | 32 |
| 4.Laser allo stato liquido | 34 |
| CAPITOLO 5 – Applicazioni industriali del laser | 35 |
| 1.Il laser nell'industria | 35 |
| 1.1.Le tipologie più utilizzate | 36 |
| 1.2.Effetti del laser sui materiali | 37 |
| 1.3.Sfide produttive | 39 |
| 2.Pro e contro del laser industriale | 39 |
| 3.Individuazione dei concetti basilari per i processi industriali | 41 |
| 4.Descrizione dei processi industriali più importanti | 43 |
| 4.1.Foratura (drilling) | 43 |
| 4.2.Taglio laser (laser cutting) | 44 |

| | |
|---|----|
| 4.3.Saldatura (welding) | 46 |
| 4.3.1.Saldatura per conduzione (o per fusione) | 46 |
| 4.3.2.Saldatura per penetrazione | 47 |
| 4.3.3.Saldatura sui metalli non ferrosi | 50 |
| 4.3.4.Efficienza della saldatura laser | 50 |
| 4.4.I trattamenti superficiali | 51 |
| | |
| CAPITOLO 6 – Le nuove frontiere del laser | 55 |
| 1.Differenza tra laser <i>bulk</i> e <i>waveguide</i> | 55 |
| 2.La situazione attuale del mercato | 56 |
| 3.Uno sguardo al futuro: i laser a fibra | 57 |
| 3.1.Reticoli di Bragg in fibra (<i>Fiber Bragg's Gratings</i> , o FBG) | 58 |
| 3.2.I laser a fibra | 59 |
| 3.2.1.Struttura del laser a fibra | 60 |
| 3.2.2.Alta efficienza | 61 |
| 3.2.3.Diverse configurazioni per diversi scopi | 62 |
| 3.2.4.Applicazioni speciali: laser ad alta potenza | 63 |
| 3.3.Sviluppi futuri | 64 |
| | |
| BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA | 65 |

ABSTRACT

Questo elaborato si prefigge l'obiettivo di fornire al lettore una panoramica generale sul principio fisico e le proprietà del L. A. S. E. R. (o comunemente "laser"), le modalità di funzionamento con cui esso ha trovato spazio nell'ambiente scientifico e in quello industriale e le varie tipologie e i materiali che ne hanno permesso la realizzazione, per poi analizzarne le peculiarità che gli hanno permesso di affermarsi sul mercato per le applicazioni industriali più disparate, prendendo in esame, in particolare, i processi sui materiali metallici (ferrosi).

CAPITOLO 1

Definizione di LASER

1. Definizione

La tecnologia L. A. S. E. R., detto comunemente “laser”, consente la creazione di dispositivi in grado di emettere un fascio di **luce, coerente** ^(1, 2, 3, 4):

- nello *spazio*, permettendo la **collimazione** (da cui consegue un’alta brillantezza)
- nel *tempo*, così che lo spettro di emissione sia molto stretto (**monocromaticità**)

per mezzo di un’amplificazione ottica basata su un processo di emissione stimolata di radiazioni elettromagnetiche, da cui il nome:

Light

Amplification (by)

Stimulated

Emission (of)

Radiation.

Il termine si è talmente diffuso da assumere, in lingua inglese, i connotati di un verbo (“to lase”) a tutti gli effetti, cosicché con “lasing” si indichi l’attività stessa d’emissione di un raggio laser.

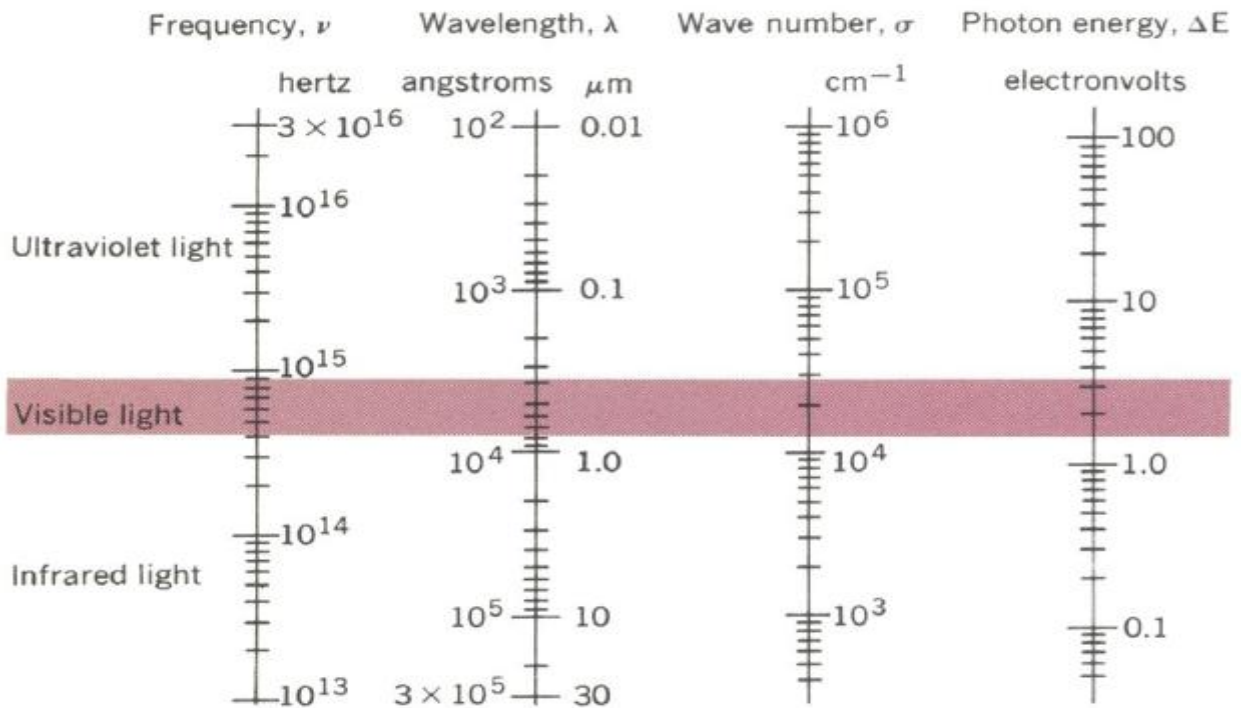
1.1. Cenni sulla fisica della luce

Nella fisica classica, la **luce** è considerata come una sovrapposizione di oscillazioni elettromagnetiche ^(2, 3), esprimibile analiticamente nella forma:

$$E = E_i \cos(2\pi\nu_i t + \varphi_i) \quad (1.1)$$

di ampiezza E_i , frequenza ν_i e fase φ_i definite. Fino alla metà del Novecento, malgrado gli sforzi per manipolare la luce in modo da renderla versatile e funzionale in campi d'applicazione sempre nuovi, appariva chiaro il limite che le fonti di luce tradizionali imponevano, ossia il fatto che fossero policromatiche: espedienti ottici (come i filtri, per esempio), per quanto riuscissero a dare una "quasi coerenza" alle radiazioni, portavano, alla fine, a una considerevole attenuazione indesiderata dell'intensità del raggio luminoso. Per quanto, in realtà, nemmeno i raggi laser siano perfettamente monocromatici, essi sono in grado di concentrare la quasi totalità della loro energia in una banda spettrale molto ristretta e ciò fornisce notevoli vantaggi nelle più svariate applicazioni. Con l'ideazione del laser, così, la luce assunse finalmente un nuovo ruolo nel mondo dell'industria: l'enorme potenziale di questa tecnologia cominciò da subito a offrire importanti spunti di applicazione e ricerca.

Le lunghezze d'onda che maggiormente coinvolgono la tecnologia laser vanno dai 0.3 ai $30\mu m$, cioè coprono una gamma che va dagli ultravioletti, alla luce visibile, sino agli infrarossi. Dalla tabella [Figura 1.1] ne vediamo i parametri principali in termini di frequenza ν , lunghezza d'onda λ , numero d'onda $\sigma = \frac{1}{\lambda}$ e energia fotonica ΔE .



Nomograph of parameters used to determine laser radiation. Wave number is the reciprocal of wavelength, and is expressed as reciprocal length. $1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ joule}$.

Figura 1.1

2. Breve excursus storico

Per capire le fondamenta teoriche su cui si basa la tecnologia laser, bisogna risalire, in primis, agli studi compiuti da Albert **Einstein**, il quale, nel 1916, ipotizzò che, nella formazione di una linea atomica spettrale, intervengano essenzialmente tre processi: emissione spontanea, emissione stimolata e assorbimento. A ciascuno di essi, egli associò un coefficiente (detto poi “di Einstein”) rappresentante una stima della probabilità che quel processo avesse luogo. Di qui, tuttavia, bisognò attendere sino al 1950 affinché l'équipe di C. H. **Townes** realizzasse il primo dispositivo funzionante che sfruttasse, nella pratica, le teorie di Einstein: venne così realizzato il primo sistema che sfruttava la tecnologia M. A. S. E. R. (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation, detta “maser”). Il desiderio di estendere, in qualche modo, i principi del maser (che lavorava appunto con le microonde) al campo degli infrarossi e della luce visibile, si impossessò del poliedrico uomo di scienza

Theodore **Maiman**, il quale, nel 1960, completò il primo laser a rubino a impulsi, avente una frequenza di $4 \times 10^{14} \text{ Hz}$ e una lunghezza d'onda di 6943 \AA . Negli anni Sessanta, di conseguenza, l'attenzione data ai fenomeni legati al laser esplose e, in pochi anni, furono ideati, ad esempio, laser a gas elio e neon eccitati (fine 1960), a *Nd:YAG* (1964), a *CO₂* (ossia il primo laser di potenza, sempre nel 1964), a rubino in modalità Q-switching (1965) e a vetro drogato con *Nd* in modalità mode-locking (1966); vedremo tali tipologie e metodi di funzionamento dei laser nei seguenti capitoli. Da allora, il laser prese il sopravvento in molti campi e la ricerca si indirizzò sia verso la messa a punto di nuove fonti laser, sia verso il miglioramento delle caratteristiche di quelli esistenti.

3. Esempi di applicazioni

Il laser sin da subito si mostrò estremamente versatile, al punto da venir presentato al pubblico dai suoi inventori come “una soluzione alla ricerca di un problema”. Già dagli anni immediatamente successivi alla sua invenzione, in effetti, di problemi contribuì ad affrontarne e risolverne tanti. Alcuni dei campi d'impiego del laser sono quello industriale, metrologico, di elaborazione e immagazzinamento dati, stampaggio, fin'anche quello medico (specialmente oftalmico).

Nella tabella di [Figura 1.2], estratta dal catalogo, tra i “Commenti”, sono presenti vari spunti d'impiego per il laser. Inoltre, è possibile individuare le caratteristiche peculiari in termini di tipo, lunghezza d'onda e potenza con cui le varie applicazioni sfruttano tale tecnologia.

I. Typical off-the-shelf lasers (see the January Laser Focus for a more comprehensive buyer's guide)

| Manufacturer | Model | Type | Wave-length | Trans-verse Mode | CW Power | Pulsed or Q-Switched Peak | Pulse Width | Operation Rep. Rate | Comments |
|--|-----------|-----------------|-----------------------------|--------------------------------|----------------------|---------------------------|-------------|---------------------|--|
| Avco Everett, Everett, Mass. | C950 | pulsed gas | 3371 Å (N ₂) | | 100 mW | 100 kW | 10 ns | single or | Uses include Raman spectroscopy, under-water ranging, and photochemistry Pumped by pulsed N ₂ laser |
| | C5000 | pulsed gas | 5401 Å (He) | | 3 mW | 10 kW | 3 ns | 1-100 pps | |
| | 1000 | tunable dye | 3371 Å (N ₂) | | 500 mW | 100 kW | 10 ns | 5-500 pps | |
| | | CO ₂ | 360-670 nm | | | (2-200 μJ/pulse) | 2-8 ns | single or 1-25 pps | Welds #304 2-cm stainless steel at 100 cm/min |
| Coherent Radiation, Palo Alto, Calif. | 41 (600) | CO ₂ | 10.6 μm | TEM ₀₀ | 250 W | 500 W* | 1-10 s | 1-100 pps | Adapted by Hughes as garment cutter for Genesco |
| | 42 (610) | CO ₂ | 10.6 μm | | 30 W | 100 W | 500 ns | 10 kHz | |
| | 52B/G, 53 | Ar-Kr ion | lines from 3507 Å to 7525 Å | TEM ₀₀ | 0.3 W(Kr) to 8 W(Ar) | | | 1-1000 Hz | Trims thick-film resistors to 0.1% ohmic tolerances |
| | 60 (660) | Nd:YAG | 1.06 μm | TEM ₀₀ higher order | 1.5 W | 600 W† | | 1 kHz | Model 52 is available as a photocoagulator with a 50-1000-μm focused spot Adapted by Teradyne for use at Motorola in precision resistor trimming of networks at 0.01% tolerances |
| GTE Sylvania, Mountain View, Calif. | 941 | CO ₂ | 10.6 μm | TEM ₀₀ | 3 W | | | | Frequency stabilities of 1 part in 10 ⁸ and 10 ⁹ make these systems applicable to telemetry, etc. |
| | 948 | CO ₂ | | | 5 W | | | | |
| | 948-1 | CO ₂ | | | 10 W | | | | |
| Holobeam, Paramus, N.J. | 350 | ruby | 6943 Å | TEM ₀₀ | | (40 mJ/pulse†) | 10-30 ns | 2 ppm | Used for holography |
| | 356 | Nd:YAG | 1.06 μm | TEM ₀₀ | | (30 mJ/pulse†) | 10-30 ns | 2 ppm | Holography |
| | 655 | ruby | 6943 Å | TEM ₀₀ | | (500 mJ/pulse†) | 1 ms | 4 ppm | Double-pulse output, single oscillator‡ |
| | 657 | ruby | 6943 Å | TEM ₀₀ | | (1 J/pulse†) | 1 ms | 4 ppm | Double-pulse output, dual oscillator‡ |
| | 602 | ruby | 6943 Å | | | 150 MW | 15 ns | 3 ppm | Passive dye cell Q-switching |
| | 603 | Nd:glass | 1.06 μm | | | 150 MW | 15 ns | 2 ppm | Same |
| Honeywell, Minneapolis, Minn. | 7000 | CO ₂ | 10.6 μm | TEM ₀₀ | 5 W | | | | "Sealed-off" unit has frequency stability of 1 part in 10 ⁸ at 0.1 second |
| | 5000 | CO ₂ | 10.6 μm | TEM ₀₀ | 3 W | | | | |
| | 3078H | HeNe | 6328 Å | TEM ₀₀ | 1 mW | | | | |
| | 3076H | | | | 3 mW | | | | |
| Hughes, Culver City, Calif. | 3070H | | | | 10 mW | | | | "Hip-Pocket" units are of rugged, weatherproof construction |
| | 3030H/X | xenon ion | 4954-5396 Å | | | >1 kW | 500-900 ns | | |
| | DC-4X | GaAs | IR | | | 10 W | 100 ns | | |
| Korad, Santa Monica, Calif. | KRT | Nd:YAG | 1.06 μm | | | 5 kW | 100-200 ns | 1.2-10 kpps | Used for thick- or thin-film resistor trimming, substrate scribing, and micromachining |
| | KSS22 | CO ₂ | 10.6 μm | | | 250-400 W | | 400-800 pps | Ceramic/glass substrate scriber; up to 15 cm/s |
| | KRT-12 | Nd:YAG | 1.06 μm | TEM ₀₀ | 500 mW | | | | Used at Motorola for thin-film resistor trimming |
| Metrologic Instruments, Bellmawr, N.J. | ML 310 | HeNe | 6330 Å | low-order multimode | 0.5 mW | | | | In general, this low-price line is suitable for student, teacher, and hobbyist alike, with accessory kits available for experiments in holography, interferometry, and communications. |
| | ML 311 | | | high-order multimode | 2 mW | | | | |
| | ML 360 | | | TEM ₀₀ | 0.7 mW | | | | |
| | ML 382 | | | TEM ₀₀ | 1 mW | | | | |
| | ML 410 | | | TEM ₀₀ | 1.6 mW | | | | |
| Metron, Providence, R.I. | ML 411 | | | multimode | 5 mW | | | | |
| | 130 | HeNe | | | 1 mW | | | | Alignment system for metal fabrication process |
| Raytheon, Waltham, Mass. | SS-136 | ruby | 6943 Å | | | | 0.6-1.5 ms | single to 1 pps | Micromachining; can be adapted to welding |
| | SS-117 | Nd:YAG | 1.06 μm | | | | | 1-20 pps | Micromachining, ceramic scribing |
| | SS-218 | Nd:YAG | 1.06 μm | | | | | 1-20 pps | Resistor/IC scriber |
| | SS-328 | Nd:YAG | 1.06 μm | | 12 W | | 400 ns | 5 kHz | Thick/thin-film resistor trimming |

* Pulsed operation. † Q-switched operation. ‡ From 0.2- to 0.5-ms pulse separation. § Nanosecond pulse separation possible.

Figura 1.2

4. Proprietà ottiche

Per comprendere al meglio il processo di amplificazione quanto-meccanica della luce operato da un dispositivo al fine di emettere un raggio laser, è opportuno dare delle brevi indicazioni sulle proprietà ottiche fondamentali che lo caratterizzano e ci permettono di gestirlo a nostra discrezione:

- **coerenza:** si riferisce alla relazione tra componente magnetica e componente elettrica di un'onda elettromagnetica. In particolare, il laser è considerato "coerente" nel momento in cui tali componenti sono allineate;
- **monocromaticità:** più è alto il suo livello, minore è l'ampiezza dello spettro di frequenze emesse (caso ideale: sinusoidale pura)
- **diffrazione:** è il processo attraverso cui la luce si piega quando cambia mezzo. I raggi laser sono diffratti solo in minima parte e ciò significa che perdono pochissima energia percorrendo una certa distanza in un mezzo;
- **radianza:** è la quantità di potenza per unità di superficie emessa ad un prefissato angolo solido. Questa caratteristica non può essere incrementata dalla manipolazione ottica, in quanto è influenzata unicamente dalla progettazione della cavità ottica del laser, la quale discrimina i modi ondulatori della luce interessati dall'amplificazione, come vedremo più avanti.

CAPITOLO 2

Principio di funzionamento

1.1 processi coinvolti

All'epoca dell'invenzione del laser, era noto già da più di mezzo secolo che tutti i sistemi atomici (cioè composti da atomi, ioni o molecole) possiedono degli **stati stazionari** (descritti da specifici numeri quantici), altresì detti **livelli** del sistema attorno a cui orbitano gli elettroni; nel caso due livelli abbiano la stessa energia, essi vengono detti "degeneri" e viene detta "**molteplicità** del livello" il numero di stati associati a quell'energia ⁽¹⁾. La generica transizione di un elettrone tra due livelli quantici, che si verifica qualora si presentino fenomeni di **emissione** (dal livello più alto al livello più basso) o **assorbimento** (dal livello più basso al livello più alto), provoca una **radiazione** (emessa o assorbita) di frequenza data dalla *legge di Bohr*:

$$\nu = \frac{E_n - E_m}{h} \quad (2.1)$$

dove E_n e E_m sono le energie degli stati n e m ($n > m$) e $h = 6,6256 \times 10^{-34} \text{ J s}$ è la costante di Plank.

