

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PISA  
Facoltà di Ingegneria  
Corso di Laurea in INGEGNERIA ELETTRONICA

TESI DI LAUREA SPECIALISTICA

**Fabbricazione di microstrutture *free-standing*  
in silicio cristallino mediante  
attacco elettrochimico**



**Relatori:**

Prof. Andrea NANNINI

Ing. Giuseppe BARILLARO

**Candidata:**

Angela CALO'

Anno Accademico 2005-2006

*a Daniele*

# Indice

<b>INTRODUZIONE</b> .....	<b>6</b>
<b>CAPITOLO 1 MEMS E TECNICHE DI FABBRICAZIONE</b> .....	<b>8</b>
1.1 NASCITA E SVILUPPO DEI <i>MEMS</i> .....	8
1.2 CHE COSA SONO I <i>MEMS</i> ?.....	10
1.3 <i>SCALING</i> DELLE DIMENSIONI DEI <i>MEMS</i> : VANTAGGI E SVANTAGGI .....	13
1.3.1 <i>Influenza dello scaling sulle proprietà del materiale</i> .....	15
1.3.2 <i>Scaling dei sistemi meccanici</i> .....	15
1.3.3 <i>Scaling dei sistemi termici</i> .....	16
1.3.4 <i>Scaling dei sistemi elettrici e magnetici</i> .....	16
1.4 PERCHÉ INTERESSANO I <i>MEMS</i> ? .....	18
1.5 UTILIZZO DEL SILICIO NELLA PRODUZIONE DI MICROSISTEMI .....	19
1.6 TECNICHE DI FABBRICAZIONE DEI <i>MEMS</i> .....	22
1.6.1 <i>Micromachining del silicio</i> .....	23
1.6.1.1 Attacchi chimici.....	23
1.6.1.2 Bulk micromachining .....	30
1.6.1.3 Surface micromachining .....	35
1.6.2 <i>Tecnica LIGA (Lithography Galvanic Abformung)</i> .....	37
1.6.3 <i>SU-8</i> .....	38
1.6.4 <i>Stampaggio plastico con PDMS</i> .....	38
1.6.5 <i>Packaging</i> .....	38
<b>CAPITOLO 2 APPLICAZIONI E PROSPETTIVE DEI MEMS</b> .....	<b>43</b>
2.1 SENSORI E ATTUATORI.....	44
2.1.1 <i>Sensori</i> .....	44
2.1.2 <i>Attuatori</i> .....	50
2.1.3 <i>Memorie</i> .....	51
2.2 MEMS OTTICI.....	53

2.3	MEMS MICROFLUIDICI E BIO-MEMS .....	56
2.3.1	<i>MEMS microfluidici</i> .....	57
2.3.2	<i>Bio-MEMS</i> .....	58
2.3.2.1	Analisi del DNA .....	59
2.3.2.2	Array per l'ibridazione del DNA .....	62
2.3.2.3	Drug-delivery.....	65
2.4	MEMS A RADIO FREQUENZA .....	66
2.5	ENERGY SCAVENGING .....	69
2.5.1	<i>Energia dalle vibrazioni</i> .....	71
2.5.2	<i>Energia dai gradienti termici</i> .....	74
2.5.3	<i>Energia dalla luce</i> .....	75
2.6	PROSPETTIVE DI MERCATO.....	79
2.6.1	<i>Aspetti finanziari</i> .....	79
2.6.2	<i>Aspetti tecnologici</i> .....	81
2.6.3	<i>Il contributo di Darpa</i> .....	83
2.6.4	<i>Previsioni Nexus: periodo 2005-2009</i> .....	86
2.6.5	<i>Ricerca ed industria in Europa</i> .....	89
2.6.6	<i>Le sfide tecnologiche aperte</i> .....	90
<b>CAPITOLO 3 MICROMACHINING ELETTROCHIMICO.....</b>		<b>93</b>
3.1	IL SISTEMA Si-HF .....	94
3.1.1	<i>Interfaccia Si-HF</i> .....	94
3.1.2	<i>La caratteristica J-V</i> .....	96
3.1.3	<i>La dissoluzione elettrochimica del silicio</i> .....	101
3.1.4	<i>La densità di corrente critica Jps</i> .....	103
3.2	IL SILICIO MACROPOROSO .....	105
3.2.1	<i>Formazione di macropori su substrati di silicio di tipo n</i> .....	105
3.2.1.1	Meccanismo di formazione dei macropori <i>random</i> .....	108
3.2.2	<i>Modello analitico per la crescita di macropori su silicio n</i> .....	116
3.3	<i>MICROMACHINING ELETTROCHIMICO</i> .....	124
3.3.1	<i>Macropori ordinati</i> .....	124
3.3.2	<i>Strutture dalla geometria complessa</i> .....	127
3.3.3	<i>Vantaggi del micromachining elettrochimico</i> .....	127
<b>CAPITOLO 4 FABBRICAZIONE DI MICROSTRUTTURE FREE-STANDING.....</b>		<b>129</b>
4.1	PRINCIPIO DI BASE PER LA REALIZZAZIONE DI STRUTTURE <i>MEMS</i> SOSPENSE .....	130
4.2	PROGETTAZIONE DELLA MASCHERA .....	133

