



Marco Russi

**Dispositivi e tecnologie per microsistemi
Politecnico di Torino**

MEMS for data storage

Optical data storage



Optical data storage

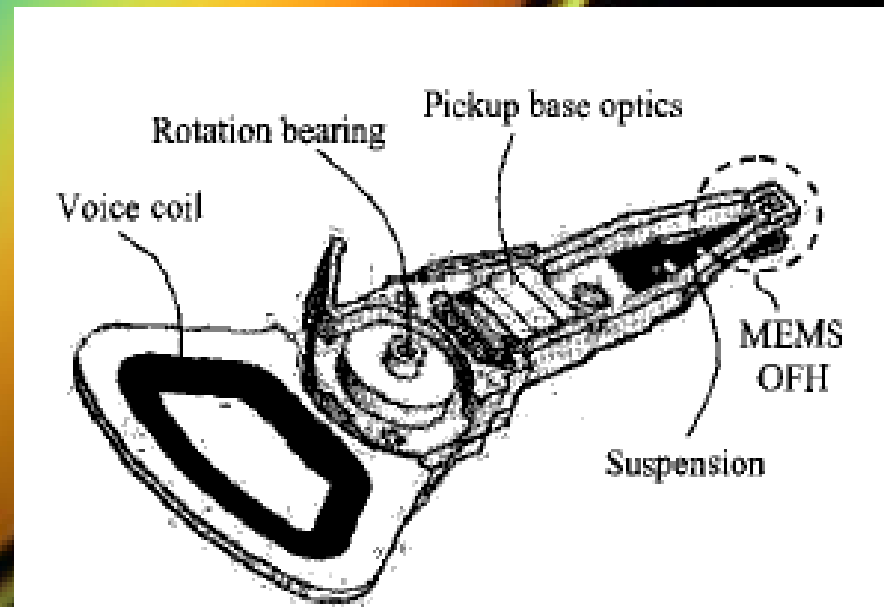
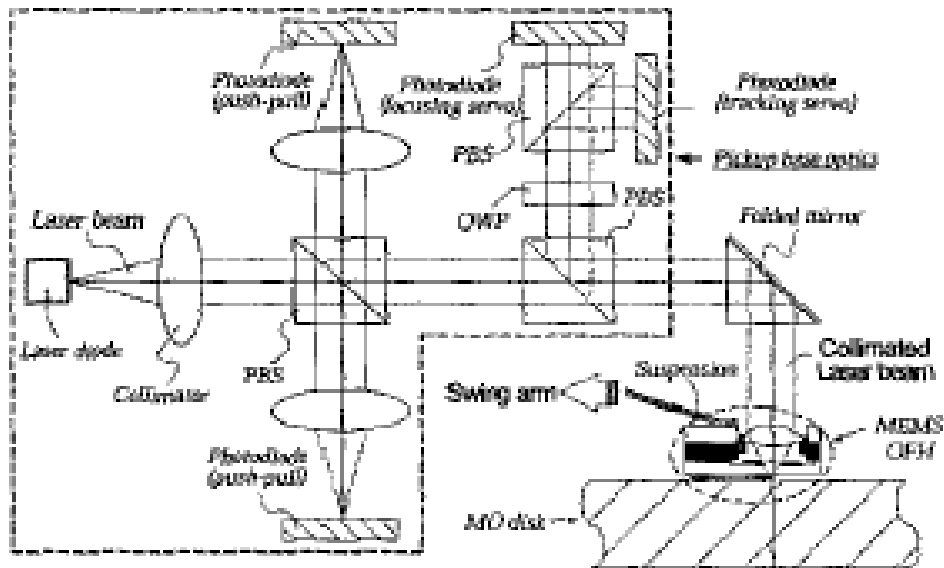
Consistono in uno o più pickup che scrivono e leggono su un supporto ottico tramite un fascio laser.

I componenti ottici convenzionali sono troppo voluminosi per essere ulteriormente miniaturizzati. Si è passati quindi alle tecnologie MEMS.

Il modulo pickup è diviso in due unità: Optical Flying Head (OFH)

Realizzato con microcomponenti ottici tra cui microlenti, microattuatori, microspecchi e micro-coil nel caso di sistemi magneto-ottici.

Basic Optical Unit (BOU)

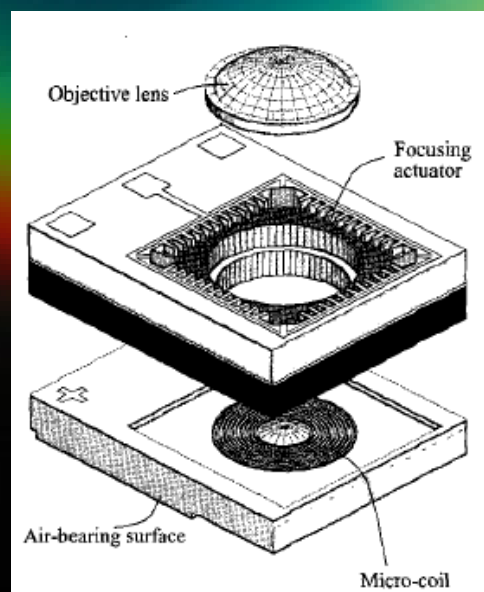


Optical Flying Head (OFH) per un dispositivo magneto-ottico

Principio di funzionamento:

Un microinduttore produce il campo magnetico necessario a cambiare la direzione del dipolo magnetico sul supporto ferromagnetico.

La lente emisferica al centro dell'induttore incrementa il raggio di apertura del fascio laser assieme all'obiettivo. Il valore del raggio di apertura detto NA (dall'inglese numerical aperture) determina, assieme alla lunghezza d'onda della sorgente luminosa, la densità di area dei dati immagazzinati. Se consideriamo d la minima lunghezza di un bit e λ la lunghezza d'onda otteniamo:



$$d = \frac{\lambda}{2 \cdot NA}$$

Optical Flying Head (OFH) per un dispositivo magneto-ottico

Per ottenere quindi una piccola dimensione di bit, e quindi una maggiore capacità di memoria, bisogna diminuire la lunghezza d'onda del fascio di luce e aumentare NA.

Per fare ciò si passa ad una luce di colore blu e si costruiscono delle lenti di obiettivo con un alto indice di rifrazione o si aggiunge un'ulteriore lente di fuoco.

L'attuatore di messa a fuoco ha la funzione di mantenere costantemente la lente di obiettivo nella posizione ottimale. Infatti il raggio laser deve rimanere sul disco nel suo punto focale.

