

TRASDUTTORI DI IMMAGINI E DI SUONI

TRASDUTTORI DI IMMAGINI

1. Trasduttori CCD

I **CCD**, acronimo di **Charge Coupled Device**, sono trasduttori ottico-elettrici costituiti da una griglia rettangolare di elementi semiconduttori, detti **pixel**, disposti in righe (file orizzontali) e colonne (file verticali), in grado di accumulare una carica elettrica (charge) proporzionale all'intensità della radiazione luminosa che li colpisce.

I pixel sono accoppiati tra loro (coupled) in maniera tale che ciascuno di essi, sollecitato da un opportuno impulso elettrico, trasferisce la propria carica elettrica al pixel adiacente, analogamente a quanto avviene in un registro a scorrimento: le cariche elettriche generate a una estremità possono essere pertanto rilevate all'altra estremità del dispositivo, ottenendo così un segnale elettrico che riproduce la matrice dei pixel che compongono l'immagine proiettata sulla superficie del CCD.

Tale segnale può essere utilizzato direttamente nella sua forma analogica per riprodurre l'immagine su un monitor, per essere registrato su supporti magnetici, oppure per essere convertito in formato digitale per l'immagazzinamento in file, consentendone così un utilizzo futuro.

I CCD sono stati ideati nel 1969 presso la divisione componenti semiconduttori dei Bell Laboratories da Willard S. Boyle e George E. Smith; nel 1975 fu realizzata la prima videocamera a CCD con una qualità dell'immagine adeguata per riprese televisive.

Attualmente esiste una vasta gamma di dispositivi che impiegano sensori CCD, come per esempio le webcam e i videocitofoni, che contengono CCD con basso numero di pixel, le videocamere e le macchine fotografiche digitali, che ne contengono un numero molto più elevato, e infine i sensori per applicazioni astronomiche, aventi numero di pixel ancora superiore.

2. Principio di funzionamento dei CCD

Il funzionamento dei trasduttori CCD si basa sull'**effetto fotoconduttivo** che si verifica nei semiconduttori, cioè nella generazione di coppie elettrone-lacuna quando questi sono investiti da una radiazione di frequenza sufficientemente elevata.

Gli elettroni colpiti dalle radiazioni acquistano energia cinetica e iniziano a vibrare all'interno della struttura cristallina del semiconduttore; se tale energia è sufficiente a rompere i legami che li vincolano ai propri nuclei, si liberano nello spazio circostante formando, nel posto occupato dall'elettrone prima della rottura del legame, una carica positiva (lacuna): viene cioè generata una coppia **elettrone-lacuna**.

La lacuna è a tutti gli effetti un portatore di carica analogamente all'elettrone libero e ambedue contribuiscono alla conduzione elettrica nel semiconduttore.

Un sensore CCD è formato da una piastra di silicio organizzata secondo una matrice di pixel, ciascuno dei quali è costituito da un condensatore **MOS** (Metal Oxide Silicon), del quale nella figura 1 ne è rappresentata la struttura di principio.

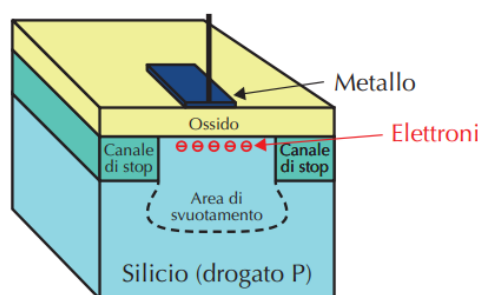


Figura 1 - Struttura di principio di un condensatore MOS

Un condensatore MOS (C-MOS) è fondamentalmente costituito un substrato semiconduttore di silicio P (quindi con cariche maggioritarie positive), avente spessore non superiore a 100 μm , ricoperto da uno strato isolante di ossido di silicio (spessore 0,12 μm circa) che funge da dielettrico, sopra il quale è depositato un elettrodo metallico. Mantenendo l'elettrodo metallico a un potenziale sufficientemente positivo rispetto al substrato di silicio, sotto lo strato di ossido viene generata una regione di svuotamento, nella quale non sono presenti portatori di carica maggioritari (lacune), ma quelli di carica minoritari (elettroni); le lacune, infatti, per effetto della polarizzazione

positiva dell'elettrodo di metallo, si spostano verso il basso del substrato, mentre gli elettroni sono attratti in prossimità dell'ossido.