Per capire il principio di funzionamento del laser, è necessario approfondire proprio la conoscenza di queste *transizioni di livello* ^(2,3):

i) **L'emissione spontanea** [Figura 2.1]

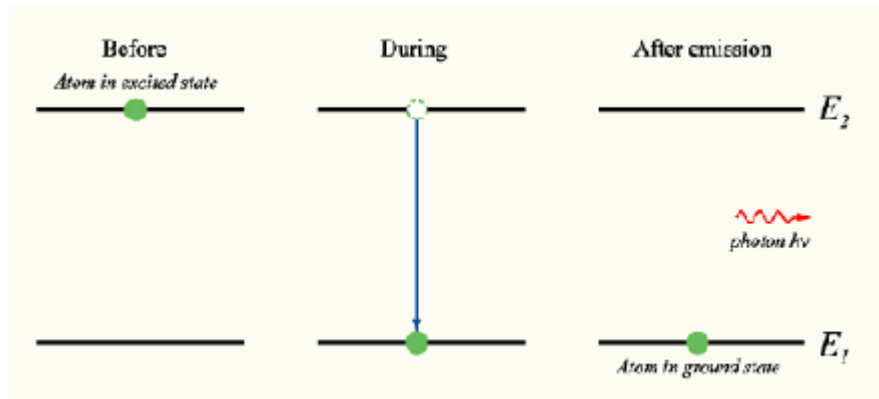


Figura 2.1

(già nota ai tempi di Einstein) e il processo per cui un elettrone decade spontaneamente (ossia in assenza di perturbazioni esterne) da un livello di energia E_2 a uno E_1 ($< E_2$), vuoto, emettendo, con probabilità A_{21} un fotone di energia $h\nu_{12} = E_2 - E_1$.

Le caratteristiche principali di tale transizione sono che:

- *la fase e il momento del fotone emesso sono completamente casuali;*
- *l'ampiezza e l'intensità del campo elettromagnetico crescono linearmente con il numero dei fotoni emessi, N .*

Il tasso di variazione nel tempo della densità di atomi allo stato 2, n_2 , dovuto a emissione spontanea è data dalla relazione:

$$n_2 = n_2(0)e^{-A_{21}t} = n_2(0)e^{-t/\tau_{21}} \quad (2.2)$$

ove τ_{21} è la vita media per emissione radiativa dell'elettrone sul livello 2 ed è pari all'inverso di A_{21} .

ii) **L'emissione stimolata** [Figura 2.2]

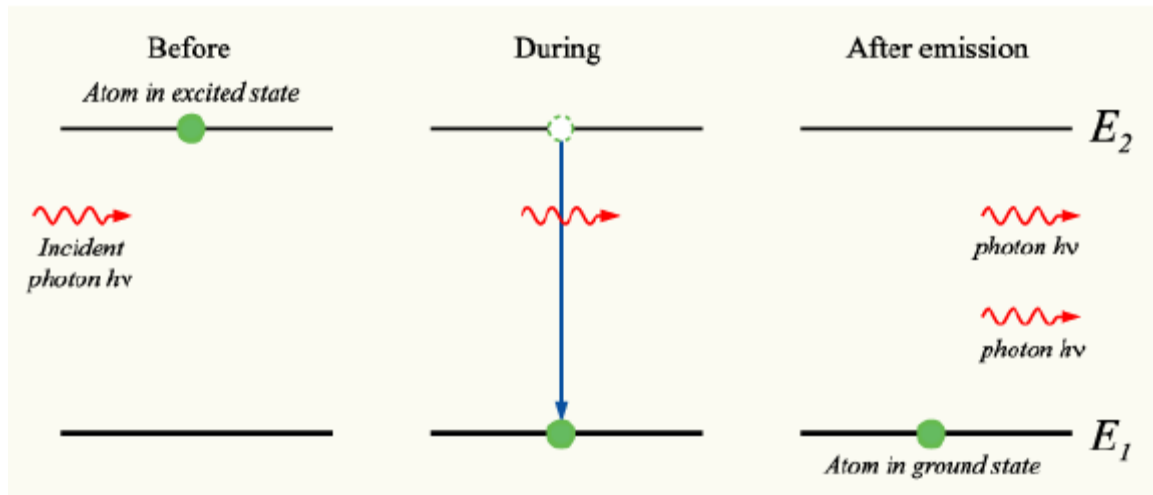


Figura 2.2

(nota anche come emissione “indotta”, ignota ai tempi di Einstein) è il processo per cui un elettrone è indotto a transire, con probabilità B_{21} , da un livello di energia E_2 a uno di energia E_1 ($< E_2$) dalla presenza di un campo elettromagnetico di energia $h\nu_{12}$ pari (o vicina) alla differenza di energia fra i due livelli.

Le caratteristiche principali di tale transizione sono che:

- *il secondo fotone creato è totalmente coerente con il primo: ha medesimi momento, fase, frequenza e polarizzazione del fotone incidente;*
- *l'ampiezza del campo magnetico cresce linearmente, ma l'intensità cresce quadraticamente con N , numero dei fotoni emessi.*

Il tasso di variazione nel tempo della densità di atomi allo stato 2 dovuto a emissione stimolata è data dalla relazione:

$$n_2 = n_2(0)e^{-B_{21}\rho t} = n_2(0)e^{-t/\tau'_{21}} \quad (2.3) \quad \text{con} \quad \tau'_{21} = \frac{1}{B_{21}\rho}$$

dove ρ è l'intensità del campo elettromagnetico e τ'_{21} è la vita media per emissione radiativa dell'elettrone sul livello 2 dovuta a emissione stimolata.

L'emissione stimolata, come si vedrà, è il processo quanto-meccanico di amplificazione ottica alla base del funzionamento di un laser o di un maser.

iii) **L'assorbimento** (stimolato)

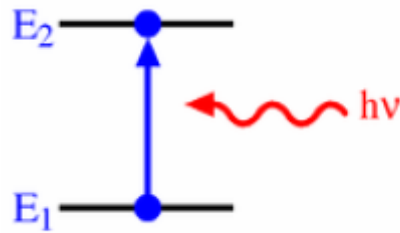


Figura 2.3

è il processo per cui un elettrone è indotto a transire, con probabilità B_{12} , da un livello di energia E_1 a uno di energia E_2 ($> E_1$) dalla presenza di un campo elettromagnetico di energia $h\nu_{12}$ pari (o vicina) alla differenza di energia fra i due livelli.

Il tasso di variazione nel tempo della densità di atomi allo stato 1 dovuto all'assorbimento è data dalla relazione:

$$n_1 = n_1(0)e^{-B_{12}\rho t} = n_1(0)e^{-t/\tau'_{12}} \quad (2.4) \text{ con } \tau'_{12} = \frac{1}{B_{12}\rho}$$

dove ρ è ancora l'intensità del campo elettromagnetico e τ'_{12} è la vita media per assorbimento radiativo dell'elettrone che salta dal livello 1 al livello 2.

Da questo esame dei tre processi, si nota un fatto assai rilevante nel funzionamento di un laser: nell'emissione stimolata, il secondo fotone ha la stessa fase, energia e vettore d'onda del primo, con cui è coerente; di conseguenza, in tale caso, l'intensità I_{em} del campo elettromagnetico cresce con il quadrato N^2 del numero di fotoni emessi, più velocemente, quindi, rispetto al caso dell'emissione spontanea (incoerente), la quale fa crescere l'intensità linearmente con il numero dei fotoni, N .

Se si riuscissero ad avere condizioni per cui l'emissione stimolata prevalesse sia sulla emissione spontanea che sull'assorbimento, si potrebbero avere sorgenti luminose coerenti e molto più intense di quelle convenzionali. Si ricercano difatti, caratteristiche soddisfacenti del raggio in termini di:

Direzionalità: $< 10^{-3} \text{ rad}$

Monocromaticità: $\Delta\nu / \nu \sim 10^{-12}$

Coerenza: focalizzabile su $1 \mu\text{m}$

Potenza: $10^{-3} \div 10^6 \text{ W}$

Velocità: $10^{-15} \text{ s} - \text{dc}$

2. Condizioni necessarie al lasing

Vediamo, ora, quali sono le condizioni affinché l'emissione stimolata possa portare all'amplificazione ottica e con che procedimento esse vengono ottenute.

Innanzitutto bisogna definire la condizione di “**inversione di popolazione**”, che si rivelerà fondamentale per il processo.

2.1. Inversione di popolazione

In meccanica statistica, si parla di un'inversione di popolazione quando, in un sistema costituito da un gruppo di corpi elementari (e.g. atomi) ci sono più corpi allo stato eccitato che in altri stati a minore energia. In un sistema a soli due livelli energetici è di fatto impossibile raggiungere l'inversione di popolazione in quanto vi è un'uguale probabilità di salto energetico in un senso o nell'altro. Si utilizzano infatti, nella pratica:

- a) sistemi a tre livelli di energia
- b) sistemi a quattro livelli di energia

2.1.1. Sistemi a tre livelli di energia

Sono i più intuitivi nella spiegazione del principio di funzionamento del laser e sono stati i

primi a essere utilizzati (laser a rubino di Maiman, 1960).

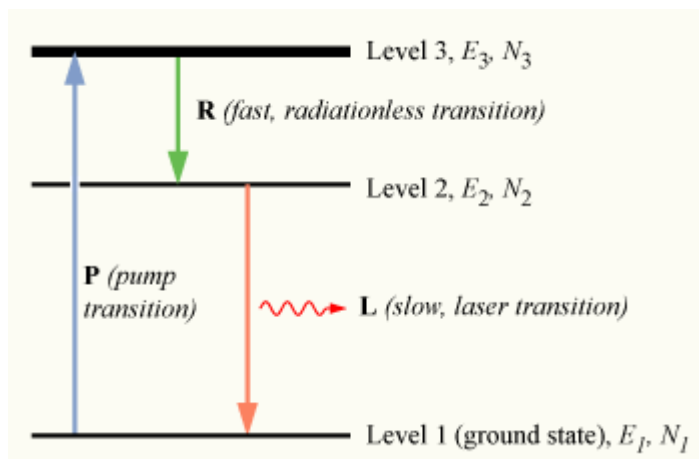


Figura 2.4

Si considerino tre livelli energetici 1, 2, 3 con energia $E_1 < E_2 < E_3$, e popolazioni, inizialmente $N_1 \cong N$ e $N_2 \cong N_3 \cong 0$. Se sottoponiamo gli atomi a una radiazione ν_{31} il processo di assorbimento ottico ecciterà gli atomi dallo stato fondamentale 1 a quello eccitato 3; questo processo viene detto di pompaggio (“**pumping**”) e può essere ottenuto anche per via elettrica o chimica, non solo ottica. Continuando ad alimentare questa transizione di pompaggio, un gran numero di elettroni verrà eccitato al livello 3, così che $N_3 > 0$. In un materiale (**medium**) per laser è normalmente richiesto che tali atomi transiscano rapidamente (nell'ordine di 10^{-8} s) dal livello 3 al livello 2, rilasciando un'energia usualmente non radiativa, bensì trasferita sotto forma di moto vibrazionale al materiale circostante. Tra gli stati 2 (metastabile) e 1 (fondamentale), invece, la transizione è più lenta (nell'ordine dei 10^{-6} s). In questo modo, gli atomi transitano velocemente attraverso il livello 3 (infatti $N_3 \cong 0$) per poi accumularsi nel 2 ($\tau_{32} \ll \tau_{21}$). Se più della metà degli N atomi si trova nello stato 2, allora si è raggiunta un'inversione di popolazione $N_2 > N_1$ e si può iniziare un'amplificazione ottica alla frequenza ν_{21} attraverso l'emissione stimolata.

N. B.: Poiché almeno metà della popolazione degli atomi deve essere eccitata dallo stato fondamentale per ottenere l'inversione di popolazione, il medium deve subire un pompaggio molto elevato, rendendo tale sistema a tre livelli sostanzialmente inefficiente rispetto alla seguente configurazione a quattro livelli, la quale richiede invece un apporto di energia esterna fornita dal pompaggio decisamente molto minore, migliorando di conseguenza il rendimento, in termini di rapporto tra energia fornita al sistema ed energia che esso eroga in uscita.

2.1.2. Sistemi a quattro livelli di energia

Materiali vari (vetri, plastiche, soluzioni liquide) drogati con terre rare i cui livelli energetici variano a seconda del reticolo ospitante, riescono a costituire sistemi a quattro livelli.

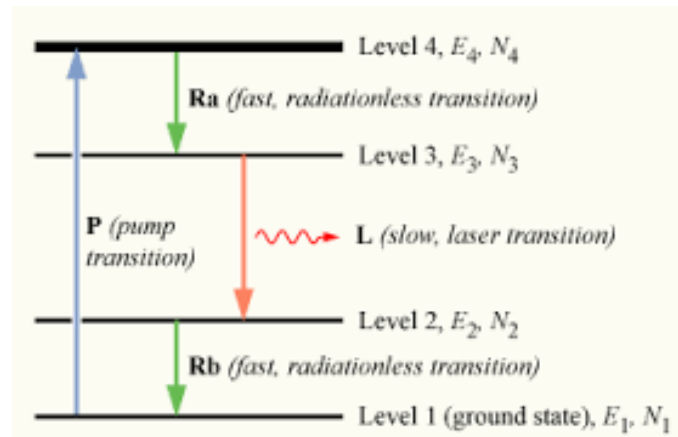


Figura 2.5

Si considerano, qui, quattro livelli 1, 2, 3, 4, con energie $E_1 < E_2 < E_3 < E_4$. Il pompaggio avviene tra il livello 1 e il livello 4 (banda di pompaggio), da cui segue un rapido decadimento non radiativo al livello 3 e poi uno laser, lento, al livello 2 (con la condizione $\tau_{43} \ll \tau_{32}$); la popolazione va quindi aumentando al livello 3 (*livello laser superiore*), dal quale avviene un rilassamento spontaneo oppure l'emissione stimolata verso il livello 2 (*livello laser inferiore*). Dal livello 2, infine, vi è un rapido decadimento non radiativo al livello 1.

Come prima, si nota che la popolazione della banda di pompaggio si svuota velocemente ($N_4 \approx 0$) ma, per di più, qui si svuota anche il livello 2, dal quale gli atomi si rilassano rapidamente verso il livello fondamentale ($N_2 \approx 0$). Ciò è importantissimo: anche il minimo accumulo di popolazione al livello 3 sarà sufficiente a comportare una situazione di inversione rispetto al livello 2: difatti, se $N_3 > 0$, allora $N_3 > N_2$. Di conseguenza, l'amplificazione avverrà ad una frequenza ν_{32} .

N. B.: Poiché è necessario che anche solo pochi atomi vengano eccitati nel livello laser superiore, questo tipo di sistema a quattro livelli è molto più efficiente di uno a tre livelli.

Nella pratica, si utilizzano più di quattro livelli, soprattutto si sfruttano diverse bande di pompaggio per avere un medium eccitato a un gran numero di lunghezze d'onda.

Si evidenzia, in ogni caso, che l'energia della transizione di pompaggio è maggiore di quella della transizione laser e che la frequenza della luce pompante deve essere maggiore di quella della luce laser.

2.2. Analisi delle condizioni necessarie

Analiticamente, definite σ_{21} la sezione d'urto [cm^2] per l'emissione stimolata e ΔN_{21} l'inversione di popolazione [cm^{-3}], si può dimostrare che il guadagno dell'emissione stimolata $\gamma_0(\nu) = \sigma_{21}(\nu)\Delta N_{21}[cm^{-1}]$, positivo se $\Delta N_{21} > 0$, è in competizione con l'assorbimento. Ci sarà dunque una soglia oltre a quale uno prevarrà sull'altro. Per tentare di trovarla, prendiamo in considerazione il caso particolare dell'*equilibrio termodinamico*, da cui evinceremo la condizione di soglia. I *coefficienti di Einstein*, che rappresentano probabilità fisse associate alle transizioni di ciascun atomo e che non dipendono dallo stato del mezzo di cui gli atomi sono parte, saranno gli strumenti con cui analizzeremo la questione.

All'**equilibrio termodinamico**, la popolazione dei vari livelli atomici deve essere costante nel tempo, e la sua variazione nulla. Ne segue che, per unità di tempo, all'equilibrio fra due livelli atomici e il campo elettromagnetico, l'incremento di popolazione del livello 2 dovuto a processi di assorbimento (dal livello più basso 1), dovrà essere bilanciato dal decremento dovuto ai processi di emissione (stimolata e spontanea) dal livello 2 stesso verso il livello 1, cioè:

$$0 = \left(\frac{dn_2}{dt}\right)_{tot} = -\left(\frac{dn_1}{dt}\right)_{ass} - \left(\frac{dn_2}{dt}\right)_{em,st} - \left(\frac{dn_2}{dt}\right)_{em,sp} = B_{12}n_1\rho(\nu_{12}) - B_{21}n_2\rho(\nu_{12}) - A_{21}n_2 \quad (2.5)$$

Ricavata l'intensità del campo magnetico $\rho(\nu_{12})$ e confrontata con la formula di Plank:

$$\rho(\nu_{12}) = \frac{1}{\pi^2 c^3} \frac{(h\nu_{12})^3}{e^{h\nu_{12}/kT} - 1} \quad (2.6)$$

dove c è la velocità della radiazione e T è la temperatura assoluta, si ricavano due condizioni necessarie per il funzionamento di un laser:

$$1) \quad \frac{g_1}{g_2} B_{12} = B_{21} \quad (2.7) \text{ dove } g_1 \text{ e } g_2 \text{ sono le molteplicità dei due livelli energetici}$$

$$2) \quad \frac{(h\nu_{12})^3}{\pi^2 c^3} B_{21} = A_{21} \quad (2.8)$$

Ciò implica che l'emissione spontanea domina su quella stimolata al crescere dell'energia del fotone emesso, poiché la prima cresce con il cubo dell'energia rispetto alla seconda. Di conseguenza, per far sì che il loro rapporto non sia troppo svantaggioso per l'emissione stimolata, lavorare a bassa energia ($h\nu$) pare una

situazione più favorevole.