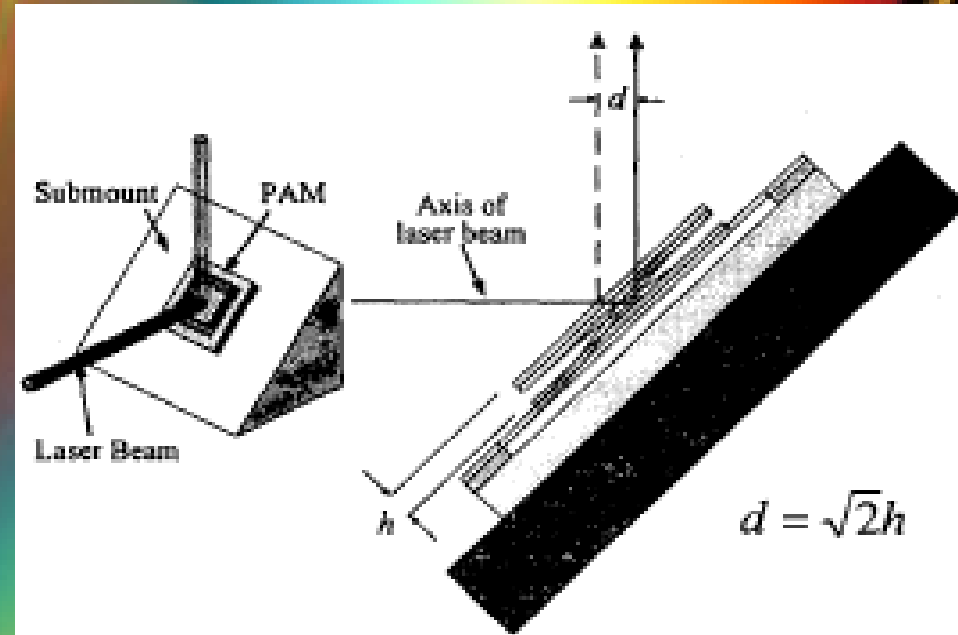
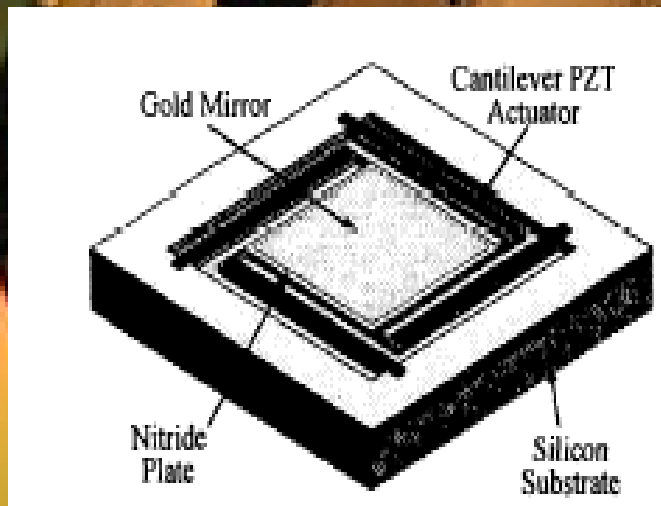
La superficie di *air-bearing* permette all'OFH di rimanere costantemente in levitazione aerodinamica sopra al disco ad una distanza sub-micrometrica.

Fabbricazione di un microspecchio

Si tratta di un microspecchio attuato da cantilever piezoelettrici. La sua funzione è quella di alterare la traiettoria del fascio laser attraverso la sua rotazione o traslazione. Il movimento sui due assi può essere applicato per compensare l'inclinazione del fascio laser dalla base ottica dovuta ad errori di assemblaggio.

Il micromirror è costituito da 4 cantilever identici dislocati simmetricamente attorno ad una superficie ricoperta di un materiale riflettente (in genere oro). Quattro cardini collegano ogni cantilever con lo specchio. L'ossatura di base con la quale sono stati costruiti sia i cantilever che lo specchio è nitruro di silicio spesso 2 μ m.

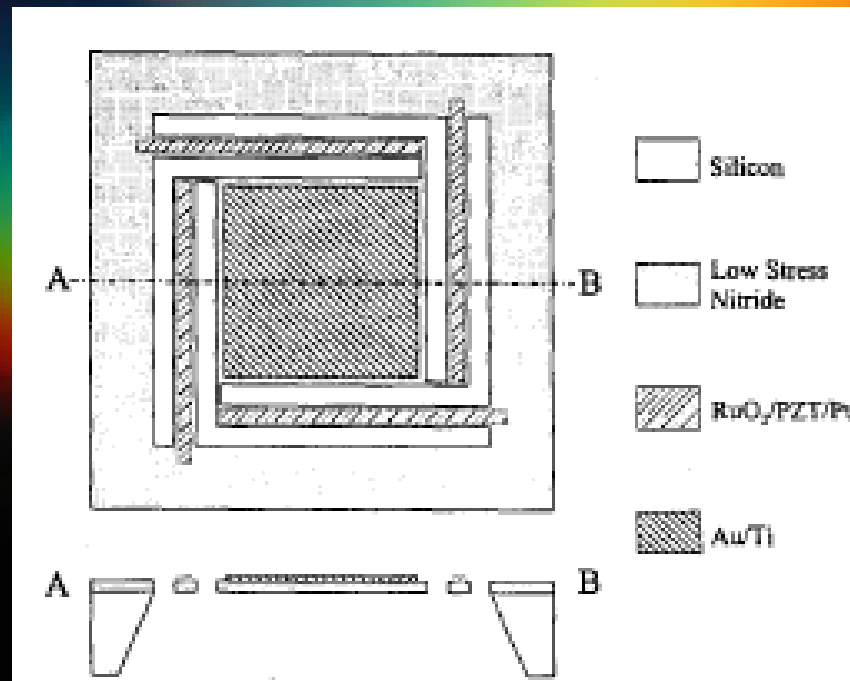
Fabbricazione di un microspecchio



I cantilever piezoelettrici sono dei *sandwich* di *metal/PZT/metal* sovrapposti al nitruro. Quando si applica una tensione ai capi dei due elettrodi l'effetto piezoelettrico fa inclinare il cantilever.

Fabbricazione di un microspecchio

Ogni cardine è largo 10 μm mentre lo specchio dista 100 μm dal supporto quadrato. Il substrato ha subito un'operazione di *bulk micromachining* ed i bordi permettono l'ancoraggio dei cantilever. Questi ultimi sono larghi 50 μm e la lunghezza dipende dalle dimensioni dello specchio. Ad esempio con uno specchio di 250x250 μm^2 si hanno cantilever di 230 μm mentre con 500x500 μm^2 si arriva a 355 μm . Lo spessore dei cantilever è di 3600 \AA . Per limitare le correnti di perdita ed evitare di compromettere le proprietà meccaniche dei cantilever, gli elettrodi sono formati da due sottilissimi strati di platino (sotto) e ossido di rutenio (sopra).



Fabbricazione di un microspecchio

Fabbricazione dei *metal/PZT/metal* tramite metodo *sol-gel*:

