

**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA**

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE DII
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria dell'Energia Elettrica

Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria dell'Energia Elettrica

**Realizzazione e caratterizzazione di un cantilever
con film in AlN per raccolta di energia cinetica**

Relatore: Prof. Daniele Desideri

Laureando: Davide Apolloni

Anno Accademico 2018/2019

Alla mia famiglia

Sommario

Questa tesi ha lo scopo di studiare un convertitore piezoelettrico in configurazione a trave a sbalzo su cui è stato montato un film in nitrato di alluminio. Oltre alla sua realizzazione, il lavoro prevede uno studio della tecnica di deposizione di tale film. Il processo utilizzato è il magnetron sputtering di tipo reattivo. Particolare attenzione è stata posta ai parametri di influenza di tale tecnica di deposizione. Il convertitore è stato poi sollecitato meccanicamente mediante uno shaker elettrodinamico per ricavare l'andamento della tensione in uscita in funzione della frequenza di vibrazione. In questo modo è stato possibile ricavare anche la frequenza di risonanza della struttura.

Indice

1	Introduzione	1
2	Materiali piezoelettrici	3
2.1.	Materiali dielettrici e polarizzazione	3
2.2.	Effetto piezoelettrico diretto	4
2.3.	Effetto piezoelettrico inverso	6
2.4.	Relazioni lineari per materiali piezoelettrici	8
3	Nitruro di alluminio	15
3.1.	Introduzione alla struttura cristallina	15
3.2.	Sistema esagonale	17
3.3.	Analisi cristallografica del nitruro di alluminio	17
4	Magnetron Sputtering	19
4.1.	Tecniche di deposizione da vapore	19
4.1.1.	Sputtering	19
4.1.2.	Formazione di un plasma	21
4.1.3.	Grandezze caratteristiche di un plasma	24
4.1.4.	Ruolo del plasma nella tecnica di sputtering	26
4.1.5.	Processo di urto	27
4.1.6.	Caratteristiche del meccanismo di sputtering	28
4.1.7.	Rendimento di sputtering	28
4.1.8.	Singolo urto	29
4.1.9.	Urti lineari a catena	29
4.2.	Magnetron sputtering	30
4.2.1.	Moto di una carica elettrica in un campo di induzione magnetica	30
4.2.2.	Specchio magnetico	32
4.2.3.	Configurazioni magnetron sputtering	34
4.3.	Deposizione di film di nitruro di alluminio	36
4.4.	Parametri che influenzano la deposizione di film di nitruro di alluminio	37
4.4.1.	Bombardamento ionico	37
4.4.2.	Variazione della pressione di sputtering	38
4.4.3.	Distanza tra bersaglio e substrato	39
4.4.4.	Concentrazione di azoto nella camera di deposizione	39
4.4.5.	Spessore del film depositato	39
4.4.6.	Potenza di scarica	40
4.4.7.	Temperatura del substrato	40
4.4.8.	Tensione di bias applicata al substrato	40
4.4.9.	Rugosità della superficie del substrato	40
5	Modello elettromeccanico	41
5.1.	Introduzione	41
5.2.	Derivazione del modello elettromeccanico	42
5.3.	Eccitazione della base – caso generale	48
6	Deposizione del film di nitruro di alluminio	53
6.1.	Primo deposito del film di nitruro di alluminio	53
6.1.1.	Preparazione del substrato e misure preliminari	53
6.1.2.	Primo metodo per la misurazione dello spessore del deposito	53

6.1.3. Struttura di supporto al substrato	54
6.1.4. Magnetron sputtering per il primo deposito di nitrato di alluminio	57
6.1.5. Trattamento del substrato dopo il primo deposito di nitrato di alluminio	59
6.1.6. Misurazione dello spessore del deposito	60
6.1.7. Realizzazione del cantilever	61
6.1.7.1. Applicazione del nastro in poliestere 3M 74	61
6.1.7.2. Applicazione del nastro di carta	62
6.1.7.3. Applicazione del nastro di rame 3M 1181	63
6.1.7.4. Collegamenti elettrici	64
6.1.7.5. Applicazione della vernice conduttiva RS SCP 123-9911	66
6.1.7.6. Configurazione finale e misura di capacità	68
6.1.7.7. Incastro allo shaker	69
6.2. Secondo deposito del film di nitrato di alluminio	70
6.2.1. Preparazione del substrato e misure preliminari	70
6.2.2. Secondo metodo per la misurazione dello spessore del deposito	73
6.2.3. Struttura di supporto al substrato	77
6.2.4. Magnetron sputtering per il secondo deposito di nitrato di alluminio	79
6.2.5. Trattamento del substrato dopo il secondo deposito di nitrato di alluminio	81
6.2.6. Misurazione dello spessore del deposito	82
6.2.7. Realizzazione del cantilever	84
6.2.7.1. Applicazione del nastro in poliestere 3M 74	84
6.2.7.2. Applicazione del nastro di carta	85
6.2.7.3. Applicazione del nastro di rame 3M 1181	86
6.2.7.4. Collegamenti elettrici	87
6.2.7.5. Applicazione della vernice conduttiva RS SCP 123-9911	88
6.2.7.6. Configurazione finale e misura di capacità	89
6.2.7.7. Incastro allo shaker	91
7 Prove sul convertitore	93
7.1. Prova di laboratorio sul convertitore	93
7.1.1. Descrizione configurazione strumenti	93
7.1.2. Descrizione svolgimento della prova	94
7.2. Strumenti utilizzati in laboratorio	95
7.2.1. Generatore di funzioni Agilent 33120 A	95
7.2.2. Amplificatore SmartAmp POWER AMPLIFIER 2100E21-100	96
7.2.3. Shaker elettrodinamico MODAL SHOP 2007E	96
7.2.4. Accelerometro piezoelettrico PCB 352C65	98
7.2.5. Condizionatore di segnale PCB 480C02	99
7.2.6. Oscilloscopio digitale YOKOGAWA DL9140 710310	101
7.2.7. Sonda passiva di tensione YOKOGAWA 700998	102
8 Caratteristica della tensione	103
8.1. Primo deposito di nitrato di alluminio	103
8.2. Secondo deposito di nitrato di alluminio	105
9 Conclusioni	107

Capitolo 1

Introduzione

Ci sono varie applicazioni in cui è necessaria poca energia e sarebbe importante ottenerla mediante raccolta di energia dall'ambiente circostante: si parla in questo caso di energy harvesting.

In particolare è presente energia cinetica sotto forma di vibrazioni soprattutto in apparecchiature industriali, apparecchiature domestiche (frigoriferi, lavatrici, ...) o strutture in movimento (automobili, aeroplani).

Gli apparecchi che convertono energia meccanica da vibrazioni ambientali in energia elettrica vengono denominati raccoglitori di energia cinetica (kinetic energy harvesters). Essi possono essere fondamentalmente di tre tipi: elettromagnetici, elettrostatici o piezoelettrici.

Tra questi tre tipi di raccoglitori, quelli di tipo piezoelettrico non necessitano di alcuna alimentazione esterna e sono facilmente miniaturizzabili.

Una delle configurazioni più utilizzate per i convertitori piezoelettrici è la configurazione a cantilever o a trave a sbalzo in cui si ha un film di materiale piezoelettrico depositato, ad esempio mediante magnetron sputtering, su una superficie di un substrato metallico vincolato ad una delle sue estremità. Il movimento vibratorio della base a cui tale substrato è vincolato fa sì che il film di materiale piezoelettrico venga alternativamente compresso o disteso ed il risultato è l'instaurarsi di una tensione tra le due facce del film.

In tale lavoro di tesi si intende studiare un convertitore piezoelettrico in configurazione a trave a sbalzo il cui materiale piezoelettrico è costituito da un film di nitruro di alluminio, AlN , materiale molto interessante per le sue proprietà piezoelettriche. In particolare, lo scopo è quello di studiare la caratteristica della tensione in uscita in funzione della frequenza di vibrazione di tale raccoglitore in cui sia stato effettuato un deposito di film di nitruro di alluminio in diverse condizioni di deposizione, in modo tale da ottimizzare il processo di deposizione per ottenere le migliori prestazioni con il convertitore.

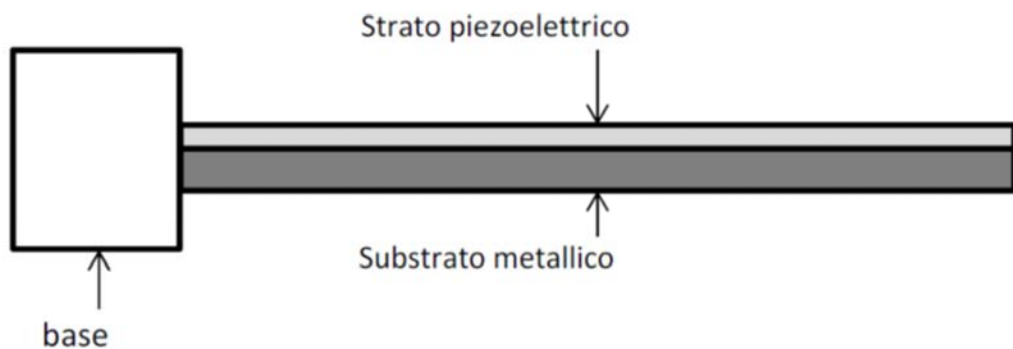


Fig. 1.1. Convertitore piezoelettrico in configurazione a trave a sbalzo.

Il secondo capitolo contiene la trattazione dei materiali piezoelettrici e le loro relazioni costitutive.

Il terzo capitolo presenta una breve analisi cristallografica del nitruro di alluminio.

Nel quarto capitolo viene presentata la tecnica di sputtering. Nello specifico ci si concentra sulla tecnica di magnetron sputtering con particolare attenzione ai parametri che influenzano il processo di deposizione di un film di nitruro di alluminio.

Il quinto capitolo contiene una analisi dettagliata del modello elettromeccanico di un raccoglitore di energia piezoelettrico in configurazione a trave a sbalzo.

Il sesto capitolo riguarda le prove svolte in laboratorio per quanto riguarda la deposizione di due film di nitruro di alluminio mediante magnetron sputtering di tipo reattivo e la realizzazione delle configurazioni a cantilever del convertitore piezoelettrico.

Il settimo capitolo si focalizza sulla descrizione della prova necessaria per determinare la caratteristica della tensione in uscita in funzione della frequenza di un convertitore piezoelettrico in configurazione a trave a sbalzo.

L'ottavo capitolo presenta i risultati ottenuti per quanto riguarda le caratteristiche della tensione in uscita in funzione della frequenza del convertitore piezoelettrico a cantilever per i due film di nitruro di alluminio ottenuti durante le prove in laboratorio.

Il nono capitolo contiene le conclusioni e gli spunti per eventuali sviluppi futuri.

Capitolo 2

Materiali piezoelettrici

2.1 Materiali dielettrici e polarizzazione

La relazione generale della polarizzazione di un materiale dielettrico (isolante) è la seguente [1]:

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P} \quad (2.1)$$

dove \mathbf{D} è il vettore spostamento elettrico, \mathbf{E} è il campo elettrico, ε_0 è la permittività elettrica del vuoto, pari a $8.854 \cdot 10^{-12} \text{ C/Nm}^2$, mentre \mathbf{P} è il vettore polarizzazione elettrica, che è un momento di dipolo elettrico per unità di volume.

In generale, il campo elettrico \mathbf{E} è presente sia all'interno che all'esterno del materiale dielettrico, dovuto a tutte le cariche elettriche. La polarizzazione \mathbf{P} è dovuta a dipoli elettrici che sono indotti nel materiale dielettrico dall'applicazione di un campo elettrico \mathbf{E} esterno o, se sono presenti dipoli elettrici permanenti all'interno del materiale, alla risposta di questi dipoli elettrici al campo elettrico \mathbf{E} applicato esternamente.

Un momento di dipolo elettrico \mathbf{p} si definisce quando due cariche puntuali $+q$ e $-q$ (con $q > 0$) sono tra loro vicine ad una distanza a molto piccola: in questo caso si può considerare il vettore spostamento \mathbf{a} diretto dalla carica puntuale $-q$ a quella $+q$ (Fig. 2.1). Il momento di dipolo elettrico \mathbf{p} è pari a:

$$\mathbf{p} = q\mathbf{a} \quad (2.2)$$

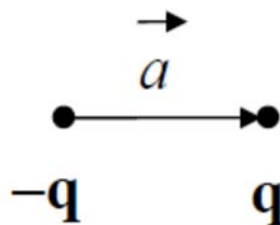


Fig. 2.1 – Vettore spostamento \mathbf{a} tra una carica elettrica puntuale di segno negativo ($-q$) e una di segno positivo ($+q$) ($q > 0$).

Dato un volume ΔV molto piccolo, il momento di dipolo elettrico per unità di volume è dato dal rapporto tra la somma di tutti i momenti di dipolo elettrico dentro il volume ΔV e il volume ΔV stesso:

$$\mathbf{P} = \frac{\sum_n \mathbf{p}_n}{\Delta V} = \frac{\Delta \mathbf{p}}{\Delta V} \quad (2.3)$$

In un materiale isotropo il legame tra polarizzazione elettrica \mathbf{P} e campo elettrico \mathbf{E} è dato dalla seguente espressione:

$$\mathbf{P} = \varepsilon_0 \chi \mathbf{E} \quad (2.4)$$

dove χ viene definita suscettività dielettrica. Inserendo l'espressione (2.4) all'interno dell'equazione (2.1) si ottiene che il vettore spostamento elettrico \mathbf{D} è pari a:

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0(1 + \chi)\mathbf{E} \quad (2.5)$$

Si definisce permittività elettrica relativa ε_r (relativa al materiale considerato) la quantità:

$$\varepsilon_r = 1 + \chi \quad (2.6)$$

Si definisce permittività elettrica ε il prodotto tra la permittività elettrica del vuoto ε_0 e la permittività elettrica relativa ε_r :

$$\varepsilon = \varepsilon_0\varepsilon_r \quad (2.7)$$

Perciò, considerando l'espressione (2.6), l'equazione (2.5) può essere riscritta nella seguente forma:

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0\varepsilon_r\mathbf{E} = \varepsilon\mathbf{E} \quad (2.8)$$

Se il materiale è anisotropo, la suscettività dielettrica è un tensore di rango due ($[\chi]$). Di conseguenza anche la permittività elettrica è un tensore di rango due ($[\varepsilon]$). L'equazione (2.6) diventa quindi:

$$[\varepsilon_r] = [I] + [\chi] = \frac{1}{\varepsilon_0}[\varepsilon] \quad (2.9)$$

Dove $[I]$ è la matrice unitaria 3x3.

Il termine "piezoelettricità" significa "elettricità da pressione" e caratterizza i materiali piezoelettrici. Esso è un processo reversibile: si ha un effetto piezoelettrico diretto, quando applicando uno sforzo di tipo meccanico al materiale compaiono cariche elettriche superficiali, ed un effetto piezoelettrico inverso, quando l'applicazione di un campo elettrico \mathbf{E} causa una deformazione meccanica.

2.2 Effetto piezoelettrico diretto

Per descrivere l'effetto piezoelettrico diretto si considerano tre cariche elettriche puntuali positive ($+q$) poste agli angoli di un triangolo equilatero ad una distanza a dal baricentro di tale triangolo. Nel baricentro del triangolo (O in Fig. 2.2) si ha un campo elettrico \mathbf{E} pari a 0 (configurazione (a) in Fig. 2.2). Lo stesso risultato avviene con tre cariche elettriche puntuali negative ($-q$, configurazione (b) in Fig. 2.2). Di conseguenza anche la combinazione delle due situazioni precedenti porta allo stesso risultato (configurazione (c) in Fig. 2.2).

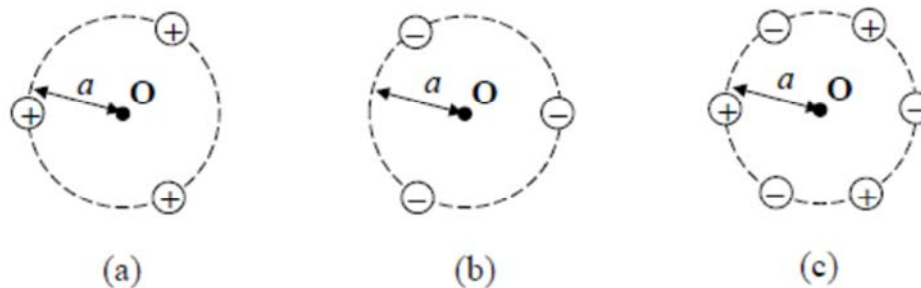


Fig. 2.2 – Configurazioni cariche elettriche. (a) tre cariche elettriche puntuali positive (+ q) poste agli angoli di un triangolo equilatero ad una distanza a dal baricentro (O); (b) tre cariche elettriche puntuali negative (- q) poste agli angoli di un triangolo equilatero ad una distanza a dal baricentro (O); (c) combinazione delle due configurazioni precedenti ((a) e (b)).

Se si applica una forza meccanica ad un materiale piezoelettrico, in esso compaiono uno sforzo ed una deformazione di tipo meccanico. Considerando lo spostamento delle cariche in Fig. 2.3, dove (a) è la configurazione imperturbata e (b) è la configurazione con lo spostamento delle cariche (superiori ed inferiori), si vede che dopo l'applicazione della forza meccanica il centro delle cariche elettriche puntuali positive (la carica positiva risultante) e quello delle cariche elettriche puntuali negative (la carica negativa risultante) non coincidono più e perciò compare un momento di dipolo elettrico p .

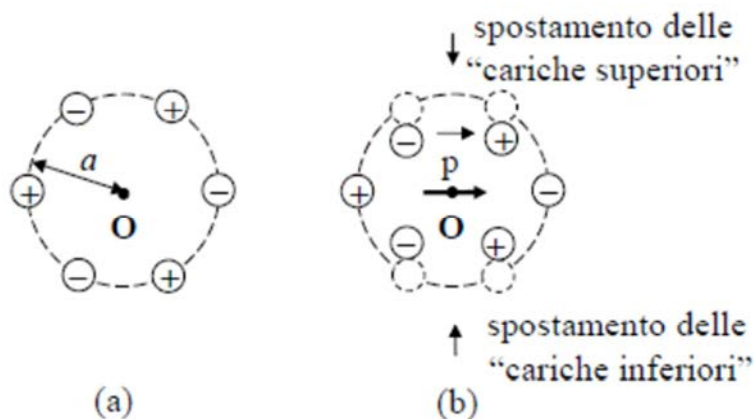


Fig. 2.3 – Formazione di un momento di dipolo elettrico p dovuto a spostamento di cariche elettriche puntuali che non fa più coincidere i centri delle cariche elettriche puntuali (le cariche risultanti) positive (+ q) e negative (- q). (a) configurazione imperturbata; (b) configurazione con lo spostamento delle cariche.

Nell'ipotesi semplicistica di considerare grandezze scalari, nell'effetto piezoelettrico diretto si ha una proporzionalità diretta tra la polarizzazione P e lo sforzo meccanico T :

$$P_p = dT \quad (2.10)$$

dove d è la costante piezoelettrica. P_p è il contributo alla polarizzazione dovuto solamente all'effetto piezoelettrico diretto.

In generale la costante piezoelettrica non è uno scalare, ma una matrice 3x6:

$$[d] = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} & d_{26} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} & d_{35} & d_{36} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

La relazione generale scritta in forma matriciale è pertanto (considerando le tre componenti nelle tre dimensioni del vettore polarizzazione P_p):

$$\begin{bmatrix} P_{p1} \\ P_{p2} \\ P_{p3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} & d_{26} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} & d_{35} & d_{36} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

quindi:

$$\begin{bmatrix} P_{p1} \\ P_{p2} \\ P_{p3} \end{bmatrix} = [d] \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

dove:

$$\begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} = [T]_{6 \times 1} \rightarrow [T] = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{31} \\ T_{12} & T_{22} & T_{23} \\ T_{31} & T_{23} & T_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_1 & T_6 & T_5 \\ T_6 & T_2 & T_4 \\ T_5 & T_4 & T_3 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Lo sforzo meccanico $[T]$ è un tensore di rango due, che ha sei elementi dal momento che risulta essere simmetrico.

Si può pertanto riscrivere l'espressione (2.13) in maniera compatta:

$$[P_p] = [d][T]_{6 \times 1} \quad (2.15)$$

2.3 Effetto piezoelettrico inverso

Nell'ipotesi semplicistica di considerare grandezze scalari, nell'effetto piezoelettrico inverso si ha una proporzionalità diretta tra la deformazione S e il campo elettrico E :

$$S_p = dE \quad (2.16)$$

Si noti che la costante di proporzionalità è sempre la costante piezoelettrica d . S_p è il contributo alla deformazione dovuto solamente all'effetto piezoelettrico inverso.

In generale si usa la trasposta della matrice $[d]$ dell'effetto piezoelettrico diretto:

$$[d]^T = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{21} & d_{31} \\ d_{12} & d_{22} & d_{32} \\ d_{13} & d_{23} & d_{33} \\ d_{14} & d_{24} & d_{34} \\ d_{15} & d_{25} & d_{35} \\ d_{16} & d_{26} & d_{36} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

La relazione generale scritta in forma matriciale è (considerando le tre componenti nelle tre dimensioni del campo elettrico \mathbf{E}):

$$\begin{bmatrix} S_{p1} \\ S_{p2} \\ S_{p3} \\ S_{p4} \\ S_{p5} \\ S_{p6} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{21} & d_{31} \\ d_{12} & d_{22} & d_{32} \\ d_{13} & d_{23} & d_{33} \\ d_{14} & d_{24} & d_{34} \\ d_{15} & d_{25} & d_{35} \\ d_{16} & d_{26} & d_{36} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

quindi:

$$\begin{bmatrix} S_{p1} \\ S_{p2} \\ S_{p3} \\ S_{p4} \\ S_{p5} \\ S_{p6} \end{bmatrix} = [d]^T \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

dove:

$$\begin{bmatrix} S_{p1} \\ S_{p2} \\ S_{p3} \\ S_{p4} \\ S_{p5} \\ S_{p6} \end{bmatrix} = [S]_{6 \times 1} \rightarrow [S] = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{31} \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{23} & S_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_1 & \frac{1}{2}S_6 & \frac{1}{2}S_5 \\ \frac{1}{2}S_6 & S_2 & \frac{1}{2}S_4 \\ \frac{1}{2}S_5 & \frac{1}{2}S_4 & S_3 \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

La deformazione $[S]$ è un tensore di rango due, che ha sei elementi dal momento che risulta essere simmetrico.

Si può pertanto riscrivere l'espressione (2.19) in maniera compatta:

$$[S_p]_{6 \times 1} = [d]^T [E] \quad (2.21)$$

2.4 Relazioni lineari per materiali piezoelettrici

Assumendo di essere a temperatura costante e di avere grandezze scalari, se si prendono lo sforzo meccanico T e il campo elettrico E come variabili indipendenti e la deformazione S e lo spostamento elettrico D come variabili dipendenti, si può scrivere:

$$\begin{cases} S = S(T, E) \\ D = D(T, E) \end{cases} \quad (2.22)$$

Considerando piccole variazioni attorno ad un punto di lavoro si può utilizzare un modello lineare. Dalla (2.22) si ottiene:

$$\begin{cases} \Delta S = \frac{\partial S}{\partial T} \Delta T + \frac{\partial S}{\partial E} \Delta E \\ \Delta D = \frac{\partial D}{\partial T} \Delta T + \frac{\partial D}{\partial E} \Delta E \end{cases} \quad (2.23)$$

Da considerazioni energetiche e della termodinamica, risulta che la relazione tra deformazione S , campo elettrico E , spostamento elettrico D e sforzo meccanico T è pari a:

$$\frac{\partial S}{\partial E} = \frac{\partial D}{\partial T} = d \quad (2.24)$$

Questa relazione può anche essere ricavata facendo riferimento alle relazioni (2.1), (2.10) e (2.16).

La relazione di dipendenza della deformazione S dallo sforzo meccanico T si può descrivere mediante la seguente relazione:

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} & s_{14} & s_{15} & s_{16} \\ s_{21} & s_{22} & s_{23} & s_{24} & s_{25} & s_{26} \\ s_{31} & s_{32} & s_{33} & s_{34} & s_{35} & s_{36} \\ s_{41} & s_{42} & s_{43} & s_{44} & s_{45} & s_{46} \\ s_{51} & s_{52} & s_{53} & s_{54} & s_{55} & s_{56} \\ s_{61} & s_{62} & s_{63} & s_{64} & s_{65} & s_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

Si definisce la matrice cedevolezza $[s]$:

$$[s] = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} & s_{14} & s_{15} & s_{16} \\ s_{21} & s_{22} & s_{23} & s_{24} & s_{25} & s_{26} \\ s_{31} & s_{32} & s_{33} & s_{34} & s_{35} & s_{36} \\ s_{41} & s_{42} & s_{43} & s_{44} & s_{45} & s_{46} \\ s_{51} & s_{52} & s_{53} & s_{54} & s_{55} & s_{56} \\ s_{61} & s_{62} & s_{63} & s_{64} & s_{65} & s_{66} \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

quindi:

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{bmatrix} = [s] \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

La relazione di dipendenza dello sforzo meccanico T dalla deformazione S si può descrivere mediante la seguente relazione:

$$\begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & c_{15} & c_{16} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} & c_{25} & c_{26} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} & c_{35} & c_{36} \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{44} & c_{45} & c_{46} \\ c_{51} & c_{52} & c_{53} & c_{54} & c_{55} & c_{56} \\ c_{61} & c_{62} & c_{63} & c_{64} & c_{65} & c_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

Si definisce la matrice rigidezza $[c]$:

$$[c] = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & c_{15} & c_{16} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} & c_{25} & c_{26} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} & c_{35} & c_{36} \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{44} & c_{45} & c_{46} \\ c_{51} & c_{52} & c_{53} & c_{54} & c_{55} & c_{56} \\ c_{61} & c_{62} & c_{63} & c_{64} & c_{65} & c_{66} \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

quindi:

$$\begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} = [c] \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

Le espressioni (2.27) e (2.29) si possono riscrivere in forma compatta:

$$[S]_{6 \times 1} = [s]_{6 \times 6} [T]_{6 \times 1} \quad (2.31)$$

$$[T]_{6 \times 1} = [s]_{6 \times 6} [T]_{6 \times 1} \quad (2.32)$$

Tra la matrice cedevolezza $[s]$ e la matrice rigidezza $[c]$ sussistono perciò le seguenti relazioni:

$$[c] = [s]^{-1} \quad (2.33)$$

$$[s] = [c]^{-1} \quad (2.34)$$

Per definire le grandezze (si ricorda che si fa riferimento a grandezze scalari) descritte nell'espressione (2.23), ci sono, considerata la relazione (2.24), tre derivate parziali del primo ordine da identificare: esse risultano essere (considerate le relazioni (2.8), (2.16) e (2.27)) la cedevolezza s^E a campo elettrico E costante (dove l'apice E sta ad indicare che tale grandezza è definita a campo elettrico E costante) la costante piezoelettrica d e la permittività elettrica ε^T a sforzo meccanico T costante (dove l'apice T sta a indicare che tale grandezza è definita a sforzo meccanico T costante):

$$s^E = \left. \frac{\Delta S}{\Delta T} \right|_{\Delta E=0} = \left. \frac{\Delta S}{\Delta T} \right|_{E=\text{costante}} \quad (2.35)$$

$$\varepsilon^T = \left. \frac{\Delta D}{\Delta E} \right|_{\Delta T=0} = \left. \frac{\Delta D}{\Delta E} \right|_{T=\text{costante}} \quad (2.36)$$

Perciò l'espressione (2.23) si può riscrivere nel seguente modo:

$$\begin{cases} \Delta S = s^E \Delta T + d \Delta E \\ \Delta D = d \Delta T + \varepsilon^T \Delta E \end{cases} \quad (2.37)$$

Integrando le due equazioni dell'espressione (2.37), in ipotesi che a $E=0$, $T=0$ siano nulli anche S e D , si ha che:

$$\begin{cases} S = s^E T + d E \\ D = d T + \varepsilon^T E \end{cases} \quad (2.38)$$

in notazione tensoriale, assumendo di essere a temperatura costante, l'espressione (2.38) diventa:

$$\begin{cases} [S]_{6 \times 1} = [s^E][T]_{6 \times 1} + [d]^T[E] \\ [D] = [d][T]_{6 \times 1} + [\varepsilon^T][E] \end{cases} \quad (2.39)$$

Assumendo lo sforzo meccanico T e lo spostamento elettrico D come variabili indipendenti, la deformazione S e il campo elettrico E come variabili dipendenti, si può scrivere:

$$\begin{cases} S = S(T, D) \\ E = E(T, D) \end{cases} \quad (2.40)$$

Dalla seconda equazione dell'espressione (2.37):

$$\Delta E = -\frac{d}{\varepsilon^T} \Delta T + \frac{1}{\varepsilon^T} \Delta D \quad (2.41)$$

ponendo:

$$g = \frac{d}{\varepsilon^T} \quad (2.42)$$

$$\beta^T = \frac{1}{\varepsilon^T} \quad (2.43)$$

l'espressione (2.41) può essere riscritta nel seguente modo:

$$\Delta E = -g\Delta T + \beta^T \Delta D \quad (2.44)$$

mentre, dalla prima equazione dell'espressione (2.37), inserendo l'espressione (2.41):

$$\Delta S = s^E \Delta T + d \left(-\frac{d}{\varepsilon^T} \Delta T + \frac{1}{\varepsilon^T} \Delta D \right) \quad (2.45)$$

quindi:

$$\Delta S = \left(s^E - \frac{d^2}{\varepsilon^T} \right) \Delta T + \frac{d}{\varepsilon^T} \Delta D \quad (2.46)$$

ponendo:

$$s^D = s^E - \frac{d^2}{\varepsilon^T} \quad (2.47)$$

che rappresenta la cedevolezza s^D a spostamento elettrico D costante (dove l'apice D sta a indicare che tale grandezza è definita a spostamento elettrico D costante), si ottengono perciò le seguenti relazioni:

$$\begin{cases} \Delta S = s^D \Delta T + g \Delta D \\ \Delta E = -g \Delta T + \beta^T \Delta D \end{cases} \quad (2.48)$$

dove:

$$s^D = \left. \frac{\Delta S}{\Delta T} \right|_{\Delta D=0} = \left. \frac{\Delta S}{\Delta T} \right|_{D=\text{costante}} \quad (2.49)$$

$$g = \left. \frac{\Delta S}{\Delta D} \right|_{\Delta T=0} = \left. \frac{\Delta S}{\Delta D} \right|_{T=\text{costante}} \quad (2.50)$$

$$\beta^T = \left. \frac{\Delta E}{\Delta D} \right|_{\Delta T=0} = \left. \frac{\Delta E}{\Delta D} \right|_{T=\text{costante}} \quad (2.51)$$

Integrando le due equazioni dell'espressione (2.48), in ipotesi che a $T=0$, $D=0$ siano nulli anche S e E , si ha che:

$$\begin{cases} S = s^D T + g D \\ E = -g T + \beta^T D \end{cases} \quad (2.52)$$

In notazione tensoriale, assumendo di essere a temperatura costante, l'espressione (2.52) diventa:

$$\begin{cases} [S]_{6 \times 1} = [s^D][T]_{6 \times 1} + [g][D] \\ [E] = -[g][T]_{6 \times 1} + [\beta^T][D] \end{cases} \quad (2.53)$$

Assumendo la deformazione S e campo elettrico E come variabili indipendenti, lo sforzo meccanico T e lo spostamento elettrico D come variabili dipendenti, si può scrivere:

$$\begin{cases} T = T(S, E) \\ D = D(S, E) \end{cases} \quad (2.54)$$

Dalla prima equazione dell'espressione (2.37):

$$\Delta T = \frac{1}{s^E} \Delta S - \frac{d}{s^E} \Delta E \quad (2.55)$$

mentre dalla seconda espressione dell'equazione (2.37), inserendo l'espressione (2.55):

$$\Delta D = d \left(\frac{1}{s^E} \Delta S - \frac{d}{s^E} \Delta E \right) + \varepsilon^T \Delta E \quad (2.56)$$

quindi:

$$\Delta D = \frac{d}{s^E} \Delta S + \left(\varepsilon^T - \frac{d^2}{s^E} \right) \Delta E \quad (2.57)$$

Si ottengono perciò le seguenti relazioni:

$$\begin{cases} \Delta T = \frac{1}{s^E} \Delta S - \frac{d}{s^E} \Delta E \\ \Delta D = \frac{d}{s^E} \Delta S + \left(\varepsilon^T - \frac{d^2}{s^E} \right) \Delta E \end{cases} \quad (2.58)$$

Integrando le due equazioni dell'espressione (2.58), in ipotesi che a $S=0$, $E=0$ siano nulli anche T e D , si ha che:

$$\begin{cases} T = \frac{1}{s^E} S - \frac{d}{s^E} E \\ D = \frac{d}{s^E} S + \left(\varepsilon^T - \frac{d^2}{s^E} \right) E \end{cases} \quad (2.59)$$

Assumendo la deformazione S e lo spostamento elettrico D come variabili indipendenti, lo sforzo meccanico T e il campo elettrico E come variabili dipendenti, si può scrivere:

$$\begin{cases} T = T(S, D) \\ E = E(S, D) \end{cases} \quad (2.60)$$

Dalla prima equazione dell'espressione (2.48):

$$\Delta T = \frac{1}{s^D} \Delta S - \frac{g}{s^D} \Delta D \quad (2.61)$$

Mentre dalla seconda equazione dell'espressione (2.48), inserendo l'espressione (2.61):

$$\Delta E = -g \left(\frac{1}{s^D} \Delta S - \frac{g}{s^D} \Delta D \right) + \beta^T \Delta D \quad (2.62)$$

Si ottengono perciò le seguenti relazioni:

$$\begin{cases} \Delta T = \frac{1}{s^D} \Delta S - \frac{g}{s^D} \Delta D \\ \Delta E = -\frac{g}{s^D} \Delta S + \left(\beta^T + \frac{g^2}{s^D} \right) \Delta D \end{cases} \quad (2.63)$$

Integrando le due equazioni dell'espressione (2.63), in ipotesi che a $S=0$, $D=0$ siano nulli anche T e E , si ha che:

$$\begin{cases} T = \frac{1}{s^D} S - \frac{g}{s^D} D \\ E = -\frac{g}{s^D} S + \left(\beta^T + \frac{g^2}{s^D} \right) D \end{cases} \quad (2.64)$$

Capitolo 3

Nitruro di alluminio

3.1 Introduzione alla struttura cristallina

Atomi, molecole o ioni che compongono un solido cristallino o una sua parte sono disposti secondo uno schema che si ripete ordinatamente denominato cristallo. Un solido cristallino può presentarsi sotto forma monocristallina, composta da un singolo cristallo, o policristallina, composta da un gran numero di piccoli o microscopici cristalli denominati cristalliti.

