

POLITECNICO DI MILANO
Scuola di Ingegneria Industriale e dell'Informazione
Corso di Laurea MAGISTRALE in Ingegneria Informatica



Sviluppo firmware per misuratore laser di distanza basato su FPGA

Relatore: Prof. Michele Norgia

Tesi di Laurea Magistrale di:
Leonardo Cavagnis, matricola 816646
Diego Rondelli, matricola 817108

Anno Accademico 2014-2015

Alle nostre famiglie

Sommario

Lo scopo di questo lavoro di tesi é sviluppare il firmware di un misuratore laser basato sulla tecnica di interferometria a retroiniezione per misurare la distanza assoluta di un bersaglio.

La prima parte del lavoro consiste nell'implementazione del firmware, sviluppato usando NI LabVIEW FPGA e Real-Time, e degli algoritmi necessari per la misura della distanza assoluta.

Nella seconda parte ci si é concentrati sull'ottimizzazione degli algoritmi implementati e sulla calibrazione dei parametri di funzionamento del sistema, al fine di migliorare la precisione e l'accuratezza della misura.

Abstract

The aim of this project is to develop the firmware of a laser sensor based on the self-mixing interferometer technique to measure the absolute distance from a target.

The first part of the work consists in the implementation of the firmware, developed using NI LabVIEW FPGA and Real-Time, and the algorithms required for the absolute distance measurement.

The second part is focused on the optimization of the implemented algorithms and the calibration of the working parameters of the system, in order to improve the precision and the accuracy of the measurement.

Ringraziamenti

Indice

Introduzione	1
1 Principi di Laser e Telemetria	3
1.1 Principi di funzionamento del laser	3
1.1.1 Emissione stimolata di radiazione	4
1.1.2 Inversione di popolazione	7
1.1.3 Cavit� ottica e materiale attivo	8
1.2 Laser a semiconduttore	10
1.2.1 Laser Fabry-Perot	11
1.2.2 Laser DFB	12
1.2.3 Laser VCSEL	12
1.3 Classi di sicurezza dei laser	13
1.4 Telemetri ottici	14
1.4.1 Telemetri a triangolazione	15
1.4.2 Telemetri a tempo di volo	16
1.4.3 Telemetri a onda continua	18
1.5 Una tecnica alternativa per la misura	18
2 Interferometria a retroiniezione	21
3 Architettura Hardware dello strumento	23
4 Architettura Software dello strumento	25
5 Misure effettuate e dati sperimentali	27
Conclusioni e sviluppi futuri	29
A Documentazione software	31
Bibliografia	32

Elenco delle figure

1.1	Sistema atomico composto da due livelli	5
1.2	Schema di funzionamento di un atomo eccitato: assorbimento, emissione spontanea ed emissione stimolata	6
1.3	Sistema atomico a tre livelli energetici	7
1.4	Sistema atomico a quattro livelli energetici	8
1.5	Cavit� di Fabry-Perot	9
1.6	Schema del Roundtrip ottico nella cavit� ottica	9
1.7	Propagazione della radiazione all'interno della cavit� laser . .	10
1.8	Laser Fabry-Perot	11
1.9	Laser DFB	12
1.10	Laser VCSEL	12
1.11	Classi di sicurezza dei laser	14
1.12	Schema di funzionamento di un telemetro a triangolazione . .	15
1.13	Schema di funzionamento di un telemetro a tempo di volo . .	17
1.14	Potenza trasmessa e potenza riflessa in un telemetro a onda continua	17

Elenco delle tabelle

Introduzione

Il lavoro di tesi qui presentato trae origine dall'esperienza svolta presso il "Laboratorio di Misure Ottiche ed Eletttroniche - MOLES" del Dipartimento di Elettronica Informazione e Bioingegneria del Politecnico di Milano, nell'ambito dello studio e del progetto di un sistema di misura laser di distanza mediante tecnica interferometrica a retroiniezione. Lo strumento in questione deriva dalle conoscenze acquisite con un'attività di ricerca che si sviluppa da diversi anni [1].

Grazie alla scarsa invasività delle sorgenti laser e alla loro elevata adattabilità ai vari ambienti di lavoro, il loro utilizzo é richiesto in numerose applicazioni, che spaziano dagli ambiti biomedicali alle telecomunicazioni, fino ad arrivare alla pura sensoristica. Sebbene nel mercato ci siano diverse tipologie di misuratori di distanza ottici, sfruttati grazie alla loro capacità di misurazione senza perturbazioni o interventi meccanici, la tecnica interferometrica a retroiniezione consente caratteristiche e prestazioni differenti. É una tecnica recente che permette di effettuare una misura di distanza assoluta utilizzando solamente un laser, un fotodiodo e una lente. Il costo dei componenti é esiguo grazie alle tecnologie elettroniche analogiche e digitali moderne e alla semplicità del sistema ottico.

L'obiettivo di questa tesi é lo sviluppo di una versione dello strumento che si prefigge di raggiungere il massimo delle prestazioni ottenibili e di raffinare altri aspetti come affidabilità, qualità hardware e software. In quanto note a priori le problematiche da affrontare e le specifiche che ogni componente avrebbe dovuto soddisfare, é stato possibile svolgere il lavoro in maniera ordinata e precisa.

L'attività é stata ripartita con un altro laureando, Samuele Disegna, che si é occupato della parte elettronica e ottica dello strumento, mentre questo lavoro tratta la parte software.

Gli argomenti sviluppati sono organizzati in 5 capitoli principali.