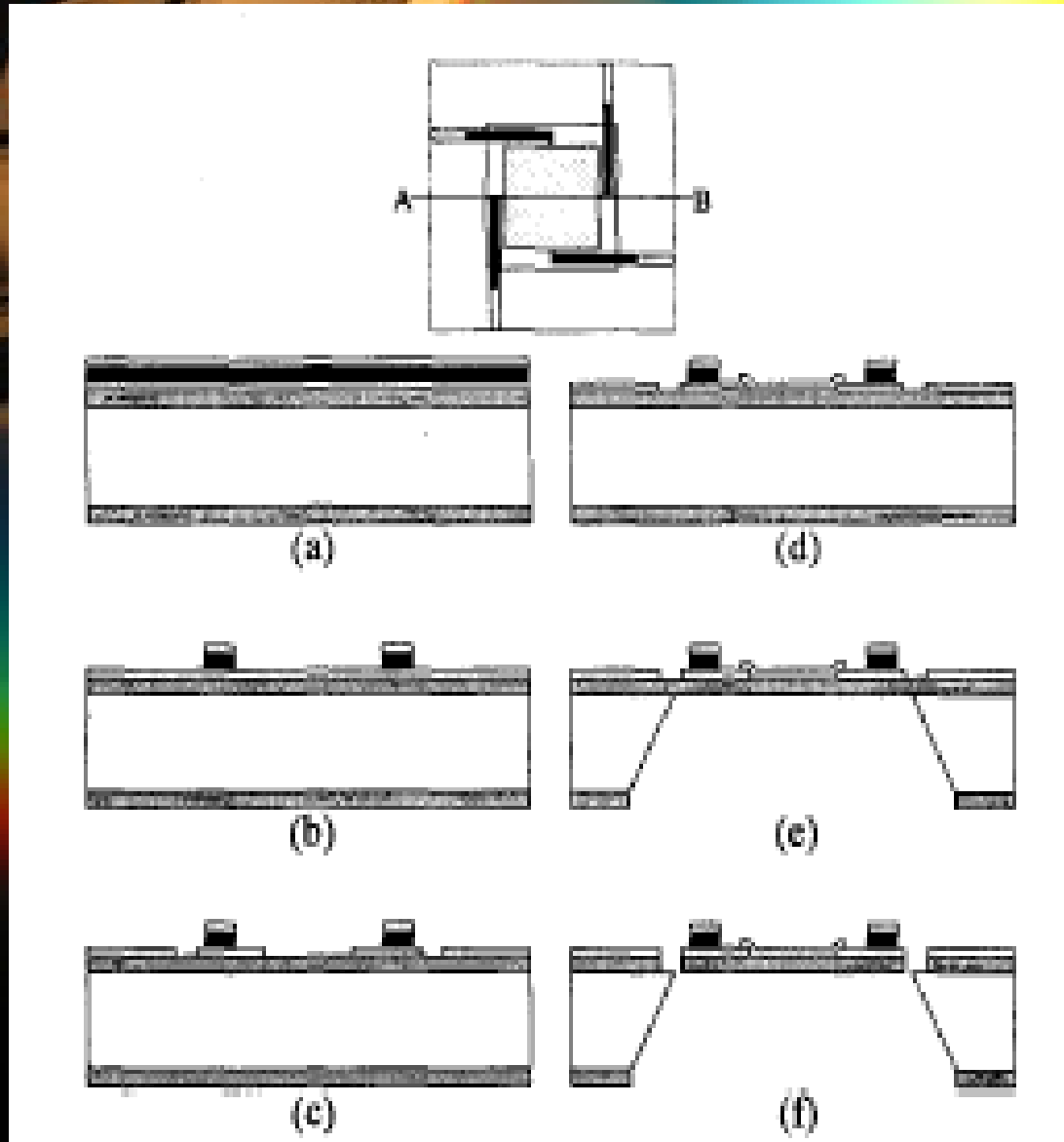
- 1) Deposizione del platino tramite *sputtering*
- 2) Formazione del materiale PZT in quattro rivestimenti e solidificazioni termiche. Dopodiché il film così depositato viene sottoposto ad un *anealing* di 1 minuto a 650°C.
- 3) Deposizione dell'ossido di rutenio tramite *sputtering* a 300°C.
- 4) Etching dei due strati superiori con una maschera comune tramite RIE.
- 5) Etching dello strato inferiore (platino) con una maschera opportuna tramite RIE.
- 6) *Anealing* a 650°C per un minuto.

Fabbricazione di un microspecchio

Processo di fabbricazione:

- 1) LPCVD di nitruro di silicio spesso 2um.
- 2) *Sputtering* di platino (1500A).
- 3) 3600A di PZT tramite metodo *sol-gel*.
- 4) *Sputtering* di ossido di rutenio (1500A).
- 5) Definizione della struttura *metal/PZT/metal* tramite RIE con Cl_2O_2 .
- 6) Depositazione dell'oro e rimozione del silicio sottostante tramite etching anisotropico di KOH acqueo.
- 7) Rilascio dello specchio tramite RIE sul lato frontale e *dicing* in singoli chip

Fabbricazione di un microspecchio





Marco Russi

**Dispositivi e tecnologie per microsistemi
Politecnico di Torino**

MEMS for data storage

Ferroelectric probe storage

Ferroelectric probe storage

L'idea è quella di memorizzare le informazioni su di un supporto ferroelettrico tramite un elettrodo montato su di una sonda. In questo modo la lunghezza di bit dipende dalla velocità di scansione della sonda e dal *data-rate* ma non dalla lunghezza dell'elettrodo. Quest'ultimo risulterebbe quindi meno critico da fabbricare a differenza della punta di un sistema AFM dove le sue dimensioni stabiliscono le dimensioni di bit.

Le memorie ferroelettriche hanno inoltre il vantaggio di essere molto stabili termicamente e di aver bisogno di basse tensioni per la scrittura.

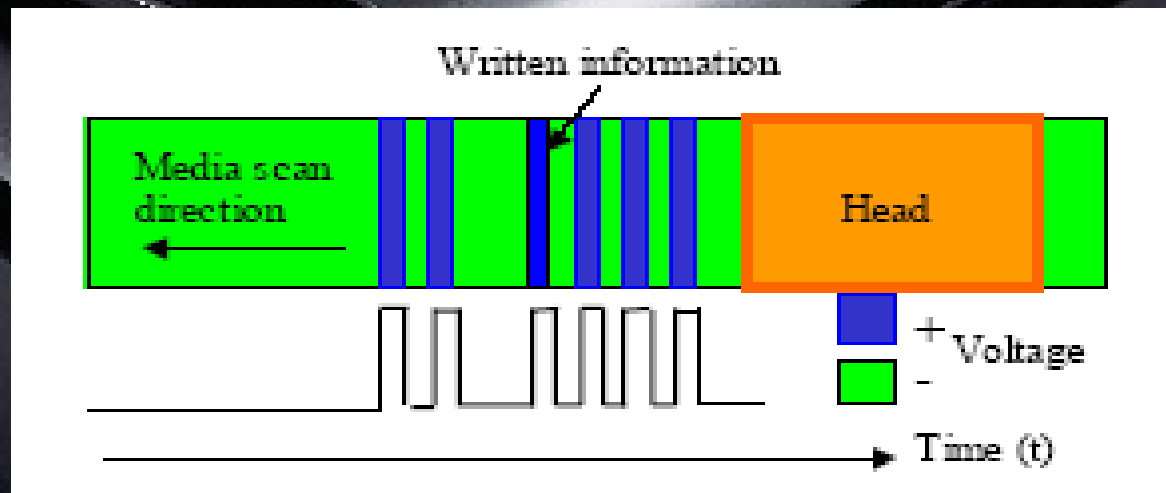
Segue un esperimento della Seagate Technology e pubblicato su IEEE nel 2008.

Ferroelectric probe storage

Principio di funzionamento (scrittura):

Su un supporto ricoperto da un sottile strato di materiale ferroelettrico, con polarizzazione verticale, viene fatta scorrere una sonda che definisce la polarità di un'area (area di bit) tramite una tensione applicata tra la sonda ed il supporto.

La dimensione del bit è determinata dalla velocità con cui la tensione cambia di polarità (fronte di salita e discesa) e dalla velocità di scansione della sonda ma non dalla dimensione dell'elettrodo.



Ferroelectric probe storage

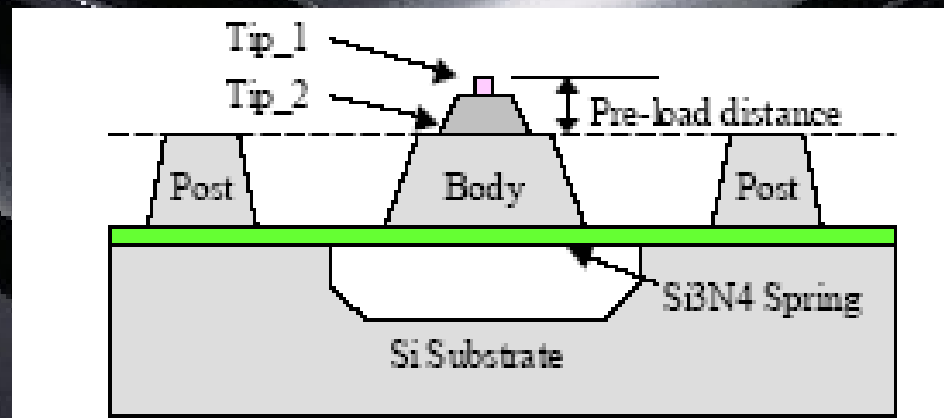
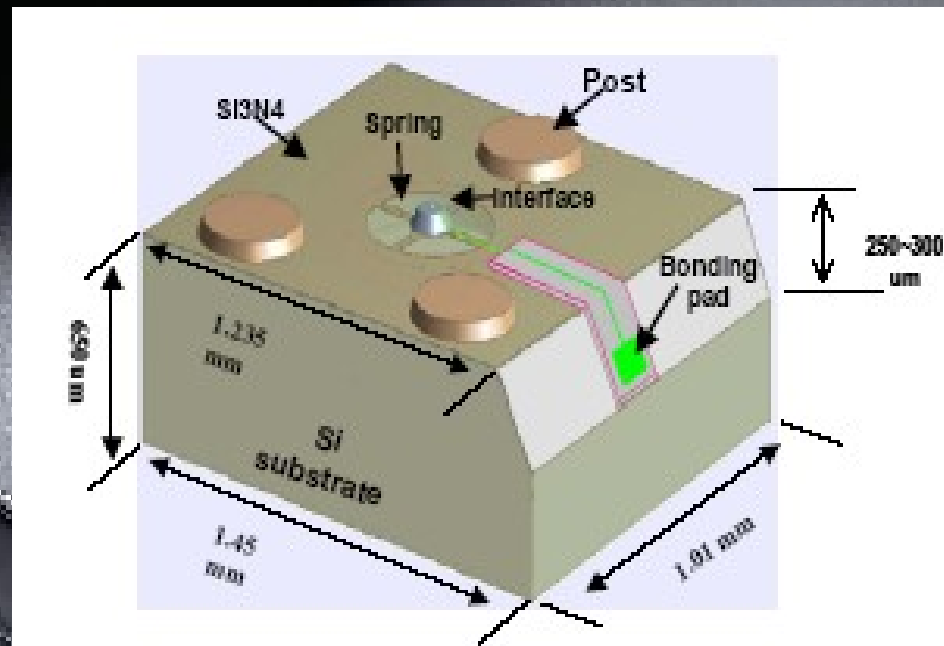
Le specifiche di progetto sono le seguenti:

- 1) forza di contatto**
- 2) resistenza all'usura**
- 3) basso costo**
- 4) estendibile ad una matrice di elettrodi**
- 5) integrazione con una sonda**

Anche se le dimensioni dell'elettrodo con influenzano quelle di bit è comunque meglio farlo il più piccolo possibile, compresa l'altezza.

Si opta quindi per una elettrodo fatto in rutenio inserito in una punta più larga. L'insieme è montato su un corpo che appoggia al substrato tramite delle molle. Per controllare la deflessione e quindi la forza di contatto ci sono 3 o 4 colonnine sul substrato che poggiano sul supporto ferroelettrico.

Ferroelectric probe storage



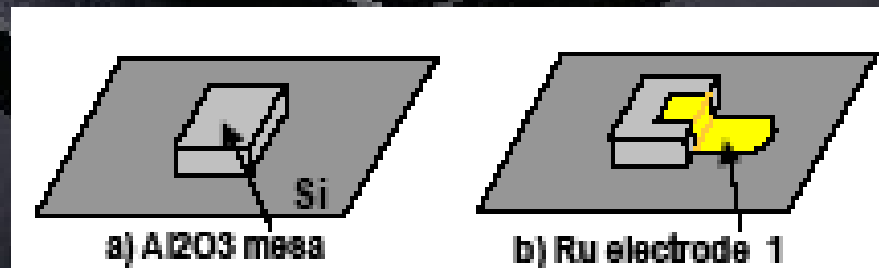
Ferroelectric probe storage

Fabbricazione dell'elettrodo

Il substrato di partenza acquistato commercialmente ha uno strato di silicio spesso 10 – 15 μm sopra un sottile strato (1 μm) di Si_3N_4 depositato tramite LPCVD. Questo nitruro servirà a fare le molle. Per la punta sono stati scelti Al_2O_3 e rutenio per la loro durezza e la facile reperibilità in laboratorio.

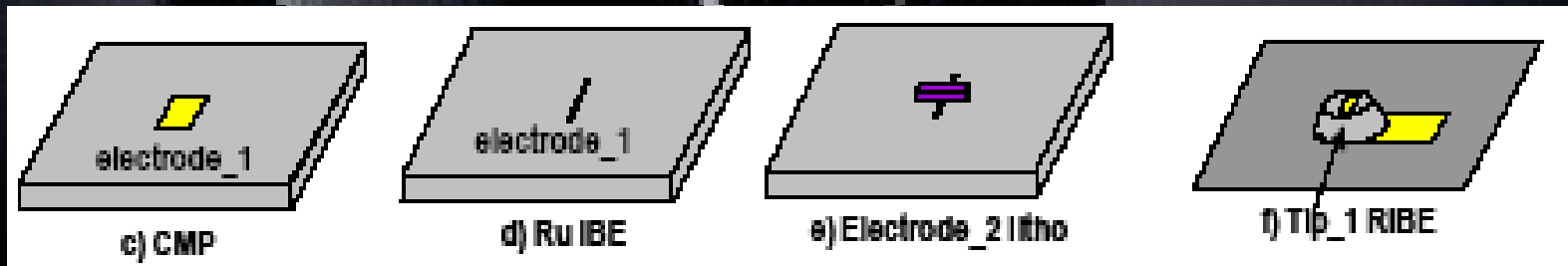
a) Deposizione di 1 μm di Al_2O_3 e definizione con litografia e RBE a base di CHF_3 .

b) Deposizione di 100nm di Ru tramite sputtering e definizione con litografia e Ar IBE su un lato dell'altopiano.



Ferroelectric probe storage

- c) Riempimento e CMP. Quest'ultimo fermato sulla faccia superiore del rutenio.
- d) *Etching* con IBE in modo da lasciare $100\text{nm} \times 1\mu\text{m}$ di rutenio.
- e) Una seconda litografia seguita da un IBE definisce la dimensione finale dell'elettrodo pari a $100\text{nm} \times 300\text{nm}$.
- f) Ennesimo riempimento e CMP. Quest'ultimo va controllato nuovamente con attenzione in modo da creare una leggera sporgenza di Ru ($25 - 50\text{nm}$) in modo da agevolare il contatto con il supporto. Litografia ed etching finale. Il diametro finale dell'intera punta varia da 1 a $3\mu\text{m}$.



Ferroelectric probe storage

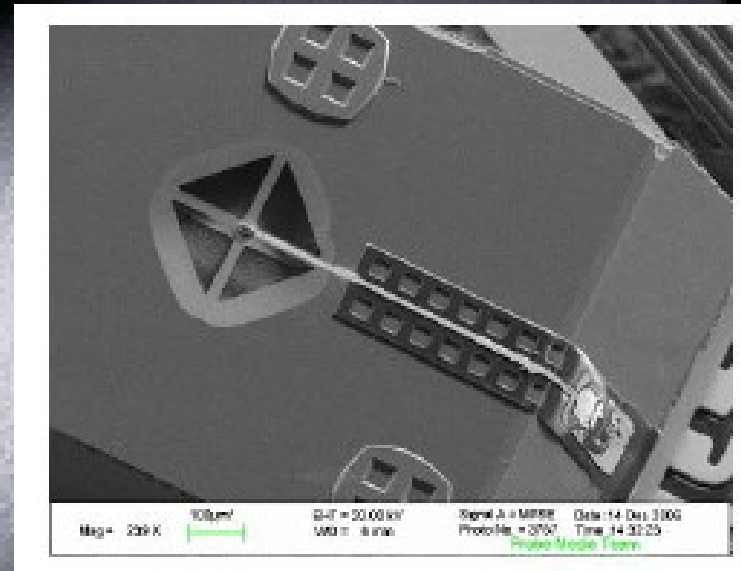
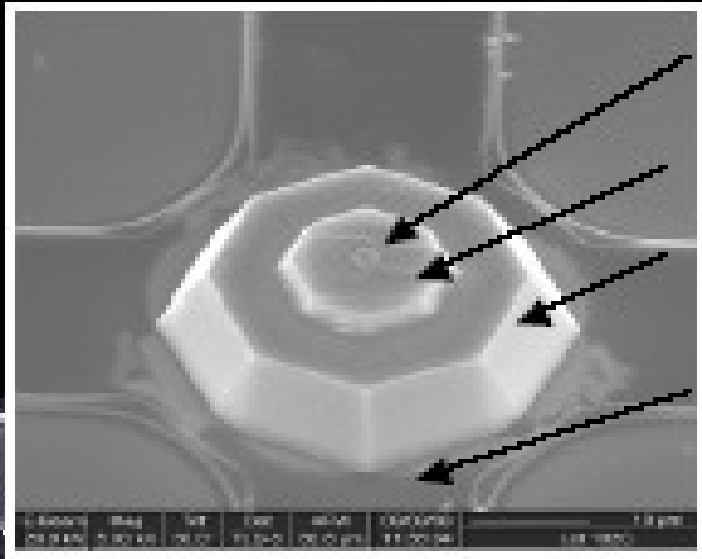


La seconda punta, sulla quale poggia la prima, viene fatta tramite *etching* del Si in 25% TMAH a 70°C.

