



**Università degli Studi di Padova**

---

FACOLTÀ DI INGEGNERIA  
Corso di Laurea Triennale in Ingegneria dell'Informazione

TESI DI LAUREA TRIENNALE

# **Microfoni MEMS: tecnologia, circuiti e analisi di mercato**

Candidato:  
**Marcello Vertuan**  
Matricola 591988

Relatore:  
**Prof. Andrea Gerosa**



# Indice

<b>Introduzione</b>	<b>5</b>
<b>1 Progetto e processo di fabbricazione dei microfoni MEMS</b>	<b>7</b>
1.1 Microfono a condensatore realizzato con wafer SOI . . . . .	7
1.2 Microfono a condensatore con diaframma perforato . . . . .	9
1.3 Microfono piezoelettrico con diaframma a isola sospesa . . . . .	11
1.4 Microfono piezoresistivo con diaframma sospeso . . . . .	13
<b>2 Architettura dei microfoni MEMS</b>	<b>16</b>
2.1 Principi di funzionamento del microfono MEMS a condensatore	16
2.1.1 Adattamento delle impedenze e polarizzazione . . . . .	18
2.2 Strutture principali integrate di elaborazione del segnale . . . . .	19
<b>3 Proprietà e caratteristiche tecniche a confronto</b>	<b>23</b>
3.1 Analisi e confronto delle proprietà . . . . .	23
<b>4 Analisi di mercato e previsioni future</b>	<b>29</b>
4.1 Ambiti di utilizzo ed espansione del mercato . . . . .	29
<b>Conclusioni</b>	<b>33</b>
<b>A Appendice</b>	<b>34</b>
<b>B Appendice</b>	<b>35</b>
<b>Bibliografia</b>	<b>36</b>

## Elenco delle figure

1	Processo di fabbricazione del microfono a condensatore con wafer SOI. . . . .	8
2	Processo di fabbricazione del microfono a condensatore con diaframma perforato. . . . .	10
3	Processo di fabbricazione del microfono piezoelettrico con diaframma ad isola sospesa. . . . .	12
4	Piezoresistori configurati a ponte di Wheatstone. . . . .	13
5	Processo di fabbricazione del microfono piezoresistivo con diaframma libero. . . . .	14
6	Diagramma a blocchi di un microfono a condensatore. . . . .	17
7	Modello elettrico di un microfono per lo studio di adattamento delle impedenze. . . . .	18
8	Buffer ad inseguitore di source con transistor: (a) PMOS, (b) NMOS. . . . .	20
9	Stadio buffer pseudo-differenziale a inseguitore di source di un microfono a condensatore. . . . .	21
10	Risposta in frequenza relativa alla sensibilità ad 1 kHz. . . . .	24
11	Rapporto di reiezione della tensione di alimentazione (relativa ad una tensione sinusoidale di 100 mV sovrapposta all'alimentazione $V_{DD}$ ). . . . .	25
12	Previsioni di mercato dei microfoni MEMS. Tasso annuale di crescita (CAGR) superiore al 23%. Fonte Yole Développement. . . . .	30
13	Previsioni di mercato globale dei microfoni MEMS, in milioni di dollari. Fonte iHS iSuppli Gennaio 2012. . . . .	31
14	Previsioni di mercato globale dei microfoni MEMS analogici e digitali, in milioni di dollari. Fonte iHS iSuppli Marzo 2012. . . . .	38

## Elenco delle tabelle

1	Confronto caratteristiche tecniche basilari. . . . .	24
---	--	----

2	Variazione delle proprietà dei microfoni MEMS in seguito alla riduzione delle dimensioni. . . . .	26
3	Valore annuale, in milioni di dollari, del mercato dei microfoni MEMS. Fonte iHS iSuppli Gennaio 2012. . . . .	31
4	Valore annuale, in milioni di dollari, del mercato dei microfoni MEMS differenziandoli tra analogici e digitali. Fonte iHS iSuppli Marzo 2012. . . . .	32

## Introduzione

Il microfono è un trasduttore elettro-meccanico in grado di convertire un'onda acustica di pressione in un segnale elettrico, proporzionale alla pressione esercitata. Un suono, o onda acustica, è una variazione di pressione attorno alla condizione di equilibrio del mezzo. Un aumento della pressione corrisponde a un aumento della tensione generata, viceversa una depressione provoca una diminuzione di tensione. Principalmente esistono quattro tipologie di microfoni: capacitivo, piezoelettrico, piezoresistivo e ottico, tutte basate sull'utilizzo di un diaframma accoppiato a dei trasduttori elettrici che, una volta messi in movimento dall'onda sonora, generano il corrispondente segnale elettrico. Durante la discussione verranno presentate le prime tre tipologie, senza soffermarsi sul microfono ottico, data la maggiore complessità. Il più diffuso è il microfono capacitivo, il cui principio di funzionamento si basa su una variazione capacitiva e per questo detto anche a condensatore, vista la somiglianza a un condensatore a facce piane parallele. Il microfono ottico, al contrario del piezoelettrico e piezoresistivo che tuttora presentano una limitata diffusione, è maggiormente utilizzato in ambito militare e nelle applicazioni che richiedono un'elevata precisione, date le ottime caratteristiche tecniche accompagnate da un elevato costo. Negli ultimi anni, la sempre maggiore diffusione di dispositivi quali: sistemi wireless, telefonia mobile, camere digitali, registratori e lettori portatili, ecc. ha accresciuto la necessità di realizzare microfoni che integrassero nello stesso chip sia il sensore sia l'unità di elaborazione, al fine di ridurre le dimensioni, i costi, i consumi e i tempi di produzione. Nel 2003 è arrivato sul mercato il primo microfono MEMS, Micro Electro-Mechanical Systems, per telefoni cellulari. Questi microfoni, realizzati a partire da un wafer di silicio, offrono numerosi vantaggi. Oltre alla riduzione delle dimensioni e dei consumi, l'integrazione del sensore e di tutta l'elettronica dedicata, nello stesso chip e nello stesso package, ha contribuito alla riduzione del rumore e degli effetti parassiti. Inoltre la possibilità di gestire tutti i processi di realizzazione, discussi in maniera più approfondita nel Capitolo 1, permette di realizzare microfoni con diverse ca-

ratteristiche tecniche. La possibilità di applicare il processo di produzione CMOS permette di replicare strutture identiche con un'ottima precisione. In questo sistema diviene possibile realizzare interi array di microfoni insieme all'elettronica necessaria. Nel Capitolo 2 saranno analizzati dei semplici circuiti, detti buffer, che realizzano l'accoppiamento del sensore con la parte circuitale. Infine saranno formulate alcune considerazioni riguardo all'amplificazione del segnale proveniente dal sensore e la possibile conversione A/D nel caso di microfoni digitali. Le tre tipologie di microfoni, nonostante la somiglianza del processo di produzione, presentano caratteristiche molto diverse. L'analisi di queste proprietà sarà presentata nel Capitolo 3, dove sarà posta particolare attenzione alle variazioni dovute alla riduzione delle dimensioni. Tra il 2010-11 la produzione dei microfoni MEMS ha subito un forte incremento con una crescita annua prevista del 23% fino al 2016. I motivi di una tale crescita saranno discussi nel Capitolo 4, dove sarà presentata quella che può essere definita una rivoluzione interna al mercato MEMS, che porterà alla progressiva sostituzione dei microfoni analogici con i digitali.

# 1 Progetto e processo di fabbricazione dei microfoni MEMS

In generale un microfono MEMS è costituito da due parti ben distinte, l'una si occupa della ricezione dell'onda acustica mentre l'altra, realizzata con la tecnologia CMOS, si occupa dell'elaborazione del segnale. In questo capitolo verranno analizzati i processi di realizzazione della prima struttura in generale costituita da un diaframma, che rappresenta la parte mobile del microfono, e un back-plate che, oltre ad assumere in certi casi il ruolo di contatto elettrico, fornisce un supporto stabile all'intera struttura. Data la grande diffusione dei microfoni capacitivi, saranno presentate due tipologie di strutture, basate l'una sull'utilizzo di un wafer di silicio di tipo SOI (Silicon On Insulator) [1] e l'altra sul più recente diaframma perforato [2]. Nella seconda parte saranno infine descritte due strutture con cui vengono realizzati i microfoni piezoelettrici [3] e piezoresistivi [4, 5].

## 1.1 Microfono a condensatore realizzato con wafer SOI

E' da sempre la tecnica più utilizzata per la realizzazione di microfoni capacitivi di buona qualità, mantenendo allo stesso tempo un alto rapporto qualità prezzo. L'utilizzo di un wafer SOI al posto di un comune wafer di silicio permette di ridurre i tempi di lavorazione. L'intero processo utilizza una singola maschera ottica, il che contribuisce ad abbattere notevolmente i costi di produzione. Il wafer SOI è costituito da due lamine di silicio, la base dallo spessore di  $450 \mu\text{m}$  e la lamina superiore da  $20 \mu\text{m}$ , separate da un sottile strato isolante di ossido di silicio di circa  $4 \mu\text{m}$ . La lamina superiore costituirà il diaframma del microfono mentre nella lamina inferiore, più spessa, verranno ricavati i fori acustici. Questi ultimi giocano un ruolo molto importante nel funzionamento del microfono. Un numero maggiore di fori contribuisce alla riduzione della resistenza acustica del microfono con conseguente aumento della larghezza di banda. Durante la fase di realizzazione permettono inoltre la rimozione dell'ossido, ottenendo così una cavità vuota



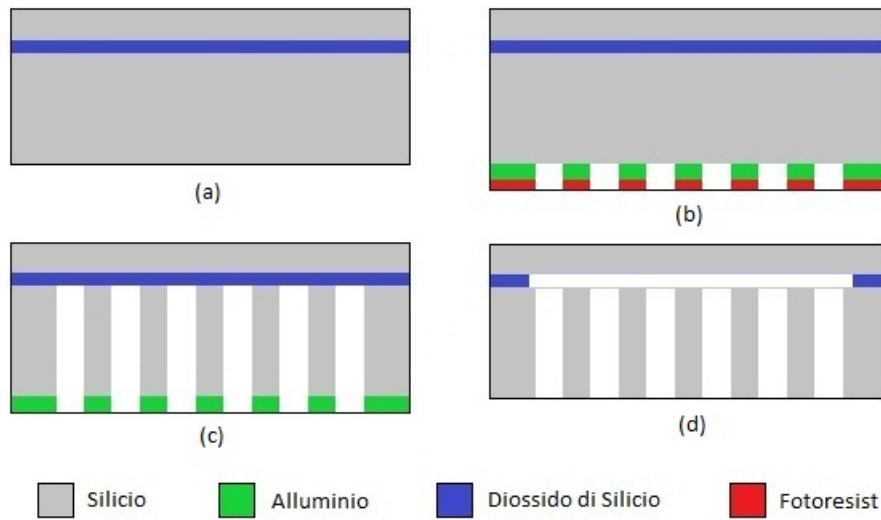


Figura 1: Processo di fabbricazione del microfono a condensatore con wafer SOI.

necessaria alla vibrazione del diaframma. Il processo di lavorazione inizia con la pulizia del wafer SOI mediante il metodo RCA (Radio Corporation of America) (Figura 1a). Con questa tecnica, in più passaggi, vengono eliminati i contaminanti ionici, organici e il sottile film di ossido formatosi attorno al wafer. Il passo successivo consiste nel depositare termicamente un film d'alluminio dello spessore di circa 100 nm nella parte posteriore del wafer, seguito da un sottile strato di fotoresist. Ora, utilizzando l'unica maschera necessaria, viene impresso nel fotoresist il diagramma dei fori acustici, mediante l'esposizione a radiazione ultravioletta. Nella Figura 1b si vede come si presenta la base del wafer dopo la rimozione dell'alluminio e del fotoresist esposto. A questo punto si procede con la rimozione verticale del silicio non coperto dall'alluminio, finché non si espone lo strato isolante d'ossido inizialmente presente nel wafer SOI (Figura 1c). Questo è possibile mediante la tecnica d'incisione anisotropica BOSCH (nome della compagnia che l'ha brevettato) che, attraverso l'utilizzo di plasma alternato all'applicazione di uno speciale polimero ai bordi dell'incisione, permette di realizzare degli scavi verticali. L'utilizzo dell'alluminio come maschera per l'incisione BOSCH si è

reso necessario per sopperire alla perdita di fotoresist, che avrebbe causato delle asimmetrie nella struttura dei fori. Infine l'ultimo passo, dopo aver rimosso l'alluminio, è liberare il diaframma di silicio attraverso l'asportazione dell'ossido (Figura 1d). E' sufficiente una soluzione a base di acido fluoridrico (HF o Hydrofluoric acid); tuttavia occorre prestare particolare attenzione a non rimuovere completamente il film d'ossido, così da mantenere isolato il diaframma dalla base. L'ultima operazione consiste nel creare i contatti nel diaframma e nella base. I fori acustici, dal diametro inferiore a 100  $\mu\text{m}$ , possono essere realizzati in varie forme geometriche. Spesso quando non si devono raggiungere dimensioni troppo ridotte, data l'elevata robustezza, vengono realizzati fori esagonali a nido d'ape. Il risultato finale è un chip di 25 mm<sup>2</sup> con un diaframma circolare di 2 mm di diametro.

