

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRENTO
Facoltà di Scienze Matematiche, Fisiche e Naturali



Corso di Laurea in Fisica Applicata

Elaborato Finale

**REALIZZAZIONE E CARATTERIZZAZIONE
DI CONDENSATORI AD ALTA RESISTENZA
DIELETTRICA MEDIANTE DEPOSIZIONE
DI FILM SOTTILI**

Relatore:
Prof. Prodi Giovanni Andrea

Correlatori:
Dott. Bonaldi Michele
Dott.ssa Laidani Nadhira Bensaada

Laureando:
Penasa Francesco

Anno Accademico 2002-2003

Indice

Introduzione	4
1. Realizzazione dei condensatori	6
1.1 Progettazione dei condensatori	6
1.1.1 Processo di deposizione per sputtering catodico.....	6
1.1.1.1 Processo di spruzzamento catodico a radio frequenza (RF sputtering)	9
1.1.1.2 Procedimenti speciali di spruzzamento.....	10
1.1.2 Estensione superficiale delle deposizioni: mascheratura substrati	11
1.1.3 Spessore dei film.....	13
1.2 Apparato sperimentale: camera di deposizione.....	15
1.2.1 Pre-camera: introduzione dei campioni	15
1.2.2 Elettrodi.....	17
1.2.3 Sistema di refrigerazione ad acqua	19
1.2.4 Apparato di generazione del plasma	20
1.2.5 Linee di ingresso gas e controllo pressione.....	20
1.2.6 Sistema di pompaggio	22
1.3 Fase di deposizione	24
1.3.1 Preparazione chimica dei campioni	24
1.3.2 Montaggio dei substrati sul portacampioni.....	25
1.3.3 Impostazione dei parametri in preparazione al processo di deposizione.....	25
1.3.4 Processo di pre-sputtering.....	26
1.3.5 Determinazione della velocità di deposizione.....	26
1.3.6 Analisi sui campioni tra le 3 fasi di deposizione.....	28
1.3.6.1 Profilometro (KLA-Tencor P-15 stylus profilometer).....	28
1.3.6.2 Spettroscopia Auger (PHI Modello 4200 Thin Film Analyzer).....	30
2. Caratterizzazione dei condensatori	32

2.1 Metodi e modalità di misurazione dei parametri elettrici	32
2.2 Misure di capacità	34
2.3 Misure di resistenza	35
2.4 Misure di rigidità elettrica.....	36
2.5 Misure di resistenza ad alta tensione.....	37
3. Analisi dei dati	41
3.1 Primi risultati.....	41
3.2 Analisi al microscopio ottico del film dielettrico.....	41
3.3 Analisi Auger del film dielettrico	44
3.4 Spettroscopia di massa di ioni secondari: SIMS.....	45
3.5 Analisi SIMS del film dielettrico	45
3.6 Misure di capacità e resistenza: modifica strutturale dei condensatori	47
3.7 Misure di resistenza in DC: resistività dielettrico	52
3.8 Misure di rigidità dielettrica: tensione di breakdown	53
4. Conclusioni	55
4.1 Analisi del modello di condensatore utilizzato in fase di caratterizzazione.....	56
4.2 Per un successivo sviluppo dei condensatori	59
5. Bibliografia	61
Ringraziamenti	62

Introduzione

Il presente documento descrive l'attività svolta nell'ambito di uno stage di formazione professionale svolto con la collaborazione della Dott.ssa Laidani Nadhira Bensaada, presso la divisione Fisica Chimica delle Superfici (FCS) dell'istituto di ricerca ITC-IRST di Trento.

L'attività è stata rivolta alla progettazione e realizzazione tramite deposizione di film sottili su substrato in silicio, di condensatori con le seguenti caratteristiche:

- elevata resistenza dielettrica: misura la capacità dei condensatori di sopportare elevati voltaggi senza degradarsi e divenire conduttori. In particolare si punta a sviluppare condensatori in grado di immagazzinare campi elettrici $> 10 \frac{MV}{m}$;
- bassa perdita dielettrica: in un campo elettrico alternato, la perdita di energia elettrica sotto forma di calore deve essere minima. Questo garantisce un basso livello di rumore termico prodotto dal condensatore.

Lo studio di tali modelli di condensatori fa parte del progetto di sviluppo del rivelatore AURIGA di onde gravitazionali presso i Laboratori Nazionali di Legnaro (PD) dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN).

Il progetto AURIGA punta al rilevamento delle onde gravitazionali che arrivano sulla terra dall'universo. Il rivelatore è basato su un oscillatore meccanico il cui modo fondamentale di oscillazione è eccitato dal passaggio delle onde gravitazionali. La conversione del segnale meccanico della vibrazione in un segnale elettromagnetico viene eseguita tramite dei trasduttori capacitivi che utilizzati con carica costante danno una trasduzione (spostamento armature) proporzionale alla tensione data dal campo elettrico di polarizzazione. I fattori chiave per realizzare una catena

di trasduzione efficiente sono un elevato campo elettrico di operazione e un basso contributo di rumore termico.

Nella presente relazione viene descritto il processo di sviluppo e costruzione dei condensatori a cui, successivamente, seguirà una fase di caratterizzazione elettrica, base per un successivo ulteriore sviluppo degli stessi.

1. Realizzazione dei condensatori

1.1 Progettazione dei condensatori

Si è deciso di realizzare dei condensatori piani le cui facce fossero costituite da film di alluminio depositati tramite processo di sputtering su substrato di silicio. È stato scelto l'alluminio come materiale conduttore in quanto è il più largamente usato in questo tipo di applicazioni, per la sua bassa resistività e la buona compatibilità con materiali isolanti quali Si e SiO₂. La scelta del materiale isolante da utilizzare come dielettrico da frapporre tra le due armature è stata effettuata tra due possibili candidati: l'allumina e il vetro (SiO₂); si è deciso di utilizzare quest'ultimo per le sue buone proprietà dielettriche e per la sua pronta disponibilità in laboratorio. Il dielettrico è stato depositato anch'esso tramite processo di sputtering.

Le deposizioni di alluminio e SiO₂ costituenti la struttura fondamentale dei condensatori sono state effettuate nella divisione di Fisica Chimica delle Superfici (FCS) presso l'istituto di ricerca ITC-IRST di Trento. Nel laboratorio integrato ultra alto vuoto (UHV) sono presenti due strumenti per analisi di superficie (XPS e ToF-SIMS) interconnessi in ultra alto vuoto fra di loro e una camera di deposizione in grado di depositare film sottili utilizzando processi di sputtering catodico tramite plasma in radiofrequenza (RF Sputtering).

1.1.1 Processo di deposizione per sputtering catodico

Esistono vari processi di deposizione di strati sottili in vuoto e tutti sono costituiti da elementi di base quali:

- una sorgente del materiale da depositare;
- un mezzo per apportarne l'energia necessaria ad estrarne e trasferirne gli atomi o le molecole di superficie;

- un substrato su cui si effettua il deposito.

Le varie tecniche differiscono essenzialmente per il modo di estrazione e trasferimento del materiale da depositare e per il livello energetico del processo e possiamo raggrupparle in tre categorie:

- evaporazione;
- spruzzamento catodico;
- impianto ionico.

Si ha il fenomeno dello spruzzamento catodico quando si produce una scarica tra due elettrodi in un gas a bassa pressione e si osserva una lenta disintegrazione del catodo (target) ad opera del bombardamento di particelle del gas ionizzato (plasma), con asportazione e trasporto di materia.

Si può definire lo spruzzamento catodico come l'espulsione di atomi dalla superficie del target per effetto dell'impulso degli ioni che lo bombardano.

Lo ione accelerato penetra nel materiale costituente il target alla profondità di 3 o 4 strati atomici, cedendo la sua quantità di moto. Questi atomi urtano quelli di superficie, meno legati, proiettandoli verso l'esterno. Quello che si ha è un urto elastico con trasferimento diretto della quantità di moto dallo ione incidente alla particella della superficie, determinata dal rapporto tra le masse degli ioni e quelle degli atomi del bersaglio.

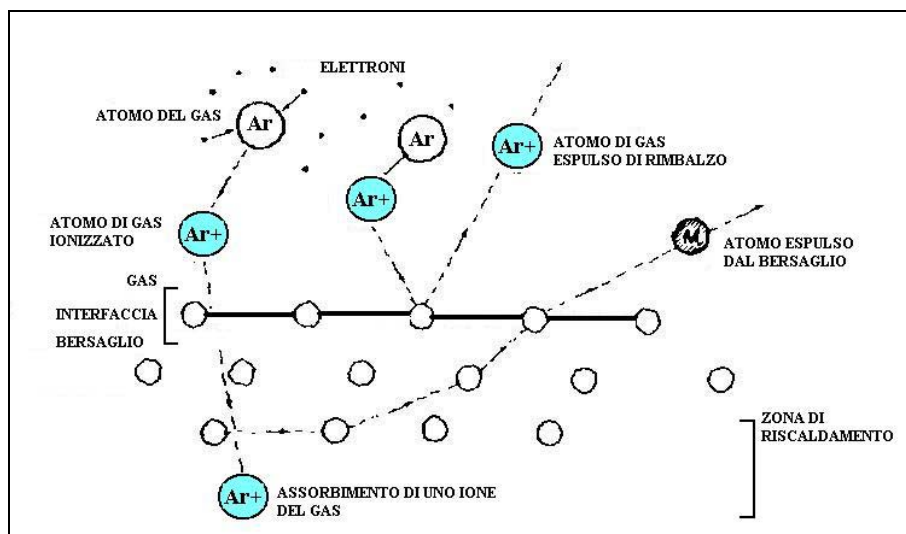


Figura 1-1 Genesi del processo di sputtering per spruzzamento catodico

Questo modello dà una buona spiegazione della distribuzione angolare e della natura neutra della maggior parte delle particelle emesse dalla superficie bombardata: solo dallo 0.1% all'1% di queste avrebbero infatti una carica positiva o negativa. Al contrario non si spiega altrettanto bene la dipendenza del rendimento di spruzzamento dal numero atomico e non dal peso atomico, proporzionale alla massa.

Il rendimento di polverizzazione del target cresce rapidamente per le basse energie, si stabilizza da 5 a 25 keV ed infine decresce verso le alte energie: qui una notevole penetrazione nel bersaglio dissipa più in profondità l'energia degli ioni incidenti, riducendone sensibilmente il trasferimento agli atomi superiori. Il rendimento del processo dipende inoltre dall'orientamento cristallografico del target.

La velocità di deposizione, misurata in $\frac{\mu m}{min}$, cresce con il peso atomico del

gas costituente il plasma e sarà quindi maggiore con gas come l'argon e lo xenon e minore con l'idrogeno e l'elio. Quindi la scelta dell'argon come gas per generare il plasma si impone sia per migliorare la velocità di deposizione che per evitare reazioni indesiderabili con gli atomi spruzzati.

I fattori che determinano la velocità di deposizione del target si possono riassumere come segue:

- fattori con azione diretta:
 - numero, energia e massa degli ioni incidenti;
- fattori con azione inversa:
 - pressione del gas ionizzante;
 - distanza fra gli elettrodi;
 - numero atomico del materiale costituente il bersaglio;
- fattori con azione incerta:
 - angolo di incidenza degli ioni sul target;
 - temperatura del catodo;
 - formazione di uno strato di sostanze contaminanti sulla superficie del catodo, per via di reazioni chimiche secondarie;
 - orientazione cristallografica del catodo.

I procedimenti tradizionali per attuare un processo di sputtering catodico sono i seguenti:

- sistema a diodo convenzionale;
- sistema a triodo;
- spruzzamento catodico ad alta frequenza (HF sputtering) o a radio frequenza (RF sputtering).

In seguito viene presentato l'ultimo processo, che è stato effettivamente utilizzato.

1.1.1.1 Processo di spruzzamento catodico a radio frequenza (RF sputtering)

Nel sistema a diodo convenzionale la gamma dei materiali depositabili è limitata ai conduttori (metalli e composti) in quanto il catodo che viene spruzzato deve essere sufficientemente conduttore per potergli applicare il potenziale acceleratore degli ioni; gli isolanti non possono far parte di questo tipo processo.

Se si applica un potenziale negativo rispetto al plasma ad un catodo rivestito di materiale isolante, gli ioni che provocano lo spruzzamento verranno attratti nel momento in cui l'accumularsi delle cariche positive avrà creato un potenziale uguale ed opposto a quello dell'elettrodo: sul target si sarà allora formata una barriera di cariche spaziali che limita lo spruzzamento poiché cessa l'attrazione degli ioni.

Se ora si applica allo stesso elettrodo un potenziale ad alta frequenza, il fenomeno si produrrà nel semiperiodo in cui l'elettrodo è negativo. Durante il semiperiodo successivo l'elettrodo diventa positivo e sono quindi gli elettroni del plasma, a loro volta attirati, che vengono attratti e neutralizzano gli ioni positivi accumulati sul bersaglio. Dopo ogni alternanza il bersaglio si ritrova così nelle condizioni di partenza ed il ciclo riprende: si rende così possibile la continuazione del processo anche con un target costituito da materiale isolante.

I vantaggi della scarica a radio frequenza sono quindi:

- possibilità di deporre materiali isolanti, anche se a velocità inferiore rispetto ai metalli;
- depositi molto “puliti”, grazie alla bassa pressione di lavoro ($10^{-1} \div 10^{-3}$ Torr);
- depositi isolanti o metallici molto aderenti grazie alle alte energie acquisite dalle specie spruzzate.

1.1.1.2 Procedimenti speciali di spruzzamento

- Polarizzazione del substrato: è una tecnica che tende a migliorare la qualità del deposito a leggero scapito della velocità di deposizione. Il deposito, circondato dal plasma, tende a catturare molecole di gas residui e del gas ionizzante. Questo può essere evitato scaldando il substrato, oppure polarizzando leggermente il deposito in formazione con un potenziale di 50÷100V che attiri gli ioni. Il bombardamento che ne risulta asporta per spruzzamento i gas presenti in superficie.

- Spruzzamento reattivo: può capitare che la deposizione di un materiale isolante non sia realizzabile perché non esiste in forma, dimensione o purezza adatte. In questi casi si ricorre allo spruzzamento reattivo che consiste nell'introdurre nell'argon da ionizzare piccole percentuali di gas attivo (O_2 , N_2 , NH_3 , CH_3 , SH_2) che si combina chimicamente col materiale del bersaglio, con gli atomi sputterati e con quelli depositati per formare composti quali ossidi, nitruri, carburi, boruri, siliciuri, solfuri, ecc...

1.1.2 Estensione superficiale delle deposizioni: mascheratura substrati

L'estensione superficiale dei 3 film costituenti i condensatori è stata studiata in modo tale da soddisfare certi requisiti fondamentali per un corretto funzionamento degli stessi.