Il corpo ed i “distanziatori”, che decidono la distanza tra la sonda ed il supporto, vengono successivamente creati con *etching* in TMAH che si ferma automaticamente al livello del nitruro.

Le molle di nitruro vengono realizzate tramite IBE.

Ferroelectric probe storage



Il silicio sotto alle molle di nitruro viene tolto attraverso un *etching* profondo per 250um.

Il *wire-bonding* dell'elettrodo non può essere fatto sulla punta per via del poco spazio. Si usa quindi un pad sul substrato.

Il collegamento tra il pad e l'elettrodo è stato realizzato in Ta/Au e per ridurre le capacità parassite si è interposto tra il substrato ed il filo del materiale con bassa costante dielettrica, SU-8, facile da definire.

Ferroelectric probe storage

Risultati.

La minor dimensione di bit ottenuta è di 51 (passo minimo) X 22 (lunghezza) nm.

Usando il metodo di lettura sopra citato si è misurata una densità di 500GB/in² .

La densità di memoria è del tutto paragonabile con quella di altre tecnologie sperimentali come AFM.

Bisogna però notare che nell'esperimento si è utilizzata una tensione di 8V per la fase di scrittura.



Marco Russi

**Dispositivi e tecnologie per microsistemi
Politecnico di Torino**

MEMS for data storage

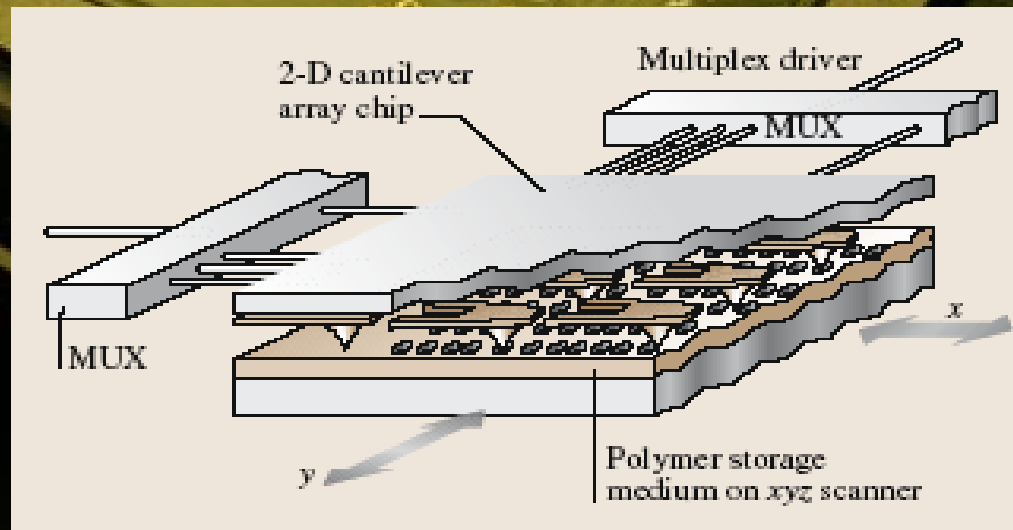
Il Millipede

MILLIPEDE_LT0118-1
Chip Interface PCB for
16M Zurich Research
ELS/Jac 2001



Il Millipede

Si tratta di una ricerca dei laboratori IBM di Zurigo. L'informazione viene memorizzata come sequenza di indentazioni o non indentazioni su di uno strato di polimero usando una matrice di cantilevers. Ogni cantilever lavora su una specifica zona ed è delimitata dallo spostamento x/y dell'intera matrice o del supporto del polimero. Il contatto con la punta di ogni cantilever è assicurato da un movimento nell'asse z. Ogni cantilever viene indirizzato secondo un indirizzamento riga/colonna come avviene nelle classiche memorie DRAM.





Il Millipede

Principio di funzionamento:

Il procedimento di scrittura prende il nome di “scrittura termomeccanica”.

Consiste nell'applicare una forza sul polimero tramite il cantilever e simultaneamente scaldarne la punta.

La temperatura necessaria all'ammorbidimento del polimero si aggira attorno ai 400°C; la successiva pressione definisce la dimensione finale dell'indentazione.

Il problema è che a causa della non linearità del meccanismo di trasferimento di calore è difficile ottenere una piccola dimensione di bit e riprodurla ad ogni scrittura. In più la punta del cantilever più penetra in profondità e più aumenta la dimensione del bit.

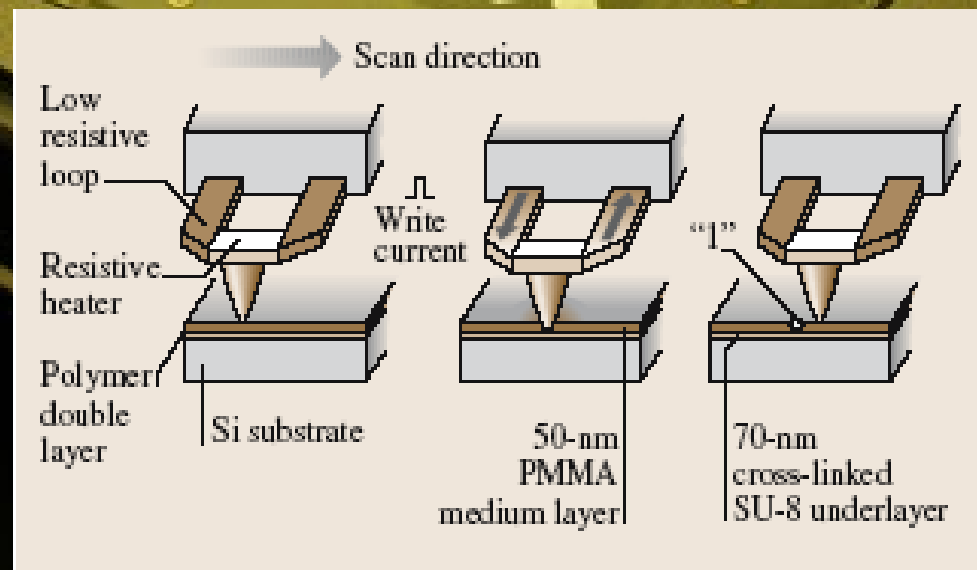
MILLIPEDE_L1T018-1
Chip Interface PCB
16M Zurich Research for
EL9/Jac
2004



Il Millipede

Soluzione:

Si deposita un sottilissimo strato di polimero sopra ad un substrato di silicio. In questo modo si limita la penetrazione della punta (il silicio non viene penetrato) e si aumenta notevolmente il trasferimento di calore (vista la maggior conducibilità termica del silicio rispetto al polimero). Per ridurre l'usura della punta dovuta al contatto col silicio si interpone tra polimero e silicio un sottile strato di fotoresist (SU-8) per attutire il “colpo” della punta pur mantenendo la stabilità termica.