Infatti, per avere l'effetto laser, è evidente che bisogna far sì che l'emissione stimolata sia maggiore dell'assorbimento; esaminandone il rapporto:

$$r_{em, st/ass} = \frac{B_{21}n_2\rho(\nu_{12})}{B_{12}n_1\rho(\nu_{12})} = \frac{B_{21}n_2}{B_{12}n_1} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{g_2}{g_1} e^{-h\nu_{12}/kT} \quad (2.9)$$

dove si è ipotizzato che in genere si possa approssimare $B_{21} \simeq B_{12}$; per l'inversione di popolazione è quindi meglio lavorare a bassa energia, in quanto l'emissione stimolata ha un rapporto sull'assorbimento che decade con andamento esponenziale: minore l'energia, minore la velocità di discesa di tale funzione. Affinché l'emissione stimolata predomini sull'assorbimento si deve ottenere una condizione di **inversione di popolazione** o di "temperatura efficace negativa".

Inoltre, l'emissione stimolata deve essere maggiore di quella spontanea e, siccome il loro rapporto è:

$$r_{em, sp/emst} = \frac{A_{21}n_2}{B_{21}n_2\rho(\nu_{12})} = \frac{A_{21}}{B_{21}} \frac{1}{\rho(\nu_{12})} = e^{h\nu_{12}/kT} - 1 \quad (2.10)$$

che diminuisce all'aumentare del campo elettromagnetico, c'è la necessità, di conseguenza, di una **cavità risonante** (vedi Par. 2.3) che amplifichi i modi di frequenza ν_{12} così da avvantaggiare l'emissione stimolata rispetto a quella spontanea.

Sostituendo con la (2.8), nell'ultimo passaggio, peraltro, ci accorgiamo che abbiamo la necessità che $\frac{h\nu_{12}}{kT} \ll 1$, cioè necessitiamo di lavorare ad alta temperatura e/o a bassa energia per contribuire alla massimizzazione dell'emissione stimolata rispetto a quella spontanea.

Sinteticamente, il processo di emissione laser si può riassumere nel seguente modo:

*Una sorgente esterna di energia stimola transizioni degli atomi dallo stato fondamentale a uno stato eccitato, creando **un'inversione di popolazione**, tramite un processo di **pompaggio**. Quando un campo elettromagnetico con fotoni di energia pari alla differenza di energia dei due livelli in questione interagisce con questi atomi a popolazione invertita, i*

fotoni stimolano gli atomi eccitati a emettere altri fotoni coerenti con loro, dando luogo a un'amplificazione dell'intensità del campo elettromagnetico (effetto laser).

Come abbiamo visto, le basilari condizioni necessarie per il lasing sono:

1) Inversione di popolazione (Par. 2.1)

2) Cavità risonante (Par. 2.3)

Alta T e bassa energia del campo elettromagnetico favoriscono il raggiungimento di queste due condizioni, ma vedremo che non sono strettamente necessarie. Storicamente, infatti, persino condizioni di bassa T ne agevolarono il funzionamento, motivo per cui la realizzazione del MASER (1954, C.H. Townes e A. Schawlow) precedette quella dei LASER (N. P. 1964, C. H. Townes, N.G. Basov e A. Prokhorov).

2.3. Cavità ottica

Per quanto siano probabilmente le forme di luce più pura dal punto di vista spettrale, nemmeno i laser hanno una sola frequenza, bensì producono uno spettro di frequenze caratterizzato da una peculiare larghezza di banda, la quale è influenzata, in primis, dalle caratteristiche del mezzo attivo che produce il raggio; in secondo luogo, poi, le frequenze di emissione di un laser sono determinate dalla cavità ottica (o cavità risonante).

Nel caso più semplice, la cavità consiste di due specchi piani affacciati l'uno sull'altro, che circondano il mezzo attivo del laser (questa disposizione è nota come cavità di Fabry-Perot). Rimbalzando sugli specchi, la luce interferisce costruttivamente o distruttivamente con se stessa, portando alla formazione di un set di onde stazionarie, dette *modi longitudinali* della cavità. Questo set rappresenta gli unici modi che la cavità lascia liberi di oscillare e di auto-rigenerarsi (tutti gli altri modi sono soppressi dall'interferenza distruttiva).

Per una cavità semplice a specchio piano [Figura 2.6], i modi consentiti sono quelli per cui la distanza tra gli specchi è un multiplo esatto della lunghezza d'onda interessata, ossia un particolare modo del campo magnetico si rinforza se la sua lunghezza d'onda λ è tale che $L = m \lambda/2$, ove L è la lunghezza della cavità ottica.

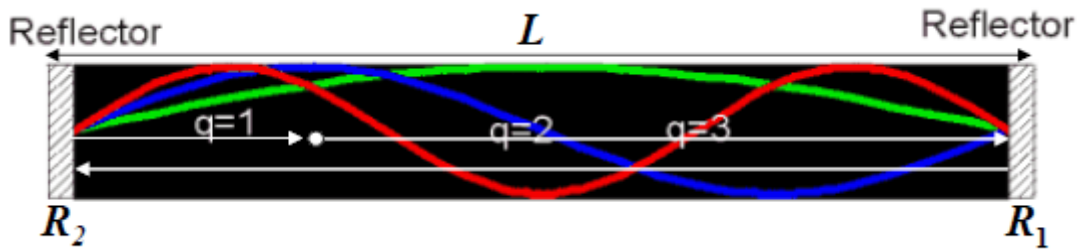


Figura 2.6

La **soglia** per aver amplificazione laser è determinata dalla relazione tra le intensità a due passaggi successivi n e $n+1$:

$$I_{n+1} = I_n R_1 R_2 e^{2gL - 2\alpha L - 2\alpha_c L} \geq I_n \quad (2.11)$$

evidenziando, equivalentemente, una condizione sul guadagno:

$$g_{net} = g - \alpha \geq g_{net,th} = \alpha_c - \frac{1}{2L} \ln(R_1 R_2) \quad (2.12)$$

dove

- g : guadagno dovuto all'emissione stimolata;
- α : perdite dovute all'assorbimento;
- α_c : perdite dovute a imperfezioni della cavità (modi di emissione stimolata non allineati alla cavità, emissione spontanea, energia laser estratta);
- R_1 e R_2 sono coefficienti legati alla riflessione dei due specchi.

Dall'espressione (2.11), quindi, risulta che l'amplificazione viene facilitata con la diminuzione di α e α_c e l'aumento di L . In generale, viene amplificato un numero molto alto di modi, fino a che uno domina sugli altri. Di qui, si articolano diverse modalità di funzionamento (*Cap.3*) e tipologie di laser (*Cap. 4*).

CAPITOLO 3

Modalità di funzionamento

1.Generalità: modalità di funzionamento continua e impulsiva

I laser possono essere classificati in base al tipo di uscita emessa (¹), cioè se essa è essenzialmente continua o formata da impulsi su una scala temporale. Ovviamente un laser essenzialmente continuo può essere acceso o spento in modo da ottenere degli impulsi: in tal caso, quando il tasso di modulazione è molto più lento, su scala temporale, rispetto sia alla vita media nella cavità che al periodo di tempo in cui l'energia può essere immagazzinata nel mezzo (o nel meccanismo di pompaggio), allora si parla di laser a onda continua "modulato" o "impulsivo".

1.1.Funzionamento continuo

Quando abbiamo un'uscita costante in potenza nel tempo, si parla di laser *continuous wave* (CW). In realtà, molti dei tipi di laser adattabili a questo funzionamento emettono contemporaneamente in diversi modi longitudinali e possono verificarsi delle piccole interferenze che provocano delle variazioni di ampiezza per periodi di tempo comunque inferiori al *round-trip time* (tempo di andata e ritorno di un fotone in moto all'interno della cavità ottica, solitamente dell'ordine di alcuni nanosecondi). Trascurando queste piccole alterazioni, questi tipi di laser si assumono essere a potenza mediamente costante, considerando quindi periodi più lunghi del round-trip time.

Il funzionamento in continua richiede, in particolare, che l'inversione di popolazione sia costantemente implementata da una fonte di pompaggio. In alcuni mezzi, ciò è impossibile; in altri, richiederebbe un pompaggio così elevato da risultare sconveniente o pericoloso: in questi casi, non si può operare in CW.

1.2.Funzionamento impulsivo

In questo caso, con il termine “impulso” (*pulse*), ci si riferisce all’uscita di un qualsiasi laser che non abbia funzionamento in CW. Nella fattispecie, la potenza si concentra sotto forma di impulsi di una certa durata temporale, con un certo tasso di ripetizione: ciò adatta la definizione a un'enorme gamma di dispositivi. Si fa presente che alcuni laser lavorano a impulsi solo perché non possono lavorare in continua.

In alcuni casi, l'applicazione richiede esplicitamente impulsi aventi il maggior ammontare possibile di energia; in questi casi si abbassa il tasso di ripetizione dell'impulso, permettendo l'accumulo di maggior energia tra uno e l'altro: ne è un esempio il caso delle tecniche di ablazione, in cui si fanno evaporare porzioni di materiale immettendo tutta l'energia in un breve impulso e non gradualmente (l'energia verrebbe altrimenti assorbita dalla massa pezzo). Altre applicazioni si basano sulla potenza di picco dell'impulso (piuttosto che sull'energia) per ottenere effetti ottici non lineari (impulsi più brevi possibile, per esempio con il Q-switching (Par. 3.2.1)).

La lunghezza di banda di un impulso non può essere più breve del reciproco della durata dell'impulso, perciò, per impulsi particolarmente brevi, troviamo larghezze di banda considerevoli, contrariamente alle tipiche bande strette dei laser in CW. Tecnologie recenti sono riuscite a produrre impulsi dell'ordine dei femtosecondi (10^{-15} s).

2. Tecniche particolari

Prenderemo in considerazione due tipologie di tecniche particolarmente utilizzate per la generazione di laser a impulsi, i quali, consentendo picchi di potenza d’uscita particolarmente elevati, trovano molte applicazioni in ambito industriale, specie nella lavorazione dei metalli: il Q-switching e il mode-locking (⁶).

2.1. Q-switching

Anche conosciuto come “tecnica di generazione di impulsi giganti” o “Q-spoiling”, il Q-switching è una tecnica che permette la generazione di raggi laser impulsivi con potenze di picco estremamente elevate (anche dell'ordine dei gigawatt). Comparato al mode-locking (Par. 3.2.2), esso fornisce sfortunatamente tassi di ripetizione dell'impulso molto più bassi, ma energia e durata di impulso molto maggiori. Tale risultato si ottiene inserendo un qualche tipo di **attenuatore** (otturatore) all'interno del risonatore ottico: durante il funzionamento

dell'otturatore, la luce che lascia il mezzo attivo non può tornare indietro e, quindi, essere amplificata. Di conseguenza, durante questo lasso di tempo, non viene consentita la produzione del raggio laser. L'attenuazione applicata si rappresenta analiticamente con una diminuzione del fattore di qualità Q della cavità ottica: in particolare, a un alto Q , corrisponde una perdita di energia bassa nel corso di un viaggio di andata e ritorno (*round-trip*) di un fotone.

I passaggi che costituiscono la tecnica del Q-switching sono i seguenti: all'inizio del processo di generazione del raggio, il mezzo viene pompato con l'otturatore attivo (quindi in una cavità a basso Q) in modo da prevenire il ritorno della luce all'interno del mezzo attivo. Ciò provoca, da un lato, un'inversione di popolazione dovuta al pompaggio, ma, dall'altro, non vi può essere emissione laser in quanto manca il feedback (e quindi l'amplificazione) del risonatore a causa dell'otturatore. In questo modo, dal momento che il tasso di emissione stimolata dipende dall'energia fornita dal pompaggio, l'energia immagazzinata nel mezzo aumenta con il passare del tempo; a causa, invece, delle perdite d'energia che si verificano nel mezzo (come per esempio quelle dovute all'emissione spontanea), a un certo punto, l'energia immagazzinata raggiungerà un livello massimo, detto di saturazione. A questo punto, il dispositivo Q-switch cambia velocemente il fattore Q da basso ad alto (si disattiva l'otturatore), consentendo il feedback e, dunque, l'amplificazione ottica da parte del risonatore mediante l'emissione stimolata. Per via della gran quantità di energia già immagazzinata nel mezzo, l'intensità della luce incrementa molto velocemente; di conseguenza, vi è uno svuotamento altrettanto rapido di energia. Si genera, come risultato netto dell'operazione, un breve impulso gigante di luce con un'altissima potenza di picco.

Vi sono due tipi principali di Q-switching:

- attivo: il Q-switch è un attenuatore variabile controllato dall'esterno. Può essere un dispositivo meccanico (otturatori a saracinesca, specchi/prismi rotanti, etc.) o, più spesso, un modulatore di tipo acustico-ottico o elettro-ottico (che consentono transizioni basso-alto di Q più rapide). L'evento di trigger che innesca la riduzione delle perdite (e quindi l'aumento di Q) è, solitamente, un segnale elettrico esterno e, perciò, il tasso di ripetizione degli impulsi può essere controllato con accuratezza;

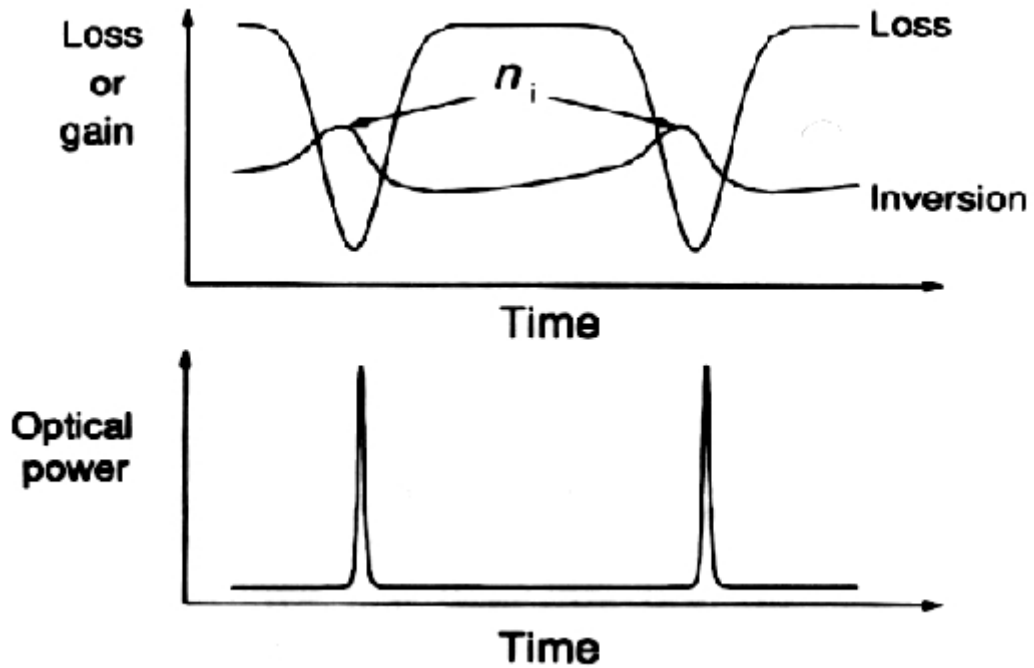


Figura 3.1

- passivo: in questo caso, il Q-switch è un “assorbitore saturabile”, ossia un materiale la cui capacità di trasmettere le radiazioni aumenta quando l'intensità della luce oltrepassa una certa soglia (es. un cristallo drogato con ioni come Cr:YAG, usato per il Q-switching di laser come quelli a Nd:YAG, ad esempio). Inizialmente, le perdite nell'assorbitore sono alte, permettendo l'immagazzinamento di molta energia nel mezzo, ma raggiunta la soglia di saturazione, l'assorbitore passa ad uno stato a basse perdite, permettendo la produzione di un impulso laser con scarica dell'energia accumulata. A seguito dell'impulso, l'assorbitore ritorna allo stato ad alte perdite, così che il prossimo impulso sarà ritardato nel tempo finché l'energia di saturazione non sarà ripristinata. Qui, è evidente che la frequenza di ripetizione degli impulsi può essere controllata solo indirettamente tramite la quantità di materiale assorbente presente nella cavità e la potenza della fonte esterna di pompaggio; si può raggiungere un controllo pressoché diretto, tuttavia, utilizzando una fonte di pompaggio impulsiva.

2.2.Mode-locking

Il mode-locking è una tecnica ottica per mezzo della quale è possibile produrre impulsi

luminosi della durata dei pico- o dei femtosecondi. La base della tecnica è introdurre una relazione di fase fissa tra i modi longitudinali della cavità risonante di un laser (che si dice, così, essere “phase-locked” o “mode-locked”). L'interferenza tra questi modi provoca la produzione del raggio laser come un treno di impulsi, di durata dipendente dalle proprietà intrinseche del tipo di laser.

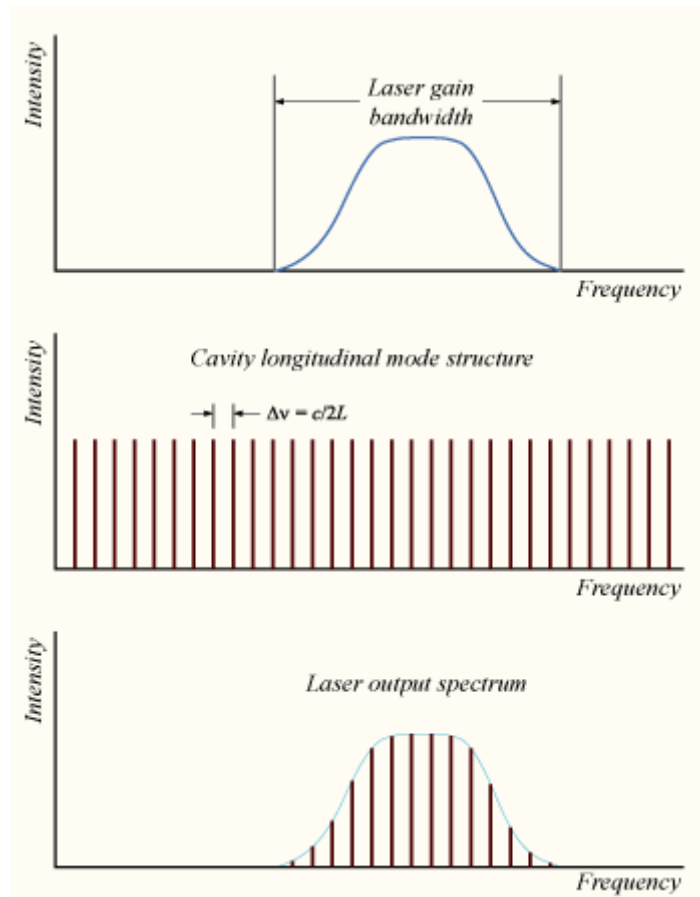


Figura 3.2

CAPITOLO 4

Tipologie di dispositivi laser

Possiamo identificare quattro grandi categorie di laser, basandoci sul tipo di mezzo utilizzato (¹); vi sono infatti laser:

- allo stato solido;
- allo stato gassoso;
- a semiconduttore;
- allo stato liquido.