La prima deposizione di alluminio ricopre l'intera superficie del substrato ($20 \times 20mm$); il successivo film di dielettrico è stato depositato lasciando libera una porzione sufficiente di superficie alluminata ($5 \times 20mm$) per poter eseguire i contatti elettrici con gli strumenti di misura nella fase di caratterizzazione dei condensatori.

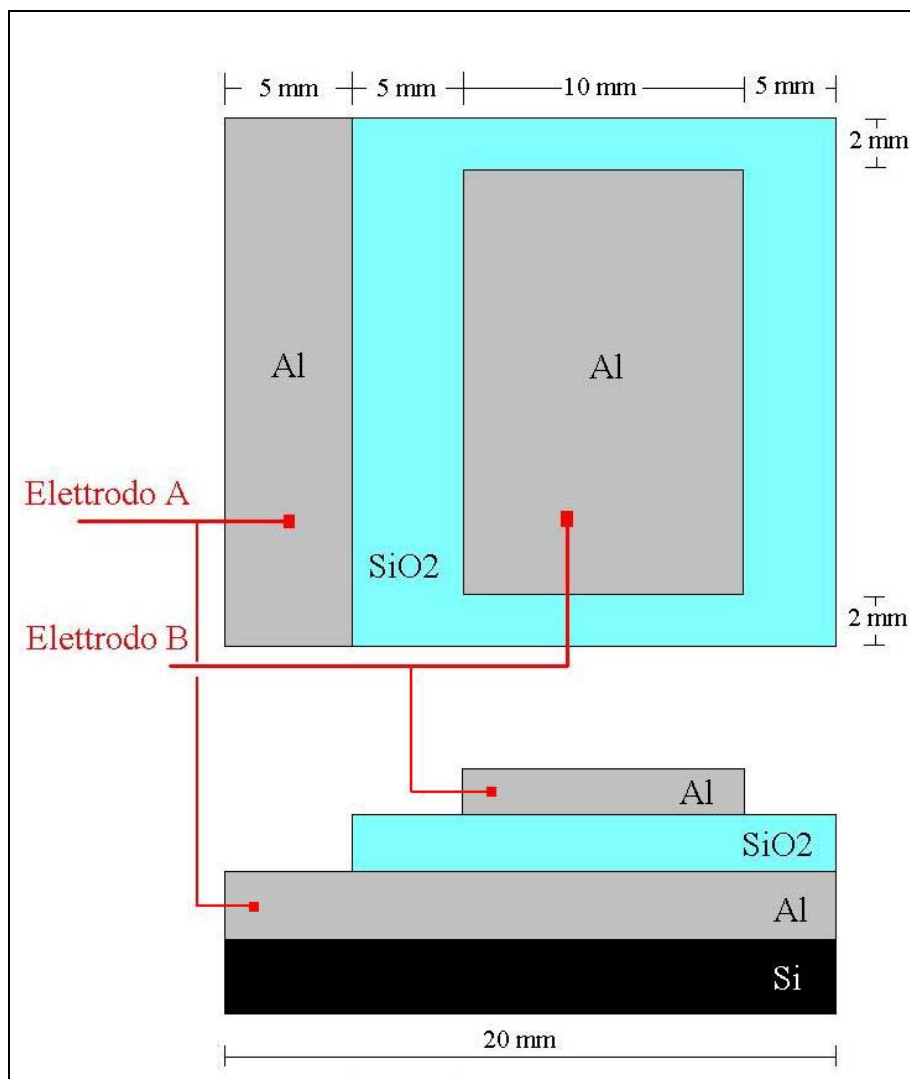


Figura 1-2 Vista da sopra e di profilo dell'estensione superficiale delle 3 deposizioni su substrato di silicio.

Ciò è stato possibile utilizzando in fase di deposizione delle opportune mascherature realizzate con delle lastre sottili di plastica (PET) che, ritagliate per ottenere la forma desiderata, venivano poste e fissate sopra il campione.

Come si nota in figura l'ultima deposizione è stata conformata lasciando un certo margine di sicurezza ai suoi lati:

- ≈ 2 mm rispetto al confine del substrato per garantire un perfetto isolamento elettrico con l'elettrodo A; questo poteva essere compromesso nel caso in cui dell'alluminio proveniente dalla terza

fase di deposizione fosse andato a depositarsi sui bordi del substrato causando il corto circuito del condensatore; in questo caso la maschera in PET è stata conformata in modo tale da salvaguardare oltre che l'interfaccia del substrato anche il bordo dello stesso;

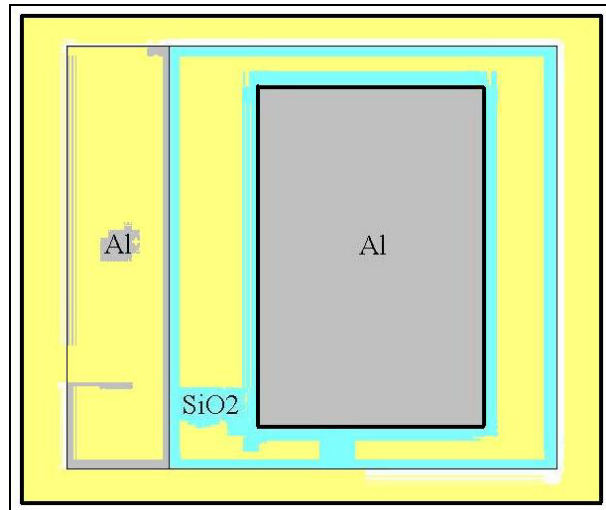


Figura 1-3 Mascheratura del substrato. In giallo è visibile l'area coperta dalla maschera in PET.

- ≈ 5 mm nei restanti due lati.

1.1.3 Spessore dei film

I film di alluminio hanno uno spessore di $1.5 \mu\text{m}$. Tale valore è stato scelto in quanto garante di una certa “robustezza e consistenza” alle sollecitazioni termiche (in fase di deposizione) e meccaniche (in fase di caratterizzazione) dello strato.

La variazione dello spessore del film di SiO_2 e l'area della superficie utile di film conduttore sono stati gli strumenti fondamentali per determinare le caratteristiche elettriche dei condensatori. Infatti è noto come la capacità di un condensatore piano sia data dalla seguente formula:

$$C = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_d \cdot A}{d} \quad (\text{Equazione 1-1})$$

dove ϵ_0 , ϵ_d , A e d sono rispettivamente la costante dielettrica nel vuoto, costante dielettrica del materiale isolante, area delle facce del condensatore e distanza tra le due lastre che equivale, nel nostro caso, allo spessore del film dielettrico.

L'obiettivo è quello di realizzare dei condensatori di capacità dell'ordine di qualche nF: considerando i valori delle due costanti dielettriche

$$\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \frac{C^2}{N \cdot m^2}, \quad (\text{Equazione 1-2})$$

$$\epsilon_{SiO_2} \approx 3.75 \quad (\text{Equazione 1-3})$$

e l'area di superficie utile stimabile in $\approx 1 \text{ cm}^2$, si ottiene per lo spessore del film isolante un valore dell'ordine del μm .

Sono stati quindi realizzati 2 condensatori per 5 diversi spessori del film dielettrico, per ottenere differenti valori di capacità e per poter valutare la bontà del dielettrico SiO_2 per spessori anche inferiori al μm in condizioni di

alto campo elettrico applicato $\left(\approx 10 \frac{MV}{m} \right)$:

Spessore film SiO_2 (μm)	Valore capacità stimato (nF)
0.15	22.1
0.4	8.3
0.6	5.5
0.8	4.2
1	3.3

Tabella 1-1 Valori di capacità stimati per i 5 spessori scelti per il film dielettrico, considerando pari a 1cm^2 la superficie delle facce dei condensatori.

1.2 Apparato sperimentale: camera di deposizione

L'apparato sperimentale utilizzato è costituito da una camera di deposizione a cui sono collegati strumenti di generazione e controllo del plasma.

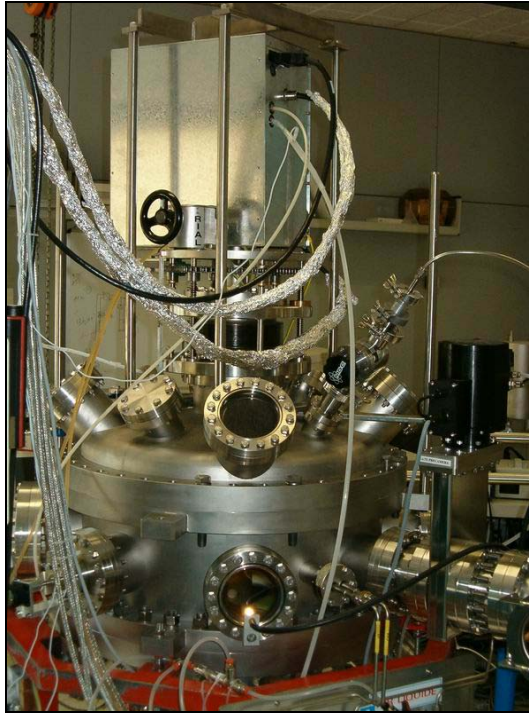


Figura 1-4 Camera di deposizione per film sottili; laboratorio UHV.

Il corpo della camera, completamente in acciaio inox, è costituito da una sezione cilindrica centrale del diametro di 120cm predisposta di diverse flange per il collegamento di accessori quali misuratori di pressione, pompe, ecc... ed è chiuso alle estremità superiore ed inferiore da due semisfere cilindriche anch'esse dotate di diverse flange. La tenuta del vuoto nella camera è assicurata dalla presenza di guarnizioni in rame, tra la semisfera inferiore e la sezione centrale, in viton per la semisfera superiore.

1.2.1 Pre-camera: introduzione dei campioni

Parte importante della struttura è una camera secondaria (pre-camera) collegata ad una delle flange laterali della sezione centrale della camera

primaria, atta all'inserimento dei campioni tramite un braccio magnetico. La pre-camera è particolarmente utile in quanto è possibile il suo isolamento dalla camera primaria tramite una gate comandata manualmente con un interruttore e quindi l'inserimento dei campioni può essere effettuato senza compromettere l'alto vuoto presente.

La procedura consiste nell'inserire il portacampioni nella pre-camera isolata, portandola in atmosfera. Si procede poi con l'evacuazione fino ad un vuoto paragonabile in ordine di grandezza a quello presente nella camera primaria, quindi aprendo la gate e inserendo il portacampioni tramite il braccio magnetico.

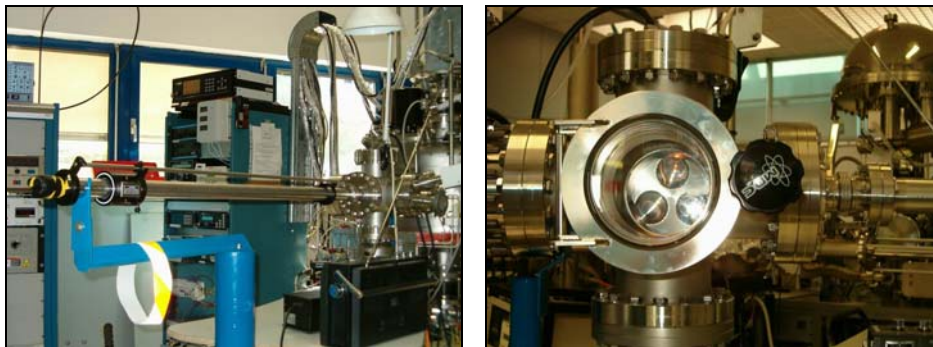


Figura 1-5 a) braccio meccanico, collegato alla pre-camera per l'inserimento dei campioni nella camera primaria; b) vista laterale della camera secondaria.

Alla camera secondaria è collegato un sistema di pompaggio costituito da:

- pompa rotativa Alcatel 2033 SD (flusso nominale $30 \frac{m^3}{h}$, vuoto limite $2.25 \times 10^{-3} Torr$);
- pompa turbomolecolare Leybold Turbovac 361 a monte della pompa rotativa (flusso nominale $400 \frac{l}{sec}$, pre-vuoto di partenza $10^{-3} \div 10^{-4} Torr$, vuoto limite $< 8 \times 10^{-11} Torr$, raffreddamento ad acqua).

La pressione viene monitorata da un vacuometro Alcatel AHC 1010 dotato di controller in grado di coprire l'intero range di pressione dall'atmosfera a 10^{-8} Torr; questo si ottiene grazie alla presenza nello strumento di un misuratore Pirani, che garantisce misure di basso vuoto e di una testa ionica a catodo caldo. È inoltre presente una valvola ad azionamento manuale collegata alla linea di azoto, utile per fare rientri.

Il portacampioni circolare, a cui i substrati vengono fissati tramite delle viti, una volta introdotto viene posizionato sull'anodo a cui rimane solidale grazie ad un piccolo perno che garantisce anche il contatto elettrico. All'esterno della camera è presente un piccolo motorino elettrico in grado, attraverso un sistema di bracci e ruote dentate, di trasmettere un movimento rotativo al portacampioni appoggiato all'anodo: la rotazione dei substrati lungo l'asse anodico garantirà l'uniformità dello spessore del materiale depositato per tutta la superficie utile del portacampioni.

1.2.2 Elettrodi

Gli elettrodi, anodo e catodo, sono posti ai poli della camera da cui sono isolati elettricamente.

Una parte meccanica molto importante per la determinazione delle caratteristiche del plasma è quella che permette la regolazione della distanza tra i due elettrodi. Questa è costituita da due soffietti in acciaio che permettono, data la loro flessibilità, il movimento verticale dei due elettrodi ad essi ancorati. Il movimento viene comandato attraverso due manopole che vengono ruotate manualmente dall'operatore; la distanza tra catodo e anodo viene controllata tramite due asticelle millimetriche che forniscono la posizione dei due rispetto a dei riferimenti.



Figura 1-6 Soffietto in acciaio che permette il movimento in verticale degli elettrodi (nel caso specifico dell'anodo). In basso a destra si può notare la manopola per regolarne la posizione.

Il catodo è composto da un cilindro di rame a cui, per operazioni di sputtering per spruzzamento catodico, viene fissato un target o bersaglio del materiale da depositare. Il tutto è opportunamente schermato per evitare che il bombardamento ionico vada a colpire zone non facenti parte del target. È importante assicurare che non vengano coinvolte nel processo di sputtering le parti metalliche del catodo in quanto potrebbero contaminare di materiale non desiderato il film deposto.

L'anodo è messo a terra, anche se è previsto un collegamento opzionale ad un generatore di tensione nel caso si voglia polarizzare elettricamente il substrato (1.1.1.2).

Tra i due elettrodi è possibile frapporre, per mezzo di un braccio meccanico, uno schermo utile nella fase preliminare di pre-sputtering (1.3.4).