Per descrivere un solido cristallino si introduce il concetto di reticolo spaziale. Esso è un modello matematico. Un reticolo spaziale è una disposizione regolare di punti in tre dimensioni, ottenuti per traslazione a partire da un punto O denominato origine. I punti del reticolo spaziale sono identificati dal vettore \mathbf{a}_{123} [1]:

$$\mathbf{a}_{123} = n_1 \mathbf{a}_1 + n_2 \mathbf{a}_2 + n_3 \mathbf{a}_3 \quad (3.1)$$

definito dai tre vettori non complanari \mathbf{a}_1 , \mathbf{a}_2 e \mathbf{a}_3 (i cui moduli sono rispettivamente a_1 , a_2 e a_3). n_1 , n_2 e n_3 sono numeri interi di valore arbitrario.

Per come è stato definito, il reticolo spaziale ha sempre lo stesso aspetto quando è visto da uno qualunque dei suoi punti.

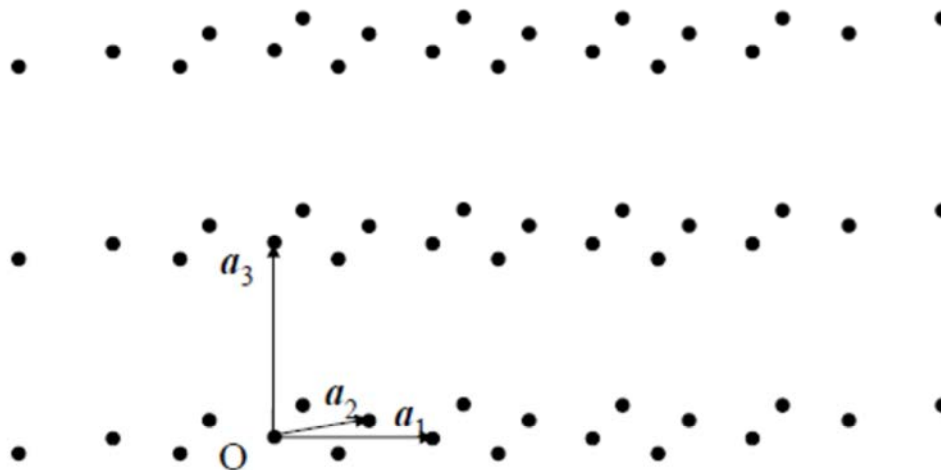


Fig. 3.1 – Esempio di reticolo spaziale.

Un cristallo ideale è una ripetizione periodica che si estende all'infinito ad intervalli a_1 , a_2 e a_3 lungo tre direzioni non complanari di un gruppo di atomi e/o molecole e/o ioni, denominato base o motivo

(rappresentata con un punto in Fig. 3.1). Perciò un cristallo ideale è costituito da un reticolo e una base o motivo.

Nel reticolo spaziale, i tre vettori di traslazione non complanari \mathbf{a}_1 , \mathbf{a}_2 e \mathbf{a}_3 identificano un parallelepipedo denominato cella primitiva, in cui i tre vettori \mathbf{a}_1 , \mathbf{a}_2 e \mathbf{a}_3 sono denominati vettori di traslazione primitivi. Una cella primitiva contiene solo un punto del reticolo spaziale.

I tre vettori non complanari \mathbf{a}_1 , \mathbf{a}_2 e \mathbf{a}_3 identificano anche una direzione descritta dalla seguente espressione:

$$u\mathbf{a}_1 + v\mathbf{a}_2 + w\mathbf{a}_3 \quad (3.2)$$

Le direzioni vengono identificate dai tre valori u , v e w che vengono scritti per convenzione tra parentesi quadre: $[uvw]$.

Un piano nel reticolo spaziale viene invece definito dagli indici di Miller: se un piano interseca i tre assi nei tre punti $(m_1, 0, 0)$, $(0, m_2, 0)$ e $(0, 0, m_3)$, esso viene definito moltiplicando i reciproci dei valori m_1 , m_2 ed m_3 per il loro minimo comune denominatore e inserendo i tre risultati ottenuti tra parentesi tonde senza virgole di separazione.

Dato un reticolo spaziale, si definisce cella unitaria una cella identificata da tre vettori di traslazione non complanari. Se essa contiene un solo punto del reticolo è una cella primitiva.

In tre dimensioni, per la notazione di una cella unitaria convenzionale, si utilizzano i vettori \mathbf{a} , \mathbf{b} e \mathbf{c} e gli angoli α , β e γ . L'angolo α è l'angolo tra i vettori \mathbf{b} e \mathbf{c} , β è l'angolo tra i vettori \mathbf{a} e \mathbf{c} , mentre γ è l'angolo tra i vettori \mathbf{a} e \mathbf{b} . Le lunghezze dei vettori \mathbf{a} , \mathbf{b} e \mathbf{c} (rispettivamente a , b e c) e gli angoli α , β e γ sono detti parametri del reticolo spaziale.

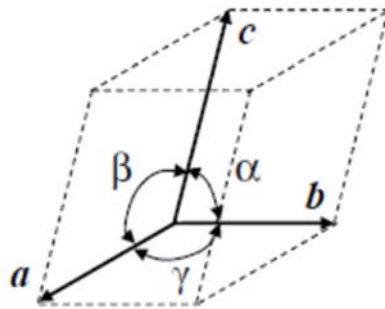


Fig. 3.2 – Cella unitaria convenzionale, definita dai parametri che descrivono le lunghezze dei vettori \mathbf{a} , \mathbf{b} e \mathbf{c} (rispettivamente a , b e c) e gli angoli α , β e γ . Il vettore \mathbf{a} ha direzione $[100]$, il vettore \mathbf{b} $[010]$, mentre il vettore \mathbf{c} $[001]$.

In base ai parametri del reticolo spaziale si possono distinguere sette sistemi reticolari, ognuno caratterizzato da una cella unitaria convenzionale o semplicemente cella unitaria.

Di seguito verrà descritto il sistema esagonale in quanto esso è il sistema reticolare cui appartiene il cristallo di nitruro di alluminio, AlN .

3.2 Sistema esagonale

Un sistema esagonale è un sistema reticolare che presenta un solo tipo di reticolo, il reticolo esagonale primitivo (denominato Esagonale P). Le relazioni tra i parametri del reticolo sono le seguenti:

$$\begin{cases} a = b \neq c \\ \alpha = \beta = \frac{\pi}{2} \\ \gamma = \frac{2\pi}{3} \end{cases} \quad (3.3)$$

Il vettore c è perpendicolare al piano identificato dai vettori a e b . L'angolo γ tra i vettori a e b è pari a $2\pi/3$.

La cella unitaria è la cella unitaria primitiva del reticolo, che contiene un solo punto del reticolo:

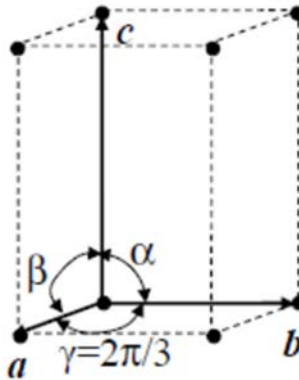


Fig. 3.3 – Cella Esagonale P. Essa è una cella primitiva.

3.3 Analisi cristallografica del nitrato di alluminio

Per quanto riguarda le applicazioni di energy harvesting, uno dei materiali piezoelettrici di interesse da utilizzare nei raccoglitori di energia cinetica da vibrazioni (in particolare quelli con configurazione a trave a sbalzo) è il nitrato di alluminio, AlN .

Esso è composto da una struttura esagonale di tipo wurzite [2]: gli atomi di alluminio, Al , e quelli di azoto, N , sono legati assieme da due tipi di legame:

- B_1 , legami di natura più covalente;
- B_2 , legami di natura più ionica e con energia di legame più bassa rispetto a quella dei legami di tipo B_1 .

Lungo l'asse c /direzione $[001]$ si ha un atomo di alluminio connesso a quattro atomi di azoto. Di questi quattro atomi di azoto, tre sono connessi mediante legami di tipo B_1 , mentre uno è connesso in direzione perpendicolare al piano (001) (cioè in direzione $[001]$) mediante un legame di tipo B_2 . Il piano (001) è perciò composto solo da legami di tipo B_1 .

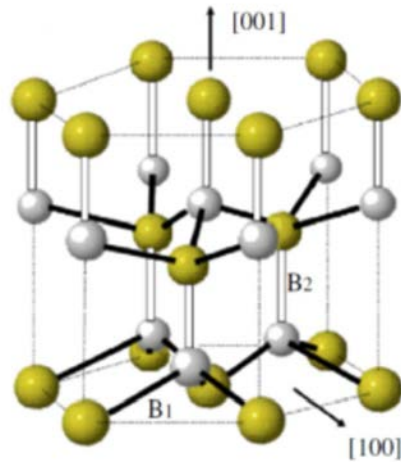


Fig. 3.4 – Struttura wurtzita del nitruro di alluminio, AlN . Gli atomi di alluminio, Al , sono rappresentati dalle sfere piccole di colore grigio, mentre gli atomi di azoto, N , sono rappresentati dalle sfere grandi di colore giallo. F. Medjani, R. Sanjinés, G. Allidi, A. Karimi, “Effect of substrate and bias voltage on the crystallite orientation in RF magnetron sputtered AlN thin films”, *Thin Solid Films*, vol.515, n.1, pp.260-265, 25 Settembre 2006.

Le proprietà piezoelettriche del nitruro di alluminio dipendono fortemente dall'orientamento cristallografico del film (alto grado di orientazione lungo l'asse c e superficie liscia del film) [3]: un film di nitruro di alluminio con perfetto orientamento lungo l'asse c /direzione $[001]$ presenta un'eccellente risposta piezoelettrica, vale a dire che presenta alti valori dei coefficienti piezoelettrici [4,5,6,7]. Inoltre, il nitruro di alluminio è stabile alle alte temperature perché non ha caratteristiche ferroelettriche e quindi nemmeno una temperatura di Curie [8,9,10,11].

Poiché il nitruro di alluminio esagonale presenta simmetrie cristalline, il numero di coefficienti indipendenti della matrice che descrive la costante piezoelettrica (espressione (2.11)) è ridotto: si hanno solo i coefficienti d_{31} , d_{33} e d_{15} . L'espressione (2.11) diventa perciò:

$$[d] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Tuttavia i coefficienti piezoelettrici d_{33} e d_{15} non hanno quasi alcuna influenza sulla deformazione della struttura a trave a sbalzo del raccoglitore di energia e perciò di solito vengono trascurati [12].

Capitolo 4

Magnetron sputtering

4.1 Tecniche di deposizione da vapore

La deposizione fisica da vapore consiste nella deposizione di un materiale, presente inizialmente in fase solida in un blocco chiamato sorgente, su di un altro materiale in fase solida, chiamato substrato: atomi della sorgente si staccano (la sorgente evapora) e come vapore arrivano al substrato. Il materiale viene pertanto depositato dalla fase gassosa. Il processo viene sviluppato all'interno della cosiddetta camera di deposizione.

Se il vapore è creato mediante meccanismi di tipo fisico, il metodo viene classificato come deposizione fisica da vapore (Physical Vapor Deposition, PVD); se invece il materiale che viene depositato è il prodotto di una reazione chimica, il metodo viene classificato come deposizione chimica da vapore (Chemical Vapor Deposition, CVD). In ogni caso il materiale viene depositato atomo per atomo sul substrato [1].

4.1.1 Sputtering

Lo sputtering (letteralmente “spruzzamento”) è una tecnica di deposizione fisica da vapore (Physical Vapor Deposition, PVD).

Nello sputtering, la sorgente si trova allo stato solido e viene definita bersaglio. Nella camera di deposizione è presente un gas, tipicamente argon, Ar , alla pressione p . Si usa l'argon poiché esso è inerte, essendo un gas nobile, e perciò non influenza la composizione del film che si vuole creare. Tuttavia, nel caso specifico di deposizione di un film di nitrato di alluminio, AlN , assieme all'argon si utilizza anche azoto, N_2 (si parla in questo caso di sputtering di tipo reattivo).

Per ottenere un elevato grado di purezza dell'atmosfera composta da argon (o argon ed azoto) e per controllare il valore di pressione p nella camera di deposizione, prima di inserire tale gas si porta la camera ad un vuoto molto spinto, dell'ordine di 10^{-5} Pa. A questo punto si immette il gas e si esegue il processo di presputtering, il quale è un processo di sputtering con substrato coperto e che ha lo scopo di pulire la superficie del bersaglio.

Durante il trattamento viene applicata una tensione tra la camera (che è a terra e funge da anodo) e il bersaglio (che viene portato ad un potenziale negativo e funge perciò da catodo). In particolare, una parte metallica della camera è vicina al bersaglio, alla distanza d (per la spiegazione di questa configurazione si veda la sezione 4.1.2). Quando la tensione raggiunge il valore di scarica (breakdown), valore che dipende dalle condizioni operative, dal tipo di gas impiegato all'interno della camera di deposizione e dal valore del prodotto tra la pressione p e la distanza d (come si può vedere dalla Fig. 4.1, rappresentante le curve di Paschen per vari tipi di gas), si ha la scarica del gas [2,5,6,7,8,11,13].

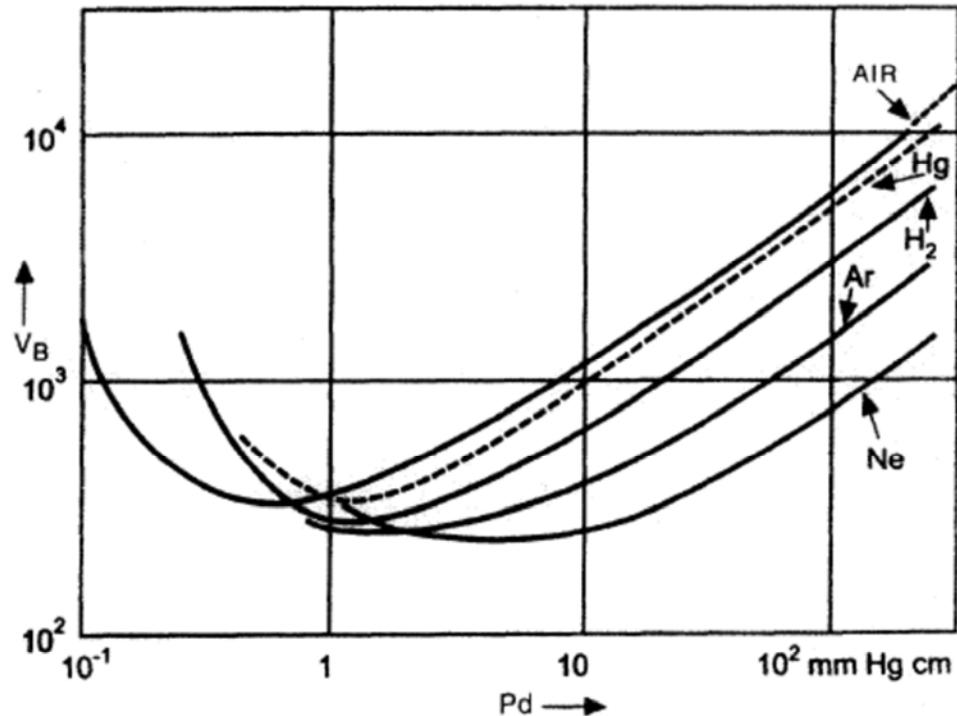


Fig. 4.1 – Curve di Paschen per vari tipi di gas: valore della tensione di scarica V_B in funzione del prodotto pd tra pressione p del gas e distanza d tra gli elettrodi. A. von Engel, *Ionized Gases*. Oxford, Oxford University Press, 1965.

Una volta ottenuta la scarica del gas (è una scarica a bagliore), in cui si ha la ionizzazione degli atomi di argon, si ha cioè la formazione di un plasma, il valore di tensione presente tra anodo e catodo (bersaglio) è inferiore al valore di scarica e si ha l'instaurarsi di una corrente elettrica: gli ioni di argon (Ar^+) colpiscono il bersaglio e, per meccanismo di sputtering, da quest'ultimo vengono rimossi e spruzzati in tutte le direzioni atomi neutri che possono quindi anche andare a colpire la superficie del substrato che viene posto al di sopra del bersaglio (Fig. 4.2).

Tutto questo processo avviene con la camera di deposizione a temperatura ambiente [14].

Per alimentare la scarica si utilizza una tensione continua DC per un bersaglio costituito da materiale conduttore, una tensione pulsata DC o a radiofrequenza (RF) per un bersaglio costituito da materiale conduttore o isolante (questo perché se si usasse una tensione continua DC con un materiale isolante si avrebbe l'instaurarsi di una carica elettrica positiva sulla superficie del materiale a causa della polarizzazione, cosa che farebbe estinguere la scarica elettrica) [14].

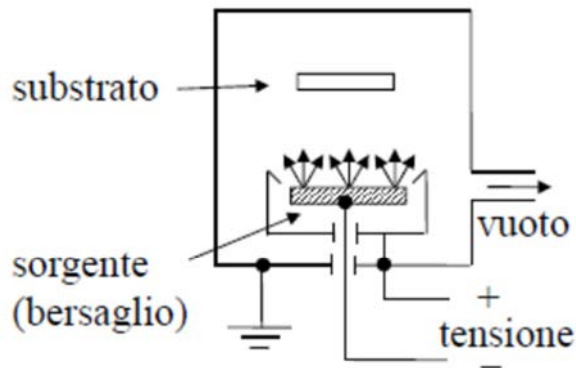


Fig. 4.2 – Camera di deposizione per il processo di magnetron sputtering. Il substrato è posto al di sopra del bersaglio che funge anche da catodo (potenziale negativo). La camera presenta una parte metallica vicina al bersaglio, alla distanza d .

4.1.2 Formazione di un plasma

Un plasma è un gas ionizzato. Nelle applicazioni industriali si hanno di solito gas debolmente ionizzati formati da un insieme di elettroni, ioni e specie atomiche o molecolari neutre. La loro pressione è al massimo dell'ordine delle decine di pascal.

L'applicazione di una tensione DC tra due elettrodi immersi in un gas a bassa pressione dà origine alla scarica del gas. Inizialmente, applicando tensione fra due elettrodi, si ha una corrente (i_0) dovuta a elettroni "naturali" e elettroni emessi dal catodo. Aumentando la tensione, quando un elettrone ha acquisito sufficiente energia, va a urtare un atomo neutro del gas (denominato A) e si ottiene con l'urto uno ione carico positivamente (A^+). Per il principio di conservazione della carica elettrica si può scrivere la seguente relazione:



in cui si vede che dalla reazione si hanno due elettroni i quali possono andare a collidere con due atomi neutri del gas, di conseguenza generando a catena altri ioni e elettroni (in un processo denominato ionizzazione di impatto). Nel frattempo il campo elettrico E presente tra gli elettrodi muove gli ioni carichi positivamente verso il bersaglio (catodo), i quali, per urto, fanno sì che vengano emessi dal bersaglio sia atomi neutri, che in parte andranno a depositarsi sul substrato posto superiormente, sia elettroni secondari che possono partecipare al processo descritto dalla reazione (4.1) (in un processo denominato generazione di elettroni secondari). Tutto questo processo a catena continua fino a che non avviene la scarica del gas.

Si definisce energia di ionizzazione W_{th} l'energia minima necessaria a espellere l'elettrone più debolmente legato all'atomo neutro del gas A . Valori tipici dell'energia di ionizzazione sono compresi tra 15 eV e 20 eV .

Affinché avvenga tale scarica, la distanza d tra gli elettrodi deve essere sufficientemente ampia da poter permettere agli elettroni di aumentare gradualmente la propria energia (essendo accelerati dal campo elettrico E presente tra gli elettrodi) in modo da raggiungere l'energia necessaria per ionizzare gli atomi neutri del gas e per sostenere quindi la reazione a catena. Inoltre la superficie degli elettrodi deve essere

sufficientemente ampia da evitare che ci sia una perdita di ioni o di elettroni a causa di una diffusione laterale al di fuori dello spazio sotteso dai due elettrodi.

Il processo di formazione di un plasma può essere descritto dall'equazione di Townsend:

$$i = i_0 \frac{e^{\alpha d}}{[1 - \gamma_e(e^{\alpha d} - 1)]} \quad (4.2)$$

dove:

- α è il coefficiente di ionizzazione di Townsend, il quale rappresenta la probabilità per unità di lunghezza che si abbia la ionizzazione durante un urto tra un elettrone e un atomo del gas;
- γ_e è il coefficiente di emissione di elettroni secondari e viene definito come il numero di elettroni secondari emessi dal bersaglio (catodo) per ogni ione incidente su di esso.

Questa formula mostra che la corrente elettrica di scarica i aumenta vertiginosamente a partire dal valore i_0 a causa dell'effetto combinato della ionizzazione di impatto e della generazione di elettroni secondari.

Per un elettrone di carica elettrica q che percorre la distanza λ in presenza di un campo elettrico E , la sua probabilità di raggiungere il potenziale di ionizzazione V_i è pari a $e^{\frac{V_i}{qE\lambda}}$, perciò il coefficiente di ionizzazione di Townsend α viene definito nel seguente modo:

$$\alpha = \frac{1}{\lambda} e^{\frac{V_i}{qE\lambda}} \quad (4.3)$$

Poiché è possibile associare la distanza λ con il cammino libero medio in un gas (esso rappresenta la distanza media percorsa da una particella del gas fra due urti successivi), il quale dipende dal reciproco della pressione p del gas, si ha che il coefficiente di ionizzazione di Townsend α è direttamente proporzionale alla pressione p del gas.

Sapendo che il cammino libero medio λ è inversamente proporzionale alla pressione p del gas si ha che:

$$\lambda = \frac{c}{p} \quad (4.4)$$

dove c è un parametro che dipende dal tipo di gas considerato e dalla temperatura T a cui esso si trova.

La scarica avviene, per definizione, quando il denominatore dell'equazione (4.2) è pari a 0, vale a dire quando $\gamma_e(e^{\alpha d} - 1) = 1$, cioè quando la corrente elettrica di scarica i è infinita. Utilizzando questa condizione e le equazioni (4.3) e (4.4) si possono ricavare il valore del campo elettrico critico di scarica ($E=E_B$) e il valore della tensione critica di scarica ($V=V_B=dE_B$) necessari per innescare la scarica del gas:

$$\gamma_e(e^{\alpha d} - 1) = 1 \quad (4.5)$$

$$e^{\alpha d} = \frac{1}{\gamma_e} + 1 = c_1 \quad (4.6)$$

dove c_1 è un termine costante. Eseguendo il logaritmo naturale di ambo i membri dell'equazione (4.6) si ottiene:

$$\alpha d = \ln c_1 \quad (4.7)$$

Inserendo l'espressione (4.4) all'interno dell'espressione (4.3) si ha che il coefficiente di ionizzazione di Townsend α è pari a:

$$\alpha = \frac{p}{c} e^{-\frac{V_i p}{q E c}} \quad (4.8)$$

Inserendo l'espressione (4.8) all'interno dell'espressione (4.7) si ha che:

$$\frac{p}{c} e^{-\frac{V_i p}{q E c}} d = \ln c_1 \quad (4.9)$$

$$p d e^{-\frac{V_i p}{q E c}} = c \ln c_1 = c_2 \quad (4.10)$$

dove c_2 è un termine costante. Eseguendo il logaritmo naturale di ambo i membri dell'equazione (4.10) si ottiene:

$$\ln(p d) - \frac{V_i p}{q E c} = \ln c_2 \quad (4.11)$$

$$q E c \ln(p d) - V_i p = q E c \ln c_2 \quad (4.12)$$

$$(c q \ln(p d)) E - (c q \ln c_2) E = V_i p \quad (4.13)$$

Il valore del campo elettrico critico di scarica E_B è quindi pari a:

$$E_B = \frac{V_i p}{c q (\ln(p d) - \ln c_2)} \quad (4.14)$$

definendo le costanti:

$$A = \frac{V_i}{c q} \quad (4.15)$$

e:

$$B = -\ln c_2 \quad (4.16)$$

si può riscrivere l'equazione (4.14) nel seguente modo:

$$E_B = \frac{Ap}{\ln(pd) + B} \quad (4.17)$$

di conseguenza il valore della tensione di scarica V_B è pari al prodotto tra la distanza d tra gli elettrodi e il valore del campo elettrico critico di scarica E_B :

$$V_B = dE_B = \frac{Apd}{\ln(pd) + B} \quad (4.18)$$

quest'ultima espressione rappresenta la legge di Paschen, il cui sviluppo grafico si può vedere, per vari tipi di gas, in Fig. 4.1. Dai grafici si nota che a bassi valori del prodotto pd ci sono alti valori della tensione di scarica V_B dal momento che c'è una bassa ionizzazione di impatto (dato il basso valore del prodotto pd ci sono, considerato un ridotto valore della pressione p del gas, pochi atomi del gas che possono impattare con gli elettroni e/o gli elettroni prodotti, data una ridotta distanza d tra gli elettrodi, non sono nella condizione di guadagnare gradualmente l'energia necessaria per ionizzare gli atomi neutri del gas e per sostenere quindi la reazione a catena) e di conseguenza anche una bassa generazione di elettroni secondari. Anche agli alti valori del prodotto pd ci sono elevati valori della tensione di scarica V_B in quanto c'è una maggiore frequenza di collisioni, considerato l'alto valore della pressione p del gas, che fa sì che gli elettroni non possano guadagnare molta energia per ionizzare il gas. Per valori intermedi del prodotto pd , per mantenere la scarica servono tipicamente dalle centinaia alle migliaia di volt.

4.1.3 Grandezze caratteristiche di un plasma

Un plasma è un gas in generale composto da elettroni, la cui densità è pari a n_e , ioni, la cui densità è pari a n_i , e specie neutre, la cui densità è pari a n_0 . Gli elettroni e gli ioni hanno distribuzioni di velocità tra loro indipendenti con gli elettroni che hanno una velocità maggiore rispetto a quella degli ioni in quanto, avendo una massa più piccola, risentono maggiormente del campo elettrico E presente tra i due elettrodi [15]. In media un plasma è elettricamente neutro, di conseguenza la densità degli elettroni e quella degli ioni sono uguali tra loro e pari ad un valore n :

$$n_e = n_i = n \quad (4.19)$$

Si definisce grado di ionizzazione f_i del plasma il rapporto tra la densità degli elettroni n_e e la somma tra la densità degli elettroni n_e e quella delle specie neutre n_0 :

$$f_i = \frac{n_e}{n_e + n_0} \quad (4.20)$$

Nelle scariche a bagliore esso ha tipicamente un valore dell'ordine di 10^{-4} .

Nelle scariche a bagliore, l'energia degli elettroni è compresa tra 1 eV e 10 eV , per un conto molto approssimativo, si può assumere un valore di circa 2 eV . L'effettiva temperatura caratteristica T associata ad una energia W è data dalla seguente formula:

$$T = \frac{W}{k_B} \quad (4.21)$$

dove k_B è la costante di Boltzmann ($k_B=8,627 \cdot 10^{-5} \text{ eV K}$).

Perciò considerando un'energia degli elettroni pari a 2 eV , utilizzando l'equazione (4.21), si può calcolare la temperatura a cui si trovano: essa è pari a $T_e=23000 \text{ K}$. Le specie neutre del gas hanno un'energia pari a 0.025 eV (corrispondente, utilizzando l'equazione (4.21), ad una temperatura $T_0=293 \text{ K}$), mentre gli ioni hanno un'energia leggermente superiore, in quanto la acquisiscono dal campo elettrico applicato, e pari a 0.04 eV (corrispondente, utilizzando l'equazione (4.21), ad una temperatura $T_i=500 \text{ K}$).

Considerando il potenziale elettrico radiale $V(r)$ attorno ad uno ione caricato positivamente (r è la distanza dal centro dello ione). Questo ione respinge altri ioni caricati positivamente e attrae una nuvola di elettroni con densità data dalla seguente relazione:

$$n_e(r) = n_i e^{\frac{qV(r)}{k_B T}} \quad (4.22)$$

Dal momento che la densità elettronica $n_e(r)$ non può scostarsi di molto dal suo valore medio (che è pari alla densità ionica n_i), il valore del potenziale elettrico radiale $V(r)$ deve essere piccolo. Perciò, espandendo in serie di Taylor al primo ordine l'esponenziale presente nell'espressione (4.22) si ha che:

$$n_e(r) = n_i \left(1 + \frac{qV(r)}{k_B T} \right) \quad (4.23)$$

Inoltre, il potenziale elettrico radiale $V(r)$ deve soddisfare l'equazione di Poisson, che in coordinate sferiche si può esprimere nel seguente modo:

$$\frac{1}{r^2} \left[\frac{d}{dr} \left[r^2 \frac{dV(r)}{dr} \right] \right] = - \frac{q(n_i - n_e)}{\epsilon_0} = \frac{n_i q^2 V(r)}{\epsilon_0 k_B T} \quad (4.24)$$

La soluzione dell'equazione (4.24) descrive il potenziale elettrico radiale $V(r)$:

$$V(r) = \frac{q}{r} e^{-\frac{r}{\lambda_D}} \quad (4.25)$$

dove:

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 k_B T}{n_i q^2}} \quad (4.26)$$

viene chiamata lunghezza di Debye. Essa è una dimensione caratteristica dei plasmi. Se il potenziale del plasma è perturbato da una carica elettrica puntuale positiva, la lunghezza di Debye λ_D è una misura della dimensione della nuvola mobile di elettroni necessaria per ridurre il potenziale elettrico radiale $V(r)$ al 37% del suo valore iniziale ($e^{-1} \cdot 100$). Fuori dalla sfera di raggio λ_D non c'è praticamente interazione tra lo ione positivo e il resto del plasma, che è quindi elettricamente neutro.

Gas ionizzati possono definirsi plasmi se soddisfano le seguenti condizioni:

- 1) le dimensioni del sistema devono essere molto maggiori della lunghezza di Debye λ_D descritta dall'espressione (4.26). In questo modo è assicurata la quasi neutralità del bulk del plasma;
- 2) il numero totale di elettroni N_D schermanti attirati dentro la lunghezza di Debye λ_D deve essere grande, almeno più grande di 1;
- 3) gli elettroni devono interagire più tra di loro che con le specie neutre del gas. In questo modo il moto delle specie del plasma al suo interno viene controllato da forze elettromagnetiche e non dalla dinamica dei fluidi.

4.1.4 Ruolo del plasma nella tecnica di sputtering

L'immersione di un elettrodo a potenziale flottante in un plasma lo fa caricare negativamente a causa della disparità (in massa, velocità ed energia) tra elettroni e ioni. Di conseguenza, in una scarica a bagliore sia la superficie dell'anodo che quella del catodo (bersaglio) si trovano ad un potenziale elettrico negativo (V_p) rispetto a quello del plasma (V_p). Uno strato, simile alla lunghezza di Debye λ_D per le cariche elettriche puntuali scherma la superficie che è a potenziale negativo. Si ha uno strato che racchiude il catodo (bersaglio) e respinge gli elettroni. In questa regione la bassa densità elettronica fa sì che ci sia un basso livello di ionizzazione ed eccitazione delle particelle neutre del gas (per questo motivo in questa regione c'è meno luminosità e questa zona appare scura, viene infatti chiamata anche spazio oscuro catodico). Come si può vedere dalla Fig. 4.3 si ha che il campo elettrico E maggiore è confinato in questa regione.

È proprio all'interfaccia tra lo strato catodico e il plasma stesso che gli ioni iniziano ad accelerare (nel cosiddetto processo di bombardamento ionico) verso l'anodo (bersaglio). Poiché è proprio in tale regione che essi accelerano verso il catodo e questa regione ha una lunghezza relativamente bassa se confrontata con la lunghezza d tra i due elettrodi, si può considerare che tutti gli ioni impattanti sul bersaglio abbiano la stessa energia (sono sottoposti alla stessa forza per circa lo stesso spostamento) e questo è importante nel controllo dell'intero processo.

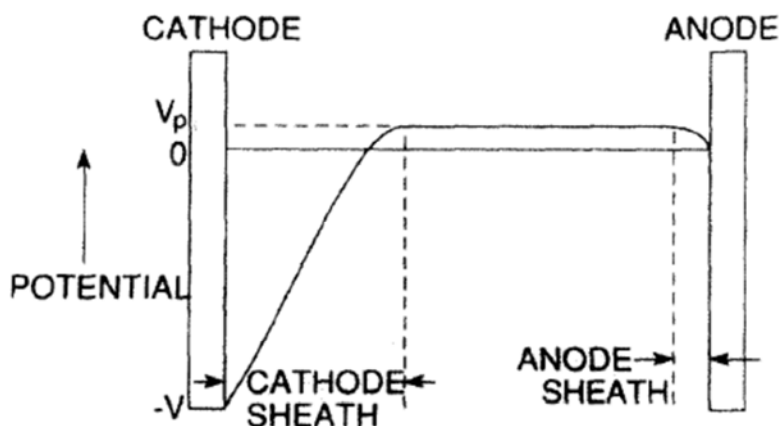


Fig. 4.3 – Distribuzione della tensione durante una scarica a bagliore DC. Si noti che lo strato catodico è più ampio rispetto a quello anodico. M. Ohring, *Materials science of thin film*, 2nd edition, Academic Press, 2001, p.162.

La descrizione della corrente ionica j attraverso la regione dello strato catodico può essere riassunta dall'equazione di Child-Langmuir, valida alle basse pressioni:

$$j = \frac{4E_0}{9d_s^2} \cdot \sqrt{\frac{2q}{m}} V^{\frac{3}{2}} \quad (4.27)$$

dove:

- E_0 è l'ampiezza del campo elettrico E tra gli elettrodi;
- d_s è l'ampiezza dello strato catodico;
- q è la carica elettrica degli ioni positivi;
- m è la massa degli ioni.

4.1.5 Processo di urto

Per descrivere il processo di urto tra uno ione incidente sul bersaglio (catodo) e un atomo del bersaglio (catodo) stesso si fa riferimento al processo di urto di tipo elastico.

In tutti gli urti di tipo elastico viene scambiata solo energia cinetica.

Considerando che l'energia cinetica W di una particella di massa M che viaggia alla velocità v è pari a:

$$W = \frac{1}{2} M v^2 \quad (4.28)$$

L'urto elastico tra due particelle, una di massa M_1 che si muove alla velocità iniziale v_1 ed una di massa M_2 inizialmente ferma, può essere descritto dalla seguente relazione:

$$\frac{W_2}{W_1} = \frac{\frac{1}{2} M_2 v_2^2}{\frac{1}{2} M_1 v_1^2} = \frac{4M_1 M_2}{(M_1 + M_2)^2} \cos^2 \theta \quad (4.29)$$

dove:

- θ è l'angolo di collisione definito dalla traiettoria iniziale della particella di massa M_1 e la retta che collega i centri di massa delle due particelle al contatto;
- v_2 è la velocità assunta dalla particella di massa M_2 dopo l'urto con la particella di massa M_1 .

Si definisce funzione di trasferimento energetico γ la quantità:

$$\gamma = \frac{4M_1 M_2}{(M_1 + M_2)^2} \quad (4.30)$$

essa rappresenta la quantità di energia cinetica W_2 acquisita dalla particella di massa M_2 relativamente all'energia W_1 della particella di massa M_1 .