Il Millipede

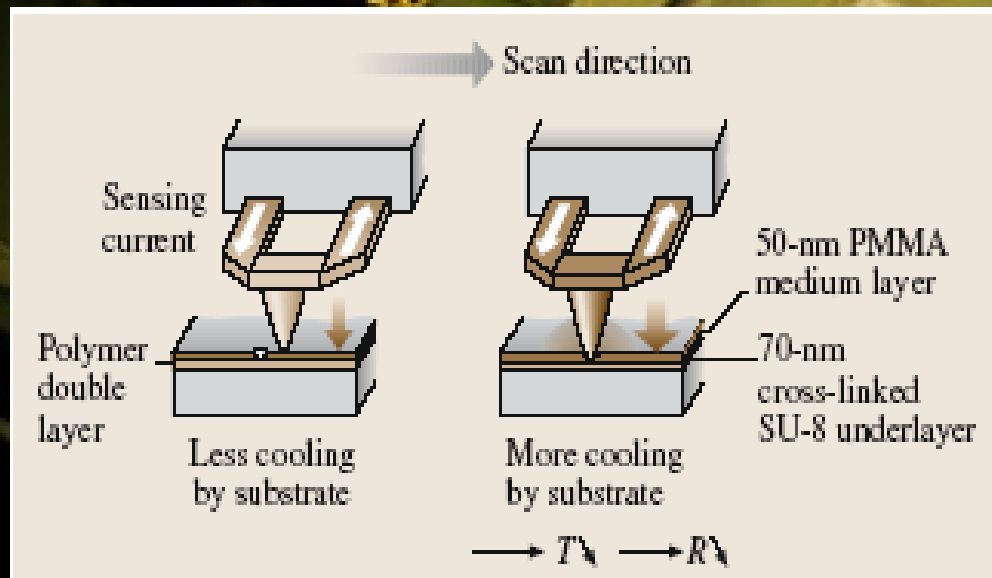
Lettura:

Il cantilever viene utilizzato come sensore di readback sfruttando la sua proprietà di termoresistenza. Più precisamente la resistenza è direttamente proporzionale alla temperatura.

La punta, una volta scaldata ad una temperatura insufficiente ad ammorbidire il polimero (350°C), viene fatta “strisciare” su di esso e quindi sulle relative indentazioni precedentemente memorizzate. Il calore si propaga molto lentamente sul polimero (no indentazione) mentre quando la punta si muove nell'indentazione il calore si propaga rapidamente sul substrato di silicio e fotoresist causando una brusca diminuzione della temperatura e quindi una diminuzione della resistenza.



Il Millipede



Ne consegue che la resistenza del cantilever varierà in corrispondenza di un "1" (indentazione) o di uno "0" (no indentazione). Misurando questa resistenza si può leggere quindi l'informazione memorizzata.

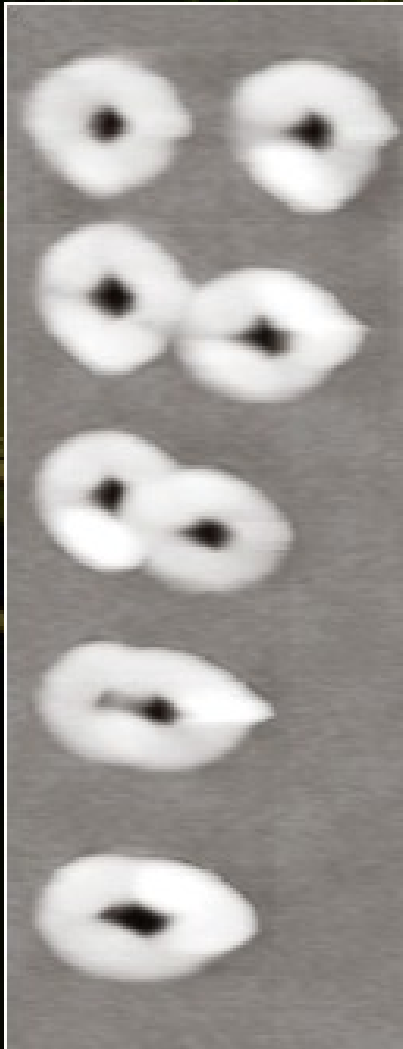
MILLIPEDE_LTO18-1000
Chip Interface PCB for
16M Zurich Research for
EL9/Jac 2004

Il Millipede

Cancellazione:

Il procedimento di cancellazione sfrutta il meccanismo della mutua interferenza tra indentazioni del polimero. Se infatti si effettuano sul polimero due indentazioni al di sotto di una certa distanza, si ottiene una “unione” delle due in una sola.

Per cancellare dell'informazione in una certa zona del supporto si indenta ripetutamente a distanza ravvicinata.



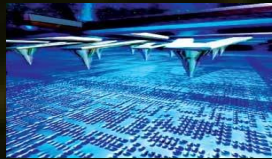
MILLIPEDE_L1T018-1
Chip Interface PCB
16M Zurich Research for
ELS/Jac
2004



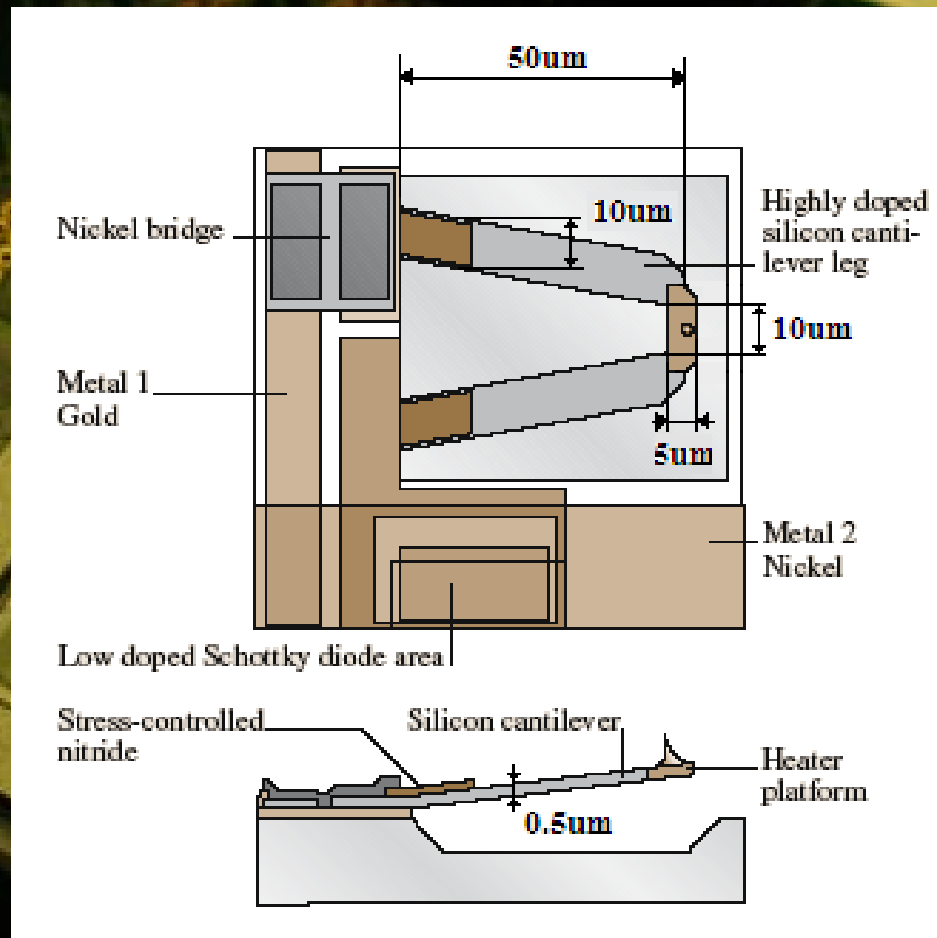
Il Millipede

Fabbricazione:

Per dare un esempio si può citare un dispositivo realizzato dai laboratori della IBM. Il chip è un quadrato di $3 \times 3 \text{ mm}^2$ dove risiedono 1024 cantilevers ognuno di area pari a $92 \times 92 \text{ um}^2$. I cantilevers sono strutturati in un riscaldatore con una punta, due gambe con molle per ammortizzare meccanicamente la struttura e le connessioni elettriche per il riscaldatore. Queste ultime sono realizzate in silicio altamente drogato per evitare di usare connessioni metalliche che potrebbero dare problemi di elettromigrazione. Il rapporto di resistenza tra il riscaldatore e le gambe deve essere il più elevato possibile. Per questo motivo si droga pesantemente le gambe in modo da aumentare la conducibilità (400 Ohm per le gambe e 5K Ohm per il riscaldatore).



