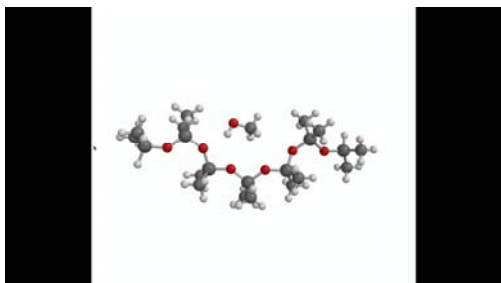
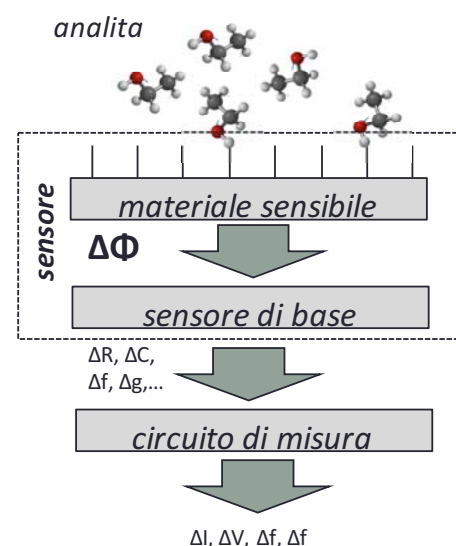


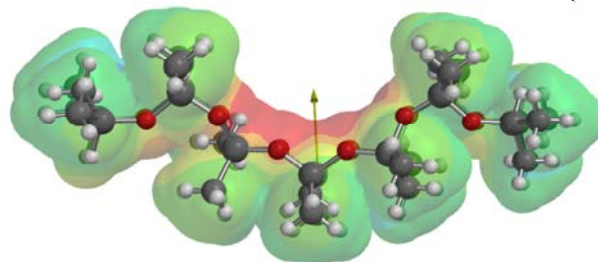
1: POTENZIALE DI CONTATTO

- Funzione Lavoro
- Kelvin Probe
- ChemFET
 - Metalli catalitici
 - Suspended gate

Potenziale di superficie



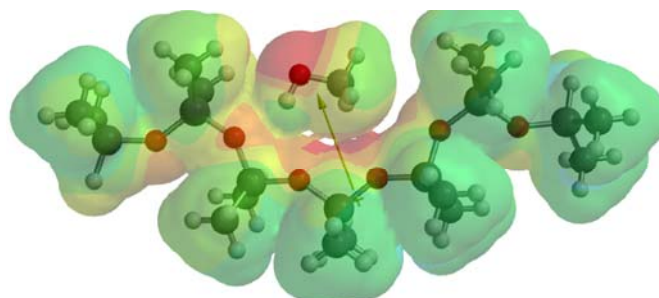
Poli-dimetilsiloxane (PDMS)



Dipole: 1.03 Debye

Potential energy = $-242.46 \div 119.70$ KJ/mol

methanol on Poli-dimetilsiloxane (PDMS)



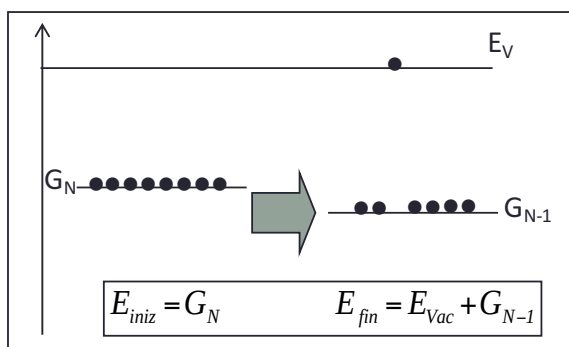
Dipole: 3.39 Debye

Potential energy = $-263.81 \div 112.17$ KJ/mol

Funzione Lavoro

- Definizione:

- La funzione lavoro ($q\Phi$) è l'energia necessaria per estrarre un elettrone da un materiale e portarlo al livello di vuoto con energia cinetica nulla.
- Questa quantità si può definire termodinamicamente considerando un gas di elettroni in equilibrio termico. Con P e T costanti, la variazione dell'energia libera del gas (G) prima e dopo l'estrazione di un elettrone è:



$$q\Phi = E_{fin} - E_{iniz} = (E_{vac} + G_{N-1}) - G_N$$

$$G_{N-1} - G_N = -\frac{G_N - G_{N-1}}{N - (N-1)} = -\frac{\partial G}{\partial N}$$

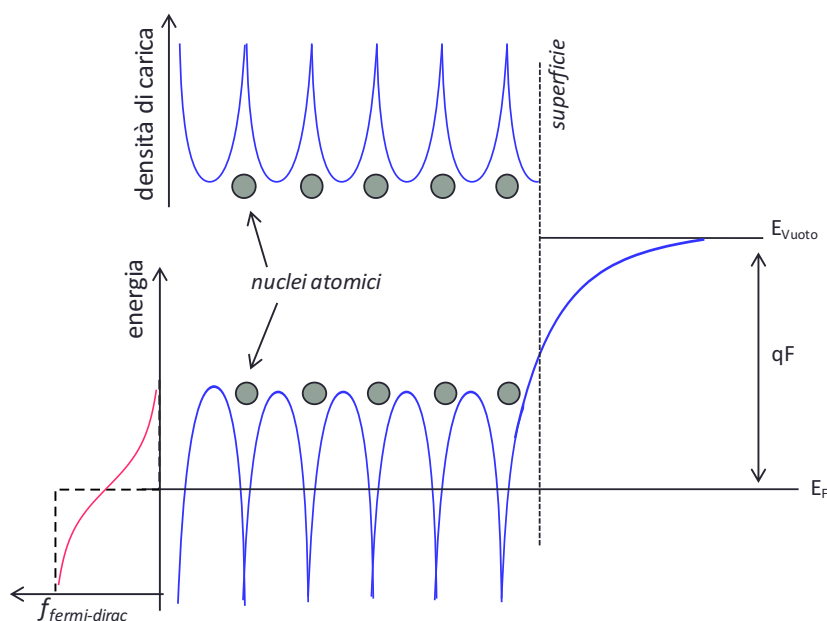
$$\Rightarrow \left(-\frac{\partial G}{\partial N} \right)_{T, V, P, \dots = \text{costante}} = \eta_e \text{ electrochemical potential}$$