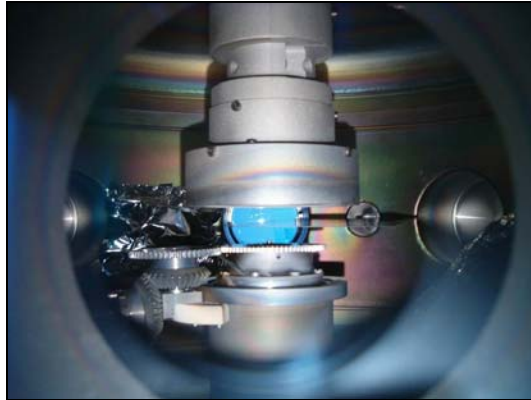


Figura 1-7 Vista dei due elettrodi all'interno della camera primaria: in alto il catodo, in basso l'anodo.

1.2.3 Sistema di refrigerazione ad acqua

All'interno dei supporti che sostengono i due elettrodi si trovano le condutture per il trasporto del liquido refrigerante, nello specifico acqua termalizzata a $\approx 15^{\circ}\text{C}$. Il surriscaldamento degli elettrodi è dovuto alle alte potenze che vengono dissipate durante i processi di deposizione. Esso viene controllato tramite due sensori applicati alle condutture di ritorno del liquido refrigerante di cui viene misurato ad intervalli di tempo regolare il valore di temperatura. L'efficienza del sistema di raffreddamento che protegge anche il sistema di pompaggio è importante per garantire l'ottimale funzionamento dell'apparato sperimentale. Per questo l'alimentazione di rete a cui sono collegati i generatori del plasma e i controller delle pompe è abilitata solo nel caso in cui un sensore rilevi un flusso nella conduttura di ritorno del circuito refrigeratore. Nel caso in cui, accidentalmente, i rubinetti dell'acqua non siano stati aperti o sia presente qualche significativa perdita, non è possibile iniziare la fase di deposizione. Questo è un modo molto semplice, quanto efficiente, per garantire una certa sicurezza di funzionamento alla strumentazione.

1.2.4 Apparato di generazione del plasma

Il plasma di argon viene generato tramite l'applicazione di un campo elettrico tra i due elettrodi. Una differenza di potenziale alternata viene creata tramite un generatore a radiofrequenza (RF) Advanced Energy RFX 600A Generator. Il relativo controller permette il monitoraggio della potenza effettiva trasmessa (6÷600W) valutando la percentuale di questa che viene riflessa e quindi la differenza di potenziale applicata tra anodo e catodo. La regolazione di quest'ultima avviene tramite una manopola presente sul generatore che permette il settaggio della potenza in Watt.

Per permettere un trasferimento ottimale della potenza è necessario frapporre tra la sorgente e l'elettrodo un adattatore d'impedenza (matching box), che permette di convertire l'impedenza complessa del plasma

$$Z_D = R_D + jX_D, \quad (\text{Equazione 1-4})$$

dove R_D è la resistenza della scarica e X_D la reattanza, in un carico resistivo di 50 Ω . In particolare è stato utilizzato un Advanced Energy ATF tuner, costituito da due capacità variabili mobili gestite da un circuito di controllo, in grado di regolare e mantenere stabile l'impedenza d'ingresso. Tale apparecchiatura viene mantenuta a temperatura controllata tramite raffreddamento ad aria.

1.2.5 Linee di ingresso gas e controllo pressione

Nel laboratorio UHV sono disponibili 5 linee di gas: ossigeno, azoto, anidride carbonica, metano e argon. La linea di azoto viene prevalentemente usata per fare rientri in camera o in pre-camera; a tale scopo sono presenti 2 valvole a spillo comandate manualmente sulle 2 camere.

La linea di argon viene utilizzata per generare il plasma: per tale motivo il suo flusso all'interno della camera deve essere controllato per evitare problemi di pompaggio (flusso eccessivo) o una mancata accensione del gas (flusso insufficiente). Questo compito viene svolto da uno dei 4 flussimetri MKS Mass-Flow Controller presenti.



Figura 1-8 I 4 flussimetri collegati alle linee dei gas.

Questi, comandati da un'unità di controllo, gestiscono il flusso per ogni linea secondo un valore impostato dall'operatore, in un range compreso tra 0÷100 sccm con un'accuratezza dell'1%.

Per monitorare la pressione all'interno della camera si ricorre a 3 vacuometri differenti a seconda del grado di vuoto in cui si opera:

- Vacuometro Varian ConvecTorr: $\text{atm} \div 10^{-3} \text{Torr}$; nel nostro caso la testa è tarata per misurare pressioni in presenza di azoto;
- Testa ionica Varian Nude Ionization Gauge: $10^{-4} \div 10^{-10} \text{Torr}$;
- Vacuometro MKS Baratron 626A: $1 \div 10^{-4} \text{Torr}$; la lettura della pressione è indipendente dal tipo di gas.

In fase di deposizione è necessario lavorare a pressione costante in un range tipico che può variare tra $10^{-1} \div 10^{-3} \text{Torr}$. Il mantenimento del valore desiderato di pressione è garantito dalla presenza di una valvola a farfalla posta sul tubo di collegamento tra la camera e la pompa turbomolecolare. Essendo la sua apertura controllata da un'unità che ci permette di settare fino a 4 diversi valori di pressione desiderabili, è possibile modificare la conduttanza del tubo di collegamento e di conseguenza la velocità di pompaggio della pompa turbomolecolare. Tramite il controller della valvola a farfalla è possibile anche impostare il grado di sensibilità (gain) della stessa nel seguire l'andamento della pressione in camera.

1.2.6 Sistema di pompaggio

Per garantire il grado di vuoto necessario per la deposizione di film sottili per spruzzamento catodico, alla camera primaria è collegato il sistema da vuoto rappresentato in figura:

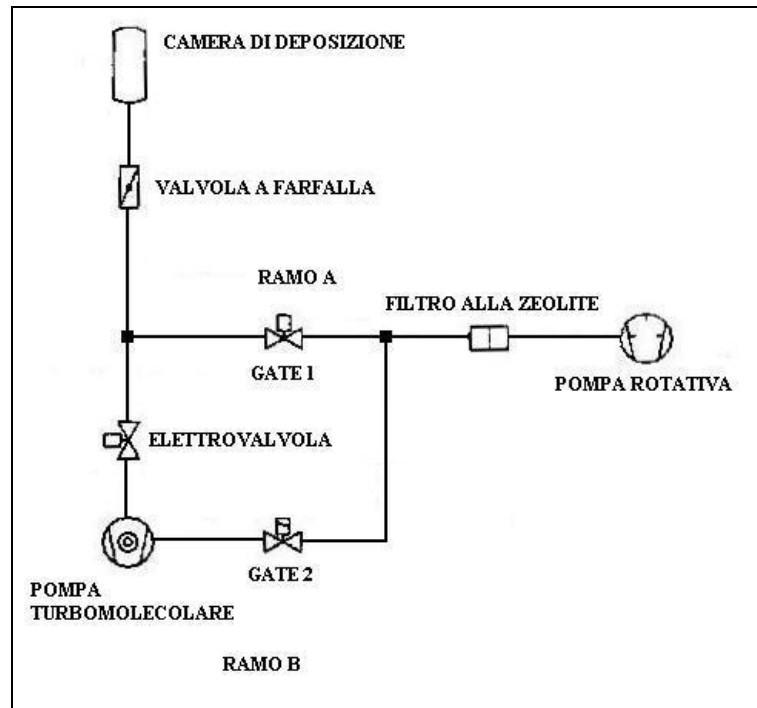


Figura 1-9 Sistema di pompaggio collegato alla camera primaria.

Come si può notare in figura, sono presenti due pompe:

- Pompa primaria: rotativa a palette Alcatel 2033 C1 (velocità di pompaggio $30 \frac{m^3}{h}$. Permette l'evacuazione della camera partendo dall'atmosfera fino ad una pressione di $1.5 \times 10^{-4} Torr$);
- Pompa secondaria: turbomolecolare con cuscinetti ceramici Varian V550 (velocità di pompaggio $500 \frac{l}{sec}$, range di lavoro per pressioni inferiori al Torr). Questa pompa è dotata di un'unità di controllo che ne gestisce l'avvio e l'arresto: ciò avviene tramite un controllo del numero dei giri al minuto attraverso la potenza elettrica fornita al

motore. È possibile utilizzare la pompa a due diverse velocità: 28krpm o 42krpm. La massima velocità viene utilizzata esclusivamente in fase di evacuazione della camera; in fase di deposizione viene impostata la velocità inferiore.

Il sistema di pompaggio consente l'evacuazione della camera tramite la sola pompa primaria o con l'aggiunta in serie ad essa della pompa secondaria. Partendo dall'atmosfera, la procedura di svuotamento della camera fino al vuoto limite è la seguente:

1. Accensione della pompa rotativa e pompaggio attraverso entrambi i rami A e B (per avere una maggiore conduttanza e, quindi, maggiore velocità di pompaggio);
2. Raggiunto il vuoto limite della rotativa ($\approx 10^{-3}$ Torr), si esclude dal pompaggio il ramo A tramite la gate 1: a questo punto si può azionare la pompa turbomolecolare, con la rotativa che ora ottimizzerà lo scarico della turbo.

Attraverso questa procedura, in condizioni di pulizia della camera, si può raggiungere un vuoto limite di $\approx 4 \times 10^{-8}$ Torr.

Il filtro alla zeolite presente a monte della pompa rotativa ha il compito di ridurre il rientro in camera degli idrocarburi dovuti a vapori dell'olio lubrificante della pompa primaria, che sono una delle principali fonti di inquinamento.

La presenza della gate 2 è necessaria nei casi i cui si debba riportare la camera a pressione atmosferica in modo tale da isolare la pompa turbomolecolare. Stessa funzione di isolamento caratterizza l'elettrovalvola presente a monte della pompa turbomolecolare.

1.3 Fase di deposizione

I substrati di silicio richiedono una certa cura da parte dell'operatore nel maneggiarli sia nella fase di preparazione e pulizia antecedente l'inserimento in camera che nella successiva estrazione ed analisi.

1.3.1 Preparazione chimica dei campioni

I substrati necessitano di una accurata pulizia chimica prima di entrare in camera di deposizione. Per rendere la superficie del substrato, che costituirà l'interfaccia con il primo film depositato, il più possibile libera da grassi, oli o semplici polveri provenienti dall'atmosfera, si attua una procedura di pulizia in diversi passi che si svolge nel laboratorio di chimica e preparazione campioni.



Figura 1-10 Laboratorio chimico e di preparazione campioni.

I substrati vengono dapprima sgrassati immergendoli in un beker contenente un solvente organico, nel nostro caso tricloretilene (TCE). Per aumentare l'efficacia della pulizia si effettua un ulteriore lavaggio del substrato tramite ultrasuoni, inserendo all'interno dell'apparecchio preposto le basette di silicio ancora immerse nella TCE.

Nel caso del silicio è, inoltre, particolarmente importante rimuovere lo strato di ossido che si forma sulla superficie contatto con l'aria. L'ossido non è

una sostanza reattiva dal punto di vista chimico e, quindi, impedisce la formazione di legami tra il substrato e il film che verrà successivamente depositato. Una situazione di questo tipo potrebbe creare evidenti problemi di aderenza e adesione tra il film e il substrato. L'acido fluoridrico (HF) è ottimo a tale scopo in quanto è in grado di attaccare e rimuovere l'ossido dal substrato, il quale viene immerso nell'acido per circa 10 secondi, risciacquato con acqua deionizzata e successivamente asciugato con azoto. L'acido fluoridrico svolge, inoltre, una funzione protettiva a lungo termine del substrato in quanto, durante la reazione viene liberato dell'idrogeno che protegge il campione dalla formazione di ossidi.

A questo punto i substrati in silicio sono pronti per essere fissati al portacampioni e inseriti in camera.

1.3.2 Montaggio dei substrati sul portacampioni

Le dimensioni del portacampioni consentono la sistemazione e il fissaggio, con viti a brugola e rondelle, di 6 basette $20 \times 20\text{mm}$ di silicio.

1.3.3 Impostazione dei parametri in preparazione al processo di deposizione

Prima di iniziare qualsiasi processo di sputtering è necessario impostare una serie di parametri fisici che vengono annotati su un quaderno di laboratorio. Ciò è importante in particolar modo per verificare in che condizioni sono stati effettuati i processi precedenti e per verificarne la ripetibilità nello stesso set di parametri.

Per ogni processo vengono registrate le seguenti informazioni:

- Tipo di processo;
- Tipo di target;
- Pressione di partenza (vuoto limite);
- Substrati introdotti in camera (numero, materiale, tipo di pulitura chimica eseguita);
- Eventuale svolgimento di un processo di pre-sputtering;

- Pressione di lavoro (percentuale di apertura valvola a farfalla);
- Valore del flusso impostato per il gas (Argon);
- Tensione RF applicata al bersaglio / potenza impostata, riflessa, effettiva trasmessa;
- Posizione di catodo e anodo;
- Numero serie, data, ora di avvio processo;
- Tempo di durata processo.

1.3.4 Processo di pre-sputtering

Ogni qualvolta venga sostituito il target costituente il catodo è necessario effettuare un'operazione di pre-sputtering con lo scopo di pulire la superficie del target da grassi e ossidi che si possono accumulare durante il periodo di inutilizzazione dello stesso. L'operazione consiste nel frapporre l'apposito schermo tra catodo e anodo, a protezione di quest'ultimo, e nell'effettuare un bombardamento per circa un'ora: questo tempo è in genere sufficiente per una completa pulizia del target da sostanze contaminanti.

1.3.5 Determinazione della velocità di deposizione

Stabiliti i valori degli spessori dei film di alluminio e SiO₂ da depositare è necessario conoscere il tempo che richiederà il processo per ottenerli. Questo lo si può calcolare conoscendo la velocità di deposizione che varia a seconda del materiale che viene sputterato. I metalli conduttori in generale spruzzano molto più rapidamente dei composti isolanti, per esempio l'oro 8 volte più della silice. Per determinare la velocità di deposizione dell'alluminio si sono introdotti in camera 2 substrati in silicio parzialmente mascherati e li si è sottoposti ad un processo di sputtering per un tempo di 4 ore nelle condizioni che poi si sarebbero utilizzate per eseguire tutte le deposizioni di alluminio:

Processo	Sputtering
Target	Al
Substrati	2 Si lavati con TCE e HF
P	0.05 Torr (valvola 5.1%)
Φ_{Ar}	25 sccm
VRF	-500 V
Potenza	86W, 21W (riflessa), 65W (effettiva)
Posizione elettrodi	Catodo= 3.4, anodo= 4.4
Tempo	4h

Tabella 1-2 Parametri fisici secondo cui è stata effettuata la deposizione con lo scopo di determinare la velocità di deposizione dell'alluminio.