Per contenere l'estensione laterale della zona di svuotamento immediatamente sotto l'ossido, vengono create due regioni di tipo P pesantemente drogate, aventi dimensioni di pochissimi micron, dette **canali di stop**: così facendo nel substrato di silicio di tipo P sottostante l'elettrodo si crea un “**pozzo di potenziale**”, nel quale rimangono confinate le cariche minoritarie (elettroni), in quanto le barriere di potenziale che delimitano il pozzo impediscono loro di spostarsi nelle zone vicine.

Una radiazione luminosa incidente il substrato di silicio, che penetra al suo interno per uno spessore dipendente dalla profondità di assorbimento del silicio stesso, genera per effetto fotoconduttivo coppie elettrone-lacuna: gli elettroni (cariche minoritarie) si concentrano all'interno del pozzo di potenziale e le lacune (cariche maggioritarie) vengono spinte verso il basso del substrato di silicio P (figura 2).

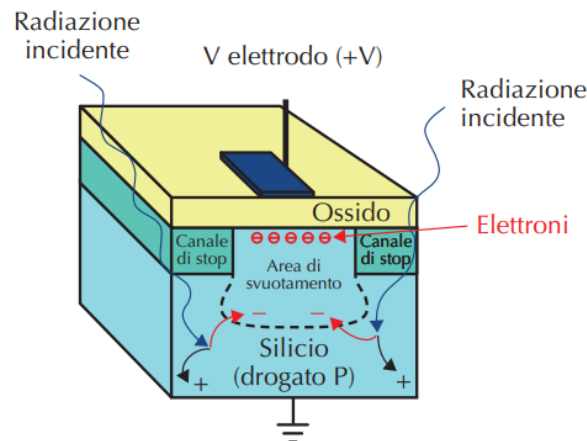


Figura 2 - Generazione del pozzo di potenziale

All'interno del pozzo si accumulano pertanto gli elettroni generati dalla radiazione incidente (segnale utile), ai quali si uniscono gli elettroni prodotti per agitazione termica, che costituiscono il rumore di fondo del dispositivo, riducibile abbassando la temperatura di lavoro.

Realizzando molti condensatori MOS (pixel) affiancati come in un mosaico, si ottiene un trasduttore CCD, come indicato nella figura 3, nella quale ne è mostrato un esempio a 7 unità.

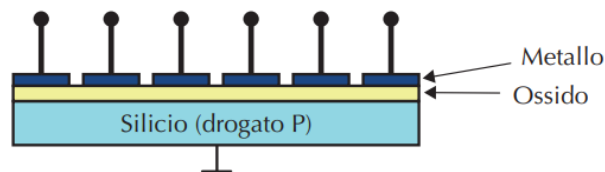


Figura 3 - Esempio di sensore CCD a 7 pixel

Il funzionamento del CCD può essere suddiviso in quattro fasi:

- generazione delle cariche per effetto fotoelettrico;
- raccolta delle cariche tramite la formazione di pozzi di potenziale;
- trasferimento delle cariche, che si ottiene variando opportunamente i potenziali degli elettrodi;
- estrazione della carica mediante il circuito di uscita.

2.1 Generazione delle cariche per effetto fotoelettrico e raccolta delle cariche nei pozzi di potenziale

Mantenendo gli elettrodi dei vari pixel a potenziale positivo rispetto al substrato di silicio P, nella zona sottostante si creano tanti “pozzi di potenziale” quanti sono gli elettrodi, nei quali rimangono confinate le cariche minoritarie (elettroni).

Una radiazione luminosa che incide sul substrato di silicio genera, per effetto fotoelettrico, coppie elettrone-lacuna: gli elettroni (cariche minoritarie) si concentrano all'interno dei pozzi di potenziale (figura 4), le lacune (cariche maggioritarie) vengono spinte verso il basso del substrato di silicio P.