$$\Rightarrow q\phi = E_{vac} - \eta_e = E_{vac} - E_F$$

Il potenziale elettrochimico di un gas di elettroni coincide con il livello di Fermi

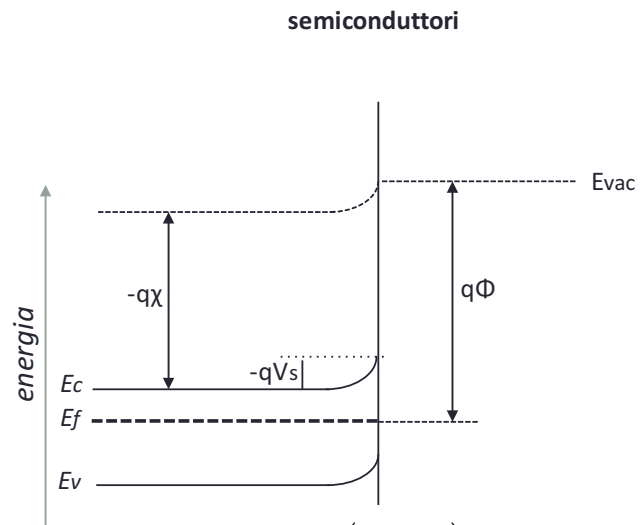
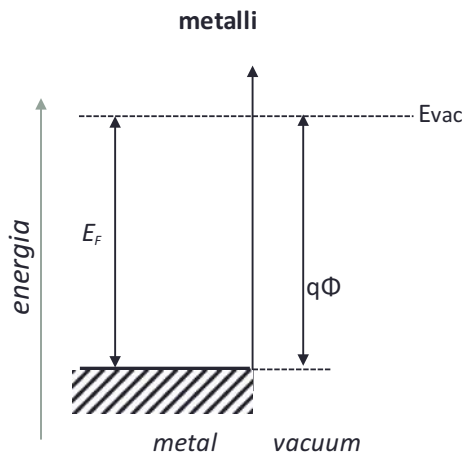
Potenziale di superficie e funzione lavoro

- La funzione lavoro è la distanza tra il livello di vuoto e il livello di Fermi
- Il livello di vuoto è l'energia potenziale elettrostatica alla superficie.



Funzione lavoro di metalli e semiconduttori

- Diagramma a bande



$$q\Phi = q\chi + (E_c - E_f)_{\text{bulk}} - qV_s$$

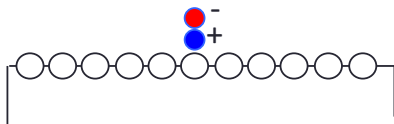
La funzione lavoro è una quantità statistica.

Nei semiconduttori non ci sono stati permessi per gli elettroni con energia pari al livello di Fermi. Nonostante ciò, l'energia media per estrarre elettroni al livello di vuoto coincide ancora con la distanza tra l'energia di vuoto e il livello di Fermi.

Somma di tre termini:

- **Affinità**
 - Costante del materiale
- **Distanza tra livello di fermi e banda di conduzione**
 - Funzione del doping
- **barriera di superficie**
 - barriera di superficie (stato difetti superficiali)

Funzione lavoro e dipoli in superficie



L'adsorbimento di molecole polari forma una densità superficiale di dipoli elettrici. Lo strato di dipoli modifica il livello di vuoto e quindi la funzione lavoro.

Il momento di dipolo è una grandezza vettoriale. L'effetto dipende dall'ordine a larga scala delle molecole adsorbite.

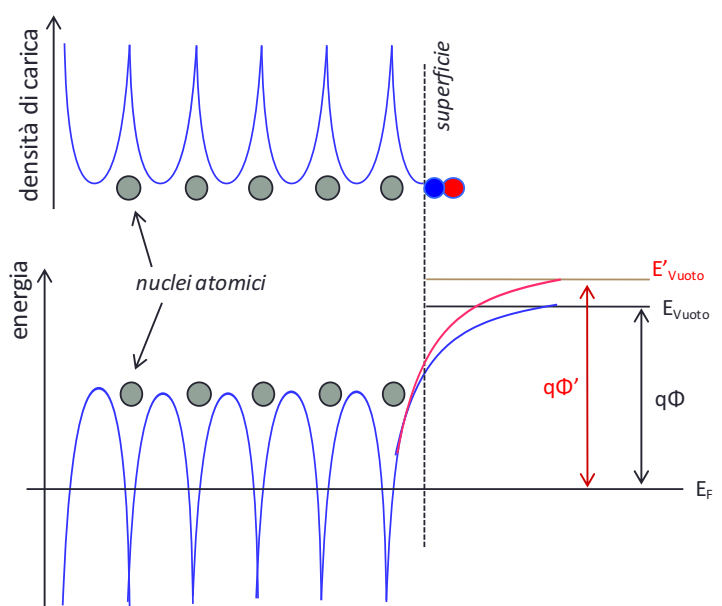
$$\Phi = \Phi_{\text{metal}} + \frac{e}{\epsilon_s \epsilon_o} \cdot n_s^{\text{ads}} \cdot \vec{\mu}^{\text{ads}}$$

