

Università degli Studi di Napoli “Federico II”

Scuola Politecnica e delle Scienze di Base
Area Didattica di Scienze Matematiche Fisiche e Naturali

Dipartimento di Fisica “Ettore Pancini”



Laurea triennale in Ottica e Optometria

Calibrazione di un sensore ottico per la misura del livello di un liquido

Relatore:

Prof. De Rosa Rosario

Candidata:

Lucia Festa

Matricola M44000665

A.A. 2021/2022

Sommario

Introduzione	2
Misure di forza di gravità	3
La forza di gravità.....	3
L'esperienza LAG.....	4
Il pendolo di torsione.....	7
Elementi dell'apparato sperimentale	10
Sorgenti LED.....	10
LED superluminescenti	12
Sensori	12
Sensore di posizione (PSD)	14
Leva Ottica	16
Principio di funzionamento	17
Apparato sperimentale e misure.....	20
Apparato sperimentale.....	20
Calibrazione del PSD	22
Calibrazione del sensore di livello	26
Conclusioni.....	30
Bibliografia	31
Ringraziamenti.....	32

Introduzione

Questo lavoro di tesi affronta la descrizione e la calibrazione di un sensore per la lettura del livello del liquido che costituisce la massa che produce la forza di gravità che un pendolo di torsione provvede poi a misurare. L'utilizzo di una massa di campo liquida permette di modulare la forza di gravità che agisce sulla massa di prova controllando solo il livello di un liquido contenuto in un apposito contenitore. Questo permette di ottenere una forza di gravità periodica senza avere allo stesso tempo parti meccaniche in movimento (tranne il livello del liquido). Questo particolare sistema sarà utilizzato per verificare la validità della dipendenza dall'inverso del quadrato della distanza nella forza gravitazionale.

Nella tesi saranno descritti in dettaglio gli aspetti più rilevanti dell'attuatore liquido, in particolare la necessità di controllarne il livello, direttamente legato all'intensità della forza gravitazionale esercitata sulla massa di prova. Per tale scopo si utilizza un sensore basato su una leva ottica, in grado di misurare il livello con elevata precisione. La parte sperimentale del lavoro di tesi è stata proprio la calibrazione di un prototipo del sistema di lettura del livello del liquido.

Il lavoro di tesi è suddiviso in tre capitoli. Nel primo capitolo sono descritte le motivazioni di alcune misure di gravità, in particolare quelle realizzabili in laboratorio tramite strumenti come i pendoli di torsione. Nel secondo, invece, l'attenzione è posta sull'apparato sperimentale, descrivendo nel dettaglio il funzionamento delle diverse parti che lo compongono: LED superluminescenti, fotodiodi sensibili alla posizione e leve ottiche. Nell'ultimo capitolo viene descritto l'apparato sperimentale nel suo insieme, la procedura utilizzata per effettuare le misure e infine vengono presentati i risultati ottenuti dai dati sperimentali.

Misure di forza di gravità

La forza di gravità

La gravità, chiamata anche gravitazione o interazione gravitazionale, è una delle quattro forze fondamentali conosciute finora in natura. Alla fine del XVII secolo, Isaac Newton ne descrisse il comportamento macroscopico in quella che a tutt'oggi viene chiamata legge di gravitazione universale. La forza di gravità agisce attraendo due corpi dotati di massa, posizionati a una certa distanza l'uno dall'altro. È una forza conservativa, ovvero il lavoro da essa compiuto dipende soltanto dalla posizione e non dal percorso fatto per raggiungere tale posizione.

Isaac Newton fu il primo a capire che la massa ha un ruolo cruciale nell'intensità della gravità, il cui nome viene proprio dal latino "gravis", cioè pesante. Capì inoltre che la gravità si manifesta quotidianamente sulla Terra attraverso la forza peso ed è la stessa forza che mantiene i pianeti in orbita intorno al Sole. La legge di gravitazione universale afferma che due masse, m_1 e m_2 , si attraggono con una forza la cui intensità F_g , è proporzionale al prodotto delle masse e inversamente proporzionale al quadrato della loro distanza, r , tramite una costante G .

$$F_g = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad (1)$$

La costante G è detta costante di gravitazione universale ed il valore attualmente accettato, ottenuto tenendo conto del risultato di varie misure sperimentali, è pari a $6.67 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$ [1].

La prima misura della costante di gravitazione universale fu eseguita da Henry Cavendish nel 1798 [2] che, utilizzando una bilancia di torsione, misurò un valore molto vicino quello attuale. Successivamente, nel corso degli anni, sono stati realizzati diversi altri esperimenti che hanno migliorato la precisione con cui questa fondamentale costante fisica è conosciuta [3].

Parallelamente, negli ultimi decenni, ci sono state diverse indicazioni sul fatto che la forza di gravità non dipendesse esattamente dal quadrato della distanza.

Una deviazione dalla legge dell'inverso del quadrato può essere vista come se la costante di gravitazione dipendesse dalla distanza: $G(r)$. In questo modo la forza tra le masse m_1 ed m_2 viene espressa come:

$$F(r) = -G(r) \frac{m_1 m_2}{r^2} = -G_\infty \frac{m_1 m_2}{r^2} [1 + a(r)] \quad (2)$$

dove G_∞ rappresenta un valore della costante di gravitazione universale che non dipende dalla distanza mentre $a(r)$ è una funzione della distanza che corrisponde alla deviazione. Normalmente la deviazione viene parametrizzata attraverso un particolare tipo di potenziale:

$$V(r) = -G_\infty \frac{m_1 m_2}{r} (1 + \alpha e^{-r/\lambda}) \quad (3)$$

detto potenziale di Yukawa, nel quale il parametro adimensionale α rappresenta l'entità della deviazione della dipendenza dal quadrato della distanza mentre la distanza λ descrive la portata dell'interazione. Fino ad oggi non è stata osservata alcuna violazione ma le misure fatte attraverso vari esperimenti, negli ultimi anni, hanno contribuito a fissare i limiti ai possibili valori di α e λ [4].

L'esperimento LAG

Gran parte degli esperimenti per misure di gravità vengono realizzati utilizzando una o più masse di campo, ovvero delle masse che agiscono da sorgente del campo gravitazionale (FM: Field Mass) i cui effetti vengono misurati attraverso una massa di prova (TM: Test Mass). Negli esperimenti svolti a terra, la massa di prova è normalmente sospesa ad un pendolo di torsione. L'effetto fisico che si può misurare è il cambiamento della modalità di oscillazione del pendolo oppure l'orientamento della massa di prova.

Questo è vero anche per gli esperimenti che puntano a misurare la deviazione della dipendenza dal quadrato della distanza. In particolare, in questi casi, occorre svolgere due o più misure nelle quali la distanza tra le masse di campo e quella di test viene cambiata. L'entità della distanza tra TM ed FM è legata, nella parametrizzazione alla Yukawa, al parametro λ , per cui gli esperimenti con i pendoli riescono normalmente a fissare i limiti per valori di λ compresi tra frazioni di centimetri e pochi metri [4].

Tipici problemi, in questo tipo di apparati sperimentali, sono la precisione e la ripetibilità con cui le masse possono essere posizionate le une rispetto alle altre oltre che l'uniformità con cui le masse stesse possono essere realizzate. Inoltre, allo scopo di aumentare la sensibilità della misura, molto spesso in questo tipo di esperimenti si opera in maniera da modulare, ad una frequenza opportuna, la forza di gravità tra TM ed FM, minimizzando in tal modo l'effetto dei disturbi che inevitabilmente agiscono sull'apparato.

In questo lavoro di tesi verrà descritto un apparato nel quale le masse di campo sono costituite da un liquido. L'utilizzo di un liquido anziché di un solido costituisce un vantaggio poiché la densità di un liquido puro e stazionario è normalmente molto più uniforme di quella di un solido. Un vantaggio ulteriore è dato dalla possibilità di modulare la forza di gravità senza spostare alcun elemento meccanico dell'apparato, ma cambiando semplicemente il livello del liquido, operazione che, disponendo di opportuni sensori e sistemi di movimentazione, può essere fatta in maniera controllata e ripetibile. Naturalmente, per effettuare le misure a distanze diverse tra TM ed FM, sarà necessario spostare meccanicamente l'una o l'altra.

In alternativa a un liquido si potrebbe utilizzare un gas. In questo caso la forza dovrebbe essere modulata modificando la pressione del gas anziché il livello del liquido. Ciò offrirebbe l'ulteriore vantaggio che la posizione del centro di massa non cambia durante la modulazione. Tuttavia, a pressioni ordinarie, la densità del gas, e quindi l'effetto gravitazionale, sono molto inferiori rispetto a un liquido e quindi l'effetto della forza di gravità sarebbe troppo difficile da misurare.