Il Millipede

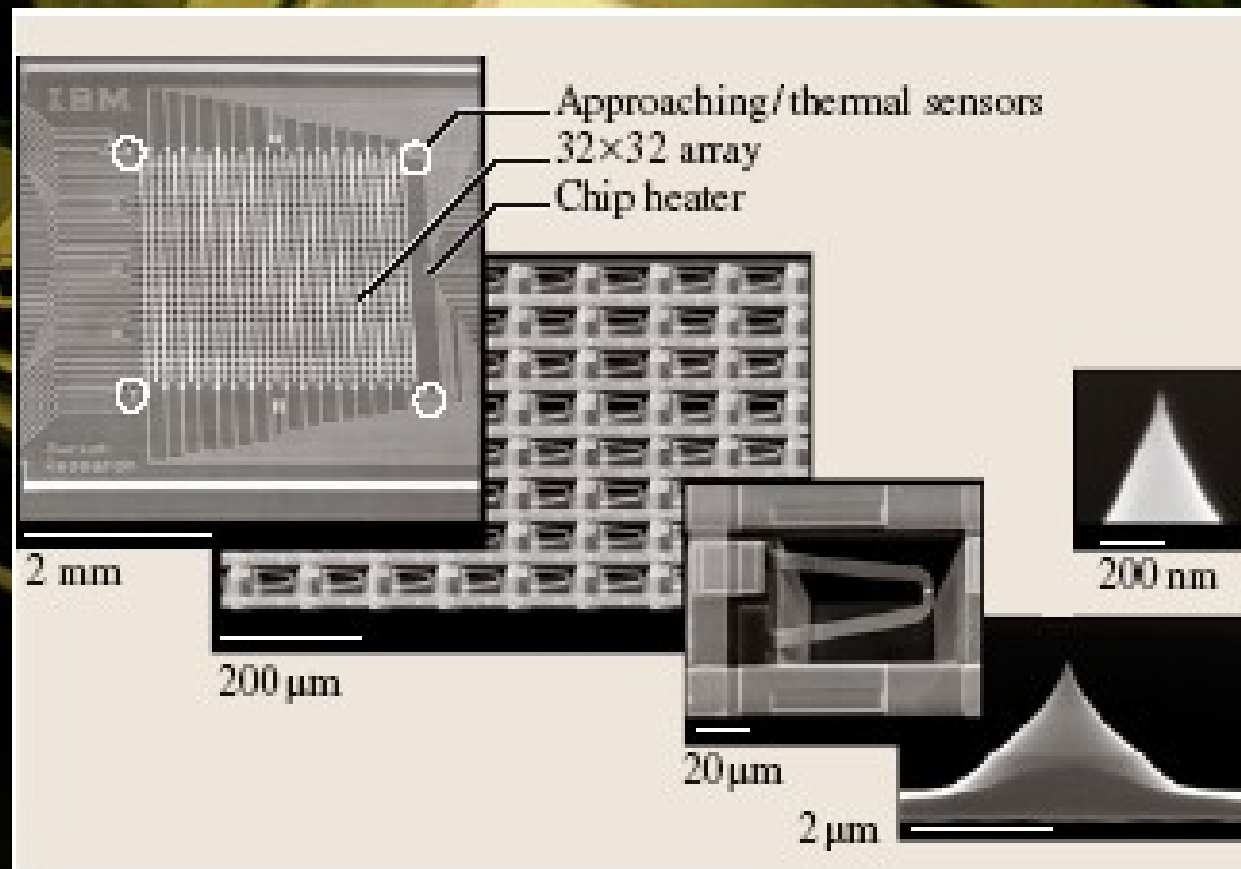


La leggera sporgenza è realizzata tramite PECVD di nitruro di silicio con stress controllato alla base dei cantilevers.



Il Millipede

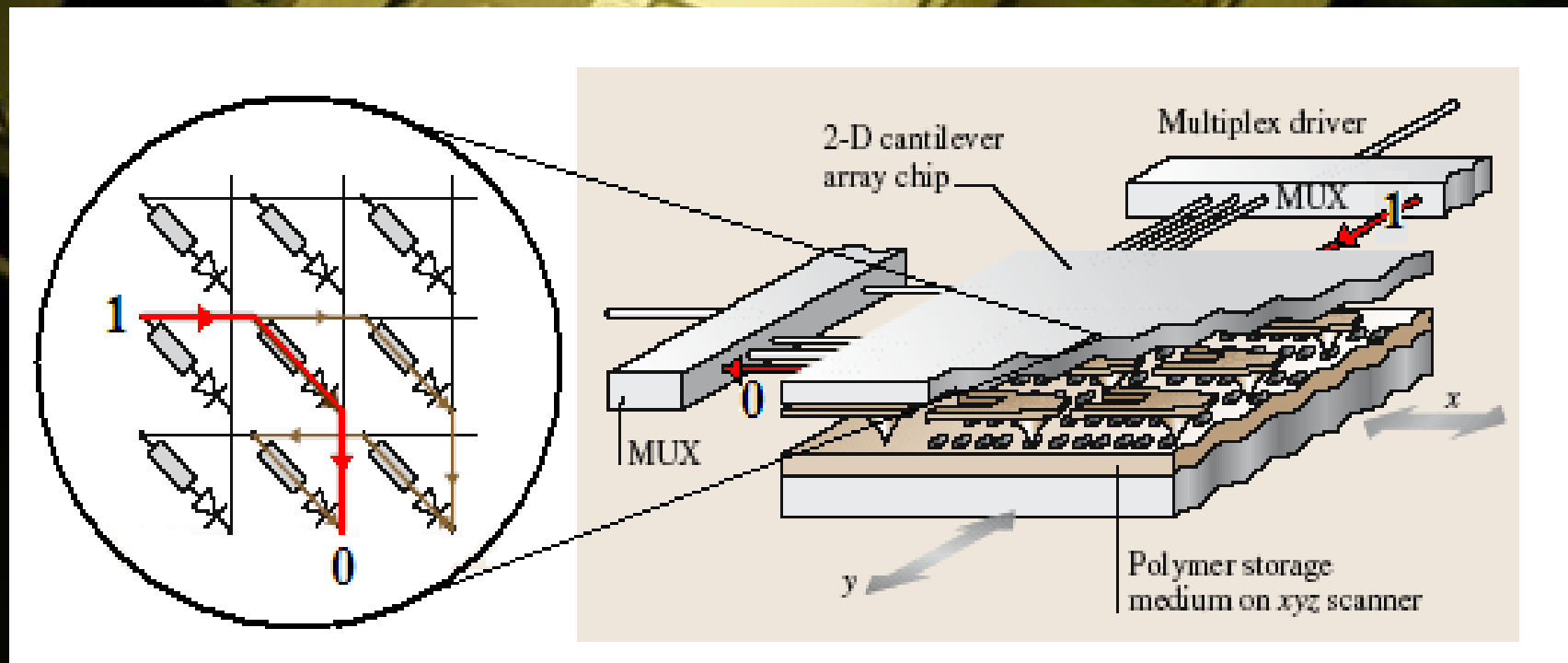
La matrice di cantilevers è realizzata con *micromachining* con *wet chemical etching* per formare la cavità sottostante. Le punte sono alte 1.7 μm , la base ha un raggio di 20nm e si ottengono con “ossidazione appuntita”.