$$\vec{\mu}^{\text{ads}} \propto \Theta$$

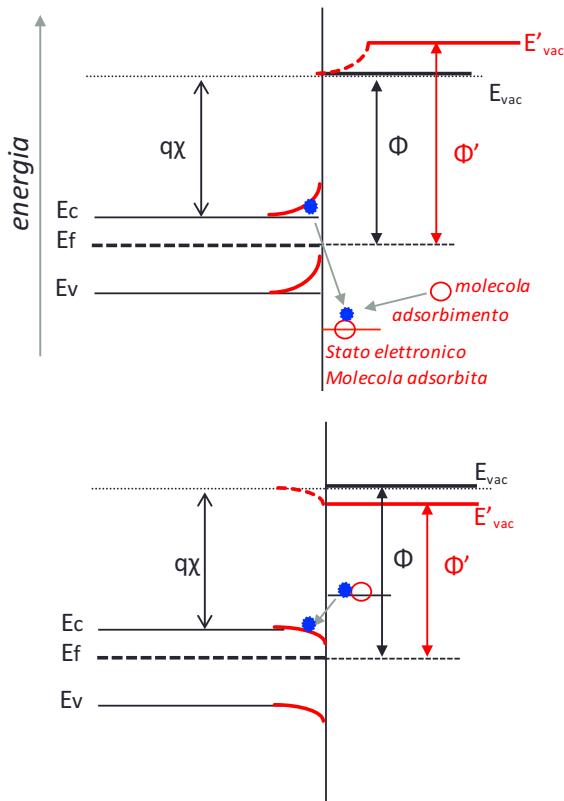
n : densità di dipoli adsorbiti

μ : dipolo totale

$$\Theta: \text{coverage} \quad \Theta = \frac{N_{\text{ads}}}{N_{\text{sites}}}$$



Trasferimento di carica



Ionosorbimento: La molecola adsorbita acquista o cede un elettrone nei confronti del solido.

Se l'elettrone viene trasferito dal semiconduttore alla molecola, si formano un depletion layer e una barriera superficiale.

Se la carica viene trasferita dalla molecola al semiconduttore si forma uno strato di accumulo di elettroni in superficie a cui corrisponde una barriera di segno opposto.

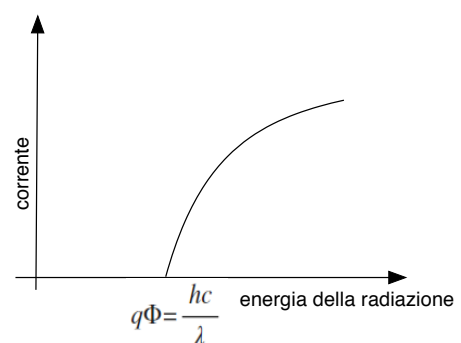
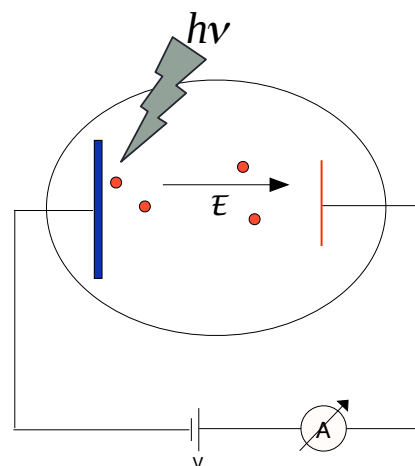
In entrambe i casi, la barriera di superficie modifica la funzione lavoro. Il segno della variazione indica il verso del trasferimento di carica.

Misura della funzione lavoro

- Misura diretta:
 - Applicazione della definizione: gli elettroni del materiale acquistano energia, ad esempio, attraverso la luce (effetto fotoelettrico). Quando l'energia assorbita eguaglia la funzione lavoro gli elettroni abbandonano il materiale e possono essere raccolti da un elettrodo esterno.
- Metodi differenziali
 - Si misura la differenza di funzione lavoro tra due materiali a contatto.
 - Kelvin probe