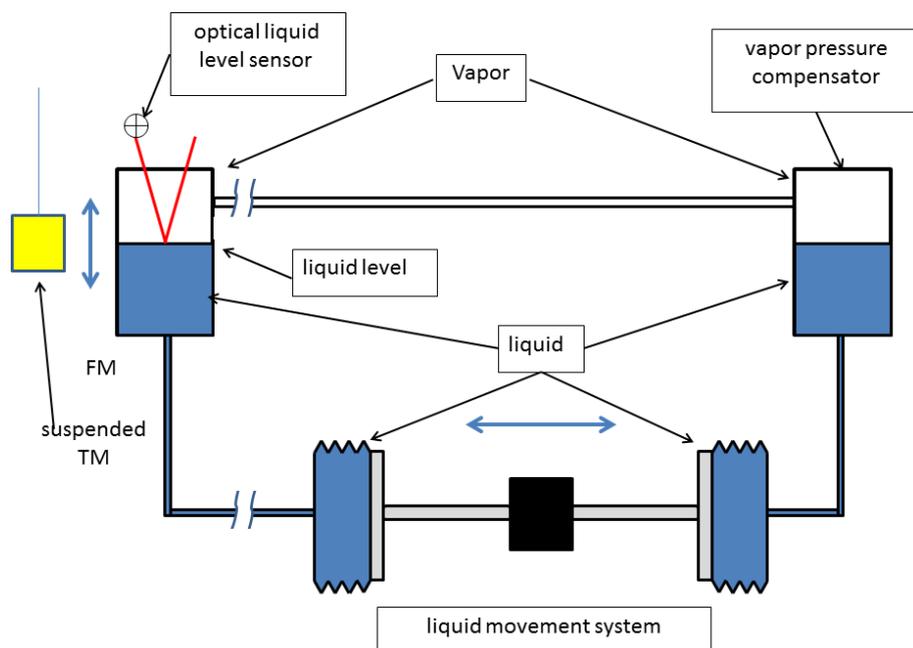


Figura 1 - Schema dell'attuazione gravitazionale nell'esperimento LAG

La forza o la coppia dovuta alla gravità agente su una massa di prova viene modulata variando il livello del liquido in un contenitore posto vicino alla massa di prova sospesa al pendolo. Il contenitore ha la forma di un cilindro ed è collegato, tramite un tubo, ad un serbatoio di liquido esterno, dal quale il liquido può essere forato ad entrare o

uscire tramite un pistone azionato da un motore (Figura 1). La modulazione del livello del liquido viene effettuata a bassissima frequenza, in maniera da poter essere considerata stazionaria, ed è controllata in modo tale che il serbatoio non sia mai completamente vuoto o pieno. In questo modo viene modulato solo il liquido all'interno del serbatoio per cui il liquido nel tubo, sempre pieno, non contribuisce a modulare il campo di gravità. L'unica parte mobile dell'esperimento, è quindi il pistone che agisce sui serbatoi esterni; ma esso può essere collocato a diversi metri dall'apparecchio, in modo che il suo effetto sia completamente trascurabile rispetto all'effetto del liquido nel serbatoio. Per mantenere costante la pressione del vapore durante il funzionamento, è stato realizzato un sistema speculare, azionato dallo stesso pistone in modo opposto, che forza il liquido in un contenitore di compensazione, di geometria uguale a quello posto in prossimità della massa di prova. I serbatoi sono posizionati in modo da avere la stessa pressione. Il pendolo di torsione con la sua TM ed i contenitori per il liquido che opera da FM, sono posizionati all'interno di un sistema da vuoto per minimizzare gli effetti dei disturbi esterni. Tutto il resto dell'apparato, serbatoi, pistoni e contenitori di compensazione, sono posti invece posti all'esterno [5]. L'apparato sperimentale dedicato a questa misura, è denominato LAG: Liquid Actuated Gravity. Attualmente è attivo un prototipo di tale apparato che utilizza, come liquido per generare il campo gravitazionale, della semplice acqua. Nell'apparato finale si utilizzerà il mercurio, che, grazie alla maggiore densità, è in grado di produrre una maggiore forza gravitazionale.

Il livello del liquido che costituisce le FM viene misurato in maniera accurata e precisa da un sensore a leva ottica. Un raggio di luce viene riflesso sull'interfaccia del liquido e il raggio riflesso viene monitorato da un dispositivo di rilevamento della posizione. Con un tale sensore, il livello del liquido può essere misurato con precisione sub-micrometrica micron e controllata in modo ripetibile agendo sul pistone [6].

Gli attuali limiti per il parametro α , nell'intervallo delle distanze con le quali è possibile operare con l'esperimento LAG, sono piuttosto stringenti e vanno da circa 10^{-3} a $2 \cdot 10^{-4}$. Tuttavia, operando con una opportuna geometria delle masse di prova e di campo, ed utilizzando il mercurio come liquido, sarà possibile migliorare gli attuali limiti sui parametri α e λ (Figura 2) [5].

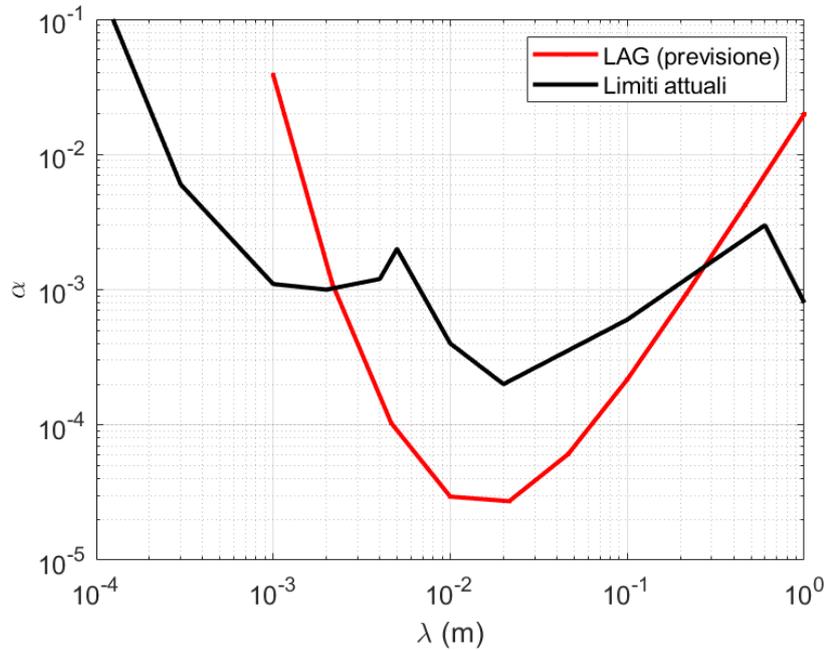


Figura 2 - Limiti attuali sui parametri α e λ con previsione del contributo dell'esperimento LAG

Il pendolo di torsione

Il pendolo di torsione utilizzato per LAG ha una struttura particolare. Infatti, esso è in realtà un doppio pendolo di torsione, denominato PETER (Pendolo Traslazionale E Rotazionale) [7]. La massa di prova è sospesa ad un sottile filo di tungsteno la cui estremità superiore è fissata ad un'asta. Questa è a sua volta sospesa ad un secondo filo fissato poi al supporto del pendolo. Una seconda massa è sospesa all'asta, in corrispondenza dell'altra estremità, per bilanciare il peso della TM (Figura 3).

Tale particolarità permette di misurare sia la forza che la coppia agente sulla massa di test. Infatti, una forza diretta lungo l'asse y produrrà una rotazione dell'asta, misurando la quale è possibile risalire all'intensità della forza, mentre una coppia agente sulla TM provocherà principalmente una rotazione della stessa, e quindi misurandone l'angolo di rotazione diventa possibile stimare la coppia agente sulla massa di prova.

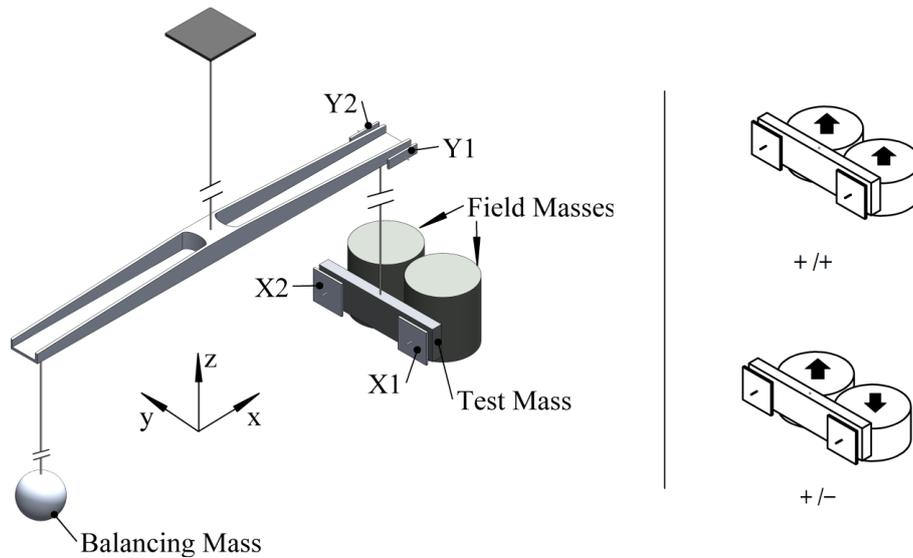


Figura 3 - Schema dell'esperimento LAG

Per aumentare l'effetto della forza gravitazionale esercitata sulla massa di prova, vengono utilizzate una coppia di masse di campo, cilindriche. Ciascuna di esse è dotata del sistema di riempimento/svuotamento mostrato in figura 1, e quindi è possibile modulare il livello del liquido in maniera indipendente in ciascun contenitore. In questo modo è possibile adottare diverse modalità di modulazione, in particolare quelle in cui i livelli nei due contenitori si muovono in fase o in controfase (rispettivamente configurazioni $+/+$ e $+/-$ nel riquadro a destra della figura 3). L'utilizzo di queste diverse modalità di modulazione consente di realizzare diverse combinazioni di forze e coppie gravitazionali sulla massa di prova, senza spostare alcun elemento meccanico.

Nel prototipo dell'esperimento LAG, realizzato senza apportare variazioni importanti su PETER, il primo stadio di sospensione è a forma di croce, ma sarà successivamente sostituito da un'unica asta come indicato in figura 3. La TM, attualmente di forma cubica, sarà sostituita da una piastra rettangolare, mentre la massa di bilanciamento, anch'essa cubica nel prototipo attuale, potrà essere una sfera avente la stessa massa della TM, in modo che nessuna coppia venga esercitata su di essa dalle masse di campo.

È importante sottolineare che, durante la modulazione in forza e coppia, la TM sarà controllata da un sistema in feed-back che agisce tramite un attuatore elettrostatico, in modo che la distanza e l'orientamento rispetto alle FM siano mantenute costanti durante la misurazione. La forza e la coppia agenti sul TM verranno quindi estratte dai segnali di correzione del feed-back. Nella figura 3 gli elementi X1 e X2 rappresentano

gli elettrodi utilizzati per controllare la posizione angolare della TM attorno all'asse verticale, mentre Y1 e Y2 sono quelli utilizzati per controllare la rotazione dell'asta superiore intorno all'asse verticale.

Infine, occorre ricordare che, pur fornendo evidenti vantaggi dovuti alla disponibilità di più segnali di diagnostica, l'uso di un pendolo a due stadi non è strettamente necessario e si potrebbe utilizzare, per l'apparato finale, anche un pendolo di torsione a singolo stadio, che corrisponde ad una configurazione più facile da realizzare e determina un funzionamento più semplice da gestire.