## 1.2 Microfono a condensatore con diaframma perforato

La continua ricerca della miniaturizzazione ha portato, negli ultimi anni, allo sviluppo di una nuova tipologia di microfoni a condensatore. Concettualmente non presentano sostanziali differenze rispetto alla precedente generazione, illustrata nel paragrafo 1.1, ma al contrario gli ambiti di utilizzo sono aumentati. Nella nuova struttura sono stati eliminati i fori acustici dalla parte posteriore del chip, per essere ricavati direttamente nel diaframma. Il risultato è un microfono più sottile con un package più facile da realizzare, dato che non richiederà un passaggio per l'aria nella parte posteriore. Il processo di produzione utilizza un numero limitato di maschere ed è svolto a una temperatura molto inferiore rispetto al precedente. In questo modo le possibilità di danneggiare il chip si riducono e si facilita la realizzazione del circuito CMOS integrato. Il processo inizia con un wafer di silicio monocristallino drogato positivamente. Dopo un'opportuna fase di fotolitografia, che sarà eseguita all'inizio di ogni passaggio, viene effettuata una diffusione di fosforo di tipo n<sup>+</sup> nella zona non coperta dall'ossido di silicio (Figura 2a). Questa zona drogata negativamente servirà in seguito a fornire il contatto elettrico con la base del chip. Dopo aver depositato uno strato d'ossido di

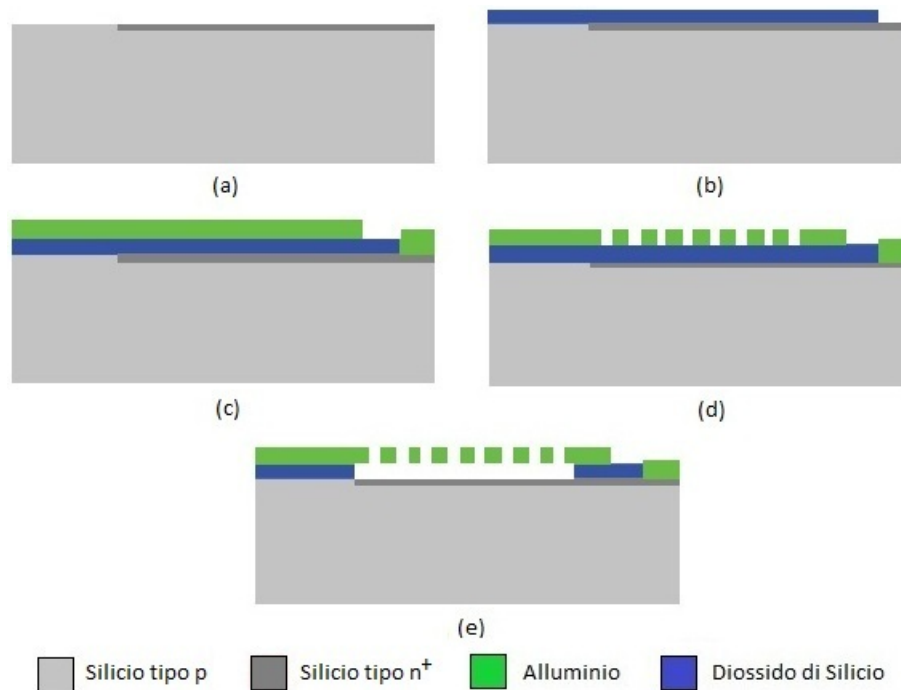


Figura 2: Processo di fabbricazione del microfono a condensatore con diaframma perforato.

$1 \mu\text{m}$ , ne viene asportata una parte mediante la tecnica PAD (Figura 2b), così da permettere la realizzazione del contatto elettrico. Nella Figura 2c è rappresentato il wafer dopo la stesura di un film d'alluminio di  $3 \mu\text{m}$  che costituirà il diaframma e i contatti del microfono. Utilizzando una maschera vengono impressi nell'alluminio i fori acustici e le connessioni elettriche, in seguito rimosse utilizzando una soluzione di acido fosforico, acido nitrico e acqua distillata (Figura 2d). L'ultima operazione consiste nel liberare il diaframma d'alluminio dall'ossido (Figura 2c). Si procede quindi all'immersione del wafer in una soluzione PAD, particolarmente efficace nel rimuovere l'ossido senza danneggiare significativamente il film d'alluminio e il substrato di silicio. Il microfono così ottenuto occupa la stessa superficie del precedente. Si differenzia per un numero maggiore di fori acustici di dimensioni inferiori e un substrato più sottile, limitato da vincoli di rigidità del chip.

### 1.3 Microfono piezoelettrico con diaframma a isola sospesa

Questa tipologia di microfoni sfrutta una proprietà di alcuni materiali particolari, detti piezoelettrici. Se sottoposti a una tensione elettrica iniziano a vibrare con una frequenza proporzionale alla tensione applicata. Nel nostro caso viene sfruttata la proprietà opposta. Quando il materiale piezoelettrico subisce uno stress meccanico, risponde con la generazione di una tensione elettrica proporzionale all'entità della deformazione. Questi microfoni, più robusti rispetto ai precedenti, sono realizzati con le più varie strutture: a ponte, a trave a sbalzo o in questo caso a isola sospesa. Il progettista adotta la struttura e il materiale piezoelettrico che meglio si adatta alle caratteristiche del progetto. Tra i materiali più comunemente utilizzati, ognuno con caratteristiche tecniche differenti, troviamo: lo zirconato titanato di piombo (PZT, Lead Zirconate Titanate), il nitruro di alluminio (AlN, Aluminum Nitride) e l'ossido di zinco (ZnO, Zinc Oxide). Nella Figura 3 sono illustrati i passaggi necessari alla realizzazione del microfono piezoelettrico con diaframma a isola sospesa. Come materiale piezoelettrico sarà usato l'ossido di zinco, data l'elevata sensibilità; mentre il rivestimento e il sostegno del diaframma saranno realizzati con il parylene. Questo materiale dall'elevata elasticità, indispensabile per il corretto movimento del diaframma, verrà utilizzato solo al termine di tutti i processi ad alte temperature, data il basso punto di fusione, attorno ai 280°C. Il processo inizia (Figura 3a) con un wafer di silicio, interamente rivestito da un 1  $\mu\text{m}$  di nitruro di silicio attraverso un processo chimico a bassa pressione (LPCVD, Low Pressure Chemical Vapor Deposition). Questo rivestimento servirà come sostegno e isolamento della parte inferiore del diaframma. In seguito viene depositato un film d'alluminio di 0,5  $\mu\text{m}$ , su cui verrà ricavato il contatto inferiore; seguito da altri 0,5  $\mu\text{m}$  di ossido di zinco (Figura 3b). A questo punto, terminati i processi ad alte temperature, è applicato un sottile film isolante da un quinto di micron di parylene, sul quale sarà ricavato il contatto superiore d'alluminio (Figura 3c). La parte superiore del diaframma verrà completata con l'appli-

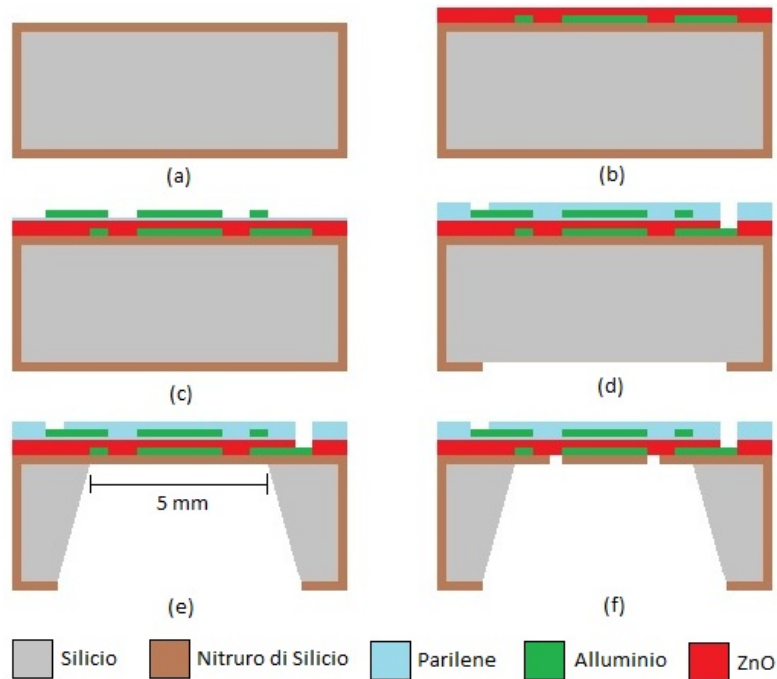


Figura 3: Processo di fabbricazione del microfono piezoelettrico con diaframma ad isola sospesa.

cazione di un ulteriore film di parylene spesso  $1 \mu\text{m}$ , su cui saranno ricavati dei fori per l'accesso ai contatti elettrici (Figura 3d). Ora che la struttura è ben consolidata si procede alla liberazione del diaframma attraverso la faccia inferiore del wafer. Attraverso un'apposita maschera viene ricavata un'apertura quadrata superiore ai 5 mm di lato nel rivestimento di nitruro di silicio. Mediante la tecnica anisotropica KOH (Heated Potassium Hydroxide), una soluzione a base d'idrossido di potassio, si procede alla rimozione del silicio ora visibile, fino al raggiungimento dello strato di nitruro che inizialmente ricopriva la parte superiore del wafer (Figura 3e). L'ultimo passaggio consiste nella creazione dell'isola sospesa centrale, attraverso la rimozione del nitruro di silicio. Utilizzando la tecnica denominata RIE (Reactive-Ion Etching), plasma costituito da ioni ad alta energia, su un'opportuna maschera di fotoresist applicata al nitruro di silicio esposto, viene completata la struttura del diaframma (Figura 3f). Il risultato finale è un chip di dimensioni

leggermente superiori ai precedenti con un'isola centrale, libera di muoversi, collegata al resto della struttura dall'ossido di zinco e dal parylene.

#### 1.4 Microfono piezoresistivo con diaframma sospeso

La struttura del microfono piezoresistivo somiglia quasi del tutto al microfono piezoelettrico presentato nel paragrafo 1.3. E' composto da un diaframma, libero o fissato interamente alla base del chip, attorno al quale sono inseriti quattro piezoresistori. Questi sono collegati secondo la configurazione a ponte di Wheatstone attiva, illustrata in figura 4, posti ai lati del diaframma, dove le sollecitazioni sono maggiori. La pressione esercitata sul diaframma dall'onda acustica provoca una variazione di resistività dei piezoresistori, tradotta in una differenza di potenziale all'uscita del ponte di Wheatstone. In

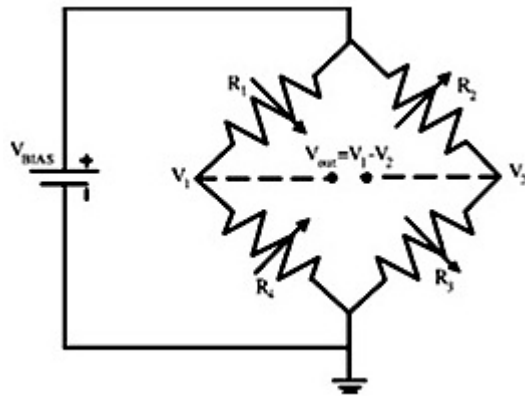


Figura 4: Piezoresistori configurati a ponte di Wheatstone.

condizioni di equilibrio, pressione nulla, i resistori presentano lo stesso valore di resistenza e di conseguenza la tensione all'uscita del ponte è nulla. I resistori hanno due forme diverse, uguali a coppie ai lati opposti del diaframma, per consentire una migliore rilevazione. Quelli a forma conica, rivolti radialmente al diaframma, rilevano le sollecitazioni parallele all'onda sonora, mentre quelli ad arco rilevano le sollecitazioni tangenziali. I due tipi di resistori sono realizzati con polarità opposta in modo che, una volta collegati a ponte di Wheatstone, una variazione di resistenza provochi una tensione

differenziale  $V_{\text{out}}$  in uscita, secondo la seguente formula:

$$V_{\text{out}} = \frac{\Delta R(p_d)}{R} V_{\text{bias}} \quad (1)$$

Dove  $V_{\text{bias}}$  è la tensione di polarizzazione e il termine  $\frac{\Delta R}{R}$  è la variazione di resistenza nominale, proporzionale alle tensioni meccaniche longitudinali e trasversali scalate con gli opportuni coefficienti piezoresistivi. Passiamo ora alla descrizione del processo di realizzazione del chip. Utilizza un totale di 7 maschere e, come nel microfono capacitivo presentato nel paragrafo 1.1, inizia con un wafer SOI di oltre  $500 \mu\text{m}$  di spessore, con un film isolante spesso  $400 \text{ nm}$  e un strato superiore di silicio di  $5 \mu\text{m}$ . Nella superficie del wafer SOI, pulito accuratamente con la tecnica RCA, viene fatto crescere un sottile film d'ossido di  $100 \text{ nm}$  attraverso l'esposizione a ossigeno puro a  $1000^\circ\text{C}$ . In seguito è depositato uno strato di polisilicio (Figura 5a) dove,

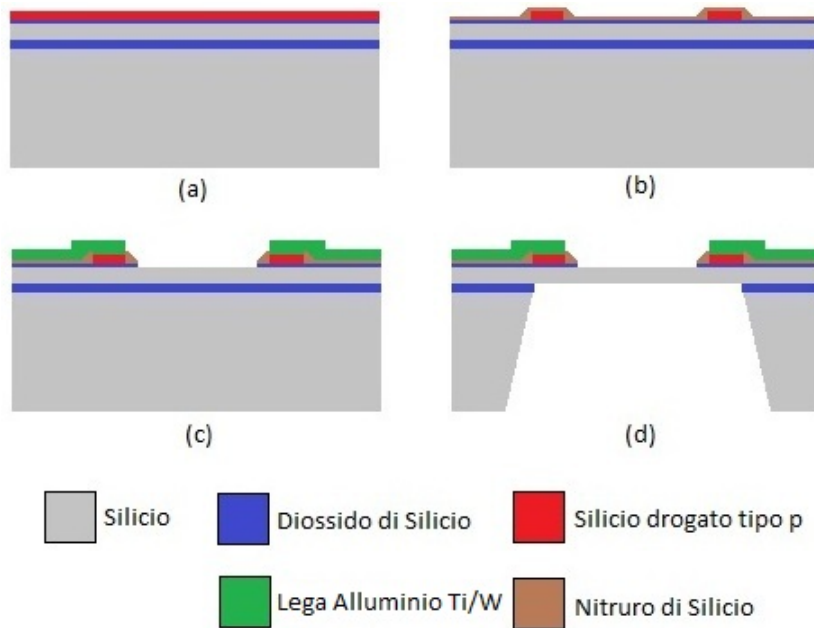


Figura 5: Processo di fabbricazione del microfono piezoresistivo con diaframma libero.

dopo un'opportuna operazione di fotolitografia, mediante l'impiantazione ionica di atomi di boro verranno realizzati i piezoresistori, costituiti da silicio

drogato positivamente. Per isolare i resistori è fatto crescere un film di nitru-  
ro di silicio spesso 100 nm, vedi Figura 5b, mediante la tecnica LCPVD, già  
utilizzata in precedenza per depositare il film di polisilicio. Un'opportuna  
maschera definisce le aperture in cui saranno realizzati i contatti elettrici,  
costituiti da una lega d'alluminio, titanio e tungsteno, dallo spessore di 600  
nm. La parte superiore del chip è infine completata rimuovendo l'ossido e il  
nitruro di silicio che coprono il diaframma (Figura 5c). Utilizzando la tecnica  
anisotropica KOH, descritta nel paragrafo precedente, si ricava un'apertura  
nello strato inferiore di silicio e d'ossido così da liberare completamente il  
diaframma.