Il numero delle coppie elettrone-lacuna generate dipende dall'intensità della radiazione e pertanto la quantità di carica che si accumula nei pozzi è proporzionale all'intensità luminosa della radiazione incidente: conseguentemente la matrice che si forma riproduce, punto per punto, la luminosità della radiazione incidente (immagine).

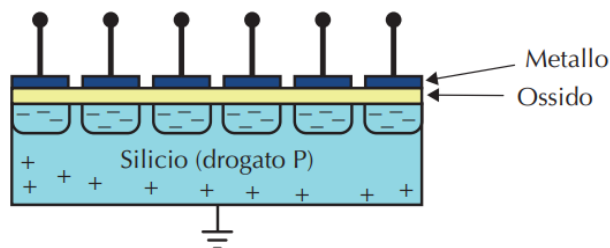


Figura 4 - Esempio di struttura CCD a 7 pixel

2.2 Trasferimento delle cariche

La fase successiva riguarda il trasferimento (accoppiamento) all'elemento successivo della carica accumulata sotto l'elettrodo; il trasferimento è realizzato portando l'elettrodo adiacente a un potenziale positivo superiore a quello vicino: così facendo il corrispondente pozzo diventa più profondo, consentendo il "trabocco" degli elettroni dal pozzo meno profondo a quello più profondo (adiacente).

Con successive variazioni dei potenziali degli elettrodi adiacenti è pertanto possibile spostare gli elettroni parallelamente ai canali di stop: il sensore CCD si comporta pertanto come un registro a scorrimento, nel quale le cariche possono essere generate a una estremità, spostate lungo la superficie del trasduttore e rilevate all'altra estremità, dove è posto il registro di lettura (figura 5), formato da una riga di pixel, anch'essa opportunamente pilotata dai potenziali degli elettrodi, in cui la carica si sposta perpendicolarmente ai canali di stop.

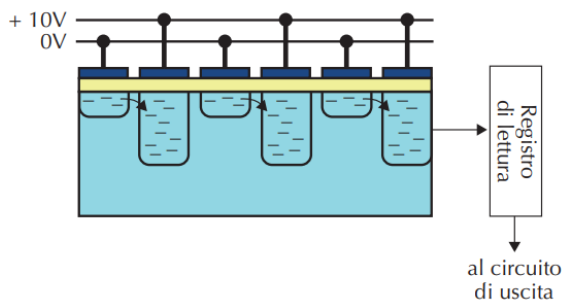


Figura 5 - Trasferimento delle cariche lungo la superficie del CCD parallelamente ai canali di stop

2.3 Estrazione delle cariche

Il contenuto del registro di lettura viene letto tramite il circuito d'uscita, di cui in figura 6 ne è indicato lo schema di principio, prima scaricandolo sul diodo D mediante un'opportuna variazione dei potenziali di ciascun pixel del registro, poi sul nodo d'uscita (capacità C) e, infine, tramite il FET (Field Effect Transistor), sulla resistenza di carico (Load).

Il segnale viene quindi amplificato da un preamplificatore posto subito dopo il circuito d'uscita del CCD e convertito in digitale dal convertitore analogico-digitale.