Finito il processo si è fatta un'analisi del profilo dei due campioni: questo è stato possibile grazie allo scalino formatosi all'interfaccia Al/Si per via della mascheratura. È stato misurato uno spessore di $1.5\mu\text{m}$ da cui si ricava per l'alluminio una velocità di deposizione, secondo i parametri riportati sopra, pari a:

$$V_{dep_{Al}} \approx 0.0063 \mu\text{m} / \text{min} \quad (\text{Equazione 1-5})$$

Stessa procedura è stata svolta per determinare la velocità di deposizione della SiO_2 :

Processo	Sputtering
Target	SiO ₂
Substrati	2 Si lavati con TCE e HF
P	0.078 Torr (valvola 3.2%)
Φ_{Ar}	20 sccm
VRF	-600 V
Potenza	78W, 27W (riflessa), 51W (effettiva)
Posizione elettrodi	Catodo= 3.4, anodo= 4.4
Tempo	4h

Tabella 1-3 Parametri fisici secondo cui è stata effettuata la deposizione con lo scopo di determinare la velocità di deposizione della SiO₂.

Spessore del film misurato: 1μm;

$$V_{dep_{SiO_2}} \approx 0.0041 \mu m / \text{min} \quad (\text{Equazione 1-6})$$

Come ci si poteva aspettare è stata confermata una minore velocità di deposizione per il materiale isolante rispetto al conduttore.

1.3.6 Analisi sui campioni tra le 3 fasi di deposizione.

Durante la fase di preparazione dei 10 condensatori sono state eseguite delle analisi profilometriche per ogni strato depositato, per valutare se lo spessore fosse quello programmato e rilevare l'eventuale presenza di disomogeneità o buchi all'interfaccia. Inoltre tramite spettroscopia si è accertata la reale natura chimica di ogni strato depositato per quantificare l'eventuale presenza di elementi contaminanti

1.3.6.1 Profilometro (KLA-Tencor P-15 stylus profilometer)

Il profilometro meccanico è uno strumento nel quale una punta diamantata viene fatta scorrere a contatto del campione in modo da seguirne il profilo. Un trasduttore di posizione converte il movimento della punta in valori

d'altezza relativi. Usando lo stilo meccanico è possibile ottenere informazioni sulla tessitura delle superfici, la loro rugosità e la topografia superficiale dei campioni. Infatti, applicazioni principali della tecnica sono misure di morfologia di film sottili e spessori di ricoprimenti. Lo strumento permette di misurare step e rugosità su superfici come silicio, metalli, vetri, plastica e altro.



Figura 1-11 Profilometro (KLA-Tencor P-15 stylus profilometer) e relativo calcolatore per l'analisi delle acquisizioni.

I dati relativi ad una scansione profilometrica sul campione possono essere esportati su supporto rimovibile in formato *.txt, in modo da poter realizzare grafici mediante software di elaborazione dati. In figura viene riportato un profilo eseguito su un campione su cui è stato depositato uno strato di alluminio (serie #374 Al/Si):

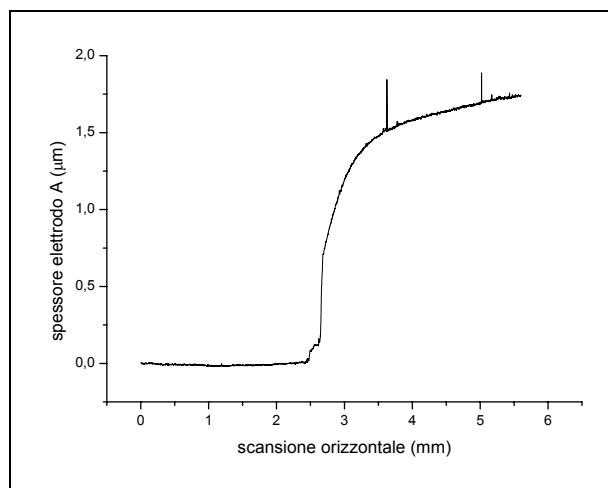


Figura 1-12 Profilo eseguito su un campione su cui è stato depositato il primo strato di alluminio (serie #374 Al/Si).

Dal grafico si può notare l'andamento a scalino dovuto alla parziale mascheratura del substrato e la presenza di impurezze sul film, probabilmente dovute a polvere depositatasi in fase di estrazione dalla camera o durante l'operazione di introduzione nel profilometro. Si può stimare uno spessore del film pari a $\approx 1.6\mu\text{m}$, in linea con quanto ci si aspettava.

1.3.6.2 Spettroscopia Auger (PHI Modello 4200 Thin Film Analyzer)

Caratteristica della tecnica è la sensibilità alla superficie ($0.002\div 0.003\mu\text{m}$) che combinata ad un processo di erosione ionica (ottenuto generalmente attraverso lo sputtering con ioni di gas nobile accelerati energeticamente) consente di misurare la distribuzione in profondità degli elementi, con una sensibilità superiore allo 0.1% sul totale degli atomi presenti. L'aspetto più rilevante della tecnica è rappresentato d'altra parte dalla sua capacità di fornire, in un tempo relativamente breve, una distribuzione elementare risolta spazialmente nelle tre dimensioni (sulla superficie, $0.2\mu\text{m}$ di risoluzione laterale e lungo la sua normale, $2\div 20\text{nm}$ di risoluzione in profondità).

Tipiche applicazioni della spettroscopia Auger possono essere trovate nel campo della microelettronica, della metallurgia e nella scienza dei materiali in genere.

2. Caratterizzazione dei condensatori

La caratterizzazione dei condensatori prevede la misurazione diretta di parametri elettrici quali capacità, resistenza e rigidità elettrica. Da tali informazioni è stato possibile valutare proprietà del dielettrico, resistività della SiO₂ e la soglia massima di campo elettrico applicabile.

2.1 Metodi e modalità di misurazione dei parametri elettrici

Si è già accennato alla fragilità strutturale dei substrati in silicio. Nel momento in cui sullo stesso sono presenti 3 film di spessore dell'ordine del μm , risulta evidente la necessità di adottare una procedura di analisi che non vada a stressare in maniera eccessiva i campioni sia meccanicamente che termicamente.

Per tali motivi, è stato progettato un portacampioni ceramico in Macor, costituito da un incavo quadrato per contenere il campione e dotato di due contatti metallici flessibili da appoggiare sugli elettrodi A e B, sia per stabilire i contatti elettrici con gli strumenti di misura che per mantenere fermo il campione.

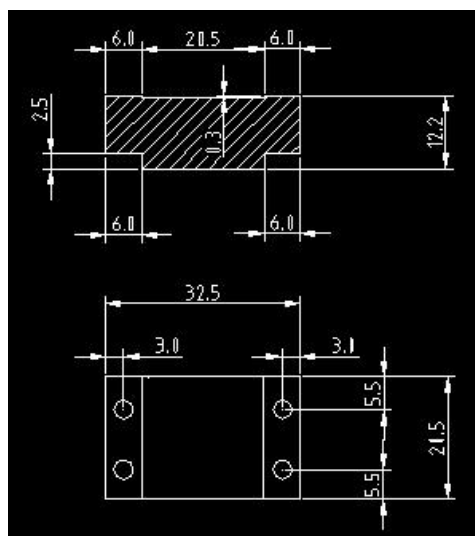


Figura 2-1 Disegno in Autocad (vista da sopra e di profilo) del portacampioni in Macor.

Al primo utilizzo di questo modello di portacampioni si è evidenziata una difficoltà operativa: i contatti elettrici, per quanto realizzati con delle lamine flessibili in rame-berillio (CuBe), nella fase di fissaggio del campione andavano a graffiare e incidere lo stesso nelle zone di contatto. Questo si verificava in parte per la pressione esercitata sui film dalle lamine, ma soprattutto per la difficoltà da parte dell'operatore di appoggiare i contatti sulla superficie del campione in modo tale da non graffiarlo.

In particolare, la procedura sviluppata portava alla rimozione dell'elettrodo B e alla perforazione del sottostante strato di SiO_2 modificando la struttura del campione e rendendolo inutilizzabile.

Si è reso necessario ricercare un metodo alternativo per eseguire contatti elettrici affidabili senza compromettere l'efficienza del campione.

Escluse altre tipologie di contatto con materiale solido, per quanto morbido e flessibile, si è pensato di utilizzare sostanze liquide conduttrici come l'argento e il mercurio: quest'ultima è stata scartata in quanto elemento contaminante e non di facile utilizzo su dimensioni così limitate.

Si è scelto, quindi, di utilizzare della pasta d'argento (RS Silver conductive paint) da applicare all'elettrodo B. La pasta d'argento si presenta piuttosto densa per poterla applicare con uniformità sul film; per questo motivo è stata diluita con dell'acetato di butile. Con l'ausilio di un pennellino è stato

applicato uno strato di pasta argentata su tutti i condensatori, cercando di ricoprire una porzione di superficie il più definita possibile e in maniera uniforme. Qualche minuto è sufficiente per far solidificare la pasta, garantendo un'ottima aderenza fra la stessa e l'alluminio. Il contatto elettrico è stato stimato essere di buona qualità data la bassa resistività della pasta d'argento inferiore a $0.001\Omega \cdot cm$.

Il contatto con l'elettrodo A è stato realizzato utilizzando comunque il portacampioni sopra descritto, utilizzando le lamine flessibili per effettuare il contatto elettrico e per fissare il campione; la presenza sotto l'elettrodo A del substrato isolante in silicio non porta a conseguenze gravi nel caso di perforazione del film.

2.2 Misure di capacità

Le misure dei valori di capacità per ognuno dei 10 condensatori sono state effettuate con l'ausilio di un ponte RCL di precisione HP 4284A. Il potenziale di eccitazione impiegato e la sua frequenza sono selezionabili in campi rispettivamente di $5mV \div 20V$ e $20Hz \div 1MHz$ in modo da ricreare le condizioni di impiego dei componenti sotto test. L'accuratezza assoluta dello strumento è del 0,05% sull'intera gamma di frequenze di prova fino ad 1MHz.

Per la misurazione di valori di capacità, lo strumento ci permette di selezionare due modelli di circuito equivalente che meglio si adattano al tipo di componente su cui si lavora:

- circuito $C_S - R_S$: fornisce i valori di una capacità in serie ad una resistenza;
- circuito $C_P - R_P$: fornisce i valori di una capacità in parallelo ad una resistenza.

La scelta del tipo di modello da adottare in fase di misura dipende dall'impedenza del condensatore su cui si effettua la misura:

$$Z_C = \frac{1}{2\pi\omega C} \quad (\text{Equazione 2-1})$$

Per

$$Z_C > 10K\Omega \quad \text{modello } C_P - R_P;$$

$$Z_C < 10\Omega \quad \text{modello } C_S - R_S;$$

Per valutare la risposta in frequenza dei condensatori, progettati per avere capacità dell'ordine del nF, è stato deciso di eseguire misure per valori di frequenza di eccitazione compresi tra 20Hz e 100KHz; otteniamo:

$$1K\Omega < Z_C < 10M\Omega ;$$

questa indicazione ci consente di scegliere il modello $C_P - R_P$; l'accuratezza della misura su C_P è ricavabile tramite la valutazione di diversi parametri presenti sul manuale dello strumento. Per una misura tipica di un condensatore di capacità $\approx 1nF$, con un eccitazione di 0.1V a 1KHz, otteniamo un'incertezza del 7% sul valore di C_P .

Il fatto di utilizzare un'eccitazione di 0.1V per eseguire le misure è dovuto a questioni di sicurezza per i campioni. L'impiego di un potenziale più intenso comporterebbe un rischio di breakdown.

2.3 Misure di resistenza

Le misure di resistenza ai capi dei terminali dei condensatori risultano fondamentali per valutare la bontà del dielettrico. Infatti conoscendo la resistenza del condensatore è possibile risalire al valore di resistività del dielettrico:

$$\rho_{SiO_2} > 10^{10} \Omega \cdot cm \quad (\text{Equazione 2-2})$$

$$R_{DC} = \frac{\rho_{SiO_2} \cdot d}{A} \quad (\text{Equazione 2-3})$$

Il confronto di tale valore con quello tabulato per la SiO_2 consentirà di valutare la reale natura chimica e strutturale del dielettrico depositatosi e, nel caso di risultati non congruenti con le aspettative, cercare, tramite analisi

profilometrica e Auger, l'eventuale presenza di materiale contaminante nello stesso.

Le misure di resistenza sono state effettuate utilizzando due strumenti:

- generatore DC (0÷60 V) HP E3617A;
- elettrometro Keithley 6514.

L'utilizzo esclusivo dell'elettrometro per la misura di resistenza non permetteva di fissare un potenziale di eccitazione: per la medesima motivazione accennata nel 2.2 vi era la necessità di mantenersi ad un livello basso di tensione. È stata confermata la scelta di utilizzare un potenziale di 0.1V ottenuto dal generatore DC. Sfruttando la legge di ohm per cui

$$R = \frac{V}{I} \quad (\text{Equazione 2-4})$$

nota la tensione, andando a misurare con l'elettrometro il valore di corrente, si è ricavato il valore di resistenza.

2.4 Misure di rigidità elettrica

È interessante al fine dello studio delle proprietà del dielettrico misurare la sua rigidità elettrica. Questo richiede l'applicazione al condensatore di una tensione DC, fornita dal generatore già citato nel 2.3.

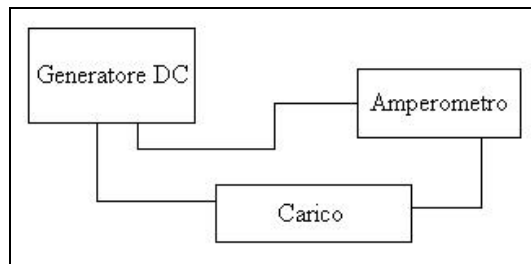


Figura 2-2 Schema elettrico del circuito utilizzato per effettuare misure di rigidità elettrica.

Sono state eseguite prove distruttive con regolazione manuale della tensione di prova e della rampa di salita. Il generatore utilizzato fornisce una lettura in ampere della corrente passante attraverso i due terminali: nel momento in cui si verifica il breakdown si nota un brusco aumento della corrente passante e la scarica prodotta attraverso il dielettrico. Durante la fase di misura si è aumentata in modo lento e graduale la tensione applicata, partendo dai 0.1V già in precedenza applicati per le misure capacitive e resistive.

2.5 Misure di resistenza ad alta tensione

Come complemento all'esperienza è stata sviluppata una metodologia per la misurazione di valori di resistenza ad alta tensione.