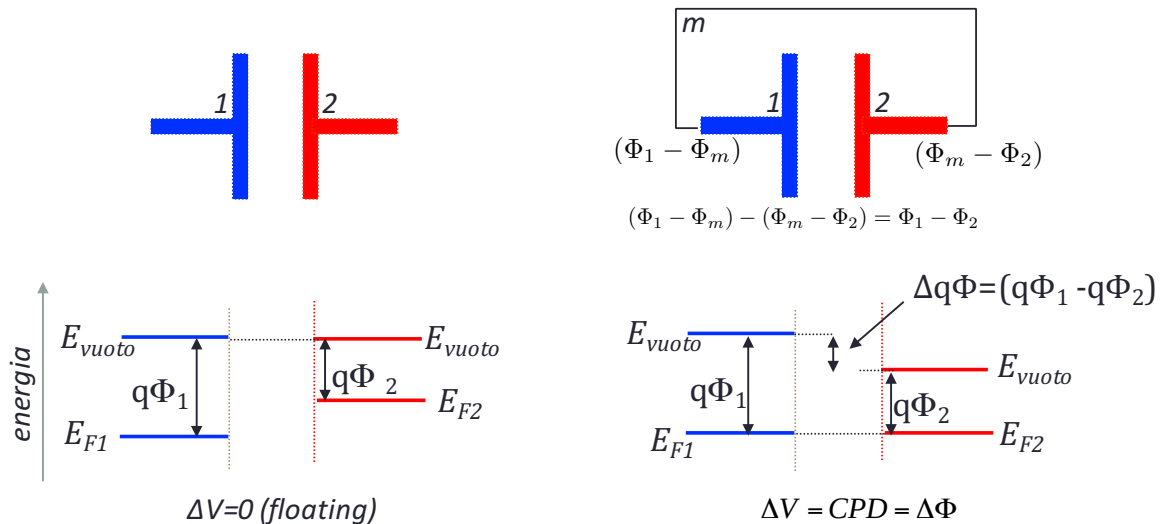
$$\Delta q\Phi = q\Phi - q\Phi_{ref}$$

Effetto fotoelettrico



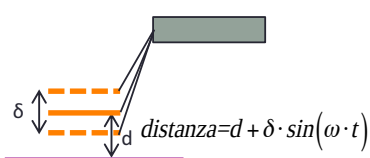
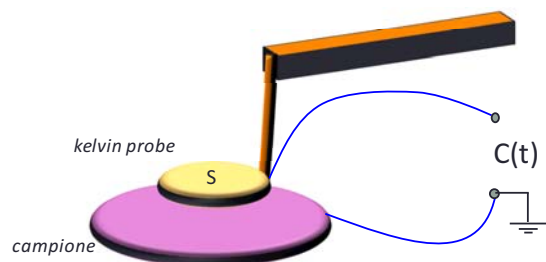
Potenziale di contatto

- In una giunzione tra due materiali, gli elettroni si ridistribuiscono per eguagliare i livelli di Fermi. All'equilibrio, la zona della giunzione è interessata da una differenza di potenziale (*potenziale di built-in*) pari alla differenza tra le funzioni lavoro.
- La stessa differenza di potenziale, ma di segno opposto, si manifesta sulle superfici dei materiali
 - CPD=Differenza di Potenziale di Contatto o Potenziale di Volta.
- Consideriamo un condensatore formato da due materiali di diversa funzione lavoro e chiuso in un circuito esterno. Ai capi del condensatore si trova una differenza di potenziale che è pari alla differenza delle funzioni lavoro dei due materiali.



Kelvin Probe

- Il Kelvin probe è un condensatore a facce piane e parallele tenuto in oscillazione nella direzione della distanza tra i piatti.
- In questo modo nel condensatore, polarizzato dal potenziale di contatto (d.c.), nasce una corrente di spostamento modulata dalla oscillazione meccanica.



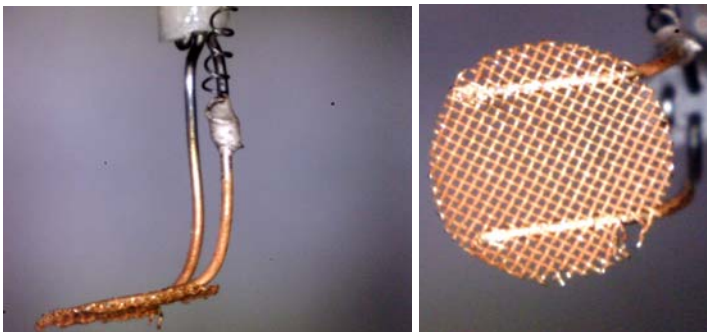
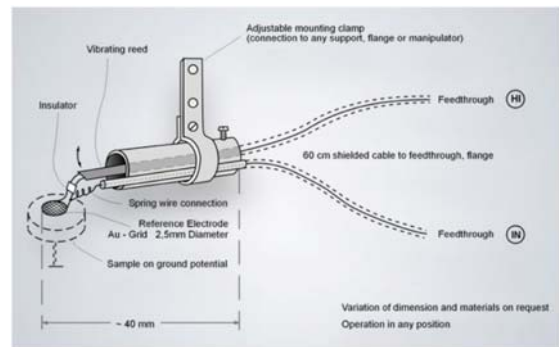
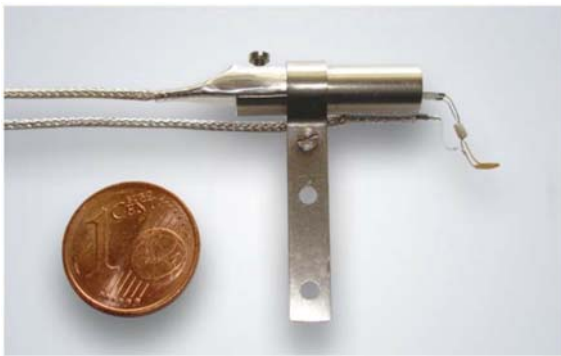
$$\Delta V = CPD = \frac{\Delta q\Phi}{q}$$

$$i(t) = \frac{dQ}{dt} = C(t) \cdot \frac{dv}{dt} + v \cdot \frac{dC(t)}{dt}; \quad v = CPD$$

$$i(t) = CPD \cdot \frac{dC(t)}{dt}$$

$$C(t) = \epsilon \cdot \frac{S}{d + \delta \sin(\omega \cdot t)}$$

Kelvin Probe

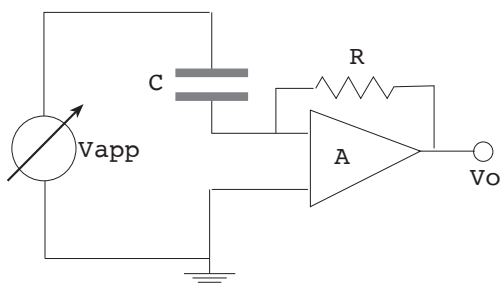


- L'elettrodo oscillante è costituito da una retina d'oro di diametro 1 mm.
 - La rete consente di illuminare il campione sottostante per misure di fotovoltaggio.
- La oscillazione è realizzata da un attuatore piezoelettrico che oscilla ad una frequenza di risonanza di circa 180 Hz

Circuito di misura

Per non perturbare il circuito, la corrente generata dal Kelvin probe è convertita in tensione da un convertitore I/V realizzato con un op.amp. ad alta impedenza di ingresso.