Elementi dell'apparato sperimentale

In questo capitolo vengono descritti gli elementi che compongono l'apparato sperimentale utilizzato per effettuare le misure di livello dell'acqua, tramite il sensore di posizione a leva ottica. L'apparato nel suo insieme, le misure e l'analisi dei dati saranno invece illustrati nel capitolo successivo.

Sorgenti LED

I LED (Light-Emitting Diode) sono diodi che emettono luce. Sono componenti elettronici che trasformano l'energia elettrica in luce grazie al movimento degli elettroni all'interno del materiale del diodo. I LED stanno iniziando pian piano a sostituire le più tradizionali sorgenti luminose poiché hanno bassi consumi energetici e hanno una grande efficienza.

Grazie al fenomeno dell'elettroluminescenza i LED sono in grado di generare luce al passaggio della corrente che li attraversa. Infatti, quando si applica una tensione ai capi di un LED, quello che succede è che gli elettroni si muovono in corrispondenza della giunzione dei semiconduttori di tipo n e p che si trovano all'interno del diodo. Quando l'elettrone arriva in corrispondenza della giunzione p-n perde parte della propria energia. Nei LED, nello specifico, il dispositivo è realizzato in modo da produrre luce a differenza di ciò che accade nei diodi tradizionali, per i quali la perdita di energia avviene sotto forma di calore. La quantità di energia persa definisce il colore della luce prodotta.

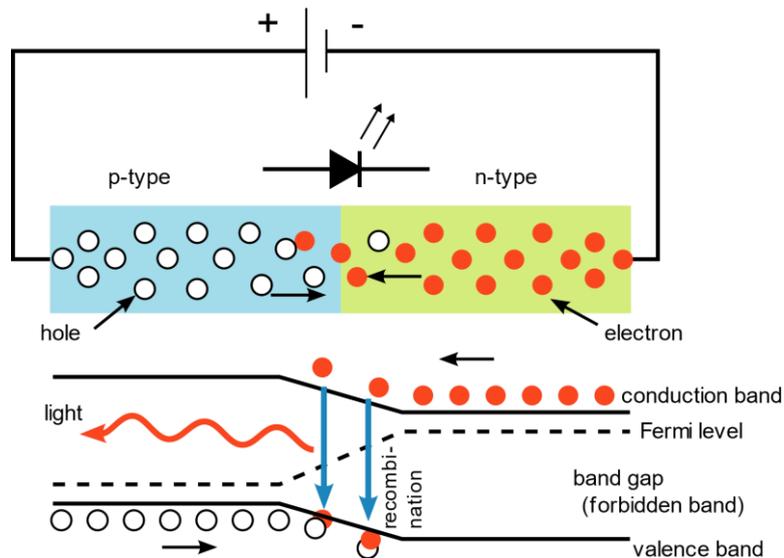


Figura 1 - Rappresentazione di un LED in polarizzazione diretta: in alto lo schema della sua giunzione p-n, in basso il corrispondente diagramma a bande

Quando al diodo viene applicata una tensione diretta ci sono due separazioni gli elettroni che vengono diretti nella regione n invece le lacune nella regione p, finendo entrambi nella cosiddetta "regione attiva", nei pressi della giunzione stessa. Il differente drogaggio p ed n delle rispettive regioni è importante poiché favorisce il passaggio delle cariche elettriche. Elettroni e lacune si spostano di livello energetico in livello energetico, gli elettroni si spostano nella banda di conduzione del semiconduttore mentre le lacune in quella di valenza. Tra le due bande si crea una zona che si chiama banda proibita, e inoltre nelle due bande troviamo zone energetiche in cui la struttura atomica del materiale permette ai portatori di carica di muoversi. A fine di ciò gli elettroni e le lacune di combinano di nuovo e rilasciano una certa quantità di energia che viene definita proprio da questa banda proibita. Si possono verificare due fenomeni, se è sufficientemente elevata questi pacchetti energetici saranno fotoni e la ricombinazione sarà definita radiativa, altrimenti sarà calore e la ricombinazione è definita non radiativa.

Solitamente i materiali con cui vengono prodotti i LED hanno indici di rifrazione molto elevati rispetto a quello dell'aria. Quando si passa da un mezzo con un indice di rifrazione maggiore ad uno minore, quello che si verifica è il fenomeno della riflessione totale interna. Nello specifico alcuni semiconduttori a facce piane emettono radiazione solo in direzione perpendicolare rispetto alla superficie del semiconduttore stesso e per pochissimi angoli si forma il "cono di luce". I fotoni, quelli che incidono su un angolo maggiore rispetto a quello critico e alla normale vanno in riflessione totale interna e non riescono ad uscire dal diodo stesso, però, potranno

uscire o da una faccia principale o da quella laterale quando l'angolo di incidenza risulta minore di quello critico.

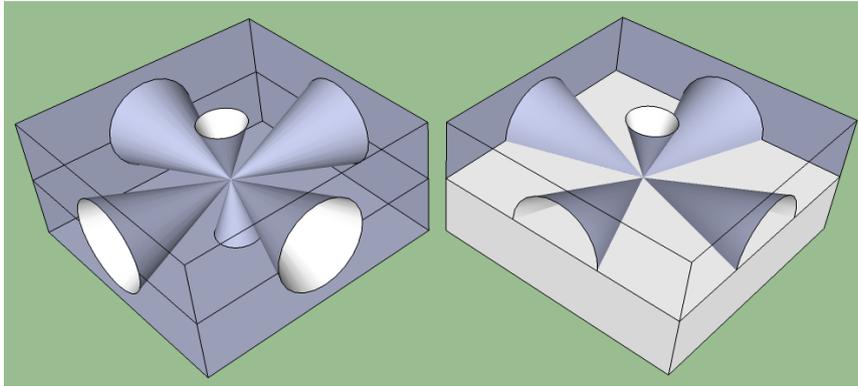


Figure 2 - Rappresentazioni dei coni di emissione da una sorgente puntiforme. A sinistra un wafer completamente trasparente, a destra uno trasparente a metà.

LED superluminescenti

I LED superluminescenti sono sorgenti di luce basati sul fenomeno della superluminescenza. Sono dispositivi che emettono luce incoerente, ad elevata intensità e con larga banda di lunghezza d'onda. I LED superluminescenti hanno lo stesso funzionamento dei LED semplici ovvero a giunzione p-n. Essi sono realizzati in modo tale da avere un solo canale di amplificazione per l'emissione lungo lo strato che funge da guida d'onda; tuttavia, la risposta del dispositivo è tale da non poter innescare l'effetto laser.

L'applicazione di un potenziale agli estremi del dispositivo provoca il passaggio di una corrente nella regione attiva dello stesso materiale, la corrente fluisce dalla zona p a quella n. Durante tutto il processo la radiazione elettromagnetica è prodotta per ricombinazione degli elettroni e delle lacune. Nello specifico la giunzione n-p per i SLED è stata realizzata per avere una grande quantità di bande energetiche aventi differenti energie sia per gli elettroni che per le lacune, così da poter ottenere più frequenze ottiche.

Sensori

Un sensore, o trasduttore, è un dispositivo che presenta in grado di trasformare una certa grandezza fisica in un'altra. Con riferimento alla figura 3, si può schematizzare un tale dispositivo come un sistema al cui ingresso arriva la grandezza fisica da

misurare e che genera, in uscita, una seconda grandezza fisica, tipicamente una tensione o una corrente, il cui valore è funzione dell'ingresso.

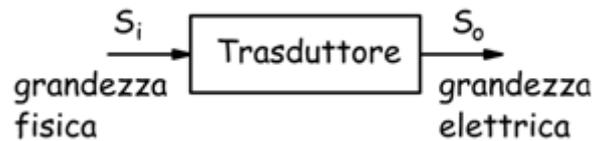


Figura 3 – Schema di un trasduttore

Esistono sensori per misurare la gran parte delle grandezze fisiche come: temperatura, umidità, posizione, velocità accelerazione, etc. Un esempio di sensore possono essere le termocoppie che convertono un differente segnale di temperatura in un segnale elettrico. Mentre per sensore di posizione intendiamo un sistema in grado di misurare la distanza di un oggetto rispetto ad un punto di riferimento.

Esistono, inoltre, diverse classificazioni. Un primo criterio di classificazione dei trasduttori si basa sul modo di conversione della grandezza fisica in ingresso:

- I trasduttori primari convertono direttamente la grandezza fisica in ingresso in una grandezza elettrica.
- I trasduttori secondari trasformano preventivamente la grandezza fisica in ingresso in un'altra grandezza fisica, rilevabile attraverso un trasduttore primario.

Un altro criterio di classificazione dei trasduttori è basato sul tipo di grandezza elettrica prodotta in uscita (tensione, corrente, capacità, etc..). Un terzo criterio di classificazione si riferisce la tipo di segnale prodotto. Un esempio di trasduttore di luminosità è il fotodiodo, che esprime un segnale luminoso tramite una corrente proporzionale alla intensità della radiazione incidente (figura 4).



Figura 4 – Simbolo di un fotodiodo

Il suo funzionamento è basato sul principio che una giunzione p-n, polarizzata inversamente, vede aumentare la corrente che la percorre quando viene esposta a radiazione luminosa (quindi, prima di tutto, dobbiamo usare un diodo polarizzato inversamente). Questo fenomeno è dovuto al fatto che i fotoni incidenti, liberano

delle coppie elettrone-lacuna che sotto l'effetto del campo elettrico applicato aumentano l'intensità della corrente inversa.