Dalla tabella [Figura 4.1], si può notare la varietà di elementi utilizzati nella costruzione dei laser già dagli anni Sessanta:

Legend for laser types:

- S = solid-state laser
- N = neutral gas laser
- I = ion gas laser
- M = molecular gas laser
- L = liquid laser
- MM = microwave laser

| Period | IA | Transition metals | | | | | | | | | | III A | IV A | VA | VIA | VII A | 0 | | |
|--|-------------------|-------------------|-------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|-------|------|----|-----|-------|----|----|---|
| 1 | H | | | | | | | | | | | | | | | | He | | |
| 2 | Li | | | | | | | | | | | B | C | N | O | F | Ne | | |
| 3 | Na | | | | | | | | | | | Al | Si | P | S | Cl | Ar | | |
| 4 | K | Ca | Sc | Ti | V | Cr | Mn | Fe | Co | Ni | Cu | Zn | Ga | Ge | As | Se | Br | Kr | |
| 5 | Rb | Sr | Y | Zr | Nb | Mo | Tc | Ru | Rh | Pd | Ag | Cd | In | Sn | Sb | Te | I | Xe | |
| 6 | Cs | Ba | Rare earth metals 57-71 | Hf | Ta | W | Re | Os | Ir | Pt | Au | Hg | Tl | Pb | Bi | Po | At | Rn | |
| 7 | Fr | Ra | Actinide metals 89-103 | Ku | | | | | | | | | | | | | | | |
| * Number of electron shells surrounding the atom nucleus | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | Rare earth metals | | | | | | | | | | | | | | | | | | 6 |
| 7 | Actinide metals | | | | | | | | | | | | | | | | | | 7 |

Figura 4.1

1.Laser allo stato solido

I materiali, solitamente lavorati in forma di barra, con cui questi laser sono costruiti possono sia essere amorfi che presentare, invece, un reticolo cristallino. Normalmente, l'eccitazione atomica di questi mezzi è raggiunta mediante pompaggio ottico: in realtà, contribuisce effettivamente all'azione di lasing solo circa il 2% in peso del materiale (*active medium*), mentre il resto fa parte della matrice (*host*) che contiene il materiale attivo.

Sebbene i primi laser di questo tipo a essere inventati fossero a tre livelli, come quello a rubino ($Cr^{3+}:Al_2O_3$), per ragioni di efficienza, come abbiamo già visto nel Cap. 2, si utilizzano quelli a quattro livelli che, di solito, utilizzano atomi attivi o ioni di metalli di transizione, terre rare o attinidi, contenuti in una dura matrice cristallina o vetrosa. Hanno la capacità di generare lunghezze d'onda da 0,55 a $2,69\mu m$, con picchi d'intensità di molti megawatt (impulsi della durata di nanosecondi) grazie alla loro grande capacità di immagazzinamento di energia.

I laser cristallini hanno una più alta conducibilità termica e ingombri più ridotti (es. laser al rubino per la produzione di laser in impulsata nello spettro del visibile). I laser allo stato solido commercialmente più utilizzati sono quelli drogati con neodimio trivalente (Nd^{3+}) che produce le maggiori righe di emissione a 0.914, 1.06 (la più forte) e $1.35\mu m$ in matrici come $Y_3Al_5O_{12}$ (YAG), $YAlO_3$ (YALO) e $CaWO_4$: nello specifico, i più impiegati sono i laser a granato di alluminio e ittrio dopato con neodimio ($Nd:YAG$), i quali possiedono uno spettro di assorbimento così stretto da non consentire un accoppiamento effettivo con la sorgente di pompaggio ottico. Si sopperisce a questo inconveniente, di norma, aggiungendo alla matrice uno ione "sensibilizzatore" in grado di assorbire e trasferire l'energia di pompaggio e al contempo di adattarsi alla banda di assorbimento del neodimio.

Di tutti i laser a quattro livelli, a dare la maggior intensità di picco sono, invece, quelli a neodimio in matrice vetrosa. Il vantaggio è, principalmente, legato al processo tecnologico: è molto più facile formare lunghe barre di vetro rispetto ad accrescere grani cristallini in tale forma. Tuttavia, a causa della minor conducibilità termica del vetro, risulta più difficile operare in continua rispetto ai cristalli. Cionondimeno, le matrici vetrose possiedono qualità ottiche superiori e flessibilità di forma, indice di rifrazione modificabile e un coefficiente di temperatura adattabile alle varie cavità ottiche.

Inizialmente dal funzionamento puramente intermittente a causa dell'inadeguatezza delle fonti di pompaggio ottico, i laser allo stato solido sono stati portati in continua (*Continuous*

Wave, CW) con gradi di efficienza migliorati via via nel tempo (maggiori al 30% già dal 1966). La limitazione principale per le applicazioni di questi laser, sia in CW che Q-switched, consiste nel problema del controllo dei modi che, per grandi potenze di picco, si fa ancora più rilevante. Una possibile soluzione per il controllo dei modi risiede nella segmentazione del vetro, che genera un gradiente assiale con cui si possono realizzare modelli di potenza media dell'ordine dei kilowatt ("zig-zag lasers", [Figura 4.2]). Con una barra semplice di materiale, infatti, il pompaggio concentra l'eccitazione degli atomi al centro della barra, creando una distribuzione di energia differenziale e, dal momento che in impulsata il calore nel cuore del pezzo è più difficile da dissipare rispetto a quello sulla superficie, si genera anche una distribuzione di temperatura differenziale: con il design a zig-zag, questa disomogeneità viene eliminata perché il raggio incidente attraversa condizioni uniformi. Tale tipologia di laser è principalmente utilizzata come amplificatore dei raggi a bassa intensità di altri laser e la densità di potenza e la velocità di ripetizione elevate che ne risultano, rendono tali sistemi particolarmente adatti alle lavorazioni automatiche sui materiali.

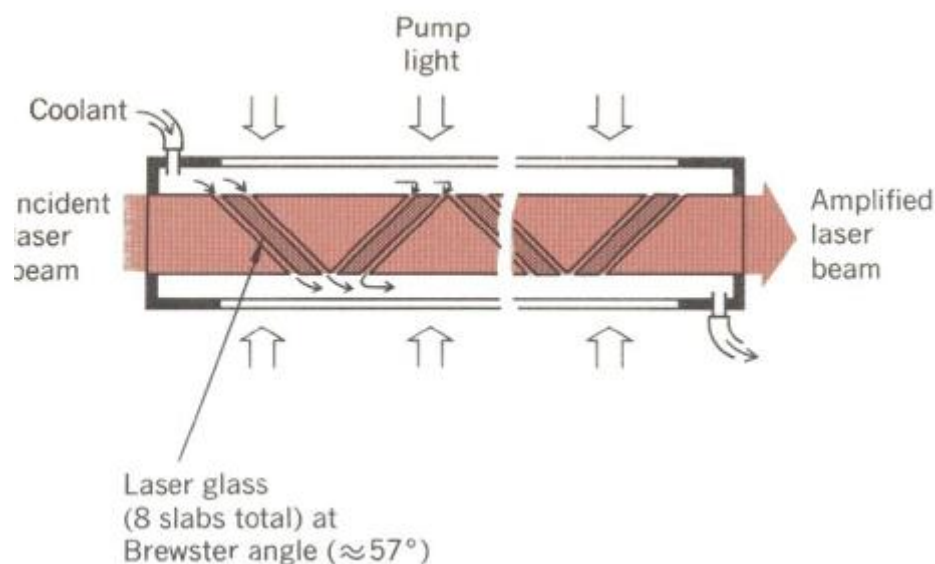


Figura 4.2

2.Laser a gas

Questo tipo di laser presenta picchi di potenza generalmente più bassi di quelli dei laser allo stato solido, tuttavia il guadagno per unità di lunghezza è molto buono e l'azione laser è tutto

sommato semplice da ottenere. Il funzionamento può avvenire sia in continua che in impulsata con potenze medie anche alte: in genere, laser a gas in CW sono più lunghi, più stabili e monocromatici, con uscite più direzionali dei laser allo stato solido. Grazie a tali caratteristiche, quindi, si adattano molto bene ad applicazioni come l'olografia, l'allineamento ottico e la comunicazione ottica, dove operano ad una singola frequenza.

I laser a gas si suddividono in tre tipi:

- a gas neutro
- a gas ionizzato
- a gas molecolare

2.1.Laser a gas neutro

Questi laser sono costruiti per lo più con gas nobili; il più famoso è quello a He-Ne , con matrice al 90% di He e al 10% di Ne attivo, con pompaggio effettuato tramite accelerazione di elettroni attraverso un campo elettrico tra due elettrodi (scarica o *discharge*). Può operare tipicamente a tre diverse lunghezze d'onda con altrettanti guadagni (in [mW/m]) diversi. Questi laser sono la fonte luminosa più vicina alla monocromaticità, ma il range di potenze in uscita sta tra 0.01 e 0.1 mW , quindi decisamente basso. Inoltre, hanno scarsissima efficienza: a 1W, l'efficienza è dello 0.001.

2.2.Laser a gas ionizzato

Nei laser a ioni, l'emissione stimolata avviene, appunto, tra due livelli di uno ione elettricamente carico e non in un atomo intero complessivamente neutro e ciò ha importanti implicazioni a livello di design dei componenti e per quanto riguarda il funzionamento specifiche per il ogni gas utilizzato. In generale, la ionizzazione comporta un guadagno in termini di potenza (picchi di decine di watt) e sposta l'emissione verso le alte frequenza, ma a scapito dell'efficienza. Oltre ai gas nobili, si possono ionizzare Hg, alogeni, elementi della famiglia di O e N; inoltre, è possibile, inoltre, utilizzare dei vapori metallici, per quanto i laser agli ioni di gas nobili siano più facili da maneggiare.

I laser a vapori di gas sono la promessa per il futuro perché riescono a unire una buona efficienza e alte potenze di picco. Si classificano in due classi:

- laser continui a ioni metallici: utilizzano cadmio, selenio, zinco, piombo o stagno mescolati a gas come l'elio, producendo potenze fino a qualche centinaio di milliwatt;
- laser impulsivi ad alto guadagno: utilizzano piombo o rame (ma anche calcio, manganese e stronzio) arrivando a potenze anche di decine di kilowatt, richiedendo tuttavia alte temperature di funzionamento.

2.3.Laser a gas molecolare

Nei gas molecolari, le dinamiche vibrazionali e rotazionali rendono lo stato del sistema molto più complesso di quello dei più semplici stati di energia atomici. Il più importante di questi dispositivi, nonché quello su di cui la ricerca si è concentrata maggiormente, è il laser a CO_2 che ha due gruppi di oscillazioni, uno a $9.6 \mu m$ e l'altro a $10.6 \mu m$, il secondo dei quali sostiene un funzionamento in CW fino a un'efficienza che, generalmente, non supera il 40%. Il pompaggio può essere sia elettrico, che ottico o chimico, con uscite talvolta aumentate dall'aggiunta di altri gas (come elio e azoto nei laser a CO_2 , per esempio). I laser a CO_2 , grazie alle loro elevata potenza, sono eccellenti in applicazioni come taglio, saldatura, riscaldamento, evaporazione, perforazione e altri tipi di processi sui materiali.

Sono stati trovati dei **gas che non richiedono pompaggio** esterno per compiere l'inversione di popolazione:

- nei laser *gasdinamici*, grazie all'eccitazione termica, si sono riusciti a costruire laser con potenze di decine di kilowatt in CW.
- nei laser *chimici*, una reazione che avviene nel mezzo dà dei prodotti termicamente eccitati che emettono nell'infrarosso. Questi laser raggiungono l'inversione di popolazione direttamente dalla reazione chimica in prodotti come HF e CO e tale eccitazione può a sua volta trasmettersi a un secondo gas molecolare. Tuttavia si riscontrano problemi legati alla corrosione o alla pericolosità dei carburanti e delle scorie della reazione, i quali provocano, peraltro, oscillazioni parassite nella cavità ottica.

3.Laser a semiconduttore (a iniezione)

Mentre l'emissione nei laser allo stato solido e in quelli a gas è direttamente legata alle transizioni tra i diversi livelli di energia di singoli atomi o molecole, l'emissione in un laser a semiconduttore risulta da strutture parecchio più complesse lungo tutto il cristallo: i livelli energetici dei semiconduttori sono raggruppati in **bande** separate da gap di energia proibita, le più basse delle quali, a riposo, sono completamente riempite di elettroni. In semiconduttori estrinseci (o “drogati”), i portatori di corrente sono formati aggiungendo delle impurità:

- di tipo “donatore”, che causano un eccesso di elettroni nella banda di conduzione, creando semiconduttori di tipo *n*;
- di tipo “accettore”, che causano un eccesso di lacune nel mare di elettroni nella banda di valenza, creando semiconduttori di tipo *p*.

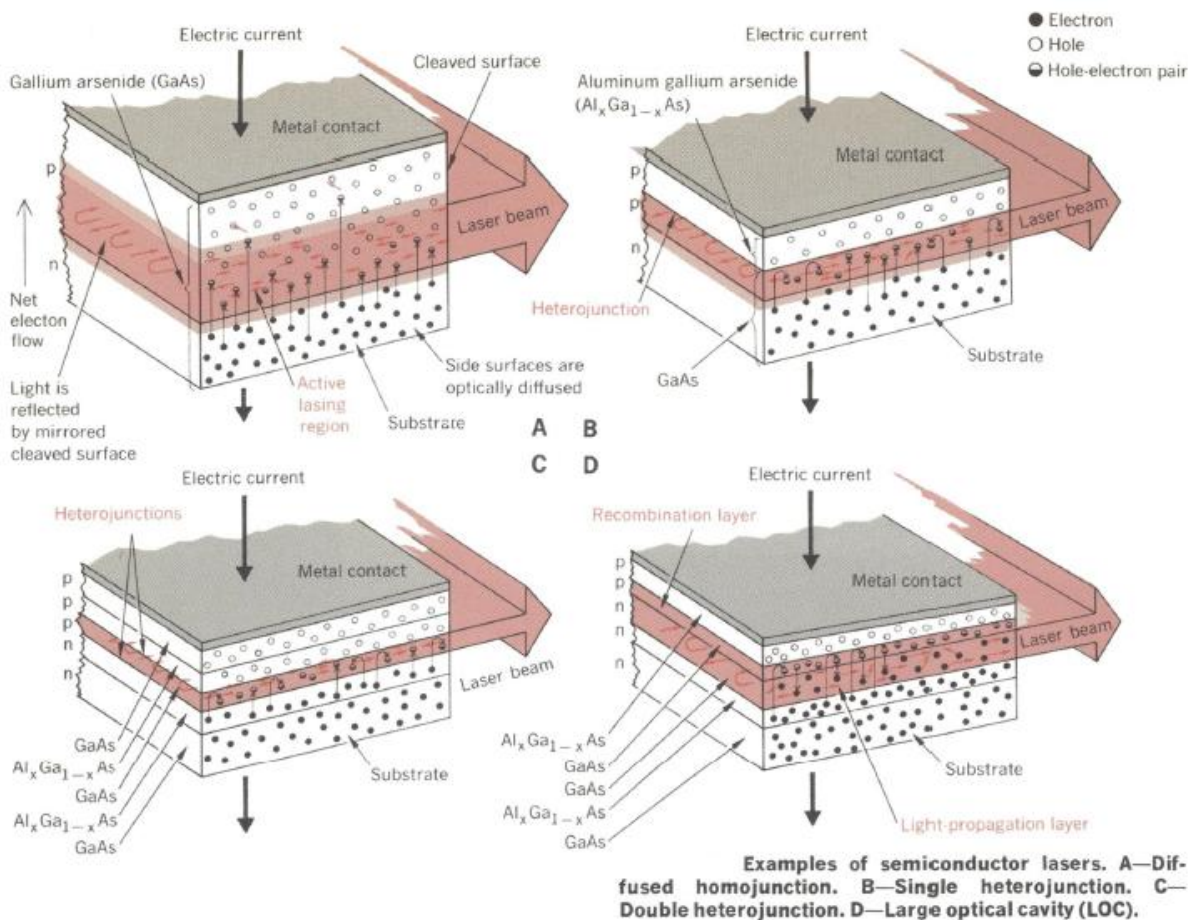
L'emissione luminosa è ottenuta all'interfaccia di una *giunzione n-p* ogniqualvolta vi sia un'iniezione di portatori: un tipico laser a **omogiunzione** [Figura 4.3.A] è costituito da un singolo wafer di elementi del III e V gruppo (come *GaAs*, per esempio) drogati da una parte con un donatore (come *Te*) e dall'altra con un accettore (come *Zn*). La lunghezza del wafer di solito è di *1 mm*, con un'ampiezza dell'area di giunzione dell'ordine di 10^{-4} cm^2 , con spessori di qualche micrometro. L'azione laser, che è dunque il risultato della radiazione provocata dalla ricombinazione delle coppie elettrone-lacuna, è apprezzabile già a piccole densità di corrente e, a mano a mano che quest'ultima cresce, vi è una variazione lineare dell'intensità luminosa, ma solo fino a un livello di soglia: a questo punto, entra in gioco l'emissione stimolata che fa sì che l'intensità del raggio incrementi rapidamente e la lunghezza di banda si riduca. La larghezza di spettro risultante, tuttavia, è di diversi ordini di grandezza maggiore di quella dei gas allo stato solido (a causa delle variazioni nella distribuzione di atomi accettori e donatori); a questo, unitamente a energie di uscita molto ridotte rispetto a quelle degli altri laser succitati, i laser a semiconduttore a omogiunzione sopperiscono con un'efficienza molto alta, intorno al 70%.

Sfortunatamente, le proprietà dei semiconduttori sono strettamente dipendenti dalla temperatura e ciò ne limita l'impiego o a temperature molto basse (temperature dell'azoto liquido, *77 K*) in continua o al solo funzionamento in impulsata a temperatura ambiente.

I più recenti miglioramenti alla famiglia dei laser a semiconduttori sono quelli a **eterogiunzione**, estremamente piccoli e possono essere alimentati da batterie. Essi sono in grado di operare con molta meno corrente rispetto a quelli a omogiunzione e possono quindi operare a temperatura ambiente. Il motivo per cui richiedono meno corrente di quelli a

omogiunzione è dovuto al fatto che presentano una regione attiva sensibilmente più stretta, abbassando di molto il livello di soglia richiesto: con una singola eterogiunzione [Figura 4.3.B], la zona attiva misura circa $2\ \mu\text{m}$, mentre con una doppia eterogiunzione [Figura 4.3.C] può essere anche più stretta di $0.2\ \mu\text{m}$. Operare con dimensioni così ristrette, tuttavia, è estremamente delicato e può portare a malfunzionamenti.