Una batteria variabile in serie al condensatore consente di misurare il potenziale di contatto attraverso una misura di zero.



$$i(t) = \frac{dQ}{dt} = C(t) \cdot \frac{dv}{dt} + v \cdot \frac{dC(t)}{dt}; \quad v = v_{appl} - CPD$$

$$i(t) = (v_{appl} - CPD) \frac{dC(t)}{dt}$$

$$C(t) = \epsilon \cdot \frac{S}{d + \delta \cdot \sin(\omega \cdot t)}$$

$$v_o(t) = -R \cdot i(t) = -R \cdot (v_{appl} - CPD) \frac{dC}{dt} = R \cdot (v_{appl} - CPD) \cdot \epsilon \cdot \frac{S \cdot \omega \cdot \delta \cdot \cos(\omega \cdot t)}{[d + \delta \cdot \sin(\omega \cdot t)]^2}$$

Esempio numerico

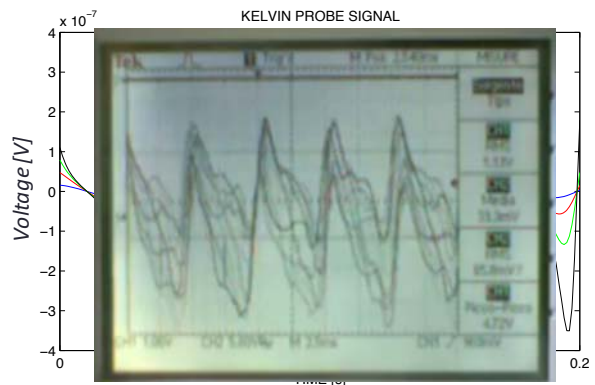
$$v_0(t) = -R \cdot i(t) = -R \cdot (v_{appl} - CPD) \frac{dC}{dt} =$$

$$= R \cdot (v_{appl} - CPD) \cdot \varepsilon \cdot \frac{S \cdot \omega \cdot \delta \cdot \cos(\omega \cdot t)}{[d + \delta \cdot \sin(\omega \cdot t)]^2}$$

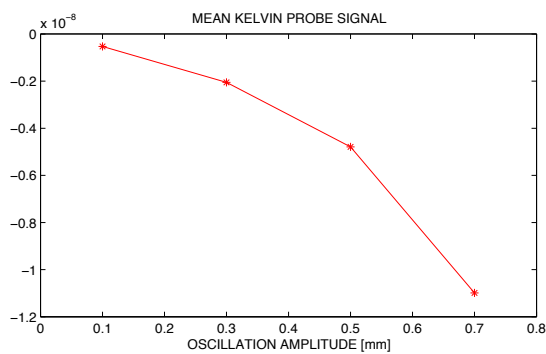
$$R = 1K\Omega; V_{app} = 5V; CPD = 0.8V$$

$$d = 1mm; S = \pi \cdot (3mm)^2; \omega = 150Hz$$

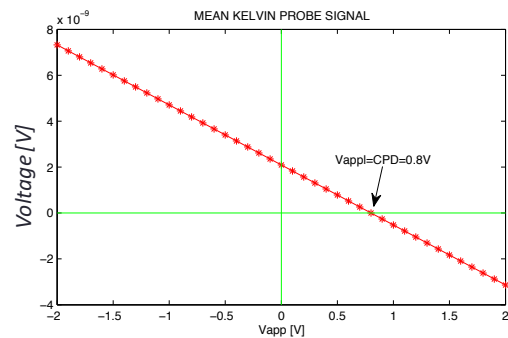
$$\delta = 0.1mm; 0.3mm; 0.5mm; 0.7mm$$



media del segnale in funzione di δ



media del segnale in funzione di V_{app} e per $\delta=0.7mm$

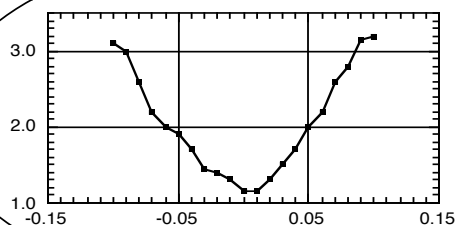
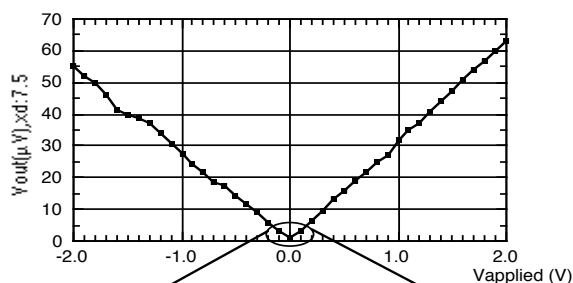


Misura di zero

- Il valore del CPD viene determinato con maggior accuratezza attraverso una misura di zero, cioè determinando il valore di V_{app} che annulla il segnale d'uscita dell'amplificatore.