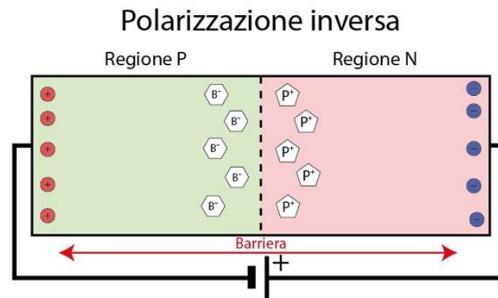


Figura 5 – Schema di un diodo polarizzato inversamente

Esistono tre regioni in cui si ha la formazione delle coppie elettrone-lacuna. La prima regione in cui sia gli elettroni che le lacune sono generate da una zona di svuotamento e si allontanano molto velocemente sotto l'effetto del campo elettrico. Il campo elettrico va da n a p, le lacune si muovono verso p invece gli elettroni verso n. Quello che ne risulta è una foto-corrente nel circuito esterno ma in direzione opposta cioè da n a p. Nella seconda regione, la coppia elettrone-lacuna sono generate fuori dalla zona di svuotamento ma comunque nella sua prossimità. Un elettrone se generato nella zona p, può essere spostato nella n e contribuire alla corrente esterna. La stessa cosa vale per la lacuna. Nell'ultima regione le coppie elettrone-lacuna sono generate molto lontano dalla zona di svuotamento e pertanto le cariche non possono essere spostate poiché non esiste il campo elettrico quindi si combinano di nuovo. In questa regione quindi il contributo alla corrente inversa è trascurabile. Ci sono tre diversi modi di funzionamento per un fotodiode [8]:

1. circuito aperto (fotovoltaico)
2. corto circuito
3. polarizzazione inversa (fotoconduttivo).

Sensore di posizione (PSD)

Un tipo particolare di sensore di posizione può essere realizzato utilizzando un fascio di luce che incidente su un elemento sensibile opportunamente realizzato, in modo di fornire informazioni sulla posizione nella quale la luce ha colpito il sensore.

La posizione della luce incidente viene rivelata attraverso vari metodi, inclusi quelli che utilizzano rilevatori a più elementi (ad esempio, sensore di immagine). A differenza di questi, il PSD (Position Sensing Device) è un dispositivo monolitico

idealizzato per rilevare la posizione della luce incidente. Nello specifico il PSD è un fotosensore non segmentato che sfrutta la resistenza superficiale del fotodiode, fornisce segnali elettrici continui e offre un'eccellente risoluzione della posizione, risposta rapida e alta affidabilità. Il PSD viene utilizzato in molti campi come ad esempio: misurazioni di posizione, angoli, distorsione, vibrazione e riflessione/rifrazione dell'obiettivo. Le applicazioni includono anche misurazioni di precisione come misuratori di spostamento laser, nonché dispositivi ottici di controllo remoto, sensori di distanza e interruttori ottici. Esistono due tipi di sensori:

1. a una dimensione: hanno di solito una forma lunga e stretta, adatta a rivelare la posizione del fascio rispetto alla lunghezza del sensore. Alcuni tipi possono avere lunghezze fino a 20mm.
2. a due dimensioni: hanno di solito forma quadrata, e possono rivelare la posizione del fascio sulla loro intera area.

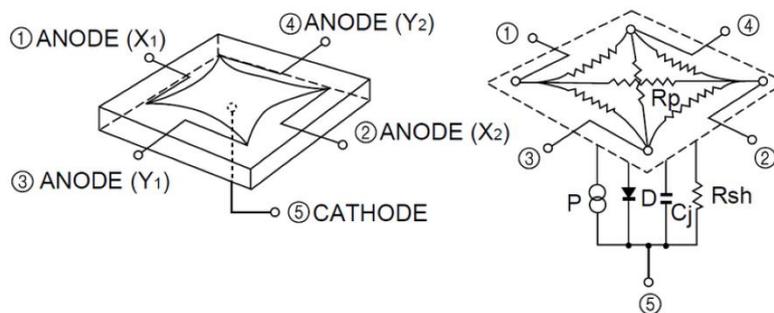


Figura 6 – Struttura dei PSD a due dimensioni

Un PSD consiste essenzialmente in uno strato resistivo uniforme formato su una o entrambe le superfici di un substrato semiconduttore ad alta resistività e una coppia di elettrodi formati su entrambe le estremità dello strato resistivo per l'estrazione delle cariche. L'area fotosensibile è formata da una giunzione n-p che genera fotocorrente per effetto della luce incidente. Il principio di funzionamento è formato da un substrato di silicio ad alta resistività di tipo n si forma uno strato resistivo di tipo p che funge da area fotosensibile per la conversione fotoelettrica e uno strato resistivo. Una coppia di elettrodi di uscita è formata su entrambe le estremità dello strato resistivo di tipo P. La parte posteriore del substrato di silicio è uno strato n a cui è collegato un elettrodo comune. Solitamente questa è la stessa struttura di quella dei fotodiode PIN ad eccezione dello strato resistivo di tipo p sulla superficie. Quando un fascio luminoso colpisce il PSD, viene generata una carica elettrica proporzionale al livello di luce nella posizione di incidenza della luce. Questa carica elettrica fluisce come fotocorrente attraverso lo strato resistivo e viene estratta dagli elettrodi di

uscita X1 e X2, pur essendo divisa in proporzione inversa alla distanza tra la posizione della luce incidente e ciascun elettrodo.

Le forme dell'area fotosensibile e degli elettrodi dei PSD bidimensionali sono state migliorate per sopprimere le interazioni tra gli elettrodi.

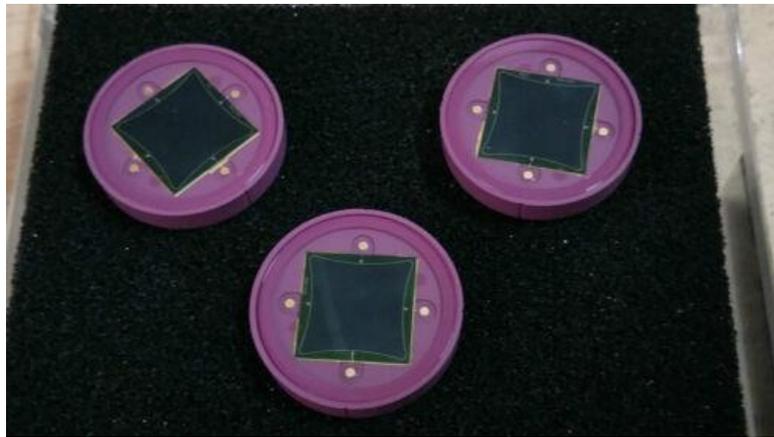


Figura 7 – PSD a due dimensioni

Leva Ottica

La leva ottica viene utilizzata per effettuare con massima precisione misurazione di piccoli spostamenti e rotazioni. Viene utilizzata tale tecnica poiché ha un particolare vantaggio, ossia, l'assenza di contatto tra la parte in movimento da misurare e il sensore stesso, inoltre, la sensibilità può essere migliorata aumentando o diminuendo la lunghezza del braccio della leva.

L'apparato che utilizza la leva ottica generalmente è composto da tre parti:

1. un rivelatore di radiazione elettromagnetica;
2. uno specchio, generalmente posto sull'oggetto di cui si vuole conoscere l'eventuale spostamento o rotazione;
3. 3na sorgente di radiazione elettromagnetica.

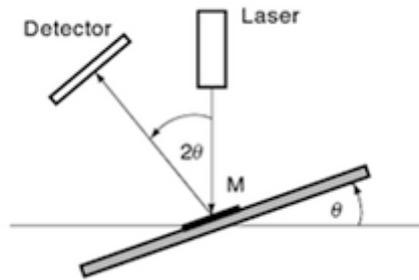


Fig 8 Schema di un apparato che utilizza la leva ottica

Principio di funzionamento

In riferimento alla figura 9 supponiamo di avere un fascio di radiazione elettromagnetica che incide su uno specchio.

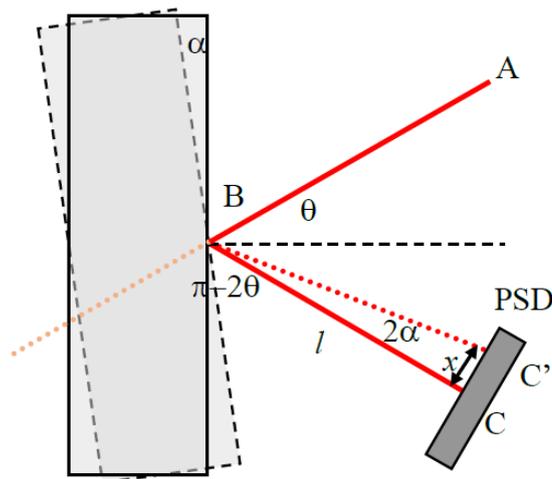


Fig. 9 Specchio ruotato di un angolo α

Il raggio AB incide sullo specchio fino ad essere riflesso nella direzione BC. L'angolo di incidenza del fascio è θ , per cui, dopo la riflessione l'angolo di deviazione del fascio sarà pari a $\delta = \pi - 2\theta$ e quindi il fascio procederà fino al punto C corrispondente al centro del PSD. Ruotando lo specchio di un angolo α , il nuovo angolo di incidenza sarà pari a $\theta + \alpha$, ne segue che l'angolo di deviazione sarà diverso e pari a $\delta' = \pi - 2(\theta + \alpha)$. La differenza l'angolo di deviazione prima e dopo la rotazione sarà: $\delta' - \delta = 2\alpha$

Ne risulta che il fascio di radiazione elettromagnetica che colpisce uno specchio ruotato, viene deviato di una quantità pari al doppio della rotazione dello specchio. La posizione del fascio riflesso, prima e dopo la rotazione dello specchio, risulta,

evidentemente, proporzionale alla distanza percorsa da quest'ultimo prima di incontrare il rivelatore, che, nella versione più semplice, può essere una comune scala graduata. Da qui il nome di "leva" ottica, giacché tale distanza amplifica la rotazione del fascio riflesso tramite un "braccio" che è esattamente tale distanza.