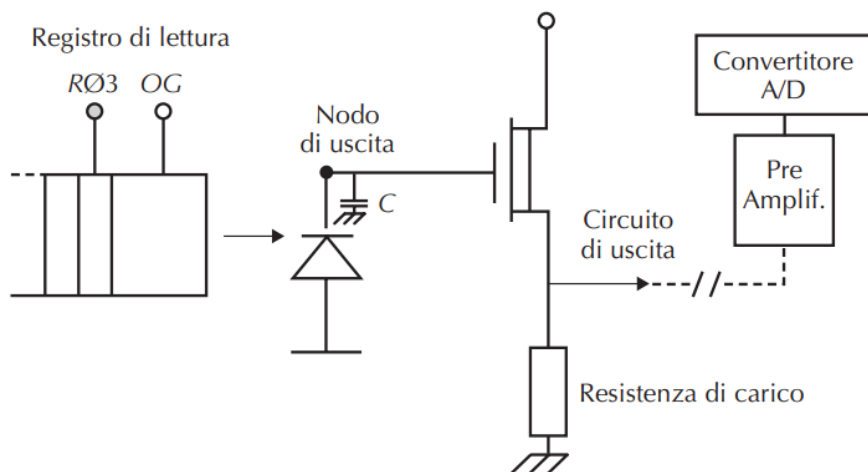


Figura 6 - Circuito di uscita del CCD

3. Risoluzione di un CCD

Immaginando di disporre idealmente di un piccolo CCD in bianco e nero con 400 pixel disposti secondo una matrice quadrata 20×20 , l'immagine di una mela, per esempio, risulta formata da 400 quadratini, aventi ciascuno una tonalità di grigio, come mostrato in figura 7.



Figura 7 - Visualizzazione dell'immagine di una mela sul CCD a 400 pixel

Si può osservare che con 400 pixel la qualità dell'immagine è molto bassa e per migliorarla è necessario aumentarne il numero. Infatti, con un basso numero di pixel, ciascuno di essi “copre” un'area dell'immagine troppo grande e, poiché la carica rappresenta la media dei dettagli luminosi che hanno colpito la sua superficie, la qualità dell'immagine è scadente.

Aumentando il numero dei pixel, ciascuno di essi “copre” un'area più piccola con conseguente miglioramento della qualità: pertanto, tanto più elevato è il numero di pixel, quanto migliore risulta la qualità, ovvero la risoluzione dell'immagine. Si definisce risoluzione di un'immagine digitale il numero di pixel che la compongono, espresso dal prodotto della base per l'altezza: nell'esempio di figura 7 la risoluzione dell'immagine è quindi 20×20 .

Nella figura 8 è infine mostrato un sensore CCD, in genere utilizzato nelle videocamere.

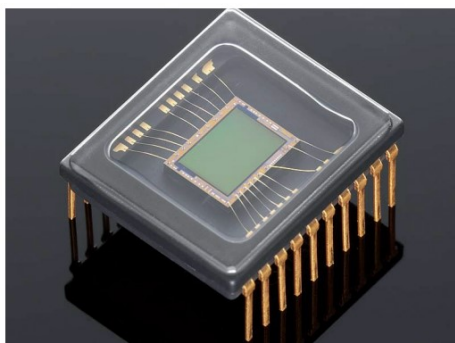


Figura 8 - Sensore CCD per videocamera

TRASDUTTORI DI IMMAGINI

1. Il suono

Il suono è una perturbazione di tipo ondulatorio (avente una determinata frequenza) che si propaga in un mezzo elastico, in grado di generare una sensazione uditiva nell'uomo, e in generale in tutti gli esseri viventi.

Non tutti i suoni sono udibili dall'uomo, ma soltanto quelli aventi frequenza compresa tra circa 20 Hz e 20 kHz; le perturbazioni che hanno frequenze inferiori a 16-20 Hz vengono dette infrasuoni, quelle di frequenza superiore a 20 kHz ultrasuoni. L'uomo genera i suoni mediante la vibrazione di due membrane, denominate **corde vocali**, che producono oscillazioni trasmesse all'aria circostante mediante la **bocca**, la quale, insieme alle **fosse nasali**, costituisce una sorta di cassa di risonanza che modula e rafforza il suono emesso.

Le vibrazioni delle corde vocali generano un moto oscillatorio che si trasmette alle molecole d'aria immediatamente vicine, le quali a loro volta entrano in oscillazione trasmettendo il moto a quelle vicine e così via: la propagazione dell'onda sonora nell'aria, e più in generale in un qualsiasi mezzo, avviene pertanto per successive trasmissioni di un moto oscillatorio.

Nel caso la direzione del moto coincida con quella della propagazione della perturbazione, l'onda sonora è detta **longitudinale**, nel caso sia ortogonale alla direzione di propagazione è denominata **trasversale**.