4.1.6 Caratteristiche del meccanismo di sputtering

Le principali caratteristiche che descrivono il meccanismo di sputtering sono le seguenti:

- 1) durante il bombardamento di una superficie gli ioni possono essere riflessi, conficcarsi nella superficie, essere adsorbiti, dispersi, espulsi, possono dar luogo al processo di sputtering e spruzzare quindi gli atomi del bersaglio (catodo) oppure possono essere seppelliti negli strati al di sotto della superficie (impianto di ioni);
- 2) in base all'energia del flusso ionico che incide sulla superficie può variare il tipo di interazione: di base, gli ioni possono conficcarsi oppure reagire con gli atomi della superficie del bersaglio (catodo). Con un'energia cinetica degli ioni inferiore a 10^{-2} eV (l'energia corrispondente alla temperatura ambiente di 293 K), la probabilità di conficcamento ionico, definita come il rapporto tra il numero di ioni depositati e il numero di ioni incidenti è di solito pari a 1; con un'energia cinetica degli ioni compresa tra i valori 10^{-2} e 10^4 eV la probabilità di conficcamento ionico tipicamente diminuisce, raggiungendo un minimo pari a circa 0.2 all'energia cinetica di 20 eV, per poi aumentare fino ad un valore di 0.6: i processi di sputtering avvengono in questo intervallo energetico; un'energia cinetica superiore a 10^4 eV e (fino a 10^6 eV) fa sì che la probabilità di conficcamento ionico aumenti nuovamente fino a circa il valore 1 dal momento che gli ioni vengono seppelliti al di sotto della superficie del bersaglio. In questo intervallo energetico la probabilità di avere il processo di sputtering è bassa;
- 3) quando gli ioni sono generati da scarica a bagliore, il loro intervallo energetico è compreso tra pochi eV e centinaia di eV, valori relativamente bassi e adatti alla applicazione di deposizione di film sottili;
- 4) il bombardamento ionico può servire a due funzioni durante la deposizione di film sottili mediante sputtering. Lo sputtering si ha al catodo (bersaglio) come risultato del trasporto ionico attraverso lo strato catodico. Tuttavia, in base a come viene eseguito il confinamento del plasma, il bombardamento ionico può raggiungere anche la superficie del substrato e ciò ha influenza sulla deposizione del film sottile. Ciò avviene nella configurazione magnetron sputtering sbilanciata di tipo 2 (si veda il paragrafo 4.2.3).

4.1.7 Rendimento di sputtering

Nel processo di sputtering, quando uno ione impatta sul bersaglio (catodo) stabilisce in esso una serie di urti, portando a un'espulsione di un atomo dalla matrice del bersaglio (catodo). Esso è il risultato di uno scambio di momento tra la particella impattante e quella espulsa dalla superficie. L'energia degli atomi del bersaglio (catodo) spruzzati è compresa tra 2 eV e 7 eV.

Si definisce rendimento di sputtering il rapporto tra il numero di atomi spruzzati e il numero di particelle incidenti sul bersaglio:

$$S = \frac{\text{Numero di atomi spruzzati}}{\text{Numero di particelle incidenti}} \quad (4.31)$$

Esso è una misura dell'efficienza del processo di sputtering. Di solito il suo valore è compreso tra 10^{-5} e 10^3 anche se nelle applicazioni pratiche è compreso tra 10^{-1} e 10.

L'emissione di atomi riflette la simmetria del reticolo del bersaglio (catodo): dove il flusso vede una bassa densità di punti del reticolo, gli ioni entrano più in profondità, riducendo perciò il rendimento di sputtering S .

Tale grandezza è inoltre chiaramente influenzata dall'energia che viene trasferita dallo ione incidente all'atomo del bersaglio (catodo) in quanto si deve fornire l'energia di soglia W_{th} all'atomo del bersaglio (catodo) affinché esso possa venire spruzzato. Perciò è importante che le masse dello ione e dell'atomo del bersaglio (catodo), siano tra di loro confrontabili in modo da massimizzare l'energia trasferita dallo ione incidente all'atomo del bersaglio (catodo) (si veda l'espressione (4.30)).

È a questo punto importante far notare il perché il gas più utilizzato nella camera di deposizione è l'argon. Come già detto, esso è un gas inerte e perciò non influenza la composizione del film che si vuole creare. È preferito rispetto agli altri gas nobili poiché è più economico. Si potrebbe anche utilizzare elio, altro gas inerte, ma l'argon ha una massa atomica più grande rispetto all'elio, perciò gli ioni che si vengono a creare durante la scarica del gas hanno una massa atomica confrontabile a quella degli atomi che solitamente compongono il bersaglio. Questo fa sì che si abbia un alto valore della funzione di trasferimento energetico γ (si veda l'espressione (4.30)) che consente agli ioni di estrarre un numero più elevato di atomi dal bersaglio aumentando il rendimento di sputtering S .

4.1.8 Singolo urto

Se viene trasferita sufficiente energia agli atomi del bersaglio (catodo) durante l'urto, essi vincono le forze di legame e vengono spruzzati. Si definisce energia di soglia W_{th} l'energia minima necessaria ad attivare il processo di sputtering. Valori tipici di W_{th} variano tra 5 eV e 40 eV a seconda della natura degli ioni incidenti, della massa e del numero atomico degli atomi del bersaglio (catodo). Questa energia di soglia è collegata all'energia di legame U_S degli atomi superficiali del bersaglio, la quale è legata al calore necessario per la sublimazione o vaporizzazione del materiale componente il bersaglio e assume valori compresi tra 2 eV e 5 eV . Il legame tra W_{th} e U_S è descritto dalle seguenti relazioni:

$$\begin{cases} W_{th} = 4U_S \text{ se } 0.08 < \frac{M_1}{M_2} < 1 \\ W_{th} = \frac{U_S}{\gamma} \text{ in generale} \end{cases} \quad (4.32)$$

Nella seconda relazione dell'espressione appena scritta si vede che la funzione di trasferimento energetico γ aumenta il valore di U_S tenendo conto della frazione di energia ionica trasferita durante l'urto.

4.1.9 Urti lineari a catena

Alle alte energie ioniche si hanno, al posto di singoli urti, urti lineari a catena. In questo caso la densità di rimbalzi è bassa, perciò la gran parte degli urti coinvolgono una particella in movimento (ione incidente) e una particella ferma (atomo del bersaglio) al posto di due particelle in movimento.

In questo caso il rendimento di sputtering viene descritto dalla relazione di Sigmund:

$$S = \Lambda F_D(W) \quad (4.33)$$

dove:

- A è una costante del materiale. Essa riflette proprietà come l'energia di legame U_s degli atomi superficiali del bersaglio e il numero di atomi che superano la barriera superficiale del solido e si disperdono;
- $F_D(W)$ è una grandezza che riflette la quantità di energia depositata dagli ioni sulla superficie del bersaglio e dipende dal tipo, energia e angolo di incidenza θ degli ioni, come pure da parametri del bersaglio (catodo). Di particolare importanza è la perdita energetica che gli ioni soffrono a causa delle ripetute collisioni nucleari cui sono sottoposti durante il loro attraversamento del bersaglio (catodo).

La teoria di Sigmund descrive la dipendenza specifica del rendimento di sputtering S dall'energia cinetica W degli ioni sia per bassi che per alti livelli energetici:

$$\left\{ \begin{array}{l} S = \frac{3\alpha 4M_1M_2W}{4\pi^2(M_1 + M_2)^2U_s} \text{ se } W < 1 \text{ keV} \\ S = \frac{0.042\alpha S_n(W)}{U_s} \text{ se } W > 1 \text{ keV} \end{array} \right. \quad (4.34)$$

dove $\alpha(M_1/M_2, \theta)$ dipende dal rapporto tra la massa M_1 dello ione impattante e la massa M_2 dell'atomo spruzzato, oltre che dall'angolo di collisione θ .

Chiaramente, poiché quando gli ioni vengono generati da scarica a bagliore il loro intervallo energetico è compreso tra pochi eV e centinaia di eV, nelle applicazioni di sputtering si considera solo la prima equazione dell'espressione (4.34).

Il valore del rendimento di sputtering S è tipicamente compreso tra 0.01 e 4 ed aumenta con la massa e l'energia delle molecole del gas nella camera di deposizione.

Urti a catena superficiali (aumentando l'angolo di incidenza θ degli ioni sul bersaglio, ma non ad angoli prossimi a 90° in quanto la penetrazione ionica nel bersaglio sarebbe molto ridotta) creano su bersaglio (catodo) una maggior densità di atomi superficiali che possono essere potenzialmente spruzzati.

4.2 Magnetron Sputtering

Come detto nel paragrafo 4.1.4, è all'interfaccia tra lo strato del catodo e il plasma stesso che gli ioni iniziano ad accelerare verso il catodo (bersaglio). Tuttavia la densità elettronica in tale regione risulta essere bassa ed è pertanto necessario aumentarla. Ciò può essere ottenuto mediante la tecnica di magnetron sputtering.

4.2.1 Moto di una carica elettrica in un campo di induzione magnetica

Si consideri il moto alla velocità \mathbf{v} di una carica elettrica di massa m e carica q in un campo di induzione magnetica \mathbf{B} costante nel tempo e nello spazio. La relazione che descrive questo tipo di moto viene descritta dalla forza di Lorentz [1]:

$$m \frac{d\mathbf{v}}{dt} = q(\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (4.35)$$

Considerando una direzione parallela alla direzione di \mathbf{B} (asse z) e un piano perpendicolare a tale direzione (piano xy), la velocità della carica elettrica può essere divisa in due termini, uno parallelo a \mathbf{B} lungo l'asse z (v_z) e uno ad esso perpendicolare giacente sul piano xy (\mathbf{v}_\perp):

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}_\perp + v_z \mathbf{u}_z \quad (4.36)$$

l'espressione (4.35) si può perciò riscrivere nel seguente modo:

$$m \frac{d}{dt} (\mathbf{v}_\perp + v_z \mathbf{u}_z) = q [(\mathbf{v}_\perp + v_z \mathbf{u}_z) \times \mathbf{B}] \quad (4.37)$$

poiché:

$$|\mathbf{u}_z \times \mathbf{B}| = u_z B \sin \varphi_1 = u_z B \sin(0) = 0 \quad (4.38)$$

dove φ_1 è l'angolo compreso tra \mathbf{u}_z e \mathbf{B} ed è pari a 0 in quanto i due vettori sono tra loro paralleli.

Si può pertanto scrivere:

$$\begin{cases} m \frac{d}{dt} v_z = 0 \\ m \frac{d}{dt} \mathbf{v}_\perp = q (\mathbf{v}_\perp \times \mathbf{B}) \end{cases} \quad (4.39)$$

Dalla prima relazione dell'espressione (4.39) risulta che il valore della velocità lungo l'asse z v_z è costante:

$$v_z = \text{costante} \quad (4.40)$$

Dalla seconda relazione dell'espressione (4.39) si può vedere che tutta la forza di Lorentz descritta dall'espressione (4.35) giace nel piano xy ed è perpendicolare alla componente di velocità \mathbf{v}_\perp . Essa è una forza centripeta che dà luogo ad una accelerazione centripeta verso il centro di rotazione. Nel piano xy si ha perciò un moto circolare uniforme, di raggio R , in cui l'intensità dell'accelerazione centripeta è pari a:

$$a = \left| \frac{d}{dt} \mathbf{v}_\perp \right| = \frac{|q(\mathbf{v}_\perp \times \mathbf{B})|}{m} = \frac{|q| v_\perp B \sin \varphi_2}{m} = \frac{|q|}{m} v_\perp B \quad (4.41)$$

dove φ_2 è l'angolo compreso tra \mathbf{v}_\perp e \mathbf{B} ed il $\sin \varphi_2$ è pari a 1 in quanto i due vettori sono perpendicolari.

Dalla relazione del moto circolare uniforme si può esprimere la formula che descrive il valore dell'accelerazione centripeta a :

$$a = \frac{v_\perp^2}{R} = \omega^2 R \quad (4.42)$$

dove la velocità angolare ω è definita come:

$$\omega = \frac{v_\perp}{R} \quad (4.43)$$

Il raggio R che descrive la traiettoria circolare è dunque pari a:

$$R = \frac{mv_{\perp}}{|q|B} \quad (4.44)$$

e la velocità angolare ω definita dall'espressione (4.43) si può riscrivere nel seguente modo:

$$\omega = \frac{|q|B}{m} \quad (4.45)$$

4.2.2 Specchio magnetico

Dalla seconda relazione dell'espressione (4.39) è chiaro che il moto ha verso differente se si prende una carica elettrica positiva ($q > 0$) oppure una carica elettrica negativa ($q < 0$). Tuttavia la corrente elettrica i generata nei due casi ha lo stesso verso in quanto essa è convenzionalmente definita dal moto delle cariche elettriche positive. Il suo valore è pari a:

$$i = \frac{|q|\omega}{2\pi} \quad (4.46)$$

e può essere vista come un momento di dipolo magnetico μ di una spira di raggio R :

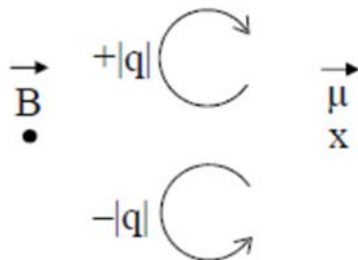


Fig. 4.4 – Momento di dipolo magnetico μ . Esso ha direzione opposta rispetto al campo di induzione magnetica B .

Si consideri ora una configurazione dove c'è un gradiente dell'induzione magnetica \mathbf{B} . Si consideri che l'induzione magnetica \mathbf{B} aumenti la sua intensità all'aumentare di z :

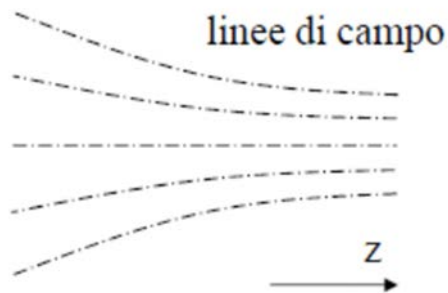


Fig. 4.5 – Gradiente di induzione magnetica \mathbf{B} lungo la direzione z : l'intensità dell'induzione magnetica aumenta all'aumentare di z .

Assumendo che la variazione dell'intensità dell'induzione magnetica \mathbf{B} sia piccola, si consideri una carica elettrica (indipendentemente che essa sia positiva o negativa) che si muove nel piano xy , perpendicolare all'asse z , in una traiettoria circolare di raggio R .

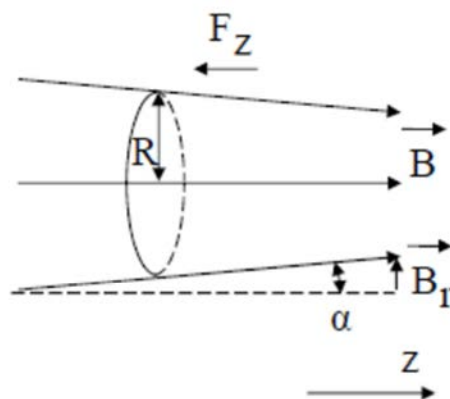


Fig. 4.6 – Moto circolare uniforme, di raggio R e nel piano xy , di una carica elettrica (indipendentemente che essa sia positiva o negativa) in un campo di induzione magnetica \mathbf{B} la cui intensità aumenta all'aumentare di z (perpendicolare al piano xy).

Ad una piccola distanza R dal centro della traiettoria circolare, il gradiente di induzione magnetica ha una componente B_r lungo la generica direzione r perpendicolare all'asse z . Si può scrivere la seguente relazione:

$$\frac{|B_r|}{B} \simeq |\sin\alpha| \quad (4.47)$$

poiché l'angolo α che descrive il gradiente di induzione magnetica \mathbf{B} è piccolo dal momento che la variazione dell'intensità dell'induzione magnetica \mathbf{B} è piccola.

La componente della forza di Lorentz lungo l'asse z è perciò pari a:

$$F_z = q(\mathbf{v} \times \mathbf{B})|_z = -|q|v_{\perp}|B_r| \quad (4.48)$$

Dall'espressione (4.48) si vede che la forza F_z è diretta verso la regione dove il valore dell'induzione magnetica \mathbf{B} è più basso.

Quanto detto sta alla base della configurazione a specchio magnetico:

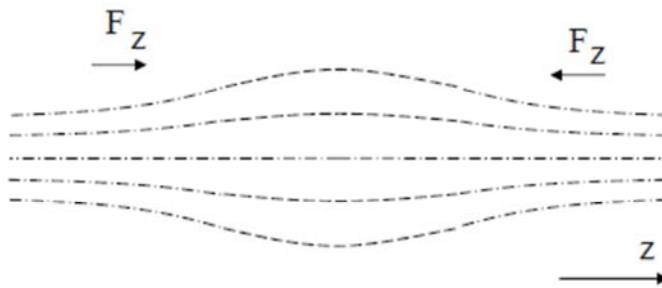


Fig. 4.7 – Configurazione a specchio magnetico. Le linee tratteggiate indicano il campo di induzione magnetica \mathbf{B} .

In Fig. 4.7 si vede che l'intensità dell'induzione magnetica \mathbf{B} lungo l'asse z è più alta alle due estremità, questo fa sì che le cariche elettriche che presentano una componente di velocità perpendicolare alla direzione di applicazione dell'induzione magnetica \mathbf{B} (asse z , indipendentemente che esse siano positive o negative) restino confinate nella zona dove l'intensità di induzione magnetica è più bassa.

Questa configurazione è perciò utilizzata nelle applicazioni di sputtering per aumentare la densità elettronica e di conseguenza ionica (di ioni carichi positivamente generati nel plasma per urto tra elettroni e atomi neutri del gas) nella regione dello strato catodico dove gli ioni carichi positivamente vengono sostanzialmente accelerati verso il bersaglio (catodo), in tale modo si aumenta il bombardamento ionico del bersaglio e di conseguenza anche il rendimento di sputtering.

4.2.3 Configurazioni magnetron sputtering

In una configurazione magnetron sputtering, al di sotto del bersaglio (catodo) vengono posti dei magneti permanenti: al centro vengono posti magneti, mentre in posizioni disposte in modo regolare lungo una circonferenza presso il bordo vengono posizionati magneti permanenti con le due polarità scambiate rispetto a quelli posti al centro. In questo modo l'induzione magnetica \mathbf{B} tende a tenere gli elettroni presso il bersaglio, con riflessioni al bordo e al centro, in quanto essi hanno una massa molto piccola e perciò hanno un valore molto basso del raggio R che descrive la loro traiettoria. Grazie a ciò aumenta la densità degli elettroni e, per urto con gli atomi del gas, anche quella degli ioni positivi che vengono quindi accelerati verso il bersaglio.

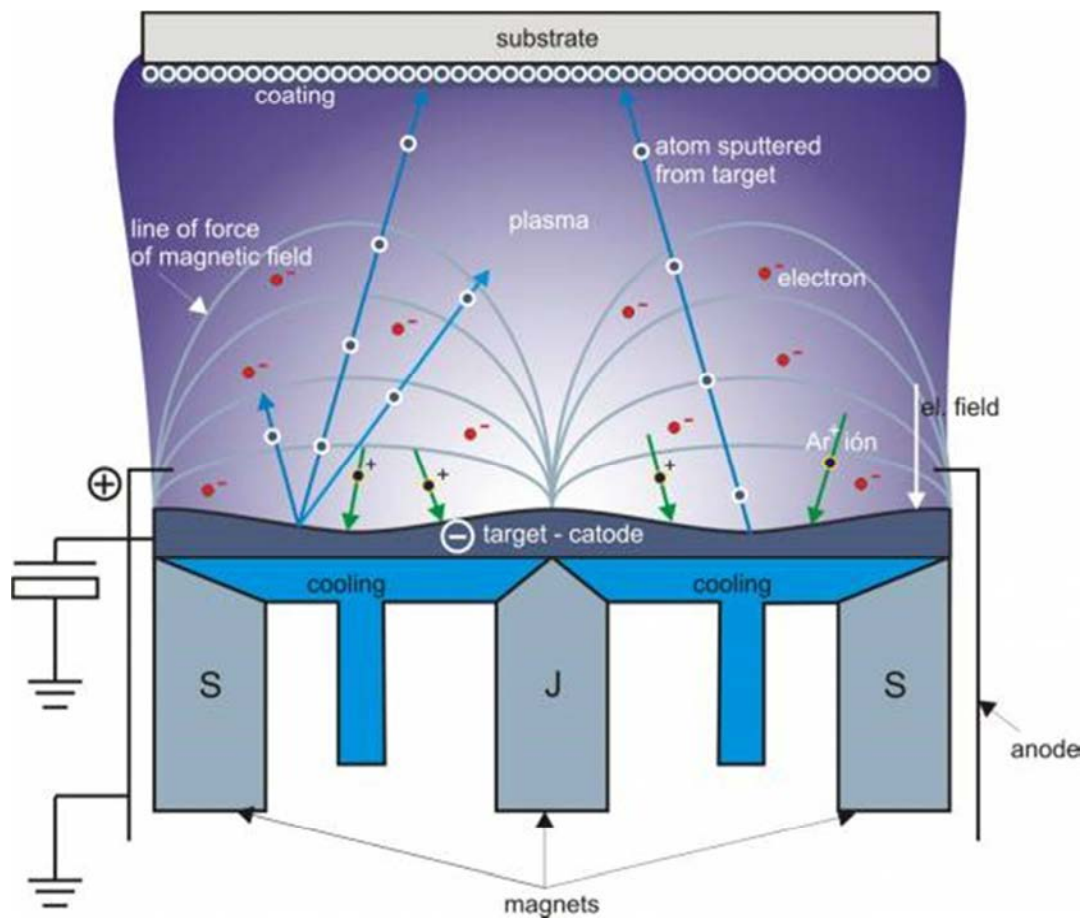


Fig. 4.8 – Tipica configurazione magnetron sputtering. Il bersaglio coincide con il catodo e sotto di esso vengono posti i magneti permanenti: in questo modo al di sopra di esso si crea una diversa densità di induzione magnetica B che confina gli elettroni (e di conseguenza gli ioni carichi positivamente che si creano nel plasma per urto tra elettroni e atomi neutri del gas) presso il bersaglio (catodo). All'estremità superiore si trova il substrato sulla cui superficie si può creare il deposito del materiale di cui è costituito il bersaglio.

Grazie all'aumento della densità elettronica nella zona dello strato catodico, i vantaggi della tecnica di magnetron sputtering rispetto a quella di sputtering sono, a parità di tensione DC applicata tra gli elettrodi:

- 1) maggiore corrente ionica j ;
- 2) aumento del tasso di deposizione;
- 3) minori pressioni operative necessarie.

Mentre lo svantaggio principale consiste in un'erosione non omogenea del bersaglio a causa del gradiente del campo di induzione magnetica B .

Le varie configurazioni di magnetron sputtering differiscono tra di loro per la diversa disposizione dei magneti permanenti: si può avere una configurazione bilanciata oppure una configurazione sbilanciata, che può essere di tipo 1 oppure di tipo 2 [16].

In una configurazione bilanciata (convenzionale) il plasma è confinato in prossimità del bersaglio. Tipicamente il plasma si estende per 60 mm dalla superficie del bersaglio. I film sottili che crescono in un substrato posto all'interno di questa regione sono soggetti a bombardamento ionico, il quale può influire fortemente sulla struttura e sulle proprietà del film che si sta creando. Invece, i film sottili che crescono in un substrato posto all'esterno di questa regione giacciono in una regione a bassa densità ionica e di conseguenza il bombardamento ionico verso il substrato è insufficiente per modificare la struttura del film. Inoltre l'energia del bombardamento ionico può essere aumentata aumentando il bias negativo applicato al substrato.

In una configurazione sbilanciata di tipo 1 il polo centrale produce un flusso magnetico maggiore rispetto a ciascun polo posto sulla circonferenza esterna. Il substrato si trova anche in questo caso in una regione a bassa densità ionica e il bombardamento ionico verso il substrato è insufficiente per modificare la struttura del film, perciò questa configurazione raramente viene utilizzata nelle applicazioni di magnetron sputtering.

In una configurazione sbilanciata di tipo 2 il polo centrale produce un flusso magnetico minore rispetto a ciascun polo posto sulla circonferenza esterna. Il plasma non è più fortemente confinato nella regione del bersaglio ma raggiunge anche il substrato. Si ha così un alto bombardamento ionico verso il substrato senza che sia necessario applicargli un bias negativo. La densità di corrente ionica in questa configurazione è direttamente proporzionale alla densità di corrente ionica j verso il bersaglio ed è approssimativamente un ordine di grandezza maggiore rispetto a quella dei magnetron in configurazione bilanciata. Anche il tasso di deposizione è direttamente proporzionale alla densità di corrente j verso il bersaglio.

4.3 Deposizione di film di nitruro di alluminio

La deposizione di film di nitruro di alluminio, AlN , avviene principalmente mediante la tecnica di sputtering o di magnetron sputtering. Il bersaglio è costituito da alluminio, Al , mentre il gas presente nella camera di trattamento è una miscela di argon, Ar , e azoto, N_2 . In questo modo gli atomi di alluminio, dopo essere stati spruzzati dal bersaglio, reagiscono con le molecole di azoto e formano quindi una molecola di nitruro di alluminio secondo la reazione di nitrizzazione diretta:



Si parla in questo caso di sputtering di tipo reattivo.

Come si vedrà nel capitolo 5, nei raccoglitori di energia cinetica da vibrazioni basati su convertitori piezoelettrici in configurazione a trave a sbalzo si ha che la direzione lungo la quale viene applicata l'azione di sforzo meccanico (asse x /direzione 1) è perpendicolare alla direzione in cui vengono posti gli elettrodi e in cui si ottiene la tensione in uscita (asse y /direzione 3). Perciò è importante avere un buon coefficiente piezoelettrico d_{31} , che viene ottenuto se l'orientazione cristallografica del nitruro di alluminio è lungo l'asse c /direzione $[001]$, cioè la direzione perpendicolare alla superficie del substrato su cui sta crescendo il film. Per questo motivo di solito si cerca di avere un substrato costituito da materiale il cui orientamento cristallografico possa favorire la nucleazione dei cristalli di nitruro di alluminio lungo l'asse c /direzione $[001]$. Sotto questo aspetto i più usati dei materiali che costituiscono il substrato sono il silicio, Si , (100) [2,3,4,6,8,9,12,13,17,18] o, in maniera meno frequente, il platino, Pt , (111) [4,7,11,12,13,17].

4.4 Parametri che influenzano la deposizione di film di nitruro di alluminio

Come descritto nella sezione 3.3, le proprietà cristalline del nitruro di alluminio che influiscono fortemente sul valore del coefficiente piezoelettrico d_{31} , sono fortemente dipendenti dalle condizioni di deposizione e dalla natura del substrato [8]. Si ha che la crescita dei cristalli di nitruro di alluminio lungo l'asse c /direzione $[001]$ risulta essere la condizione energeticamente più favorevole e quella a cui i cristalli crescono se hanno sufficiente energia (per superare la barriera energetica di reazione) e sufficiente tempo di diffusione, entrambi rappresentati dalla mobilità degli adatom (atomi superficiali) [2,5]. Perciò le variazioni dei parametri di seguito studiate sono equivalenti a parità di energia consegnata [13].

4.4.1 Bombardamento ionico

Il bombardamento ionico si riferisce al bombardamento del substrato da parte degli ioni di carica positiva che si sono formati nel plasma, i quali, oltre ad impattare sulla superficie del bersaglio, vanno ad impattare anche sulla superficie del substrato. In particolare, il bombardamento ionico è evidente nella configurazione magnetron sputtering sbilanciata di tipo 2. All'aumentare del bombardamento ionico del substrato si ha un sempre maggior trasferimento di energia agli adatom posti sulla superficie del film di nitruro di alluminio, i quali aumentano di conseguenza la propria mobilità e possono quindi spostarsi verso la loro configurazione energetica più favorevole, coincidente con un'orientazione cristallografica lungo l'asse c /direzione $[001]$ [8,17]. Il bombardamento ionico è legato alla pressione p di sputtering alla distanza tra bersaglio e substrato, alla potenza della scarica e alla tensione di bias applicata al substrato.

4.4.2 Variazione della pressione di sputtering

La pressione di sputtering gioca un ruolo fondamentale nel processo di deposizione di un film di nitruro di alluminio [4,12]. In generale, la diminuzione della pressione p nella camera di deposizione favorisce la crescita del film di nitruro di alluminio con una buona orientazione cristallografica lungo l'asse c /direzione $[001]$ [2,5,13]. Questo grazie a tre motivi principali:

- 1) il cammino libero medio λ di una particella, cioè la distanza che essa percorre senza scontrarsi con altre particelle del gas, è inversamente proporzionale alla pressione p del gas presente nella camera di deposizione, perciò al diminuire di quest'ultima aumenta il tasso di deposizione di molecole energetiche di nitruro di alluminio sulla superficie del substrato [3,6,7]. Il libero cammino medio λ di una particella è infatti definito come:

$$\lambda = \frac{k_B T}{\sqrt{2} \pi \sigma^2 p} \quad (4.50)$$

dove:

- k_B è la costante di Boltzmann ($k_B = 1.381 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$);
- T è la temperatura assoluta (in K) del gas;
- σ è il diametro di collisione (definito come la somma dei raggi delle particelle in collisione).

Valori tipici del libero cammino medio λ per un atomo di alluminio spruzzato, ad una pressione di 0.27 Pa , sono compresi tra 98 e 138 nm [19].

- 2) il bombardamento ionico delle specie del plasma aumenta al diminuire della pressione p del gas presente nella camera di deposizione;
- 3) se la pressione p del gas presente nella camera di trattamento è troppo alta, c'è un'alta concentrazione di argon, che può dar luogo ad effetti di resputtering (spruzzamento di atomi o molecole del film che si vuole invece creare), e di azoto, che può venire inglobato all'interno del film di nitruro di alluminio che si sta formando sulla superficie del substrato [20]. Inoltre, se è presente ossigeno, O_2 , nella camera di deposizione (a causa di una non completa operazione in cui si porta sottovuoto la camera per cercare di evitare, durante il successivo processo di sputtering, la presenza di altri gas all'interno della camera di deposizione al di fuori di quelli necessari durante il trattamento) questo può venire inglobato dal film di nitruro di alluminio che si sta formando, se la pressione p è troppo alta [8,18,20,21].

Il valore di pressione p usato nelle applicazioni di sputtering è dell'ordine di 10^{-1} Pa .

Bisogna comunque tenere presente che non si può abbassare arbitrariamente la pressione p ma c'è un minimo dettato anche in questo caso da due motivi principali:

- 1) se la pressione p del gas presente nella camera di deposizione è troppo bassa, per generare la scarica nel gas servono valori molto alti di tensione, superiori ai kV e difficili da implementare a livello pratico (si vedano le curve di Paschen);
- 2) se la pressione p del gas presente nella camera di deposizione è troppo bassa, si ha un problema a livello stechiometrico in quanto gli atomi di alluminio che vengono spruzzati dal bersaglio, trovandosi in un'atmosfera a bassa pressione, non trovano nel loro percorso verso il substrato nessun molecola di azoto (o molto poche) con cui reagire per formare il nitruro di alluminio [20].

L'effetto ottenuto riducendo la pressione p di sputtering può essere in generale ottenuto in maniera equivalente aumentando la potenza di sputtering o accorciando la distanza tra bersaglio e substrato [7].

4.4.3 Distanza tra bersaglio e substrato

Considerando l'influenza che ha la pressione p sul libero cammino medio λ , descritto dall'espressione (4.50), e di conseguenza sul processo di deposizione del film di nitruro di alluminio, si ha che anche una diminuzione della distanza tra bersaglio e substrato favorisce tale processo e una crescita del film di nitruro di alluminio con un'orientazione cristallografica lungo l'asse c /direzione $[001]$ [2,6,7,12]. Tuttavia, se la distanza tra bersaglio e substrato diventa troppo ravvicinata si ha che il tasso di deposizione del film di nitruro di alluminio cresce a tal punto da far diminuire il tempo di diffusione degli atomi, i quali non possono perciò cristallizzare lungo l'asse c /direzione $[001]$, che rappresenta la loro condizione energetica più favorevole [2].

Risulta evidente che fintantoché la distanza tra bersaglio e substrato è inferiore rispetto al libero cammino medio λ delle particelle che si devono depositare sul substrato, tale distanza non è influente sulla deposizione del film di nitruro di alluminio, così come la pressione p o la temperatura (esse influisce sul libero cammino medio λ come si può vedere dall'espressione (4.50)).

L'effetto ottenuto accorciando la distanza tra bersaglio e substrato può essere in generale ottenuto in maniera equivalente riducendo la pressione p di sputtering o aumentando la potenza di sputtering [7].

4.4.4 Concentrazione di azoto nella camera di deposizione

Per la deposizione di un film sottile di nitruro di alluminio, AlN , è necessario avere nella camera di deposizione un'atmosfera mista di argon, Ar , e azoto, N_2 . In generale, all'aumentare del rapporto tra la concentrazione di azoto e la concentrazione di argon si ha che il film di nitruro di alluminio migliora l'orientazione cristallografica lungo l'asse c /direzione $[001]$ [2,3,5,6,12,13]. Tuttavia ciò è vero fino ad un massimo di percentuale di azoto di circa l'80% [7]. Se infatti si rimane sotto tale valore, tutti gli atomi di alluminio provenienti dal bersaglio reagiscono con l'azoto presente nell'atmosfera prima di raggiungere il substrato e perciò il film di nitruro di alluminio cresce con una buona orientazione cristallografica lungo l'asse c /direzione $[001]$. Se invece la percentuale di azoto nell'atmosfera è superiore a tale valore si ha che il tasso di deposizione dell'azoto sul bersaglio supera il tasso di erosione del bersaglio durante lo sputtering: si ha in questo modo il cosiddetto avvelenamento del bersaglio [8].

4.4.5 Spessore del film depositato

Un aumento dello spessore del film di nitruro di alluminio che si sta formando sulla superficie del substrato può portare ad una riduzione delle impurità all'interno del film e quindi ad una migliore risposta piezoelettrica [8]. Tuttavia se lo spessore aumenta di molto aumentano anche gli sforzi di tensione all'interno di esso e perciò anche i difetti all'interno del film di nitruro di alluminio con conseguente calo delle proprietà piezoelettriche del film [11].

4.4.6 Potenza di scarica

All'aumentare della potenza di scarica del gas all'interno della camera di deposizione il film di nitruro di alluminio si forma con una maggiore qualità cristallina e quindi presenta buoni coefficienti piezoelettrici. Questo perché l'energia trasferita agli adatomi sulla superficie del film che si sta formando aumenta aumentando la loro mobilità e quindi la loro possibilità di raggiungere la configurazione energeticamente più favorevole, cioè quella con orientazione lungo l'asse c /direzione $[001]$ [3,4,5,6,8,12,13]. Tuttavia ciò è vero solo se la potenza di scarica è entro certi limiti. Se invece la potenza di scarica aumenta troppo, il tasso di deposizione del film di nitruro di alluminio sul substrato aumenta vertiginosamente diminuendo il tempo di diffusione degli adatomi che non possono perciò cristallizzare lungo l'asse c /direzione $[001]$. L'effetto ottenuto aumentando la potenza di sputtering può essere in generale ottenuto in maniera equivalente riducendo la pressione p di sputtering o accorciando la distanza tra bersaglio e substrato [7].