Le misure di resistenza sono state effettuate, anche in questo caso, sfruttando la legge di ohm; per misurare basse correnti ($10^{-9} \div 10^{-12} \text{A}$) in regime di HV garantendo una bassa presenza di rumore e una buona protezione per gli strumenti di misura, è stato utilizzato il circuito elettrico in figura:

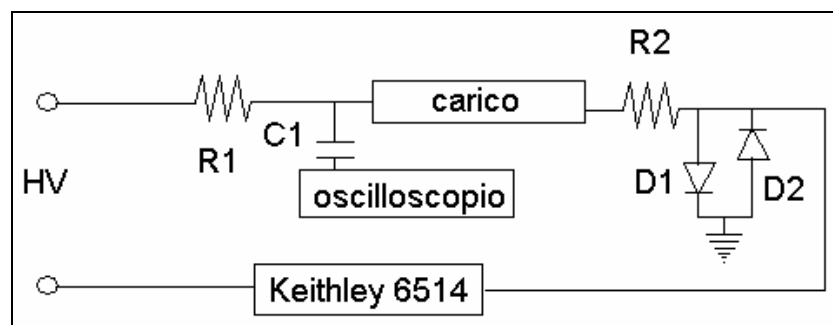


Figura 2-3 Circuito elettrico utilizzato per effettuare misure di resistenza ad alta tensione.

La corrente viene qui misurata da un elettrometro Keithley 6514 con una risoluzione minima di 10^{-18}A . Una prima resistenza ($R1 = 2.3 \text{M}\Omega$) posta in ingresso al circuito ha lo scopo di ridurre il rumore e di limitare un eccessivo flusso di corrente, possibile in caso di breakdown del carico o di

C1; il valore di R1 è dato dal parallelo di 3 resistenze ad alta potenza e tensione (7.5kV) ciascuna del valore di circa $7M\Omega$, questo per aumentare il valore massimo di potenza applicabile. La resistenza R2 e i due diodi hanno la funzione di salvaguardare l'elettrometro nel caso di alte tensioni o correnti, dovute a breakdown nel carico. Infatti se la tensione presente a valle di R2 supera una determinata soglia, la linea viene connessa a terra dall'entrata in conduzione di uno dei due diodi. La funzione di R1 e R2 è quella di limitare il flusso di corrente attraverso i diodi. E' inoltre presente un'uscita a cui è possibile collegare un oscilloscopio per il monitoraggio della tensione in regime di pre-breakdown.

Come si può notare in Figura 2-4 la risposta del circuito descritto è lineare ed è stata misurata una resistenza complessiva equivalente, senza alcun carico applicato, di $3.3G\Omega$.

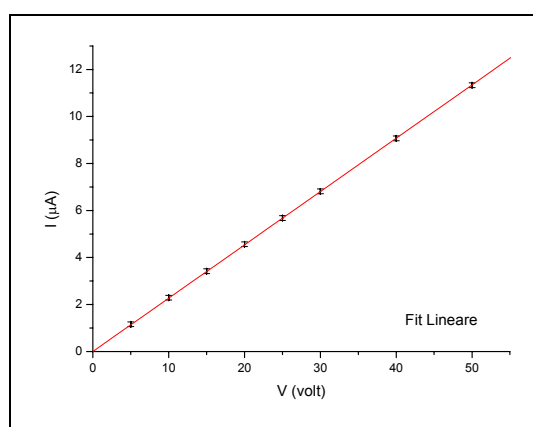


Figura 2-4 Grafico che evidenzia la risposta lineare del circuito utilizzato per misure di resistenza ad alta tensione.

L'elettrometro Keithley 6514 garantisce una lettura massima di resistenza di $200G\Omega$ con un'accuratezza di $1M\Omega$ nel range massimo di lettura. Lo strumento calcola il valore di resistenza, generando una corrente e misurando la tensione ai capi del carico. La corrente di test può variare nominalmente tra $0.9nA\div 0.9mA$.

Per aumentare il limite massimo imposto dalle caratteristiche dell'elettrometro, si è utilizzato un generatore ad alta tensione Keithley 248 High Voltage Supply che genera un potenziale variabile tra $0\div 5000V$. In

questo modo, andando a misurare con l'elettrometro correnti dell'ordine del pA, si arrivano a misurare resistenze dell'ordine del TΩ.

Per verificare definitivamente ciò, si è effettuata una misura ponendo un carico di circa 3TΩ ottenuto con una serie di 3 resistenze da 1TΩ ($\pm 1\%$) ciascuna. Sono stati acquisiti vari valori di corrente per tensioni variabili in un range tra 50 e 500 volt:

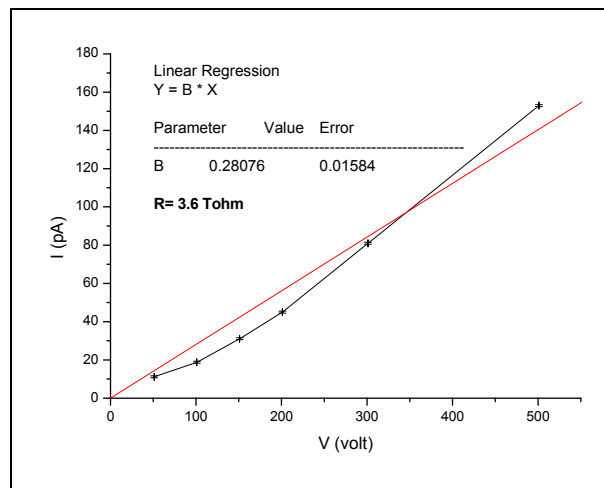


Figura 2-5 Misura di valori di corrente ponendo un carico di circa 3TΩ ottenuto con una serie di 3 resistenze da 1TΩ ($\pm 1\%$) ciascuna.

Come ci si aspettava i valori di corrente misurati erano dell'ordine del pA: risulta quindi confermata la possibilità tramite questo sistema di misurare valori di resistenza fino a qualche TΩ.

Inoltre, sono state eseguite diverse misure di resistenza utilizzando come “carico” vari condensatori ceramici da qualche pF:

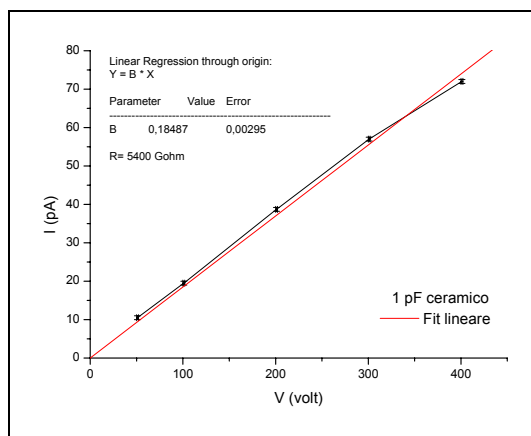


Figura 2-6 Misura di resistenza effettuata utilizzando come carico un condensatore ceramico da 1 pF.

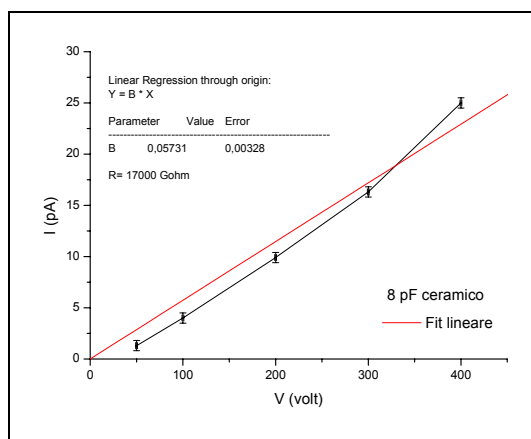


Figura 2-7 Misura di resistenza effettuata utilizzando come carico un condensatore ceramico da 8 pF.

Come si può notare sono stati misurati dei valori di resistenza molto elevati in linea con le previsioni.

3. Analisi dei dati

3.1 Primi risultati

Una prima analisi effettuata sui 10 condensatori, contattando i terminali degli strumenti come descritto nel 2.1, ha mostrato come tutti i campioni fossero in corto circuito. La resistenza in parallelo R_p misurata dal ponte risultava dell'ordine dell'ohm per tutti i condensatori. Una conferma a questa evidenza è stata la misura della resistenza in DC con l'ausilio di un elettrometro.

3.2 Analisi al microscopio ottico del film dielettrico

In seguito a quanto evidenziato nel 3.1 è stata eseguita un'analisi del film dielettrico al microscopio, con l'obbiettivo di verificare la presenza di difetti strutturali.

Le precedenti analisi profilometriche dei campioni, svolte tra le varie fasi di deposizione, avevano dato dei buoni risultati per quanto riguardava i film di alluminio: non risultavano presenti difetti strutturali quali buchi, rugosità e disomogeneità in spessore.

Sui film di SiO_2 non erano state eseguite analisi profilometriche se non per determinare la velocità di deposizione del materiale, come già descritto nel paragrafo 1.3.5. Questa scelta è stata dettata dalla volontà di preservare il più possibile i film dielettrici da stress meccanici; infatti l'analisi al profilometro viene eseguita, come già accennato, scansionando il campione con una punta diamantata. È evidente che ripetute analisi di questo tipo avrebbero compromesso la struttura superficiale dei film.

Solamente in un secondo tempo, alla luce di quanto detto nel 3.1 sono state effettuate analisi al microscopio e al profilometro per i film di SiO_2 . Nelle figure seguenti vengono riportate alcune emblematiche immagini, scattate con diversi ingrandimenti al microscopio:



Figura 3-1 Immagine al microscopio: SiO₂/Si serie #377, 100X.

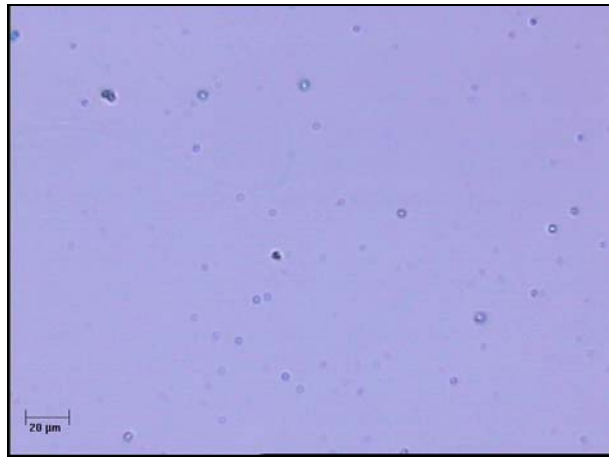


Figura 3-2 Immagine al microscopio: SiO₂/Si serie #377, 20X.

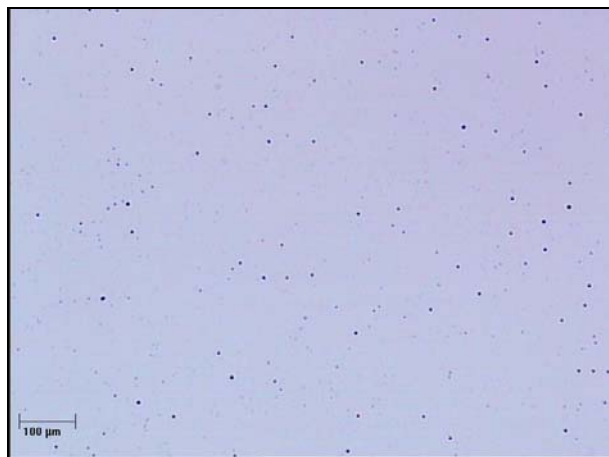


Figura 3-3 Immagine al microscopio: SiO₂/Si serie #377, 5X.

Le macchie presenti, dell'ordine del μm , possono essere identificate come bolle dovute ad intrappolamento del gas utilizzato per generare il plasma, o come veri e propri buchi. Tutti gli oggetti dimensionalmente più grandi del μm non sono difetti strutturali, ma granelli di polvere o sporcizia depositatasi sui campioni proprio in fase di analisi. È possibile distinguere le bolle dai buchi notando che questi ultimi presentano una zona più chiara all'interno, assumendo così un aspetto a "ciambella".

Mentre le bolle non costituiscono, almeno in prima approssimazione, un difetto strutturale compromettente; i buchi sono solitamente uno dei principali problemi a cui si va incontro in questo tipo di applicazioni. Un'analisi profilometrica ha consentito di quantificarne la dimensione media e la profondità. In figura vengono riportati dei profili eseguiti sullo stesso campione a cui si riferiscono le foto mostrate in precedenza:

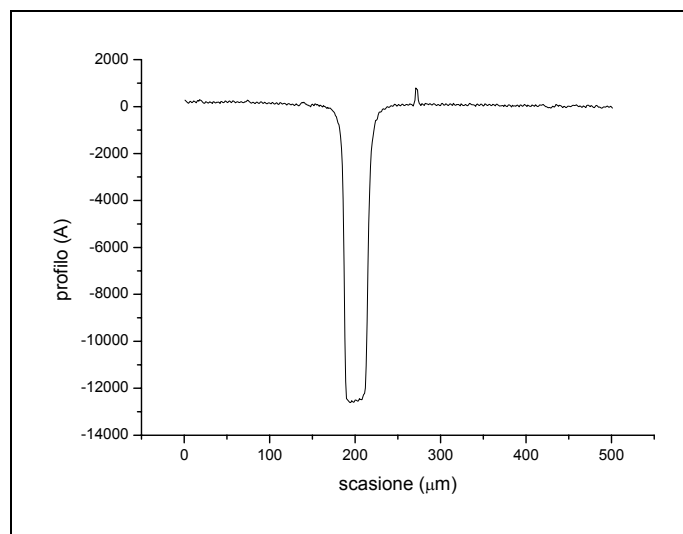


Figura 3-4 Analisi profilometrica eseguita sul campione SiO_2/Si serie #377. Si nota la presenza di un buco sufficientemente profondo da perforare l'intero film dielettrico.

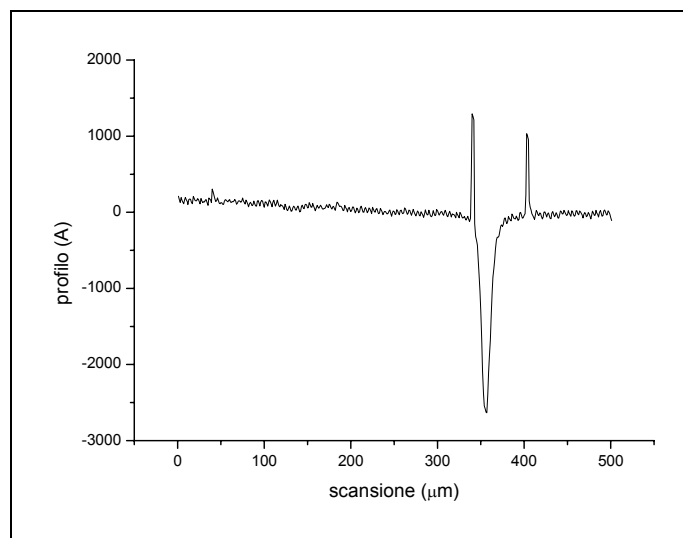


Figura 3-5 Analisi profilometrica eseguita sul campione SiO₂/Si serie #377. Si nota la presenza di un buco e di due bolle adiacenti ad esso.