## 2 Architettura dei microfoni MEMS

Il seguente capitolo vuole rendere noti i blocchi circuitali principali che costituiscono un microfono MEMS. Nel primo paragrafo si è voluto dare una breve spiegazione del principio di funzionamento della parte sensoriale del microfono a condensatore [6], completandolo con la descrizione della struttura di un microfono a condensatore analogico standard [7]. In seguito sarà presentata l'analisi circuitale dello stadio preamplificatore, per quanto riguarda l'adattamento delle impedenze e la generazione del segnale d'uscita [6-8], utilizzando come schema di riferimento il microfono MEMS a condensatore. Viene utilizzata questa tipologia di microfono dopo che è la più diffusa in commercio e si discosta solo in minima parte, ciò riguarda soprattutto la struttura del sensore, dalle altre due tipologie presentate.

### 2.1 Principi di funzionamento del microfono MEMS a condensatore

Il principio di funzionamento di un microfono a condensatore è molto semplice. Il diaframma e il back-plate, posti ad una determinata distanza  $d$ , costituiscono le armature di un condensatore mentre l'aria che le separa funge da dielettrico. Semplificando al massimo il modello e considerando le armature completamente piatte, il condensatore segue le stesse proprietà del modello a facce piane parallele. In condizioni di equilibrio, diaframma sottoposto alla sola pressione atmosferica, la capacità presenta il valore ricavato dalla seguente formula:

$$C = \frac{\epsilon_0 A}{d(P_0)} \quad (2)$$

Dove  $d(P_0)$  è la distanza tra il diaframma e il back-plate alla pressione atmosferica,  $A$  è la superficie del diaframma e  $\epsilon_0$  è la permittività elettrica dell'aria. Quando un'onda acustica, cioè una variazione della pressione atmosferica attorno al valor medio, colpisce il diaframma, provoca una variazione della distanza  $d$  e di conseguenza della capacità proporzionale alla pressione esercitata. Ad un aumento di pressione corrisponde un aumento della differenza

di potenziale rilevata, al contrario una depressione provoca una riduzione di tensione. Il condensatore, caricato ad una tensione fissa  $V$ , è opportunamente isolato così da mantenere costante la carica immagazzinata al suo interno. Assumendo inoltre che esista una relazione di proporzionalità lineare tra la distanza  $d$  e la pressione  $P_S$ , manipolando la formula (2), si ottiene:

$$\Delta V = \frac{Q\Delta d(P_S)}{\epsilon_0 A} = \frac{C_0 V \Delta d(P_S)}{\epsilon_0 A} = \frac{C_0 V \alpha \Delta P_S}{\epsilon_0 A} \quad (3)$$

con  $\Delta d(P_S) = \alpha \Delta P_S$

Dove  $C_0$  è la capacità in condizioni di equilibrio,  $\Delta P_S$  è la variazione di pressione e  $\alpha$  è una costante di proporzionalità. La particolarità della tecnologia MEMS è integrare in un unico chip sia il sensore sia il circuito necessario all'elaborazione dei segnali. Come si può vedere dal diagramma a blocchi di Figura 6, il microfono MEMS analogico a condensatore si compone di un sensore, un buffer che ne genera la tensione di polarizzazione e permette di adattarne l'elevata impedenza d'uscita, e per ultimo un circuito amplificatore. Nel caso di un microfono MEMS digitale, in coda allo schema a blocchi di

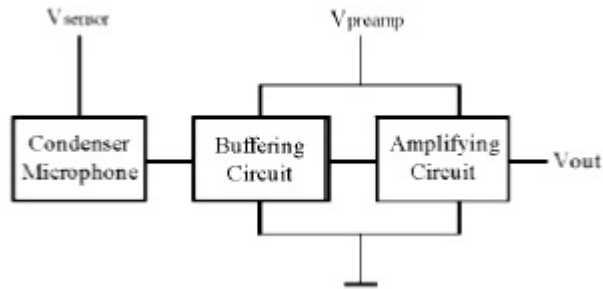


Figura 6: Diagramma a blocchi di un microfono a condensatore.

Figura 6 deve essere aggiunto un convertitore ADC. Nei paragrafi successivi verrà analizzato esclusivamente il buffer per quanto riguarda l'adattamento del carico e la generazione della tensione di polarizzazione.

### 2.1.1 Adattamento delle impedenze e polarizzazione

Il microfono a condensatore può essere facilmente modellato dalla serie di un generatore di tensione e della capacità rilevata tra il diaframma e il back-plate. Nel modello è inoltre necessario considerare una resistenza, posta in parallelo alla serie precedente, tra il nodo d'ingresso della tensione di polarizzazione e il nodo d'uscita del sensore collegato all'ingresso del buffer. Idealmente dovrebbe assumere un valore infinito ma realmente è dell'ordine di alcuni  $G\Omega$ . Nella Figura 7 è presentato un modello semplificato di microfono a condensatore con annesso circuito di preamplificazione o buffer. Tramite

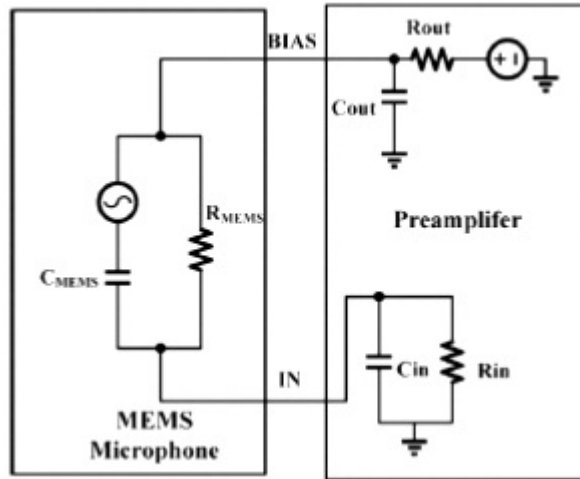


Figura 7: Modello elettrico di un microfono per lo studio di adattamento delle impedenze.

L'analisi DC del circuito è possibile stabilire i valori delle resistenze  $R_{in}$  e  $R_{out}$  tali da ottenere una corretta tensione di polarizzazione. Tipicamente è necessaria una  $V_{bias}$  piuttosto elevata, dell'ordine di alcuni Volt. La scelta della  $V_{bias}$  richiede particolare attenzione, poiché andrà a influire direttamente sulle prestazioni del microfono come sensibilità, SNR e consumi. Nel caso di microfono capacitivo andrà a stabilire la carica immagazzinata, in condizioni di equilibrio, tra il diaframma e il back-plate, mentre nelle altre due tipologie andrà a influire sulla tensione differenziale rilevata all'uscita del sensore

e applicata all'ingresso del preamplificatore. Il microfono presentato in [8], richiede una tensione di polarizzazione di 9 V, molto superiore alla tensione di alimentazione dell'intero circuito. Per ovviare al problema, all'interno del chip è presente un convertitore DC-DC, in grado di modificare la tensione di una sorgente di corrente continua al livello richiesto. Il resistore  $R_{\text{MEMS}}$  viene dimensionato con valori molto maggiori rispetto ai resistori  $R_{\text{in}}$  e  $R_{\text{out}}$ , così da applicare al microfono la maggior parte della tensione fornita dal convertitore DC-DC. Procediamo ora all'analisi AC utilizzando la frequenza tipica di 1 kHz. Perché il segnale generato dal microfono possa entrare nel preamplificatore, senza subire sostanziali attenuazioni, si devono verificare delle condizioni di accoppiamento d'impedenza. Ciò si traduce nella necessità di ottenere un'impedenza elevata all'ingresso IN del preamplificatore e una bassa impedenza, sempre nel preamplificatore, vista dall'ingresso di BIAS. In breve, una configurazione ottimale segue la seguente disuguaglianza:

$$|Z_{\text{in}}| \gg |Z_{\text{MEMS}}| \gg |Z_{\text{out}}| \quad (4)$$

Procedendo con l'analisi si ricava che l'unico modo per soddisfare (4) è imporre alla resistenza  $R_{\text{in}}$  un valore 10 volte superiore all'impedenza  $|j\omega/C_{\text{MEMS}}|$ , in contrapposizione al risultato della precedente analisi DC, che ne imponeva un valore 10 volte inferiore a  $R_{\text{MEMS}}$ . Un modo per ovviare al problema è dimensionare  $R_{\text{MEMS}}$  con un valore maggiore oppure aumentare la capacità del microfono, vista tra il diaframma e il back-plate, attraverso la diminuzione dello spazio tra le armature o aumentando l'area del diaframma. Nella maggior parte dei casi, data la minor complessità, si cercherà di dimensionare adeguatamente il preamplificatore senza andare a modificare la struttura del microfono.

## 2.2 Strutture principali integrate di elaborazione del segnale

Nel paragrafo precedente è stata analizzata la struttura del preamplificatore nel ruolo di adattatore d'impedenze, compito necessario data l'elevata

impedenza d'uscita del microfono. Ora si procederà allo studio del buffer ponendo l'attenzione sulla generazione del segnale d'uscita e sul guadagno. Per lo scopo saranno presentate due strutture semplificate basate l'una sulla configurazione pseudo-differenziale a inseguitore di source e l'altra su un semplice inseguitore di source o drain comune. Sarà tralasciata la parte circuitale che si occupa dell'amplificazione del segnale, posta tra il buffer e l'eventuale modulatore digitale; alcuni esempi si trovano in [7, 8]. La struttura più semplice che andremo ad analizzare è la configurazione a drain comune che utilizza un solo MOS. Nella Figura 8 sono presentati i circuiti semplificati di due inseguitori di source utilizzando un transistor PMOS e un NMOS. Questa

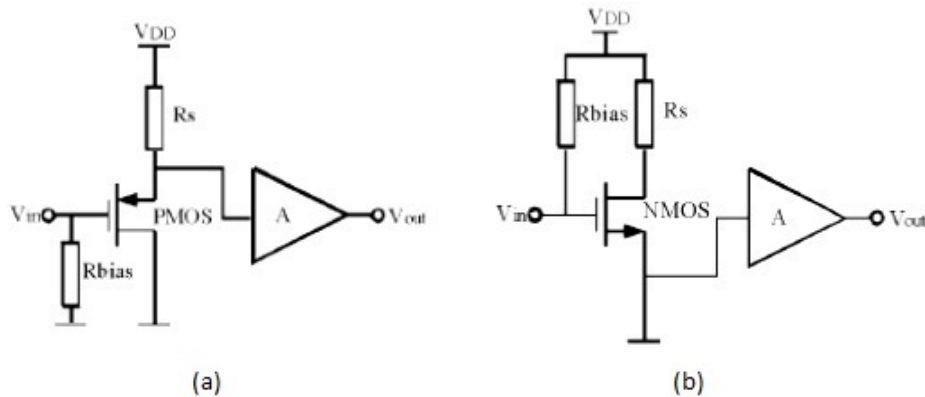


Figura 8: Buffer ad inseguitore di source con transistor: (a) PMOS, (b) NMOS.

configurazione è l'ideale per quanto riguarda l'adattamento delle impedenze, poiché presenta un'impedenza elevata in ingresso e ridotta in uscita. Il punto debole riguarda il guadagno generato dal circuito, idealmente unitario, che provoca una degradazione del segnale, già di ampiezza ridotta, influenzando sulla sensibilità e immunità ai disturbi del microfono. Per questi motivi è necessario inserire il buffer all'ingresso di uno stadio amplificatore [7] realizzato in modo da raggiungere un'elevata sensibilità. Passiamo ora alla seconda configurazione. Data la maggior diffusione del microfono a condensatore, sarà presentato uno stadio preamplificatore pseudo-differenziale a inseguitore-

re di source adattato all'utilizzo con questa tipologia di microfono (Figura 9). Riguardo ai microfoni piezoelettrici e piezoresistivi, il circuito è meno complesso, poiché i trasduttori di pressione presentano già un'uscita differenziale. Diviene quindi più comodo utilizzare un amplificatore differenziale con carico attivo. Come nel caso precedente, il preamplificatore presenta

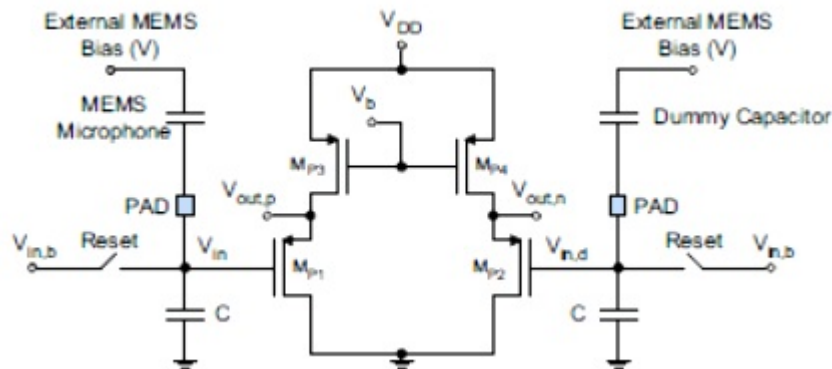


Figura 9: Stadio buffer pseudo-differenziale a inseguitore di source di un microfono a condensatore.