4.4.7 Temperatura del substrato

Solitamente non viene riscaldato il substrato direttamente, questo può essere scaldato indirettamente dal plasma presente in camera di trattamento fino alla temperatura di circa 493 K [5,8,9]. Tuttavia un aumento di temperatura del substrato può avere un effetto benefico sull'orientazione lungo l'asse c /direzione $[001]$ del film di nitruro di alluminio che si sta formando in quanto migliora la diffusione degli adatomi che vanno a formare il film [3,4,12], a patto però che non venga superata la temperatura di circa 673 K oltre la quale la mobilità degli adatomi cresce a tal punto da far sì che ci siano meno punti di nucleazione (punti sul substrato dove si inizia a formare il film di nitruro di alluminio) e di conseguenza il film cresce con una granulometria (dimensione dei granelli) non uniforme [2,7]. L'effetto della temperatura del substrato è ininfluente se il film di nitruro di alluminio cresce già con una buona qualità cristallina grazie agli altri parametri di influenza della deposizione [17].

4.4.8 Tensione di bias applicata al substrato

In generale, se si applica al substrato una piccola tensione di bias negativa, inferiore ai 25 V , si può favorire il bombardamento ionico (di ioni positivi) e perciò il film di nitruro di alluminio si forma con una maggiore qualità cristallina e quindi presenta un buon coefficiente piezoelettrico d_{31} (l'effetto è analogo a quello di una diminuzione di pressione p o a un aumento della concentrazione di azoto) [4,9,12,13]. Tuttavia non si devono superare i 25 V altrimenti si hanno processi di resputtering (spruzzamento di atomi o molecole del film che si vuole invece creare) [2]. L'effetto della tensione di bias applicata al substrato è ininfluente se il film di nitruro di alluminio cresce già con una buona qualità cristallina grazie agli altri parametri di influenza della deposizione [17].

4.4.9 Rugosità della superficie del substrato

Se la rugosità della superficie del substrato è elevata, da una parte il film di nitruro di alluminio che si crea aderisce meglio al substrato, dall'altra il film è meno orientato lungo l'asse c /direzione $[001]$ a causa degli sforzi interni che si instaurano durante la sua formazione [11].

Capitolo 5

Modello elettromeccanico

5.1 Introduzione

In questo capitolo viene descritto un modello di raccoglitore di energia piezoelettrico a cantilever [22], cioè un modello a trave a sbalzo in cui si assume valido il modello della trave di Euler-Bernoulli (vale a dire in cui varia il raggio di curvatura con il procedere lungo l'asse della trave). La trave è costituita da un materiale composito in cui è presente uno strato di materiale piezoelettrico depositato su di un substrato di tipo metallico. Tale sistema viene solitamente eccitato in maniera armonica alla sua frequenza naturale in modo da ottenere in uscita la massima potenza possibile.

Il raccoglitore viene eccitato dal movimento della sua base e tale movimento è rappresentato da una traslazione in direzione trasversale (lungo l'asse y /direzione 3) e da una piccola rotazione. A causa di questo movimento si ha che la parte superiore e la parte inferiore dello strato piezoelettrico vengono alternativamente compresse o distese lungo l'asse x /direzione 1, mentre la tensione viene ottenuta dagli elettrodi posti sopra e sotto lo strato piezoelettrico e quindi si ha in direzione perpendicolare a quest'ultimo, ovvero lungo l'asse y /direzione 3. Si parla perciò di modo 31 ed in questo caso si utilizzano solo i termini d_{31} ed s_{11} descritti precedentemente nelle espressioni (2.11) (matrice della costante piezoelettrica) e (2.26) (matrice cedevolezza).

Il circuito elettrico consiste in un carico resistivo R_l connesso agli elettrodi (uno si trova sulla parte superiore dello strato di materiale piezoelettrico, mentre l'altro si trova sulla sua parte inferiore). Perciò assieme alla capacità interna C_p del materiale piezoelettrico bisogna considerare una resistenza ad essa in parallelo e quindi il circuito elettrico risultante è un circuito elettrico RC del primo ordine.

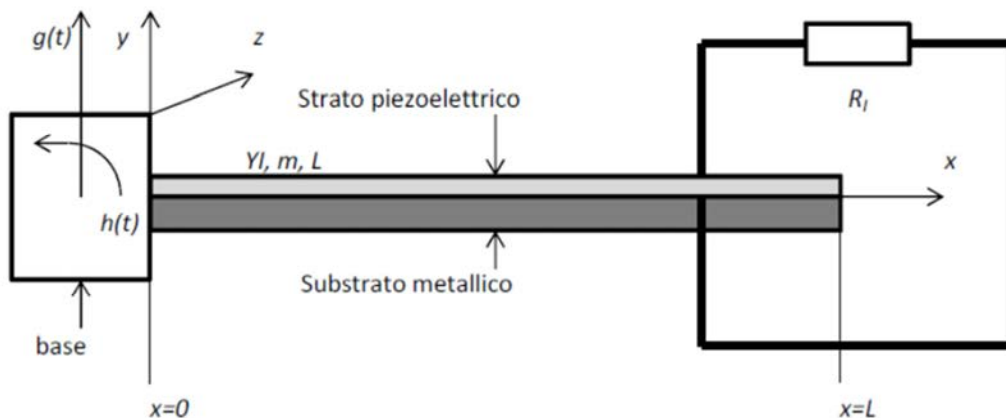


Fig. 5.1 – Raccoglitore di energia piezoelettrico unimorfo (in cui è presente un solo strato di materiale piezoelettrico), configurazione a cantilever. Vista laterale. Un carico rappresentato dalla resistenza R_l è stato inserito tra la superficie superiore e la superficie inferiore dello strato di materiale piezoelettrico.

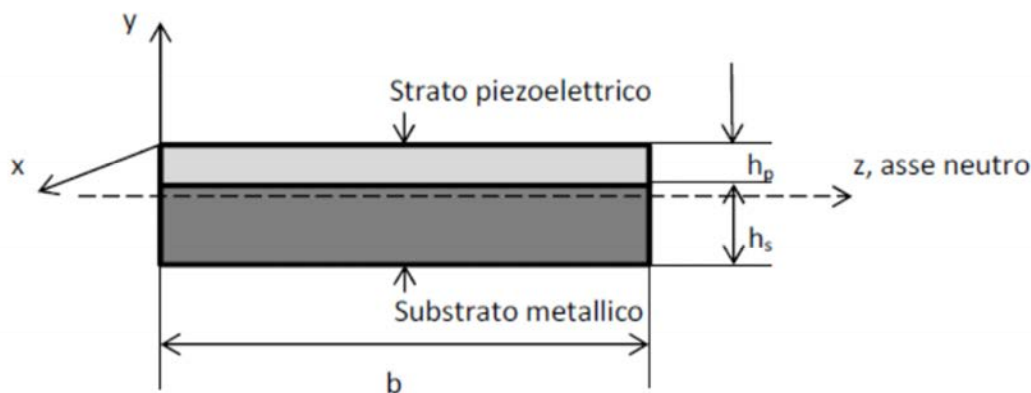


Fig. 5.2 – Raccoglitore di energia piezoelettrico unimorfo (in cui è presente un solo strato di materiale piezoelettrico), configurazione a cantilever. Sezione. L’asse z rappresenta l’asse neutro della sezione composita (cioè l’asse della sezione omogenea equivalente).

Questa trattazione non considera una massa di prova posta all’estremità della trave (cioè in posizione $x=L$).

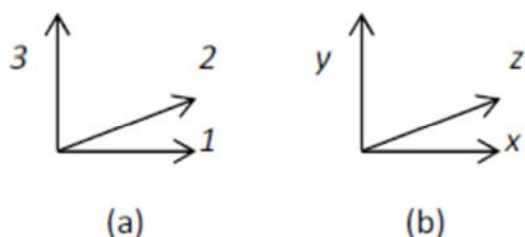


Fig. 5.3 – Diversa nomenclatura dello stesso sistema di riferimento utilizzato per la descrizione delle grandezze in questo capitolo.

5.2 Derivazione del modello elettromeccanico

Si considera un raccoglitore di energia unimorfo (cioè in cui è presente un solo strato di materiale piezoelettrico, Fig. 5.1), costituito da una trave che soddisfa il principio di Euler-Bernoulli (vale adire in cui varia il raggio di curvatura con il procedere lungo l’asse della trave), uniforme e di materiale composito, costituita da uno strato di materiale piezoelettrico perfettamente legato al substrato metallico di sostegno. Il raccoglitore è connesso al circuito elettrico mediante due elettrodi, uno sulla superficie superiore dello strato di materiale piezoelettrico e uno sulla sua superficie inferiore, i quali vengono assunti come perfettamente conduttivi e coprenti le intere superfici, in questo modo il campo elettrico generato è uniforme su tutta la lunghezza della trave. In generale la resistenza di dispersione dello strato di materiale piezoelettrico è molto più grande di quella di carico R_l e perciò, visto che si trovano in parallelo, essa può essere trascurata.

Il movimento trasversale assoluto $w(x,t)$ della trave in ogni punto x lungo il suo asse e ad ogni istante temporale t può essere espresso come [23]:

$$w(x,t) = w_b(x,t) + w_{rel}(x,t) \quad (5.1)$$

dove:

- $w_b(x,t)$ è la traslazione della base lungo l'asse y /direzione 3;
- $w_{rel}(x,t)$ è la traslazione relativa, lungo l'asse y /direzione 3, della trave rispetto alla base.

Considerando che la trave si muove solo di moto di traslazione lungo l'asse y /direzione 3, denominato $g(t)$, e di moto di piccole rotazioni della base, denominato $h(t)$, il moto della base $w_b(x,t)$ può essere espresso nel seguente modo:

$$w_b(x,t) = g(t) + xh(t) \quad (5.2)$$

e nell'ipotesi di modello di trave incastrata si ha $h(t)=0$.

L'equazione che governa il moto viene espressa dalla seguente relazione, la quale esprime la velocità di deformazione della trave [22]:

$$\frac{\partial^2 M(x,t)}{\partial x^2} + c_s I \frac{\partial^5 w_{rel}(x,t)}{\partial x^4 \partial t} + c_a \frac{\partial w_{rel}(x,t)}{\partial t} + m \frac{\partial^2 w_{rel}(x,t)}{\partial t^2} = -m \frac{\partial^2 w_b(x,t)}{\partial t^2} - c_a \frac{\partial w_b(x,t)}{\partial t} \quad (5.3)$$

dove :

- $M(x,t)$ è il momento flettente interno della trave;
- $c_s I$ è la componente equivalente di smorzamento della sezione trasversale composita della trave dovuto alla viscoelasticità interna (c_s è il coefficiente equivalente della componente di smorzamento dovuta alla deformazione della trave, mentre I è il momento d'inerzia equivalente dell'area della sezione trasversale composita della trave);
- c_a è il coefficiente di attrito viscoso dovuto al mezzo in cui si trova la trave, cioè aria;
- m è la massa della trave per unità di lunghezza.

Il momento flettente interno $M(x,t)$ può essere ottenuto integrando il momento della distribuzione dello sforzo su una sezione trasversale della trave. Poiché si ha una trave costituita da un materiale composito, le grandezze delle relazioni inerenti alla parte di materiale non piezoelettrico (substrato) si indicano con un apice s , mentre le grandezze delle relazioni inerenti alla parte di materiale piezoelettrico si indicano con un apice p .

Per quanto riguarda il substrato, considerando le equazioni (2.26), (2.28) e (2.31), si ha:

$$T_1^s = Y_s S_1^s \quad (5.4)$$

dove Y indica il modulo di Young ed è pari al reciproco della cedevolezza:

$$Y = \frac{1}{s} \quad (5.5)$$

Per quanto riguarda il materiale piezoelettrico, considerando l'equazione (2.55), si ha:

$$T_1^p = Y_p (S_1^p - d_{31} E_3) \quad (5.6)$$

Dalla teoria di scienza delle costruzioni si può esprimere il momento flettente interno nel seguente modo:

$$M(x, t) = - \int_{h_a}^{h_b} T_1^s b y dy - \int_{h_b}^{h_c} T_1^p b y dy \quad (5.7)$$

dove:

- b è l'ampiezza della trave;
- h_a è la posizione del fondo del substrato rispetto all'asse neutro della sezione composita;
- h_b è la posizione del fondo dello strato di materiale piezoelettrico (perciò è anche la posizione della parte superiore del substrato, si veda la Fig. 5.1) rispetto all'asse neutro della sezione composita;
- h_c è la posizione della parte superiore dello strato di materiale piezoelettrico rispetto all'asse neutro della sezione composita.

Poiché è valida la seguente relazione tra il valore dello sforzo $S(x, h, t)$ (h è un generico spessore) e traslazione relativa $w_{rel}(x, t)$, lungo l'asse y /direzione 3, della trave rispetto alla base:

$$S(x, h, t) = -h \frac{\partial^2 w_{rel}(x, t)}{\partial x^2} \quad (5.8)$$

e considerando che il campo elettrico può essere espresso come il negativo del rapporto tra la tensione $v(t)$ presente ai capi dello strato di materiale piezoelettrico e lo spessore h_p di tale materiale:

$$E_3(x, t) = - \frac{v(t)}{h_p} \quad (5.9)$$

inserendo l'espressione (5.6) all'interno dell'espressione (5.7), il momento flettente interno $M(x, t)$ è pari a:

$$M(x, t) = \int_{h_a}^{h_b} Y_s b \frac{\partial^2 w_{rel}(x, t)}{\partial x^2} y^2 dy + \int_{h_b}^{h_c} Y_p b \frac{\partial^2 w_{rel}(x, t)}{\partial x^2} y^2 dy - \int_{h_b}^{h_c} v(t) Y_p b \frac{d_{31}}{h_p} y dy \quad (5.10)$$

Mediante alcuni passaggi qui sotto riportati si può riscrivere l'ultima espressione rappresentata:

$$M(x, t) = Y_s b \frac{\partial^2 w_{rel}(x, t)}{\partial x^2} \frac{y^3}{3} \Big|_{h_a}^{h_b} + Y_p b \frac{\partial^2 w_{rel}(x, t)}{\partial x^2} \frac{y^3}{3} \Big|_{h_b}^{h_c} - v(t) Y_p b \frac{d_{31}}{h_p} \frac{y^2}{2} \Big|_{h_b}^{h_c} \quad (5.11)$$

$$M(x, t) = Y_s b \frac{\partial^2 w_{rel}(x, t)}{\partial x^2} \frac{(h_b^3 - h_a^3)}{3} + Y_p b \frac{\partial^2 w_{rel}(x, t)}{\partial x^2} \frac{(h_c^3 - h_b^3)}{3} - v(t) Y_p b \frac{d_{31}}{h_p} \frac{(h_c^2 - h_b^2)}{2} \quad (5.12)$$

$$M(x, t) = b \left[Y_s \frac{(h_b^3 - h_a^3)}{3} + Y_p \frac{(h_c^3 - h_b^3)}{3} \right] \frac{\partial^2 w_{rel}(x, t)}{\partial x^2} - v(t) Y_p b \frac{d_{31}}{h_p} \frac{(h_c^2 - h_b^2)}{2} \quad (5.13)$$

Quest'ultima espressione può essere ridotta alla seguente forma:

$$M(x, t) = YI \frac{\partial^2 w_{rel}(x, t)}{\partial x^2} + \vartheta v(t) \quad (5.14)$$

dove:

$$YI = b \left[\frac{Y_s(h_b^3 - h_a^3) + Y_p(h_c^3 - h_b^3)}{3} \right] \quad (5.15)$$

rappresenta la rigidità torsionale della sezione trasversale composita, mentre:

$$\vartheta = -\frac{Y_p d_{13} b}{2h_p} (h_c^2 - h_b^2) \quad (5.16)$$

rappresenta il termine di accoppiamento elettromeccanico.

Se lo strato di materiale piezoelettrico e/o gli elettrodi non coprono l'intera lunghezza L della trave ma una regione $x_1 \leq x \leq x_2$, allora il secondo termine dell'equazione (5.14) dovrebbe essere moltiplicato per il termine $H(x-x_1) - H(x-x_2)$, dove $H(x)$ è la funzione di Heaviside, la funzione a gradino unitaria, definita come pari a 0 per $x < 0$ e uguale a 1 per $x \geq 0$. Si nota che nelle applicazioni di energy harvesting da vibrazioni risulta necessario l'utilizzo di coppie di elettrodi segmentati in modo da evitare la cancellazione di carica che si avrebbe se si utilizzassero elettrodi continui (si veda la sezione 5.8). In ogni caso in questo capitolo si studia il modello in cui gli elettrodi coprono l'intera superficie della trave, perciò l'equazione (5.14) si può riscrivere nella seguente forma:

$$M(x, t) = YI \frac{\partial^2 w_{rel}(x, t)}{\partial x^2} + \vartheta v(t) [H(x) - H(x - L)] \quad (5.17)$$

Utilizzando quindi l'equazione (5.17) all'interno dell'equazione (5.3) si ottiene la seguente espressione:

$$YI \frac{\partial^4 w_{rel}(x, t)}{\partial x^4} + c_s I \frac{\partial^5 w_{rel}(x, t)}{\partial x^4 \partial t} + c_a \frac{\partial w_{rel}(x, t)}{\partial t} + m \frac{\partial^2 w_{rel}(x, t)}{\partial t^2} + \vartheta v(t) \times \left[\frac{d\delta(x)}{dx} - \frac{d\delta(x-L)}{dx} \right] = -m \frac{\partial^2 w_b(x, t)}{\partial t^2} - c_a \frac{\partial w_b(x, t)}{\partial t} \quad (5.18)$$

dove $\delta(x)$ è la funzione delta di Dirac che soddisfa la seguente condizione:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{d^{(n)}\delta(x-x_0)}{dx^{(n)}} f(x) dx = (-1)^n \frac{df^{(n)}(x_0)}{dx^{(n)}} \quad (5.19)$$

Per il moto vibratorio relativo, lungo l'asse y /direzione 3, dell'asse rispetto alla base valgono le seguenti condizioni al contorno [23]:

$$w_{rel}(0, t) = 0 \quad (5.20)$$

$$\left. \frac{\partial w_{rel}(x, t)}{\partial x} \right|_{x=0} = 0 \quad (5.21)$$

$$\left[YI \frac{\partial^2 w_{rel}(x, t)}{\partial x^2} + c_s I \frac{\partial^3 w_{rel}(x, t)}{\partial x^2 \partial t} \right]_{x=L} = 0 \quad (5.22)$$

$$\left[YI \frac{\partial^3 w_{rel}(x, t)}{\partial x^3} + c_s I \frac{\partial^4 w_{rel}(x, t)}{\partial x^3 \partial t} \right]_{x=L} \quad (5.23)$$

L'equazione (5.18) rappresenta l'equazione meccanica del moto vibratorio della trave con accoppiamento elettrico. Per ottenere l'equazione del circuito elettrico con accoppiamento meccanico, si deve considerare la seconda equazione dell'espressione (2.38), equazione costitutiva dei materiali piezoelettrici che definisce il valore dello spostamento elettrico D in funzione del valore dello sforzo meccanico T e del valore del campo elettrico E , qui sotto riportata utilizzando solo i termini d_{31} ed s_{11} descritti precedentemente nelle espressioni (2.11) (matrice della costante piezoelettrica) e (2.26) (matrice cedevolezza) [22]:

$$D_3 = d_{31}T_1 + \varepsilon_{33}^T E_3 \quad (5.24)$$

Considerando le espressioni (5.4), (5.9) e la seconda equazione dell'espressione (2.55), l'equazione (5.24) può essere riscritta nel seguente modo:

$$D_3(x, t) = d_{31}Y_p S_1(x, t) - \varepsilon_{33}^S \frac{v(t)}{h_p} \quad (5.25)$$

dove:

$$\varepsilon_{33}^S = \varepsilon_{33}^T - \frac{d_{31}^2}{s_{11}^E} \quad (5.26)$$

Dal momento che l'equazione (5.8) si può scrivere in questo caso nel seguente modo:

$$S_1(x, t) = -h_{pc} \frac{\partial^2 w_{rel}(x, t)}{\partial x^2} \quad (5.27)$$

l'espressione (5.25) diventa:

$$D_3(x, t) = -d_{31}Y_p h_{pc} \frac{\partial^2 w_{rel}(x, t)}{\partial x^2} - \varepsilon_{33}^S \frac{v(t)}{h_p} \quad (5.35)$$

dove h_{pc} è la distanza tra il centro del materiale piezoelettrico e l'asse neutro della sezione trasversale composita.

Per ricavare la posizione dell'asse neutro (asse z nella Fig. 5.2) in una sezione trasversale composita bisogna trasformare tale sezione composita in una sezione omogenea rappresentata da un singolo valore del modulo di Young. Si definisce perciò il rapporto tra i due moduli di Young del substrato metallico Y_s e del materiale piezoelettrico Y_p :

$$n = \frac{Y_s}{Y_p} \quad (5.28)$$

Nella sezione trasversale risultante l'ampiezza del substrato metallico viene aumentata se $Y_s > Y_p$, questo è il caso generale e quello che verrà trattato in questa dimostrazione, diminuita se $Y_s < Y_p$. Considerando la Fig. 5.2 e il caso in cui $Y_s > Y_p$, si ha che la distanza h_{pa} tra la parte superiore del materiale piezoelettrico e l'asse neutro è pari a:

$$h_{pa} = \frac{h_p^2 + 2nh_ph_s + nh_s^2}{2(h_p + nh_s)} \quad (5.29)$$

dove h_s è lo spessore del substrato metallico.

La distanza h_{sa} tra il fondo del substrato metallico e l'asse neutro è pari a:

$$h_{sa} = \frac{h_p^2 + 2h_ph_s + nh_s^2}{2(h_p + nh_s)} \quad (5.30)$$

mentre la distanza h_{pc} tra il centro dello strato di materiale piezoelettrico e l'asse neutro è pari a:

$$h_{pc} = \frac{nh_s(h_p + h_s)}{2(h_p + nh_s)} \quad (5.31)$$

Si noti che i parametri geometrici usati precedentemente (h_a , h_b e h_c) descrivono posizioni rispetto all'asse neutro piuttosto che distanze. Per questo motivo possono essere espresse come:

$$h_a = -h_{sa} \quad (5.32)$$

$$h_b = h_{pa} - h_p \quad (5.33)$$

$$h_c = h_{pa} \quad (5.34)$$

La carica elettrica $q(t)$ sviluppata nel materiale piezoelettrico e raccolta mediante gli elettrodi, può essere calcolata integrando lo spostamento elettrico \mathbf{D} sull'intera area A ricoperta da ciascun elettrodo:

$$q(t) = \int \mathbf{D} \cdot \mathbf{n}dA = - \int_{x=0}^L \left(d_{31}Y_ph_{pc}b \frac{\partial^2 w_{rel}(x,t)}{\partial x^2} - \epsilon_{33}^S b \frac{v(t)}{h_p} \right) dx \quad (5.36)$$

dove \mathbf{n} rappresenta il versore normale uscente dalla superficie degli elettrodi.

Di conseguenza, seguendo la definizione, la corrente elettrica $i(t)$ in uscita è data dalla derivata della carica elettrica $q(t)$ nel tempo t :

$$i(t) = \frac{dq(t)}{dt} = - \int_{x=0}^L d_{31} Y_p h_{pc} b \frac{\partial^3 w_{rel}(x, t)}{\partial x^2 \partial t} dx - \frac{\varepsilon_{33}^S b L}{h_p} \frac{dv(t)}{dt} \quad (5.37)$$

Si nota che la corrente generata è funzione di due componenti: la prima è dovuta al moto vibratorio relativo $w_{rel}(x, t)$ della trave rispetto alla base, mentre la seconda è dovuta alla tensione $v(t)$ presente ai capi del materiale piezoelettrico. Quest'ultimo termine è dovuto alla capacità statica C_p dello strato di materiale piezoelettrico. Infatti, per definizione, si ha che tale capacità è pari a:

$$C_p = \frac{\varepsilon_{33}^S b L}{h_p} \quad (5.38)$$

Questo indica che all'aumentare dell'area della trave (cioè del prodotto bL) aumenta di conseguenza la capacità statica dello strato di materiale piezoelettrico C_p e quindi anche la corrente elettrica $i(t)$ generata dal materiale piezoelettrico. Aumentare la corrente elettrica $i(t)$ in uscita e di conseguenza la potenza elettrica $p(t)$ estratta dal sistema è quanto si vuole conseguire in questo studio.

Essendo il carico puramente resistivo, la tensione $v(t)$ in uscita è pari al prodotto tra la resistenza di carico R_l e la corrente $i(t)$ in uscita:

$$v(t) = R_l i(t) = -R_l \left[\int_{x=0}^L d_{31} Y_p h_{pc} b \frac{\partial^3 w_{rel}(x, t)}{\partial x^2 \partial t} dx + \frac{\varepsilon_{33}^S b L}{h_p} \frac{dv(t)}{dt} \right] \quad (5.39)$$

L'espressione (5.39) può essere riscritta, in alternativa, nel seguente modo:

$$\frac{\varepsilon_{33}^S b L}{h_p} \frac{dv(t)}{dt} + \frac{v(t)}{R_l} = - \int_{x=0}^L d_{31} Y_p h_{pc} b \frac{\partial^3 w_{rel}(x, t)}{\partial x^2 \partial t} dx \quad (5.40)$$

5.3 Eccitazione della base – caso generale

Si vuole ora trovare la soluzione delle equazioni (5.18) e (5.40), le quali rappresentano le equazioni costitutive del modello elettromeccanico del raccogliitore di energia piezoelettrico presentato.

Il movimento vibratorio relativo $w_{rel}(x, t)$, lungo l'asse y /direzione 3, della trave rispetto alla base può essere rappresentato da una serie convergente (in maniera assoluta e uniforme) di autofunzioni [24]:

$$w_{rel}(x, t) = \sum_{r=1}^{\infty} \phi_r(x) \eta_r(t) \quad (5.41)$$

dove:

- $\phi_r(x)$ è l'autofunzione normalizzata della massa;
- $\eta_r(t)$ è la coordinata modale del modo r-esimo della trave a sbalzo non vincolata.
- il pedice r sta ad indicare lo specifico modo di vibrazione; chiaramente il modo di vibrazione più importante è il modo 1, il modo fondamentale.

Per il moto vibratorio relativo $w_{rel}(x,t)$, lungo l'asse y /direzione 3, della trave rispetto alla base le condizioni al contorno descritte precedentemente ((5.20), (5.21), (5.22) e (5.23)) diventano [23]:

$$w_{rel}(0, t) = 0 \quad (5.42)$$

$$\left. \frac{\partial w_{rel}(x, t)}{\partial x} \right|_{x=0} = 0 \quad (5.43)$$

$$YI \left. \frac{\partial^2 w_{rel}(x, t)}{\partial x^2} \right|_{x=L} = 0 \quad (5.44)$$

$$YI \left. \frac{\partial^3 w_{rel}(x, t)}{\partial x^3} \right|_{x=L} = 0 \quad (5.45)$$

Poiché il sistema è smorzato in maniera proporzionale, le autofunzioni $\phi_r(x)$ sono le autofunzioni normalizzate della massa del problema di vibrazione libera non smorzata [22]:

$$\phi_r(x) = \sqrt{\frac{1}{mL}} \left[\cosh \frac{\lambda_r}{L} x - \cos \frac{\lambda_r}{L} x - \sigma_r \left(\sinh \frac{\lambda_r}{L} x - \sin \frac{\lambda_r}{L} x \right) \right] \quad (5.46)$$

dove λ_r sono i numeri adimensionali di frequenza ottenuti dalla seguente equazione caratteristica:

$$1 + \cos \lambda \cosh \lambda = 0 \quad (5.47)$$

mentre il termine σ_r è espresso come:

$$\sigma_r = \frac{\sinh \lambda_r - \sin \lambda_r}{\cosh \lambda_r + \cos \lambda_r} \quad (5.48)$$

Le autofunzioni normalizzate della massa $\phi_r(x)$ ((5.46)) soddisfano le seguenti condizioni di ortogonalità:

$$\int_{x=0}^L m \phi_s(x) \phi_r(x) dx = \delta_{rs} \quad (5.49)$$

$$\int_{x=0}^L YI \phi_s(x) \frac{d^4 \phi_r(x)}{dx^4} dx = \omega_r^2 \delta_{rs} \quad (5.50)$$

dove:

- δ_{rs} rappresenta la funzione delta di Kronecker, definita come pari a 1 per $s=r$ e uguale a 0 se $s \neq r$;
- ω_r è la frequenza naturale non smorzata del modo r-esimo:

$$\omega_r = \lambda_r^2 \sqrt{\frac{YI}{mL^4}} = \frac{\lambda_r^2}{L^2} \sqrt{\frac{Ybh^3}{12m}} = \frac{\lambda_r^2 h}{L^2} \sqrt{\frac{Ybh}{12m}} = \frac{\lambda_r^2 h}{L^2} \sqrt{\frac{YbhL}{12M}} = \frac{\lambda_r^2 h}{L^2} \sqrt{\frac{Y}{12\rho}} \quad (5.51)$$

dove:

- h indica lo spessore della trave;
- $I = \frac{1}{12}bh^3$ è il momento d'inerzia equivalente dell'area della sezione trasversale della trave;
- $M = mL$ è la massa della trave;
- $\rho = \frac{M}{bhl}$ è la densità del materiale che compone la trave.

Usando l'equazione (5.41) e le condizioni di ortogonalità ((5.49) e (5.50)) all'interno dell'equazione (5.18) si ottiene l'espressione dell'equazione differenziale della risposta modale $\eta_r(t)$ del sistema:

$$\frac{d^2\eta_r(t)}{dt^2} + 2\zeta_r\omega_r \frac{d\eta_r(t)}{dt} + \omega_r^2\eta_r(t) + \chi_r v(t) = N_r(t) \quad (5.52)$$

dove:

$$\chi_r = \vartheta \left. \frac{d\phi_r(x)}{dx} \right|_{x=0}^L \quad (5.53)$$

rappresenta il termine di accoppiamento modale. Esso contiene l'informazione inerente all'accoppiamento elettromeccanico della trave, mentre:

$$\zeta_r = \frac{c_s I \omega_r}{2YI} + \frac{c_a}{2m\omega_r} = \frac{c_s \omega_r}{2Y} + \frac{c_a}{2m\omega_r} \quad (5.54)$$

rappresenta il coefficiente di smorzamento meccanico, il quale include sia gli effetti dello smorzamento dovuto alla deformazione della trave (c_s , proporzionale alla rigidità flessionale della trave), sia gli effetti dello smorzamento viscoso dovuto all'aria (c_a , proporzionale alla massa m della trave per unità di lunghezza).

Il termine di accoppiamento modale χ_r descritto dall'equazione (5.53), inserendo in esso l'espressione (5.46), può essere riscritto nel seguente modo:

$$\chi_r = \vartheta \frac{d}{dx} \left[\sqrt{\frac{1}{mL}} \left[\cosh \frac{\lambda_r}{L} x - \cos \frac{\lambda_r}{L} x - \sigma_r \left(\sinh \frac{\lambda_r}{L} x - \sin \frac{\lambda_r}{L} x \right) \right] \right]_{x=0}^L \quad (5.55)$$

$$\chi_r = \vartheta \frac{d\phi_r(x)}{dx} \Big|_{x=L} - \vartheta \left[\sqrt{\frac{1}{mL}} \left[\sinh \frac{\lambda_r}{L} x + \sin \frac{\lambda_r}{L} x - \sigma_r \left(\cosh \frac{\lambda_r}{L} x - \cos \frac{\lambda_r}{L} x \right) \right] \right]_{x=0} \quad (5.56)$$

$$\chi_r = \vartheta \frac{d\phi_r(x)}{dx} \Big|_{x=L} - \vartheta \left[\sqrt{\frac{1}{mL}} [\sinh 0 + \sin 0 - \sigma_r (\cosh 0 - \cos 0)] \right]_{x=0} \quad (5.57)$$

Poiché il secondo termine dell'equazione è pari a 0, il termine di accoppiamento modale χ_r è pari a:

$$\chi_r = \vartheta \frac{d\phi_r(x)}{dx} \Big|_{x=L} \quad (5.58)$$

Facendo riferimento all'espressione (5.58), la derivata, rispetto alla grandezza x , dell'autofunzione normalizzata della massa $\phi_r(x)$ rappresenta l'autofunzione della pendenza di flessione.

La funzione forzante modale meccanica $N_r(t)$ si può esprimere nel seguente modo:

$$N_r(t) = N_r^m(t) + N_r^c(t) \quad (5.59)$$

dove $N_r^m(t)$ rappresenta la componente inerziale dell'eccitazione meccanica:

$$N_r^m(t) = -m \left(\gamma_r^w \frac{d^2 g(t)}{dt^2} + \gamma_r^\vartheta \frac{d^2 h(t)}{dt^2} \right) \quad (5.60)$$

mentre $N_r^c(t)$ rappresenta la componente di smorzamento dell'eccitazione meccanica:

$$N_r^c(t) = -c_a \left(\gamma_r^w \frac{dg(t)}{dt} + \gamma_r^\vartheta \frac{dh(t)}{dt} \right) \quad (5.61)$$

dove:

$$\gamma_r^w = \int_{x=0}^L \phi_r(x) dx \quad (5.62)$$

$$\gamma_r^\vartheta = \int_{x=0}^L x \phi_r(x) dx \quad (5.63)$$

Il termine (5.62), inserendo in esso l'espressione (5.46), può essere riscritto nel seguente modo:

$$\gamma_r^w = \int_{x=0}^L \sqrt{\frac{1}{mL}} \left[\cosh \frac{\lambda_r}{L} x - \cos \frac{\lambda_r}{L} x - \sigma_r \left(\sinh \frac{\lambda_r}{L} x - \sin \frac{\lambda_r}{L} x \right) \right] dx \quad (5.64)$$

$$\gamma_r^w = \sqrt{\frac{L}{m}} \frac{1}{\lambda_r} \left[\sinh \frac{\lambda_r}{L} x - \sin \frac{\lambda_r}{L} x - \sigma_r \left(\cosh \frac{\lambda_r}{L} x - \cos \frac{\lambda_r}{L} x \right) \right]_{x=0}^L \quad (5.65)$$

Inserendo l'espressione (5.48) nell'espressione (5.65) si ottiene:

$$\gamma_r^w = \sqrt{\frac{L}{m}} \frac{1}{\lambda_r} \left\{ \left[\sinh \frac{\lambda_r}{L} L - \sin \frac{\lambda_r}{L} L - \frac{\sinh \lambda_r - \sin \lambda_r}{\cosh \lambda_r + \cos \lambda_r} \left(\cosh \frac{\lambda_r}{L} L + \cos \frac{\lambda_r}{L} L \right) \right] - [\sinh 0 - \sin 0 - \sigma_r (\cosh 0 + \cos 0)] \right\} \quad (5.66)$$

Poiché il termine tra parentesi graffe è pari a $2\sigma_r$, quest'ultima espressione viene quindi semplificata nella seguente forma:

$$\gamma_r^w = \frac{2\sigma_r}{\lambda_r} \sqrt{\frac{L}{m}} \quad (5.67)$$

Se l'eccitazione dovuta allo smorzamento esterno del mezzo (che è l'aria) è trascurabile rispetto all'eccitazione dovuta all'inerzia (vale a dire $N_r^e(t) \ll N_r^m(t)$), essa può essere considerata pari a 0 ($N_r^e(t) = 0$).