In particolare, lo spostamento del fascio sul fotodiodo, posto ad una distanza l dallo specchio, ossia la lunghezza del segmento CC' , sarà pari a:

$$x = l \tan 2\alpha \quad (1)$$

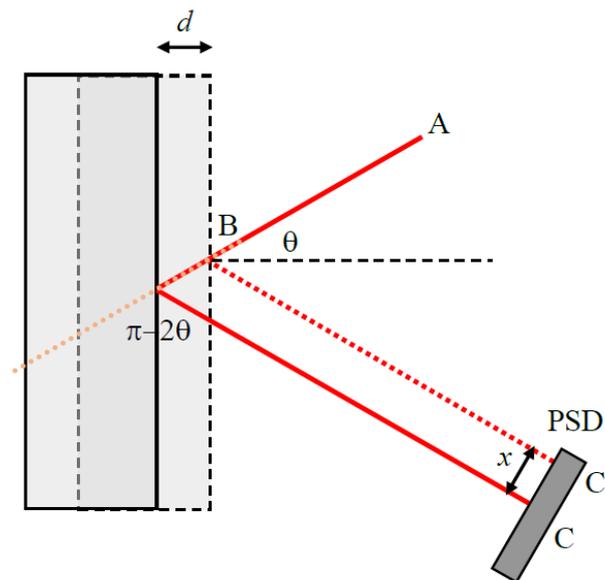


Figura 10 – Specchio traslato della quantità d con fotodiodo perpendicolare al fascio

Nel caso in cui lo specchio viene invece traslato, di una certa quantità d (figura 10), il fascio riflesso mantiene lo stesso angolo di deviazione pari a $\delta = \pi - 2\theta$, ma poiché la riflessione avviene in punto diverso del percorso ovvero nel punto B' invece che nel punto B , il raggio riflesso risulta traslato rispetto alla situazione iniziale, per cui colpirà il fotodiodo nel punto C' , posto ad una distanza dal punto iniziale C pari a:

$$x = 2 d \sin \theta \quad (2)$$

Sempre per una traslazione dello specchio, ma nel caso in cui il PSD venga disposto parallelamente allo specchio stesso (figura 11), corrispondente al set-up utilizzato in questo lavoro di tesi, la distanza tra i punti C e C' , pari allo spostamento del fascio sul sensore, risulta pari a:

$$x = 2d \tan 2\theta \quad (3)$$

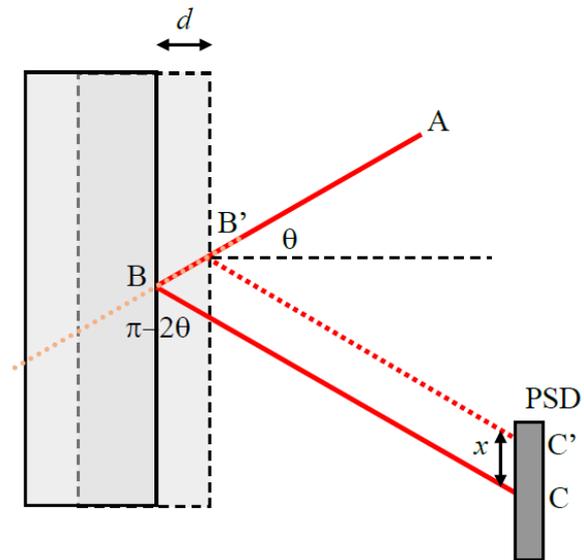


Figura 11 – Specchio traslato della quantità d con fotodiodo perpendicolare allo specchio

Apparato sperimentale e misure

Apparato sperimentale

Per la calibrazione del sistema di lettura del livello del liquido è stato realizzato, su un banco ottico, un apparato sperimentale designato allo scopo (figura 1).

Questo è costituito da una sorgente SLED accoppiata in fibra il cui fascio arriva su uno specchio e viene riflesso verso un fotodiode position sensing.

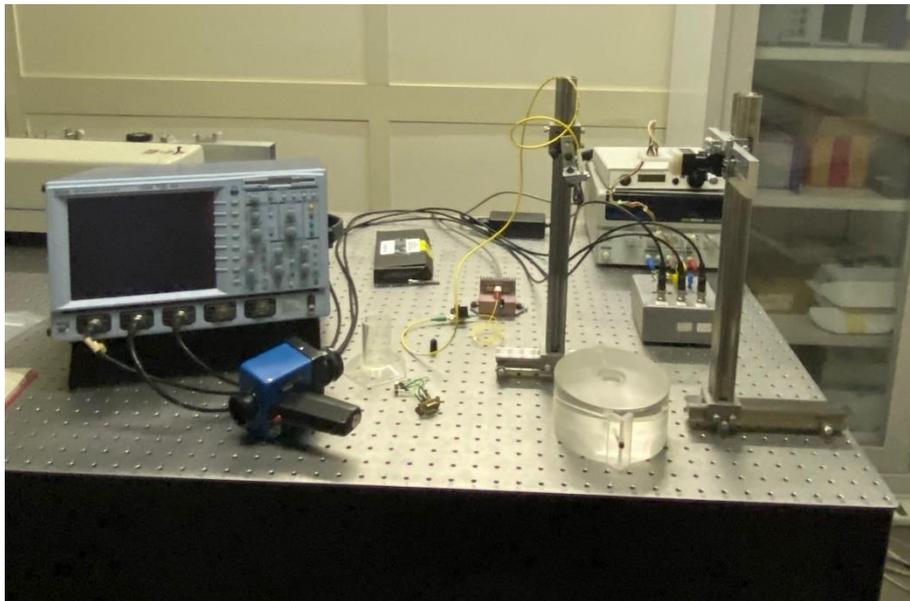


Figura 1 – Foto del banco con l'apparato sperimentale utilizzato per la calibrazione del PSD

La sorgente utilizzata è un LED superluminescente QSDM-830-2 prodotto dalla QPhotonics con uscita in fibra ottica. La radiazione elettromagnetica emessa dall'SLED è centrata a 830 nm [9]. La sorgente è stata utilizzata operando con una corrente pari a 90 mA, che corrisponde ad una potenza pari a circa 1 mW. All'uscita della fibra ottica è montato un collimatore.

La luce emessa dal collimatore arriva su uno specchio e viene poi riflessa verso il PSD.

Il sensore che viene utilizzato in questo apparato è un fotodiode position sensing bidimensionale Hamamatsu s2044 (figura 2), esso spesso viene utilizzato come sensore di posizione o per l'allineamento dei fasci laser [10].

Il sensore ha un intervallo di risposta che va dai 300 nm ai 1100 nm (in condizioni di temperatura = 25°). La massima risposta è a circa 900 nm, intorno all'infrarosso.

Tale dispositivo è connesso ad una elettronica (driver) in grado di combinare i segnali prodotti dal sensore per ottenere informazioni riguardo l'intensità e la posizione, rispetto alla superficie del sensore, di un fascio di radiazione elettromagnetica.

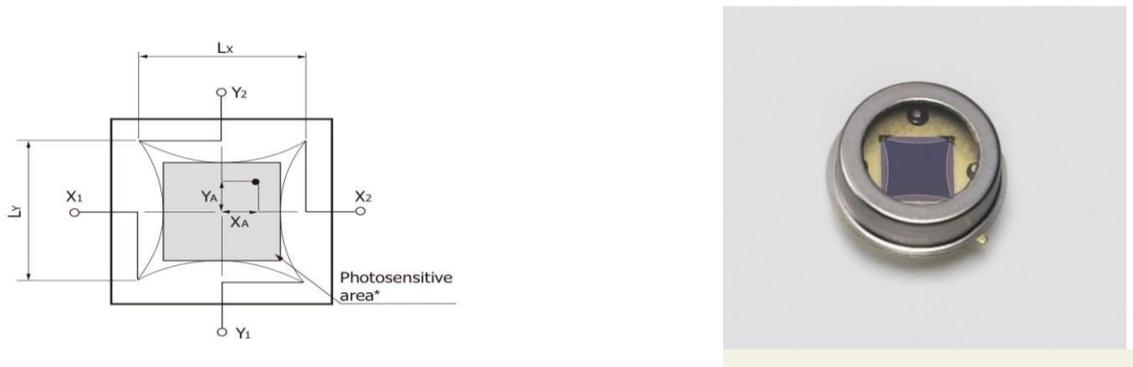


Figura 2 – Schema e foto del PSD S2044

In particolare, il driver fornisce dei segnali in tensione proporzionali alle seguenti combinazioni di correnti:

$$A_x = I_{x2} + I_{y1} - (I_{x1} + I_{y2}) \quad (1)$$

$$A_y = I_{x2} + I_{y2} - (I_{x1} + I_{y1}) \quad (2)$$

$$S = I_{x1} + I_{x2} + I_{y1} + I_{y2} \quad (3)$$

Ovvero le asimmetrie orizzontale e verticale e la somma delle correnti. Nelle equazioni I_{x1} , I_{x2} , I_{y1} , I_{y2} sono i contributi (foto-correnti) dei singoli elettrodi.

Le uscite del driver, ossia i segnali A_x , A_y ed S , sono collegate ad un oscilloscopio che ne consente la visualizzazione per le successive misure.

La posizione si può ottenere combinando insieme le fotocorrenti raccolte in corrispondenza dei 4 elettrodi, pertanto si utilizzano le seguenti formule:

$$x = \frac{L}{2} \frac{I_{x2} + I_{y1} - (I_{x1} + I_{y2})}{I_{x1} + I_{x2} + I_{y1} + I_{y2}} = \frac{L}{2} \frac{A_x}{S} \quad (4)$$

$$y = \frac{L}{2} \frac{I_{x2} + I_{y2} - (I_{x1} + I_{y1})}{I_{x1} + I_{x2} + I_{y1} + I_{y2}} = \frac{L}{2} \frac{A_y}{S} \quad (5)$$

Dove L , pari a 4.7 mm, è la dimensione del lato del sensore. Se consideriamo un fascio centrato esattamente sul sensore, le intensità delle quattro fotocorrenti saranno uguali, ne risulterà quindi che il rapporto dell'equazione 1 (così come la 2) sarà pari a 0. Se invece spostiamo il sensore in direzione orizzontale verso destra (oppure il fascio nel senso opposto) e manteniamo fissa la posizione verticale, la foto-corrente

Il procedimento di misura si è svolto nei seguenti passi:

1. Viene posto il fotodiode bidimensionale ad una distanza fissata rispetto al collimatore.
2. Si sposta il fotodiode nelle due direzioni orizzontali (x ed y) fino a cercare lo zero per entrambe le asimmetrie (A_x ed A_y).
3. Si sposta il sensore lungo l'asse x, con passi di 0.2 mm, registrando i dati che si ottengono dall'oscilloscopio.
4. Si effettua la stessa procedura per l'asse y.

Gli spostamenti in x ed y del sensore sono stati effettuati finché il valore del segnale S, somma di tutte le fotocorrenti, mantenesse il valore corrispondente a quanto letto con il fascio centrato sul sensore. In questo modo si è sicuri di mantenere il fascio sempre completamente all'interno del sensore.