Negli aeriformi e nei liquidi le onde sonore sono longitudinali, nei solidi possono essere sia longitudinali sia trasversali.

Un suono è detto **semplice** o **puro** se comprende una sola frequenza, **composto** se il suo spettro è formato da più frequenze.

Nel caso di un suono composto e periodico, il contenuto spettrale è formato da una componente fondamentale, alla quale è associata la maggior parte dell'energia, e da un certo numero di armoniche aventi frequenza pari a un multiplo intero della frequenza fondamentale.

2 Trasduzione acustico-elettrica

La trasduzione acustico-elettrica, cioè la trasformazione di un suono generato da una sorgente in un segnale elettrico, viene effettuata mediante trasduttori denominati **microfoni**.

Generalmente la trasduzione acustico-elettrica è indiretta, nel senso che l'energia acustica viene prima convertita in energia meccanica mediante un organo mobile (sensore) e poi in energia elettrica.

In base al movimento dell'organo mobile i microfoni possono essere così classificati:

- microfoni a spostamento;
- microfoni a velocità.

I primi generano una tensione elettrica proporzionale allo spostamento dell'organo mobile rispetto alla posizione di riposo, e l'accoppiamento tra il sistema meccanico e quello elettrico è di natura elettrica; nei secondi, la tensione elettrica generata è proporzionale alla velocità di spostamento dell'organo mobile e l'accoppiamento meccanico-elettrico è di natura magnetica.

Alla prima categoria appartengono i microfoni a condensatore, piezoelettrici, ceramici e a transistor, alla seconda i microfoni a bobina mobile e a nastro.

Un'altra classificazione può essere fatta in base alle modalità utilizzata per la conversione acustico-meccanica, cioè:

- microfono a pressione;
- microfono a gradiente di pressione.

Nei microfoni a pressione, viene investita dalle onde sonore soltanto una faccia dell'organo mobile, in quelli a gradiente di pressione entrambe.

3. Microfoni a spostamento

3.1 Microfono a condensatore

Il microfono a condensatore, o **elettrostatico**, appartiene alla classe dei microfoni a spostamento, in quanto la tensione elettrica generata è proporzionale allo spostamento di una delle due armature di un condensatore piano.

Lo schema di principio è del tipo indicato nella figura 1.

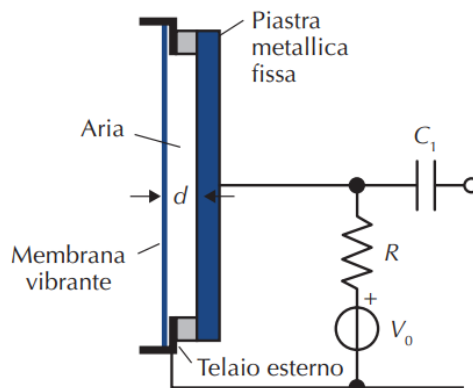


Figura 1 - Principio di funzionamento del microfono a condensatore

L'organo mobile è formato da una membrana vibrante, avente spessore compreso tra $20\div 40\text{ }\mu\text{m}$ e area S , fissata tramite due anelli su un telaio di materiale isolante a una distanza di circa $40\div 50\text{ }\mu\text{m}$ da una piastra metallica fissa, avente la stessa superficie della membrana; la membrana e la piastra costituiscono le armature di un condensatore piano, avente come dielettrico l'aria, denominato **condensatore microfonico**.

Sia la membrana vibrante sia la piastra sono collegate a un circuito di polarizzazione, costituito da un generatore di tensione continua V_0 , con in serie una resistenza R di elevato valore (per tale ragione il microfono a condensatore è anche detto polarizzato).