Capitolo 6

Deposizione del film di nitruro di alluminio

In questo capitolo si descrivono le operazioni eseguite in laboratorio per quanto riguarda la deposizione di film di nitruro di alluminio, AlN , su substrati di alluminio e per quanto riguarda la realizzazione della configurazione a trave a sbalzo dei convertitori piezoelettrici basati su nitruro di alluminio.

6.1 Primo deposito del film di nitruro di alluminio

6.1.1 Preparazione del substrato e misure preliminari

Come prima cosa si prende come substrato, su cui si eseguirà il deposito di nitruro di alluminio, una barretta di alluminio $75 \times 12.4 \text{ mm}^2$ con un foro di 3 mm di diametro ad una distanza di 4.5 mm dall'estremità. Il suo spessore nominale è pari a 2 mm .



Fig. 6.1 – Substrato di alluminio. Lo spessore nominale è pari a 2 mm .

Si lavora quindi una delle due superfici, che risulterà essere la superficie dove si realizzerà il deposito di nitruro di alluminio, mediante carta abrasiva P500 per circa 15 minuti, P1000 per circa 15 minuti, P2000 per circa 10 minuti e P5000 per circa 10 minuti. In questo modo si assicura una certa omogeneità alla superficie.

6.1.2 Primo metodo per la misurazione dello spessore del deposito

Per avere una stima dello spessore del deposito, oltre che sul substrato di alluminio si esegue un deposito di nitruro di alluminio anche su di un vetrino di riferimento 26×76 in quanto esso presenta una superficie abbastanza omogenea e quindi adatta ad eseguire misure precise di spessore.

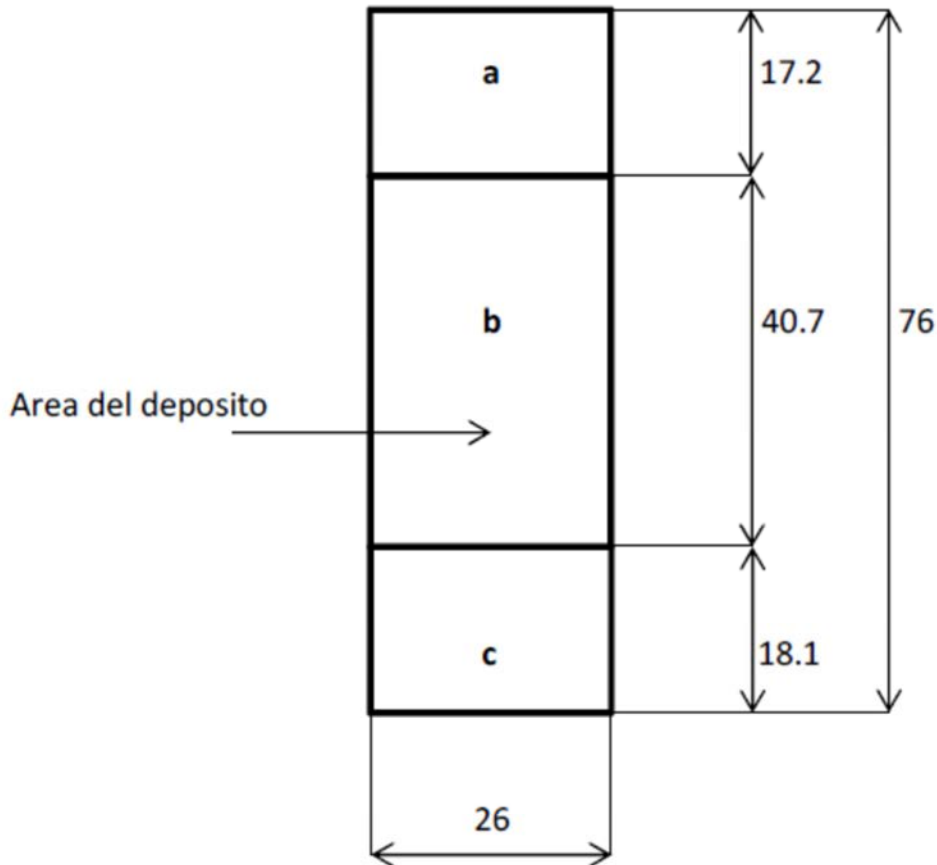


Fig. 6.2 – Schema mappatura vetrino $26 \times 76 \text{ mm}^2$ usato per le misure dello spessore del deposito. Nella figura è stata indicata l'area in cui verrà eseguito il deposito di nitrato di alluminio.

Una volta realizzato il deposito, si misurano gli spessori nell'intorno dei punti *a*, *b* e *c*: le misure in prossimità di *a* e *c* dovrebbero essere confrontabili mentre per ottenere una stima dello spessore del deposito si dovrà sottrarre il valore nell'intorno di *a* o *c* dalla misura nell'intorno di *b*.

6.1.3 Struttura di supporto al substrato

Per la realizzazione della struttura di supporto al substrato di alluminio e al vetrino che andranno in camera di deposizione, si prendono come supporti due barrette di alluminio $116 \times 30 \text{ mm}^2$ e dello spessore di 2 mm e si realizza la seguente configurazione in cui il substrato e il vetrino sono legati ai supporti mediante nastro in kapton (prima della realizzazione della struttura le barrette di alluminio vanno pulite con acetone ed alcol, mentre il vetrino viene pulito mediante il solo alcol).

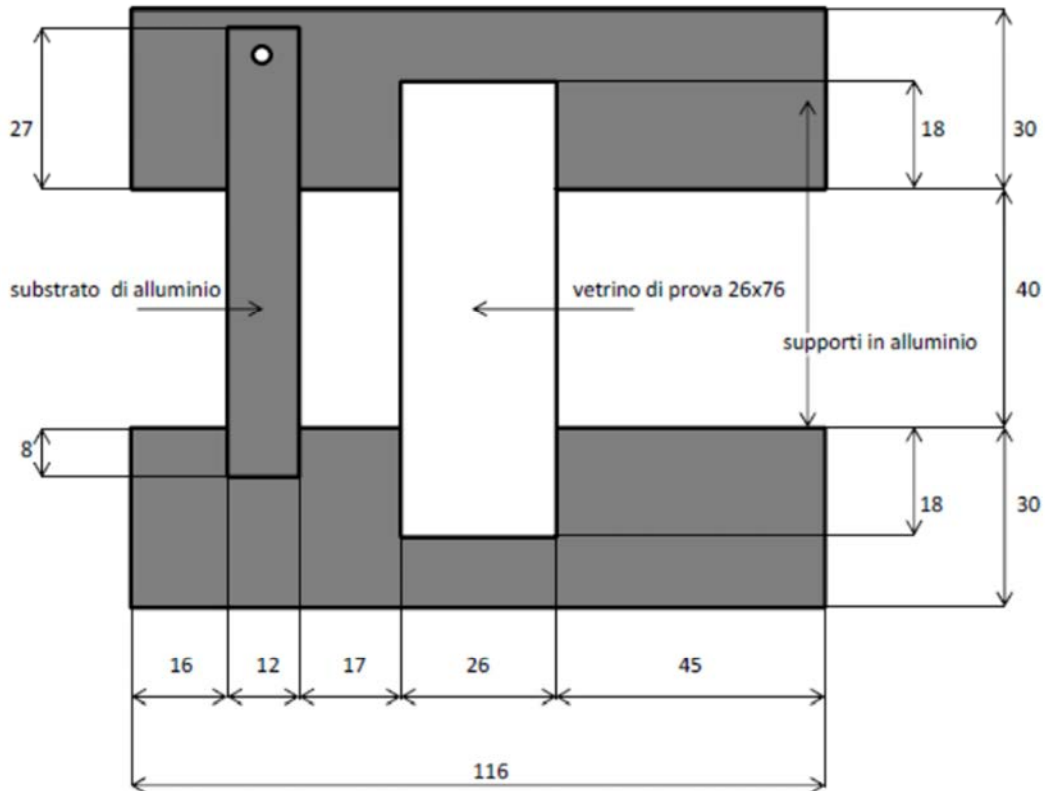


Fig. 6.3 – Substrato di alluminio su di cui avviene il deposito di nitrato di alluminio (sulla sinistra). Al centro vi è un vetrino di dimensioni 26×76 che serve per la stima dello spessore del deposito effettuato. Le barre di alluminio (dello spessore di 2 mm) sopra e sotto fungono solamente da supporto. Il deposito avviene sulla superficie inferiore della barra di alluminio e del vetrino qui rappresentati.

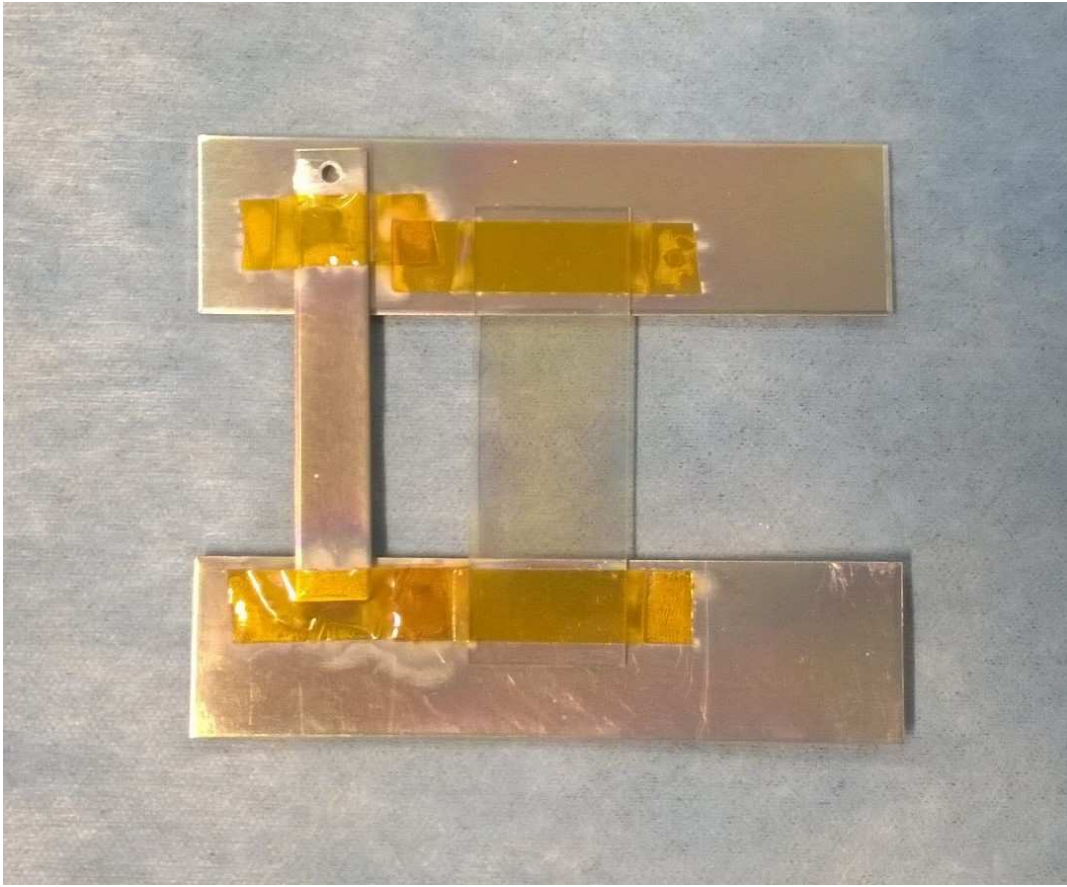


Fig. 6.4 – Substrato di alluminio su di cui avviene il deposito di nitrato di alluminio (sulla sinistra). Al centro vi è un vetrino di dimensioni 26×76 che serve per la stima dello spessore del deposito effettuato. Le barre di alluminio sopra e sotto fungono solamente da supporto. Il deposito avviene sulla superficie inferiore della barra di alluminio e del vetrino visibili nella foto. Substrato e vetrino sono legati ai supporti mediante nastro in kapton.

6.1.4 Magnetron sputtering per il primo deposito di nitruro di alluminio

Si inserisce quindi la configurazione di Fig. 6.4 all'interno della camera di deposizione.

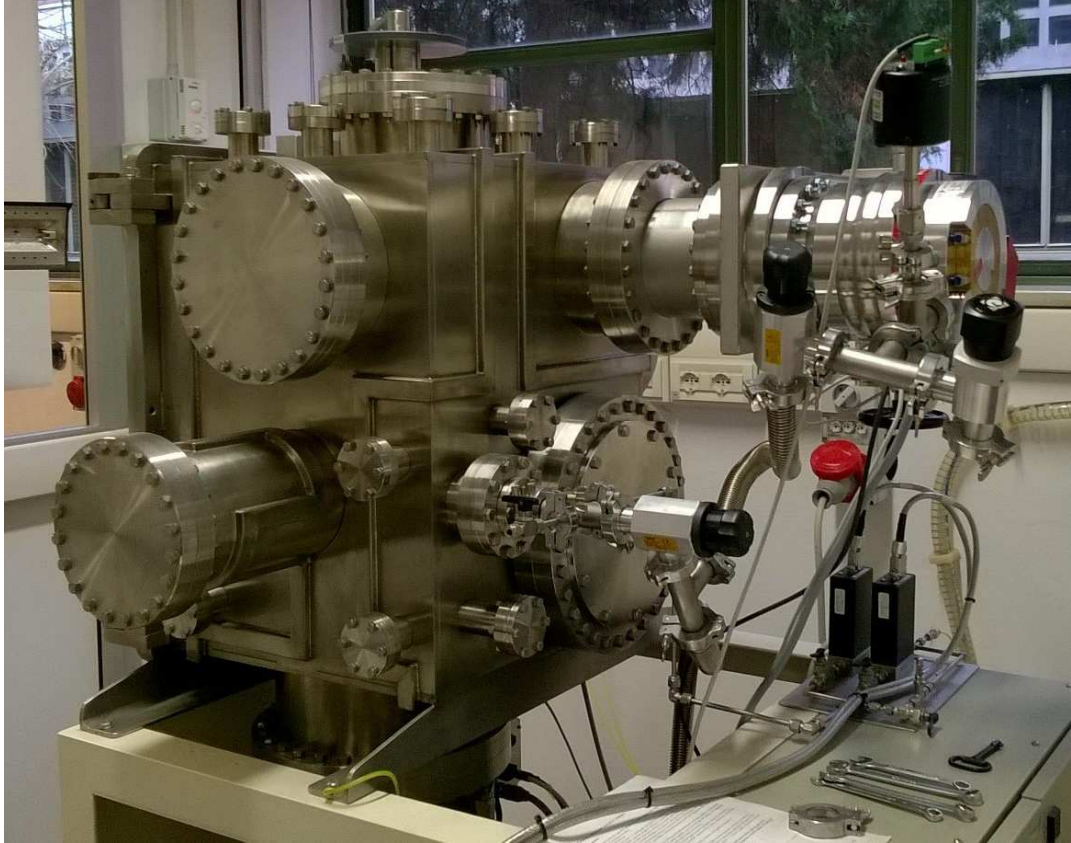


Fig. 6.5 – Sistema magnetron sputtering utilizzato per la deposizione di film sottili.

Prima del trattamento si porta la camera di deposizione alla pressione base di $2.96 \cdot 10^{-5} Pa$ per evitare che l'atmosfera presenti altri gas (e quindi delle impurità) oltre all'argon, Ar e all'azoto, N_2 .

Il bersaglio è costituito da alluminio con grado di purezza 99.99%.

A questo punto si esegue l'operazione di presputtering per pulire la superficie del bersaglio. Si usa un magnetron sputtering DC pulsato a $50 kHz$ con tempo di pausa di $2 \mu s$ per ogni periodo della pulsazione. L'atmosfera in camera è costituita totalmente da argon alla pressione di $0.48 Pa$ e con un flusso pari a $25 sccm$ (centimetri cubi standard al minuto). La potenza di scarica in camera è pari a $100 W$ mentre la durata del processo è pari a 10 minuti.

Parametri di presputtering:

- tipo di magnetron sputtering: DC pulsato con tempo di pausa $2 \mu s$ per ogni periodo della pulsazione;
- atmosfera: argon: 100%;
 azoto: 0%
- pressione in camera: 0.48 Pa;
- flusso gas in camera: 25 sccm (centimetri cubi standard al minuto);
- potenza di scarica: 100 W;
- durata: 10 min.

Per quanto riguarda il primo deposito, si usa un magnetron sputtering DC pulsato a 50 kHz con tempo di pausa di $2 \mu s$ per ogni periodo della pulsazione. L'atmosfera in camera è costituita totalmente da azoto alla pressione di 0.5 Pa e con un flusso pari a 25 sccm (centimetri cubi standard al minuto). La potenza di scarica in camera è pari a 150 W mentre la durata del processo è pari a 20 ore, perciò lo spessore stimato del substrato è pari a circa $10 \mu m$ (il tasso di deposizione è pari a circa $0.5 \mu m$ per ora).

Dati di deposizione:

- tipo di magnetron sputtering: DC pulsato con tempo di pausa $2 \mu s$ per ogni periodo della pulsazione;
- tipo di substrato: alluminio;
- spessore nominale del substrato: 2 mm;
- atmosfera: argon: 0%;
 azoto: 100%;
- pressione in camera: 0.5 Pa;
- potenza di scarica: 150 W;
- flusso gas in camera: 25 sccm (centimetri cubi standard al minuto);
- durata del deposito: 20 h;
- tasso di deposizione: $0.5 \mu m/h$ (circa);
- spessore stimato: $10 \mu m$ (circa).

Durante la deposizione mediante magnetron sputtering si sono misurati i seguenti parametri di processo in modo da poter monitorare il corretto svolgimento dell'operazione:

Tempo trascorso	Potenza [W]	Tensione [V]	Corrente [mA]	Pressione [Pa]
15''	149	294	506	0.495
1'	149	298	500	0.495
1 h 25'	150	309	485	0.499
18 h 45'	150	332	452	0.499
19 h	150	332	452	0.499
19 h 55'	150	333	450	0.495

Tabella 6.1 –Parametri del primo processo.

6.1.5 Trattamento del substrato dopo il primo deposito di nitruro di alluminio

Dopo aver estratto dalla camera di deposizione la configurazione rappresentata in Fig. 6.4, la barretta di alluminio su cui è stato depositato il film di nitruro di alluminio presenta le seguenti dimensioni:

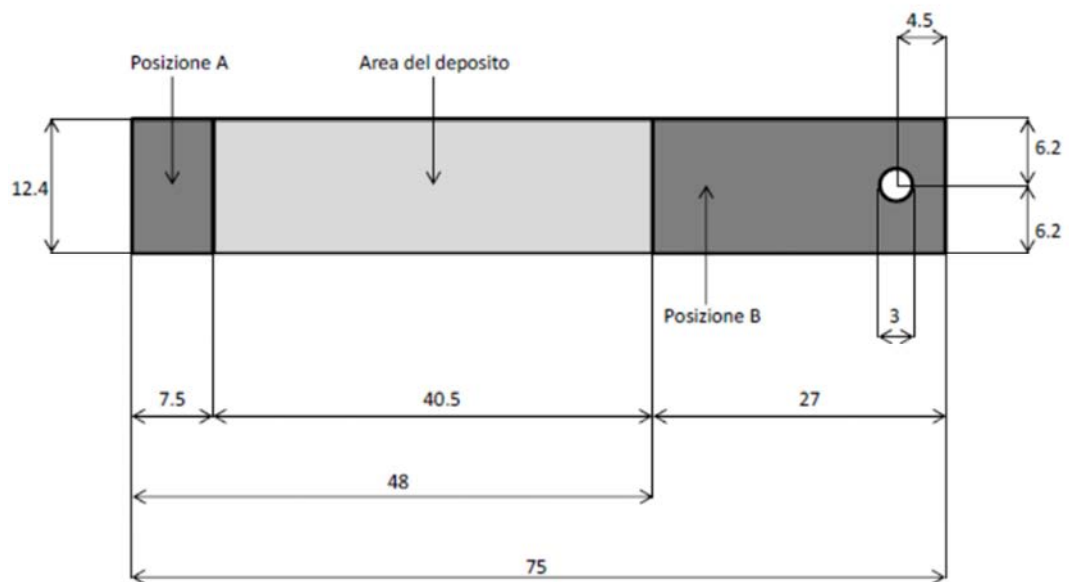


Fig. 6.6 – Dimensioni del substrato di alluminio su cui è stato eseguito il deposito di nitruro di alluminio su una delle sue superfici. Lo spessore nominale è pari a 2 mm.



Fig. 6.7 – Substrato di alluminio su cui è stato eseguito il deposito di nitruro di alluminio su una delle sue superfici. Lo spessore nominale è pari a 2 mm.

Si misura (mediante un micrometro con la risoluzione di 0.01 mm) lo spessore del substrato di alluminio nella posizione *A* e nella posizione *B* indicate nella Fig. 6.6. Le misure forniscono i seguenti risultati:

- posizione *A*: 1.87 mm;
- posizione *B*: 1.87 mm.

6.1.6 Misurazione dello spessore del deposito

Inoltre, per quanto riguarda lo spessore del vetrino di riferimento, seguendo la procedura descritta nel paragrafo 6.1.2, nell'intorno dei punti *a*, *b* (il quale si trova all'interno dell'area in cui è stato eseguito il deposito) e *c* in Fig. 6.2 si sono misurati (mediante un micrometro con la risoluzione di 0.0001 mm) i seguenti spessori:

- intorno di *a*: 0.9703 ± 0.0007 mm;
- intorno di *b*: 0.98365 ± 0.00015 mm;
- intorno di *c*: 0.97565 ± 0.00055 mm.

Poiché i valori misurati nell'intorno del punto *a* e nell'intorno del punto *c* differiscono di $5.35 \pm 1,25 \mu\text{m}$, questo metodo non è utile per la determinazione di uno spessore del film di circa $10 \mu\text{m}$.

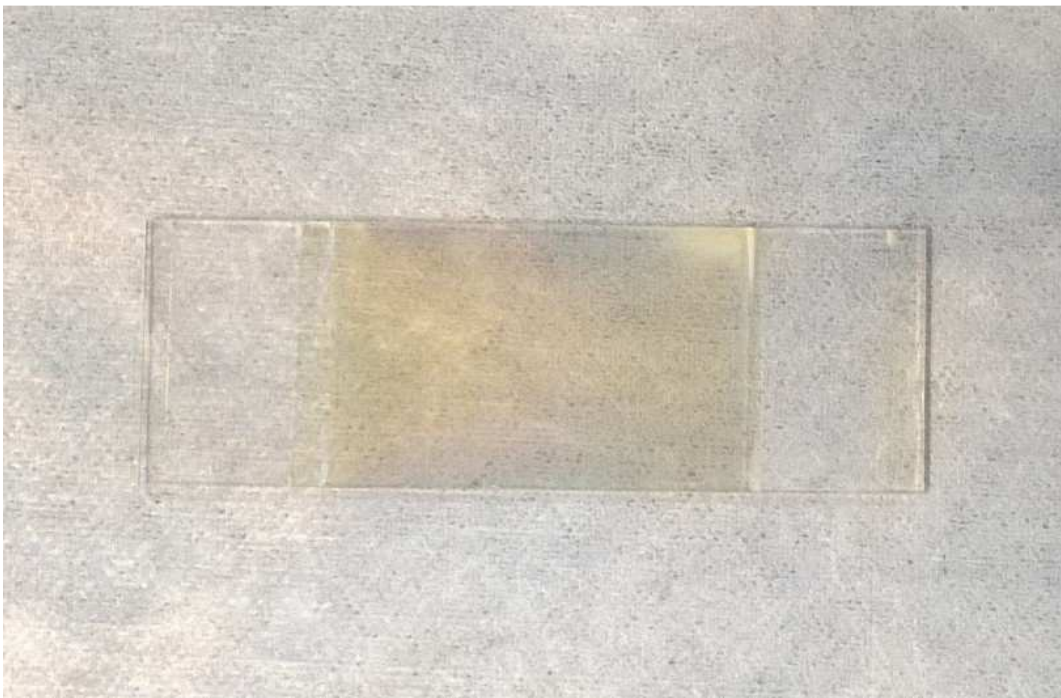


Fig. 6.8 – Vetrino di alluminio 26x76 su cui è stato eseguito il deposito di nitrato di alluminio su una delle sue superfici.

6.1.7 Realizzazione del cantilever

6.1.7.1 Applicazione del nastro in poliestere 3M 74

Sopra la superficie della barretta di alluminio dove si trova il deposito di nitruro di alluminio (si veda la Fig. 6.7) si pone il nastro in poliestere 3M 74 con colla adesiva ben stesa, usando la pressione delle dita per lispiarlo. Oltre le dimensioni della barretta viene lasciato un bordo di qualche millimetro. Lo scopo di questo nastro è quello di impedire alla vernice conduttiva in argento RS Silver Conductive Paint 123-9911, che verrà applicata sopra allo strato di nitruro di alluminio e che assieme al nastro di rame 3M 1181 forma l'elettrodo superiore, come sarà descritto più avanti, di percolare attraverso lo strato di nitruro di alluminio e andare a cortocircuitare i due elettrodi (l'elettrodo inferiore è costituito dal substrato di alluminio).

Le specifiche tecniche del nastro in poliestere 3M 74 sono le seguenti:

- tipo di adesivo: gomma termoindurente;
- spessore: 0.02 mm (poliestere: 12.7 μm ; colla: 7.6 μm);
- resistenza di isolamento: $\geq 1 \cdot 10^6 \text{ M}\Omega$;
- tensione di breakdown del dielettrico: 3500 V.



Fig. 6.9 – Superficie della barretta di alluminio, lato deposito, coperta da uno strato di nastro in poliestere 3M 74.

6.1.7.2 Applicazione del nastro di carta

Sulla barretta di alluminio (si veda la Fig. 6.9) sono stati quindi posti cinque strati di carta a partire da 51 mm dalla punta fino alla fine della struttura. Poi è stato forato il nastro in poliestere 3M 74 e la carta in corrispondenza del foro nella barretta:

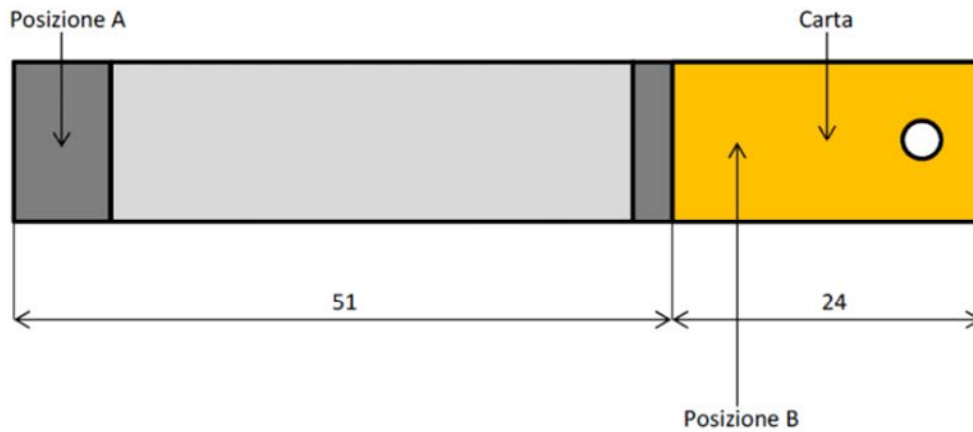


Fig. 6.10 – Applicazione di cinque strati di carta sulla barretta di alluminio a partire da 51 mm dalla punta fino alla fine della struttura. Lo spessore di uno strato di carta è circa pari a 0.1 mm .



Fig. 6.11 - Applicazione di cinque strati di carta sulla barretta di alluminio a partire da 51 mm dalla punta fino alla fine della struttura. Lo spessore di uno strato di carta è circa pari a 0.1 mm .

Lo scopo di questi strati di carta è duplice: da un lato serve come base robusta su cui si esegue l'incastro della barretta con lo shaker elettrodinamico MODAL SHOP 2007E e per questo i 51 mm di distanza dalla sua punta garantiscono che tale incastro non avvenga sopra allo strato di nitrato di alluminio, che si ferma a 48 mm dalla sua punta (si veda la Fig. 6.6), il quale è quindi interamente libero di vibrare; dall'altro riduce la capacità della parte in parallelo alla capacità interna del nitrato di alluminio in quanto ne aumenta lo spessore (e questo è utile per una stima più precisa della capacità interna dello strato di nitrato di alluminio).

Si misura nuovamente (mediante un micrometro con la risoluzione di 0.01 mm) lo spessore del substrato di alluminio nella posizione *A* e nella posizione *B* indicate nella Fig. 6.10. Le misure forniscono i seguenti risultati:

- posizione *A*: 1.89 mm ;
- posizione *B*: 2.39 mm .

Si vede che lo spessore nella posizione *B* è aumentato di 0.5 mm rispetto alla misura precedente (si veda il paragrafo 6.1.5) dato che lo spessore di uno strato di carta è circa pari a 0.1 mm e sono stati applicati cinque strati di carta.

6.1.7.3 Applicazione del nastro di rame 3M 1181

Si mette quindi una rondella di plastica (M3) sopra la carta (si veda la Fig. 6.11) e, sopra ad essa, si posiziona uno strato di nastro di rame 3M 1181 con colla conduttiva da 48 mm dalla punta della barretta (cioè dalla fine dello strato di nitrato di alluminio, si veda la Fig. 6.6), con larghezza di circa 20 mm e per 3 mm di profondità (cioè fino a 51 mm dalla punta del materiale, dove iniziano i cinque strati di carta, si veda la Fig. 6.10) e poi per 25 mm (quindi oltre la fine della barretta, che finisce dopo 24 mm , si veda la Fig. 6.12) con larghezza 8 mm (quindi l'area dello strato di nastro di rame 3M 1181 è pari a $3 \times 20 + 8 \times 25\text{ mm}^2$). Si usa dapprima un'area di $3 \times 20\text{ mm}^2$ in quanto sopra di essa verrà posta la vernice conduttiva in argento RS SCP 123-9911 e quindi serve a garantire un buon contatto elettrico con tale vernice, successivamente una larghezza di 8 mm per ridurre l'area dello strato di rame e quindi la capacità in parallelo alla capacità interna del nitrato di alluminio e perché i cinque strati di carta sotto fanno meno sforzo sulla piccola parte di rame $3 \times 20\text{ mm}^2$, perciò il nastro di rame è più aderente alla struttura. La parte di rame + vernice conduttiva funge da elettrodo superiore. L'elettrodo inferiore è dato dal substrato di alluminio.

Le specifiche tecniche del nastro di rame 3M 1181 sono le seguenti:

- tipo di adesivo: acrilico conduttivo;
- spessore: 0.066 mm ;
- resistenza elettrica: $0.005\ \Omega/\square$.

Si fora quindi il nastro di rame.

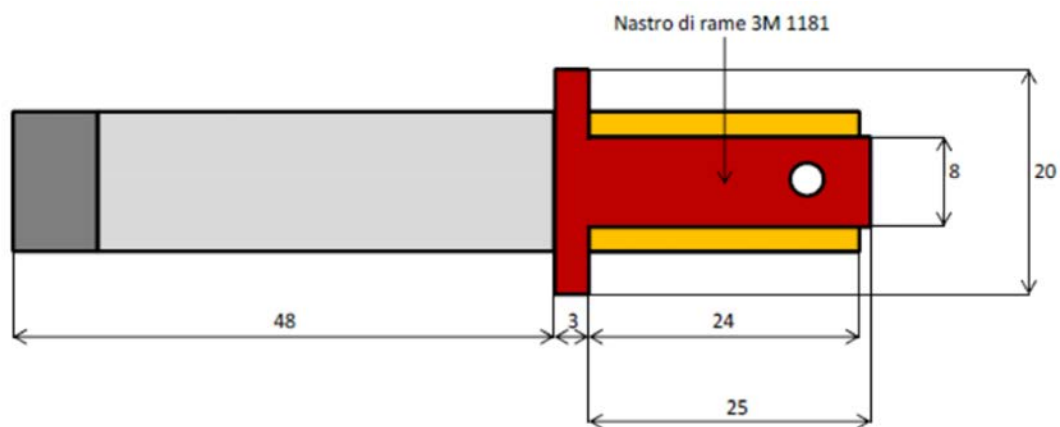


Fig. 6.12 – Applicazione del nastro di rame 3M 1181 alla barretta di alluminio.



Fig. 6.13 – Applicazione del nastro di rame 3M 1181 alla barretta di alluminio. In corrispondenza del foro, sotto allo strato di nastro di rame è stata applicata una rondella M3.

6.1.7.4 Collegamenti elettrici

A questo punto sul sistema (si veda la Fig. 6.13) si collegano sull'elettrodo superiore e su quello inferiore due fili con capocorda ad occhiello, bloccati da una vite di plastica (M3) più corrispondente dado di plastica. Alla fine (sopra ai capicorda) si pongono le guaine termorestringenti. In questo modo l'elettrodo

superiore e l'elettrodo inferiore sono accessibili per la misura della tensione generata dal convertitore piezoelettrico in configurazione a trave a sbalzo.



Fig. 6.14 – Collegamento di due fili mediante capocorda ad occhiello: uno sull'elettrodo superiore e uno sull'elettrodo inferiore, entrambi bloccati da una vite di plastica (M3) più corrispondente dado di plastica. Alla fine (sopra ai capicorda), vengono poste le guaine termorestringenti.

Successivamente si verifica l'isolamento tra i due terminali (cioè tra elettrodo superiore ed elettrodo inferiore) e il collegamento elettrico tra nastro in rame (che è parte dell'elettrodo superiore) e terminale del filo ad esso collegato e tra alluminio (elettrodo inferiore) e terminale del filo ad esso collegato.

Si misura quindi la capacità tra i due elettrodi (in cui la superficie è definita dalla superficie del nastro in rame) mediante il ponte di misura RLC Metrix IX 3131: alla frequenza di 1 kHz , con cantilever collegato, si misurano 19.2 pF .

Le specifiche tecniche del ponte di misura RLC Metrix IX 3131 sono le seguenti:

- Modo parallelo: capacità (C) e resistenza (R) (di default);
- Modo serie: induttanza (L) (di default);
- Tensione di protezione: 5 V rispetto a terra;
- Frequenze di test: 1 kHz o 120 Hz;
- Livello del test di segnale (valore efficace): 0.9 V (circa);
- Classe di isolamento: I.