I dati corrispondenti a queste misure sono riportati nelle tabelle 1 e 2. In ciascuna tabella sono riportate:

- Pos. X (oppure Pos. Y): posizione del fotodiode letta sul traslatore micrometrico.
- V_x , V_y , V_s : asimmetrie e segnale somma fornite dal driver.
- A_x e A_y : asimmetrie normalizzate, rappresentano i rapporti V_x/V_s e V_y/V_s .
- Coord. X (oppure Coord. Y): corrispondono alle coordinate del fascio sul sensore, espresse dalle equazioni (3) e (4).
- L: Distanza dal centro del fotodiode fino al punto in cui si trova il raggio.

Posi. X (mm)	V_x (V)	V_y (V)	V_s (V)	A_x	A_y	CORD.X (mm)	CORD.Y (mm)	L (mm)
1.6	-0.76	0.00	1.66	-0.45	0	-1.07	0	0.00
1.8	-0.64	0.00	1.66	-0.38	-0.005	-0.91	-0.01	0.16
2.0	-0.51	-0.02	1.66	-0.31	-0.01	-0.73	-0.03	0.34
2.2	-0.39	-0.03	1.66	-0.24	-0.02	-0.56	-0.04	0.51
2.4	-0.28	-0.04	1.66	-0.17	-0.02	-0.40	-0.05	0.67
2.6	-0.15	-0.05	1.66	-0.09	-0.03	-0.21	-0.07	0.86
2.8	-0.05	-0.06	1.66	-0.03	-0.03	-0.07	-0.09	1.00
3.0	0.07	-0.07	1.66	0.04	-0.04	0.10	-0.10	1.18
3.2	0.18	-0.08	1.66	0.11	-0.05	0.26	-0.12	1.34
3.4	0.30	-0.09	1.66	0.18	-0.05	0.43	-0.13	1.51
3.6	0.42	-0.10	1.66	0.25	-0.06	0.60	-0.15	1.68
3.8	0.53	-0.11	1.66	0.32	-0.06	0.75	-0.16	1.83
4.0	0.64	-0.12	1.66	0.39	-0.07	0.91	-0.17	2.00
4.1	0.70	-0.13	1.66	0.42	-0.07	0.99	-0.18	2.07

Tabella 1 - Calibrazione del PSD lungo x

POSI.Y (mm)	Vx (V)	Vy (V)	Vs (V)	Ax	Ay	CORD. X (mm)	CORD. Y (mm)	L
1.8	-0.05	-0.73	1.66	-0.03	-0.44	-0.08	-1.04	0.00
2.0	-0.05	-0.68	1.66	-0.03	-0.41	-0.07	-0.96	0.07
2.2	-0.04	-0.62	1.66	-0.02	-0.37	-0.06	-0.88	0.15
2.4	-0.03	-0.50	1.66	-0.02	-0.30	-0.04	-0.70	0.33
2.6	-0.02	-0.39	1.66	-0.01	-0.24	-0.03	-0.56	0.47
2.8	-0.01	-0.28	1.66	-0.0	-0.17	-0.01	-0.40	0.64
3.0	-0.04	-0.15	1.66	-0.0	-0.09	-0.00	-0.22	0.82
3.2	0.01	-0.04	1.66	0.0	-0.02	0.01	-0.05	0.98
3.4	0.02	0.07	1.66	0.01	0.04	0.03	0.09	1.14
3.6	0.03	0.20	1.66	0.02	0.12	0.05	0.28	1.33
3.8	0.04	0.32	1.66	0.02	0.19	0.06	0.46	1.51
4.0	0.05	0.43	1.66	0.03	0.26	0.08	0.61	1.66
4.2	0.06	0.55	1.66	0.04	0.33	0.09	0.78	1.82
4.4	0.07	0.66	1.66	0.04	0.40	0.10	0.94	1.98
4.6	0.08	0.78	1.66	0.05	0.46	0.12	1.10	2.15

Tabella 2 - Calibrazione del PSD lungo y

Nelle figure 4 e 5 sono mostrati alcuni dei dati riportati in tabella. In particolare, nella figura 4 si vede l'andamento della distanza dal centro del fotodiode in funzione della sua traslazione lungo l'asse x. Si vede chiaramente l'andamento lineare di questa quantità. Nella figura 5, invece, si vede la tensione Vs, corrispondente all'intensità totale della radiazione incidente sul fotodiode, che, come anticipato, resta costante durante tutto l'intervallo di spostamenti considerati.

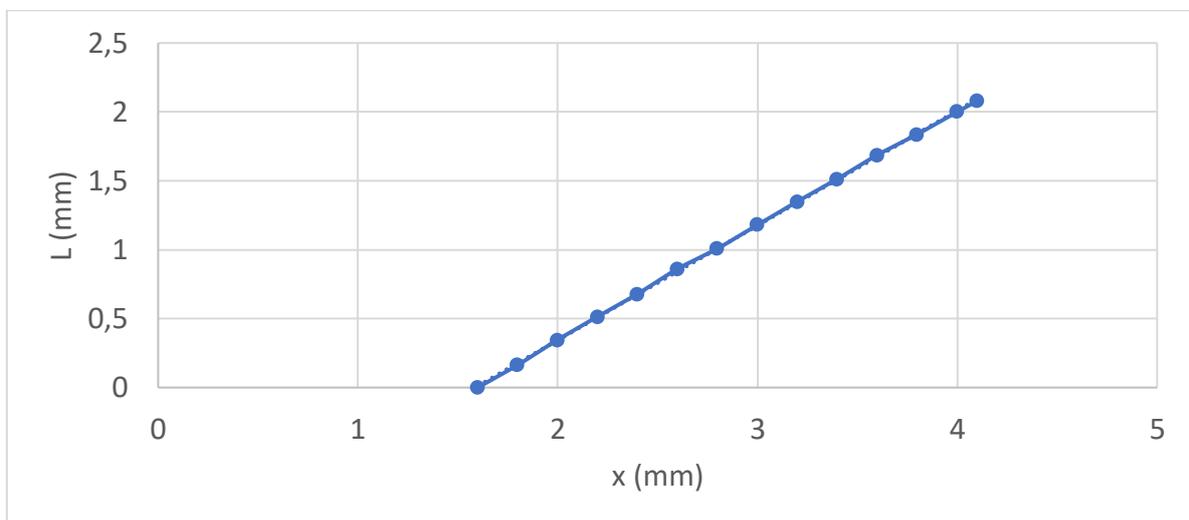


Figura 4 - Rappresentazione grafica del rapporto tra posizione x e L

Nelle figure 6 e 7 sono riportate le stesse grandezze, ma corrispondenti allo spostamento lungo l'asse y.

Dunque, il PSD risponde in maniera lineare in questi intervalli di funzionamento.