Nel **Capitolo 1** é presente una descrizione delle caratteristiche fisiche e ottiche delle sorgenti laser. Nel **Capitolo 2** sono descritti i principi base

dell'interferometria, con particolare attenzione a quella utilizzata, la retroiniezione. Nei **Capitoli 3 e 4** sono descritte l'architettura hardware e software dello strumento. Nel **Capitolo 5**, infine, sono illustrate le prove sperimentali.

Milano, Dicembre 2015

Leonardo Cavagnis
Diego Rondelli

Capitolo 1

Principi di Laser e Telemetria

In questo Capitolo verranno richiamati i concetti fondamentali relativi al funzionamento delle sorgenti laser. Verranno quindi descritte le principali tipologie di sorgenti e le classi di sicurezza che ne regolamentano l'utilizzo. Successivamente, verrà esposto lo stato dell'arte dei misuratori ottici di distanza assoluta, ponendo particolare attenzione alle tecniche di misura a triangolazione, a tempo di volo e a onda continua. In conclusione, quest'ultime verranno messe a confronto con una tecnica alternativa, l'interferometria a retroiniezione, al fine di motivare l'utilizzo di tale tecnica per questo lavoro di Tesi.

1.1 Principi di funzionamento del laser

LASER é l'acronimo di *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, cioè amplificazione della luce mediante il fenomeno dell'emissione stimolata di radiazione [4]. In generale, un laser é un dispositivo elettronico in grado di emettere un fascio di luce. Un fascio di luce é un'onda elettromagnetica costituita da particelle chiamate fotoni. Il fotone é il quanto di energia della radiazione elettromagnetica.

Il fascio di luce emesso da un dispositivo laser possiede tre caratteristiche principali:

1. Coerenza
2. Monocromaticità
3. Direzionalità

Per quanto riguarda la prima caratteristica ci si riferisce in particolare a due aspetti differenti: la coerenza spaziale e la coerenza temporale. La

coerenza spaziale esprime la correlazione tra i valori che il campo elettromagnetico emesso assume in due punti diversi dello spazio, mentre per coerenza temporale si definisce la correlazione tra i valori che il campo elettromagnetico assume in due istanti di tempo diversi. Un'onda è coerente spaziale se esiste una differenza di fase costante tra due punti qualunque sul fronte d'onda. Mentre, la coerenza temporale è strettamente legata al tempo di coerenza. Esso è l'intervallo medio di tempo nel quale l'onda compirà un certo numero di oscillazioni prima di cambiare fase.

La seconda proprietà garantisce che tutti i fotoni generati per effetto dell'emissione stimolata risultino iso-frequenziali (aventi tutti la stessa frequenza). Essa è strettamente correlata alla coerenza temporale.

La terza e ultima proprietà, invece, afferma che la radiazione emessa dalla sorgente si propaga nello spazio in un'unica direzione ben definita con piccoli angoli di divergenza del fascio parallelo e perpendicolare, più precisamente, l'angolo solido sotteso da un fascio laser è estremamente piccolo. Essa è strettamente correlata alla coerenza spaziale.

Queste proprietà fondamentali di una sorgente laser sono dovute al principio di funzionamento stesso: l'emissione stimolata di radiazione.

1.1.1 Emissione stimolata di radiazione

Il fenomeno che permette il funzionamento del laser è l'emissione stimolata, per questo è importante capire di cosa si tratta e in che modo essa è differente dall'emissione spontanea. Per fare ciò è conveniente richiamare alcuni concetti di base.

Come accennato in precedenza, la propagazione della luce nello spazio si sviluppa tramite particelle dette fotoni (o quanti), aventi ciascuna una energia pari a:

$$E = h\nu \quad (1.1)$$

dove $h = 6.62 \times 10^{-34} \text{ J s}$ è la costante di Planck, mentre ν è la frequenza della radiazione. A sua volta la frequenza ν è in relazione alla lunghezza d'onda λ tramite la relazione:

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad (1.2)$$

dove $c = 2.99 \times 10^8 \text{ m/s}$ rappresenta la velocità della luce nel vuoto.

Un laser è un sistema ottico costituito da due specchi separati da un mezzo attivo, il quale può essere un solido, un liquido, un gas o un semiconduttore. Si consideri il mezzo attivo come un insieme di atomi (sistema atomico) e per semplicità di trattazione si ipotizzi che il materiale attivo in questione, investito dalla radiazione, abbia due soli livelli energetici dotati

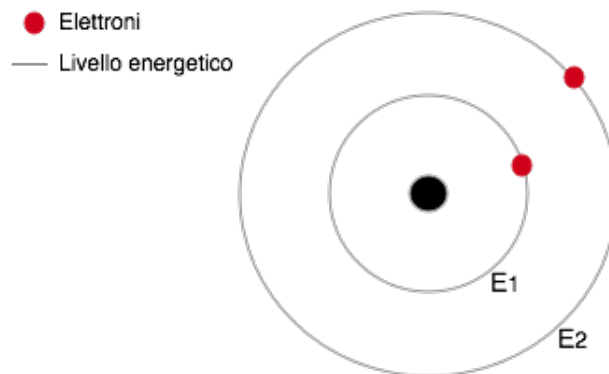


Figura 1.1: Sistema atomico composto da due livelli

rispettivamente di energia E_1 e E_2 con $E_2 > E_1$. Definiamo lo stato ad energia inferiore E_1 come stato fondamentale e lo stato ad energia superiore E_2 come stato eccitato.