I problemi relativi a regioni attive troppo strette sono stati risolti grazie a dei laser ad ampia cavità ottica (**LOC**, Large Optical Cavity) [Figura 4.3.D]: questi dispositivi mettono da parte il funzionamento usuale dei laser a eterogiunzione, basato sulla generazione e propagazione della luce dalla regione attiva stessa, eseguito piazzando un sottile strato di ricombinazione p vicino a uno più largo di propagazione n . Invece di lasciare che molta luce venga così assorbita dalla regione attiva, nei dispositivi LOC essa viene propagata da uno strato passivo non-assorbente: si raggiungono così potenze di picco maggiori utilizzando una regione estesa di cavità ottica piuttosto che strette giunzioni $p-n$. Infatti, laser LOC sono costruiti con regioni attive di circa $30\ \mu\text{m}$ e con un'efficienza del 40-60%. Grandi speranze risiedono in questo tipo di laser per quanto riguarda lo sviluppo delle telecomunicazioni su lunghe distanze.



4.Laser allo stato liquido

Simili per configurazione dei livelli energetici ai laser allo stato solido, una differenza fondamentale tra i laser allo stato liquido e quelli allo stato solido risiede nella dilatazione termica, così alta in quelli allo stato liquido da dover apportare contromisure adeguate. I laser allo stato liquido, inoltre, oltre a costare relativamente poco, producono potenze medie più alte rispetto a quelli allo stato solido, con conseguente miglioramento dell'efficienza in termini di dissipazione termica. Ci sono tre tipi principali di laser di questa categoria:

- a chelati di terre rare (che sono composti metallo-organici), in cui l'eccitazione inizia dalla parte organica per poi trasferirsi agli ioni metallici. In essi si verifica un elevato assorbimento della frequenza di eccitazione, relegando l'effetto laser all'interno dei tubi chelati, i quali presentano, tuttavia, il forte svantaggio di variare le loro caratteristiche spettrali a causa dell'ambiente incontrollabile. Dissipando una quantità ingente di calore, inoltre, questi laser necessitano di refrigerazione;
- a composti inorganici del tipo *Nd:liquido*, molto efficienti, con soglie di lasing a energie relativamente basse. Possono anche essere usati a temperatura ambiente, ma, purtroppo, sono molto tossici e corrosivi;
- a coloranti organici, composti da materiali attivi fluorescenti dissolti in un solvente, possono essere eccitati sia da altri laser che da lampade stroboscopiche ad alta velocità. La loro principale caratteristica è l'adattabilità (particolarmente utili nel riconoscimento di agenti inquinanti nell'aria).

CAPITOLO 5

Applicazioni industriali del laser

1. Il laser nell'industria

Il laser, per quanto ancora oggetto di ricerca, uscì ben presto dai laboratori per trovare svariate applicazioni in ambito industriale, grazie alla sua capacità di fornire enormi quantità di energia termica con elevatissima accuratezza e a grande velocità (⁶). Particolare attenzione fu rivolta sin da subito alle lavorazioni sui materiali, come l'indurimento superficiale, il taglio, la foratura, l'incisione, l'intaglio, la saldatura e la rimozione di materiale. I tipi di materiale su cui si applica il laser sono i più disparati: metalli, plastiche, ceramici, gomma, legno, tessuto, semiconduttori e cristalli, come persino il diamante. Le ragioni del successo commerciale del laser nell'industria riguardano, in primis:

- l'affidabilità, che porta a periodi di inattività delle macchine molto contenuti all'interno del processo produttivo
- l'adattabilità alle innovazioni tecnologiche dei materiali stessi
- il controllo computerizzato, che porta a una grande versatilità e al controllo sistematico delle variabili del processo.

Sebbene spesso il laser si trovi a competere con altri processi tecnologici affermati come getti gassosi, scariche elettriche, archi plasmatici e raggi di elettroni, spesso, in realtà, può fungere da loro complemento nel processo produttivo, se non da sostituto. In tabella [Figura 5.1], vengono riportati gli aspetti da considerare nella valutazione della convenienza della produzione per mezzo di laser.

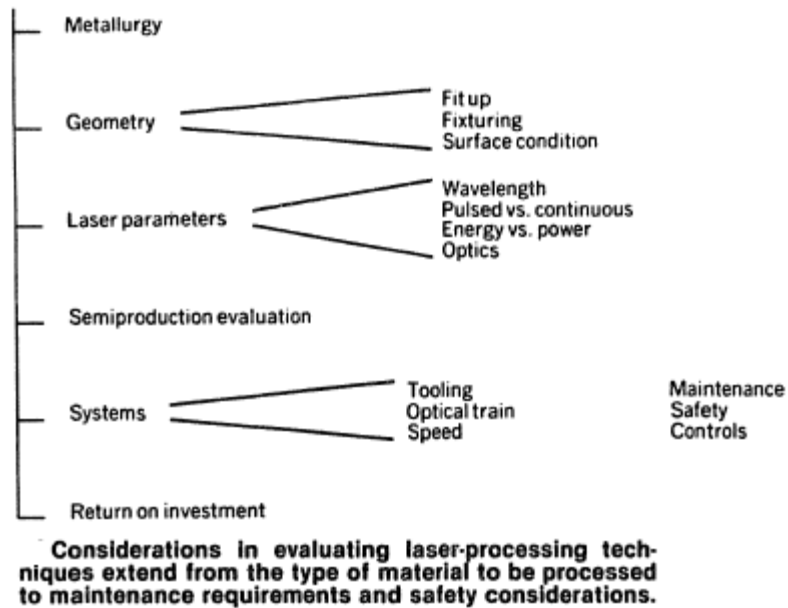


Figura 5.1

1.1. Le tipologie più utilizzate

I due tipi di laser maggiormente impiegati in campo industriale sono quello a $Nd:YAG$ e quello a CO_2 :

- $Nd:YAG$ [Figura 5.2.A], ha una lunghezza d'onda principale di $1.06 \mu m$ ed è utilizzato soprattutto in lavorazioni di precisioni su metalli fini, nell'incisione di wafer di silicio e nel trimming di reti di resistenze; le potenze in gioco variano dai $10 - 10^3 W$ in continua ai $10^4 W$ in impulsata;
- CO_2 [Figura 5.2.B], ha una lunghezza d'onda di $10.6 \mu m$, fornisce una potenza maggiore, dell'ordine dei $1 - 20000 W$ in continua, fin'anche ai $10 MW$ in impulsata, il che consente lavorazioni sui metalli più pesanti.

Nel campo dei $0.1 - 1 kW$, vi è, quindi, una sostanziale sovrapposizione tra i settori di applicazione dei due tipi di laser; nella pratica, ciò risulta evidente in attività come la saldatura e la placcatura dei metalli. Entrambi i tipi di laser, poi, sono utilizzati ovviamente anche per lavorare materiali differenti dai metalli.

A basic solid-state or Nd:YAG laser (A) consists of a crystal rod as the lasing medium, an arc or flash lamp as the excitation source, and an optical cavity made up of a pair of reflector mirrors. A basic CO₂ laser (B) consists of a gas mixture in a discharge tube as the lasing medium, a high-voltage power supply as the excitation source, and an optical cavity of two mirrors.

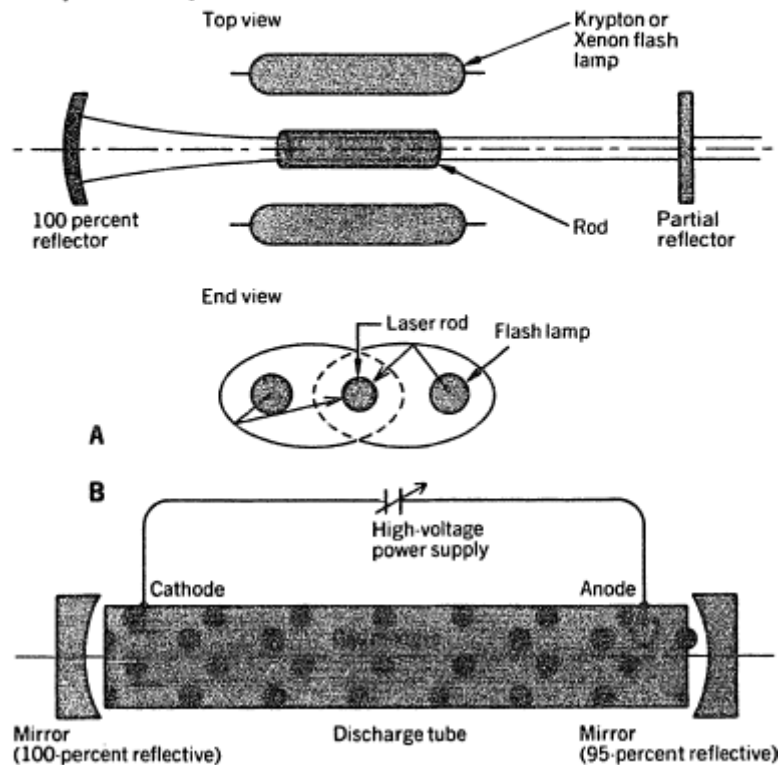


Figura 5.2

1.2. Effetti del laser sui materiali

Per quanto riguarda le lavorazioni sui materiali, sebbene la natura stessa del singolo dispositivo laser sia un fattore fondamentale, essa non è l'unico fattore a determinare l'effettiva densità superficiale di potenza sul pezzo: concorrono, difatti, diversi fattori, quali l'impiego dell'ottica nella collimazione della luce, la distanza tra la sorgente del raggio e l'oggetto da lavorare, la modalità di funzionamento e il suo livello di potenza, lo spessore del pezzo, la durata dell'intervallo temporale d'applicazione. L'opportuna modulazione di questi parametri, facilmente monitorabile da un computer, può renderci in grado di giungere a:

- **sub-fusione**, per applicazioni come cambiamenti di fase, ricottura e tempra
- **fusione**, per applicazioni come saldatura, placcatura e alligazione
- **vaporizzazione**, per applicazioni come taglio, foratura, rimozione di materiale, cavitazione, incisione, rifinitura, ecc..

Nel seguente diagramma ad albero [Figura 5.3], sono sintetizzati, a titolo d'esempio, i comportamenti dei vari metalli e non-metalli in risposta a un laser a CO_2 :

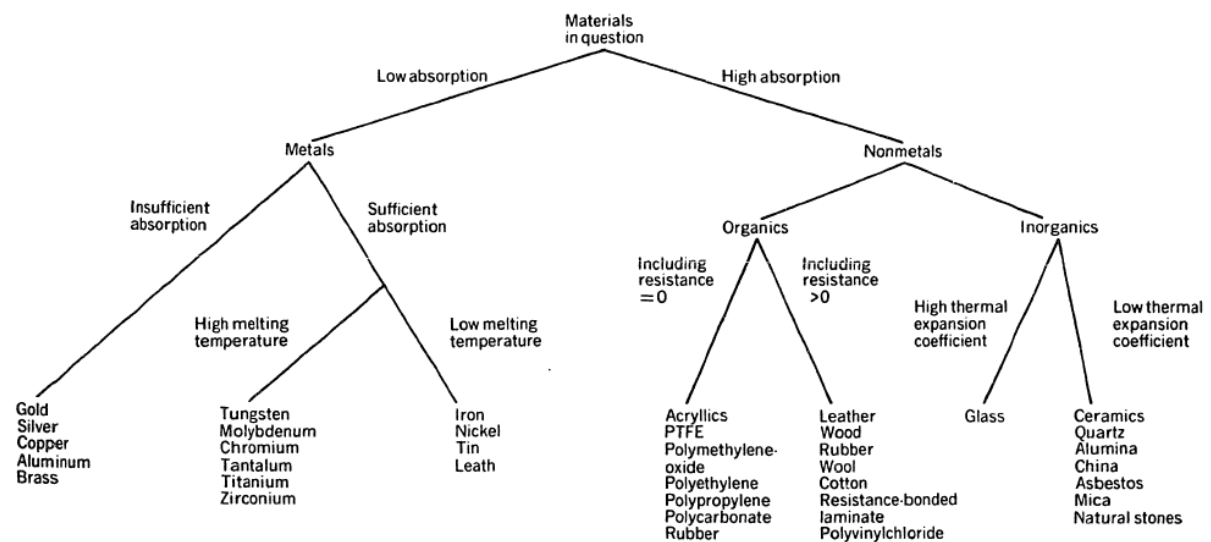


Figura 5.3

come si nota, i metalli assorbono un quantitativo inferiore di energia dal raggio laser rispetto ai non-metalli, riflettendone, invece, di più. Talvolta, in applicazioni come i trattamenti termici, ciò diventa un ostacolo e la capacità di assorbimento deve essere implementata mediante processi chimici a monte. Per i metalli, inoltre, si è notato che l'energia di un laser a *Nd:YAG* a $1.06 \mu m$ viene assorbita più prontamente rispetto a quella a $10.6 \mu m$ di un laser a CO_2 , ma l'uscita più elevata in potenza di quest'ultimo fa passare in secondo piano tale aspetto che pareva svantaggiare l'impiego.

Il **trattamento dei metalli** è, in assoluto, l'attività più gettonata per quanto riguarda l'applicazione del laser nell'industria. I due processi più diffusi sono la **saldatura** e l'**indurimento superficiale** su acciaio o ghisa (oppure su alluminio, magnesio, titanio o leghe varie), declinati sia in campo meccanico (per esempio indurimento superficiale degli ingranaggi nell'automotive) che elettronico (ad esempio, la saldatura delle guarnizioni circolari dei pacemaker o delle batterie al litio). Nel caso di campi d'applicazione particolarmente raffinati come quello aerospaziale, i laser riescono spesso ad adempiere a compiti altrimenti impossibili, o per l'estrema complessità geometrica della lavorazione, o per le peculiarità del materiale in utilizzo. Il laser offre un'eccellente alternativa ai metodi tradizionali anche per applicazioni come:

- lo stampaggio, l'incisione e la marcatura (per mezzo della vaporizzazione), specie di prodotti troppo piccoli o fragili; il vantaggio principale risiede nel controllo automatico per mezzo di un calcolatore, fattore che rende più veloce, accurata e flessibile l'intera

operazione;

- il taglio di modelli complessi di abiti in ambito tessile;
- il trimming automatico di reti ibride di resistori e condensatori (mediante vaporizzazione) e l'incisione di wafer di silicio (spesso con substrati di allumina o di altri ceramici)

Il laser ha aperto la strada anche a svariati **processi su materiali non-metallici**, poiché la maggior parte di essi assorbe quantità rilevanti di energia dalla radiazione a $10.6 \mu m$ del laser a CO_2 , siano essi composti organici o inorganici, acrilici, polietileni, legno, gomma, lana, diamanti, specialmente per applicazioni come la foratura e la saldatura di materiali plastici e gommosi mediante l'impiego di medie potenze ($50 \div 500 W$).

1.3.Sfide produttive

Per quanto un laser solitamente compia molto bene il proprio lavoro, il suo costo elevato è un ostacolo notevole nel suo impiego su vasta scala. Inoltre, può essere che l'ambiente industriale non sia adatto all'utilizzo del laser: le forti vibrazioni che i macchinari provocano, oltre a scintille, calore e polvere, possono compromettere il funzionamento ottimale del laser, il quale deve operare entro tolleranze strettissime. Come se non fossero già stringenti le condizioni ambientali, in un impianto industriale, ovviamente, devono venire soddisfatte norme di sicurezza molto cautelative, le quali implicano ulteriori accorgimenti e costi per il sistema laser. Un altro limite sono le differenti prestazioni a causa di variazioni di riflettività o di materiale che si verificano anche nella lavorazione dello stesso pezzo.

Un passo determinante nell'industrializzazione del laser è l'ottenimento di un controllo in catena chiusa del sistema sfruttando microcontrollori a basso costo e circuiti integrati per il riconoscimento automatico dei modelli, minimizzando così i costi per l'addestramento speciale degli operatori.

2.Pro e contro del laser industriale

Rispetto ad altri processi sui materiali, l'utilizzo del laser presenta dei considerevoli vantaggi:

- il raggio laser opera a distanza, senza contatto, riducendo quindi il rischio di contaminazioni;
- il riscaldamento localizzato confina la concentrazione di calore attorno all'area di lavoro;
- non è richiesto un aspiratore per il truciolo;
- il laser consente di lavorare materiali altrimenti impossibili da trattare;
- possibilità di forare con diametri molto contenuti;
- grazie a sistemi a controllo numerico, il processo può essere automatizzato;
- possibilità di realizzare saldature molto piccole su materiali delicati;
- sono disponibili grandi densità di potenza grazie ai raggi laser.

Di contro, tuttavia, presenta svantaggi che con il tempo si è cercato e si cerca tutt'ora, di minimizzare sempre più, in termini di:

- costi di equipaggiamento e processo, nonché manutenzione periodica e rimpiazzo di elementi consumabili come, ad esempio, il gas CO_2 (i macchinari più innovativi tuttavia prevedono un sistema di ricircolo che riduce di molto le perdite) e le lampade di pompaggio;
- la profondità di penetrazione del laser è limitata, per quanto applicazioni ripetute del raggio possano in qualche modo sopperire a tale limite;
- il materiale vaporizzato nel processo di foratura tende a riconsolidarsi sulle pareti e sulle sporgenze del foro stesso, creando orli rialzati;
- le pareti delle superfici sottoposte a foratura o taglio sono in genere ruvide 32 – 250 μ m;
- il controllo di tolleranze e misure per i fori effettuati con il laser è, in genere, complicato;
- talvolta bisogna rivestire chimicamente le superfici in modo da aumentare l'assorbimento del raggio laser da parte del materiale;

- in applicazioni di saldatura, ci sono limiti di dimensioni e bisogna costantemente monitorare i parametri impulsivi;
- i sistemi laser (specialmente quelli a gas CO₂ da svariati kilowatt) occupano molto spazio; fortunatamente, la zona per l'uscita del raggio laser può essere piazzata anche a distanza occupando piccoli spazi, rendendo possibile la lavorazione di aree altrimenti inaccessibili con le tecniche e gli strumenti tradizionali.

3. Individuazione dei concetti basilari per i processi industriali

Nella pratica industriale, come abbiamo già notato, molteplici sono le applicazioni in cui viene applicato il laser (⁷): tali attività possono essere sommariamente categorizzate, ad esempio, in termini di potenza media all'uscita del dispositivo: così, foratura e trivellazione rimangono, principalmente, nel dominio dei laser allo stato solido (o a CO₂) in impulsata poiché necessitano di potenze medie di centinaia di watt; invece, taglio laser assistito da un getto gassoso (*gas jet-assisted laser cutting*) e saldatura per fusione vengono normalmente compiuti con laser a gas in continua, con livelli di potenza di uscita dell'ordine dei kilowatt. In questo paragrafo, ci occuperemo di trattare i concetti basilari per la comprensione dei limiti e dei pregi del laser nell'industria.