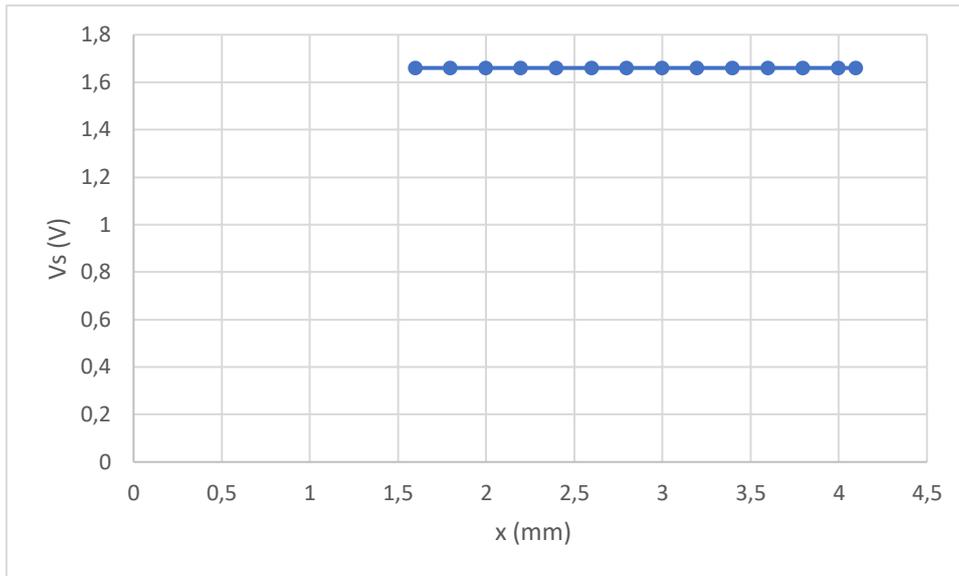


Figura 5 - Rappresentazione grafica del rapporto tra posizione x e V_s

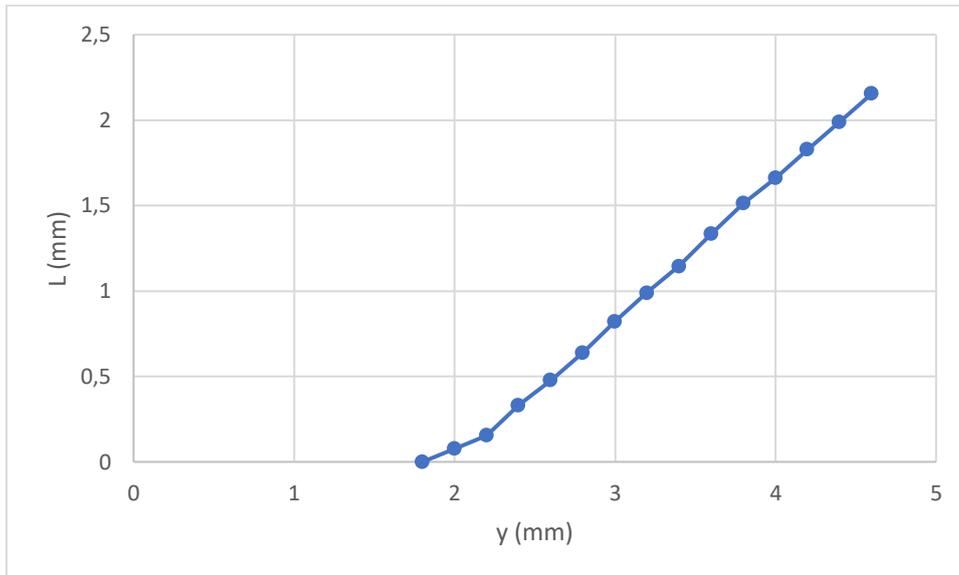


Figura 6 - Rappresentazione grafica del rapporto tra posizione Y e L

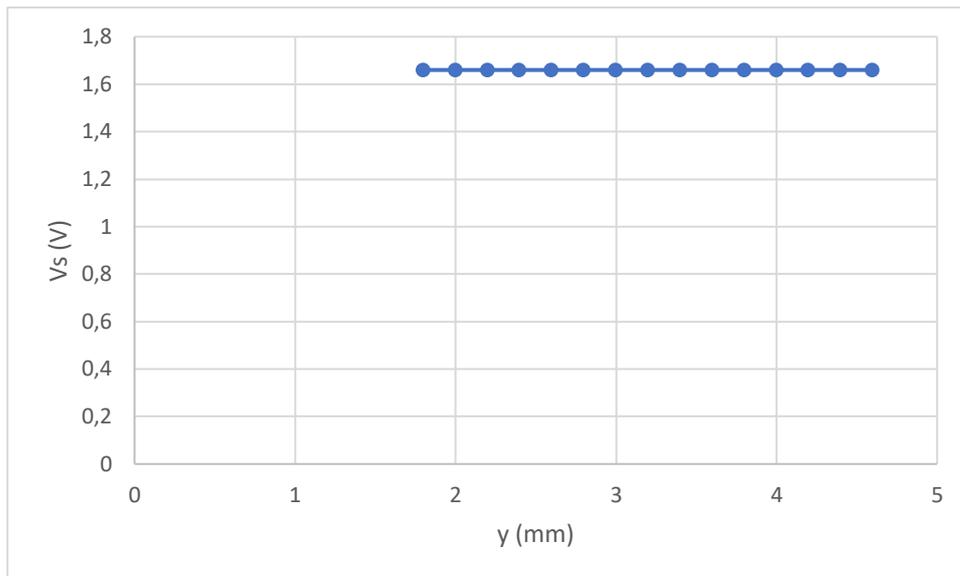


Figura 7 - Rappresentazione grafica del rapporto tra posizione y e Vs

Calibrazione del sensore di livello

L'ultima fase delle misure consiste proprio nella calibrazione del sensore di livello del liquido. Per questa misura si è sostituito allo specchio fisso un cilindro con uno specchio incollato sul fondo e con una scala graduata realizzata in modo da leggere il livello dell'acqua contenuto nel cilindro. (figura 8).

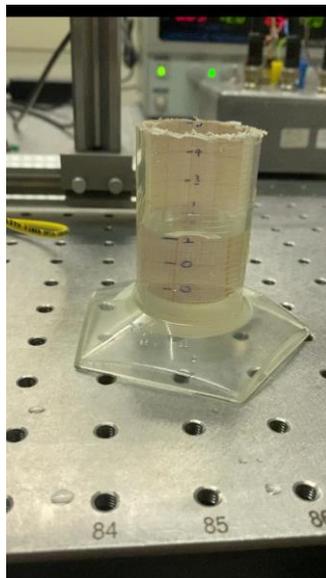


Figura 8 -Tubo di plastica di forma cilindrica

In questo caso, a causa della rifrazione del fascio nell'acqua, lo specchio posto sul fondo del cilindro verrà colpito in un punto diverso a seconda del livello del liquido sovrastante. Allo stesso modo, dopo la riflessione, il fascio verrà ulteriormente rifratto

dall'interfaccia acqua-aria, ed anche questa seconda rifrazione avrà un effetto che dipende dal livello dell'acqua.

In figure 9 è mostrata una simulazione di quello che avviene al fascio rifratto e poi riflesso, per tre diversi livelli del liquido. Si vede che la posizione finale del fascio sul fotodiodo è diversa per i tre casi. Nella simulazione sono stati utilizzati valori simili a quelli realizzati nell'apparato sperimentale.

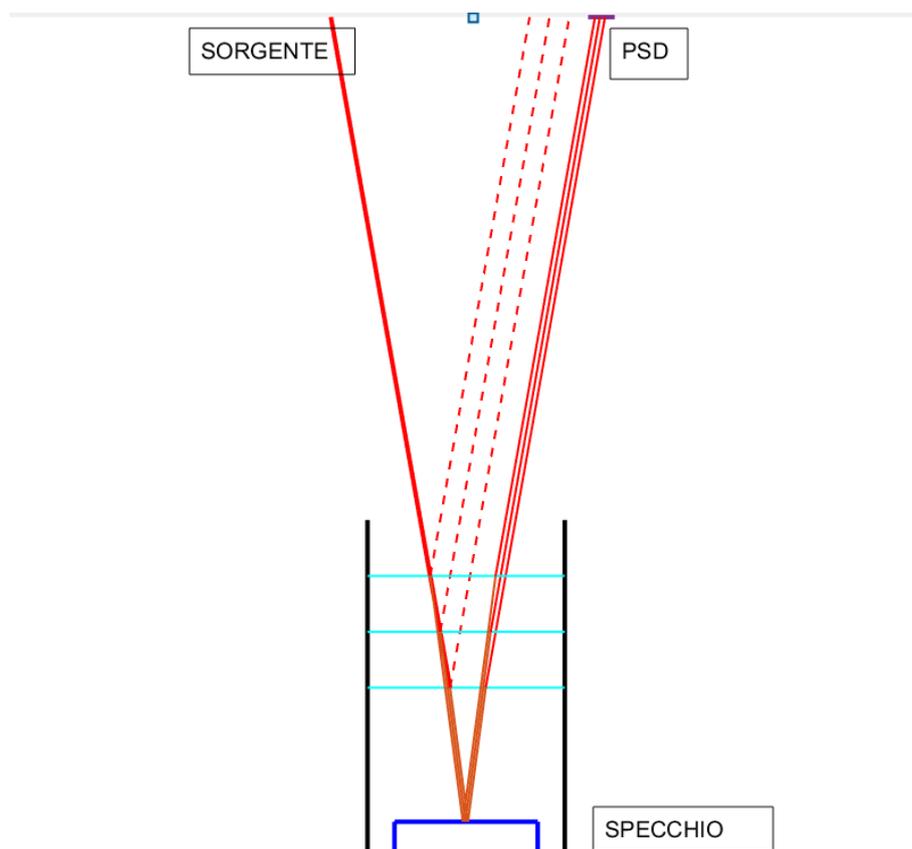


Figura 9 – Simulazione del percorso del fascio dalla sorgente al PSD per tre livelli del liquido. Le linee tratteggiate rappresentano la luce riflessa dall'interfaccia aria-acqua.

Dunque ci si aspetta una proporzionalità tra il livello dell'acqua e la posizione del fascio letta dal PSD. Questa è stata quindi verificata sperimentalmente, effettuando delle misure di V_x , V_y e V_s per diversi livelli di riempimento del cilindro.

I dati sono riportati nella tabella 3. In figura 10 è riportato l'andamento della distanza del fascio dal centro del sensore in funzione del livello del liquido nel cilindro. Nella figura 11, invece, è riportata la tensione V_s in corrispondenza degli stessi livelli.

LIV.ACQUA (mm)	Vx (V)	Vy (V)	V somma (V)	Ax	Ay	CORD. X (mm)	CORD. Y (mm)	L (mm)	
1.0	-1.73	0.25	2.58	-0.66	0.09	-1.57	0.22	0.00	
1.2	-1.74	0.34	2.52	-0.69	0.13	-1.62	0.32	0.10	
1.3	-1.52	0.11	2.59	-0.58	0.04	-1.37	0.10	0.22	
1.4	-1.45	0.07	2.57	-0.56	0.02	-1.32	0.06	0.29	
1.5	-1.37	0.03	2.55	-0.53	0.01	-1.26	0.02	0.36	
1.6	-1.23	-0.06	2.53	-0.48	-0.02	-1.10	-0.06	0.51	
1.7	-1.27	-0.02	2.51	-0.50	-0.00	-1.10	-0.02	0.45	
1.8	-1.09	-0.06	2.49	-0.51	-0.02	-1.20	-0.05	0.46	
1.9	-0.90	-0.11	2.48	-0.44	-0.04	-1.00	-0.10	0.63	
2.0	-0.82	-0.16	2.40	-0.37	-0.06	-0.88	-0.16	0.79	
2.1	-0.78	-0.21	2.38	-0.34	-0.09	-0.81	-0.21	0.87	
2.2	-0.70	-0.18	2.33	-0.33	-0.07	-0.78	-0.18	0.88	
2.3	-0.62	-0.24	2.35	-0.30	-0.10	-0.70	-0.24	0.98	
2.4	-0.62	-0.28	2.33	-0.26	-0.12	-0.63	-0.28	1.07	
2.5	-0.54	-0.30	2.32	-0.27	-0.13	-0.63	-0.31	1.08	
2.6	-0.48	-0.36	2.30	-0.23	-0.15	-0.55	-0.37	1.18	
2.7	-0.48	-0.39	2.27	-0.21	-0.17	-0.49	-0.40	1.24	
2.8	-0.42	-0.41	2.22	-0.19	-0.18	-0.44	-0.43	1.30	
2.9	-0.41	-0.40	2.20	-0.18	-0.18	-0.43	-0.43	1.31	
3.0	-0.38	-0.41	2.10	-0.18	-0.19	-0.42	-0.45	1.33	