Dal profilo in Figura 3-4 si nota la presenza di un buco di dimensioni notevoli: la sua profondità può essere stimata dell'ordine di 1.2µm e quindi sufficiente per perforare l'intero film dielettrico (lo spessore maggiore dei nostri film è di 1µm). È evidente come un film di questo tipo non dia nessuna garanzia di tenuta dielettrica. In Figura 3-5 si possono notare due bolle adiacenti ad un buco di profondità inferiore rispetto al precedente.

3.3 Analisi Auger del film dielettrico

Un'ulteriore analisi è stata eseguita tramite spettroscopia Auger sul film di SiO₂ per verificarne la composizione chimica. La presenza di sostanze conduttrici al suo interno poteva dare un ulteriore indizio sulla possibile causa del corto circuito dei condensatori. È stato possibile eseguire questa analisi solo dopo aver rimosso da due campioni lo strato superiore di alluminio (elettrodo B), in maniera totale ed efficace, con della soda caustica; questo per poter svolgere l'analisi all'interno della zona di SiO₂ ricoperta di alluminio. I campioni sacrificati a questo scopo sono stati i due condensatori con dielettrico di spessore inferiore (0.15µm, serie #384 Al/SiO₂/Si).

Non sono state rilevate tracce di tali sostanze contaminanti nella SiO₂, nel limite della sensibilità della tecnica (0.1%). Per avere una maggiore risoluzione di misura è stata eseguita un'ulteriore analisi con tecnologia SIMS (Spettroscopia di massa di ioni secondari).

3.4 Spettroscopia di massa di ioni secondari: SIMS

La tecnica consiste in un fascio primario che colpisce una superficie ad energia compresa tipicamente tra 0.25 e 20keV e ne distacca atomi e molecole: una piccola frazione di questi ($\approx 1\%$) è in forma ionica, pertanto può essere analizzata utilizzando spettrometri di massa a settore magnetico o a quadrupolo. I vantaggi della tecnica SIMS risiedono nella capacità di riconoscere ogni elemento della tavola periodica con limiti di rilevabilità tra 10^{-4} ÷ $10^{-9}\%$ sul totale, con risoluzione di massa $\frac{M}{\Delta M}$ fino a 20000, con risoluzione laterale dell'ordine di 1 μ m e risoluzione in profondità di 1nm. Con questa tecnica si possono effettuare spettri in massa superficiali; tuttavia risulta specialmente indicata per effettuare profili in profondità grazie alla sua capacità di monitorare sequenzialmente le masse d'interesse col procedere dello sputtering del campione. La principale caratteristica della tecnica consiste in questo caso nel poter seguire la distribuzione in profondità degli elementi raggiungendo un bassissimo limite di rilevabilità e mantenendo un'alta risoluzione laterale.

3.5 Analisi SIMS del film dielettrico

Le analisi sono state eseguite in modalità mCs⁺, ovvero utilizzando Cs⁺ come fascio primario e raccogliendo ioni secondari positivi formati dal Cs risputterato e dall'elemento di interesse (nel nostro caso sono state seguite le specie SiCs⁺, OCs⁺ e AlCs⁺). L'energia di impatto utilizzata è stata media

(3keV) e si è fatto uso di un cannone elettronico per compensare la carica indotta dal fascio primario.

Dell'alluminio è stato rilevato in discrete concentrazioni ($\approx 0.004\%$) sia nella porzione di SiO_2 precedentemente ricoperta di alluminio sia all'esterno di essa.

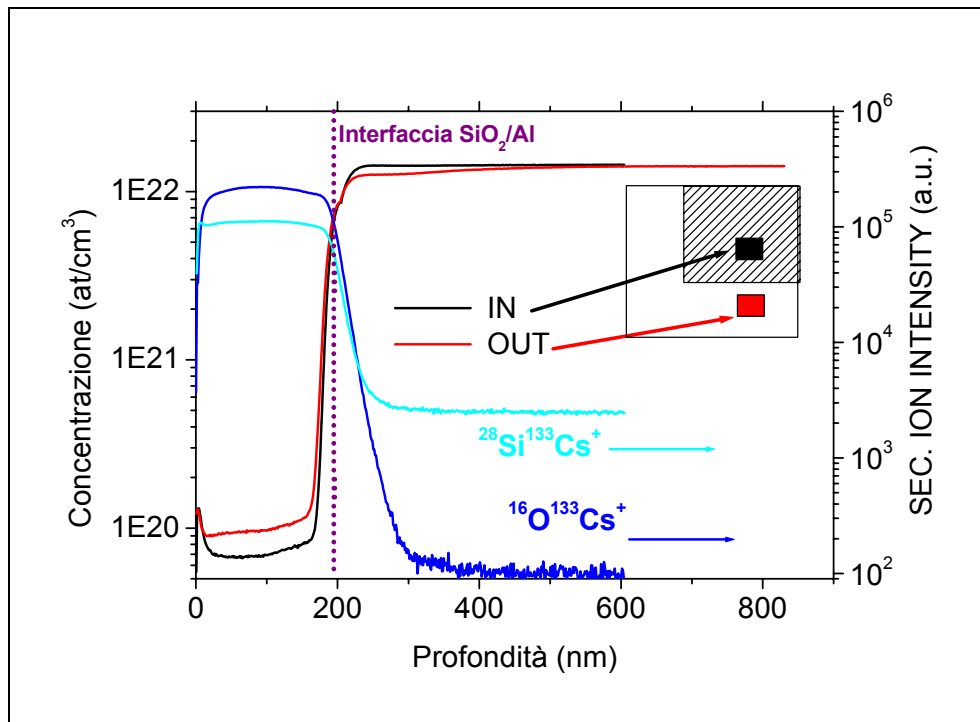


Figura 3-6 Risultati dell'analisi SIMS del film dielettrico; si nota un confronto fra le concentrazioni di alluminio e SiO_2 all'interno e all'esterno della zona precedentemente ricoperta dall'elettrodo B.

La quantità assoluta di ossido non può essere accurata perché è mancato uno standard di alluminio in ossido, ovvero di un campione di riferimento da cui determinare i fattori di sensibilità per quantificare le analisi. Si è quindi utilizzato il fattore di sensibilità per l'alluminio in silicio: si può osservare che la densità che si ottiene in questo modo per l'alluminio in alluminio è di

$1.4 \cdot 10^{22} \frac{\text{atm}}{\text{cm}^3}$, quindi circa un fattore 4 inferiore a quella attesa ($6 \cdot 10^{22} \frac{\text{atm}}{\text{cm}^3}$). Pertanto il valore assoluto può essere sbagliato di un fattore

5. Un'ulteriore indicazione dell'analisi, anche se non particolarmente utile ai nostri scopi, è stata la seguente: oltre l'elettrodo A si è anche rivelata una rilevante presenza di ossigeno all'interfaccia Al/Si segno di un'interfaccia ossidata.

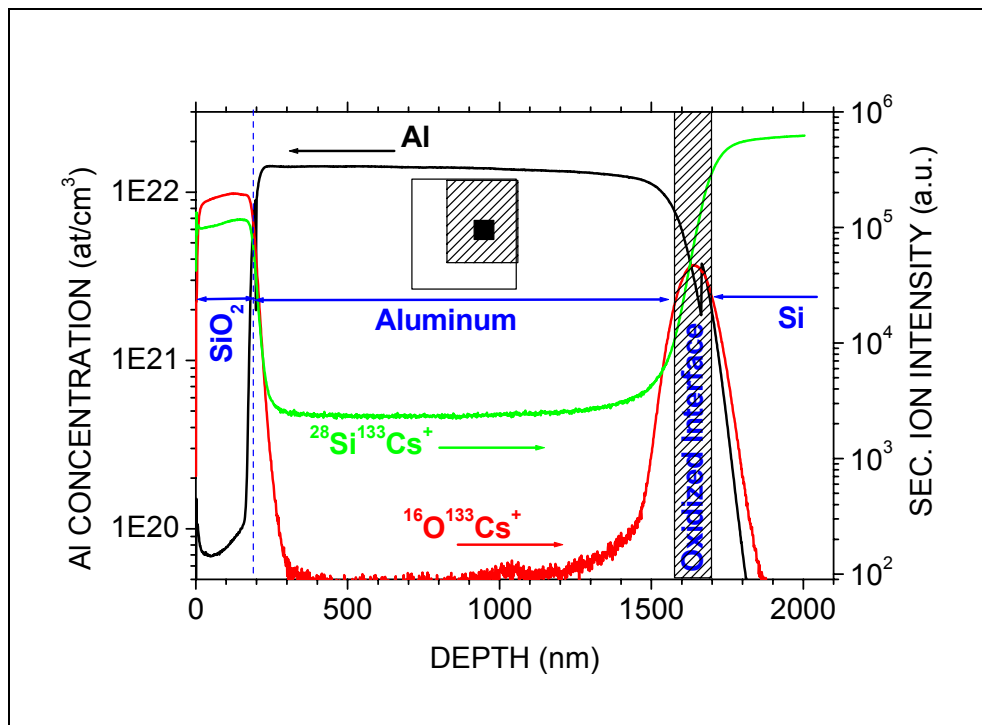


Figura 3-7 Risultati dell'analisi SIMS del film dielettrico; si notano le concentrazioni di alluminio e SiO_2 all'interno della zona precedentemente ricoperta dall'elettrodo B fino all'interfaccia con il substrato in silicio.

3.6 Misure di capacità e resistenza: modifica strutturale dei condensatori

Come ulteriore tentativo sperimentale di ottenere dai condensatori delle misure utili di capacità e resistenza, è stato deciso di utilizzare della pasta d'argento per formare una seconda armatura in sostituzione a quella costituita dall'elettrodo B.

Ciò è stato fatto applicando, sulla metà degli rimanenti 8 condensatori, la pasta d'argento nelle zone di SiO_2 non coperte dall'elettrodo B. Si è cercato di effettuare il ricoprimento mantenendo costante l'area dello stesso per tutti

i condensatori. Con questa metodologia i “nuovi” condensatori non risultavano in corto circuito. Un’analisi del modello che costituisce il nuovo elettrodo B verrà proposta in fase di conclusioni. (4.1)

I valori di capacità (indipendenti dalla frequenza) che ci fornisce la teoria per condensatori di tali caratteristiche sono riportati in tabella; la superficie A è stata stimata in cm^2 tramite analisi software di una immagine fotografica dei campioni, data l’impossibilità di riprodurre la stessa area applicando la pasta d’argento con il pennellino.

d (μm) ± 0.01	A (cm^2) $\pm 10\%$	Capacità (nF) $\pm 10\%$
0.40	0.1	0.8
0.60	0.08	0.4
0.80	0.06	0.3
1.00	0.1	0.3

Tabella 3-1 Stima dei valori di capacità forniti dalla teoria per i valori di superficie costituente i nuovi elettrodi in pasta d’argento per i 4 spessori del film isolante.

Riportiamo nelle seguenti tabelle i dati sperimentali raccolti; i valori riportati sono stati ottenuti utilizzando il ponte RCL.

Frequenza (kHz)	C_P (nF) ± 0.05	R_P (kΩ) ± 1
0.02	3.2	19600
0.1	2.8	4100
1	2.3	395
10	1.6	37
100	1.1	6

Tabella 3-2 Serie #384 Al/SiO₂/Al (0.4 μm)

Frequenza (kHz)	C_P (nF) ±0.05	R_P (kΩ) ±1
0.02	1.9	17000
0.1	1.6	5000
1	1.1	421
10	0.6	69
100	0.4	19

Tabella 3-3 Serie #385 Al/SiO₂/Al (0.6 μm)

Frequenza (kHz)	C_P (nF) ±0.05	R_P (kΩ) ±1
0.02	1.5	26000
0.1	1.1	4300
1	0.6	577
10	0.3	147
100	0.2	39

Tabella 3-4 Serie #385 Al/SiO₂/Al (0.8 μm)

Frequenza (kHz)	C_P (nF) ±0.05	R_P (kΩ) ±1
0.02	1.2	65000
0.1	1.0	14000
1	0.8	1600
10	0.5	86
100	0.3	10

Tabella 3-5 Serie #386 Al/SiO₂/Al (1 μm)

Si è valutato l'andamento dei valori di capacità in funzione dello spessore del film dielettrico. Per un miglior confronto fra i 4 condensatori, i valori di capacità sono stati normalizzati in superficie. In figura viene riportato un grafico raffigurante l'andamento dell'inverso della capacità normalizzata in superficie in funzione dello spessore del film dielettrico;

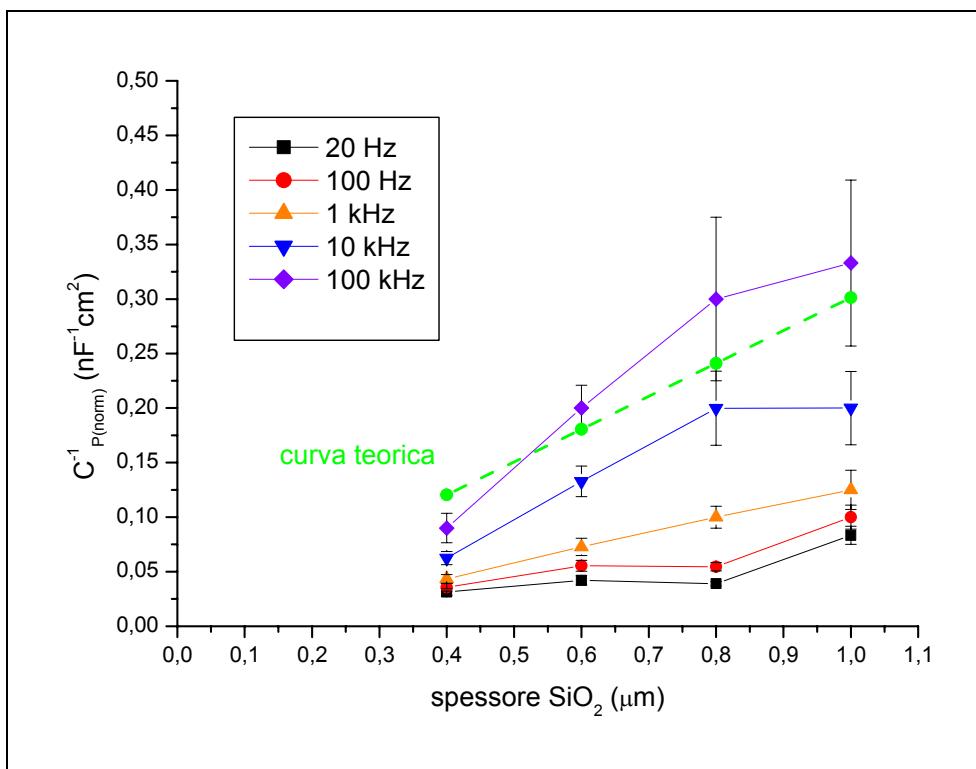


Figura 3-8 Andamento dell'inverso della capacità normalizzata in superficie in funzione dello spessore del film dielettrico