---

4.3	PASSI TECNOLOGICI .....	141
4.3.1	<i>Litografia</i> .....	142
4.3.2	<i>Protezione del back del campione e attacco dell'ossido</i> .....	146
4.3.3	<i>Attacco wet del substrato di silicio</i> .....	148
4.3.4	<i>Attacco elettrochimico (ElectroChemical Etching)</i> .....	153
4.3.4.1	Descrizione del <i>set-up</i> sperimentale .....	154
4.3.4.2	Prove sperimentali .....	160
4.4	STRUTTURE MEMS FREE-STANDING .....	173
	<b>CONCLUSIONI</b> .....	<b>180</b>
	<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	<b>182</b>

## Introduzione

I *MEMS* (Micro-Electro-Mechanical-Systems) sono ormai riconosciuti come una delle tecnologie più promettenti del ventunesimo secolo.

La tecnologia *MEMS* permette, infatti, di integrare elementi meccanici, sensori, attuatori di dimensioni micrometriche insieme a circuiti elettronici su uno stesso substrato: i circuiti elettronici del chip possono essere visti come il “cervello” di un sistema, a cui gli altri dispositivi sensori/trasduttori aggiungono “sensi” e “braccia”. Si ha, quindi, un sistema in grado di prelevare informazioni dall’ambiente circostante, effettuare delle elaborazioni ed eseguire, di conseguenza, azioni opportune.

I vantaggi dei *MEMS* comprendono inoltre un minore consumo energetico, migliori *performance*, peso ridotto e costi inferiori, rispetto ai dispositivi tradizionali. Le dimensioni ed il peso ridotti conducono ad un minore consumo energetico, mentre la fabbricazione in serie riduce i costi di produzione e di assemblaggio. In effetti, i *MEMS* sono attualmente realizzati con processi tecnologici compatibili con quelli dei circuiti integrati, opportunamente modificati per effettuare una lavorazione su scala micrometrica (microlavorazione o *micromachining*) del silicio; il silicio, infatti, per le sue proprietà elettriche e meccaniche è oggi il materiale più utilizzato nella produzione di microsistemi.

Le odierne applicazioni dei *MEMS* vanno dai sensori e attuatori (utilizzati, ad esempio, nel settore automobilistico), ai nuovi dispositivi di memorizzazione dei dati; dalle testine per stampanti a getto di inchiostro ai microspecchi per

applicazioni di ottica integrata; dai chip per l'analisi del DNA ed il rilascio controllato dei farmaci (*drug-delivery*), agli *switch* a radio frequenza.

Un'altra importante applicazione dei microsistemi riguarda l'"energy scavenging" (o "energy harvesting" = riciclare energia), termine che indica il tentativo di "riciclare" energia da forme in cui essa pare destinata ad essere persa; quali vibrazioni, gradienti termici o luce.

Il principale scopo di questo lavoro di tesi è quello di sviluppare una nuova metodologia di fabbricazione di microstrutture *free-standing* in silicio cristallino utilizzando una tecnologia a basso costo, il *micromachining elettrochimico*, rispetto alle tecniche oggi impiegate per la fabbricazione di strutture *MEMS*.

Dopo aver esaminato i vantaggi e gli svantaggi delle moderne tecniche di fabbricazione e le principali applicazioni dei *MEMS*, rispettivamente nel primo e nel secondo capitolo, nel terzo capitolo verrà analizzata in dettaglio la tecnica del *micromachining elettrochimico* del silicio (attacco da fase liquida del silicio in soluzione a base di acido fluoridrico). Nel quarto capitolo, infine, dopo aver presentato la metodologia di fabbricazione di microstrutture *free-standing* in silicio cristallino mediante *micromachining elettrochimico*, verranno illustrati in dettaglio il processo di fabbricazione e i risultati sperimentali ottenuti.