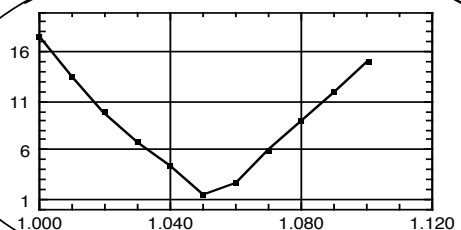
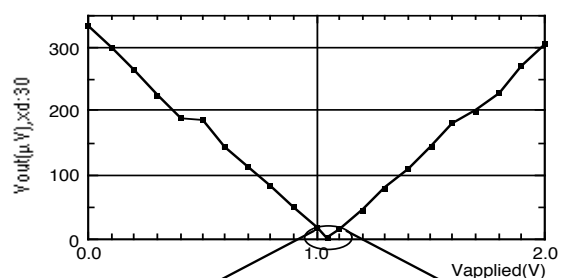
oro - oro

Valore aspettato CPD=0V

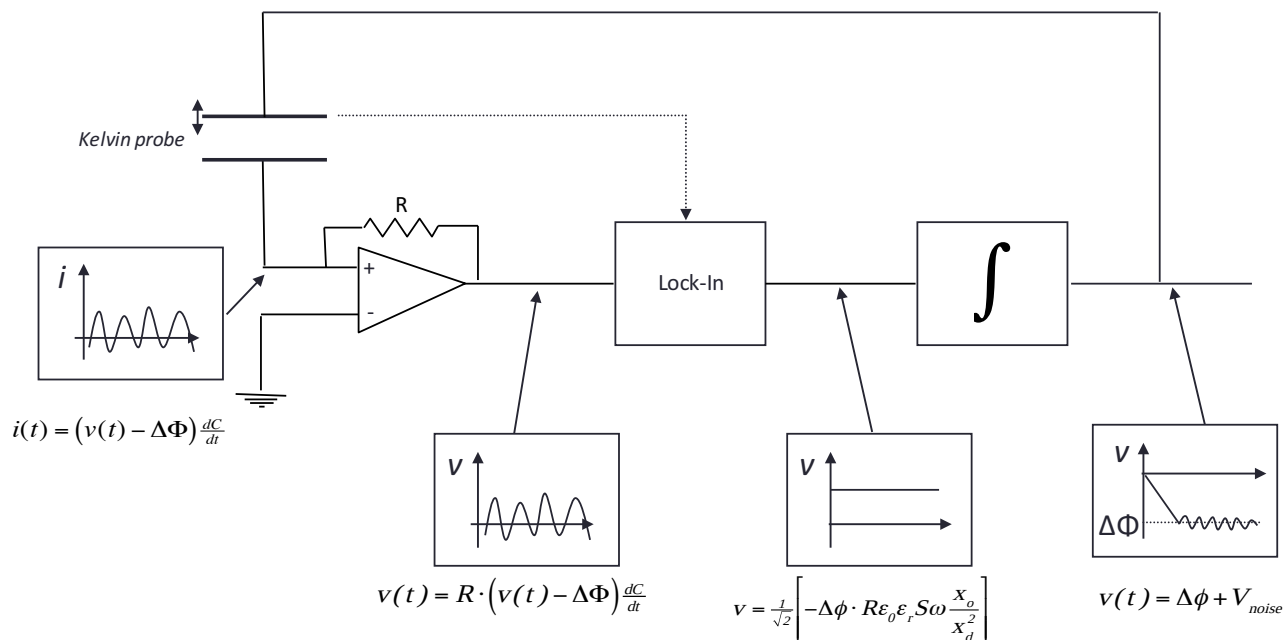


oro - alluminio

Valore aspettato CPD=1.03V



Rivelazione "automatica"



Variazione della CPD in un film sensibile molecolare

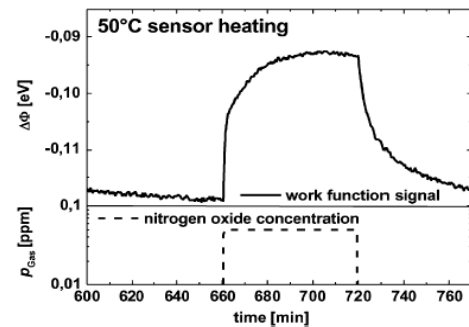
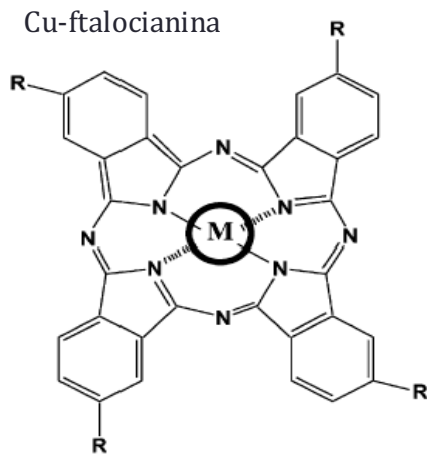
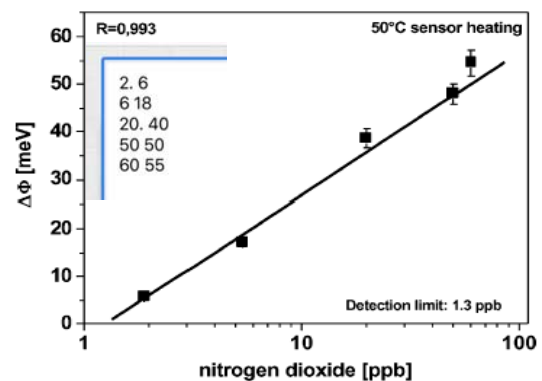