Il modello utilizzato, data la condizione

$$\lim_{d \rightarrow 0} \frac{1}{C_p} = 0 \quad (\text{Equazione 3-1})$$

impone che, estrapolando l'intercetta delle curve in grafico, si ottenga una retta passante per l'origine. Si nota come, solamente la curva corrispondente alle misure acquisite a bassa frequenza (20Hz), possa soddisfare, entro le barre d'errore, questo requisito. Il seguente grafico mostra la curva delle misure prese a 20Hz con un fit lineare eseguito senza forzarne l'intercetta per l'origine;

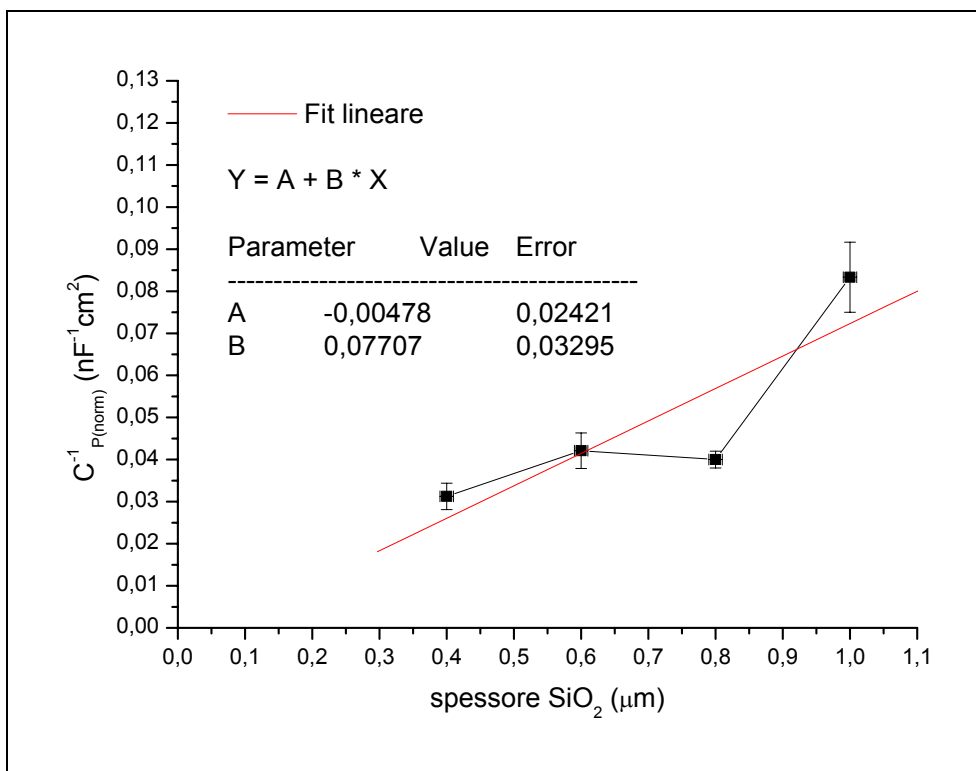


Figura 3-9 Curva dell'inverso della capacità normalizzata in superficie per le misure prese a 20Hz con un fit lineare eseguito senza forzare l'intercetta per l'origine

Si può notare come l'intercetta sia nel punto con ordinata

$$y=0.00\pm 0.02 \text{ nF}^{-1}\text{cm}^2$$

La regressione lineare risulta quindi compatibile entro l'errore con una retta passante per l'origine. Nonostante questo, appare evidente come i 4 punti non descrivano un andamento rettilineo.

Una considerazione inversa può essere fatta analizzando le curve relative alle misure effettuate ad alta frequenza: l'andamento è maggiormente approssimabile ad una retta, ma l'intercetta che si ottiene effettuando una regressione lineare non è assolutamente compatibile con una retta passante per l'origine.

Inoltre, in contrasto con quanto ci si aspettava, si può notare una forte dipendenza della capacità dalla frequenza di eccitazione.

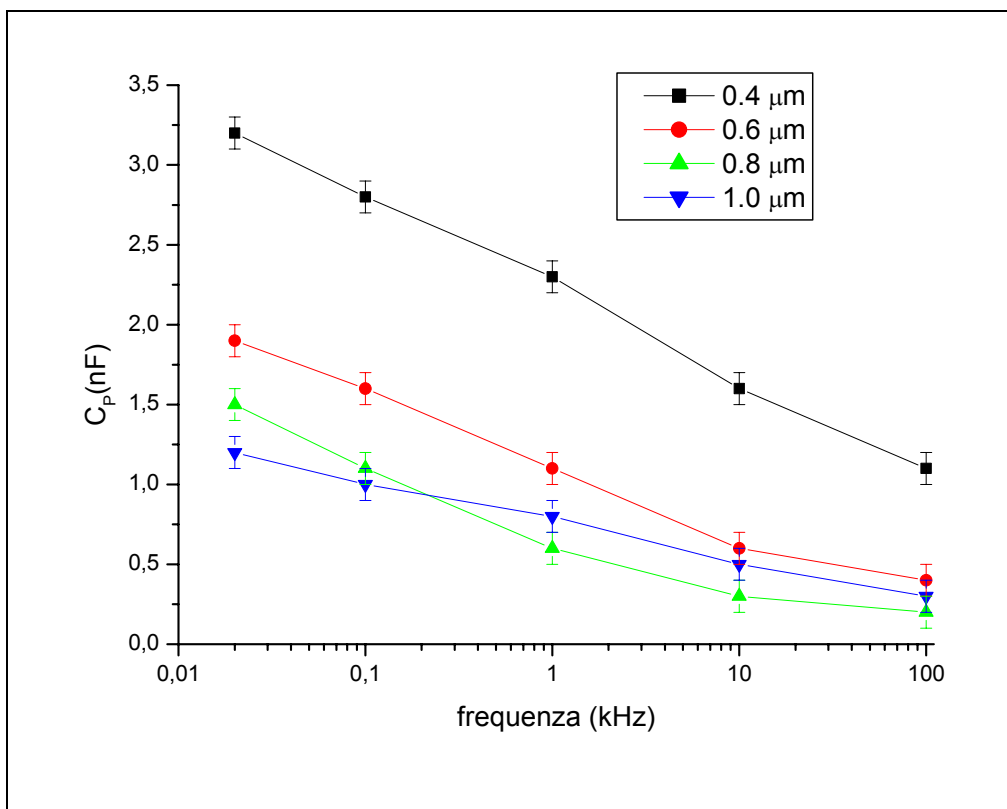


Figura 3-10 Capacità in funzione della frequenza di eccitazione: si può notare una forte dipendenza tra le due grandezze.

3.7 Misure di resistenza in DC: resistività dielettrico

Sono riportati in tabella i valori di resistenza misurati in tensione continua, come descritto nel 2.3 e i valori teorici attesi considerando la resistività del dielettrico e la struttura geometrica dei condensatori utilizzati:

d (μm) ±0.01	A (cm²) ±10%	R_{DC} (MΩ)	R_{teorica} (MΩ) ±10%
0.40	0.1	1400±170	4
0.60	0.08	400±40	7
0.80	0.06	900±130	13
1.00	0.1	900±130	10

Tabella 3-6 Valori di resistenza misurati in tensione continua, come descritto nel 2.3 e valori teorici attesi considerando la resistività del dielettrico e la struttura geometrica dei condensatori utilizzati

I risultati sperimentali evidenziano un totale disaccordo con i dati teorici. Non si nota nessuna dipendenza lineare della resistenza R_{DC} dallo spessore del dielettrico.

3.8 Misure di rigidità dielettrica: tensione di breakdown

In tabella sono riportati i valori di tensione di breakdown per i 4 condensatori, raccolti come descritto nel paragrafo 2.4.

Serie	Tensione di breakdown (Volt) ± 0.5	Rigidità dielettrica (MV/m)
#384 pasta Ar/SiO ₂ /Al (0.4 μm)	25.7	64 \pm 2
#385 pasta Ar/SiO ₂ /Al (0.6 μm)	22.7	38 \pm 1
#385 pasta Ar/SiO ₂ /Al (0.8 μm)	29.5	37 \pm 1
#386 pasta Ar/SiO ₂ /Al (1.0 μm)	26.2	26 \pm 1

Tabella 3-7 Valori di tensione di breakdown per i 4 condensatori, raccolti come descritto nel paragrafo 2.4

Da questi risultati si stima per la SiO₂ una rigidità dielettrica media pari a $\approx 40 \frac{MV}{m}$, in discreto accordo con il valore tabulato per la SiO₂ di $30 \frac{MV}{m}$.

Graficando il campo di breakdown in funzione dello spessore del dielettrico otteniamo un risultato interessante che conferma quanto già appreso dalla letteratura; come si nota dal grafico il campo di breakdown risulta inversamente proporzionale allo spessore del materiale dielettrico.

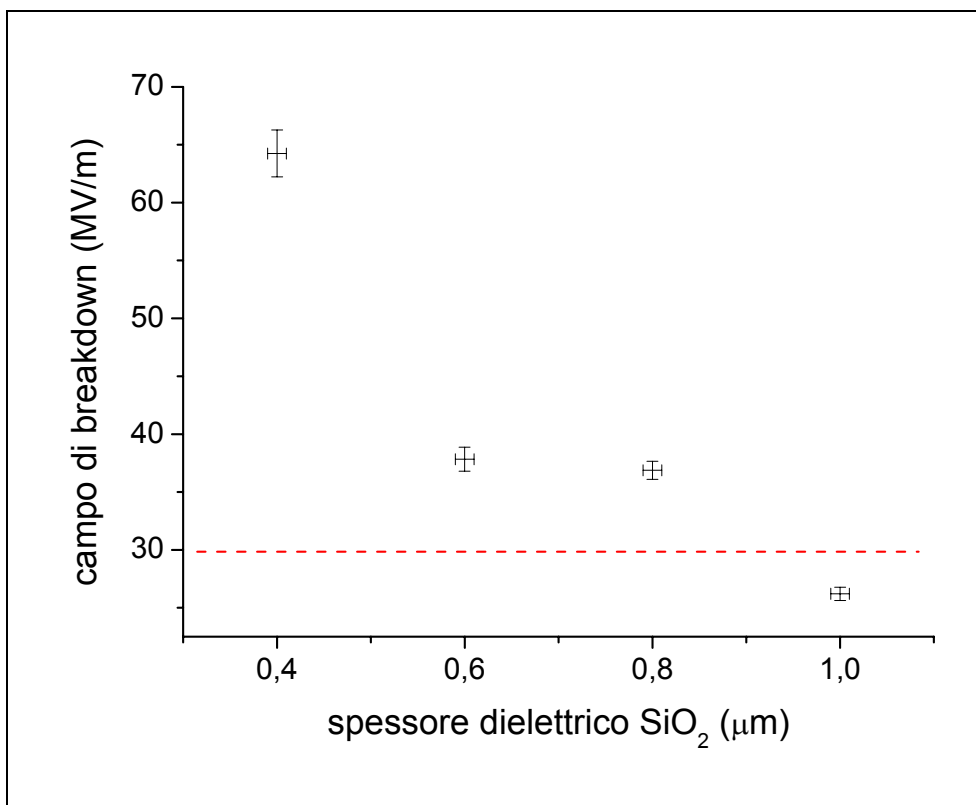


Figura 3-11 Campo di breakdown in funzione dello spessore del dielettrico. Il campo di breakdown risulta inversamente proporzionale allo spessore del materiale dielettrico. In rosso la curva teorica.

Durante la fase di misura, nel momento in cui si aumentava gradualmente per successivi passi la tensione, si notava come la corrente, per valori di tensione vicini a quella di breakdown, aumentava lentamente fino a stabilizzarsi ad un valore dell'ordine del mA. Poco prima di raggiungere la soglia di breakdown erano osservabili delle piccole scariche tra i due elettrodi, su tutta la superficie definita dalla pasta d'argento. Tale fenomeno era di immediato preludio al breakdown.

4. Conclusioni

Sono state effettuate misure di capacità, resistenza e rigidità dielettrica su 10 condensatori piani realizzati tramite deposizione di film sottili attraverso un processo di sputtering catodico. Si sono scelti l'alluminio come elemento conduttore e SiO₂ come dielettrico isolante.

Indipendentemente dallo spessore del film dielettrico, variabile tra 0.4÷1.0µm, i condensatori sono risultati, ad una prima analisi, tutti in corto circuito. Una prima osservazione effettuata al microscopio, seguita da una successiva analisi profilometrica dei film isolanti, ha evidenziato la presenza di notevoli difetti strutturali, quali buchi e bolle dovute ad intrappolamento del gas (Ar) in fase di deposizione. Le dimensioni in profondità dei buchi sono risultate dell'ordine dello spessore del dielettrico e quindi sufficienti per compromettere la funzionalità dei film isolanti.

Un'ulteriore analisi spettroscopica con tecnologia Auger e, in un secondo tempo SIMS, hanno rivelato tracce di sostanza conduttrice (alluminio) in diverse zone del film dielettrico con una concentrazione pari al 0.004%. Non risulta comunque ipotizzabile una dipendenza del cortocircuito dei condensatori da questa scarsa presenza di alluminio nel film dielettrico, in quanto la caratterizzazione elettrica dei condensatori è stata possibile modificandone la struttura originaria, rimuovendo l'elettrodo superiore di alluminio, e sostituendolo con uno strato di pasta d'argento applicato manualmente ai campioni. Attraverso tale procedura i condensatori non risultavano più in corto circuito. La spiegazione di questo sta nel fatto che l'estensione superficiale dei buchi è risultata notevolmente inferiore alla dimensione media dei grani costituenti la pasta d'argento. Si può quindi ipotizzare che la granulosità del materiale conduttore non abbia permesso allo stesso di introdursi nei buchi e di provocare la cortocircuitazione dei condensatori.

Le misure dei parametri elettrici quali capacità e resistenza, sono risultate sostanzialmente incompatibili con i valori attesi, previsti dalla teoria del modello utilizzato.

I valori di capacità ottenuti si sono rivelati superiori a quelli attesi e si è evidenziata una forte dipendenza di questi dalla frequenza di eccitazione.