un guadagno pressoché unitario, un'elevata impedenza d'ingresso, stabilita con buona approssimazione dalla capacità  $C$  e una bassa impedenza d'uscita data da  $R_{out} \cong 1/g_m$ , dove  $g_m$  è la transconduttanza del PMOS. Il ramo di sinistra del circuito costituito dai MOS  $M_{P1}$  e  $M_{P3}$  è collegato al microfono MEMS, mentre il ramo di destra identico al precedente, costituito dai MOS  $M_{P2}$  e  $M_{P4}$ , è collegato a una capacità avente lo stesso valore nominale della capacità del microfono. Inizialmente, durante la fase di reset, vengono caricate entrambe le capacità  $C$  al valore  $V_{in,b}$ . Di conseguenza la capacità del microfono e la sua copia simmetrica nell'altro ramo sono caricate alla tensione  $V - V_{in,b}$ . Dopo la fase di reset i rami sono opportunamente isolati in modo da mantenere la carica accumulata durante la fase precedente. Durante il normale funzionamento, la capacità del microfono varia provocando, attraverso il fenomeno del charge sharing con la capacità  $C$ , una variazione della tensione  $V_{in}$  in accordo a (3), mentre  $V_{in,d}$  resta costante durante l'intero processo. Lo squilibrio che si viene a creare, tra i due rami del cir-

cuito, comporta la formazione di una tensione differenziale d'uscita data da  $V_{\text{out}} = V_{\text{out,p}} - V_{\text{out,n}}$ . Questa configurazione permette di ottenere un segnale in uscita indipendente dalla tensione di polarizzazione del microfono e dai disturbi dell'alimentazione, consentendo il raggiungimento di un elevato rapporto di reiezione della tensione di alimentazione o PSRR (Power Supply Rejection Ratio). A questo punto il segnale ottenuto è ancora troppo debole per essere utilizzato. E' dato in ingresso a un amplificatore che porta i valori di tensione a livelli ottimali, cercando di ottenere un elevato rapporto segnale rumore. Il segnale così ottenuto, nel caso di un microfono MEMS analogico, può essere utilizzato dagli altri sistemi presenti nel dispositivo. A differenza dell'analogico, il microfono digitale contiene all'interno del chip anche un convertitore ADC che converte il segnale analogico in una sequenza di singoli bit. Nello specifico il convertitore utilizza la tecnica del modulatore  $\Sigma\Delta$ , in genere del quarto ordine, per trasformare il segnale analogico ad alta risoluzione in un flusso di singoli bit a bassa risoluzione, attraverso l'applicazione della modulazione PDM (Pulse Density Modulation). Infine è applicato un filtro digitale per riportare il segnale a un'alta definizione. L'utilizzo temporaneo di un segnale a bassa definizione semplifica il circuito e ne aumenta l'efficienza.

## 3 Proprietà e caratteristiche tecniche a confronto

Il seguente capitolo mette a confronto alcune delle proprietà più importanti dei microfoni MEMS. Inizialmente sarà presentata una descrizione qualitativa, servendosi delle caratteristiche di sensibilità e range dinamico [9, 10]. Come complemento nell'appendice sono inseriti i datasheet dei microfoni capacitivi ADMP421 di Analog Devices e SMM310 di Infineon. Data l'importanza che ricopre la miniaturizzazione di questi dispositivi, nella parte centrale del capitolo, verranno discusse le variazioni delle caratteristiche dovute alla riduzione delle dimensioni [11]. Infine saranno messi a confronto, attraverso alcune proprietà, i materiali più comuni con cui sono realizzati i microfoni piezoelettrici [12].

### 3.1 Analisi e confronto delle proprietà

I microfoni MEMS presentati nei precedenti capitoli, date le ridotte dimensioni e le ottime caratteristiche tecniche, possono essere utilizzati negli ambiti più disparati. Nella scelta della tipologia più adatta, ci si basa soprattutto sulle sostanziali differenze tecniche tra i vari modelli. Tra le tre tipologie presentate, il microfono a condensatore rappresenta il compromesso migliore e per questo è il più utilizzato. In generale le caratteristiche dipendono non solo dalla tipologia del microfono, ma anche dal tipo di struttura e dai materiali con cui viene realizzato. Nella tabella 1 sono messe a confronto le principali caratteristiche dei microfoni, tenendo conto delle variazioni appena citate. Osservando la tabella si capisce subito il perché il microfono capacitivo ha ottenuto il maggior sviluppo. Tra i tre è quello che presenta la maggiore sensibilità, parametro maggiormente considerato nelle applicazioni a uso commerciale, a discapito di un ridotto range dinamico. Quest'ultimo può essere ottimizzato utilizzando simultaneamente un numero maggiore di microfoni, in genere due, operanti a frequenze diverse. Il microfono piezoelettrico raggiunge un elevato range dinamico e la mancanza di un circuito di



	Capacitivo	Piezo-resistivo	Piezo-elettrico
Sensibilità	Buona	Bassa	Media
( $\mu V/P_a$ )	400-1000	0,1-100	10-500
Alimentazione	Richiesta	Richiesta	Non presente
Range Dinamico	Stretto	Relativamente Ampio	Ampio

Tabella 1: Confronto caratteristiche tecniche basilari.

polarizzazione ne permette l'utilizzo come sensore acustico passivo, raggiungendo allo stesso tempo un costo ridotto. Sia il microfono piezo-elettrico sia il piezo-resistivo, data la ridotta sensibilità, trovano largo uso nelle applicazioni dove la sensibilità non è un requisito molto importante. Per assegnare dei valori più precisi ai parametri discussi sinora, nell'appendice sono riportati i datasheet dei microfoni capacitivi SMM310 e ADMP421. Il primo, analogico, prodotto dalla Infineon mentre il secondo, digitale, prodotto dalla Analog Devices. Di seguito, nelle Figure 10 e 11, sono riportati i grafici della sensibilità e del PSRR relativi al microfono SMM310. Osservando il grafico

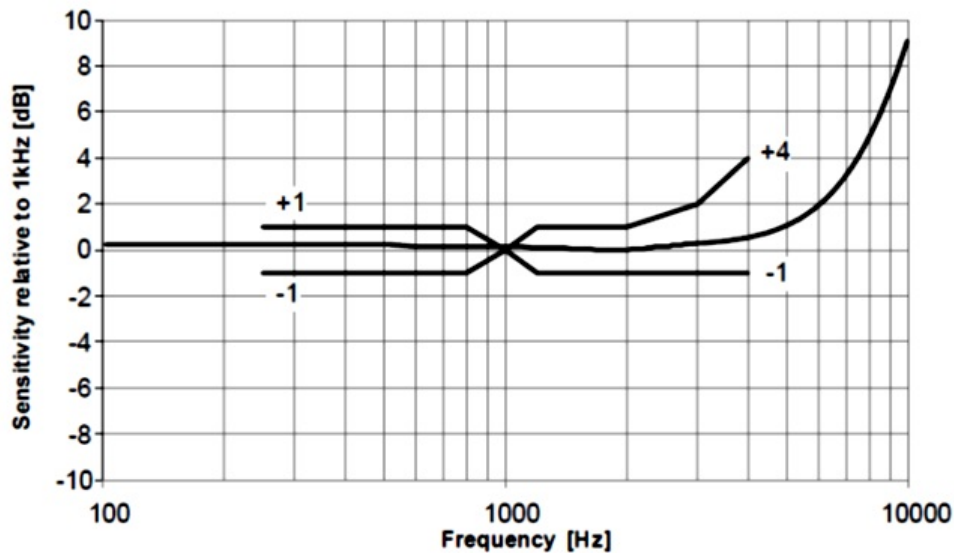


Figura 10: Risposta in frequenza relativa alla sensibilità ad 1 kHz.

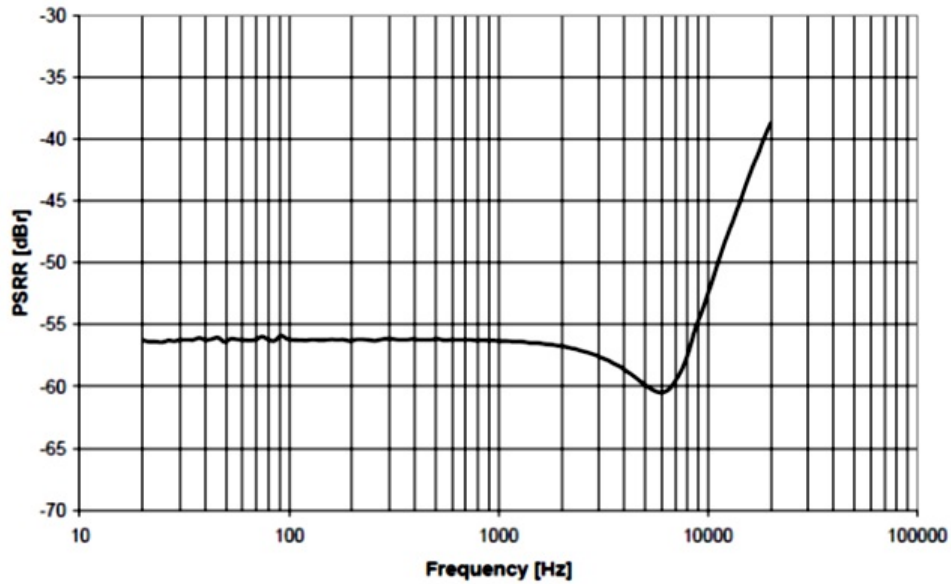


Figura 11: Rapporto di reiezione della tensione di alimentazione (relativa ad una tensione sinusoidale di 100 mV sovrapposta all'alimentazione  $V_{DD}$ ).

di Figura 10, si nota che la sensibilità rimane pressoché costante, a meno di una variazione di  $\pm 1$  dB, fino alla frequenza di 2 kHz. Oltrepastato tale limite, nella maggior parte dei microfoni commerciali, la sensibilità inizia ad aumentare con un'approssimazione, in questo caso, di  $+4 \div -1$  dB. Il secondo grafico riassume i valori assunti dal PSRR al variare della frequenza, relativo alla tensione di ripple di 100 mV applicata alla tensione di alimentazione. Questo parametro, insieme al rapporto segnale rumore o SNR, è molto importante nello studio della capacità di un microfono all'immunità ai disturbi. Rappresenta il livello di rumore, proveniente dall'alimentazione, che il dispositivo può respingere senza intaccare il segnale d'uscita. Idealmente infinito, è definito come il rapporto tra la variazione della tensione di alimentazione e la variazione della tensione di offset d'ingresso dell'amplificatore operazionale. Si definisce:

$$PSRR = \frac{\Delta V_{\text{supply}}}{\Delta V_{\text{IOS}}} \quad (5)$$

In pratica si verifica che una variazione della tensione di alimentazione provoca uno spostamento dei punti di lavoro dei transistor presenti all'interno

del circuito, che causano a loro volta l'alterazione delle tensioni di offset. Guardando il grafico di Figura 11 si nota che, come nel precedente grafico della sensibilità, il PSRR si mantiene costante, di poco inferiore a -55 dBr, fino alla frequenza di 2 kHz. Superata tale soglia, decresce per un breve tratto prima di raggiungere il valore massimo di poco superiore a -40 dBr a 20 kHz. Passiamo ora a un altro argomento molto importante. Analizziamo le variazioni di sensibilità, larghezza di banda e prodotto guadagno larghezza di banda o GBW, nelle tre tipologie di microfoni presentati, quando se ne riducono le dimensioni. Nell'analisi verrà assunto costante il rapporto di

Tipologia	Sensibilità	Banda	GBW	Sommario
Piezoelettrico	$\frac{\alpha^2}{h^2} h_{pe}$	$\frac{h}{\alpha^2}$	$\frac{h_{pe}}{h_d}$	S ↓, BW ↑, GBW –
Piezo-resistivo	$V_B \frac{\alpha^2}{h^2}$	$\frac{h}{\alpha^2}$	$\frac{V_B}{h}$	S –, BW ↑, GBW ↑
Capacitivo	$\frac{V_B}{g} \frac{A}{h} \frac{\alpha^2}{h^2}$	$\frac{h}{\alpha^2}$	$\frac{V_B}{g} \frac{\alpha^2}{h^2}$	S ↓, BW ↑, GBW ↓

Tabella 2: Variazione delle proprietà dei microfoni MEMS in seguito alla riduzione delle dimensioni.

aspetto (aspect ratio) del diaframma, indicato da  $\alpha^2/h^2$ , e il rapporto  $h_{pe}/h_d$  tra lo spessore del piezoelettrico e lo spessore del diaframma. Nella Tabella 2 sono riassunte le proprietà sopra citate comprensive di formule semplificate. Dove i parametri  $V_B$ ,  $g$ ,  $\alpha$ ,  $A$ ,  $h$ , indicano rispettivamente: la tensione di polarizzazione, lo spessore della cavità che divide il diaframma dal backplate, il raggio, l'area e lo spessore del diaframma. Il prodotto guadagno larghezza di banda dà un'idea complessiva di come scalano le prestazioni dei microfoni. Nel primo caso, microfono piezoelettrico, la sensibilità si riduce al diminuire dello spessore del film di materiale piezoelettrico  $h_{pe}$ , mentre, a causa della riduzione della superficie del diaframma, aumenta la larghezza di banda. Quest'ultima dipende dalla frequenza di risonanza definita dal parametro  $h/\alpha^2$ . Il GBW rimane costante vista l'ipotesi iniziale. La diminuzione delle dimensioni provoca un aumento del rumore di fondo che, data la componente dominante proveniente dalla linea d'alimentazione e dall'interfaccia

elettronica, non contribuisce alla degradazione delle prestazioni. Complessivamente le prestazioni del microfono piezoresistivo aumentano. La larghezza di banda si comporta come nel caso precedente mentre la sensibilità, data l'ipotesi iniziale di rapporto d'aspetto del diaframma costante, può aumentare solo se viene utilizzata una tensione di polarizzazione maggiore. Tuttavia la massima tensione applicabile è limitata dalla potenza dissipabile, dal calore prodotto e da fenomeni di elettromigrazione. Il microfono piezoresistivo ha il grande vantaggio di non essere affetto da capacità parassite, però le prestazioni sono negativamente condizionate dalla temperatura. Un aumento della stessa provoca a sua volta un aumento del rumore termico che va a incidere sulla sensibilità. Al contrario delle altre due tipologie, con la riduzione delle dimensioni, il microfono capacitivo subisce una degradazione delle prestazioni. Mentre la larghezza di banda si comporta allo stesso modo degli altri microfoni, la sensibilità e il GBW subiscono una riduzione. La sensibilità dipende sia dal diaframma sia dal campo elettrico, rappresentato da  $V_B/g$ , che si viene a generare tra le armature. Una riduzione dell'area  $A$  del diaframma provoca, anche se è considerato costante il rapporto d'aspetto, una riduzione della sensibilità. La componente del campo elettrico, se rimane costante, non contribuisce alla diminuzione della sensibilità. Tuttavia ne esiste un limite superiore, dovuto al collasso elettrostatico del diaframma, che provoca la diminuzione della sensibilità. Per la stessa ragione, data la presenza del fattore  $V_B/g$  nella formula del GBW, al diminuire delle dimensioni si ha una riduzione del prodotto guadagno larghezza di banda. Nei microfoni capacitivi la resistenza acustica data dai fori è in grado di dominare il rumore di fondo a bassa frequenza, generato dall'interfaccia elettronica e dal sensore stesso. In fase di progettazione, la riduzione delle dimensioni genera non pochi problemi. Per mantenere costante il rapporto d'aspetto del diaframma occorre diminuirne anche lo spessore, che dovrà raggiungere dimensioni di difficile realizzazione. Allo stesso modo, nei microfoni piezoresistivi, questo obbliga l'utilizzo di resistori molto sottili che, come spiegato in precedenza, contribuiscono ad aumentare il rumore di fondo. Nei microfoni capacitivi