Tabella 3 – Calibrazione del sensore di livello

S

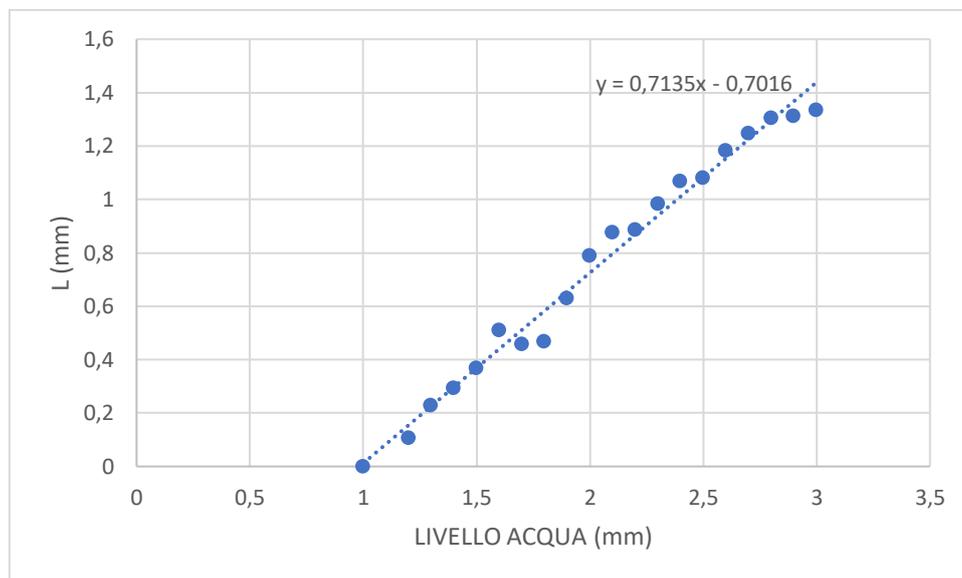


Figure 10 - Rappresentazione grafica del rapporto tra la posizione del livello dell'acqua e L

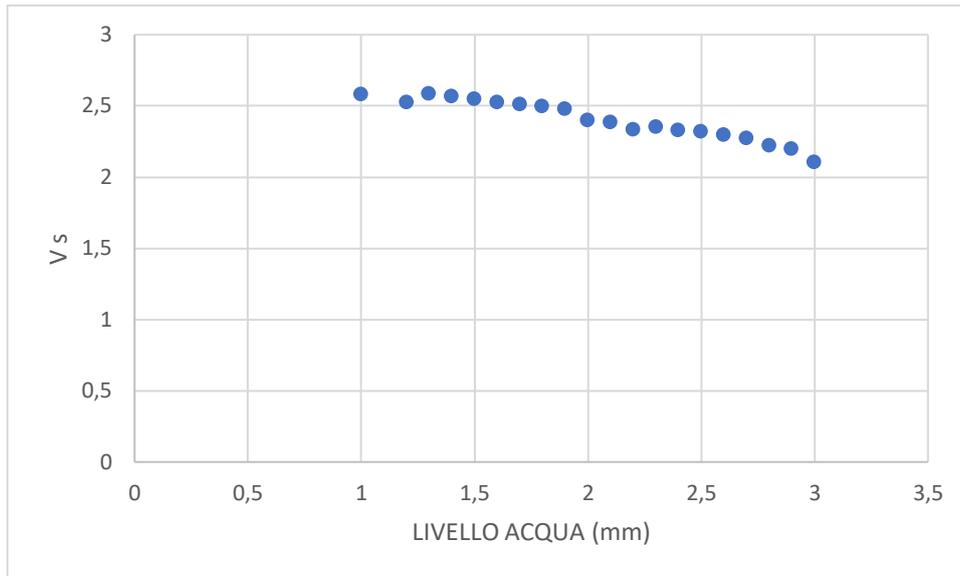


Figura 11 - Rappresentazione grafica tra il livello dell'acqua e Vs

Si vede chiaramente che l'andamento di L in funzione del livello, pur essendo abbastanza lineare, non è però così regolare come nel caso della calibrazione del PSD. Questo è facilmente comprensibile per il fatto che la lettura del livello non è così precisa come quella dei micrometri utilizzati nel caso precedente, ed anche per via delle oscillazioni del livello del liquido che possono alterare in maniera importante la misura. E' invece interessante vedere l'andamento dell'intensità di luce che arriva sul sensore, che, come si vede dalla figura 11, cala al crescere del livello dell'acqua. Questo andamento è dovuto all'assorbimento della luce da parte dell'acqua, che evidentemente aumenta al crescere del livello e quindi del volume d'acqua attraversato dalla luce.

Conclusioni

In questo lavoro di tesi è stata effettuata la calibrazione di un sensore ottico per la misura del livello di una massa di campo liquida. Questa può essere utilizzata in esperimenti per la verifica della legge dell'inverso del quadrato della distanza per la forza di gravità.

L'apparato utilizzato per la calibrazione consiste in un sensore a leva ottica che utilizza una sorgente a LED super-luminescente e un fotodiode position sensing bidimensionale. Sono state fatte prima le calibrazioni del sensore e successivamente è stato misurato il livello del liquido in un tubo cilindrico contenente acqua per calibrare il sensore di livello.

I dati sperimentali ci forniscono, almeno per un ristretto campo di utilizzo, delle zone di risposta lineare del sensore utilizzato, confermando, quindi, la possibilità di utilizzare questo tipo di sensore nell'apparato finale.

Bibliografia

- [1] NIST, «Fundamental Physical Constants,» 2018. [Online]. Available: <https://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?bg>.
- [2] H. Cavendish, «Experiments to determine the density of the earth,» *Philos. Trans. R. Soc.*, vol. 88, p. 469, 1798.
- [3] C. Schlamminger e S. Rothleitner, «Measurements of the Newtonian constant of gravitation, G ,» *Review of Scientific Instruments*, vol. 88, p. 111101, 2017.
- [4] J. Tanaka e S. Murata, «A review of short-range gravity experiments in the LHC era,» *Classical and Quantum Gravity*, vol. 35, p. 033001, 2015.
- [5] M. Bassan e al., «Liquid actuated gravity experiments,» *Inter. Jour. of Modern Physics D*, vol. 28, p. 1950115, 2019.
- [6] R. De Rosa e al., «An optical readout system for the drag free control of the LISA spacecraft,» *Astroparticle Physics*, vol. 34, p. 394, 2011.
- [7] R. Stanga e al., «Double degree of freedom pendulum facility for the study of weak forces,» *Jou. Phys.: Conf. Series*, vol. 154, p. 012032, 2009.
- [8] E. F. Schubert, *LIGHT-EMITTING DIODES*, Cambridge University Press, 2006.
- [9] «Superluminescent Dioda at 830 nm,» QPhotonics, [Online]. Available: <http://www.qphotonics.com/Fiber-coupled-superluminescent-diode-2mW-830nm.html>.
- [10] «Two-dimensional PSD S2044,» Hamamatsu, [Online]. Available: <https://www.hamamatsu.com/eu/en/product/optical-sensors/distance-position-sensor/psd/two-dimensional-psd/S2044.html>.

Ringraziamenti

Ed eccoci arrivati alla fine dell'inizio.

Ringrazio Simone, il mio fidanzato e non solo.

Sei molto di più per me. Sei stato mio sostenitore dall'inizio, grazie al tuo supporto mi hai permesso di arrivare fin qui. Grazie per il tuo continuo e infallibile amore che mi riservi tutti i giorni e per tutto il tempo che mi dedichi. Sei ciò che di meglio potesse offrirmi la vita. Il mio rifugio quando tutto sembra andare male, la mia unica certezza in questo grande caos. Sei il mio complice! Spero che la vita ci possa regalare tanti come questo, ma tranquillo! Che da come sappiamo noi anche sotto la tempesta basta aprire l'ombrello e continuare a proseguire per i nostri obiettivi, tanto non siamo soli. Io ho te e tu me. Ed è questo quello che conta!

Ringrazio i miei amati genitori, Franco e Giustina.

Senza di loro non so se sarei arrivata fin qui. Li ringrazio per i valori e l'educazione che mi hanno impartito, sono l'esempio di sacrificio e dedizione. Non vi sarò mai grata abbastanza per tutto quello che avete fatto per me, spero un giorno di poter ripagare tutto ciò. Franco, mio padre, animo allegro e socievole, grazie per aver con me tanta comprensione, grazie perché mi lasci sbagliare! Giustina, mia madre, animo troppo buono e gentile, grazie per le tue attenzioni!

Ringrazio Mena, mia sorella.

La piccola di casa che senza di lei non si riuscirebbe a stare, colori casa di gioia e tanto amore. Grazie per l'affetto che mi trasmetti tutti i giorni, grazie per avermi accompagnato in alcune circostanze e per avermi appoggiato in tutto quello che ho fatto. Spero e mi auguro che un giorno tu possa volare in alto, più di quanto ho fatto io.

Ringrazio Rosaria, Francesco e Ulderico, la mia seconda famiglia.

Persone umili e piene d'amore. Grazie per avermi accolta come una figlia, mi spingete sempre a dare il meglio, grazie per la fiducia che riponete in me. Siete persone speciali. Rosaria, mia confidente, mia amica, mia suocera. Francesco, il mio spasso, il mio aiutante, mio cognato. Ulderico, mio consigliere professionista e non solo, mio suocero.

Ringrazio Mary e Francesco F., a me cari come fratelli.

Mary, mia amica, mia sorella. Cresciute insieme alle nostre crisi adolescenziali, alle nostre canzoni malinconiche, allo scambio delle figurine o a quando non ci vedevamo per giorni, ma bastava una chiamata o un caffè per recuperare il tempo perso. Sei e sarai per sempre la persona scelta a subirti le mie lagne e nonostante i tuoi consigli (che ovviamente non ascolterò) spero e mi auguro che saremo unite per sempre.

Francesco, mio cugino, mio fratello. Persona a me di riferimento, ricordo ancora il mio primo giorno di scuola elementare, mi sedetti a fianco a te e da quel momento sei diventato per me indispensabile! Il mio faro in mezzo al mare nel percorso scolastico e non solo. Che colpo non averti avuto anche all'università, ma, nonostante ciò, sei sempre onnipresente. Grazie per tutte le volte che mi hai fatto svagare, grazie per capirmi a volte anche senza parlare.

Ringrazio Lina, mia zia.

Da sempre e per sempre sarò la tua figlioccia. Sei una persona super positiva, che rallegra le mie giornate. Grazie per tutte le volte che mi hai ascoltato, sei unica!

Ringrazio Giovanna, Carola e a tutte le mie amiche che mi hanno sostenuto affinché giungessi a tale risultato.

Ma un ringraziamento speciale va a Rosario De Rosa, il mio relatore, persona super disponibile, senza il quale mi sarei sentita persa! Porterò per sempre un bellissimo ricordo della sua professionalità e dedizione alla FISICA!