Innanzitutto, poiché l'energia di un raggio laser è altamente ordinata, essa può essere concentrata per ottenere elevatissime densità di potenza. C'è una relazione che lega il minimo diametro del raggio d_g con la sua lunghezza d'onda λ , secondo dei parametri legati all'apertura (di dimensioni finite) attraverso cui il fascio di luce stesso passa:

$$d_g = K\lambda f \quad (5.1)$$

dove f dipende dalle caratteristiche ottiche dell'apertura e K è una costante legata al modo caratteristico del raggio (es. $K = 2.44$ per un'onda piana). Entro questi vincoli, può essere ottenuta un'ampissima varietà di densità di potenza, da cui si declinano le più disparate applicazioni. Come si vede in figura [Figura 5.4], le varie aree di lavorazione possono essere differenziate in base alla densità di potenza incidente sulla superficie del pezzo in funzione del tempo di interazione: in continua, l'intervallo di tempo considerato è quello intercorso affinché avvenga uno spostamento pari al diametro del raggio; in impulsata, è

semplicemente la durata di un impulso. Si nota che il prodotto di densità di potenza e tempo di interazione dà l'energia specifica fornita al materiale.

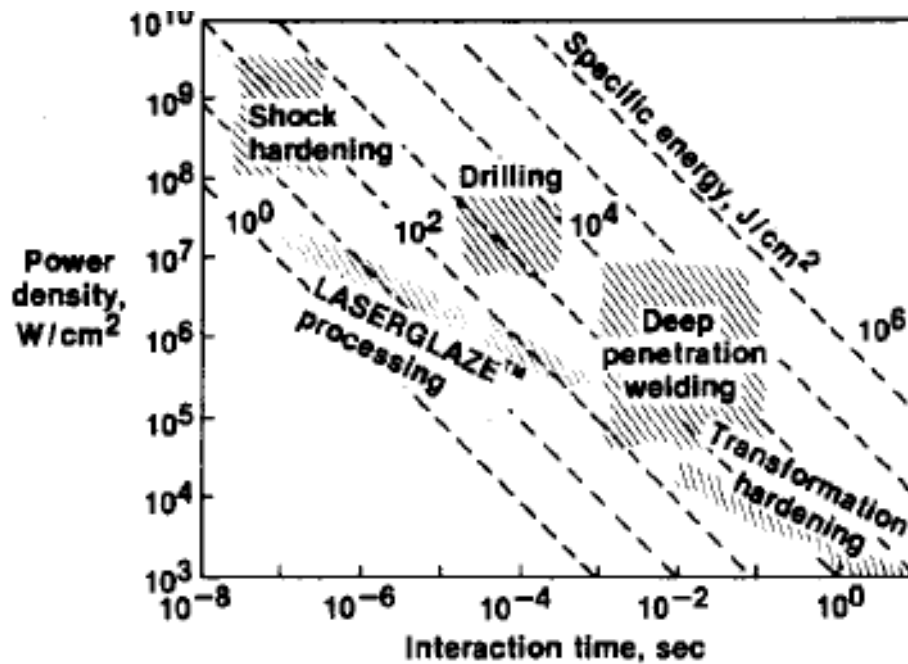


Figura 5.4

In secondo luogo, si è ottenuta un'ampiezza dello spettro raggiungibile dalla tecnologia laser comprendente vari ordini di frequenze. Alle frequenze relativamente basse (necessarie all'indurimento per trasformazione, per esempio), il laser serve sostanzialmente come dispositivo di riscaldamento superficiale; all'aumentare della densità di potenza, intorno ai $10^6 W/cm^2$, interviene la vaporizzazione locale, la quale agevola la saldatura (il laser glazing è un caso limite di saldatura in cui vengono ottenute profondità di fusione solo superficiali grazie a velocità estremamente elevate di processo e, quindi, tempi di interazione molto corti). Mediante l'aggiunta di un getto di gas, la macchina, da saldatrice, può diventare una macchina da taglio. Alle densità di potenza più elevate, la frazione di materiale che evapora al punto di interazione aumenta, cosicché possa avvenire l'espulsione di materiale, rendendo in tal modo possibile la foratura (solitamente si opera in impulsata). A densità di potenza ancora maggiori, la rapida vaporizzazione che ha luogo induce onde acustiche che provocano l'indurimento per shock. Per quanto riguarda tempi di interazione ancora più brevi e densità di potenza maggiori, ci si rifà ad altre tecnologie, come il plasma.

Per fornire un'adeguata interpretazione fisica dell'intensità della sorgente laser, si fa riferimento alla legge di Stefan-Boltzmann, la quale esplicita l'energia totale irradiata da una fonte di calore ideale per unità di superficie:

$$E_T = \sigma T^4 \quad (5.2)$$

dove σ è la costante di radiazione di Stefan-Boltzmann e T è la temperatura assoluta. In riferimento a ciò, si ricava che una densità di potenza, per esempio, di 10^6 W/cm^2 corrisponde a una fonte termica ideale che opera a ben 20500 K : appare dunque evidente che il laser fornisca concentrazioni di energia molto più elevate delle sorgenti di calore tradizionali, il che facilita la fusione e la vaporizzazione di ogni materiale conosciuto.

4. Descrizione dei processi industriali più importanti

Vediamo i principali processi industriali di applicazione del laser in ordine di potenza crescente.

4.1. Foratura (*drilling*)

Un raggio laser focalizzato è in grado di produrre i fori dal diametro più piccolo in assoluto (rispetto alle altre tecnologie concorrenti) nella maggior parte dei solidi, mediante volatilizzazione e rimozione di materiale. Il processo di foratura è, di per sé, complicato a causa dei fenomeni fisici contrastanti che vengono coinvolti. Idealmente, la foratura dovrebbe consistere nella rapida sublimazione e conseguente espulsione del materiale nella regione in oggetto, esponendo uno strato sempre fresco della superficie per la vaporizzazione. La sublimazione diretta, tuttavia, è ostacolata sia dalla formazione di residui al passaggio del raggio, sia dalla formazione di materiale fuso tanto sui bordi quanto sul fondo del foro, limitando, così, la profondità accessibile con quest'operazione. Evidenze sperimentali hanno stimato che la massima profondità raggiungibile in un metallo con un singolo impulso si aggira tra le 5 e le 6 volte il diametro (mantenendo difetti del contorno accettabili). Con un controllo sofisticato, comunque, si può raggiungere la profondità desiderata e regolare i contorni mediante tecniche a multi-impulso. In situazioni in cui l'accuratezza non è l'aspetto primario, il laser offre grandi vantaggi in termini di velocità, insensibilità alla durezza del materiale e assenza di contatto fisico. Se le tolleranze sono troppo stringenti per il laser, tuttavia, si può comunque creare un foro pilota che poi verrà rifinito con scariche elettrostatiche o procedure meccaniche più accurate.

4.2.Taglio laser (*laser cutting*)

Una gran varietà di materiali può essere tagliata senza la necessità di un effettivo contatto fisico; tuttavia, la soluzione tecnologica del taglio laser non è in ogni modo applicabile a materiali cavi e multistrati. In quest'applicazione, il laser può operare sia in maniera continua che impulsiva, con risultati comparabili con i mezzi tradizionali come la segatura. Come nella foratura, il processo di taglio ideale dovrebbe essere puramente evaporativo. Il processo reale, invece, coinvolge processi di fusione e vaporizzazione che dipendono anch'essi da intensità, tempo di esposizione e caratteristiche del materiale e dei dispositivi accessori (i.e. getto gassoso). In impulsata, il taglio risulta praticamente un'estensione della foratura, applicata lungo particolari geometrie ottenibili mediante il controllo del moto relativo delle parti: in questo modo si possono ottenere, per esempio, fori di diametri ampi, oppure tagli lineari o dalla geometria arbitraria. Le limitazioni in potenza per i laser in impulsata ricadono poi in limiti di velocità di taglio. Come si può notare, sempre in riferimento alla tabella [Figura 5.4], il livello di densità di potenza per il taglio è essenzialmente lo stesso della fusione (per quanto sia auspicabile uno maggiore), perciò generalmente serve l'ausilio di un getto gassoso per portare all'evaporazione (altrimenti si avrebbe ri-solidificazione del materiale): durante la lavorazione, l'utilizzo di un gas tecnico a 10 – 15 *bar* aiuta alla rimozione del materiale (solo per materiali incombustibili), mentre un gas neutro provvede poi a proteggere la zona circostante l'area di taglio. In generale, gas inerti contribuiscono a dare superfici lisce, mentre gas reattivi velocizzano il taglio.

Generalmente, sono i laser a *Nd:YAG* o a *CO₂*, siano operanti in continua o in impulsata, a essere impiegati nel taglio di materiali, con specificità di processo dettate di caso in caso dalle proprietà del materiale. In tabella [Figura 5.5], vi sono gli utilizzi principali per i due tipi di laser citati, in entrambe le modalità.

| Laser Operating Mode | Nd: YAG Laser (1.06 μm) | CO ₂ Laser (10.6 μm) |
|------------------------------|--|---|
| Pulsed | fragile, delicate materials such as: diamond, gemstone, thin metal foil, thin ceramic sheet | seldom used except for: thin ceramic sheet, nonmetallic materials. |
| Continuous | | |
| a) Oxygen-assisted | thin metallic sheet | metals, glass-filled epoxies, wood, fabric |
| b) Inert-gas-assisted | thin metal sheet, stainless steels, tantalum, superalloys | metals, paper, plastics, nonmetal composites, cloth, rubber, etc. |

Figura 5.5

Riveste particolare importanza, inoltre, nel taglio laser assistito da gas, il design dell'ugello. Allo scopo di ottenere, per un dato materiale, un taglio diritto, liscio, con una quantità minima di scorie sul fondo e strette regioni colpite dagli effetti del calore nelle adiacenze del taglio, vanno aggiustati con precisione tanto i parametri stessi del laser quanto quelli dell'ugello. La velocità del taglio, peraltro, avrà un limite inferiore e uno superiore e il range di velocità accettabili ("velocità di avanzamento ottimizzate" o *optimized feed rate*) si restringerà all'aumentare dello spessore del pezzo. Peraltro, un taglio lungo una linea geometrica complessa di alta e uniforme qualità, richiede un controllo estremamente sofisticato da parte di un computer o un microprocessore. Per tagli ad alta velocità, vengono normalmente preferiti laser a CO₂ ad onda continua. Alcune prestazioni ottenibili per il taglio si possono vedere, a titolo d'esempio, nella tabella [Figura 5.6].

TYPICAL JET-ASSISTED LASER CUTTING PERFORMANCE

| | Thickness (mm) | Speed (mm/s) | Power (kW) |
|-----------------|----------------|--------------|------------|
| Aluminum | 3.0 | 50.8 | 3.0 |
| | 12.5 | 12.7 | 3.0 |
| Boron/aluminum | 3.0 | 190.0 | 3.0 |
| Nickel alloy | 3.0 | 59.2 | 3.0 |
| Stainless steel | 3.0 | 42.3 | 3.0 |
| Steel | 3.0 | 67.7 | 4.0 |
| | 54.0 | 5.5 | 6.0 |
| Titanium | 3.0 | 21.2 | 4.3 |
| | 50.6 | 8.5 | 3.8 |

Figura 5.6

Si è visto, tuttavia, che il sistema laser non rappresenta un'alternativa competitiva in termini di costi rispetto ai metodi tradizionali, per quanto riguarda pezzi a sezione spessa: una delle ragioni principali è che i parametri del getto gassoso non possono essere scalati linearmente con la potenza del laser, in base alle leggi della fluidodinamica. Un altro fattore limitante è legato alla larghezza ridotta del taglio ottenuto: benché tagli stretti siano desiderabili dal punto di vista della massa di materiale utilizzato, ne scaturiscono due problematiche rilevanti: la prima è che, tanto il taglio dev'essere stretto, tanto dovrà esserlo il diametro del getto gassoso, ristrettezza ardua da mantenere a causa dell'espansione già su brevi distanze del getto libero; la seconda è che il sottile strato di metallo liquido nella zona del taglio risulta fortemente legato alla parte solida da forze di tensione superficiale: rimuovere il liquido mediante il soffio limitato di un getto dal diametro stretto risulta difficile. Ci si aspetta un miglioramento di questa metodologia di taglio sui materiali spessi grazie alla ricerca sull'accoppiamento dei parametri di getto e laser. Per quanto riguarda i materiali fini, invece, il laser ha dimostrato capacità impressionanti in molte applicazioni, con sistemi ormai completamente automatizzati. Riassumendo, il taglio mediante laser offre questi vantaggi, rispetto alle altre tecniche tradizionali:

- le distorsioni finali sono minime, poiché non vi sono distorsioni meccaniche in quanto non vi è contatto tra l'utensile e il pezzo;
- la zona termicamente alterata, data l'elevata densità di potenza e la dimensione del fascio, è ridotta;
- i bordi di taglio risultano stretti e paralleli;
- il taglio risulta indipendente dalla durezza del materiale;
- è possibile ottenere profili complessi;
- il sistema può essere facilmente integrato in sistemi automatici di lavorazione.

4.3.Saldatura (*welding*)

4.3.1.Saldatura per conduzione (o per fusione)

Si può ottenere una fusione controllata con precisione di metalli e leghe con un bilanciamento del livello di intensità del raggio e del tempo di esposizione; la profondità di penetrazione di tale operazione è limitata dall'inizio della vaporizzazione della superficie e dalle caratteristiche di diffusione termica del materiale. Per potenze sotto 1 kW, infatti, si ha, per lo più, saldatura per sola fusione, con deposizione di energia solamente sulla superficie, così che le risultanti caratteristiche della saldatura dipendono solo dalla conducibilità termica

del materiale. In questo caso, il problema principale è l'accoppiamento del materiale con il raggio, poiché, inizialmente, una parte rilevante del fascio incidente viene riflessa dal pezzo; non appena una parte di materiale fuso penetra nel materiale, però, viene raggiunta una temperatura critica che provoca la formazione di un plasma di vapori metallici, in modo che si verifichi un brusco aumento dell'assorbimento della luce proprio all'interfaccia tra plasma e metallo. Tipicamente, le saldature per fusione con il laser sono autogene, cioè condotte senza l'uso di un riempitivo. I giunti di piccoli segmenti metallici, saldati con quest'operazione, sono facilitati da una scelta appropriata delle caratteristiche costruttive e meccaniche, da un lato, e della taglia del bersaglio e dell'angolo di incidenza, dall'altro.

La saldatura a punti per mezzo di un laser a impulsi è un metodo efficace per svariate applicazioni, come realizzare giunture tra metalli diversi, legare termocoppie, saldare fili metallici ai contatti elettrici, ecc. Il successo dell'operazione consiste nel fondere una quantità il più simile possibile tra le due parti da saldare; la scelta dei possibili metalli da accoppiare, peraltro, è limitata anche da fattori di compatibilità metallurgica, come la differenza tra i punti di vaporizzazione tra i costituenti.

Il vantaggio principale della saldatura laser rispetto alla saldatura tramite resistenze consiste nella sua capacità di congiungere metalli elettricamente incompatibili o altrimenti impossibili da saldare insieme. Di contro, è difficile per il laser competere in termini economici in applicazioni in cui è facile eseguire un metodo resistivo. Perciò, i campi dove la saldatura a punti con il laser ha finito per risultare economicamente competitiva sono, ad esempio, quelli della fabbricazione di delicati e complessi componenti o interconnessioni miniaturizzate.

4.3.2. Saldatura per penetrazione

Come si è visto, per basse potenze, bisogna fare i conti, inizialmente, con la riflettività del materiale, ottenendo risultati comunque simili a quelli delle tecniche tradizionali. Peraltro, il processo risulta relativamente lento, inefficiente e fornisce scarse possibilità di penetrazione, non finendo per giustificare i costi dell'altro prezzo del sistema laser. Per intensità di potenza oltre i $10^6 W/cm^2$, invece, la natura dell'interazione tra il raggio e il materiale cambia drasticamente e quindi anche le valutazioni di carattere economico: l'energia fornita, in questo caso, è troppo alta per essere rimossa dal punto di incisione (che sia per conduzione, convezione o radiazione), provocando quindi una vaporizzazione locale e, infine, una cavità cilindrica capillare (*keyhole*), con conseguente penetrazione dell'energia all'interno del foro con fusione e successiva solidificazione in profondità (e non solo sulla superficie del pezzo).

Allo strato di materiale fuso, che tende a richiudere il capillare stesso, si oppone la pressione del vapore continuamente prodotto nella cavità: si avrà, allora, una situazione stazionaria solo ponendo il fascio laser e il pezzo da saldare in moto con una certa velocità relativa, sufficientemente elevata da permettere la produzione del un quantitativo di vapore necessario al sostentamento del *keyhole* stesso. Questa cavità, piena di vapori metallici, diviene una sorta di corpo nero nei riguardi del raggio: al suo interno, si raggiunge anche un coefficiente di assorbimento $\alpha = 0,95$ e temperature fino a 20000 °C. In questo modo, a differenza della saldatura per conduzione, in cui il calore si propagava dalla superficie verso il resto del pezzo, il calore, qui, viene trasferito dalle pareti del *keyhole* verso l'esterno.

In molte situazioni, come si vede in [Figura 5.7], la penetrazione di un laser con un dato livello di potenza è inversamente proporzionale alla velocità di saldatura. Si può notare che se, a parità di potenza, venisse ridotta la velocità, si depositerebbe più energia sul pezzo, ionizzando i vapori metallici, altrimenti trasparenti alle radiazioni del *Nd:YAG* (il più utilizzato), e producendo, quindi, plasma: dato l'alto coefficiente di assorbimento di quest'ultimo, la sua fuoriuscita ostacolerebbe e defocalizzerebbe il raggio, aumentando le dimensioni della zona di fusione intorno alla cavità e diminuendo la penetrazione, cosicché avremmo come risultato un collasso della cavità stessa e una caratteristica forma "a testa di chiodo" della saldatura, simile al risultato della saldatura superficiale per conduzione (da evitare assolutamente).

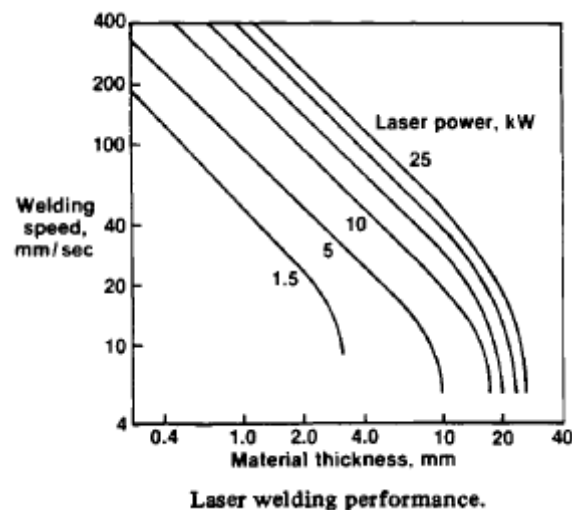


Figura 5.7

Grazie alla velocità relativa sufficientemente elevata che dobbiamo quindi imporre tra pezzo e raggio laser, il *keyhole* può traslare lungo il giunto senza collassare o alterarsi con un laser

in *continuous wave*: il materiale che progressivamente viene a trovarsi davanti al foro di penetrazione si fonde, fluisce lungo le superfici del foro e si solidifica subito dietro di esso; questo tipo di saldatura, è attualmente la più praticata a causa della ancora scarsa diffusione di laser *Nd:YAG* a elevata potenza: per la saldatura di grandi spessori sono stati fino a oggi usati, infatti, perlopiù, laser di alta potenza a CO_2 . Qualora si utilizzi, invece, un sistema laser impulsato, un singolo impulso provoca il *keyhole*, poi il tempo di riposo permette ai vapori di allontanarsi e l'impulso successivo riforma il foro.