Fig. 6.15 – Ponte di misura RLC Metrix IX 3131.

6.1.7.5 Applicazione della vernice conduttiva RS SCP 123-9911

Per quanto riguarda la verniciatura mediante vernice conduttiva in argento RS Silver Conductive Paint 123-9911, prima di eseguire tale operazione si apporta alla struttura (si veda la Fig. 6.14) la maschera in tre pezzi di carta in modo da poter verniciare solo la parte che si trova al di sopra dello strato di nitruro di alluminio (area libera pari a circa $12 \times 40 \text{ mm}^2$).

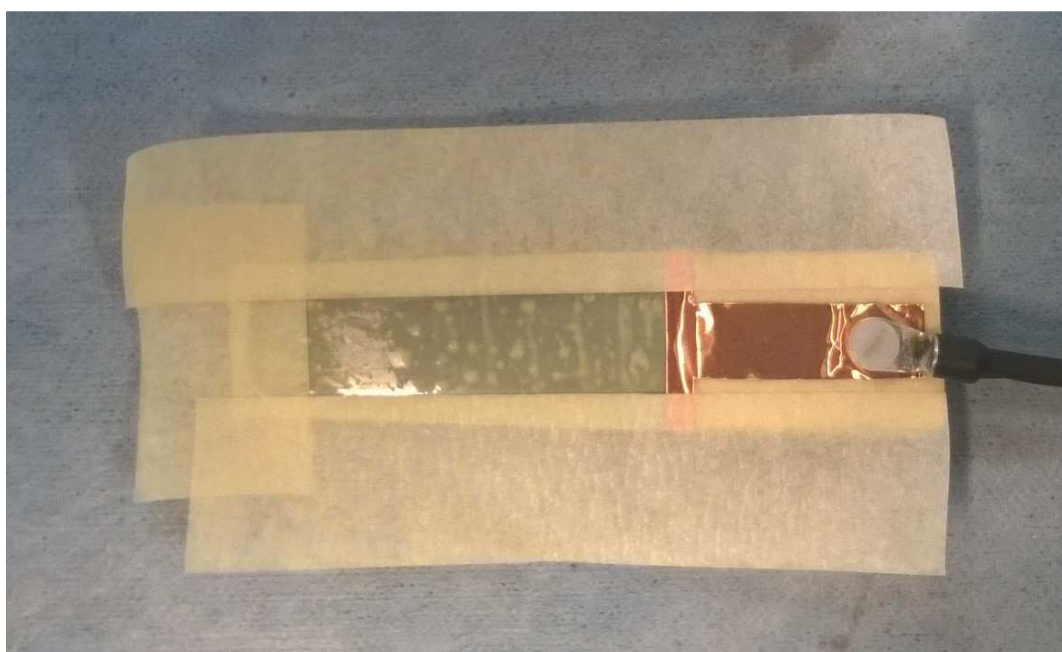


Fig. 6.16 – Apporto alla struttura della maschera in tre pezzi di carta in modo da poter verniciare con la vernice conduttiva in argento RS Silver Conductive Paint 123-9911 solo la parte che si trova al di sopra dello strato di nitruro di alluminio (area libera pari a circa $12 \times 40 \text{ mm}^2$).

Dopo aver agitato la confezione della vernice per circa 15 minuti, si spalma tale vernice sull'area posta al di sopra dello strato di materiale piezoelettrico descritta precedentemente ($12 \times 40 \text{ mm}^2$, si veda la Fig. 6.16) e la si lascia asciugare alcune ore in modo che evapori la parte volatile e rimanga solo l'argento.

Le specifiche tecniche della vernice conduttiva RS Silver Conductive Paint 123-9911 sono le seguenti:

- Elemento conduttore: argento;
- Resistività elettrica: $0.001 \Omega \cdot \text{cm}$.

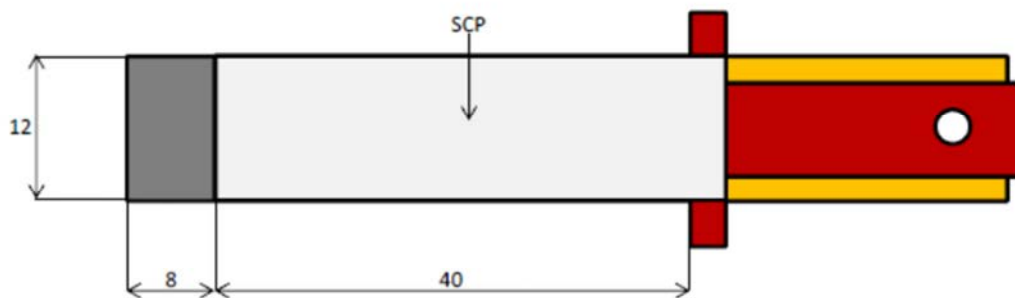


Fig. 6.17 – Area della barretta di alluminio in cui viene applicata la vernice conduttiva in argento RS Silver Conductive Paint 123-9911 (SCP).

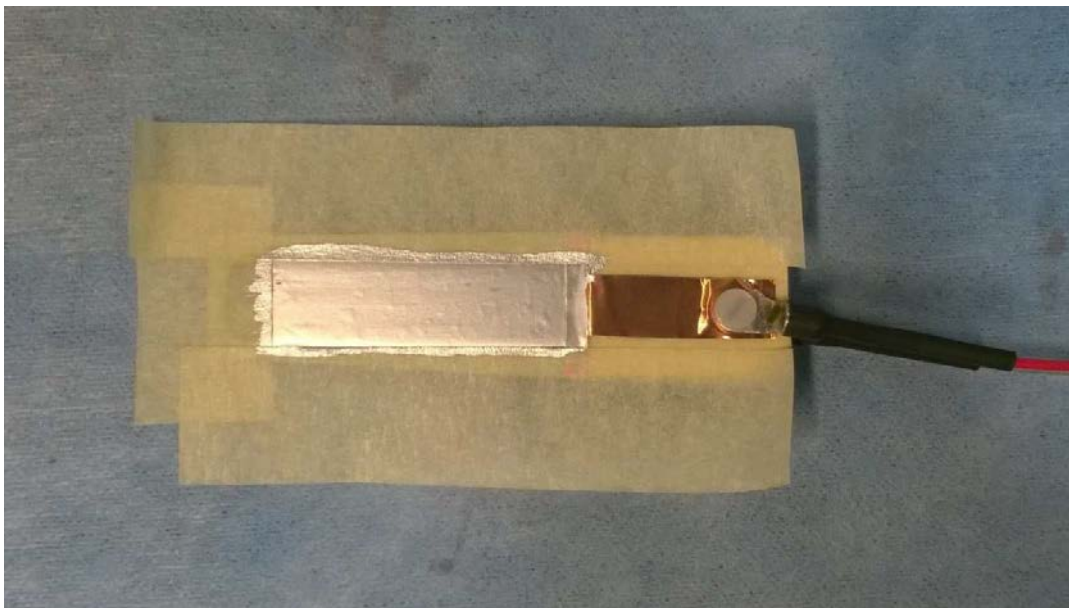


Fig. 6.18 – Applicazione della vernice conduttiva in argento RS Silver Conductive Paint 123-9911 (SCP) alla barretta di alluminio.

6.1.7.6 Configurazione finale e misura di capacità

Una volta asciugata la vernice conduttiva in argento RS Silver Conductive Paint 123-9911, si toglie la maschera in tre pezzi di carta e si misura la capacità totale tra i due elettrodi mediante il ponte di misura RLC Metrix IX 3131: alla frequenza di 1 kHz , con cantilever collegato, si misurano 498.3 pF .

A questo punto, per completare la struttura a cantilever, si applicano ad essa (si veda la Fig. 6.18) sei strati di carta sopra e sotto la struttura, della lunghezza di circa 15 mm , a partire da 51 mm dalla punta (quindi fino a 66 mm dalla punta, si veda la Fig. 6.19).

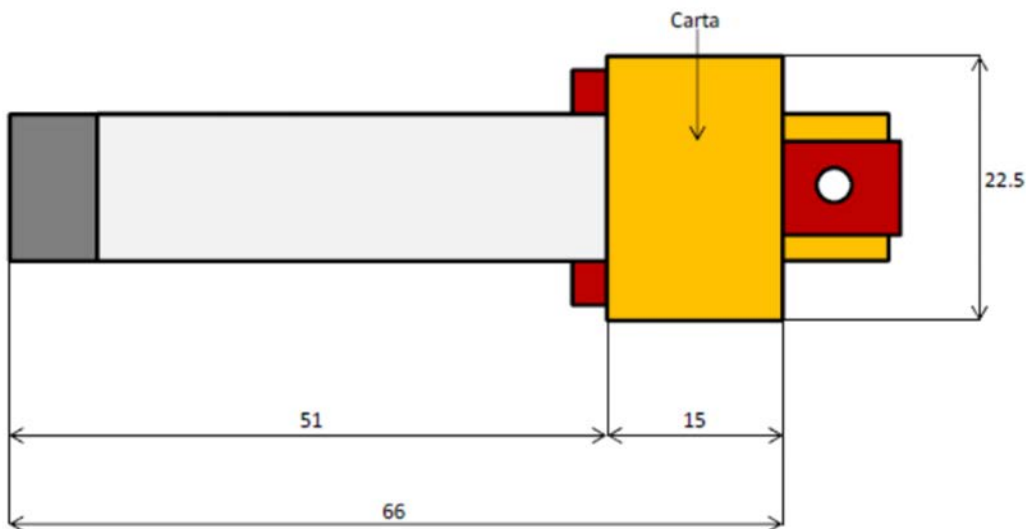


Fig. 6.19 - Applicazione di sei strati di carta sopra e sotto la struttura, della lunghezza di circa 15 mm , a partire da 51 mm dalla punta (quindi fino a 66 mm dalla punta).



Fig. 6.20 – Struttura completa del cantilever con convertitore piezoelettrico in nitruro di alluminio.

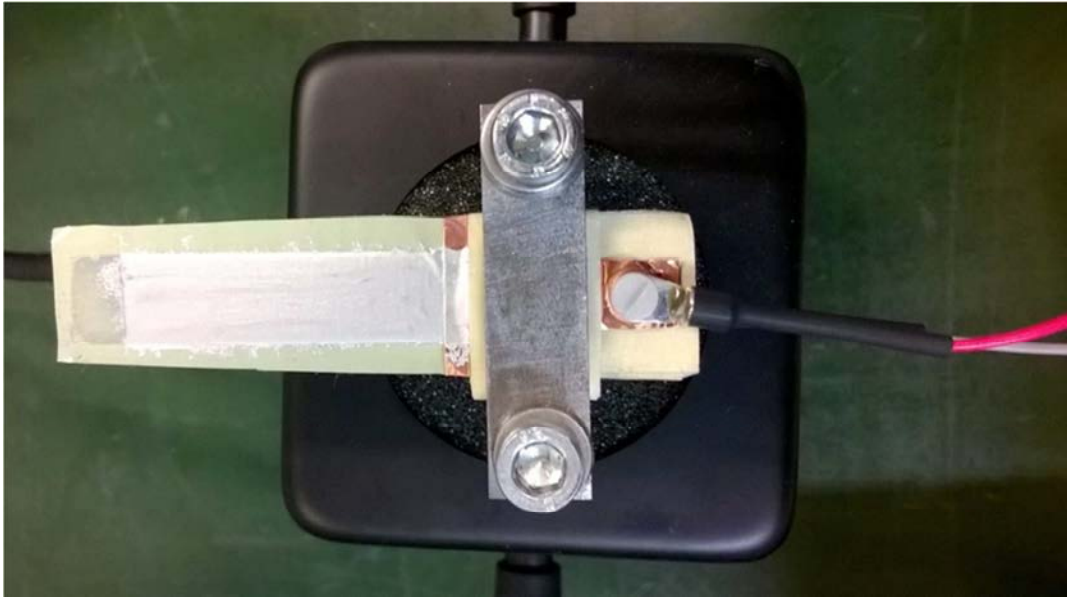


Fig. 6.22 – Incastro del convertitore piezoelettrico allo shaker elettrodinamico MODAL SHOP 2007E eseguito a 52 mm dalla punta della struttura.

Si verificano nuovamente gli isolamenti tra i due elettrodi del convertitore e tra i terminali dei fili di collegamento e la massa dello shaker elettrodinamico MODAL SHOP 2007E.

6.2 Secondo deposito del film di nitruro di alluminio

6.2.1 Preparazione del substrato e misure preliminari

Come prima cosa si prende come substrato, su cui si eseguirà il deposito di nitruro di alluminio, una barretta di alluminio $75 \times 12.4\text{ mm}^2$ con un foro di 3 mm di diametro ad una distanza di 4.5 mm dall'estremità. Il suo spessore nominale è pari a 2 mm .

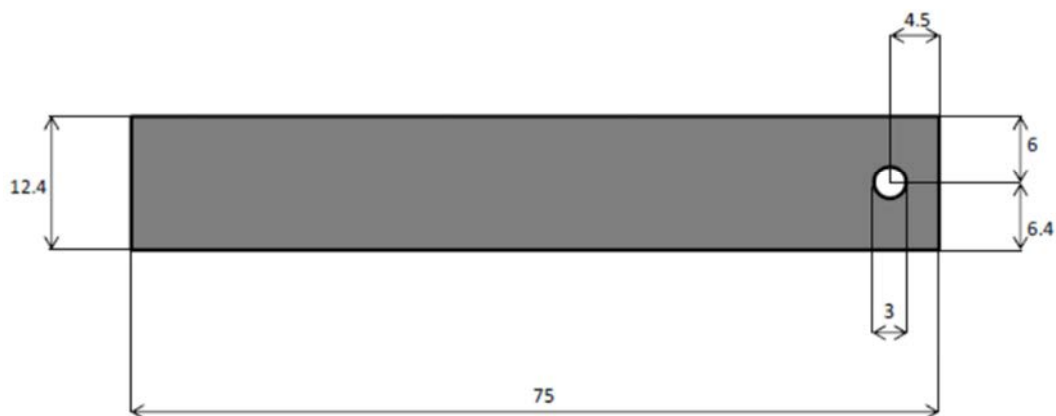


Fig. 6.23 – Substrato di alluminio. Lo spessore nominale è pari a 2 mm .



Fig. 6.24 – barretta di alluminio $75 \times 12.4 \text{ mm}^2$ con foro del diametro di 3 mm ad una distanza di 4.5 mm dall'estremità. Lo spessore nominale è pari a 2 mm .

Si esegue un'operazione di levigatura in corrispondenza del foro e si misura quindi lo spessore di tale barretta (mediante un micrometro con la risoluzione di 0.0001 mm) nelle posizioni indicate in Fig. 6.25:

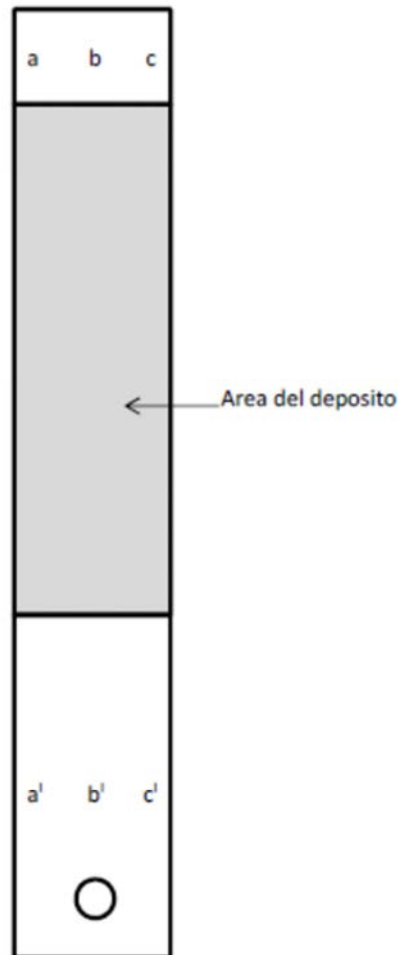


Fig. 6.25 - Mappatura dei punti del substrato di alluminio in corrispondenza dei quali viene eseguita una misura di spessore. Nella figura è stata indicata l'area in cui verrà eseguito il deposito di nitrato di alluminio.

I risultati delle misure nell'intorno dei punti a , b , c , a' , b' , c' sono i seguenti:

- intorno di a : 1.8642 mm;
- intorno di b : 1.8572 mm;
- intorno di c : 1.8565 mm;
- intorno di a' : 1.8727 mm;
- intorno di b' : 1.8656 mm;
- intorno di c' : 1.8736 mm.

I valori a , b e c stanno all'interno dell'intervallo 1.86035 ± 0.00385 mm, mentre i valori a' , b' e c' stanno all'interno dell'intervallo 1.8696 ± 0.004 mm.

Si lavora quindi una delle due superfici, che risulterà essere la superficie dove si realizzerà il deposito di nitruro di alluminio, mediante carta abrasiva P500 per circa 15 minuti, P1000 per circa 15 minuti, P2000 per circa 10 minuti e P5000 per circa 10 minuti.

Si ripetono quindi le misure di spessore nell'intorno degli stessi punti in cui si sono eseguite prima dell'abrasione (si veda la Fig. 6.25). I risultati sono i seguenti:

- intorno di a : 1.8531 mm;
- intorno di b : 1.8526 mm;
- intorno di c : 1.8529 mm;
- intorno di a' : 1.8564 mm;
- intorno di b' : 1.8576 mm;
- intorno di c' : 1.8564 mm.

I valori a , b e c stanno ora all'interno dell'intervallo 1.85285 ± 0.00025 mm, mentre i valori a' , b' e c' stanno all'interno dell'intervallo 1.8570 ± 0.0006 mm, perciò la superficie è più liscia.

6.2.2 Secondo metodo per la misurazione dello spessore del deposito

Per avere una stima dello spessore del deposito, oltre che sul substrato di alluminio si esegue anche in questo caso un deposito di nitruro di alluminio su di un vetrino di riferimento 26×76 mm².

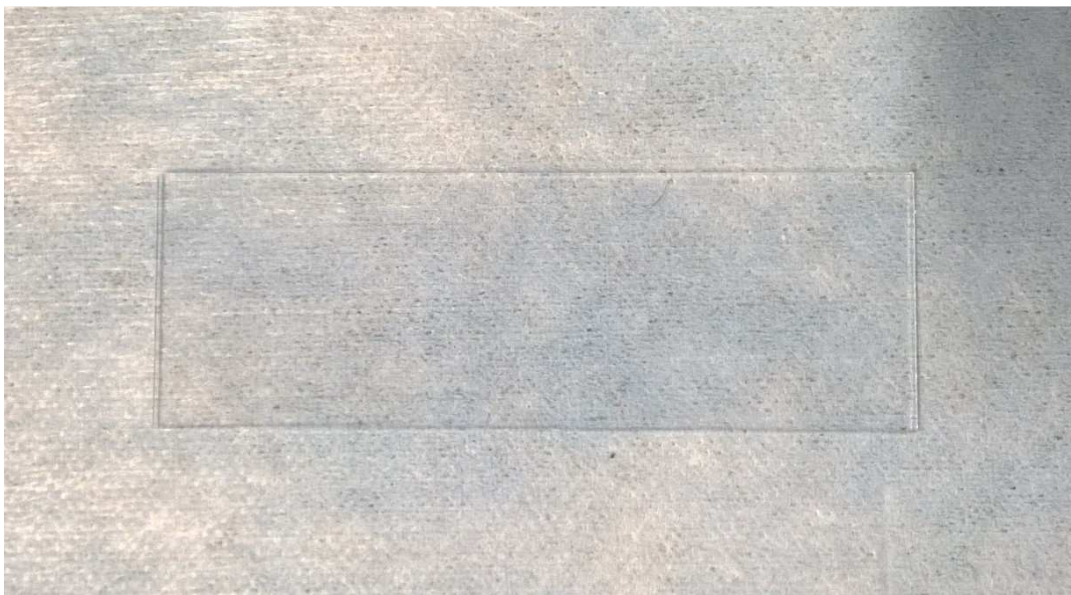


Fig. 6.26 – vetrino usato per la stima dello spessore del deposito di nitruro di alluminio (prima del deposito).

Poiché il metodo illustrato nel paragrafo 6.1.2 non è utile al fine di misurare uno spessore dell'ordine dei $10 \mu\text{m}$ (è circa lo spessore del deposito che si realizzerà anche in questo caso), si propone ora un nuovo metodo per determinare lo spessore del deposito effettuato.

Prima del trattamento, dopo aver pulito le superfici del vetrino mediante alcol, si esegue una serie di misure di spessore (mediante un micrometro con la risoluzione di 0.0001 mm) atte ad appurare l'omogeneità di tale vetrino.

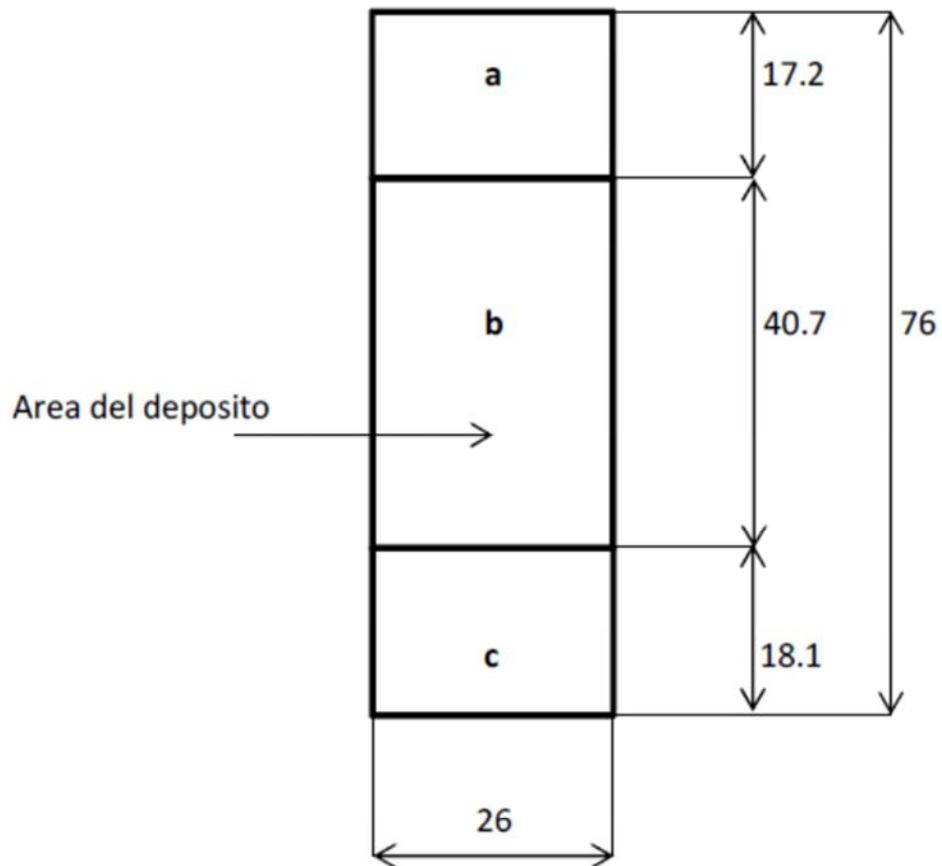


Fig. 6.27 - Schema vetrino usato per le misure dello spessore del deposito. Nella figura è stata indicata l'area in cui verrà eseguito il deposito di nitruro di alluminio.

In ognuna delle tre zone indicate in Fig. 6.27 si eseguono 24 misure di spessore, per un totale di 72 misure.

Zona a				Zona b (zona del deposito)				Zona c			
1	7	13	19	25	31	37	43	49	55	61	67
2	8	14	20	26	32	38	44	50	56	62	68
3	9	15	21	27	33	39	45	51	57	63	69
4	10	16	22	28	34	40	46	52	58	64	70
5	11	17	23	29	35	41	47	53	59	65	71
6	12	18	24	30	36	42	48	54	60	66	72

Fig. 6.28 – Mappatura del vetrino 26x76 usato per le misure dello spessore del deposito. Rispetto alla Fig. 27, in questo caso il vetrino è visto orizzontalmente. I punti che non si trovano nelle aree evidenziate sono stati scartati in quanto si trovano in corrispondenza dei bordi del vetrino (essendo al bordo, si è scelto di non considerarli).

In corrispondenza dei punti indicati in Fig. 6.28, le misure dello spessore del vetrino sono le seguenti:

Zona a:

- 1) 0.9882 mm;
- 2) 0.9875 mm;
- 3) 0.9865 mm;
- 4) 0.9867 mm;
- 5) 0.9878 mm;
- 6) 0.9910 mm;
- 7) 0.9877 mm;
- 8) 0.9872 mm;
- 9) 0.9863 mm;
- 10) 0.9862 mm;
- 11) 0.9885 mm;
- 12) 0.9907 mm;
- 13) 0.9883 mm;
- 14) 0.9872 mm;
- 15) 0.9867 mm;
- 16) 0.9865 mm;
- 17) 0.9897 mm;
- 18) 0.9907 mm;
- 19) 0.9882 mm;
- 20) 0.9877 mm;
- 21) 0.9873 mm;
- 22) 0.9879 mm;
- 23) 0.9897 mm;
- 24) 0.9911 mm.

Zona b (zona del deposito):

- 25) 0.9905 mm;
- 26) 0.9905 mm;
- 27) 0.9896 mm;
- 28) 0.9903 mm;
- 29) 0.9918 mm;
- 30) 0.9932 mm;
- 31) 0.9906 mm;
- 32) 0.9902 mm;
- 33) 0.9899 mm;
- 34) 0.9891 mm;
- 35) 0.9916 mm;
- 36) 0.9936 mm;
- 37) 0.9903 mm;
- 38) 0.9898 mm;
- 39) 0.9896 mm;
- 40) 0.9894 mm;
- 41) 0.9927 mm;
- 42) 0.9944 mm;
- 43) 0.9895 mm;
- 44) 0.9893 mm;
- 45) 0.9896 mm;
- 46) 0.9894 mm;
- 47) 0.9830 mm;
- 48) 0.9947 mm.

Zona c:

- 49) 0.9889 mm;
- 50) 0.9881 mm;
- 51) 0.9881 mm;
- 52) 0.9881 mm;
- 53) 0.9899 mm;
- 54) 0.9925 mm;
- 55) 0.9890 mm;
- 56) 0.9882 mm;
- 57) 0.9876 mm;
- 58) 0.9885 mm;
- 59) 0.9900 mm;
- 60) 0.9919 mm;
- 61) 0.9891 mm;
- 62) 0.9883 mm;
- 63) 0.9878 mm;
- 64) 0.9877 mm;
- 65) 0.9895 mm;
- 66) 0.9912 mm;
- 67) 0.9886 mm;
- 68) 0.9881 mm;
- 69) 0.9871 mm;
- 70) 0.9874 mm;
- 71) 0.9892 mm;
- 72) 0.9905 mm.

Scartando i valori ai bordi (quindi le misure numero 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 12, 13, 18, 19 e 24 per quanto riguarda la zona *a*, 25, 30, 31, 36, 37, 42, 43 e 48 per quanto riguarda la zona *b*, 49, 54, 55, 60, 61, 66, 67, 68, 69, 70, 71 per quanto riguarda la zona *c*), gli intervalli corrispondenti allo spessore del vetrino nelle tre zone *a*, *b* e *c* sono i seguenti:

- zona *a*: 0.98795 ± 0.00175 mm;
- zona *b*: 0.99105 ± 0.00195 mm;
- zona *c*: 0.9888 ± 0.0012 mm.

Si nota dunque che lo scostamento massimo tra i valori di spessore all'interno dei vari intervalli è al massimo pari a 0.0039 mm, valore che risulta essere accettabile per la misura di spessori del deposito di circa $10 \mu\text{m}$ (si veda il paragrafo 6.2.2). Quindi, dopo la realizzazione del deposito, basterà misurare di nuovo gli spessori nei punti validi delle tre zone in Fig. 6.28 (quelli che si trovano nelle aree evidenziate), verificare che gli intervalli corrispondenti allo spessore del vetrino nelle zone *a* e *c* siano confrontabili con quelle appena ottenute ed eseguire la differenza tra gli intervalli della zona *b* per ottenere una stima dello spessore del deposito di nitruro di alluminio (si veda il paragrafo 6.2.6).

6.2.3 Struttura di supporto al substrato

Per la realizzazione della struttura di supporto al substrato di alluminio e al vetrino che andranno in camera di deposizione, si prendono come supporti ancora due barrette di alluminio $116 \times 30 \text{ mm}^2$ e dello spessore di 2 mm e si realizza la seguente configurazione in cui il substrato e il vetrino sono legati ai supporti mediante nastro in kapton (prima della realizzazione della struttura le barrette di alluminio vanno pulite con acetone ed alcol, mentre il vetrino viene pulito mediante il solo alcol).

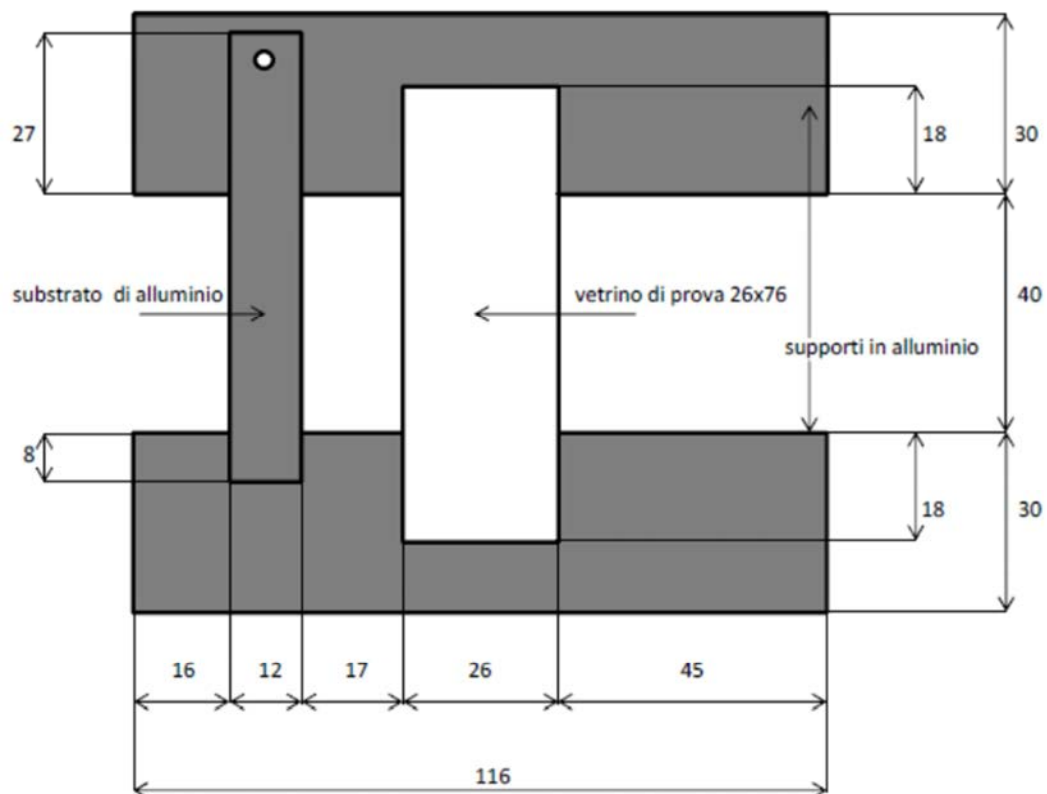


Fig. 6.29 – Substrato di alluminio su di cui avviene il deposito di nitrato di alluminio (sulla sinistra). Al centro vi è un vetrino di dimensioni $26 \times 76 \text{ mm}^2$ che serve per la stima dello spessore del deposito effettuato. Le barre di alluminio (dello spessore di 2 mm) sopra e sotto fungono solamente da supporto. Il deposito avviene sulla superficie inferiore della barra di alluminio e del vetrino qui rappresentati.

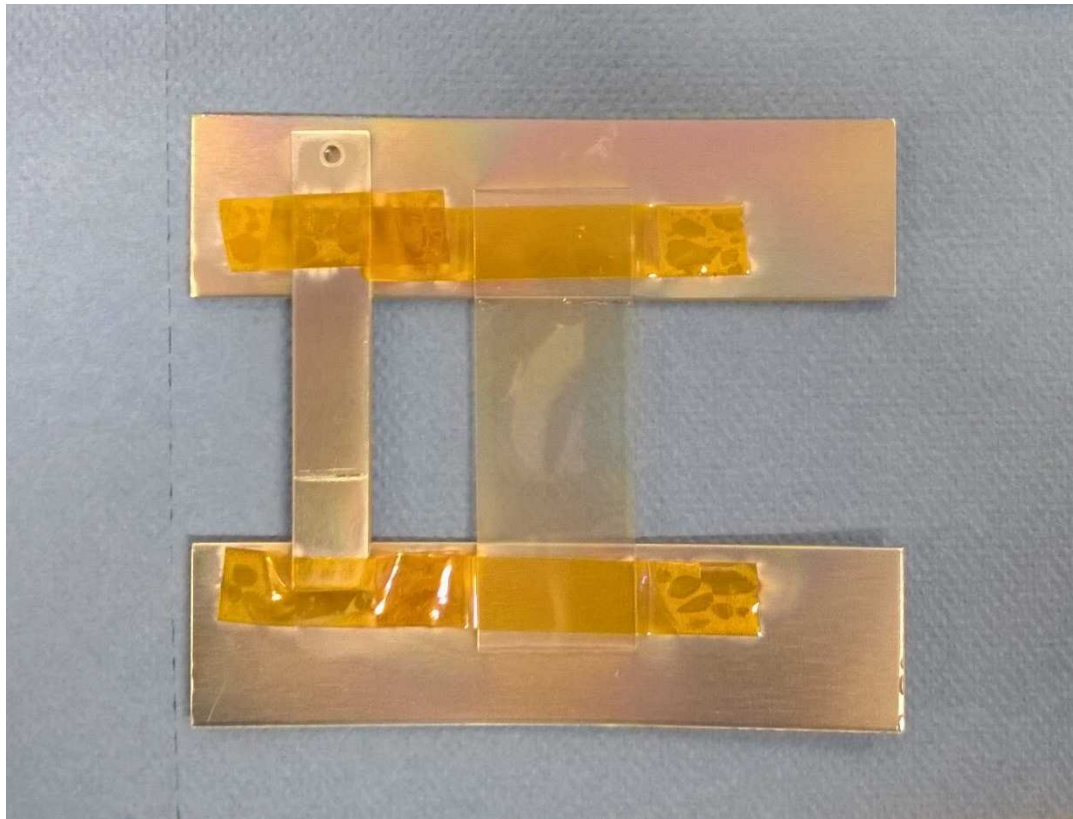


Fig. 6.30 – Substrato di alluminio su cui avviene il deposito di nitruro di alluminio (sulla sinistra). Al centro vi è un vetrino di dimensioni $26 \times 76 \text{ mm}^2$ che serve per la stima dello spessore del deposito effettuato. Le barre di alluminio sopra e sotto fungono solamente da supporto. Il deposito avviene sulla superficie inferiore della barra di alluminio e del vetrino visibili nella foto. Substrato e vetrino sono legati ai supporti mediante nastro in kapton.