la resistenza del back-plate aumenta con conseguente diminuzione della larghezza di banda, inoltre la capacità del microfono diminuisce aumentando la possibilità di perdite dovute alle capacità parassite. Procediamo ora con una breve analisi delle proprietà dei materiali piezoelettrici più utilizzati. Come accennato nel paragrafo 1.3, i materiali più comuni sono: l'ossido di zinco (ZnO), il nitruro di alluminio (AlN) e lo zirconato titanato di piombo (PZT), ognuno dei quali presenta caratteristiche differenti. I primi due sono molto simili tra loro, entrambi non sono ferroelettrici e presentano la stessa conformazione cristallina. Il nitruro di alluminio, oltre a presentare una resistività maggiore, ha il vantaggio di essere compatibile con il processo di fabbricazione CMOS. Le elevate temperature necessarie alla stesura del film di ZnO rendono difficoltosa la realizzazione del processo CMOS nello stesso chip. Per quanto il nitruro di alluminio presenti delle proprietà migliori, il materiale più utilizzato è l'ossido di zinco. Il film di ZnO è più facile da realizzare, dato che non necessita di particolari condizioni di vuoto, e ha un comportamento migliore per quanto riguarda gli stress residui. Solo negli ultimi anni, quando gli stress residui sono diventati maggiormente controllabili, si è iniziato a utilizzare maggiormente l'AlN. Il PZT differisce dai precedenti poiché è un materiale ferroelettrico. Questo significa che, a differenza dei precedenti materiali che dovevano essere depositati seguendo un certo allineamento, l'asse di polarizzazione del PZT può essere orientato in qualunque posizione dopo la deposizione del materiale. Oltre a questo motivo è utilizzato principalmente dato l'elevato coefficiente piezoelettrico.

## 4 Analisi di mercato e previsioni future

Fino a qualche anno fa il mercato dei microfoni MEMS rappresentava un settore di nicchia, per via degli elevati costi di produzione. Il 2010 e l'anno successivo sono stati teatro di una forte espansione dei microfoni MEMS che ha dato il via a una grande rivoluzione. Saranno analizzati i settori maggiormente interessati da questa tecnologia attraverso i dati e le previsioni future fornite dalla compagnia Yole Développement [13]. Infine, grazie ai dati forniti da iHS iSuppli [14, 15], saranno presentate le previsioni di mercato dei microfoni MEMS fino al 2015, differenziandole in seguito tra i microfoni digitali e analogici.

### 4.1 Ambiti di utilizzo ed espansione del mercato

Negli ultimi anni la richiesta di dispositivi sempre più compatti con, allo stesso tempo, la necessità di una qualità superiore, ha permesso lo sviluppo di un mercato fino ad allora considerato di nicchia. Stiamo parlando dei dispositivi cosiddetti MEMS. Il mercato dei microfoni MEMS prevede una crescita annua del 23% per i prossimi cinque anni, raggiungendo entro il 2016 un volume di mercato di circa 2 miliardi di unità con un valore complessivo superiore ai 600 milioni di dollari. Un segno di questa crescita si riscontra osservando i volumi di produzione della Knowles Electronics, pioniere nel mercato dei dispositivi MEMS che domina tuttora il mercato con l'80% dello share, passati dal miliardo di unità prodotte in sei anni ai due miliardi in soli 18 mesi. Tuttora i microfoni MEMS ricoprono solo una minima parte del mercato mondiale, costituita in gran parte dai microfoni capacitivi e ottici, utilizzati soprattutto in ambito militare. I microfoni piezoelettrici e piezoresistivi sono considerati dei prodotti di nicchia e per questo trovano pochissime applicazioni in ambito commerciale. I MEMS hanno sostituito i microfoni a elettrete nel 20% dei telefoni cellulari, soprattutto negli smartphone, data l'esigenza di qualità e dimensioni contenute a discapito di un costo maggiore. Nel grafico in Figura 12 sono rappresentati i vari settori di utilizzo dei mi-

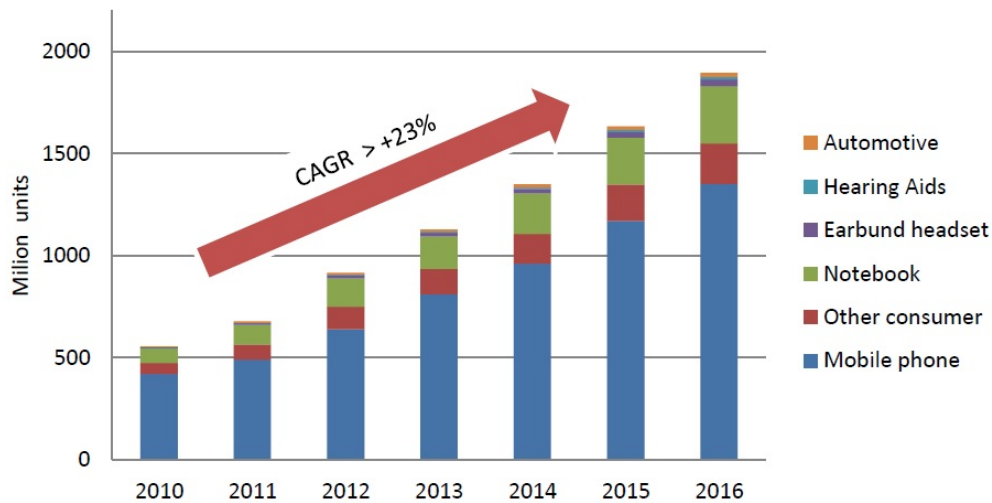


Figura 12: Previsioni di mercato dei microfoni MEMS. Tasso annuale di crescita (CAGR) superiore al 23%. Fonte Yole Développement.

crofoni MEMS con le previsioni fino al 2016. Com'era prevedibile il dominio del mercato dei microfoni apparterrà alla telefonia mobile. Negli ultimi dispositivi si è iniziato a inserire due o più microfoni per ridurre l'incidenza del rumore e migliorare la qualità del suono. La domanda è in crescita anche nel settore dei notebook. Le industrie stanno iniziando a dotare i computer di microfoni più piccoli con un suono migliore, oltre a videocamere e fotocamere di dimensioni ridotte con un maggior numero di opzioni video. Addirittura alcuni notebook sono dotati di array di microfoni atti a captare meglio il suono proveniente da una fonte non diretta. Lo sviluppo prospettato nella Figura 12 non si può verificare se non avviene allo stesso tempo uno sforzo da parte dell'industria. Si dovrà svolgere una continua ricerca nella riduzione delle dimensioni per permettere l'abbassamento del costo per singola unità. Utilizziamo come esempio sempre la Knowles Electronics. Nel 2010 aveva introdotto nel mercato microfoni con dimensioni pari al 50% rispetto a quelli prodotti nel 2006 senza ridurre le dimensioni del diaframma, raddoppiando in questo modo il numero di dispositivi realizzabili con un singolo wafer. Come si può vedere dalla Tabella 3 e dal grafico sottostante di Figura 13, i ricavi mondiali dell'industria dei microfoni MEMS si attestavano attorno ai

Anno	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Milioni di dollari USA	227,7	373,2	493,5	576,2	628,6	667,0

Tabella 3: Valore annuale, in milioni di dollari, del mercato dei microfoni MEMS. Fonte iHS iSuppli Gennaio 2012.

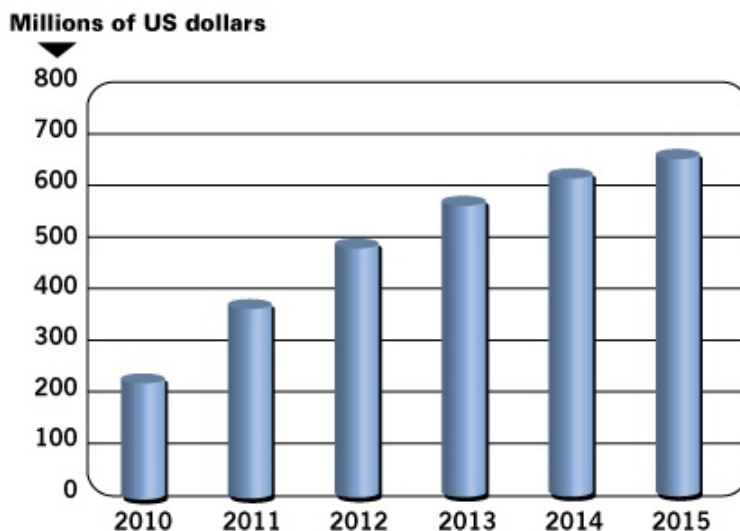


Figura 13: Previsioni di mercato globale dei microfoni MEMS, in milioni di dollari. Fonte iHS iSuppli Gennaio 2012.

220 milioni di dollari nell'anno 2010. Nei due anni successivi hanno subito una forte crescita toccando quasi i 500 milioni nel 2012, dimostrando un'espansione del 32% rispetto all'anno precedente e del 64% rispetto al 2010. La maggior parte dei dispositivi presenti sul mercato, adottanti questa tecnologia, utilizza principalmente microfoni analogici, il cui maggior difetto è la poca adattabilità. A ogni nuovo progetto sono necessarie delle modifiche per adattare al meglio il microfono che, dato il basso costo, continua a essere utilizzato soprattutto nel campo della telefonia. Dal 2006, quando Fujitsu ha iniziato a integrarli nei notebook, i microfoni digitali sono disponibili sul mercato. Al contrario dei microfoni analogici, offrono una maggiore flessibilità di utilizzo, una minore sensibilità alle interferenze elettromagnetiche (EMI) e un maggior rapporto di reiezione della tensione di alimentazione (PSRR).



Tuttavia il prezzo elevato, circa il 50% in più dei microfoni analogici, dovuto alla mancanza di concorrenza alla Knowles Electronics, ne ha ridotto la diffusione nel mercato globale. Fino al 2011, quando l'arrivo di nuove aziende in questo settore, tra cui l'italo-francese STMicroelectronics focalizzata sullo sviluppo dei microfoni digitali, hanno permesso l'abbassamento dei prezzi e dato il via a una nuova rivoluzione. Nella Figura 14 e nella Tabella 4 sono riportati i valori commerciali globali, dal 2010 fino alle previsioni del 2015, differenziandoli tra i microfoni analogici e digitali. La fonte deriva dalle ricerche dell'iHS iSuppli del Gennaio e Marzo 2012. Dal grafico si può notare

Anno	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Analogico	117,0	268,4	267,4	261,0	261,7	268,4
Digitale	50,7	104,8	226,1	315,1	366,8	398,5

Tabella 4: Valore annuale, in milioni di dollari, del mercato dei microfoni MEMS differenziandoli tra analogici e digitali. Fonte iHS iSuppli Marzo 2012.

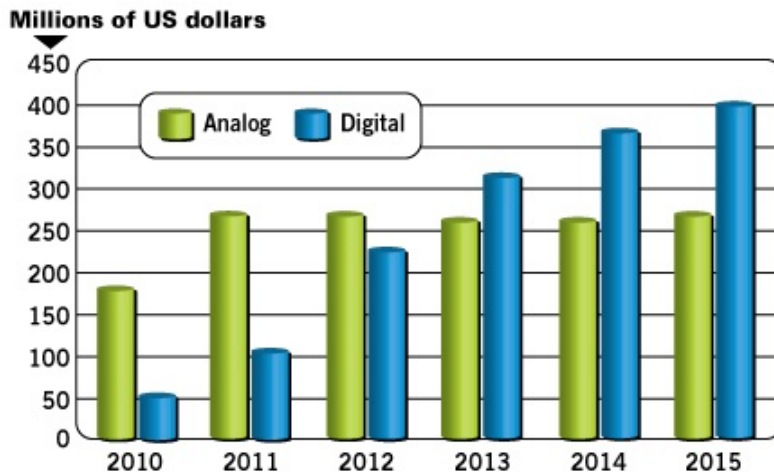


Figura 14: Previsioni di mercato globale dei microfoni MEMS analogici e digitali, in milioni di dollari. Fonte iHS iSuppli Marzo 2012.

quanto appena detto. Mentre il mercato dei microfoni analogici è rimasto

pressoché costante, nel 2012 si è verificata una grande espansione del mercato dei microfoni digitali, che ha portato a raddoppiarne il valore rispetto all'anno precedente. Causa di questa evoluzione è dovuta in gran parte alle aziende produttrici di smartphone che hanno iniziato a dotare i propri dispositivi di microfoni digitali anziché analogici. Tra queste ricordiamo Apple che, grazie all'enorme successo dei suoi dispositivi, nel 2011 è diventata la maggior acquirente mondiale di microfoni MEMS, seguita dalla concorrente Samsung. Da quanto detto il futuro dei microfoni MEMS è tra i più rosei. Le ricerche si concentreranno sul miglioramento delle caratteristiche tecniche, già di per sé eccellenti, operando soprattutto sulla struttura del diaframma e del packaging. L'utilizzo di uno o più diaframmi corrugati più complessi nello stesso microfono permetterà di raggiungere un livello maggiore di sensibilità e allo stesso tempo diminuire lo stress dovuto alle variazioni di temperatura.