La saldatura laser per penetrazione consente, solitamente, la giuntura di metalli con effetti di alterazione termica minimi sul materiale adiacente alla zona di fusione: infatti, per evitare che il materiale su cui si sta eseguendo una saldatura sia contaminato dal punto di vista metallurgico, con conseguente formazione di porosità e inclusioni, è importante utilizzare una copertura di gas inerte, detto "gas d'assistenza" o "di copertura" che eviti il contatto con agenti atmosferici dannosi. Secondo la natura del materiale che si deve saldare, si utilizzano diversi gas (e diverse portate), come si può vedere in [Figura 5.8]; quelli commercialmente più utilizzati sono:

- l'elio (*He*), che è un ottimo gas di assistenza perchè, oltre a fornire una buona copertura, possiede un elevato potenziale di ionizzazione (24,5 eV), cioè capacità di assorbire una potenza elevata prima di ionizzarsi e dar luogo alla formazione del plasma. Ciò significa che solo una ridottissima quantità dell'elio inviato sul punto di saldatura sarà ionizzato dal raggio laser, garantendo, in tal modo, trasparenza quasi completa alla radiazione anche per potenze elevate e per basse velocità di saldatura;
- l'argon (*Ar*), che è un buon gas di copertura dagli agenti esterni, ma, avendo un potenziale di ionizzazione (1,57 eV) inferiore a quello dell'elio, da origine a una maggior quantità di plasma. Avendo tuttavia un costo inferiore, viene spesso preferito all'elio quando le potenze in gioco non sono elevate.

Gas di assistenza utilizzati per la saldatura Nd:YAG

| Materiale | Importanza del gas | Tipo di gas |
|-------------------------------|---------------------------|--------------------|
| Alluminio e leghe leggere | Necessario | Elio o Argon |
| Titanio | Necessario | Argon |
| Inox e leghe a base di Nichel | Importante | Argon |

Figura 5.8

4.3.3.Saldatura su metalli non ferrosi

Solitamente il titanio e le leghe di nickel rispondono bene alla saldatura laser, grazie all'ausilio di schermi di gas inerte. Benché dal punto di vista radiografico non presentino comunque difetti legati a tale procedura, dal punto di vista della microstruttura, la velocità di saldatura incide notevolmente sulla grana del pezzo: a basse velocità (alte densità di energia) corrispondono grani grossi, con resistenza a frattura migliorata; ad alte velocità, invece, corrispondono grani fini che forniscono eccellenti caratteristiche di resistenza a fatica.

Per le leghe di alluminio, la saldatura laser non ha dato effetti altrettanto positivi e ciò è dovuto in larga misura all'alta riflettività iniziale della superficie dell'alluminio al raggio a $10.6 \mu m$ (superiore anche al 90%), rendendo necessarie elevatissime densità di potenza per iniziale la penetrazione.

4.3.4.Efficienza della saldatura laser

Uno degli svantaggi principali della saldatura laser è l'efficienza relativamente bassa della conversione di potenza elettrica in potenza ottica, tipicamente dell'ordine del 15%. L'efficienza del processo complessivo di saldatura, però, va valutata considerando quanta energia ottica viene utilizzata per formare un giunto fuso, cioè il rapporto tra l'energia richiesta per fondere il materiale nella zona di saldatura rispetto all'energia assorbita dal laser: misurazioni calorimetriche dirette, mostrano efficienze anche oltre il 90% (vedere [Figura 5.9]). Grazie alle alte efficienze di fusione, quindi, le energie specifiche in entrate nelle saldature laser sono tipicamente di circa un ordine di grandezza inferiori rispetto a quelle dei processi di saldatura convenzionali. Perciò, l'energia elettrica richiesta per unità di lunghezza del giunto è competitiva rispetto a quella richiesta dai processi ad arco elettrico, per esempio, malgrado la penalità pagata per la conversione in energia ottica. Questa capacità, oltre a caratteristiche di saldatura migliorate e alte velocità, rende il laser un serio candidato per molti compiti di saldatura nei processi produttivi.

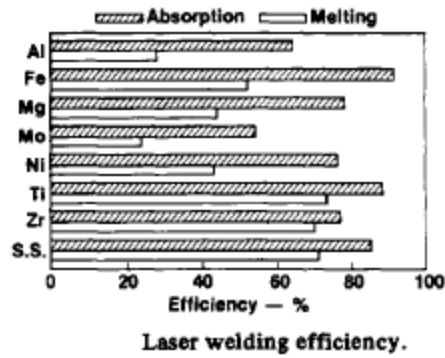
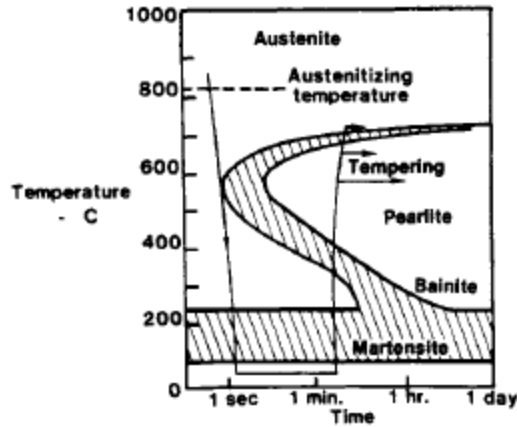


Figura 5.9

4.4.1 trattamenti superficiali

I trattamenti termici superficiali in cui i sistemi laser possono trovare applicazione, sono principalmente:

- fusione rapida e tempra (*quenching*) di fini strati superficiali;
- riporto, in cui viene fuso sulla superficie del pezzo un rivestimento, spesso di materiale resistente alla corrosione, insolubile nel substrato;
- lega superficiale, che modifica la composizione chimica della parte esterna con un additivo posto uniformemente su di essa, allo scopo di migliorare le caratteristiche meccaniche o anticorrosive;
- indurimento per trasformazione (è il trattamento più utilizzato); è noto che il riscaldamento e il successivo raffreddamento di acciaio o ghisa produce un indurimento (grazie alla trasformazione in martensite, [Figura 5.10]). Il laser, permettendo un riscaldamento locale, promuove trattamenti termici a punti.



Typical isothermal transformation diagram for a ferrous material.

Figura 5.10

Un altro vantaggio del laser riguarda il controllo in catena chiusa: si raggiunge una buona precisione di avanzamento di processo grazie ai dati del grafico [Figura 5.11], il quale mette in relazione l'intensità di potenza con il tempo di interazione, come se fosse la rappresentazione di un trattamento termico superficiale, per una ghisa al 3.5% di carbonio con punto di fusione a 1200°C. In ascissa abbiamo la profondità alla quale il materiale è riscaldato fino a raggiungere almeno la temperatura di austenizzazione. Più sale l'intensità di potenza, minore risulta la profondità (si raggiungono, di solito, non più di 3 mm), dal momento che avviene un riscaldamento più veloce.

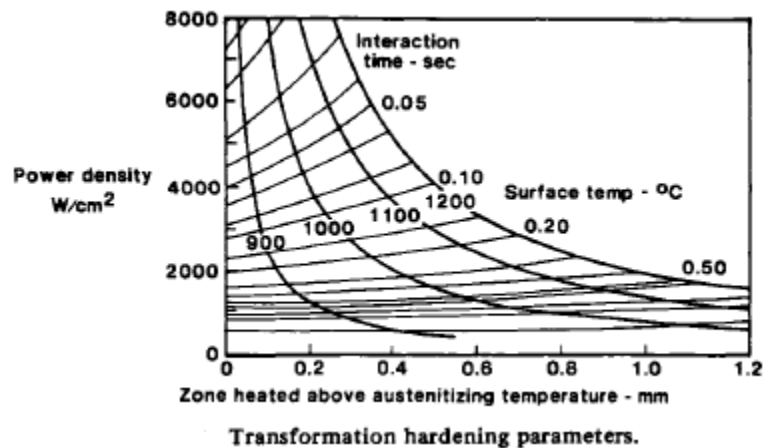


Figura 5.11

Se si applicassero condizioni diametralmente opposte a quelle indicate, ovvero si impiegassero basse densità di potenza e lunghi tempi di interazione, si finirebbe con

il promuovere una sostanziale diffusione termica nel materiale di base: in queste condizioni, al passaggio del raggio laser, il gradiente termico non sarebbe sufficiente per fornire un rapido raffreddamento dello strato superficiale, d'altra parte necessario per produrre una struttura dura. Nella pratica, anche applicando alte potenze per tempi brevi, il processo non è così semplice come sembra descritto dalle curve, a causa della riflettività iniziale del materiale (quella di un acciaio si aggira sul 50%): bisogna dunque migliorare l'assorbimento energetico con un rivestimento superficiale appropriato che trattenga il flusso termico (l'impiego di tecnologie alternative come i flussi di elettroni non dipendono, invece, dalla riflettività).

CAPITOLO 6

Le nuove frontiere del laser

Il mondo del laser non ha mai finito di stupire sin dalla sua invenzione e gli aspetti di ultima generazione, unitamente ai progressi dell'informatica, lasciano ancora a bocca aperta. Storicamente, ci sono state due ere del laser: quella delle sorgenti a CO_2 , che rappresentano ormai il passato, e l'età moderna, in cui si sta sviluppando la fibra ottica. Più che un semplice passaggio, la transizione verso la fibra è una rivoluzione, poiché vi sono fondamentali **differenze** ⁽⁸⁾:

- di **concetto**, dal momento che, nelle sorgenti a CO_2 , il fascio laser veniva generato dall'eccitazione di un miscuglio di gas, mentre ora, nelle sorgenti a fibra, il raggio si genera dall'eccitazione di un mezzo allo stato solido;
- di **qualità**, dal momento che possiamo trasmettere facilmente un fascio ad alta brillantezza dal diametro di poche decina di micron e ciò permette di tagliare a velocità doppia rispetto a un laser con sorgente a CO_2 , rendendo particolarmente vantaggiosa la fibra nel taglio di materiali medio-sottili e nel taglio da meccanica di precisione. Inoltre, L'assenza di percorso ottico esterno al mezzo attivo, grazie alla trasmissione su fibra, rende il fascio laser più stabile;
- di **efficienza**, in quanto, se nelle sorgenti a CO_2 avevamo efficienze dal 6 al 10% circa, ora invece, con la fibra saliamo anche oltre il 25%.

1. Differenza tra laser *bulk* e *waveguide*

Esistono differenza costruttive tra i laser a fibra e gli altri allo stato solido (di tipo *bulk*) che implicano importanti conseguenze sugli utilizzi e i costi ⁽⁹⁾:

- i laser di tipo **bulk** sono laser allo stato solido con un corpo costituito da un cristallo o da un vetro drogato come mezzo attivo. Da momento che non vi è nessuna struttura interna in grado di guidare l'onda, il diametro del raggio è determinato non dal mezzo,

ma dal progetto del risonatore, formato, solitamente, da specchi separati piazzati attorno al cristallo (o al vetro) con un'intercapedine d'aria tra loro e il mezzo (utile per l'inserimento di dispositivi ottici aggiuntivi, necessita di particolare attenzione per l'allineamento e la pulizia);

- i laser di tipo **waveguide**, invece, possiedono una struttura in grado di guidare il raggio all'interno del mezzo attivo, in modo tale da mantenere, di per se stessi, un'alta coerenza e una marcata intensità ottica anche per distanze lunghe. Queste strutture sono costituite da fibre o da particolari cristalli e, per lo più alimentate a diodi (l'accoppiamento non necessita di dispositivi ottici esterni). Ciò permette di ottenere alti guadagni anche con transizioni laser difficili e con energie di pompaggio limitate (anche se le perdite per la propagazione della luce nella fibra sono generalmente più alte di quelle in un materiale *bulk*). La combinazione di lunghe distanze di propagazione e di strette larghezze di banda, tuttavia, genera delle non linearità che, in certi casi, limitano le performance, mentre, in altri, vengono sfruttate a vantaggio dell'utilizzatore.

In generale, i laser di tipo *bulk* sono ottimi amplificatori e si usano per operare con alte potenze di picco e risultano particolarmente flessibili per le applicazioni di laboratorio, grazie alla possibilità di cambiarne l'ottica a piacimento; per applicazioni a bassa soglia e ad alto guadagno, invece, si utilizzano laser *waveguide*, più economici da produrre.

2.La situazione attuale del mercato

Le macchine laser oggi sul mercato si distinguono, in primo luogo, come abbiamo visto, in base alle sorgenti laser al loro interno e presentano, ognuna, vantaggi e inconvenienti, rendendosi adatte all'utilizzo su materiali differenti. I principali tipi di laser, ad oggi, sono ⁽¹⁰⁾:

- i **laser a CO₂** che, come abbiamo già visto, sono laser a gas basati su una miscela di biossido di carbonio eccitato elettricamente, con una lunghezza d'onda di 10.6 μm . Prevalentemente utilizzati nella lavorazione di materiali non metallici e della maggior parte delle plastiche, il loro sviluppo negli anni e la loro enorme diffusione rispetto agli altri tipi di laser, ha conferito loro un rendimento relativamente elevato e un'ottima qualità del raggio. Vi si adattano particolarmente materiali quali: legno, acrilico, vetro, carta, tessuti, plastica, film, cuoio e pietra;

- i **laser a fibra**, che appartengono alla categoria dei laser allo stato solido. Partendo da un cosiddetto laser "seed", ne amplificano il raggio mediante fibre di vetro appositamente montate, alle quali viene fornita energia mediante diodi di pompaggio direttamente accoppiati (senza intercapedini d'aria). Tali sistemi emettono ad una lunghezza d'onda di $1.064 \mu m$, con un diametro focale estremamente piccolo, così che la loro intensità risulta fino a 100 volte maggiore rispetto a quella dei laser a CO_2 , a parità di potenza media d'uscita. Al contrario degli altri sistemi laser, i laser a fibra non necessitano praticamente di manutenzione e si distinguono per la loro lunga vita utile di almeno 25000 ore di utilizzo. Le applicazioni di particolare rilievo del laser a fibra sono la marcatura e l'incisione di metalli (anche rivestiti) e plastiche;
- i **laser a cristallo**, anch'essi laser a stato solido alimentati a diodo (oppure mediante lampada a lampo), con la stessa lunghezza d'onda di quelli a fibra ($1.064 \mu m$) e, pertanto, altrettanto adatti alla marcatura di metalli e plastiche. I più utilizzati sono quelli a *Nd:YAG* (granato d'ittrio-alluminio drogato con neodimio) e quelli a *Nd:YVO* (ortovanadato d'ittrio drogato con neodimio). Diversamente dai laser a fibra, presentano componenti soggetti a usura e manutenzione, in particolare i costosi diodi di pompaggio (che vanno sostituiti ogni 8000 – 15000 ore di lavoro), accoppiati indirettamente (in gap d'aria, come per tutti gli apparati ottici esterni al mezzo attivo); peraltro, il cristallo stesso presenta vita ben più ridotta rispetto alla fibra.

I **prezzi** per una macchina laser variano dai 4000€ per un'entry-level cinese fino a qualche centinaio di migliaia di euro per un sistema laser high-end per l'integrazione in una linea di produzione. I fattori determinanti per il costo di un tale macchinario sono le dimensioni della macchina stessa e la potenza della sorgente laser, che va scelta accuratamente in base ai materiali da lavorare; tale scelta poi si ripercuote significativamente in termini di **durata** della macchina, che può in genere variare dai 2 ai 15 anni.

3.Uno sguardo al futuro: i laser a fibra

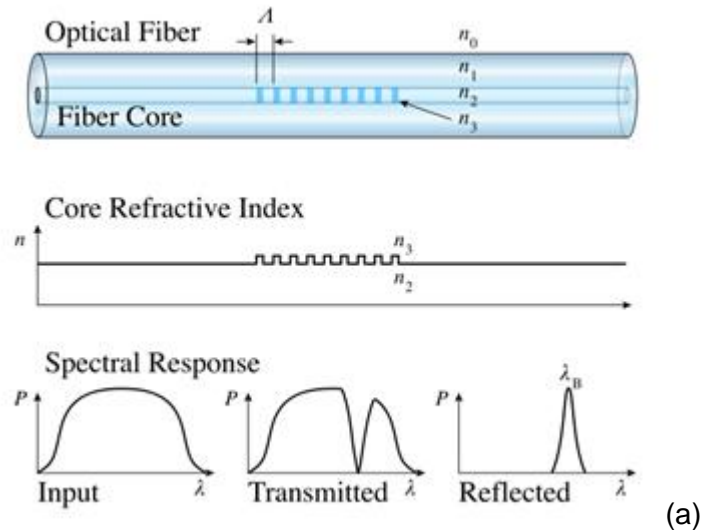
Poiché i dati di mercato mostrano che i laser a fibra stanno assumendo crescente importanza nel mondo industriale e scientifico, è opportuno dare una descrizione sintetica delle loro principali caratteristiche.

3.1. Reticoli di Bragg in fibra (*Fiber Bragg's Gratings*, o FBG)

Un reticolo di Bragg in fibra (FBG) ^(11, 12) è una modulazione periodica dell'indice di rifrazione del nucleo di una fibra ottica. L'indice di modulazione è indotto esponendo la fibra a una figura di interferenza formata da fasci di luce ultravioletta (UV), cosicché, nella parte più interna della fibra (*core*), venga sostanzialmente realizzata una variazione periodica e piccolissima dell'indice di rifrazione. Quando un segnale a banda larga viaggia nella fibra, di conseguenza, arrivato nella zona del reticolo di Bragg, può essere scomposto, a seconda della sua frequenza, in parti che vengono trasmesse nella fibra (fino al successivo reticolo), riflesse all'indietro o fatte uscire dalla fibra: le FBG, dunque, possono agire come **filtri** in riflessione (o trasmissione), selezionando una particolare frequenza (o, equivalentemente, una lunghezza d'onda) presente sul segnale ed estraendola ("riflessione indietro") dalle altre, come si vede in [Figura 6.1]. La lunghezza d'onda riflessa (λ_B), chiamata lunghezza d'onda di Bragg, è definita dalla relazione:

$$\lambda_B = 2n\Lambda \quad (6.3.1)$$

dove n è l'indice di rifrazione efficace della fibra (nel *core*) e Λ è il periodo proprio della fibra (o "passo" del reticolo). Un successivo processo di "fissaggio", ne stabilizza termicamente le caratteristiche a fino a qualche centinaio di gradi Celsius.