6.2.4 Magnetron sputtering per il secondo deposito di nitruro di alluminio

A questo punto si inserisce il substrato all'interno della camera di deposizione.

Prima del trattamento si porta la camera alla pressione base di $5 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$.

Il bersaglio è costituito da alluminio con grado di purezza 99.99%.

A questo punto si esegue l'operazione di presputtering. Anche in questo caso si usa un magnetron sputtering DC pulsato a 50 kHz con tempo di pausa di $2 \mu\text{s}$ ogni periodo della pulsazione. L'atmosfera in camera è costituita totalmente da argon alla pressione di 0.5 Pa e con un flusso pari a 25 sccm . La potenza di scarica in camera è pari a 100 W mentre la durata del processo è pari a 10 minuti.

Parametri di presputtering:

- tipo di magnetron sputtering: DC pulsato con tempo di pausa $2 \mu s$ per ogni periodo della pulsazione;
- atmosfera: argon: 100%;
 azoto: 0%
- pressione in camera: 0.5 Pa;
- flusso gas in camera: 25 sccm (centimetri cubi standard al minuto);
- potenza di scarica: 100 W;
- durata: 10 min.

Per quanto riguarda il secondo deposito, si usa un magnetron sputtering DC pulsato a 50 kHz con tempo di pausa di $2 \mu s$ ogni periodo della pulsazione. L'atmosfera in camera è costituita per il 20% da argon e per l'80% da azoto alla pressione di 0.499 Pa e con un flusso pari a 25 sccm: 5 sccm per quanto riguarda l'argon, 20 sccm per quanto riguarda l'azoto. La potenza di scarica in camera è pari a 150 W mentre la durata del processo è pari a 20 ore (perciò lo spessore stimato del substrato è pari a circa $10 \mu m$).

Dati di deposizione:

- tipo di magnetron sputtering: DC pulsato con tempo di pausa $2 \mu s$ per ogni periodo della pulsazione;
- tipo di substrato: alluminio;
- spessore nominale del substrato: 2 mm;
- atmosfera: argon: 20%;
 azoto: 100%;
- pressione in camera: 0.499 Pa;
- potenza di scarica: 150 W;
- flusso gas in camera: 25 sccm (centimetri cubi standard al minuto);
 5 sccm per l'argon;
 20 sccm per l'azoto;
- durata del deposito: 20 h;
- tasso di deposizione: $0.5 \mu m/h$ (circa);
- spessore stimato: $10 \mu m$ (circa).

Per quanto riguarda lo spessore stimato, si è indicato come valore indicativo $10 \mu m$, come il deposito precedente in atmosfera composta da solo azoto. Tuttavia in questo caso nell'atmosfera è presente anche argon, che ha una massa superiore a quella dell'azoto, in questo modo aumenta il rendimento di sputtering in quanto viene estratto dal bersaglio un numero superiore di atomi quando si ha uno ione di argon incidente.

Durante la deposizione mediante magnetron sputtering si sono misurati i seguenti parametri di processo in modo da poter monitorare il corretto svolgimento dell'operazione:

Tempo trascorso	Potenza [W]	Tensione [V]	Corrente [mA]	Pressione [Pa]
15''	150	291	517	0.487
1'	149	290	517	0.491
2 h 47'	150	304	494	0.491
15 h 12'	150	320	468	0.491
19 h 20'	150	321	466	0.483
19 h 50'	150	322	466	0.487

Tabella 6.2 –Parametri del secondo processo.

6.2.5 Trattamento del substrato dopo il secondo deposito di nitruro di alluminio

Dopo aver estratto dalla camera di deposizione la configurazione rappresentata in Fig. 6.29, la barretta di alluminio su cui è stato depositato un film di nitruro di alluminio presenta le seguenti dimensioni:

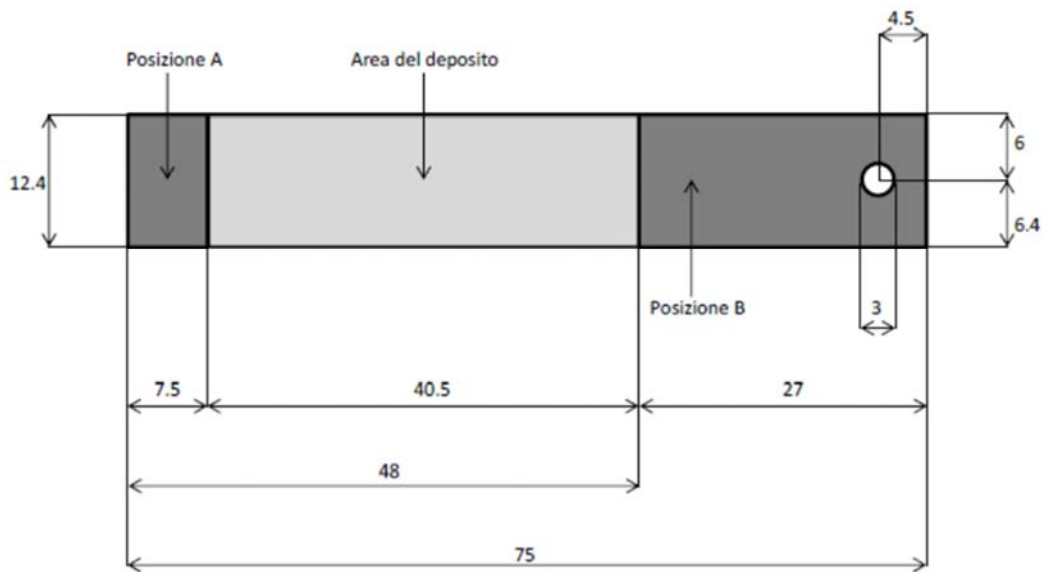


Fig. 6.31 – Dimensioni del substrato di alluminio su cui è stato eseguito il deposito di nitruro di alluminio su una delle sue superfici. Lo spessore nominale è pari a 2 mm.



Fig. 6.32 – Substrato di alluminio su cui è stato eseguito il deposito di nitruro di alluminio su una delle sue superfici. Lo spessore nominale è pari a 2 mm.

Si misura (mediante un micrometro con la risoluzione di 0.01 mm) lo spessore del substrato di alluminio nella posizione *A* e nella posizione *B* indicate nella Fig. 6.31. Le misure forniscono i seguenti risultati:

- posizione *A*: 1.87 mm;
- posizione *B*: 1.87 mm.

6.2.6 Misurazione dello spessore del deposito

A questo punto si esegue nuovamente la misura di spessore sul vetrino di riferimento descritta nel paragrafo 6.2.2.

In corrispondenza dei punti validi indicati in Fig. 6.28, le misure dello spessore del vetrino sono le seguenti:

Zona *a*:

- 8) 0.9878 mm;
- 9) 0.9869 mm;
- 10) 0.9877 mm;
- 11) 0.9899 mm;
- 14) 0.9885 mm;
- 15) 0.9871 mm;
- 16) 0.9874 mm;
- 17) 0.9899 mm;
- 20) 0.9883 mm;
- 21) 0.9876 mm;
- 22) 0.9879 mm;
- 23) 0.9901 mm.

Zona *b* (zona del deposito):

- 26) 1.0010 mm;
- 27) 1.0007 mm;
- 28) 1.0010 mm;
- 29) 1.0024 mm;
- 32) 1.0014 mm;
- 33) 1.0007 mm;
- 34) 1.0006 mm;
- 35) 1.0029 mm;
- 38) 1.0013 mm;
- 39) 1.0008 mm;
- 40) 1.0012 mm;
- 41) 1.0032 mm;
- 44) 1.0017 mm;
- 45) 1.0010 mm;
- 46) 1.0019 mm;
- 47) 1.0030 mm.

Zona *c*:

- 50) 0.9886 mm;
- 51) 0.9885 mm;
- 52) 0,9883 mm;
- 53) 0.9922 mm;
- 56) 0.9883 mm;
- 57) 0.9874 mm;
- 58) 0.9871 mm;
- 59) 0.9901 mm;
- 62) 0.9882 mm;
- 63) 0.9875 mm;
- 64) 0.9875 mm;
- 65) 0.9906 mm.

Gli intervalli corrispondenti allo spessore del vetrino nelle tre zone *a*, *b* e *c* sono i seguenti:

- zona *a*: 0.9885 ± 0.0016 mm;
- zona *b*: 1.0019 ± 0.0013 mm;
- zona *c*: 0.98965 ± 0.00255 mm.

Quindi, confrontando tali valori con quelli delle misure eseguite prima del deposito (si veda il paragrafo 6.2.2) si vede che le misure zone *a* e *c* sono circa invariate in quanto nell'intorno del punto *a* si ha una differenza di $0.55 \pm 3.35 \mu\text{m}$, invece nella zona *c* si ha una differenza di $0.85 \pm 3.75 \mu\text{m}$ (si vede che per questi valori l'incertezza è maggiore del valore centrale della differenza e ciò sta ad indicare che i valori ottenuti prima e dopo il deposito sono confrontabili) mentre la misura nell'intorno di *b* è aumentata di $10.85 \pm 3.75 \mu\text{m}$. Quest'ultimo valore fornisce un'indicazione dello spessore del deposito di nitruro di alluminio che si ha sul substrato di alluminio con un'incertezza del 35%.

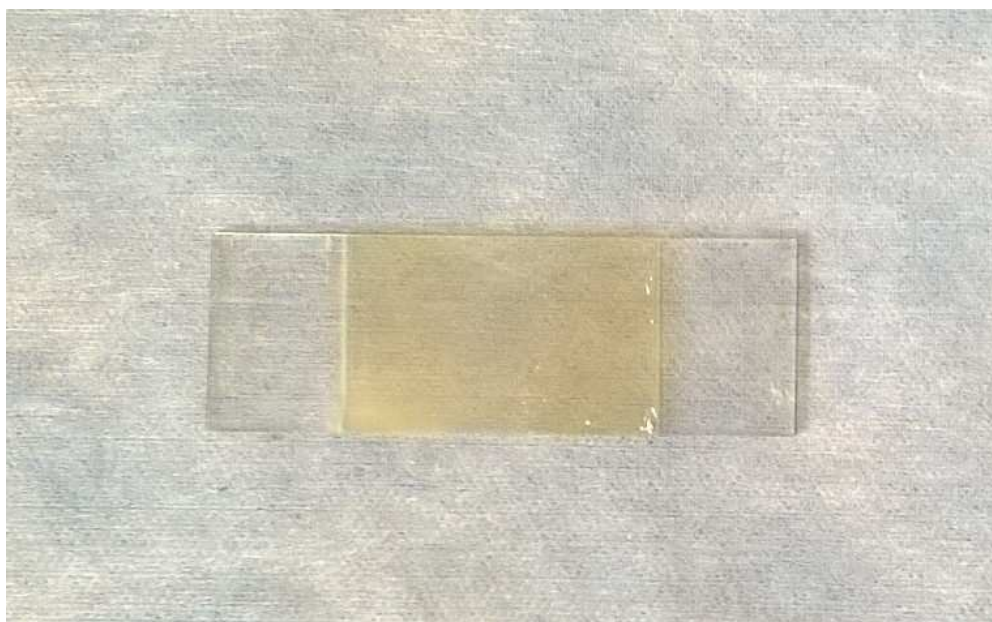


Fig. 6.33 – Vetrino di alluminio su cui è stato eseguito il deposito di nitruro di alluminio su una delle sue superfici.

6.2.7 Realizzazione del cantilever

6.2.7.1 Applicazione del nastro in poliestere 3M 74

Come fatto per il primo deposito di nitruro di alluminio (si veda il paragrafo 6.1.7.1), sopra la superficie della barretta di alluminio dove si trova il deposito di nitruro di alluminio (si veda la Fig. 6.32) si pone il nastro in poliestere 3M 74 con colla adesiva ben stesa, usando la pressione delle dita per lisciarlo. Oltre le dimensioni della barretta viene lasciato un bordo di qualche millimetro.



Fig. 6.34 – Superficie della barretta di alluminio, lato deposito, coperta da uno strato di nastro in poliestere 3M 74.

6.2.7.2 Applicazione del nastro di carta

Anche in questo caso (si veda il paragrafo 6.1.7.2) sulla barretta di alluminio (si veda la Fig. 6.34) sono stati quindi posti cinque strati di carta a partire da 51 mm dalla punta fino alla fine della struttura. Poi è stato forato il nastro in poliestere 3M 74 e la carta in corrispondenza del foro nella barretta:

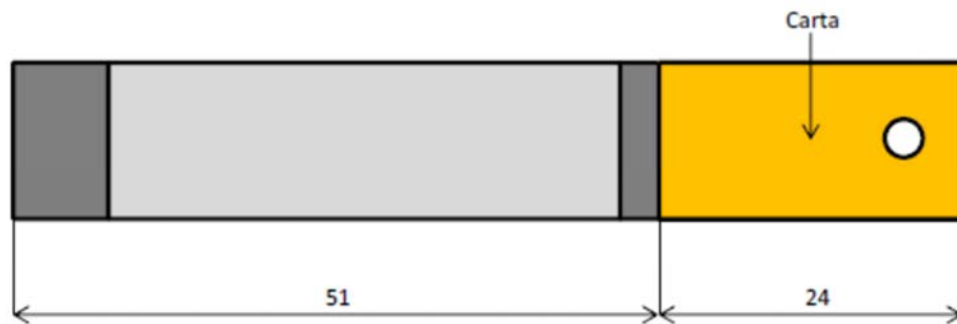


Fig. 6.35 – Applicazione di cinque strati di carta sulla barretta di alluminio a partire da 51 mm dalla punta fino alla fine della struttura. Lo spessore di uno strato di carta è circa pari a 0.1 mm .



Fig. 6.36 - Applicazione di cinque strati di carta sulla barretta di alluminio a partire da 51 mm dalla punta fino alla fine della struttura. Lo spessore di uno strato di carta è circa pari a 0.1 mm .

Si misura nuovamente (mediante un micrometro con la risoluzione di 0.01 mm) lo spessore del substrato di alluminio nella posizione *A* e nella posizione *B* indicate nella Fig. 6.35. Le misure forniscono i seguenti risultati:

- posizione *A*: 1.89 mm ;
- posizione *B*: 2.39 mm .

Si vede che lo spessore nella posizione B è aumentato di 0.5 mm rispetto alla misura precedente dato che lo spessore di uno strato di carta è circa pari a 0.1 mm e sono stati applicati cinque strati di carta.

6.2.7.3 Applicazione del nastro di rame 3M 1181

Come per il primo deposito di nitrato di alluminio, si mette quindi una rondella di plastica (M3) sopra la carta (si veda la Fig. 6.38) e, sopra ad essa, si posiziona uno strato di nastro di rame 3M 1181 con colla conduttiva da 48 mm dalla punta della barretta (cioè dalla fine dello strato di nitrato di alluminio, si veda la Fig. 6.31), con larghezza di circa 21 mm e per 3 mm di profondità (cioè fino a 51 mm dalla punta del materiale, dove iniziano i cinque strati di carta, si veda la Fig. 6.35) e poi per 26 mm (quindi oltre la fine della barretta, che finisce dopo 24 mm , si veda la Fig. 6.37) con larghezza 8 mm (quindi l'area dello strato di nastro di rame 3M 1181 è pari a $3 \times 20 + 8 \times 26\text{ mm}^2$).

Si fora quindi il nastro di rame.

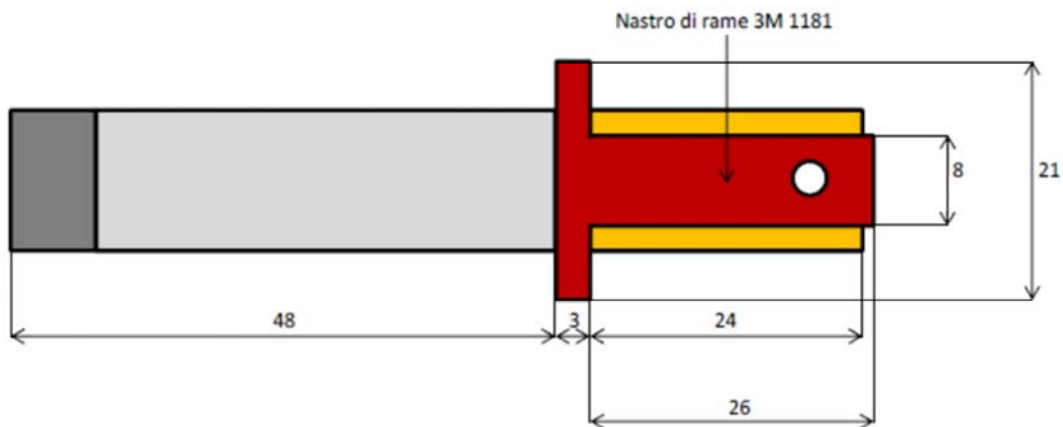


Fig. 6.37 – Applicazione del nastro di rame 3M 1181 alla barretta di alluminio.

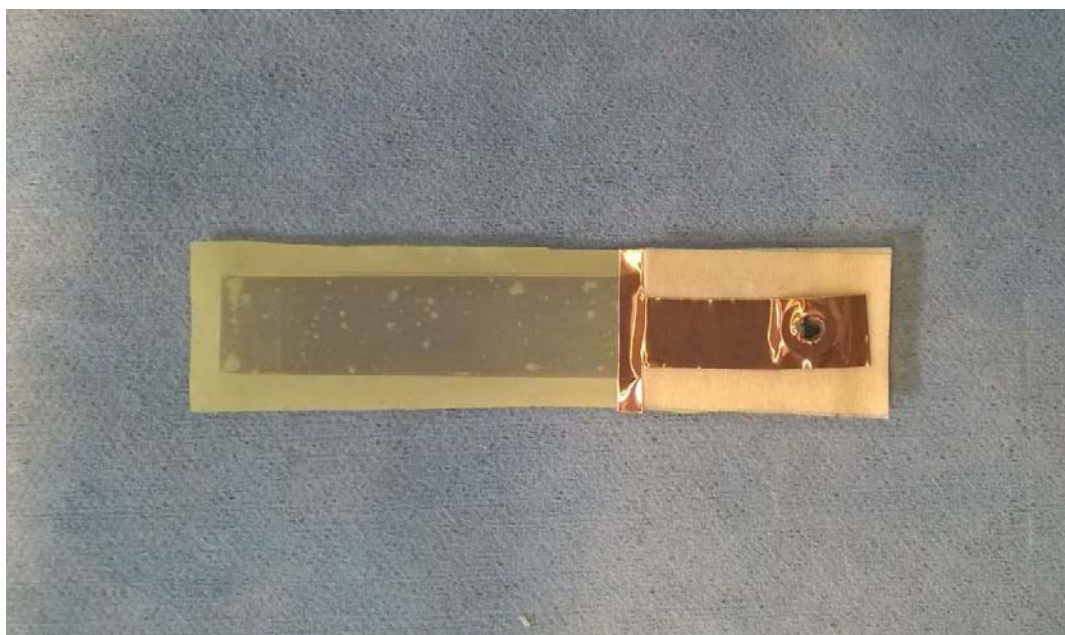


Fig. 6.38 – Applicazione del nastro di rame 3M 1181 alla barretta di alluminio. In corrispondenza del foro, sotto allo strato di nastro di rame è stata applicata una rondella M3.

6.2.7.4 Collegamenti elettrici

A questo punto sul sistema (si veda la Fig. 6.38) si collegano sull'elettrodo superiore e su quello inferiore due fili con capocorda ad occhiello, bloccati da una vite di plastica (M3). Alla fine (sopra ai capicorda) si pongono le guaine termorestringenti. In questo modo l'elettrodo superiore e l'elettrodo inferiore sono accessibili per la misura della tensione generata dal convertitore piezoelettrico in configurazione a trave a sbalzo.

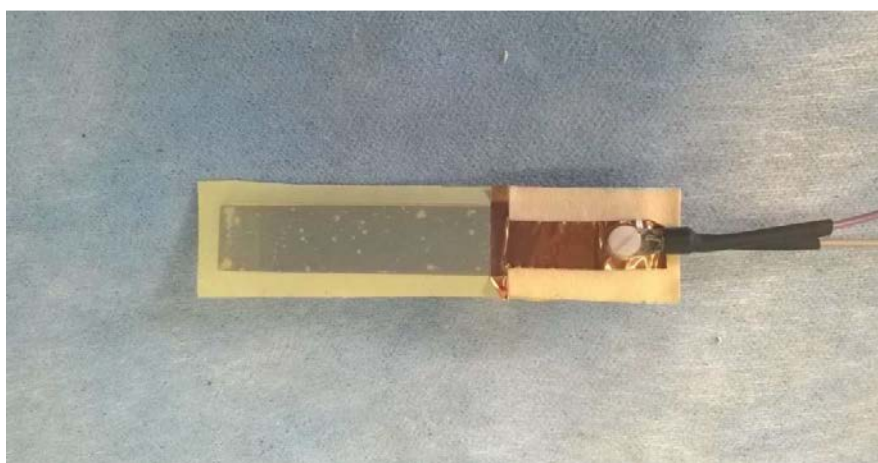


Fig. 6.39 – Collegamento di due fili mediante capocorda ad occhiello: uno sull'elettrodo superiore e uno sull'elettrodo inferiore, entrambi bloccati da una vite di plastica (M3). Alla fine (sopra ai capicorda), vengono poste le guaine termorestringenti.

Successivamente si verifica l'isolamento tra i due terminali (cioè tra elettrodo superiore ed elettrodo inferiore) e il collegamento elettrico tra nastro in rame (che è parte dell'elettrodo superiore) e terminale del filo ad esso collegato e tra alluminio (elettrodo inferiore) e terminale del filo ad esso collegato.

Si misura quindi la capacità tra i due elettrodi (in cui la superficie è definita dalla superficie del nastro in rame) mediante il ponte di misura RLC Metrix IX 3131: alla frequenza di 1 kHz , con cantilever collegato, si misurano 23.8 pF .

6.2.7.5 Applicazione della vernice conduttiva RS SCP 123-9911

Per quanto riguarda la verniciatura mediante vernice conduttiva in argento RS Silver Conductive Paint 123-9911, prima di eseguire tale operazione si apporta alla struttura (si veda la Fig. 6.39) la maschera in tre pezzi di carta in modo da poter verniciare solo la parte che si trova al di sopra dello strato di nitruro di alluminio (area libera pari a circa $12 \times 40\text{ mm}^2$).

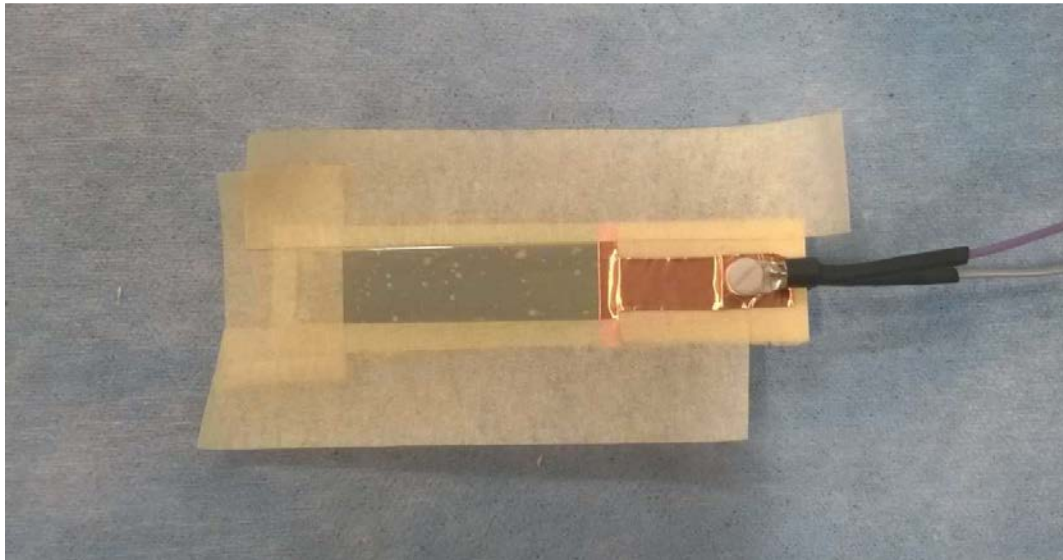


Fig. 6.40 – Apporto della maschera in tre pezzi di carta in modo da poter verniciare con la vernice conduttiva in argento RS Silver Conductive Paint 123-9911 solo la parte che si trova al di sopra dello strato di nitruro di alluminio (area libera pari a circa $12 \times 40\text{ mm}^2$).

Dopo aver agitato la confezione della vernice per circa 15 minuti, si spalma tale vernice sull'area posta al di sopra dello strato di materiale piezoelettrico descritta precedentemente e la si lascia asciugare per alcune ore.

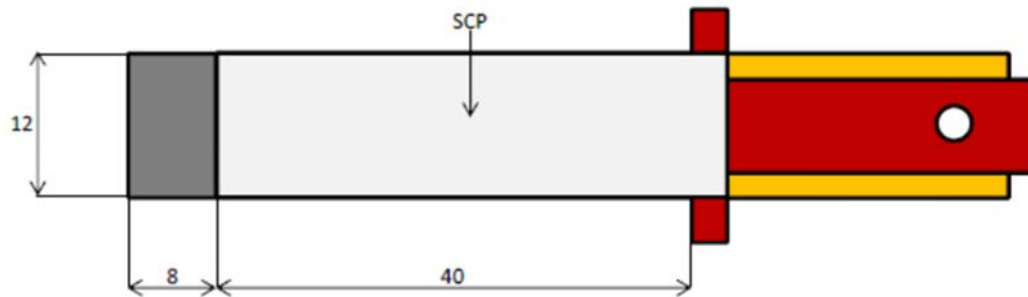


Fig. 6.41 – Area della barretta di alluminio in cui viene applicata la vernice conduttiva in argento RS Silver Conductive Paint 123-9911 (SCP).



Fig. 6.42 – Applicazione della vernice conduttiva in argento RS Silver Conductive Paint 123-9911 (SCP) alla barretta di alluminio.

La parte di rame + vernice conduttiva funge da elettrodo superiore. L'elettrodo inferiore è dato dal substrato di alluminio.

6.2.7.6 Configurazione finale e misura di capacità

Una volta asciugata la vernice conduttiva in argento RS Silver Conductive Paint 123-9911, si toglie la maschera in tre pezzi di carta . A questo punto, per completare la struttura a cantilever, si applicano ad essa (si veda la Fig. 6.42) sei strati di carta sopra e sotto la struttura, della lunghezza di circa 15 mm, a partire da 51 mm dalla punta (quindi fino a 66 mm dalla punta, si veda la Fig. 6.43).

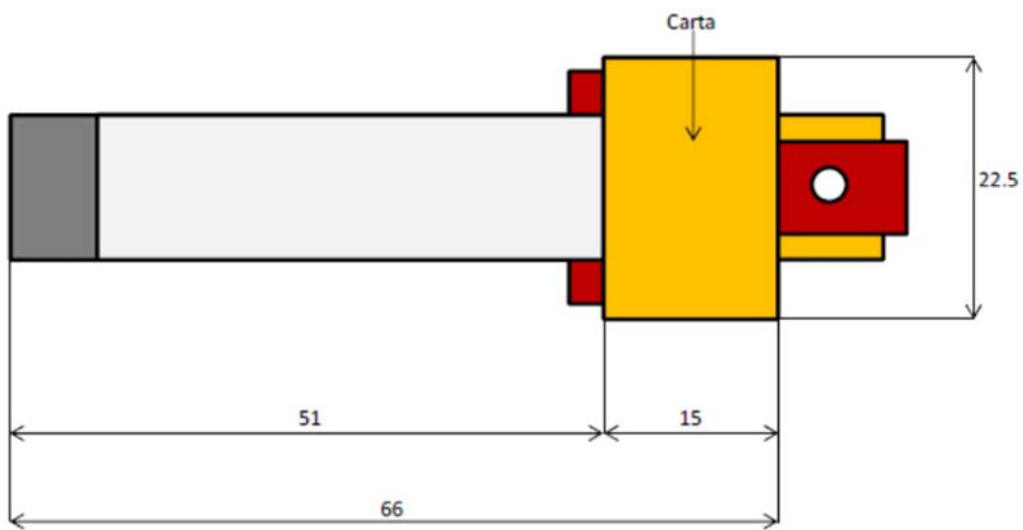


Fig. 6.43 - Applicazione di sei strati di carta sopra e sotto la struttura, della lunghezza di circa 15 mm , a partire da 51 mm dalla punta (quindi fino a 66 mm dalla punta).



Fig. 6.44 – Struttura completa del cantilever con convertitore piezoelettrico in nitruro di alluminio.

Si misura quindi la capacità totale tra i due elettrodi mediante il ponte di misura RLC Metrix IX 3131: alla frequenza di 1 kHz , con cantilever collegato, si misurano 520.5 pF .

Per una stima della capacità interna C_p dello strato di nitruro di alluminio (descritta dall'equazione (5.38)), è ancora possibile sottrarre dalla misura della capacità totale tra i due elettrodi la capacità misurata nel paragrafo 6.2.7.4 (dal momento che esse risultano essere in parallelo), la quale è pari a 23.8 pF . La capacità interna C_p dello strato di nitruro di alluminio è dunque pari a:

$$C_p = 520.5 - 23.8 = 496.7 \text{ pF} \quad (6.2)$$

6.2.7.7 Incastro allo shaker

L'incastro del convertitore piezoelettrico (si veda la Fig. 6.44) allo shaker elettrodinamico MODAL SHOP 2007E viene eseguita a 52 mm dalla punta della struttura.

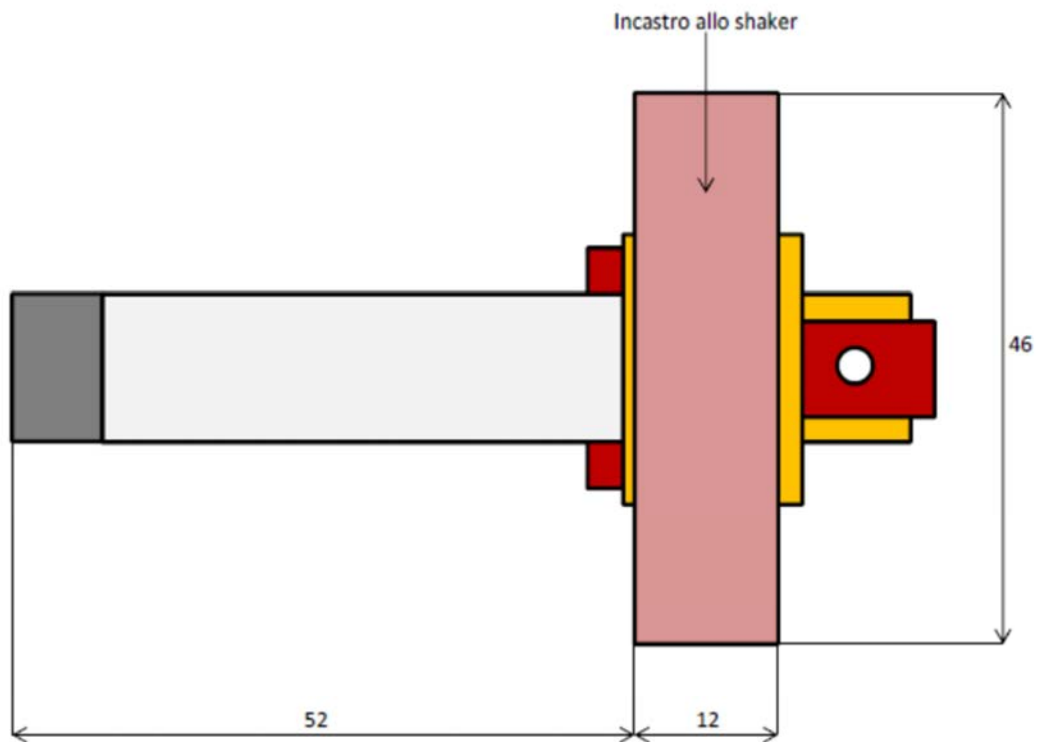


Fig. 6.45 – Incastro del convertitore piezoelettrico allo shaker elettrodinamico MODAL SHOP 2007E (si veda il paragrafo 7.2.3) eseguito a 52 mm dalla punta della struttura.

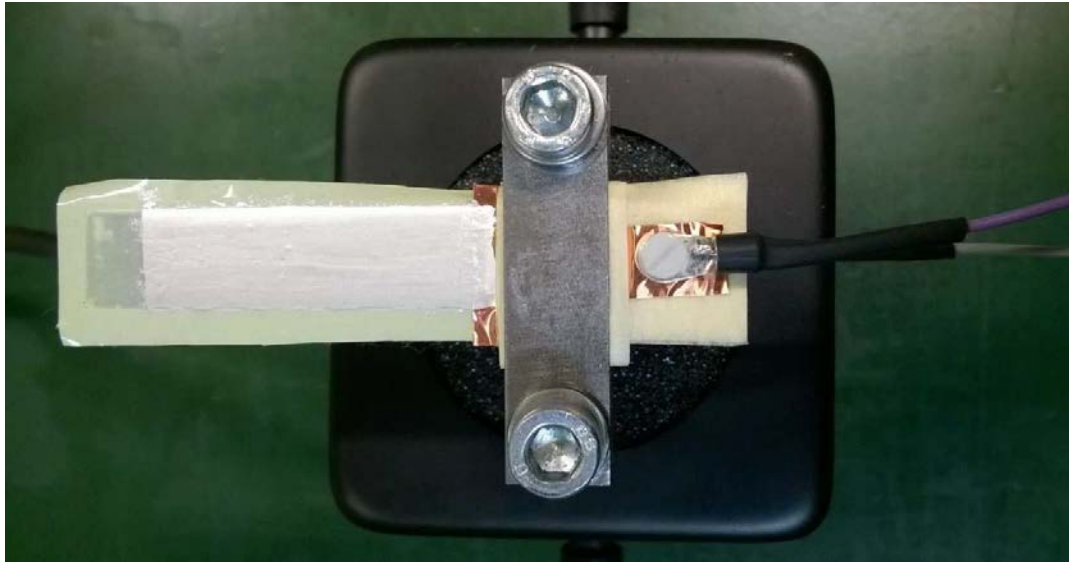


Fig. 6.46 – Incastro del convertitore piezoelettrico allo shaker elettrodinamico MODAL SHOP 2007E eseguito a 52 mm dalla punta della struttura

Si verificano nuovamente gli isolamenti tra i due elettrodi del convertitore e tra i terminali dei fili di collegamento e la massa dello shaker elettrodinamico MODAL SHOP 2007E.