## Conclusioni

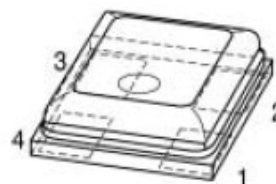
La seguente tesina offre una panoramica sul mondo dei microfoni MEMS e si pone l'obiettivo di invitare il lettore ad approfondire l'argomento, attraverso l'analisi di concetti fondamentali e di facile comprensione. La ricerca riguardo ai microfoni piezoelettrici e piezoresistivi si è dimostrata più difficile del previsto, data la mancanza o poca diffusione sul mercato di queste tipologie di microfoni. Durante la stesura ho avuto la possibilità di approfondire l'argomento, visti i grandi passi in avanti compiuti in questo campo. Gli studi scientifici, da alcuni anni, si concentrano soprattutto sullo sviluppo di nuove strutture, molto più complesse di quelle presentate, in grado di raggiungere prestazioni migliori. La ricerca è in continua evoluzione e le stime descritte nell'ultimo capitolo promettono un futuro brillante con grandi prospettive d'investimenti.

# A Appendice

## Datasheet microfono MEMS analogico SMM310 di Infineon

### Features

- SMD MEMS microphone for automated surface mount assembly
- Reflow soldering up to 260 °C (lead free)
- High long-term temperature stability
- Stable sensitivity over power supply range of 1.5 - 3.3 V
- Low current consumption of 80  $\mu$ A
- Excellent power supply rejection of -55 dB
- High integrated immunity to EMI
- RoHS-compliant, halogen-free package with small footprint and low height of 1.25 mm



### Applications

The SMM310 is designed for

- Mobile Phones (Handsets, Headsets)
- Consumer (Game Consoles, PDA's)
- Computer (Personal Computers, Notebooks)
- Cameras (Digital Still Cameras, Video Cameras)

### Product Description

Miniature Silicon MEMS (Micro Electro Mechanical System) omni-directional Microphone with single-ended analog interface designed for automated reflow soldering assembly as SMD (Surface Mounted Device) component. It is an alternative to conventional ECMs (Electret Condenser Microphones).

Due to its robust design with a metallic lid and monolithic integrated EMI-blocking capacitors and utilization of Silicon MEMS technology, the SMM310 shows high immunity to EMI (Electromagnetic Interference) and heat.

The capped Chip-On-Board package solution contains the micromechanical sensor chip and an amplifier chip. The RoHS-compliant halogen-free device has a size of 4.72 x 3.76 x 1.25 mm<sup>3</sup>.

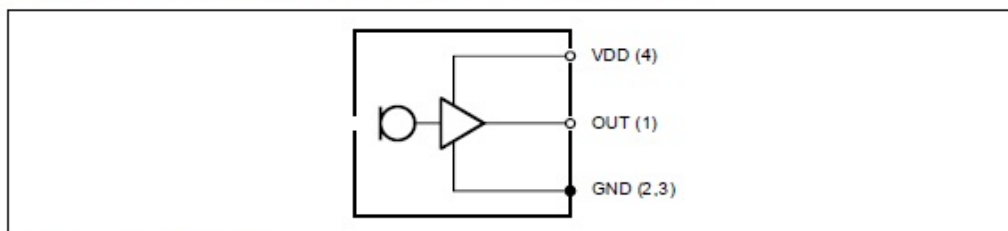


Figure 1 Block Diagram

Type	Package	Marking
SMM310	HG-MMA-4-2	S310

## Pin Definition and Function

**Table 1 Pin Definition and Function**

Pin No.	Symbol	Function
1	<i>OUT</i>	Output
2	<i>GND</i>	Ground
3	<i>GND</i>	Ground
4	$V_{DD}$	Power

## Maximum Ratings

**Table 2 Maximum Ratings**

Storage Temperature	$T_{STG}$	-40 °C - 125 °C
Operating Temperature Range	$T_A$	-40 °C - 85 °C
Operating Voltage Range	$V_{DD}$	1.5 V - 3.3 V

## ESD robustness

**Table 3 Typical robustness to electrostatic discharge**

ESD capability all pins (HBM, JESD22-A114)	$V_{ESD\_HBM}$	± 4 kV
ESD capability all pins (MM, JESD22-A115)	$V_{ESD\_MM}$	± 400 V

## Acoustical and Electrical Characteristics

**Table 4 Unless otherwise noted, typical test conditions are  $T_A = 23\text{ °C}$ ,  $V_{DD} = 2.1\text{ V}$  and R.H. = 50 % measured in a pressure chamber test setup. All voltages refer to GND node**

Parameter	Symbol	Values			Unit	Note / Test Condition
		Min.	Typ.	Max.		
Sensitivity 1 kHz	$S_{1kHz}$	-45	-42	-39	dB(V/Pa)	1 kHz, 94 dB SPL
Relative Sensitivity 4 kHz	$\Delta S_{4kHz}$	-1		+4	dB	Relative to sensitivity 1 kHz
Relative Sensitivity 240 Hz	$\Delta S_{240Hz}$	-1		+1	dB	Relative to sensitivity 1 kHz
Equivalent Noise Level	$ENL$		29.5	32.5	dB(pso)	CCITT-weighted <sup>1)</sup>
			35		dB(A)	A-weighted <sup>2)</sup>
Signal-to-Noise Ratio	$SNR$	61.5	64.5		dB(pso)	CCITT-weighted
			59		dB(A)	A-weighted
Total Harmonic Distortion	$THD$		0.1	0.5	%	104 dB SPL, 1 kHz
Current Consumption	$I_{CC}$		80	140	μA	$V_{DD} = 2.1\text{ V}$
Power Supply Rejection Ratio	$PSRR$		-55	-40	dB	100 mV superimposed on $V_{DD} = 2.1\text{ V}$ , 1 kHz
DC Output Voltage	$V_{OUT}$		1.2		V	DC Voltage at Pin 1
Output Impedance	$Z_{OUT}$		7		Ω	1 kHz

1) Psophometrically weighted noise measurement with CCITT-filter (ITU-T Rec. P.53)

2) Noise measurement with A-weighting filter (IEC 651)

Typical Measurements Results

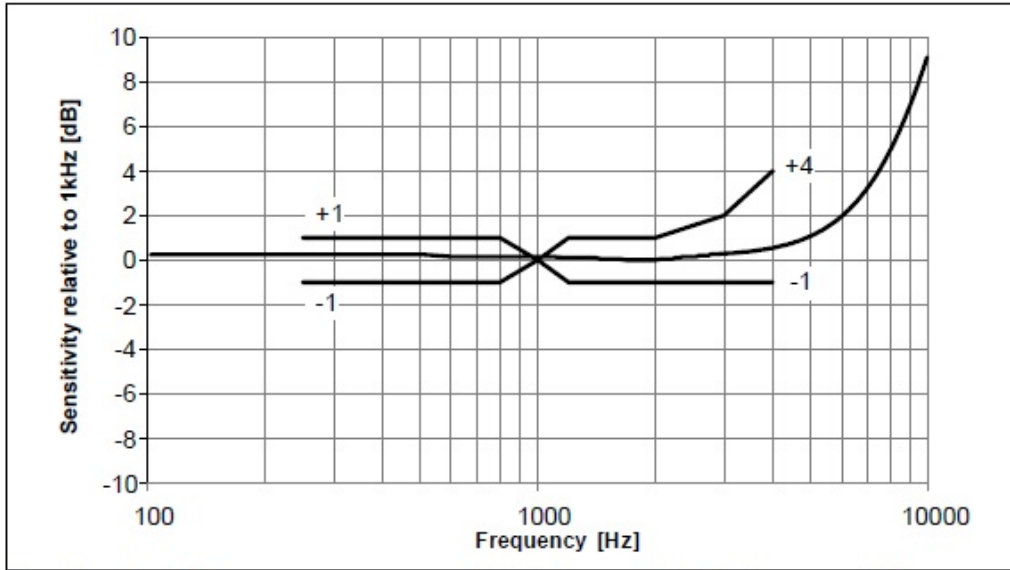


Figure 2 Typical frequency response curve relative to the sensitivity at a frequency of 1 kHz

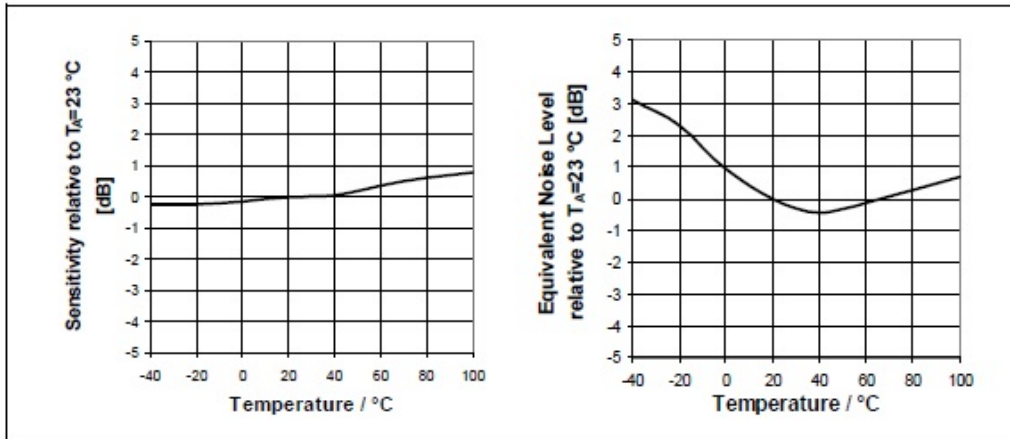


Figure 3 Typical change of sensitivity at 1 kHz and equivalent noise level over temperature relative to  $T_A = 23^\circ \text{C}$

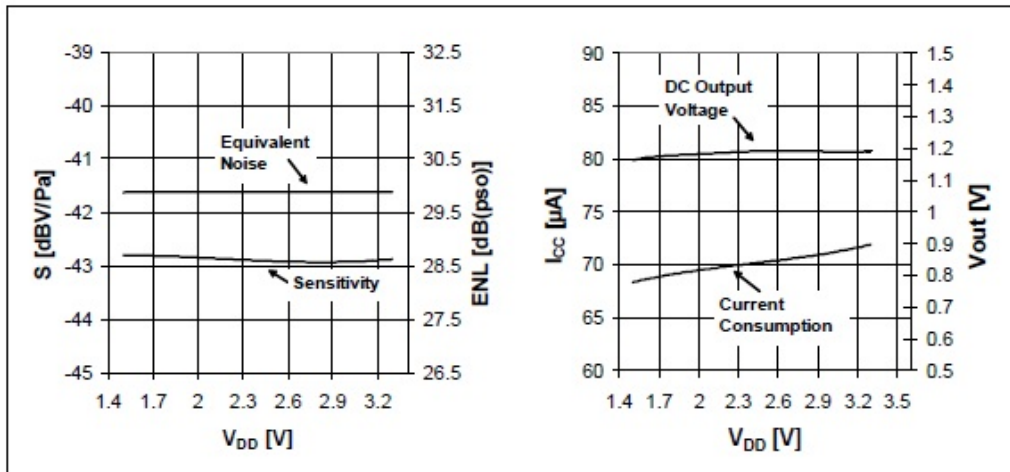


Figure 4 Typical measurement of sensitivity, equivalent noise level, current consumption and DC output voltage over power supply  $V_{DD}$

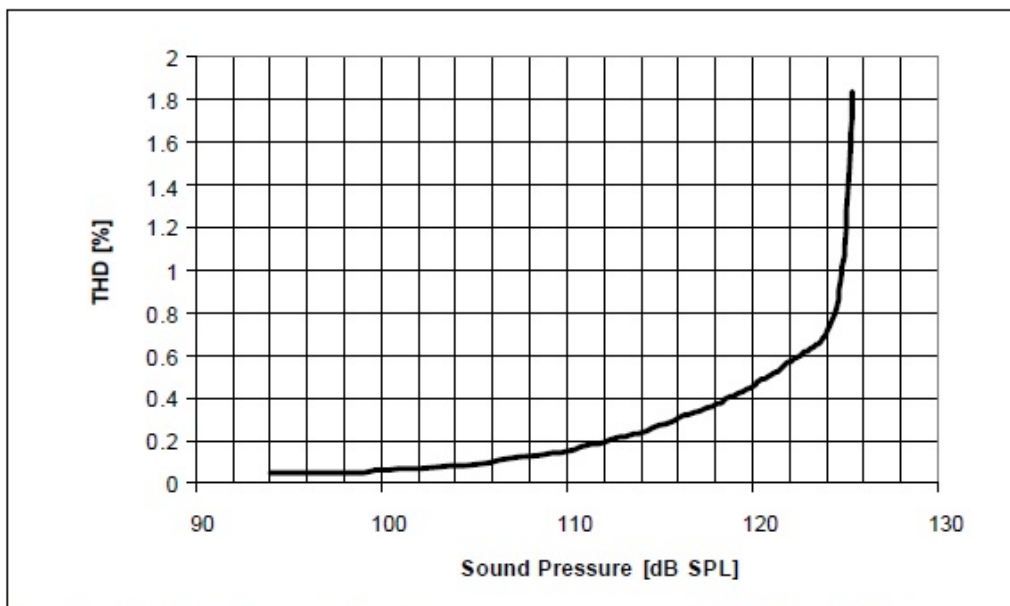


Figure 5 Typical total harmonic distortion over sound pressure level (1 kHz,  $V_{DD} = 2.1$  V)