Quando la luce investe un materiale, si possono verificare due differenti tipi di transizione:

- *Assorbimento*: Quando il fascio di luce investe un materiale, parte dell'energia posseduta dal fascio viene ceduta. L'assorbimento consiste nel cedere, da parte del fotone, la propria energia al sistema atomico permettendo ad un singolo elettrone di passare da uno stato fondamentale E_1 ad uno stato eccitato E_2 .
- *Emissione*: Il sistema atomico cede energia al campo, in questo caso si possono avere due possibili scenari:
 - *Spontanea*: L'emissione spontanea si verifica quando un elettrone torna dal livello E_2 al livello E_1 , provocando l'emissione di un fotone, senza nessun campo di radiazione incidente su di esso. Essa viene definita anche emissione incoerente: l'energia viene emessa con fase e direzione casuale.
 - *Stimolata*: L'emissione stimolata, invece, si ottiene quando un fotone incidente causa la discesa di un elettrone dal livello E_2 al livello E_1 ottenendo così due fotoni alla stessa frequenza. Quindi, in breve, un fotone colpisce l'atomo e due fotoni lo lasciano. Essa viene definita anche emissione coerente: l'energia viene emessa con la stessa fase, frequenza e direzione.

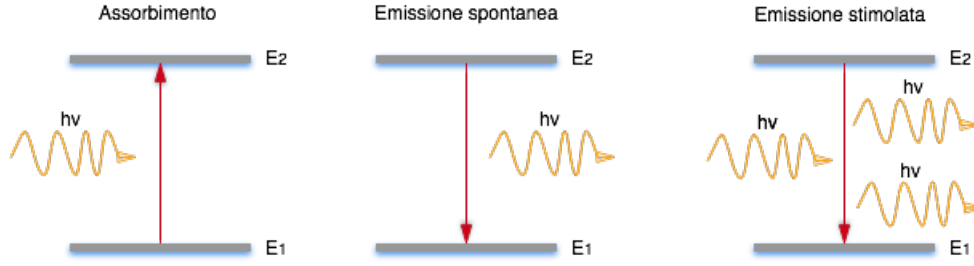


Figura 1.2: Schema di funzionamento di un atomo eccitato: assorbimento, emissione spontanea ed emissione stimolata

L'importanza dell'emissione stimolata sta nel fatto che essendo prodotti due fotoni iso-frequenziali, di fatto avviene un'amplificazione ottica, la quale consente il funzionamento del sistema laser.

Per comprendere i meccanismi che regolano lo scambio di energia tra la radiazione ed il sistema atomico, è necessario introdurre la statistica di Boltzmann [3]. Attraverso tale statistica è possibile definire la popolazione, in termini di densità, di un livello energetico all'equilibrio termico mediante la seguente relazione:

$$N = N_0 e^{-\frac{E}{kT}} \quad (1.3)$$

dove N_0 è la popolazione iniziale in un dato livello energetico e $k = 1.38 \cdot 10^{-23} \frac{J}{K}$ è la costante di Boltzmann.

Indicando, quindi, con N_1 e N_2 il numero di atomi per unità di volume (popolazione atomica) per i rispettivi livelli E_1 e E_2 , possiamo ricavare il rapporto tra il numero di atomi nello stato fondamentale e quello nello stato eccitato, all'equilibrio termodinamico alla temperatura T , tramite la seguente equazione:

$$\frac{N_2}{N_1} = e^{-\frac{\Delta E}{kT}} \quad (1.4)$$

dove $\Delta E = E_2 - E_1$.

La condizione necessaria per avere emissione stimolata è l'inversione di popolazione tra i due livelli energetici, ovvero, il numero di atomi presenti nel livello eccitato deve essere maggiore di quello fondamentale ($N_2 > N_1$).

In un sistema a due livelli questa condizione non è realizzabile poiché, come possiamo osservare dall'equazione 1.4 a causa della presenza dell'esponenziale negativo, N_1 risulta sempre maggiore di N_2 , ovvero gli atomi a energia minima sono maggiori rispetto a quelli eccitati. È evidente dunque che, per avere una maggior probabilità di emissione rispetto all'assorbimento, sia necessaria un'inversione di popolazione, ovvero $N_2 > N_1$.

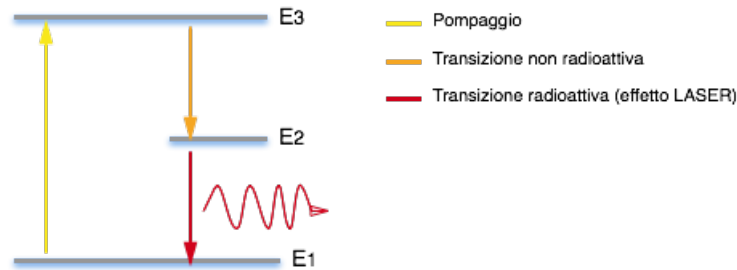


Figura 1.3: Sistema atomico a tre livelli energetici

Per ottenere la condizione di inversione di popolazione é quindi necessario l'utilizzo di un sistema atomico con almeno tre livelli energetici.

1.1.2 Inversione di popolazione

L'idea di base dell'inversione di popolazione consiste nello sfruttare i diversi tempi di vita medi dei differenti stati energetici.

Considerando un sistema ad esattamente tre livelli energetici (E_1 , E_2 e E_3) schematizzato in Figura 1.3, si sottopone il sistema atomico ad una radiazione luminosa di frequenza ν_{31} , corrispondente al gap energetico $E_3 - E_1$, in modo tale che gli elettroni dallo stato E_1 si eccitino raggiungendo lo stato instabile E_3 . Questa prima fase é chiamata *pompaggio*.