Il Millipede

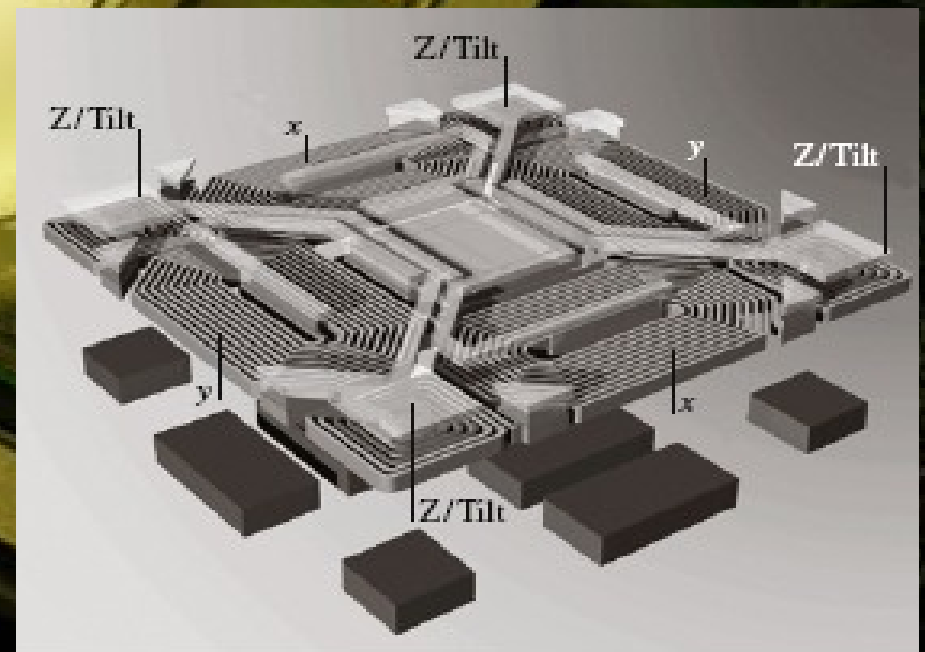
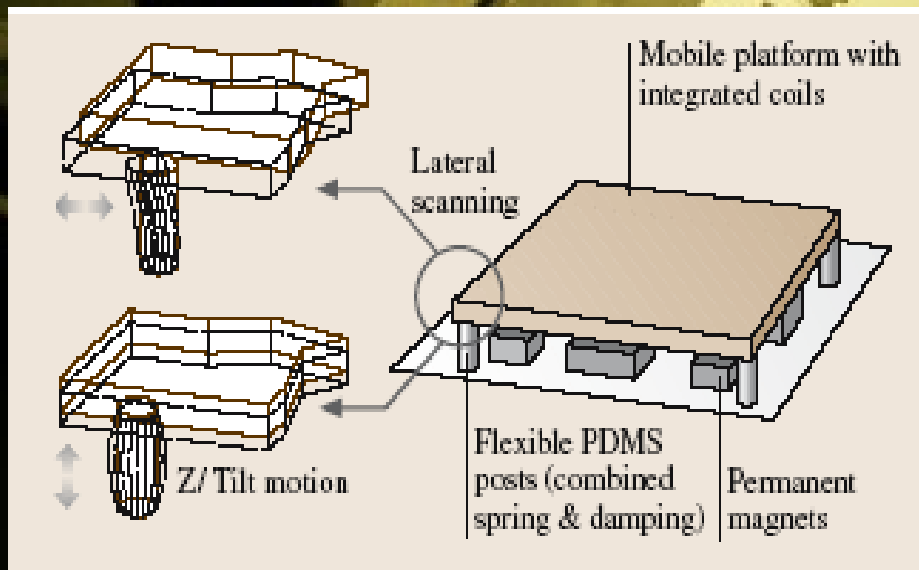
I cantilevers sono connessi alle linee di riga e colonna tramite un diodo Schottky che lavora in polarizzazione inversa (alta resistenza) quando il proprio cantilever non è indirizzato mentre si polarizza direttamente (corto circuito) al corretto indirizzamento. Si crea così un circuito che una volta chiuso fa passare corrente nel riscaldatore.





Il Millipede

Come detto all'inizio il supporto con il polimero si muove nelle direzioni x/y . Per realizzarlo si usa un micromotore lineare a magneti permanenti. Il supporto si trova su di una piattaforma mobile con degli induttori integrati che poggia sui magneti permanenti. La mobilità è garantita da dei supporti in gomma che sono in grado di flettersi (x/y) e comprimersi (z).

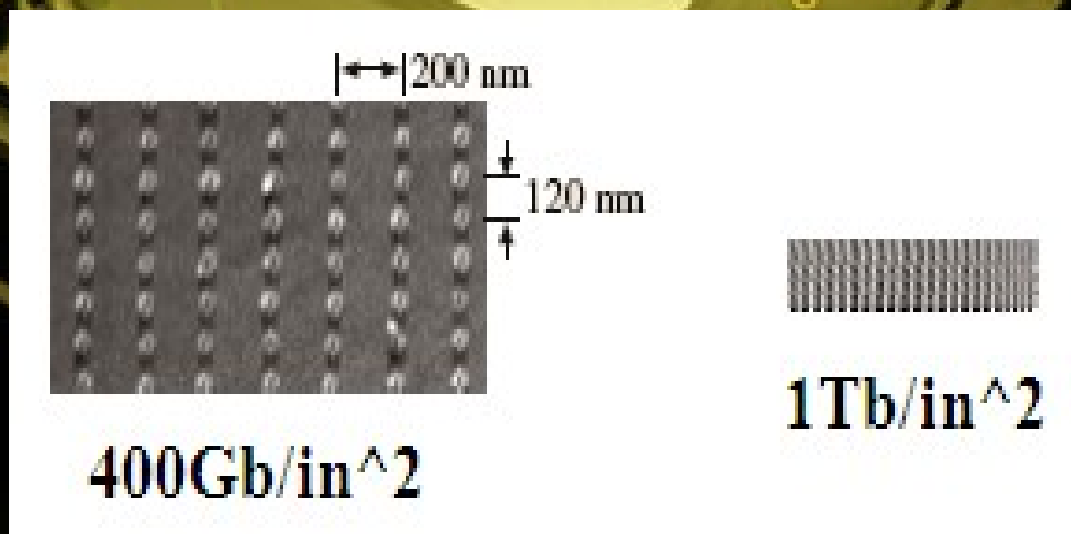




Il Millipede

Conclusioni e risultati:

Come test del sistema è stata applicata una serie di impulsi di $2\mu\text{s}$ ciascuno con un periodo di $50\mu\text{s}$. Una matrice di 256 cantilevers può arrivare ad un data-rate di 34Mb/s . Si è ottenuto un bit di 40nm di diametro ed una distanza di 120nm tra i bits. La densità di bit è pari a 400Gb/in^2 . Se invece si riduce lo spazio tra i bits fino a 25nm si può arrivare ad una densità di 1Tb/in^2 .





Il Millipede

Sono state sperimentate altre versioni del millipede, ognuna intenta a migliorare o semplificare la versione della IBM. Segue una breve descrizione del sistema realizzato dal Data Storage Institute di Singapore.

L'idea è quella di ridurre il numero di cantilevers da fabbricare. Invece di una matrice 2D come quella del millipede si è pensato di fare una fila (1D). Per coprire l'intera area si fa scorrere la fila di cantilevers sull'intero supporto tramite un micromotore lineare. Anche qui ogni cantilever gestisce un settore delimitato dal movimento x/y del supporto grazie a degli attuatori lineari a pettine sui lati del supporto.

MILLIPEDE-LT018-1000
Chip Interface PCB
IBM Zurich Research Center
CLS/Jac
2004