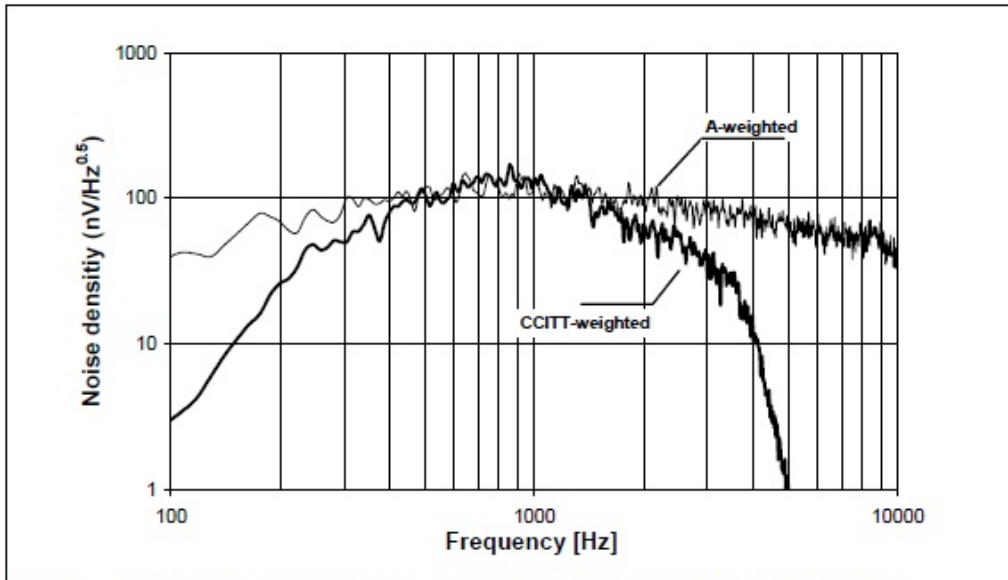


Figure 6 Typical noise density measurement with A-weighting and CCITT-weighting filter

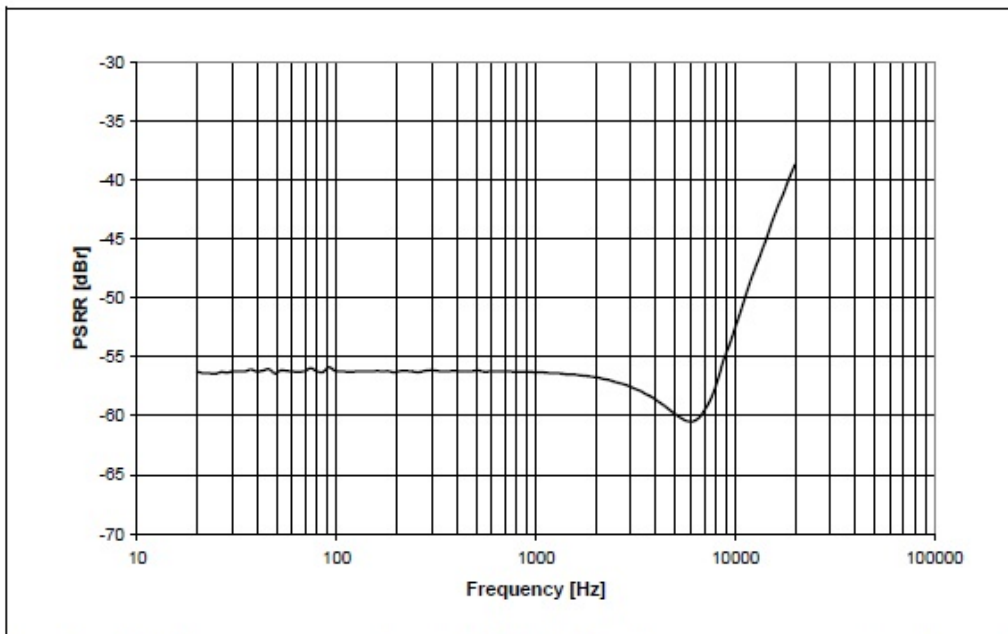


Figure 7 Typical power supply rejection ratio (relative to 100 mV sinewave superimposed on the supply voltage  $V_{DD}$ )

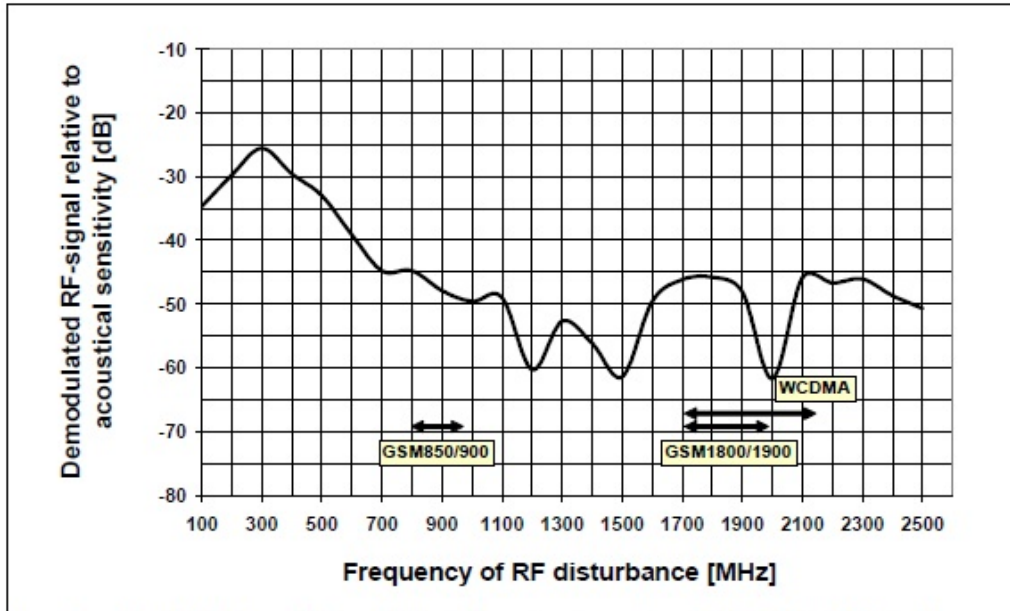


Figure 8 Typical RF demodulation relative to the microphone signal (1 kHz, 1 Pa). RF disturbance (100 MHz - 2.5 GHz, 80%-AM-modulated with 1 kHz) is directly injected in the power supply

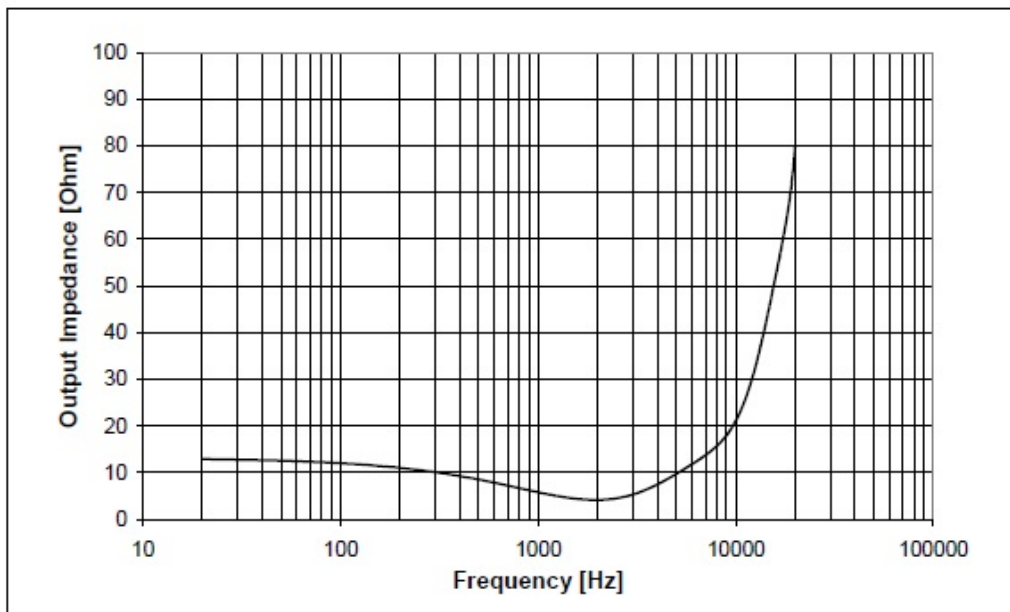


Figure 9 Typical output impedance measurement ( $T_{DD} = 2.1$  V)



Package Outline

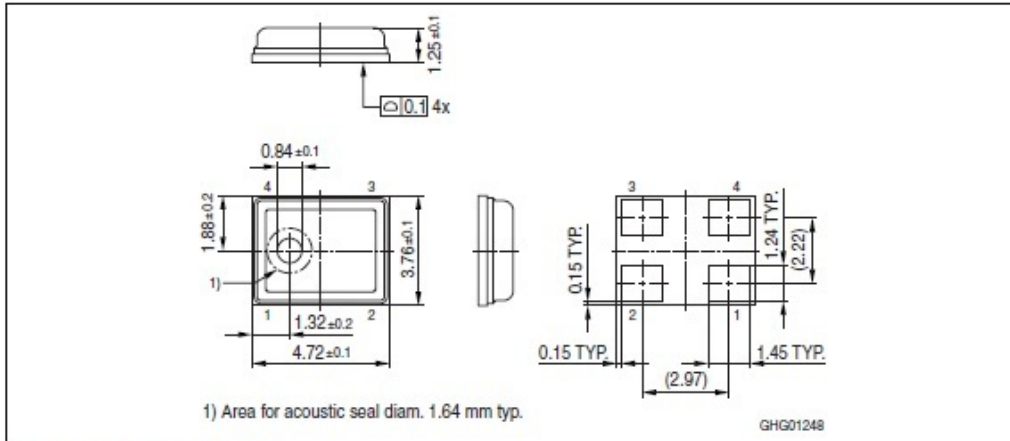


Figure 10 Package outline

Table 5 Dimensions

Item	Dimension (mm)	Tolerance (mm)
Height	1.25	± 0.1
Length	4.72	± 0.1
Width	3.76	± 0.1
Sound Port Diameter	0.84	± 0.1

Recommended Customer Land Pattern

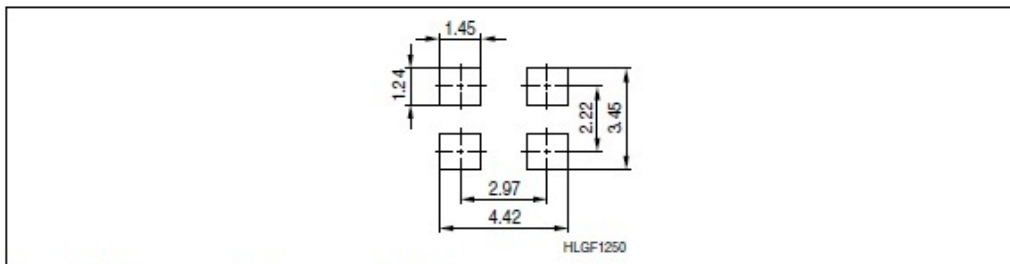


Figure 11 Recommended customer land pattern

## B Appendice

### Datasheet microfono MEMS digitale ADMP421 di Analog Devices

#### FEATURES

- Small and thin 3 mm × 4 mm × 1 mm surface-mount package**
- High SNR of 61 dBA**
- High sensitivity of -26 dBFS**
- Flat frequency response from 100 Hz to 15 kHz**
- Low current consumption: <650 μA**
- Sleep mode for extended battery life**
- High PSR of 80 dBFS**
- Fourth-order Σ-Δ modulator**
- Digital PDM output**
- Compatible with Sn/Pb and Pb-free solder processes**
- RoHS/WEEE compliant**

#### APPLICATIONS

- Smartphones and feature phones
- Teleconferencing systems
- Digital video cameras
- Bluetooth headsets
- Video phones
- Tablets

#### GENERAL DESCRIPTION

The ADMP421 is a high performance, low power, digital output bottom-ported omnidirectional MEMS microphone. The ADMP421 consists of a MEMS microphone element and an impedance converter amplifier followed by a fourth-order Σ-Δ modulator. The digital interface allows for the pulse density modulated (PDM) output of two microphones to be time-multiplexed on a single data line using a single clock.

The ADMP421 has a high SNR and high sensitivity, making it an excellent choice for far field applications. The ADMP421 has a flat wideband frequency response, resulting in natural sound with high intelligibility. Low current consumption and a sleep mode enable long battery life for portable applications. A built-in particle filter provides high reliability. The ADMP421 complies with the TIA-920 *Telecommunications Telephone Terminal Equipment Transmission Requirements for Wideband Digital Wireline Telephones* standard.

The ADMP421 is available in a thin 3 mm × 4 mm × 1 mm surface-mount package. It is reflow solder compatible with no sensitivity degradation. The ADMP421 is halide free.

#### FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM

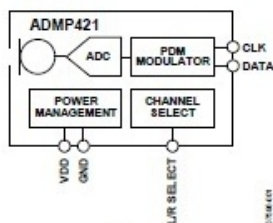


Figure 1.

Table 1.

Parameter	Description	Min	Max	Unit
Input				
t <sub>CLKIN</sub>	Input clock period	310	1000	ns
Output				
t <sub>1OUTEN</sub>	DATA1 driven after falling clock edge	30		ns
t <sub>1OUTDIS</sub>	DATA1 disabled after rising clock edge		20	ns
t <sub>2OUTEN</sub>	DATA2 driven after rising clock edge	30		ns
t <sub>2OUTDIS</sub>	DATA2 disabled after falling clock edge		20	ns

### Timing Diagram

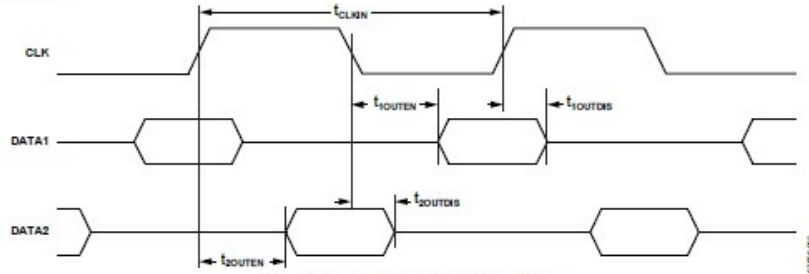


Figure 2. Pulse Density Modulated Output Timing

## SPECIFICATIONS

$T_A = 25^\circ\text{C}$ ,  $V_{DD} = 1.8\text{ V}$ ,  $\text{CLK} = 2.4\text{ MHz}$ , unless otherwise noted. All minimum and maximum specifications are guaranteed. Typical specifications are not guaranteed.

Table 2.