Successivamente si manifesta un decadimento dallo stato instabile E_3 allo stato E_2 in tempi molto rapidi e privi di emissione spontanea. Solitamente l'energia rilasciata viene trasferita sotto forma di moto vibrazionale al materiale circostante e non come fotone emesso.

Dal livello E_2 si verifica l'emissione laser alla frequenza ν_{21} e la conseguente regressione dal livello E_2 al livello E_1 . La condizione necessaria, sui tempi di vita medi, per il funzionamento del laser é $\tau_{32} \ll \tau_{21}$, ovvero che il decadimento da E_3 a E_2 sia piú rapido di quello da E_2 a E_1 . Tale condizione permette di avere inversione di popolazione, ovvero $N_2 > N_1$, cosí da poter innescare l'amplificazione ottica e, quindi, l'effetto laser alla frequenza ν_{21} .

Questo metodo é inefficiente perché richiede un pompaggio elevato: é necessario fornire un numero elevato di elettroni al livello E_3 in modo tale che possa donarli al livello E_2 permettendo cosí l'inversione di popolazione. Un struttura piú efficiente é quella a quattro livelli schematizzata in Figura 1.4. In questa disposizione, il pompaggio degli elettroni avviene da E_1 a E_4 a cui segue una transizione rapida e senza radiazione verso E_3 che consente di popolare il livello energetico. A questo punto avviene la transizione lenta

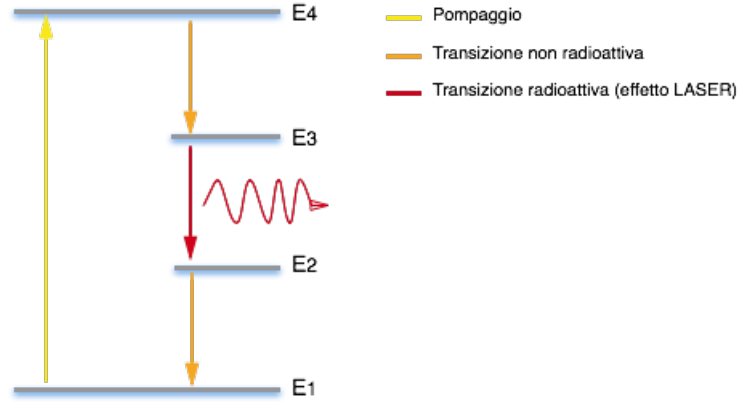


Figura 1.4: Sistema atomico a quattro livelli energetici

e l'emissione tramite azione laser. Infine avviene una rapida transizione da E_2 allo stato fondamentale E_1 .

A differenza della struttura a tre livelli, questa ha il vantaggio di avere il livello E_3 popolato mentre il livello E_2 vuoto ($N_2 = 0$), in quanto gli elettroni decadono rapidamente dallo stato E_2 allo stato E_1 , aiutando a conservare l'inversione di popolazione $N_3 \gg N_2$.

Oltre al meccanismo appena descritto, altre caratteristiche risultano cruciali nel funzionamento del laser: la cavità ottica e il materiale attivo.

1.1.3 Cavità ottica e materiale attivo

Nel paragrafo precedente abbiamo visto come realizzare un materiale amplificatore, che sfrutta l'inversione di popolazione nei livelli energetici. Per generare il fascio laser è necessario, però, inserire il materiale attivo all'interno di una cavità ottica. Una semplice cavità ottica può essere rappresentata dalla cavità a specchi piani e paralleli, nota anche come cavità di Fabry-Perot, mostrata in Figura 1.5. Il fascio di luce viaggia avanti-indietro riflettendosi negli specchi e amplificandosi nel passaggio all'interno del materiale attivo. Il fascio laser in uscita si ottiene rendendo uno dei due specchi della cavità ottica parzialmente trasparente, in modo tale che parte della radiazione esca dalla cavità.

Per definire il guadagno ottico del materiale attivo è necessario introdurre però alcuni concetti preliminari. Indicando con I l'intensità luminosa, definiamo l'intensità della luce all'interno della cavità ottica con la seguente relazione:

$$I(l) = I(0)e^{\sigma(N_2 - N_1)l} \quad (1.5)$$

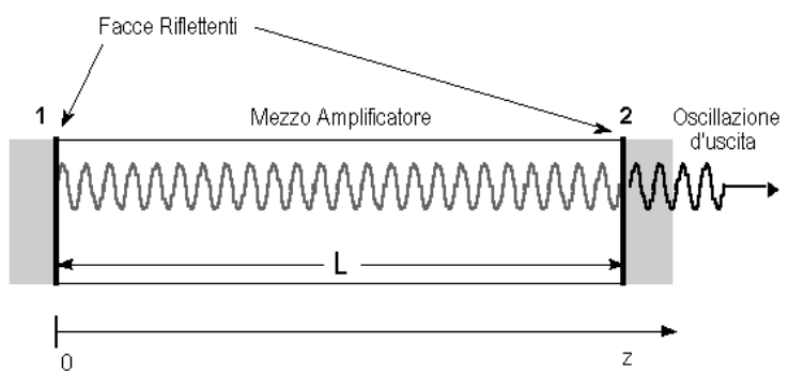


Figura 1.5: Cavità di Fabry-Perot

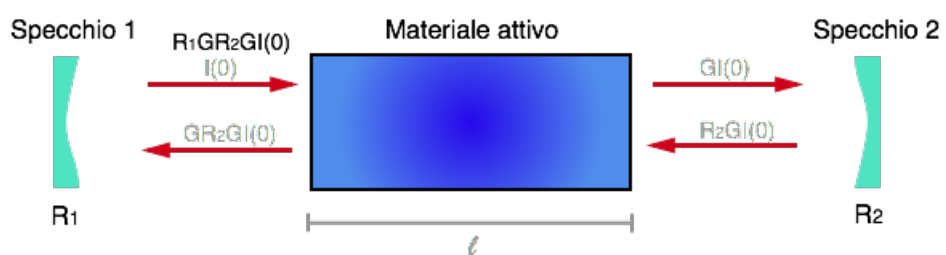


Figura 1.6: Schema del Roundtrip ottico nella cavità ottica

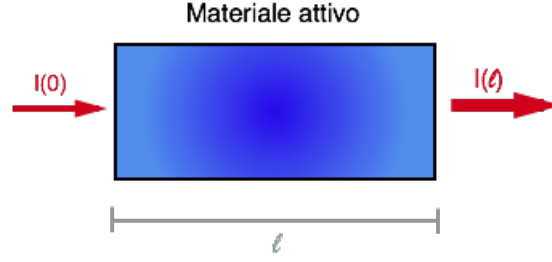


Figura 1.7: Propagazione della radiazione all'interno della cavità laser

dove σ è la *cross section* di emissione e l è la lunghezza della cavità ottica. Possiamo definire il guadagno ottico del mezzo attivo come:

$$G = \frac{I(l)}{I(0)} = e^{\sigma(N_2 - N_1)l} \quad (1.6)$$

sulla quale graveranno le limitazioni dovute alle perdite del materiale e alla perdita utile di potenza dovuta al laser uscente.

La cavità ottica e il mezzo attivo formano quindi un oscillatore ottico, ossia un amplificatore che viene retro-azionato positivamente attraverso specchi riflettenti posti ai lati del materiale attivo. Quindi, per avere un'azione laser è necessario raggiungere una situazione in cui il guadagno di amplificazione sia tale da compensare tutte le perdite presenti.

Considerando come perdite solamente la riflettività parziale degli specchi R_1 e R_2 , l'oscillazione ottica si innesca quando il guadagno del materiale attivo supera le perdite della cavità in un giro completo, o *round trip*:

$$G^2 = \frac{1}{R_1 R_2} \quad (1.7)$$

Quest'ultimo è chiamato guadagno critico o inversione critica.

1.2 Laser a semiconduttore

Un dispositivo laser a semiconduttore utilizza una giunzione p-n come materiale attivo all'interno della cavità ottica. Il pompaggio avviene tramite la ricombinazione di elettroni e lacune, che produce fotoni ad una lunghezza d'onda dipendente dal *gap* tra i livelli energetici del dispositivo: la frequenza della radiazione emessa è legata quindi al tipo di materiali impiegati [4].

In commercio esistono diverse tipologie di laser a semiconduttore. Esse differiscono sulla base di due aspetti fondamentali: il tipo di cavità ottica

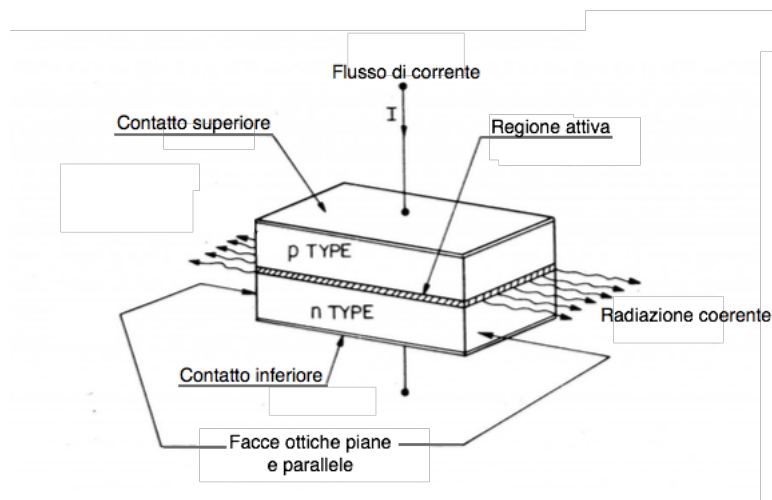


Figura 1.8: Laser Fabry-Perot

impiegata e la forma degli specchi semi-riflettenti necessari a realizzare la retroazione ottica.

Sulla base di queste due caratteristiche si possono individuare tre categorie principali di laser:

1. Laser Fabry-perot
2. Laser DFB
3. Laser VCSEL

1.2.1 Laser Fabry-Perot

I laser Fabry-Perot hanno la classica configurazione con cavità orizzontale a specchi piani, come mostrato in Figura 1.8.

Il principio di funzionamento è analogo a quello di un oscillatore ottico, descritto per esteso nel paragrafo precedente.

In particolare, la luce presente in cavità stimola alcuni atomi, già eccitati dalla corrente di pompa, ad emettere un fotone isofrequenziale con stessa fase di quello incidente. Gli specchi agli estremi della cavità rendono possibile la retroazione positiva, infatti fanno in modo che si possano instaurare alcuni modi di oscillazione stabili, o talvolta solo uno.

Questo può rappresentare uno svantaggio in applicazioni come l'interferometria.