In condizioni di riposo, cioè di assenza di perturbazioni esterne, il condensatore microfonico viene caricato alla tensione V_0 e quindi accumula una carica Q_0 proporzionale alla sua capacità statica ($Q_0 = C_0 \cdot V_0$): la membrana rimane fissa a distanza d dalla piastra; nel caso, invece, un'onda sonora investa la membrana, viene generata una forza che la fa vibrare provocandone scostamenti rispetto alla condizione di riposo e quindi variazioni della distanza d tra membrana e piastra. Essendo la capacità di un condensatore piano direttamente proporzionale a tale distanza, secondo la relazione:

$$C = \epsilon \frac{S}{d} \quad (1)$$

si ha una corrispondente variazione ΔC della capacità rispetto al valore statico C_0 , con conseguente variazione ΔQ della quantità di carica Q_0 ; nel caso la costante di tempo RC_0 sia molto grande rispetto alle variazioni ΔC , la quantità di carica non riesce a seguire tali variazioni, e pertanto si può ipotizzare con sufficiente approssimazione che Q_0 rimanga costante (è questo il motivo per cui la resistenza R del circuito di polarizzazione deve essere di valore molto elevato).

Con questa ipotesi le variazioni di capacità ΔC si traducono in corrispondenti variazioni di tensione che si sovrappongono alla componente continua di polarizzazione V_0 , la quale, essendo filtrata dal condensatore C_I , genera all'uscita del circuito una tensione proporzionale all'intensità energetica dell'onda sonora incidente.

Essendo, inoltre, gli spostamenti della membrana provocati dall'onda incidente in genere molto piccoli (dell'ordine di qualche micron), per ottenere variazioni di capacità (e quindi variazioni della tensione d'uscita) adeguatamente apprezzabili, occorre rendere la distanza d molto piccola e impiegare elevati valori della tensione di polarizzazione V_0 . Generalmente V_0 è dell'ordine di $180 \div 200 \text{ V}$, e la capacità statica C_0 ha un valore compreso tra 200 e 400 pF ; le variazioni di capacità prodotte dall'incidenza dell'onda sonora rispetto a C_0 sono dell'ordine dello $0,01\%$.

In considerazione delle difficoltà costruttive, dovute in particolare dell'elevata tensione di polarizzazione, il microfono a condensatore viene per lo più impiegato in laboratorio come strumento per lo studio dei suoni e in altre applicazioni professionali.

3.2 Microfono piezoelettrico

Il funzionamento del microfono piezoelettrico è basato sull'effetto piezoelettrico, secondo il quale alcuni corpi cristallini, detti cristalli piezoelettrici, si polarizzano elettricamente se sottoposti a una deformazione meccanica elastica.

Nel caso la deformazione prodotta sia di natura acustica, cioè dovuta all'incidenza di un'onda sonora, viene generata una tensione che dipende dall'intensità energetica dell'onda.

L'elemento base di un microfono piezoelettrico è una piastrina di materiale piezoelettrico, sulle cui facce sono saldati due elettrodi dai quali è possibile prelevare la tensione generata (figura 2).

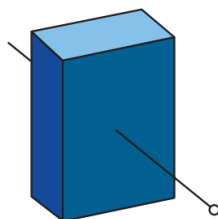


Figura 2 - Schema di principio di un microfono piezoelettrico

I vantaggi di questo microfono rispetto a quello a condensatore sono l'assenza della tensione di polarizzazione e una notevole semplicità costruttiva, in quanto è semplicemente formato da una piastrina di materiale piezoelettrico. L'azione dell'onda sonora sulla piastrina può essere diretta o indiretta: nel primo caso l'onda incide direttamente sulle facce del cristallo, nel secondo su una membrana ad esso aderente.

3.3 Microfono ceramico

Il microfono ceramico presenta caratteristiche analoghe a quelle del microfono piezoelettrico.

È infatti formato da una piastrina di materiale ceramico, nella quale le proprietà piezoelettriche vengono indotte artificialmente mediante l'azione di un campo elettrico durante la fase di preparazione del materiale.

I materiali ceramici maggiormente impiegati sono quelli al titanato di bario in quanto questo materiale, oltre al grande vantaggio di non essere influenzato dal calore e dall'umidità, presenta un'ottima curva di risposta tra i 60 Hz e i 13 kHz .

3.4 Microfono a transistor

Il microfono a transistor si basa sull'effetto piezoresistivo, tipico di alcuni cristalli come il silicio.