I valori di resistenza erano superiori in media di un fattore ≈ 140 rispetto alle aspettative, senza inoltre evidenziare alcuna dipendenza dallo spessore del dielettrico.

Le misure dei valori della tensione di breakdown si sono rivelate valide, fornendo per la SiO_2 un valore medio di rigidità dielettrica pari a $41 \frac{\text{MV}}{\text{m}}$ in

discreto accordo con il valore teorico di $30 \frac{\text{MV}}{\text{m}}$. Inoltre si è confermato

l'interessante fenomeno che evidenzia come la tensione di breakdown diminuisca all'aumentare dello spessore del dielettrico.

Il modello di condensatore proposto di seguito può spiegare l'evidente incompatibilità dei dati raccolti rispetto a quelli teoricamente previsti per quanto riguarda i valori di resistenza.

4.1 Analisi del modello di condensatore utilizzato in fase di caratterizzazione

Come precedentemente riportato, in fase di misura sono stati trovati valori di resistenza maggiori di quelli previsti dalla teoria di un fattore $50 \div 350$ a seconda dello spessore del dielettrico. Ciò potrebbe essere imputabile ad una sovrastima della superficie di contatto dell'armatura realizzata tramite l'applicazione della pasta argentata. Infatti, la pasta d'argento è formata da grani conduttori, approssimabili a delle sfere di diametro inferiore a $18 \mu\text{m}$, come riportato nel foglio illustrativo allegato al prodotto. Il tutto è immerso in una vernice di tipo plastico e in un solvente, nello specifico acetato di butile. Sul totale, è presente un contenuto di argento pari al 56%.

In figura viene presentata una ricostruzione approssimata dell'interfaccia pasta d'argento/SiO₂, secondo quanto detto a proposito della composizione della pasta;

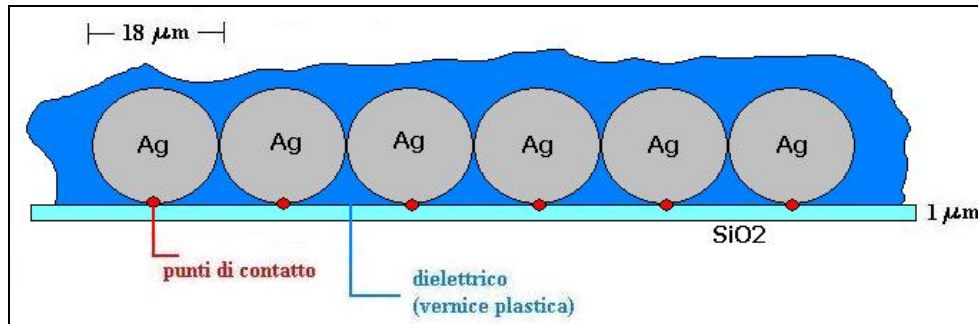


Figura 4-1 Ricostruzione approssimata dell'interfaccia pasta d'argento/SiO₂ considerando la struttura granulosa della pasta.

È evidente come, in una situazione di questo tipo, la superficie di pasta d'argento che contribuisce in maniera effettiva al contatto elettrico con il film dielettrico è inferiore a quella totale stimata. Inoltre, tra una sfera conduttrice e l'altra, è presente della sostanza dielettrica, con una resistività paragonabile in ordine di grandezza a quella del vetro, che somma il suo contributo a quello della SiO₂.

Avendo stimato in un fattore medio di 140, la discrepanza tra valori di resistenza misurati e valori teorici e considerando la superficie stimata pari a 0.1cm^2 possiamo ricavare una stima della superficie di contatto effettiva:

$$S_{\text{contattoeffettiva}} = \frac{0.1\text{cm}^2}{140} \approx 7 \times 10^{-3} \text{cm}^2 \quad (\text{Equazione 4-1})$$

Calcoliamo, ora, il numero di sfere conduttrici, quindi di punti di contatto, di diametro $18\mu\text{m}$ presenti in un area di 0.1cm^2 :

$$N_{\text{puntidiconatto}} = \frac{S_{\text{stimata}}}{S_{\text{sfera}}} = \frac{0.1\text{cm}^2}{(18 \cdot 18) \times 10^{-8} \text{cm}^2} \approx 3 \times 10^4 \quad (\text{Equazione 4-2})$$

Possiamo ora ricavare un valore approssimato della superficie corrispondente ad un punto di contatto:

$$S_{\text{puntodiconatto}} = \frac{S_{\text{contattoeffettiva}}}{N_{\text{puntodiconatto}}} = \frac{7 \times 10^{-3} \text{ cm}^2}{3 \times 10^4} \approx 2.3 \times 10^{-7} \text{ cm}^2 = 23 \mu\text{m}^2$$

(Equazione 4-3)

Con l'aiuto della rappresentazione grafica in figura è possibile stimare lo spessore del dielettrico plastico corrispondente a tale area e quindi utile ai fini del contatto elettrico:

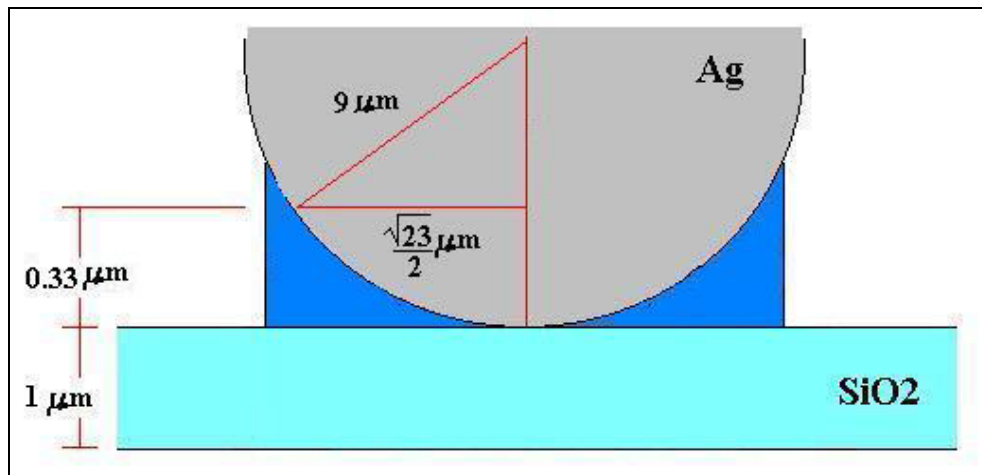


Figura 4-2 Stima dello spessore del dielettrico plastico corrispondente all'area calcolata e quindi utile ai fini del contatto elettrico. Disegno non in scala.

$$\text{Spessore}_{\text{tipico}}_{\text{dielettriciplastico}} \leq 9 \mu\text{m} - \sqrt{(9 \mu\text{m})^2 - \left(\frac{\sqrt{S_{\text{puntodiconatto}}}}{2} \right)^2} \approx 0.3 \mu\text{m}$$

(Equazione 4-4)

Questo spessore tipico di dielettrico aggiuntivo risulta dello stesso ordine o minore dello spessore della SiO₂. Anche se non è conosciuta la resistività dello specifico dielettrico plastico utilizzato nella pasta d'argento, materiali simili mostrano resistività paragonabili a quella della SiO₂. In questo quadro, il nostro modello che prevede una superficie microscopica di contatto inferiore a quella macroscopica può effettivamente dare una giustificazione ai valori di resistenza di perdita misurati.

Un dato interessante riguarda la resistività elettrica della pasta d'argento: il produttore fornisce un valore di $10^{-5} \Omega \cdot cm$ che è sensibilmente maggiore del valore tabulato per l'argento pari a $\approx 1 \times 10^{-7} \Omega \cdot cm$. C'è un fattore 100 di discrepanza tra le resistività della pasta e dell'argento: questo fatto può essere visto come una conferma del modello.

4.2 Per un successivo sviluppo dei condensatori

Dal presente documento si possono trarre dei suggerimenti per uno sviluppo futuro di condensatori realizzati tramite deposizione di film sottili. Alcune di queste osservazioni sono state tratte da problemi o situazioni critiche affrontate in fase di deposizione:

- la fragilità dei campioni può suggerire l'impiego di un substrato conduttore, al posto del silicio qui utilizzato, che funga egli stesso da primo elettrodo. In questa maniera verrebbe discretamente ridimensionata la delicatezza dell'oggetto e, altro notevole vantaggio, si otterrebbe un notevole risparmio in termini di tempo: un processo di deposizione di materiale conduttore dello spessore di $1 \mu m$ su 10 campioni, in determinate condizioni di operatività può richiedere una settimana di lavoro;
- lo sviluppo di una metodologia alternativa di mascheratura dei campioni in fase di deposizione è necessaria per garantire un ricoprimento esclusivo delle zone interessate con contorni ben netti. La plastica (PET) utilizzata si è rivelata troppo sensibile alle alte temperature presenti nella camera in fase di deposizione; quello che avveniva era la deformazione delle maschere e la loro non perfetta aderenza alle superfici da ricoprire.
- la presenza di difetti strutturali quali bolle e buchi necessita di uno studio approfondito per ricercare le cause di questi fenomeni. Questi difetti non sono comunque imputabili ad insufficienti procedure di

pulizia e preparazione dei campioni: infatti i buchi risultano di dimensioni notevolmente inferiori rispetto alla dimensione tipica di un granello di polvere. Inoltre potrebbe essere interessante valutare il comportamento delle bolle sotto campo elettrico.

5. Bibliografia

Gissler W., Jehn H.A. *Advanced techniques for surface engineering*. Brussels and Luxembourg: ECSC, 1992.

Allaria S. *Il vuoto oggi*. Paravia, 1981.

Stuart R.V., *Vacuum Technology, Thin Films, and Sputtering*. Academic Press, 1983.

Gissler W., Jehn H.A. *Surface engineering in the industrial practice*.

Chapman B., *Glow Discharge Processes: Sputtering and Plasma Etching*. John Wiley & Sons Inc, 1980.

Anderson J.C., "Dielectric and transport properties of insulating films", *The journal of vacuum science and technology*. 1971; **9**(1): p. 1.

Xianyun Ma, Sudarshan T.S., "Prebreakdown and breakdown investigation of broad area electrodes in the micrometric regime", *The journal of vacuum science and technology*. 1998; **16**(3): p. 1174.

Xianyun Ma, Sudarshan T.S., "High field breakdown characteristics of micrometric gaps in vacuum", *The journal of vacuum science and technology*. 1998; **16**(2): p. 745.

Jeffery S., Sofield C.J., Pethica J.B., "The influence of mechanical stress on the dielectric breakdown field strength of thin SiO₂ films", *Applied physics letters*. 1998; **73**(2): p. 172.

Rzad. S. et al., "Advanced materials for high energy density capacitors".

Lebey T., Malec D., Dutarde E., "Breakdown characteristics of different grades of CVD diamond samples", *7th conference on solid dielectrics, June 25-29, 2001, Eindhoven, the Netherlands*.

Jo M.H., Park H.H., "Leakage current and dielectric breakdown behavior in annealed SiO₂ aerogel films", *Applied physics letters*. 1998; **72**(11): p. 1391.

Bartali R., *Applicazione e caratterizzazione di un plasma di Argon per la deposizione di film sottili di carbonio*.

<http://www.auriga.lnl.infn.it>.

<http://www.ing.unitn.it/~colombo>.

Ringraziamenti

Bhè, visto che non ho impiegato proprio poco tempo a finire questa università la lista rischia di essere davvero lunga; per questo cercherò di essere il più ordinato possibile. Allora inizio...

Il più grande GRAZIE va ai miei genitori e ad Elisa;
a mamma AnnaMaria per avermi sostenuto soprattutto negli ultimi mesi, per aver sopportato il mio nervosismo e i miei “musì”, per tutte le volte che mi ha preparato la “tisana calmante” e le camomille: grazie mamma;
a papà Luciano che è sempre stato severo quando si trattava di studiare, fin dai tempi delle elementari, perché attraverso la sua rigidità ha sempre cercato di assicurarmi una vita serena e meno difficile di quella che per tanti anni di lavoro lui ha avuto: grazie papà;
a Elisa per tutto il bene che mi dimostra, per avermi fatto crescere in questi tanti bei anni passati assieme, per aver sempre creduto in me anche quando io non ci credevo più, per aver pazientemente ascoltato le mie preoccupazioni e i miei monologhi su come andava la tesi, nonostante i suoi mille impegni e, recentemente, l’inizio del suo nuovo lavoro: grazie piccola Eli.

Un affettuosissimo e particolare ringraziamento alle mie nonne Giuseppina e Elda, per avermi sempre insegnato i veri valori della vita, per la loro allegria e la loro preziosa compagnia, per tutte le preghiere che hanno detto la sera prima di ogni mio esame, per i magnifici pranzi che mi preparano ogni volta che vado a trovarle; ricordo con tanto affetto anche due persone che non ci sono più: nonno Carlo che mi ha trasmesso la mania di “fojare” e aggiustare le cose e lo zio Agostino con le sue mitiche battute e le lunghe partite a carte.

Non dimentico mia sorella Laura che disturbo sempre quando mi serve il computer...

Grazie a Paolo e Diego, le mie guide alpine di fiducia, con cui ho condiviso tante belle gite in montagna; un ricordo anche per Michele e Daniele, storici componenti del quartetto del liceo.

Grazie al mio amicone Emiliano per il sostegno nei momenti difficili, per tutte le serate passate a divertirci e sfogarci suonando come dei matti, per gli indimenticabili anni delle medie all'Arcivescovile.

Grazie a (Dona)Tella e Giu(lia) per la loro amicizia e vicinanza e a tutti i bambini del Coloniola che in campeggio e in diversi anni di oratorio mi hanno fatto divertire un mondo.

Grazie al coro "Magiche Note", a Claudia, Martina e Silvia che mi sopportano quando suono mentre loro spiegano le cose ai bambini e quando passo tempi memorabili ad accordare le loro chitarre.

Rimanendo in tema musicale, ringrazio Ghigo Renzulli che mi ha dato la passione di suonare la chitarra e i Litfiba che da anni mi fanno compagnia con la loro musica e mi danno sempre nuovi stimoli per continuare a suonare.

Un grazie a tutte le "mie" storiche Panda, da quella azzurra del nonno su cui ho imparato a guidare (salvo parcheggiare nel garage...), quella verde che mi ha salvato la vita e quella grigia, la più "tecnologica".

Infine, ma non meno importanti, ringrazio Giovanni per avermi affidato questo progetto e per aver creduto nelle mie capacità, Michele per la sua enorme disponibilità, per la sua simpatia, per avermi aiutato e sostenuto in questo mio ultimo passo che conclude una fase importante della mia vita e Nadhira per avermi dedicato gran parte del suo tempo e delle sue energie durante i miei due mesi di permanenza all'IRST.