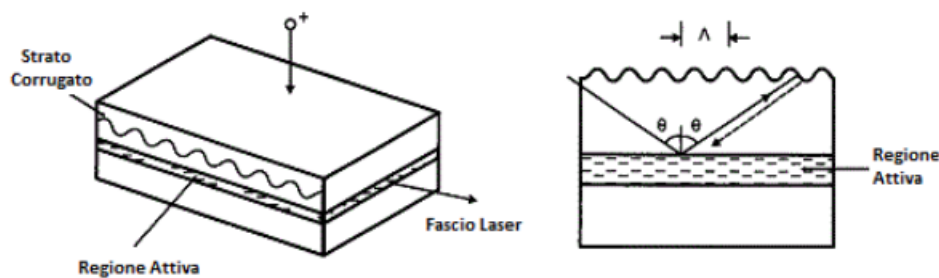


Figura 1.9: Laser DFB

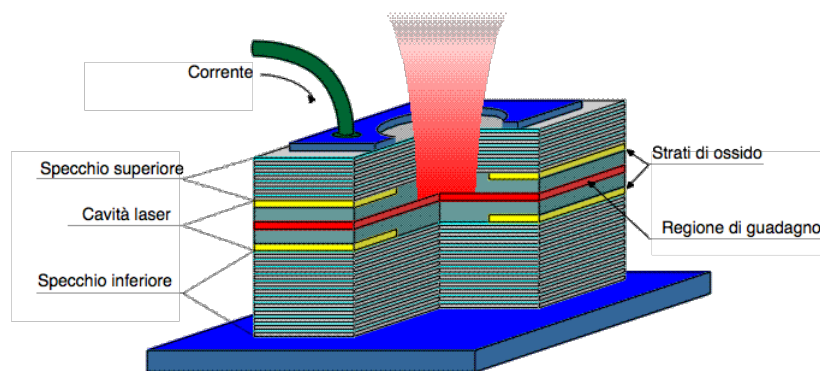


Figura 1.10: Laser VCSEL

1.2.2 Laser DFB

DFB è l'acronimo di *Distributed Feedback Laser*. Il principio di funzionamento è simile a quello dei laser Fabry-Perot, ma con la importante differenza che non sono presenti due specchi separati a formare la cavità ottica ma è inserito uno strato corrugato adiacente allo strato attivo.

Questo strato aggiuntivo è fabbricato in maniera tale da riflettere solo una banda stretta di lunghezze d'onda, così da garantire un singolo modo longitudinale.

Per questa caratteristica i laser DFB, sono più stabili dei Fabry-Perot, e più adatti ad applicazioni connesse alle fibre ottiche.

1.2.3 Laser VCSEL

VCSEL è l'acronimo di *Vertical Cavity Surface-Emitting Laser*. Questi dispositivi, a differenza delle precedenti due categorie, presentano una cavità

ottica verticale.

La cavità ottica ha una lunghezza molto inferiore alle dimensioni laterali del dispositivo, ciò implica che la luce del fascio laser viene emessa dalla superficie piuttosto che dai bordi laterali.

Poiché la cavità risulta essere più ridotta rispetto alle altre tipologie, a parità di guadagno G occorre aumentare la riflettività degli specchi per ottenere un guadagno d'anello maggiore di uno. A sfavore vi è una limitazione in potenza di emissione dovuta agli specchi altamente riflettenti.

1.3 Classi di sicurezza dei laser

Durante lo sviluppo di un sistema che include l'utilizzo di sorgenti laser è di fondamentale importanza garantire lo svolgimento del lavoro in sicurezza. Infatti, avendo a che fare con sorgenti laser, è importante conoscere i danni che esse possono provocare a cose e persone. In particolare, nei casi più gravi, le sorgenti laser possono procurare danni alla retina dell'occhio e ustioni alla pelle.

Per poter scegliere in modo appropriato il laser da impiegare nel dispositivo è indispensabile conoscere le norme legislative che ne regolano l'utilizzo [2]. A livello europeo vige la normativa *IEC/EN 60825-1* che fissa una classificazione dei fasci laser in funzione della lunghezza d'onda e della potenza ottica emessa.

La suddetta normativa classifica la pericolosità di una sorgente laser suddividendola in 4 classi:

- *Classe 1*: Questa classe include le sorgenti laser che non arrecano danni a cose e/o persone
- *Classe 2*: Questa classe comprende i laser che emettono nell'intervallo di lunghezza d'onda compreso tra $400nm$ e $700nm$. Possono provocare danni alla retina dell'occhio in caso di osservazione prolungata.
- *Classe 3*: Questa classe comprende due sotto-classi.
 - *Classe 3A*: Questa classe include tutte le sorgenti laser che risultano sicure per una visione naturale e non mediante strumenti ottici (es. microscopi)
 - *Classe 3B*: Questa classe include tutte le sorgenti laser che risultano pericolose per una visione naturale. È necessario utilizzare protezioni per gli occhi e disporre delle segnalazioni di avvertimento nella zona in cui si utilizza il laser.

- **Classe 4:** Questa classe include le sorgenti laser più pericolose. Possono causare lesioni alla pelle e costituiscono pericolo d'incendio.

La classificazione appena descritta è rappresentata in Figura 1.11, insieme alle lunghezze d'onda corrispondenti a ciascuna classe.

1.4 Telemetri ottici

La telemetria è un insieme di metodi di osservazione aventi lo scopo di fornire la misura della distanza di un oggetto dall'osservatore.