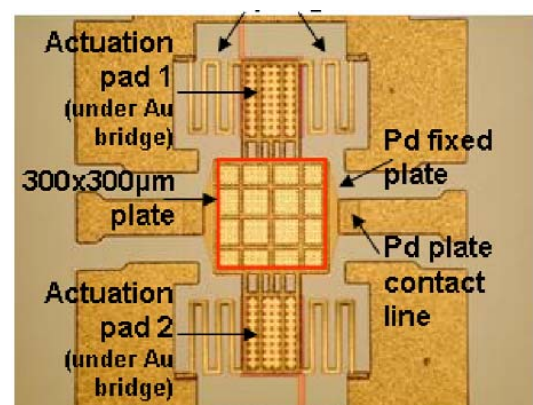
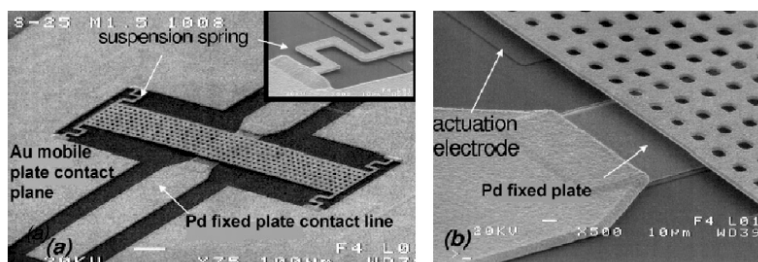
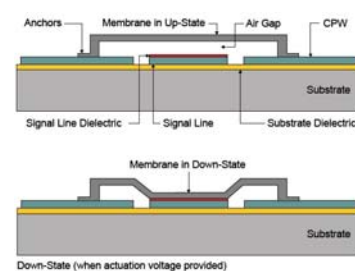
Fig. 3. Work function signal of Cu-phthalocyanine (measured at 50 °C sensor heating, with 34% RH in synthetic air).



Fleischer et al. *Sensors and Actuators B*, 83 (2002) 245

Kelvin probe MEMS

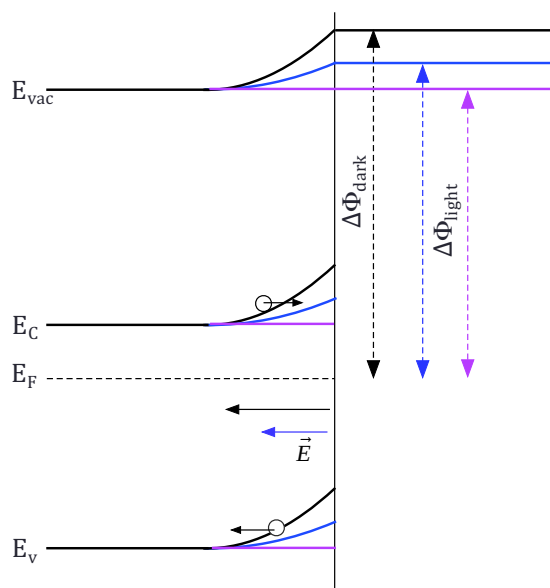
- Il Kelvin probe, basato su parti meccaniche mobili, è di difficile implementazione in un sensore.
- Le tecniche di microlavorazione del silicio consentono di creare delle parti mobili attuate elettrostaticamente
 - tecnologia degli interruttori a radiofrequenza
- Il condensatore di Kelvin è formato da palladio (armatura fissa sensibile all'idrogeno molecolare) e da oro (armatura mobile)



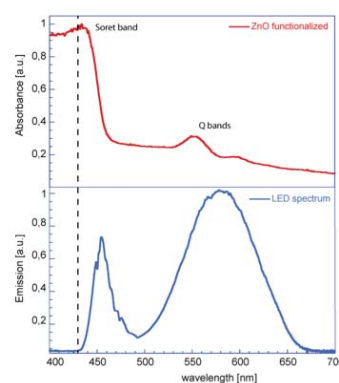
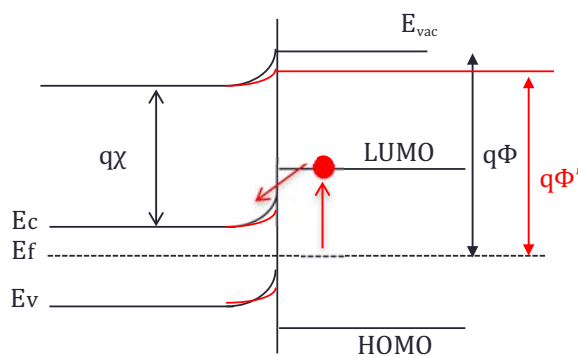
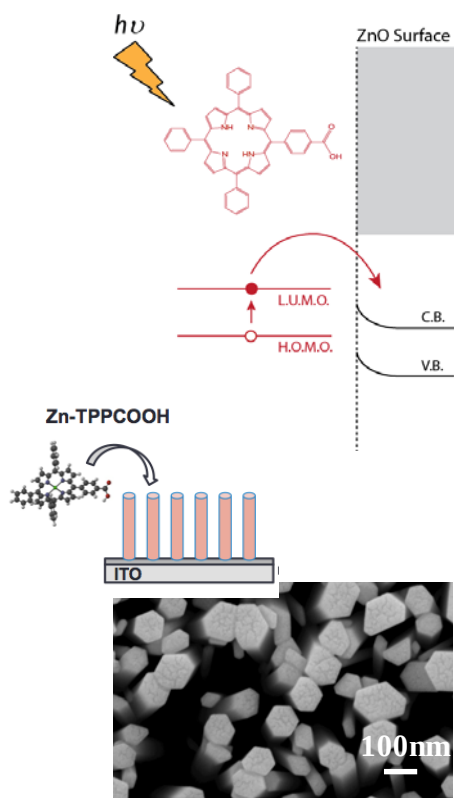
D'Amico et al. *Sensors and Actuators B*, 142 (2009) 418