Capitolo 7

Prove sul convertitore

7.1 Prova di laboratorio sul convertitore

7.1.1 Descrizione configurazione strumenti

La prova sul convertitore piezoelettrico basato sul nitrato di alluminio, *AlN*, in configurazione a trave a sbalzo è stata eseguita utilizzando la configurazione di seguito descritta:

Il segnale di tensione, un'onda sinusoidale regolabile in ampiezza e frequenza, viene prodotto da un generatore di funzioni Agilent 33120 A. Alla sua uscita viene collegato un amplificatore SmartAmp POWER AMPLIFIER 2100E21-100, il quale produce in uscita un segnale di corrente regolato in ampiezza e in frequenza. Il segnale di corrente prodotto viene quindi utilizzato per alimentare lo shaker elettrodinamico MODAL SHOP 2007E il quale riproduce il segnale in ingresso come vibrazione armonica verticale sulla sua tavola alla quale viene collegata la trave a sbalzo in cui è presente il film di materiale piezoelettrico. Alla parte vibrante di questo shaker è collegato un accelerometro piezoelettrico PCB 352C65 il cui segnale viene condizionato tramite un condizionatore di segnale PCB 480C02, il quale viene poi collegato mediante cavo coassiale al canale 2 (CH2) dell'oscilloscopio digitale YOKOGAWA DL9140 710310. Per monitorare l'andamento della tensione in uscita dal convertitore, ai morsetti elettrici della trave a sbalzo viene collegata una sonda passiva di tensione YOKOGAWA 700998, poi collegata al canale 1 (CH1) dell'oscilloscopio YOKOGAWA DL9140 710310.



Fig. 7.1 – Configurazione utilizzata per eseguire le misure sul convertitore piezoelettrico in configurazione a trave a sbalzo. A sinistra si vede il generatore di funzioni Agilent 33120 A, al centro l'amplificatore SmartAmp POWER AMPLIFIER 2100E21-100, mentre sulla destra si vede lo shaker elettrodinamico MODAL SHOP 2007E (su cui è montato il convertitore piezoelettrico), alla cui estremità superiore è collegato l'accelerometro piezoelettrico PCB 352C65 che poi si collega al condizionatore di segnale PCB 480C02, il quale poi è collegato al canale 2 (CH2) dell'oscilloscopio YOKOGAWA DL9140 710310. Ai morsetti elettrici della trave a sbalzo viene collegata una sonda passiva di tensione YOKOGAWA 700998, poi collegata al canale 1 (CH1) dell'oscilloscopio YOKOGAWA DL9140 710310.

7.1.2 Descrizione svolgimento della prova

Lo studio consiste nel sottoporre la struttura in cui è presente il convertitore piezoelettrico basato sul nitrato di alluminio, in configurazione a trave a sbalzo, a sollecitazioni di tipo vibratorio a diverse frequenze in modo da poter trovare il valore della frequenza di risonanza del sistema (vale a dire la frequenza in cui la tensione in uscita prodotta dal materiale piezoelettrico è massima).

Per convenzione, le prove vanno eseguite sottoponendo la struttura ad un'accelerazione pari a $1g$ ($g=9.8 m/s^2$), valore che nel dato accelerometro piezoelettrico PCB 352C65 corrisponde a una tensione, in valore efficace, di $100 mV$ (si vedano le sue specifiche tecniche descritte nel paragrafo 7.2.4). Questo valore, viene letto nel canale 2 (CH2) dell'oscilloscopio YOKOGAWA DL9140 710310. Poiché il sistema è in catena aperta, è necessario accertarsi che durante ogni misura eseguita (in cui si varia il valore della frequenza del segnale di alimentazione) si mantenga sempre tale valore e ciò viene di volta in volta eseguito variando l'ampiezza del segnale in uscita dal generatore di funzioni Agilent 33120 oppure aumentando il guadagno dell'amplificatore SmartAmp POWER AMPLIFIER 2100E21-100.

Si è studiato solo il modo di vibrazione 1, che è quello prevalente.

7.2 Strumenti utilizzati in laboratorio

Si descrivono ora gli strumenti utilizzati durante le prove, ponendo particolare attenzione alle loro specifiche tecniche.

7.2.1 Generatore di funzioni Agilent 33120 A

Il generatore di funzioni Agilent 33120 genera il segnale di tensione con cui poi si va ad alimentare tutto il sistema. Tramite esso è possibile generare il segnale di tensione con la forma d'onda desiderata (nel caso specifico di questo studio si tratta di una forma d'onda di tipo sinusoidale) e regolarne l'ampiezza (la quale va regolata per ottenere sullo shaker elettrodinamico MODAL SHOP 2007E sempre un valore di accelerazione delle vibrazioni pari a 1 g) e la frequenza (che va variata per trovare la frequenza di risonanza della struttura).

Le specifiche tecniche del generatore di funzioni Agilent 33120 A sono le seguenti:

- Risoluzione ampiezza (segno compreso): 12 bit;
- Frequenza di campionamento: 40 MS/s;
- Risoluzione frequenza: 10 μ Hz;
- Distorsione armonica massima: -70 dBc (decibel relativi al carrier);
- Distorsione armonica totale: <0.04%;
- Tensione massima in uscita: 20 Vpp;
- Precisione ampiezza (a 1 kHz): $\pm 1\%$ del valore di uscita specificato;
- Impedenza in uscita: 50 Ω ;
- Intervallo frequenza: 100 μ Hz-15 MHz.



Fig. 7.2 – Generatore di funzioni Agilent 33120 A

7.2.2 Amplificatore SmartAmp POWER AMPLIFIER 2100E21-100

L'amplificatore SmartAmp POWER AMPLIFIER 2100E21-100 serve a convertire il segnale di tensione proveniente dal generatore di funzioni Agilent 33120 in un segnale di corrente utile ad alimentare lo shaker elettrodinamico MODAL SHOP 2007E. Tale segnale può anche essere modificato in ampiezza per ottenere sullo shaker sempre un valore di accelerazione verticale di $1 g$.

Le specifiche tecniche dell'amplificatore SmartAmp POWER AMPLIFIER 2100E21-100 sono le seguenti:

- Efficienza (alla massima potenza): 92%;
- Corrente massima in uscita (valore di picco): 18 A;
- Potenza massima in uscita: 100 W;
- Distorsione armonica: <0.1%;
- Risposta in frequenza: 0.4-40000 Hz;
- Guadagno in tensione massimo: 20 dB;
- Impedenza in ingresso: 10 k Ω ;
- Impedenza in uscita: 30 k Ω .



Fig. 7.3 – Amplificatore SmartAmp POWER AMPLIFIER 2100E21-100

7.2.3 Shaker elettrodinamico MODAL SHOP 2007E

Lo shaker elettrodinamico MODAL SHOP 2007E serve per imprimere il moto vibratorio verticale alla base della trave a sbalzo su cui è stato depositato il film di nitruro di alluminio. Esso converte il segnale di corrente in ingresso (proveniente dall'amplificatore SmartAmp POWER AMPLIFIER 2100E21-100) in un moto vibratorio verticale con la stessa frequenza del segnale in ingresso e ampiezza proporzionale a quella del segnale in ingresso.

Il principio fondamentale di funzionamento dello shaker elettrodinamico è il seguente:

si ha una struttura denominata armatura costituita da un materiale ferromagnetico avvolto da una bobina di materiale conduttore, sull'estremità superiore del materiale ferromagnetico viene posta la cosiddetta tavola, costituita in genere da alluminio per minimizzarne il peso, su cui è possibile bloccare la trave che si vuole mettere in vibrazione. L'armatura è sostenuta da elementi flessionali che la collegano alla struttura di sostegno dello strumento. Pertanto armatura e struttura sono libere di muoversi tra di loro in maniera indipendente. All'interno della struttura di sostegno vi è un magnete permanente il cui flusso uscente verticalmente si richiude lungo il materiale ferromagnetico dell'armatura e lungo le pareti esterne della struttura di sostegno. Quando la bobina è percorsa da una corrente alternata si ha una forza diretta verticalmente ma alternativamente in versi opposti a causa dell'interazione tra il flusso costante prodotto dal magnete permanente e il flusso variabile prodotto dalla corrente alternata di alimentazione.

Le specifiche tecniche dello shaker elettrodinamico MODAL SHOP 2007E sono le seguenti:

- Forza massima in uscita (sinusoidale, valore di picco): 31 N;
- Forza massima in uscita (forma d'onda generica, valore di picco): 22 N;
- Forza massima in uscita (impulso, valore di picco): 67 N;
- Intervallo di frequenza: 0-9 kHz;
- Accelerazione massima (guidata, valore di picco): 27 g;
- Accelerazione massima (risonanza, valore di picco): 120 g;
- Accelerazione massima (impulso, valore di picco): 190 g;
- Corrente massima in entrata (valore efficace): 8.5 A.



Fig. 7.4 – Shaker elettrodinamico MODAL SHOP 2007E su cui viene montato il convertitore piezoelettrico in configurazione a trave a sbalzo.

7.2.4 Accelerometro piezoelettrico PCB 352C65

L'accelerometro piezoelettrico PCB 352C65 serve a misurare l'accelerazione cui è sottoposta la base su cui è posizionato il convertitore piezoelettrico in configurazione a trave a sbalzo. Il suo segnale viene poi inviato al condizionatore di segnale PCB 480C02.

Il principio fondamentale di funzionamento di un accelerometro piezoelettrico è il seguente:

una massa viene sospesa su di un cristallo di materiale piezoelettrico. In presenza di un'accelerazione la massa (che presenta una certa inerzia) comprime il cristallo di materiale piezoelettrico, il quale genera un segnale elettrico di tensione proporzionale allo sforzo meccanico di compressione cui è sottoposto (effetto piezoelettrico diretto).

Per funzionare correttamente, l'accelerometro deve essere alimentato da corrente costante mediante il condizionatore di segnale PCB 480C02.

Le specifiche dell'accelerometro piezoelettrico PCB 352C65 sono le seguenti:

- Sensibilità ($\pm 10\%$): 100 mVrms/g;
- Intervallo di misurazione accelerazione (valore di picco): ± 50 g;
- Intervallo di frequenza ($\pm 5\%$): 0.5-10000 Hz;
- Intervallo di frequenza ($\pm 10\%$): 0.3-12000 Hz;
- Intervallo di frequenza (± 3 dB): 0.2-20000 Hz;
- Risoluzione (valore efficace) (nell'intervallo 1-10000 Hz): 0.00016 g;
- Tensione DC di eccitazione: 18-30 V;
- Corrente costante di eccitazione: 2-20 mA;
- Impedenza in uscita: $\leq 300 \Omega$.



Fig. 7.5 – Accelerometro piezoelettrico PCB 352C65



Fig. 7.6 – Accelerometro piezoelettrico PCB 352C65, dettaglio

7.2.5 Condizionatore di segnale PCB 480C02

Il condizionatore di segnale PCB 480C02 serve ad alimentare a corrente costante l'accelerometro piezoelettrico PCB 352C65. Inoltre esso esegue un disaccoppiamento tra sensore e ingresso dell'oscilloscopio in modo da far sì che il segnale possa essere letto correttamente (ad esempio eliminando la tensione di bias del sensore): esso riceve in ingresso il segnale proveniente dall'accelerometro piezoelettrico e, dopo averlo elaborato e monitorando che non ci siano malfunzionamenti del sensore, lo invia al canale 2 (CH2) dell'oscilloscopio digitale YOKOGAWA DL9140 710310.

Le specifiche del condizionatore di segnale PCB 480C02 sono le seguenti:

- Intervallo di frequenza: 0.05-500000 Hz;
- Guadagno in tensione ($\pm 2\%$): 1:1;
- Tensione DC di eccitazione (al sensore): 25-29 V;
- Corrente costante di eccitazione (al sensore): 2-3.2 mA;
- Offset DC: <30 mV.

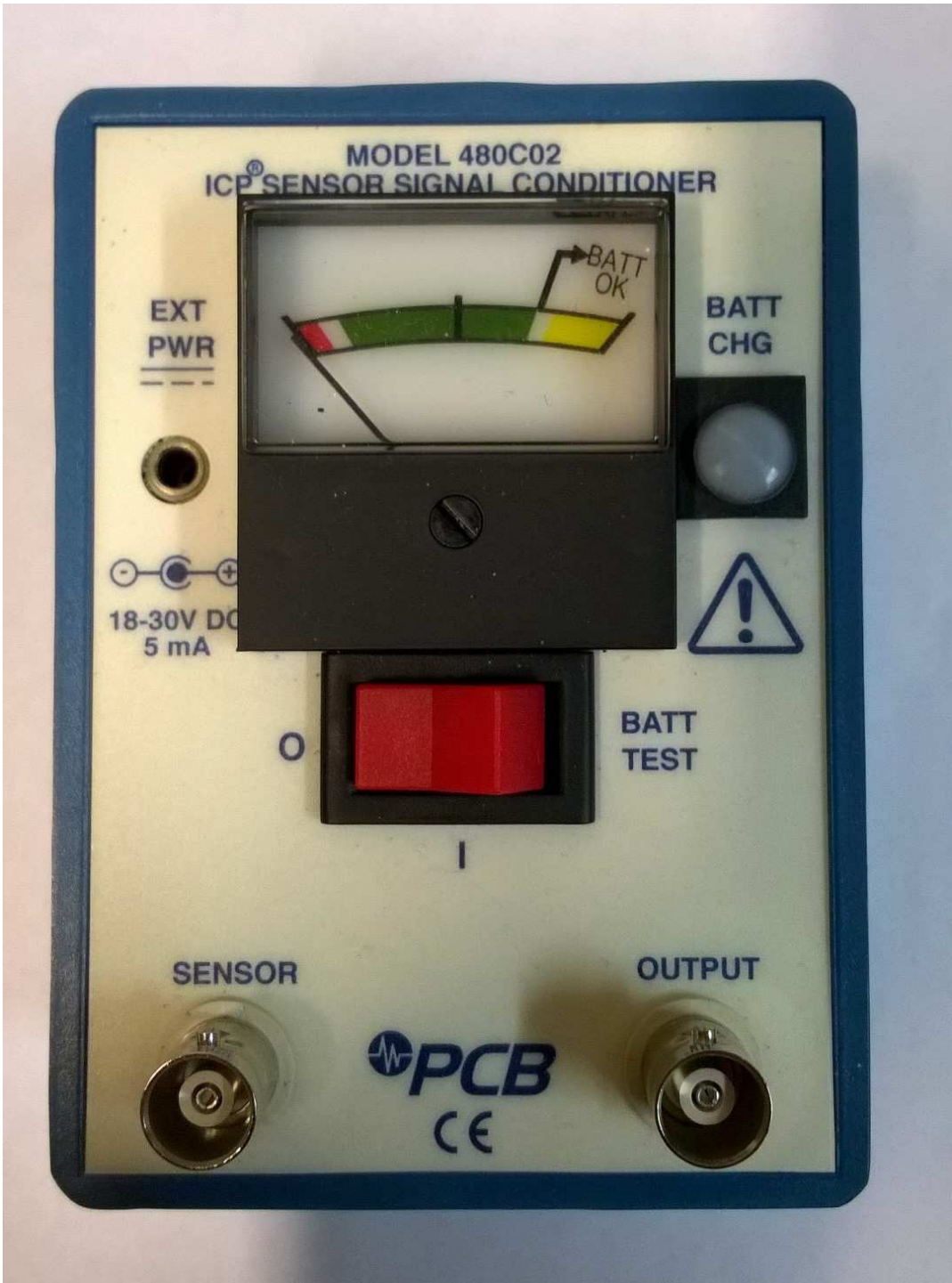


Fig. 7.7 – Condizionatore di segnale PCB 480C02

7.2.6 Oscilloscopio digitale YOKOGAWA DL9140 710310

L'oscilloscopio YOKOGAWA DL9140 710310 serve a visualizzare i segnali di tensione provenienti:

- 1) nel canale 1 (CH1) dalla sonda passiva di tensione YOKOGAWA 700998 collegata ai morsetti elettrici della trave a sbalzo. In esso si può visualizzare la tensione in uscita prodotta dalle vibrazioni del film di nitruro di alluminio;
- 2) nel canale 2 (CH2) la tensione proveniente dal condizionatore di segnale 480C02. In esso si può visualizzare la tensione corrispondente all'accelerazione misurata dall'accelerometro PCB 352C65.

Le specifiche tecniche dell'oscilloscopio digitale YOKOGAWA DL9140 710310 sono le seguenti:

- Frequenza massima di campionamento: 5 GS/s;
- Banda di frequenza: 1 GHz;
- Impedenza in ingresso: $1\text{ M}\Omega (\pm 1.0\%) + 20\text{ pF}$
 $50\ \Omega (\pm 1.5\%)$;
- Incertezza di misura : $\pm(1.5\%$ di 8 divisioni + incertezza sull'offset DC);
- Incertezza sull'offset DC: da 2 mV/div a 50 mV/div: $\pm(1\%$ valore impostato +0.2 mV)
da 100 mV/div a 500 mV/div: $\pm(1\%$ valore impostato +2 mV)
da 1 V/div a 5 V/div: $\pm(1\%$ valore impostato +20 mV).



Fig. 7.8 – Oscilloscopio digitale YOKOGAWA DL9140 710310

7.2.7 Sonda passiva di tensione YOKOGAWA 700998

La sonda passiva di tensione YOKOGAWA 700998 serve a misurare la tensione sviluppata dal sistema in cui è presente il convertitore piezoelettrico in configurazione a trave a sbalzo. Essa si collega al canale 1 (CH1) dell'oscilloscopio YOKOGAWA DL9140 710310.

Le specifiche della sonda passiva di tensione YOKOGAWA 700998 sono le seguenti:

- Impedenza in ingresso: 10 M Ω ;
- Rapporto di attenuazione: 1/10;
- Banda passante: 500 MHz;
- Tensione massima (valore di picco): 600 V.



Fig. 7.9 – Sonda passiva di tensione YOKOGAWA 700998

Capitolo 8

Caratteristica della tensione in funzione della frequenza

Per calcolare una stima della frequenza di risonanza del convertitore piezoelettrico a trave a sbalzo è possibile utilizzare la formula (5.51). Poiché lo spessore dello strato di materiale piezoelettrico (circa $10 \mu m$) è molto più piccolo rispetto allo spessore del substrato di alluminio (circa $2 mm$), si possono usare i dati relativi alla parte del substrato di alluminio anziché calcolare tutti i dati relativi alla trave di materiale composito.

8.1 Primo deposito di nitrato di alluminio

Per il primo deposito di nitrato di alluminio descritto nella sezione 6.1 (atmosfera costituita solamente da azoto, si veda il paragrafo 6.1.4), i dati relativi alla trave di alluminio sono i seguenti:

- Lunghezza della parte a sbalzo del cantilever: $L=52 mm$;
- Spessore: $h_s=1.87 mm$;
- Densità: $\rho_{Al}=2700 kg/m^3$;
- Modulo di Young: $Y_{sAl}=64 GPa$.

Come detto nel paragrafo 7.1.2, si è studiato solo il modo di vibrazione 1, che è quello principale.

Quindi, considerando solamente il modo di vibrazione 1 si ha che la stima della pulsazione di risonanza è pari a:

$$\omega_1 = \lambda_1^2 \frac{h_s}{L^2} \sqrt{\frac{Y_s}{12\rho}} = 1.875^2 \frac{1.87 \cdot 10^{-3}}{(52 \cdot 10^{-3})^2} \sqrt{\frac{64 \cdot 10^9}{12 \cdot 2700}} \approx 3417 rad/s \quad (8.1)$$

dove $\lambda_1=1.875$ è il primo numero adimensionale di frequenza ottenuto dall'equazione caratteristica (5.47).

Alla pulsazione di risonanza $\omega_1=3417 rad/s$ corrisponde la frequenza:

$$f_1 = \frac{\omega_1}{2\pi} = \frac{3417}{2\pi} \approx 544 Hz \quad (8.2)$$

Per quanto riguarda il primo deposito di nitrato di alluminio, si misura, mediante il metodo descritto nel capitolo 7, la tensione a vuoto in uscita in funzione della frequenza di vibrazione del cantilever in seguito all'applicazione di vibrazioni con un'accelerazione di circa 1 g (applicate mediante lo shaker elettrodinamico MODAL SHOP 2007E). I risultati ottenuti sono riportati in Fig. 8.1.

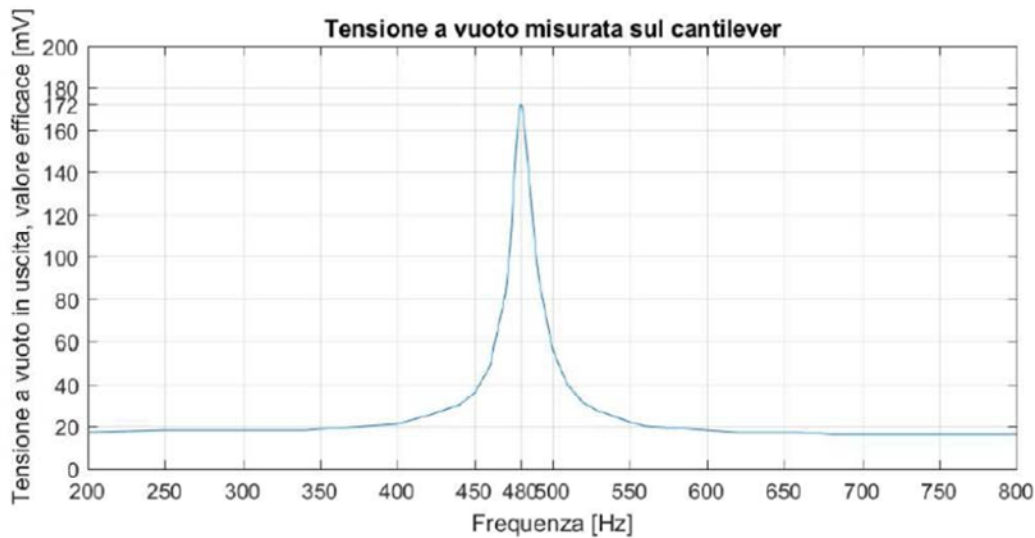


Fig. 8.1 – Andamento della tensione in uscita dal cantilever in funzione della frequenza di vibrazione. Si nota che la frequenza di risonanza è pari a 480 Hz.

La frequenza di risonanza ottenuta sperimentalmente è pari a 480 Hz, non distante dal valore stimato di 544 Hz.

In corrispondenza della frequenza di risonanza si misura la tensione anche con un carico resistivo collegato al cantilever. In particolare si sceglie un valore di resistenza il più vicino possibile a quello che consente il massimo trasferimento di potenza, ovvero un valore prossimo al valore del modulo dell'impedenza capacitiva interna X_p del convertitore (la configurazione a trave a sbalzo presenta infatti la capacità interna C_p dello strato di nitrato di alluminio, del nastro in poliestere e del contatto, si veda la sezione 5.1, assieme alla piccola capacità ad essa in parallelo definita dalla superficie del nastro in rame). Dal momento che la capacità interna del convertitore piezoelettrico è pari a 499.6 pF (si veda il paragrafo 6.1.7.6) e la frequenza di risonanza della struttura è pari a 480 Hz, il valore che risulta è:

$$X_p = \frac{1}{2\pi \cdot f_r \cdot C_p} = \frac{1}{2\pi \cdot 480 \cdot 499.6 \cdot 10^{-12}} \simeq 664 \text{ k}\Omega \quad (8.3)$$

dove f_r è la frequenza di risonanza.

Perciò si è eseguita una misura con una resistenza di carico R_l pari a 678 kΩ e una frequenza delle vibrazioni pari a 480 Hz, in corrispondenza dei quali si è rilevata una tensione di 119 mV (valore efficace).

8.2 Secondo deposito di nitrato di alluminio

Per il secondo deposito di nitrato di alluminio descritto nella sezione 6.2 (atmosfera costituita per il 20% da argon e per l'80% da azoto), i dati relativi alla trave di alluminio sono i seguenti:

- Lunghezza della parte a sbalzo del cantilever: $L=52\text{ mm}$;
- Spessore: $h_s=1.87\text{ mm}$;
- Densità: $\rho_{Al}=2700\text{ kg/m}^3$;
- Modulo di Young: $Y_{sAl}=64\text{ GPa}$.

Essendo tali valori pari a quelli studiati nella sezione 8.1, il valore di frequenza di risonanza stimata è pari a 544 Hz .

Anche per quanto riguarda il secondo deposito di nitrato di alluminio, si misura, mediante il metodo descritto nel capitolo 7, la tensione a vuoto in uscita in funzione della frequenza di vibrazione del cantilever in seguito all'applicazione di vibrazioni con un'accelerazione di circa 1 g (applicate mediante lo shaker elettrodinamico MODAL SHOP 2007E). I risultati ottenuti sono riportati in Fig. 8.2.

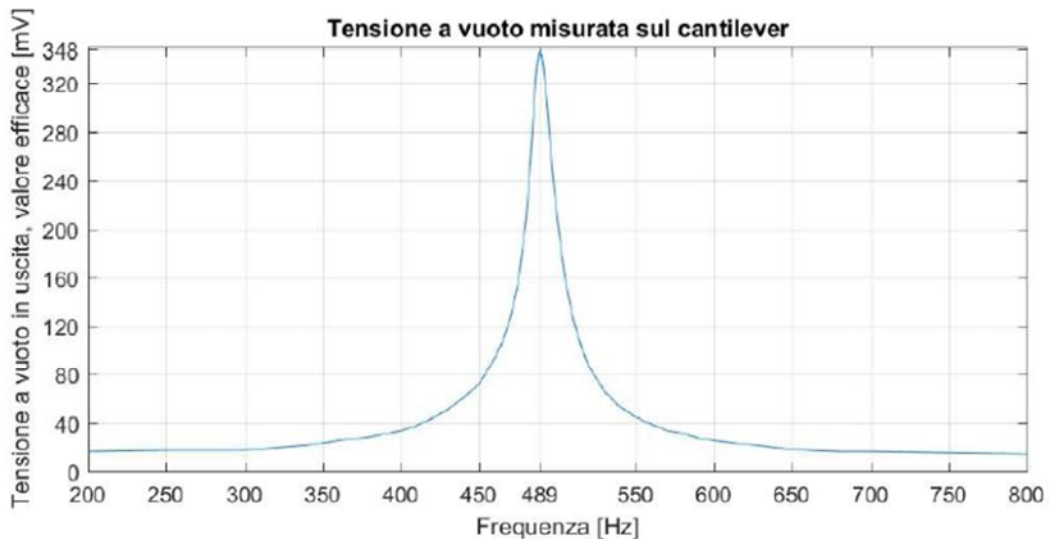


Fig. 8.2 – Andamento della tensione in uscita dal cantilever in funzione della frequenza di vibrazione. Si nota che la frequenza di risonanza è pari a 489 Hz .

La frequenza di risonanza ottenuta sperimentalmente è pari a 489 Hz , non distante dal valore stimato di 544 Hz .

Anche in questo caso si misura la tensione con un carico resistivo collegato al cantilever tale da consentire il massimo trasferimento di potenza (si veda la sezione 8.1). Dal momento che la capacità interna del convertitore piezoelettrico è pari a 520.5 pF (si veda il paragrafo 6.2.7.6 e la frequenza di risonanza della struttura è pari a 489 Hz , il valore che risulta è:

$$X_p = \frac{1}{2\pi \cdot f_r \cdot C_p} = \frac{1}{2\pi \cdot 489 \cdot 520.5 \cdot 10^{-12}} \simeq 625\text{ k}\Omega \quad (8.4)$$

dove f_r è la frequenza di risonanza.

Perciò si è eseguita una misura con una resistenza di carico R_l pari a $678\text{ k}\Omega$ e una frequenza delle vibrazioni pari a 489 Hz , in corrispondenza dei quali si è rilevata una tensione di 259 mV (valore efficace).

I valori di tensione a vuoto (e a carico) in uscita dal cantilever alla frequenza di risonanza sono significativamente maggiori rispetto a quelli misurati sul convertitore ottenuto dal primo deposito di nitruro di alluminio (si veda la sezione 8.1).

Capitolo 9

Conclusioni

In base ai risultati ottenuti si può concludere che, a parità degli altri parametri di deposizione, un deposito di nitrato di alluminio effettuato in atmosfera di puro azoto presenta caratteristiche piezoelettriche peggiori rispetto ad un deposito in cui l'atmosfera è costituita al 20% da argon e all'80% da azoto. Ciò è in accordo con quanto presente in letteratura [7] in cui viene indicato circa l'80% come percentuale ottimale di azoto per quanto riguarda le caratteristiche piezoelettriche del deposito di nitrato di alluminio. Si è ottenuta una tensione a vuoto in uscita dal cantilever pari a 348 mV (valore efficace), valore interessante in vista di prove future, in cui per aumentare la tensione a vuoto in uscita dal convertitore si potrebbe pensare di realizzare un deposito di nitrato di alluminio con pressioni in camera diverse, vicine a 0.5 Pa, e con concentrazioni di azoto diverse, vicine all'80%.

Bibliografia

- [1] D. Desideri, *Lectures of Electrical and electromagnetic micro/nanodevices*, Italia, Università degli Studi di Padova, 2017.
- [2] F. Medjani, R. Sanjinés, G. Allidi, A. Karimi, “Effect of substrate and bias voltage on the crystallite orientation in RF magnetron sputtered AlN thin films”, *Thin Solid Films*, vol.515, n.1, pp.260-265, 25 Settembre 2006.
- [3] C. Han, D. Chen, Y. Zhang, D. Xu, Y. Liu, E. Siu-Wai Kong, Y. Zhang, “High Potential Columnar Nanocrystalline AlN Films Deposited by RF Reactive Magnetron Sputtering”, *Nano-Micro Letters*, vol.4, n.1, pp.40-44, Marzo 2012.
- [4] J. Olivares, S. González-Castilla, M. Clement, A. Sanz-Hervás, L. Vergara, J. Sangrador, E. Iborra, “Combined assessment of piezoelectric AlN films using X-ray diffraction, infrared absorption and atomic force microscopy”, *Diamond & Related Materials*, vol.16, n.4-7, pp.1421-1424, Aprile-Luglio 2007.
- [5] H.C. Lee, J.Y. Lee, “Effects of sputtering pressure and nitrogen concentration on the preferred orientation of AlN thin films”, *Journal of materials science: materials in electronics*, vol.5, n.4, pp.221-225, Agosto 1994.
- [6] V. Mortet, M. Nesladek, J. D’Haen, G. Vanhoyland, O. Elmazria, M. B. Assouar, P. Alnot, M. D’Olieslaeger, “Deposition of Aluminium Nitride Film by Magnetron Sputtering for Diamond-Based Surface Acoustic Wave Applications”, *Physica Status Solidi (a)*, vol.193, n.3, pp.482-488, 17 Ottobre 2002.
- [7] K. Hsun Chiu, J. Heng Chen, H. Ren Chen, R. Shing Huang, “Deposition and characterization of reactive magnetron sputtered aluminium nitride thin films for bulk acoustic wave resonator”, *Thin Solids Films*, vol.515, n.11, pp.4819-4825, 9 Aprile 2007.
- [8] A. Ababneh, U. Schmid, J. Hernando, J.L. Sánchez-Rojas, H. Seidel, “The influence of sputter deposition parameters on piezoelectric and mechanical properties of AlN thin films”, *Materials Science and Engineering B*, vol.172, n.3, pp.253-258, 15 Settembre 2010.
- [9] R.D. Gould, S.A. Awan, “Dielectric properties of AlN_x thin films prepared by RF magnetron sputtering of Al using a N₂/Ar sputtering gas mixture”, *Thin Solid Films*, vol.469-470, pp.184-189, 22 Dicembre 2004.
- [10] L. B. Rowland, R. S. Kern, S. Tanaka, R. F. Davis, “Aluminium nitride/silicon carbide multilayer heterostructure produced by plasma-assisted, gas-source molecular beam epitaxy”, *Applied Physics Letters*, vol.62, n.25, pp.3333-3335, 21 Giugno 1993.
- [11] A. Artieda, M. Barbieri, C. Silviu Sandu, P. Mural, “Effect of substrate roughness on *c*-oriented AlN thin films”, *Journal of Applied Physics*, vol.105, n.2, pp.1-6, 15 Gennaio 2009.
- [12] C. Stoeckel, C. Kaufmann, R. Hahn, R. Schulze, D. Billep, T. Gessner, “Pulsed DC magnetron sputtered piezoelectric thin film aluminium nitride – Technology and piezoelectric properties”, *Journal of Applied Physics*, vol.116, n.3, pp.1-7, 21 Luglio 2014.

- [13] M.A. Dubois, P. Muralt, "Stress and piezoelectric properties of aluminium nitride thin films deposited onto metal electrodes by pulsed direct current reactive sputtering", *Journal of Applied Physics*, vol.89, n.11, pp.6389-6395, 1 Giugno 2001.
- [14] M. Ohring, *Materials science of thin film, 2nd edition*, Academic Press, 2001, pp.145-183.
- [15] B. Chapman, *Glow Discharge Processes*, Stati Uniti d'America, John Wiley & Sons, 1980, pp.49-50.
- [16] P.J. Kelly, R.D. Arnell, "Magnetron sputtering: a review of recent developments and applications", *Vacuum*, vol.56, n.3, pp.159-172, Marzo 2000.
- [17] H.P. Loebel, M. Klee, C. Metzmacher, W. Brand, R. Milson, P. Lok, "Piezoelectric thin AlN films for bulk acoustic wave (BAW) resonators", *Materials Chemistry and Physics*, vol.79, n.2-3, pp.143-146, 10 Aprile 2003.
- [18] Q.P. Wei, X.W. Zhang, D.Y. Liu, J. Li, K.C. Zhou, D. Zhang, Z.M. Yu, "Effects of sputtering pressure on nanostructure and nanomechanical properties of AlN films prepared by RF reactive sputtering", *Transaction of Nonferrous Metals Society of China*, vol.24, n.9, pp.2845-2855, Settembre 2014.
- [19] E. Särhammar, E. Strandberg, N. Martin, T. Nyberg, "Sputter rate distribution and compositional variations in films sputtered from elemental and multi-element targets at different pressures", *International Journal of Materials Science and Applications*, vol.3, n.2, pp.29-36, Marzo 2014.
- [20] P.A. Steinman, T. Spalvins, "Influence of the Deposition Conditions on Radiofrequency Magnetron Sputtered MoS₂ Films", *NASA Technical paper*, n.2294, pp.1-7, Aprile 1990.
- [21] E. Penilla, J. Wang, "Pressure and Temperature Effects on Stoichiometry and Microstructure of Nitrogen-Rich TiN Thin Films Synthesized via Reactive Magnetron DC-Sputtering", *Journal of Nanomaterials*, vol.2008, n.267161, pp.1-9, 11 Gennaio 2008.
- [22] A. Erturk, D. Inman, "A Distributed Parameter Electromechanical Model for Cantilevered Piezoelectric Energy Harvesters", *Journal of Vibration and Acoustics*, vol.130, n.4, pp.1-15, Agosto 2008.
- [23] A. Erturk, D. Inman, "On mechanical modeling of cantilevered piezoelectric vibration energy harvesters", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol.19, n.11, pp.1311-1325, Novembre 2008.
- [24] L. Meirovitch, *Fundamentals of Vibrations*, Singapore, McGraw-Hill, 2001, cap.8.