Lo strumento che effettua la misura è chiamato telemetro: esso rileva la distanza assoluta tra lo strumento stesso e un oggetto remoto, chiamato bersaglio. In commercio esistono diverse tipologie di telemetri che si basano sull'impiego di sorgenti laser.

Le tipologie più diffuse sono tre:

1. A triangolazione
2. A tempo di volo

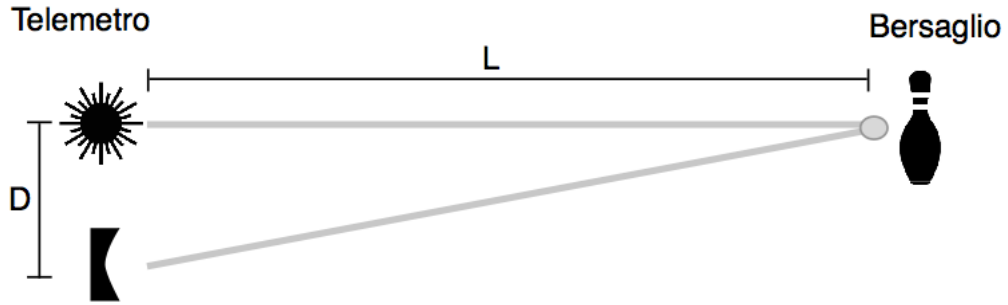


Figura 1.12: Schema di funzionamento di un telemetro a triangolazione

3. A onda continua

1.4.1 Telemetri a triangolazione

I telemetri a triangolazione utilizzano una sorgente laser e un'ottica di ricezione posti perpendicolarmente ad una distanza D tra loro. Inoltre, la sorgente laser è posizionata ad una distanza L dal bersaglio. Si dice, quindi, che il bersaglio è "triangolato" da due punti a distanza D su una stessa linea di base. Lo schema è mostrato in Figura 1.12.

Questo tipo di telemetro si basa sul principio della triangolazione, quindi valuta la distanza del bersaglio, conoscendo l'angolo α con cui il fascio laser viene riflesso sull'ottica di ricezione.

Tramite questo angolo, infatti, è possibile ricavare la seguente relazione:

$$\frac{D}{L} = \tan \alpha \approx \alpha \quad (1.8)$$

Questa approssimazione è valida solo se $\alpha \ll 1$.

L'angolo α si trova valutando la posizione in cui il fascio colpisce il fotorivelatore, secondo la relazione:

$$\alpha = \frac{x}{f_{rec}} \quad (1.9)$$

dove x è la distanza del punto di incidenza sul fotorivelatore dall'asse ottico della lente di ricezione, mentre f_{rec} è la lunghezza focale dell'ottica di ricezione.

La misura della distanza si ricava facilmente dalle precedenti relazioni:

$$L = \frac{D}{x} f_{rec} \quad (1.10)$$

Differenziando quest'ultima equazione si trova l'errore di misura assoluto ΔL dovuto al minimo spostamento misurabile Δx sul rivelatore:

$$\Delta L = -\frac{D}{x^2} f_{rec} \Delta x \quad (1.11)$$

Ricavando quindi un errore di misura relativo pari a:

$$\frac{\Delta L}{L} = -\frac{\Delta x}{x} = -\frac{\Delta \alpha}{\alpha} \quad (1.12)$$

Il principale svantaggio di questa tecnica è che, con l'aumentare della distanza L , l'angolo α diminuisce, e ciò comporta l'aumento dell'incertezza relativa $-\frac{\Delta \alpha}{\alpha}$.

Per tale motivo, questa tipologia di telemetro è utilizzata per la misura di brevi distanze ($0.1 \div 10m$).

1.4.2 Telemetri a tempo di volo

I telemetri a tempo di volo utilizzano un laser impulsato. Essi emettono potenza solo per un brevissimo istante di tempo τ .

Con un bersaglio posto a distanza L dalla sorgente laser, il fascio laser percorre un cammino pari a $2L$ (Andata e Ritorno) in un tempo T viaggiando a velocità della luce $c \approx 3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$, ricavando così la seguente relazione:

$$L = \frac{c}{2} T \quad (1.13)$$

Differenziando la precedente equazione si ottiene:

$$\Delta L = \frac{c}{2} \Delta T \quad (1.14)$$

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta T}{T} \quad (1.15)$$

Si può osservare come la misura ΔL dipenda unicamente dal ΔT che si riesce a risolvere. In pratica, la misura viene effettuata utilizzando un contatore che conta quanti tempi di clock ΔT sono intercorsi tra l'istante di partenza del raggio laser e il momento in cui ritorna all'ottica di rivelazione.

Il vincolo di questi telemetri è che la durata dell'impulso τ deve soddisfare la condizione $\tau \ll \Delta T$. Per tale motivo sono utilizzati per misure di distanze medio-lunghe (fino a $10Km$).