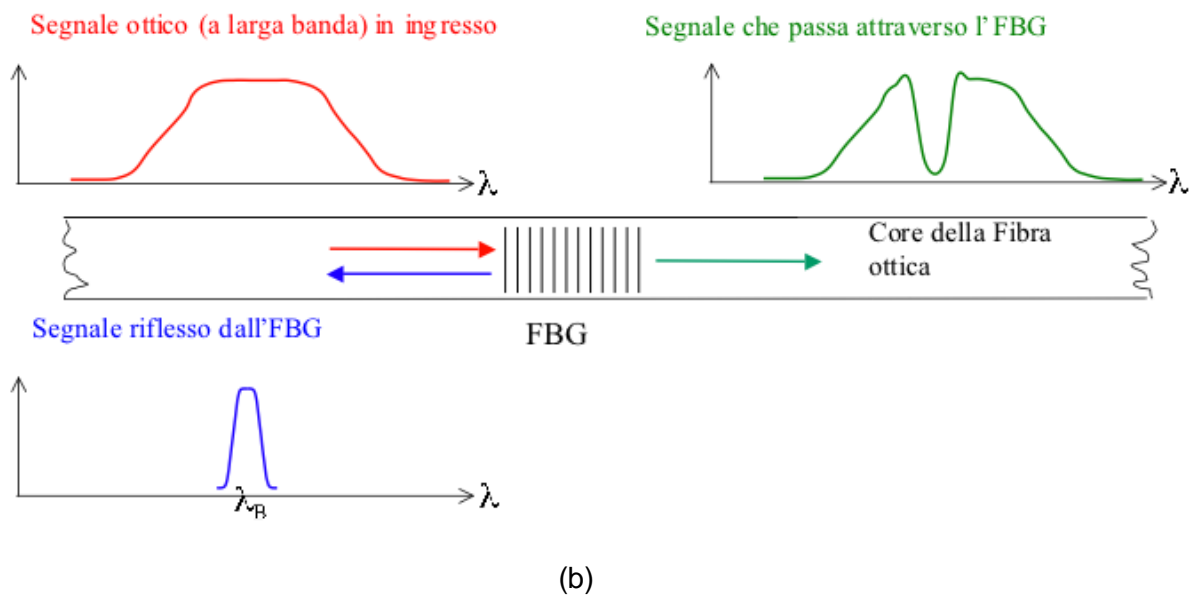


Figura 6.1 (a) viene posto l'accento sulla variazione dell'indice di riflessione nella sezione della fibra; (b) vengono individuate le componenti in cui viene scomposto il segnale di ingresso a banda larga, cioè segnale trasmesso e segnale riflesso.

Grazie a tale caratteristica di filtro di una specifica frequenza all'interno del pacchetto di frequenze che costituisce il segnale a banda larga, le FBG sono utilizzate da tempo nella trasmissione di dati sia in telecomunicazioni che in Internet, come alternativa ai cavi di rame; esse garantiscono, infatti, grandi velocità di trasmissione, non subiscono interferenze elettromagnetiche e non sono soggette a rumore termico (resta solo rumore quantico, per sua natura molto inferiore).

Ora che conosciamo la struttura base da cui si progettano i laser a fibra, possiamo passare all'esame degli aspetti costitutivi di un sistema laser basato su tale tecnologia.

3.2.1 laser a fibra

I laser a fibra ⁽¹³⁾, pur comparando in diverse forme e condividendo la tecnologia di altri tipi di laser, presentano **vantaggi** unici: sono compatti e robusti, non si disallineano e dissipano facilmente l'energia termica, dal momento che la fibra ha un elevato rapporto superficie su volume. Il design del laser a fibra è molto adattabile, sia nell'industria dei materiali (per il taglio di pezzi anche spessi), sia nella sensoristica, nelle telecomunicazioni o come amplificatore (*Master*) di altri laser a fibra, persino in *Continuous Wave* (CW). Un laser a fibra,

di norma, viene pompato otticamente, molto spesso con diodi laser accoppiati l'un l'altro mediante la fibra (drogata), appunto, all'interno della quale vengono fabbricati dei reticoli di Bragg. La fonte di pompaggio, in genere, può essere un singolo diodo, oppure un array, oppure ancora possono esserci più diodi separati, ognuno dei quali è collegato con una fibra che confluisce, a sua volta, in un accoppiatore.

3.2.1. Struttura del laser a fibra

La struttura della fibra impiegata è determinante. La struttura più comune è quella **dual-core** in [Figura 6.2]

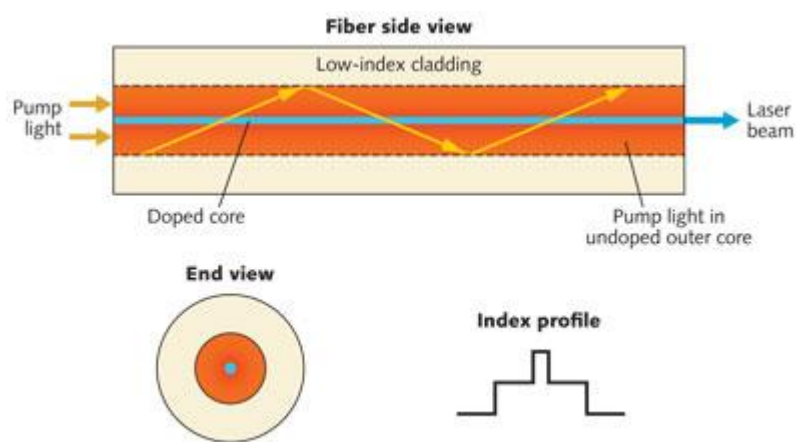


Figura 6.2

Un core esterno (*outer core*, detto anche rivestimento interno o *inner cladding*), non drogato, collima la luce di pompaggio e la guida lungo la fibra, generando l'emissione stimolata nel core interno (*inner core*, drogato con itterbio *Yb* o erbio *Er*), il quale presenta, generalmente, un solo modo caratteristico (in questo caso, il sistema si dice *singlemode*). Un laser a fibra può essere pompato dall'estremità (*end-pumped*) o lateralmente (*side-pumped*) come si vede in [Figura 6.3]:

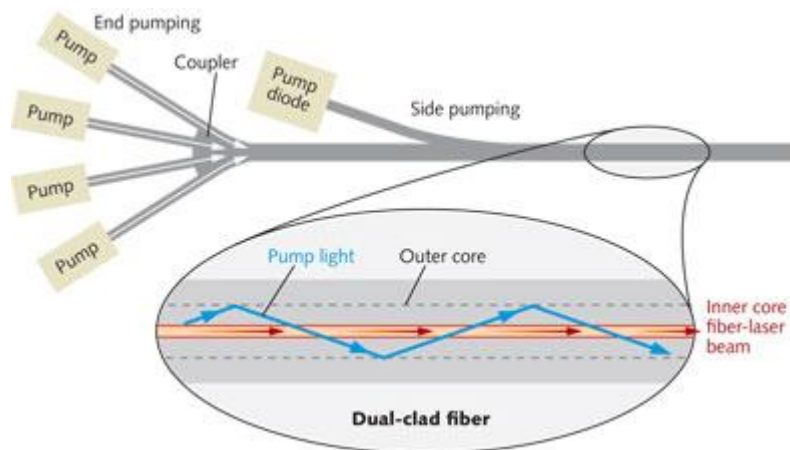


Figura 6.3

- nell'*end-pumping*, la luce di uno o più laser di pompaggio viene incanalata all'estremità della fibra;
- nel *side-pumping*, la luce di pompaggio viene accoppiata con l'*outer core* (è un processo diverso dal *side-pumping* di una barra di materiale, perché in quel caso la luce incide ortogonalmente).

Il design della fibra deve essere adatto all'accoppiamento della luce di pompaggio, sia per quanto concerne il *core* esterno in termini di assorbimento ottico, sia per quanto riguarda il *core* interno in termini di inversione di popolazione. Il guadagno del laser varierà in base alla quantità di drogante e alla lunghezza della fibra. La configurazione *singlemode* crea limitazioni di potenza, in quanto, presentando la fibra una sezione trasversale molto ridotta, vede passare energia ad altissima intensità e ciò può provocare danneggiamenti: si adottano sempre più, per aggirare quest'ostacolo, soluzioni non lineari di complessità elevata.

3.2.2. Alta efficienza

Il pompaggio a diodi funziona particolarmente bene nei laser a fibra perché la fibra stessa garantisce un'elevata lunghezza di interazione: una geometria come questa conferisce un'alta efficienza di conversione dei fotoni e un design compatto e robusto. L'alta efficienza di questi laser, inoltre, è intrinseca nella natura di questa tecnologia: i laser a fibra sono sistemi a quasi-tre-livelli, in cui un fotone di pompaggio eccita una transizione da un livello di riposo a un livello superiore, dal quale avviene, di seguito, una transizione laser come "caduta" dell'elettrone, dalla parte più bassa del livello superiore, a qualcuno dei molteplici livelli base. Ciò è molto efficiente, come si vede in [Figura 6.4], specie se si utilizza l'itterbio come dopante.

Photon conversion efficiencies

| Active element | Output | Pump bands | Photon conversion |
|-------------------------|-----------------|------------------|----------------------|
| Neodymium (solid-state) | 1064 to 1088 nm | 808 nm | 76% |
| Ytterbium | 1030 to 1100 nm | 910, 940, 975 nm | Over 90% at 940/1030 |
| Erbium | 1550 nm band | 980 and 1480 nm | 95% or 63% |
| Yb-Er | Erbium | Ytterbium | |
| Thulium | 1750 to 2100 nm | 793 nm | 2 out/1 in |

Figura 6.4

L'efficienza globale del laser, tuttavia, deriva da di due fasi operative: una prima, di trasformazione elettro-ottica da parte del diodo (50 – 70%), e una seconda, puramente ottica, di estrazione del fotone (60 – 70%), così da risultare, complessivamente, nell'intervallo del 25 – 35% di rendimento effettivo.

Un consistente vantaggio della fibra, tuttavia, consiste nell'assenza di apparati ottici accessori: quando i componenti in fibra sono congiunti, infatti, non vi sono dispositivi da calibrare o che abbiano possibilità di disallineamento, poiché tali funzioni di adattamento dell'onda sono soddisfatte dalla fibra stessa.

3.2.3. Diverse configurazioni per diversi scopi

L'adattabilità e la flessibilità della tecnologia dei laser a fibra li rendono versatili sia in ambiente scientifico che industriale. Ecco come, a titolo esemplificativo, con modalità di funzionamento diverse, vengono impiegati i laser a fibra:

- i laser continui a fibra possono essere sia *singlemode*, che *multimode* (in termini di modi trasversali). I laser che lavorano con un singolo modo producono un raggio di alta qualità, mentre i laser a più modi possono raggiungere potenze più elevate. Se non si necessita dell'intensità estremamente alta dei raggi *singlemode*, l'ammontare più elevato di potenza derivante da un *multimode* è generalmente un vantaggio, come per applicazioni quali il taglio, la saldatura e, in special modo, i trattamenti termici, dove viene illuminata un'area ampia;
- I laser a fibra a impulsi lunghi (essenzialmente laser "quasi CW"), producendo impulsi tipicamente dell'ordine dei millisecondi con un duty cycle del 10% circa, con tassi di ripetizione fino ai 500 Hz, danno potenze di picco più elevate, di circa un ordine di grandezza, rispetto a quelli in continua, il che li rende più adatti ad applicazioni come la foratura;

- il *Q-switching* è possibile nei laser a fibra con lo stesso principio adottato per i laser *bulk*. L'intervallo di velocità ottenibile varia dai nanosecondi ai microsecondi, in base anche alla lunghezza della fibra: più lunga è la fibra, più tempo ci vuole a cambiare il *quality factor*, *Q*. Un altro limite al *Q-switching* viene imposto dalla ridotta sezione trasversale delle fibre, che risente maggiormente delle non linearità: una soluzione più efficiente consiste nell'adottare un *Q-switch* esterno;
- nei laser a fibra in modalità *mode-locked*, il tasso di ripetizione varia in base alla lunghezza di banda del materiale (come in ogni tipo di schema di questo tipo). Gli impulsi più brevi dell'oscillatore raggiungono al massimo i 50 fs , anche se normalmente si lavora sui 100 fs .

3.2.4. Applicazioni speciali: laser ad alta potenza

Il mercato dei laser a fibra è ora il più ampio che mai, specie quello dei laser con una classe di potenza di più kilowatt; i record di potenza per i laser a fibra sono stati raggiunti dai sistemi elaborati dalla IPG Photonics, con i 10 kW di un *singlemode* e i 50 kW del sistema *multimode*. Un campo di utilizzo particolarmente in fermento è il settore dell'**automotive**: nel momento in cui ci si muove verso l'impiego di acciai sempre più duri e resistenti, il laser a fibra (e anche di altri tipi) ha saputo soddisfare i requisiti necessari alla lavorazione di questi materiali sempre più performanti (operazioni altrimenti impossibili con i macchinari tradizionali). I **vantaggi peculiari** dei laser a fibra rispetto agli altri laser, in questo campo, tuttavia, sono svariati: per esempio, le lunghezze d'onda vicine all'infrarosso emanate dai laser a fibra vengono facilmente assorbite dai metalli; inoltre, la semplicità di manipolazione del raggio da parte di un robot, grazie al fatto che la luce esce direttamente dalla fibra senza ingombranti apparati ottici a telaio, ne agevola considerevolmente l'impiego. Grazie a queste caratteristiche, infatti, laser a fibra si sono rivelati particolarmente adatti al taglio (non crea problemi di distorsione come le tecniche tradizionali) e alla saldatura dei metalli grazie alla loro potenza e ad altri parametri di controllo che permettono di ottenere curve particolarmente accurate, specialmente nella realizzazione degli spigoli.

Altre applicazioni particolari del laser a fibra riguardano, ad esempio, la messa in sicurezza antisismica degli edifici. Può essere necessario, infatti, inserire delle barre metalliche all'interno del calcestruzzo: bucarlo con mezzi di foratura a percussione convenzionali può provocare delle crepe, mentre il laser a fibra può penetrarlo facilmente e senza effetti collaterali (basta un *multimode* da 4 kW). Un altro esempio, questa volta per quanto concerne la modalità *Q-switch*, riguarda varie altre lavorazioni a impulsi sui materiali, specie la marcatura e la lavorazione dell'elettronica a semiconduttore o delle macchine, su scala

micro o nanoscopica: per l'ablazione di materiale, infatti, se si opera con impulsi di durata inferiore ai 35 ps, si riesce ad avere ablazione pura, senza residui fusi di materiale. Inoltre, coi laser a fibra, si possono operare lavorazioni superficiali anche su materiali trasparenti come, ad esempio, l'occhio umano, oppure su altre parti del corpo, come si fa in dermatologia. In ambito scientifico, infine, è usato per spettroscopie di vario tipo .

3.3.Sviluppi futuri

Gran parte dell'incentivo al miglioramento sui laser a fibra viene dalla **ricerca militare**, la quale sta cercando il modo per combinare i raggi di più laser a fibra al fine di ottenere un raggio complessivo di altissima qualità e potenza con un singolo modo trasversale. Sul mercato globale, comunque, i trend indicano, da un lato, un largo aumento della vendita del laser a fibra, specie nel mondo dell'**automotive** per lavorare materiali sempre più performanti, e, dall'altro, un **rimpiazzo** dei laser non a fibra con quelli a fibra, in vari altri settori. Oltre ai generali miglioramenti per quanto riguarda **costi e prestazioni**, in futuro appariranno fonti laser che lavorino con sempre maggior facilità nell'ordine dei femtosecondi. Grazie alla loro estrema flessibilità, questi laser porteranno al miglioramento anche degli altri tipi di laser, dal momento che riescono a uscire dagli ambiti di nicchia per supportare altre tecnologie in modo sempre più trasversale. In breve, gli scenari futuri della tecnologia a fibra ottica seguiranno il percorso già tracciato dall'evoluzione dei sistemi a CO₂: si cercherà, cioè, una potenza sempre crescente e se ne affineranno le peculiarità in base alle varie applicazioni, declinandone l'utilizzo ai singoli casi.

In generale, il mondo dei laser deve far fronte alle richieste pressanti del mercato internazionale, che chiede una sempre maggiore automazione dei processi e una flessibilità e adattabilità sempre più vaste: esempi ne sono l'applicazione del taglio laser anche a materiali alto-riflettenti come l'alluminio, il rame o la lamiera zincata (eccellente contro la corrosione), oppure per la realizzazione di minuscoli componenti per i processori informatici. Il fattore vincente, che rende peraltro i laser a fibra così importanti, è rendere i processi sempre più controllati e precisi attraverso funzionalità e software che, dal controllo processo di taglio, spaziano poi fino all'automazione del processo *in toto*, come si verifica in certi sistemi che gestiscono carico e scarico delle lastre di lamiera o che separano (senza danni) i pezzi incisi con il laser dal resto dello scheletro della lastra. Grazie a sistemi più efficaci e più efficienti, si può ottenere una riduzione anche sensibile dei tempi e dei costi di produzione, specie con l'integrazione dell'apparato laser nel sistema produttivo dei singoli componenti, grazie al supporto di software specifici. **Efficienza e flessibilità** saranno, dunque, i cardini dello sviluppo della tecnologia laser basata su fibra ottica.

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

1. M. Eleccion, marzo 1972, "The family of lasers: a survey"; *IEEE Spectrum*, pp. 26-40
2. S. Banerjee, B. G. Streetman, *Solid state electronics devices*, Prentice Hall, V edizione
3. A. Frova, P. Perfetti, *Semiconduttori: Proprietà ed applicazioni elettroniche*, Libreria Eredi Virgilio Veschi
4. Wikipedia, "Laser", <https://it.wikipedia.org/wiki/Laser>, <https://en.wikipedia.org/wiki/Laser>
5. Wikipedia, "Continuous Wave Laser", https://en.wikipedia.org/wiki/Continuous_wave; "Pulsed Laser", https://en.wikipedia.org/wiki/Pulse_laser; "Q-switching", <https://en.wikipedia.org/wiki/Q-switching>; "Mode-locking", <https://en.wikipedia.org/wiki/Mode-locking>
6. R. Allan, maggio 1979, "Lasers in the factory"; *IEEE Spectrum*, pp. 42-51
7. C. M. Banas, R. Webb, giugno 1982, "Macro-material processing", *Proceedings of the IEEE*, pp. 556-564
8. Intervista a Pierandrea Bello, project manager del Gruppo Salvagnini, <http://blog.magnaboscoexpress.com/le-nuove-frontiere-del-taglio-al-laser/>
9. RP Photonics, "Encyclopedia of Laser Physics and Tecnology"
10. Troteclaser, <http://www.troteclaser.com/>
11. Optosmart, <http://www.optosmart.com/>
12. Scienza per tutti, <http://scienzapertutti.Inf.infn.it/>
13. Laserfocus, <http://www.laserfocusworld.com/>