Parameter	Symbol	Test Conditions/Comments	Min	Typ	Max	Unit
<b>PERFORMANCE</b>						
Directionality				Omni		
Sensitivity <sup>1</sup>		1 kHz, 94 dB SPL	-29	-26	-23	dBFS
Signal-to-Noise Ratio	SNR	20 kHz bandwidth, A-weighted		61		dB
Equivalent Input Noise	EIN	20 kHz bandwidth, A-weighted		33		dB
Dynamic Range		Derived from EIN and maximum acoustic input		87		dB
Frequency Response <sup>2</sup>		Low frequency -3 dB point		100		Hz
		High frequency -3 dB point		15		kHz
		Deviation limits from flat response within pass band		-3/+2		dB
Total Harmonic Distortion	THD	105 dB SPL			3	%
Power Supply Rejection	PSR	217 Hz, 100 mV p-p square wave superimposed on $V_{DD} = 1.8\text{ V}$		80		dBFS
Maximum Acoustic Input		Peak		120		dB SPL
<b>INPUT CHARACTERISTICS</b>						
Clock Frequency	CLK		1.0	2.4 <sup>3</sup>	3.3	MHz
Clock Duty Ratio		Clock frequency of 2.4 MHz or less	40		60	%
Input Voltage High	$V_{IH}$		$0.65 \times V_{DD}$			V
Input Voltage Low	$V_{IL}$				$0.35 \times V_{DD}$	V
<b>OUTPUT CHARACTERISTICS</b>						
Output Voltage High	$V_{OH}$	$I_{LOAD} = 0.5\text{ mA}$	$0.7 \times V_{DD}$	$V_{DD}$		V
Output Voltage Low	$V_{OL}$	$I_{LOAD} = 0.5\text{ mA}$		0	$0.3 \times V_{DD}$	V
Latency				<30		$\mu\text{s}$
Wake-Up Time		From sleep mode, power on		10		ms
<b>POWER SUPPLY</b>						
Supply Voltage	$V_{DD}$		1.8		3.3	V
Supply Current	$I_S$	Normal mode			650	$\mu\text{A}$
		Sleep mode <sup>4</sup>			50	$\mu\text{A}$

<sup>1</sup> Relative to the rms level of a sine wave with positive amplitude equal to 100% 1s density and negative amplitude equal to 0% 1s density.

<sup>2</sup> See Figure 5 and Figure 6.

<sup>3</sup> The microphone operates at any clock frequency between 1.0 MHz and 3.3 MHz. Some specifications may not be guaranteed at frequencies other than 2.4 MHz.

<sup>4</sup> The microphone enters sleep mode when the clock is turned off or the clock frequency is less than 1 kHz.

## PIN CONFIGURATION AND FUNCTION DESCRIPTIONS

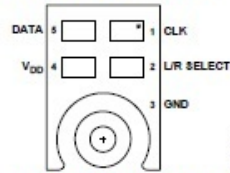


Figure 4. Pin Configuration (Bottom View)

Table 5. Pin Function Descriptions

Pin No.	Mnemonic	Description
1	CLK	Clock Input to Microphone.
2	L/R SELECT	Left Channel or Right Channel Select. DATA1 (right): L/R SELECT tied to GND. DATA2 (left): L/R SELECT pulled to V <sub>DD</sub> .
3	GND	Ground.
4	V <sub>DD</sub>	Power Supply. Placing a 0.1 $\mu$ F (100 nF) ceramic type X7R capacitor between Pin 4 (V <sub>DD</sub> ) and ground is strongly recommended for best performance and to avoid potential parasitic artifacts. The capacitor should be placed as close to Pin 4 as possible.
5	DATA	Digital Output Signal (DATA1, DATA2).

## TYPICAL PERFORMANCE CHARACTERISTICS

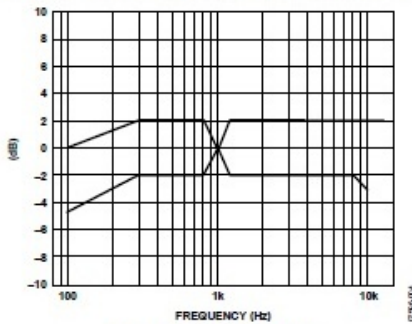


Figure 5. Frequency Response Mask

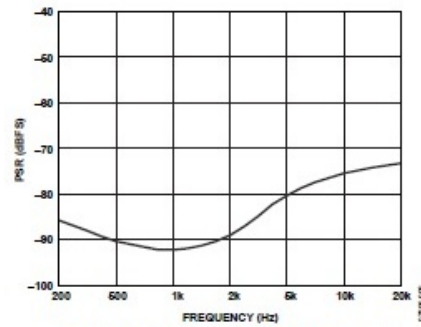


Figure 7. Typical Power Supply Rejection vs. Frequency

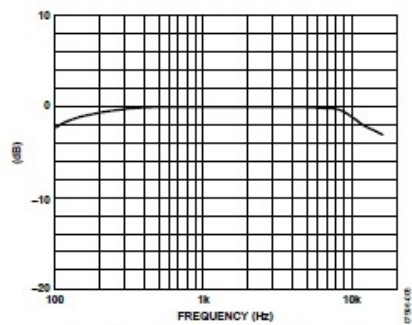


Figure 6. Typical Frequency Response (Measured)

## APPLICATIONS INFORMATION

### INTERFACING WITH ANALOG DEVICES CODECS

Analog Devices ADAU1361, ADAU1761, and ADAU1781 codecs feature digital microphone inputs that support the ADMP421 PDM output data format. See the connection diagrams shown in Figure 12, and refer to the AN-1003 [Application Note](#) and the codecs' respective data sheets for more details on the digital microphone interface.

### SLEEP MODE

The microphone enters sleep mode when the clock is turned off or the clock frequency falls below 1 kHz. In sleep mode, the microphone data output is in high impedance state and the current consumption is less than 50  $\mu\text{A}$ .

### POWER SAVINGS WHEN DISABLING ONE MICROPHONE IN A MULTIMICROPHONE APPLICATION

The ADMP421 has a unique power-saving feature when used in systems where two or more microphones share the same clock and/or data lines. The microphone is designed to present high impedance on both the clock and data pins when the power supply ( $V_{\text{DD}}$ ) pin is at 0 V or floating. This disabled microphone presents no load to and consumes no power from other active microphones.

## SUPPORTING DOCUMENTS

### Evaluation Board User Guides

UG-118, [EVAL-ADMP421Z Bottom Port Digital Output MEMS Microphone Evaluation Board](#)

UG-183, [EVAL-ADMP421Z-FLEX: Bottom-Ported Digital Output MEMS Microphone Evaluation Board](#)

### Circuit Note

CN-0078, [iMEMS Digital Microphone Simplifies the Interface to a SigmaDSP Audio Codec](#)

### Application Notes

AN-1003, [Recommendations for Mounting and Connecting Analog Devices, Inc., Bottom-Ported MEMS Microphones](#)

AN-1068, [Reflow Soldering of the MEMS Microphone](#)

AN-1112, [Microphone Specifications Explained](#)

AN-1124, [Recommendations for Sealing Analog Devices, Inc., Bottom-Port MEMS Microphones from Dust and Liquid Ingress](#)

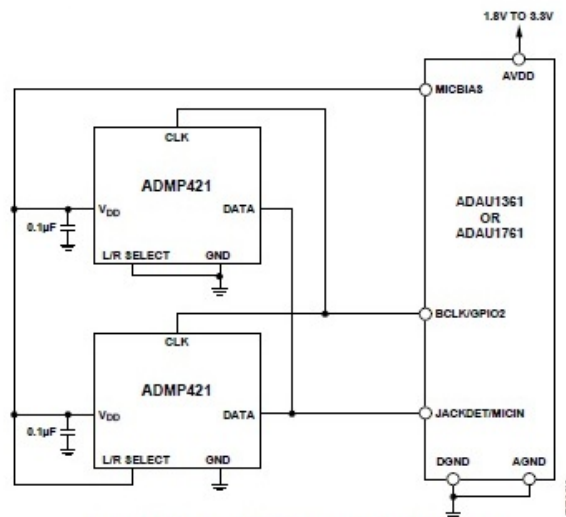


Figure 12. ADAU1361 and ADAU1761 Stereo Interface Block Diagram

## OUTLINE DIMENSIONS

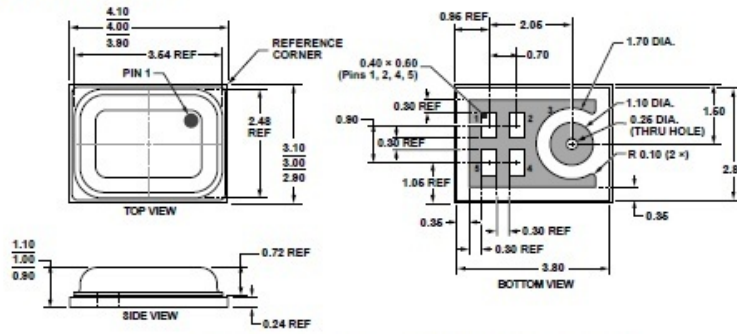
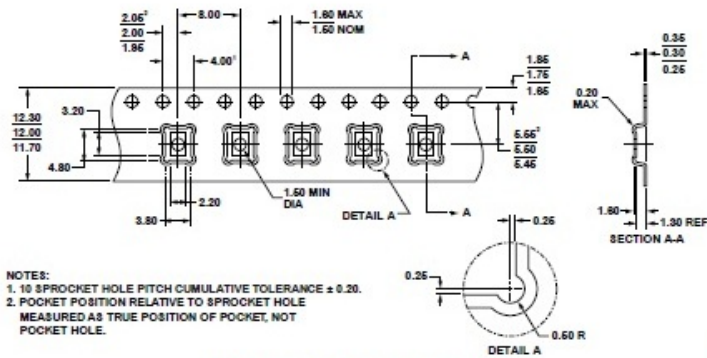


Figure 13.5-Terminal Chip Array Small Outline No Lead Cavity [LGA\_CAV]  
4 mm x 3 mm Body  
(CE-5-1)  
Dimensions shown in millimeters



NOTES:  
1. 10 SPROCKET HOLE PITCH CUMULATIVE TOLERANCE  $\pm 0.20$ .  
2. POCKET POSITION RELATIVE TO SPROCKET HOLE  
MEASURED AS TRUE POSITION OF POCKET, NOT  
POCKET HOLE.

Figure 14. LGA\_CAV Tape and Reel Outline Dimensions  
Dimensions shown in millimeters

## ORDERING GUIDE

Model <sup>1</sup>	Temperature Range	Package Description	Package Option <sup>2</sup>	Ordering Quantity
ADMP421BCEZ-RL	-40°C to +85°C	5-Terminal LGA_CAV, 13" Tape and Reel	CE-5-1	5,000
ADMP421BCEZ-RL7	-40°C to +85°C	5-Terminal LGA_CAV, 7" Tape and Reel	CE-5-1	1,000
EVAL-ADMP421Z		Evaluation Board		
EVAL-ADMP421Z-FLEX		Flex Evaluation Board		

<sup>1</sup> Z - RoHS Compliant Part.

<sup>2</sup> This package option is halide free.

## Riferimenti bibliografici

- [1] S. Hishinuma, Y. Kumai, K. Oku et al. "Silicon Condenser Microphone Fabricated on SOI Wafer", International Conference on Electrical Engineering (ICEE), 2009.
- [2] B. Azizollah Ganji and B. Yeop Majlis, "Fabrication and Characterization of a New MEMS Capacitive Microphone Using Perforated Diaphragm", International Journal of Engineering, Transactions B: Applications, Vol. 22 n.2, pp. 153-160, 2009.
- [3] H. Cheol-Hyun and K. Eun Sok, "Fabrication of Piezoelectric Acoustic Transducers Built on Cantilever-like Diaphragm", The 14<sup>th</sup> IEEE International Conference, pp. 110-113, 2001.
- [4] P. Martins, S. Beclin, S. Brida, S. Metivet, O. Stojanovic and C. Malhaire, "Design of Bossed Silicon Membranes for High Sensitivity Microphone Applications", Journal Microsystem Technologies April 2006, Vol. 13 n.11, pp. 1495-1500, May 2007.
- [5] R. Dieme, G. Bosman, M. Sheplak, and T. Nishida, "Sources of Excess Noise in Silicon Piezoresistive Microphones", Journal Acoustical Society of America, Vol. 22, pp. 2710-2720, May 2006.
- [6] L. Picolli, M. Grassi, L. Rosson, A. Fornasari and P. Malcovati, "A Fourth-Order, Audio-Bandwidth, 87.5dB SNDR  $\Sigma\Delta$  Modulator for MEMS Microphones", Circuits and Systems, IEEE International Symposium, pp. 1325-1328, May 2009.
- [7] Lu-Po Liao, Wen-Chieh Chou and Yu-Chun Hsu, "A High Sensitivity CMOS Preamplifier for Silicon Microphone", Microsystems Packaging Assembly Conference Taiwan, pp. 1-4, 2006.
- [8] Siliang Hua, Yan Liu, Jian'en Zhang, Donghui Wang and Chao-huan Hou, "A Novel Preamplifier for MEMS Microphone", IEEE 8<sup>th</sup> International Conference, pp. 636-638, 2009.

- [9] Ronald G. Polcawich, “A Piezoelectric MEMS Microphone Based on Lead Zirconate Titanate (PZT) Thin Films”, Army Research Laboratory, Nov. 2004.
- [10] P. R. Scheeper, A. G. H. Donk van der, W. Olthuis and P. Bergveld, “A review of silicon microphones”, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 44, pp. 1-11, 1994.
- [11] M. Rossi, “Acoustics and Electroacoustics”, Artech House Acoustics Library Inc., ch. 5-6, May 1988.
- [12] S. Horowitz, T. Nishida, L. Cattafesta and M. Sheplak, “Design and Characterization of a Micromachined Piezoelectric Microphone”, 11<sup>th</sup> AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, AIAA Paper #2005-2998, 2005.
- [13] Wenbin Ding, “Projected 23% CAGR in MEMS Microphone Market Attracts Crowd of Entrants”, *Solid State Technology*, 2011.  
<http://www.electroiq.com/articles/stm/2011/06/projected-23-cagr.html> (24 Settembre 2012).
- [14] Jérémie Bouchaud, “MEMS Microphones Make Noise in 2012”, *Solid State Technology*, 2012.  
<http://www.electroiq.com/articles/stm/2012/01/mems-microphones-make-noise-in-2012.html> (24 Settembre 2012).
- [15] Electroiq, “Digital MEMS Microphones to Overtake Analog”, *Solid State Technology*, 2012.  
<http://www.electroiq.com/articles/stm/2012/03/digital-mems-microphones-to-overtake-analog.html> (24 Settembre 2012).