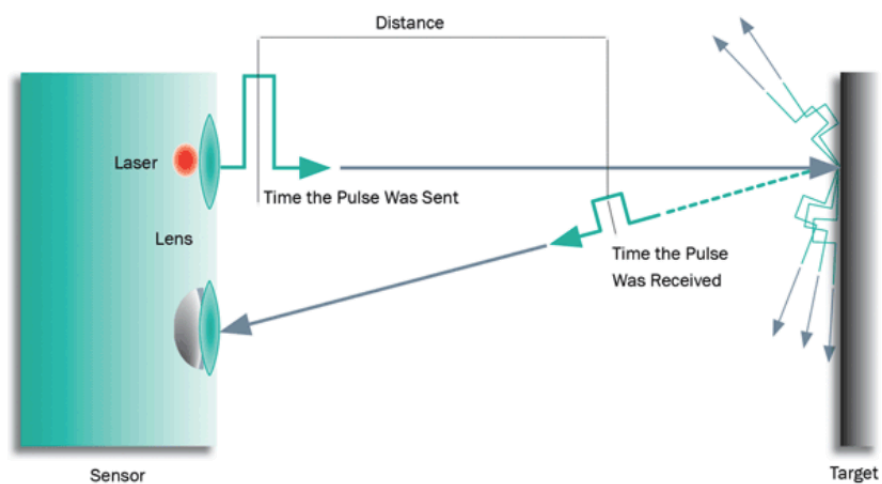


Figura 1.13: Schema di funzionamento di un telemetro a tempo di volo

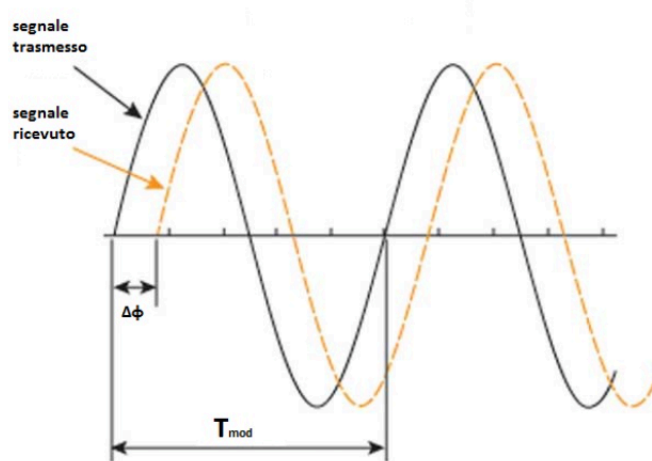


Figura 1.14: Potenza trasmessa e potenza riflessa in un telemetro a onda continua

1.4.3 Telemetri a onda continua

I telemetri a onda continua hanno un funzionamento analogo ai telemetri a tempo di volo, ma a differenza di questi ultimi, la potenza ottica viene modulata sinusoidalmente a frequenza f_{mod} ottenendo il segnale in Figura 1.14.

La potenza trasmessa dal laser vale quindi:

$$P(t) = P_0[1 + m \sin(2\pi f_{mod}t)] \quad (1.16)$$

Nella pratica, la misura non viene effettuata con un contatore elettronico, come per i telemetri a tempo di volo, ma avviene mediante la rilevazione del ritardo di fase $\Delta\phi$ tra il segnale ricevuto P_r e il segnale trasmesso P_t .

Considerando la relazione:

$$\frac{\Delta\phi}{2\pi} = \frac{\Delta t}{T_{mod}} \quad (1.17)$$

dove $\Delta t = \frac{2L}{c}$ e $T_{mod} = \frac{1}{f_{mod}}$, si ottiene così la misura di distanza assoluta:

$$L = \frac{c}{2} \frac{1}{2\pi f_{mod}} \Delta\phi = \frac{\Delta\phi}{S} \quad (1.18)$$

Dall'ultima equazione si può notare come la sensibilità S della misura migliori all'aumentare della frequenza di modulazione. Tuttavia un aumento eccessivo della frequenza di modulazione comporta una riduzione della massima distanza rilevabile.

Questo tipo di telemetro si utilizza per misure comprese tra $1 \div 1000m$, con risoluzioni dell'ordine del millimetro.

1.5 Una tecnica alternativa per la misura

Come già discusso nell'Introduzione, lo scopo di questo lavoro di Tesi è realizzare il prototipo di un misuratore di distanza assoluta che sia a basso costo e con ingombro limitato per poter essere più maneggevole nella misura di medio-brevi distanze.

Da quanto esposto nel precedente paragrafo, emerge che i telemetri descritti non sono in grado di raggiungere tali obiettivi. Infatti tali strumenti sono adatti per la misura di distanze dell'ordine della decina di metri. Per quanto riguarda i telemetri a triangolazione, invece, esistono in commercio strumenti in grado di misurare distanze brevi con buona sensibilità. Tuttavia questi dispositivi, oltre ad avere un costo elevato, necessitano di un'ottica specifica per la ricezione della radiazione riflessa e di un bersaglio cooperativo.

Da queste osservazioni si conclude che, per raggiungere l'obiettivo preposto, è necessario utilizzare una tecnica di misura che si differenzia da quelle comuni, ovvero l'**interferometria a retroiniezione**. Questa tecnica verrà ampiamente discussa nel Capitolo 2.

Capitolo 2

Interferometria a retroiniezione

Capitolo 3

Architettura Hardware dello strumento

Capitolo 4

Architettura Software dello strumento

Capitolo 5

Misure effettuate e dati sperimentali

Conclusioni e sviluppi futuri

Appendice A

Documentazione software

Bibliografia

- [1] S. Donati, G. Giuliani, and S. Merlo. Laser diode feedback interferometer for measurement of displacements without ambiguity. *Quantum Electronics, IEEE Journal of*, 31(1):113–119, Jan 1995.
- [2] A.N.S. Institute. American national standard for safe use of lasers: Ansi z 136.1. Technical report, Laser Institute of America, 2007.
- [3] Safa O Kasap. *Optoelectronics and Photonics: Principles and Practices*. Pearson Higher Ed, 2012.
- [4] O. Svelto. *Principles of Lasers*. Plenum Press, fourth edition, 1998.