In questi materiali, infatti, una sollecitazione meccanica provoca deformazioni elastiche della struttura cristallina che generano variazioni della sua resistenza elettrica.

Applicando una sollecitazione acustica sulla superficie esterna dell'emettitore di un transistor, vengono generate deformazioni elastiche che provocano una variazione della corrente di collettore proporzionale all'intensità energetica dell'onda incidente, la quale genera ai capi della resistenza di collettore una variazione di tensione anch'essa proporzionale all'intensità dell'onda incidente.

La pressione acustica viene esercitata su una punta di zaffiro o di diamante (del diametro di $50\text{ }\mu\text{m}$), direttamente connessa alla superficie dell'emettitore.

4. Microfoni a velocità

4.1 Microfono a bobina mobile

Il microfono a bobina mobile, o dinamico, appartiene alla classe dei microfoni a velocità, in quanto la tensione elettrica che genera è proporzionale alla velocità di spostamento dell'organo mobile (in questo caso una bobina mobile).

Fondamentalmente è formato da una bobina avvolta su un supporto cilindrico, rigidamente connessa a una membrana metallica a forma di cupola (figura 3).

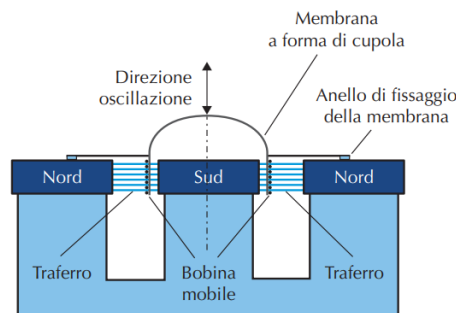


Figura 3 - Schema di principio di un microfono a bobina mobile

La bobina è immersa in un traferro cilindrico, sede di un campo magnetico radiale prodotto da un magnete permanente a forma di corona circolare.

Un'onda sonora che incide sulla membrana trasmette a quest'ultima un moto vibrazionale che fa oscillare assialmente la bobina, inducendo sulle spire che tagliano le linee di forza del campo magnetico una tensione con andamento temporale uguale a quello dell'onda sonora incidente sulla membrana (legge dell'induzione elettromagnetica).

Essendo in questo caso il campo magnetico prodotto da un magnete permanente, il microfono è detto **magnetodinamico**; se invece il campo è generato da una corrente elettrica continua è denominato **elettrodinamico**.

4.2 Microfono a nastro

Nel microfono a nastro l'organo mobile è una sottile lamina di materiale conduttore avente larghezza compresa tra 3 e 5 mm , lunghezza variabile tra 5 e 6 cm e spessore dell'ordine del centesimo di mm .

Tale lamina, tramite un apposito sistema di bloccaggio, è immersa in un campo magnetico generato da due espansioni polari permanenti, in modo tale che risulti parallela alle linee di forza magnetiche, come mostrato nella figura 4.

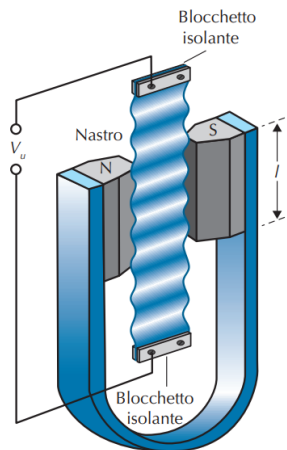


Figura 4 - Schema di principio di un microfono a nastro

Un'onda sonora che incide sul nastro genera una forza che lo fa vibrare perpendicolarmente alle linee di forza del campo magnetico, per cui il nastro diventa sede di una tensione indotta che riproduce nel tempo l'andamento dell'onda incidente.

Dalla figura 4 si può osservare che il nastro non è liscio, ma corrugato allo scopo sia di aumentare la resistenza meccanica trasversale sia di rendere il nastro più cedevole, in modo da aumentarne la sensibilità alla pressione acustica.

Essendo entrambe le facce del nastro interessate al campo sonoro, tale microfono è del tipo a gradiente di pressione.