Fotovoltaggio

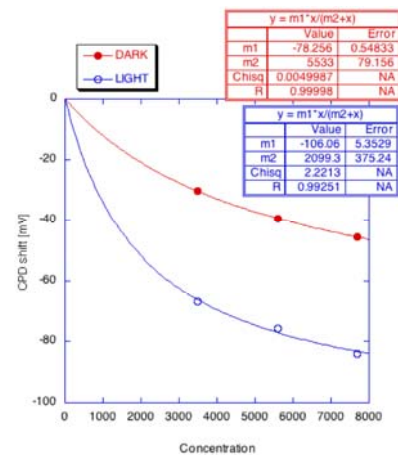
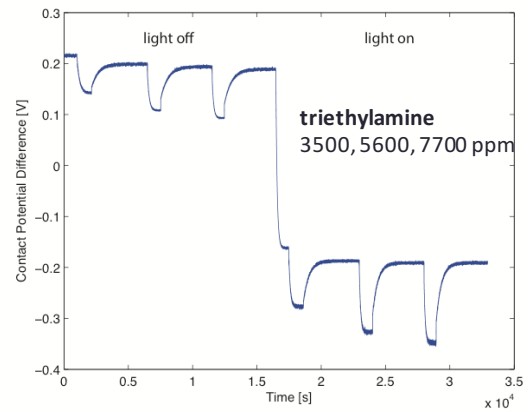
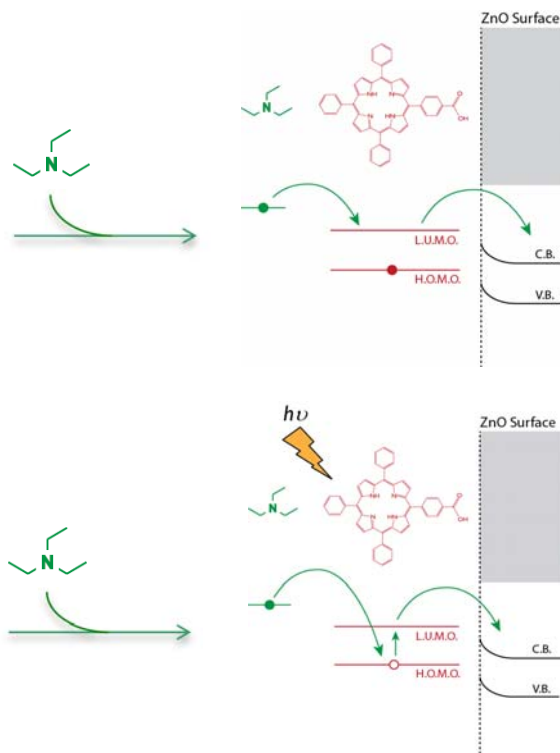
- l'assorbimento in un semiconduttore di fotoni di energia ($h\nu > E_{\text{gap}}$) produce coppie elettrone-lacuna.
- In assenza di campo elettrico la coppia si ricombina senza effetti, ma in un depletion layer le coppie vengono separate dal campo elettrico di built-in. La separazione dà luogo ad un potenziale che tende a cancellare il potenziale di built-in.
- La variazione di funzione lavoro sotto illuminazione fornisce quindi una misura del band-bending di superficie.



Trasferimento di carica tra organici-inorganici



sensibilità chimica di materiali ibridi organici-inorganici e fotoattivazione della sensibilità

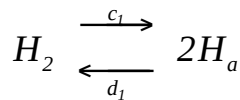


Trasduttori MOSFET

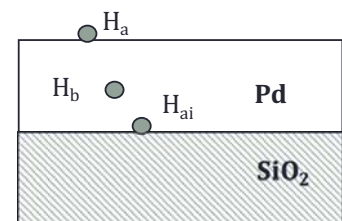
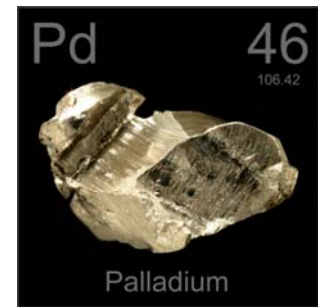
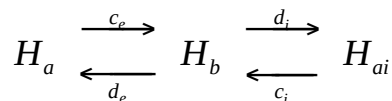
- Nei dispositivi elettronici buona parte delle caratteristiche dipendono dalle funzioni lavoro dei materiali che li compongono.
- Ad esempio, nel MOSFET la differenza di funzione lavoro tra il metallo del gate ed il semiconduttore definisce la relazione tra la tensione VGS e la corrente IDS.
- In un MOSFET se varia la funzione lavoro del gate varia anche la tensione di soglia del dispositivo con una conseguente traslazione della caratteristica IDS vs. VGS
- Su questo principio si basa il sensore di idrogeno a Pd-FET (MOSFET con gate di palladio).
 - Il palladio è reattivo nei confronti dell'idrogeno (adsorbimento dissociativo di H2) e diffusivo (l'idrogeno atomico diffonde all'interno del metallo)

Adsorbimento dissociativo di H₂ su palladio

- Il palladio è un metallo catalitico in grado di favorire un grande numero di reazioni.
 - componente del catalizzatore delle automobili
- Il palladio ha una grande affinità per l'idrogeno col quale attiva
 - processi di adsorbimento dissociativo
 - la molecola di idrogeno viene dissociata in due atomi di idrogeno che sono singolarmente adsorbiti.
 - assorbimento e diffusione all'interno del metallo
 - accumulatore di idrogeno
- Adsorbimento dissociativo:

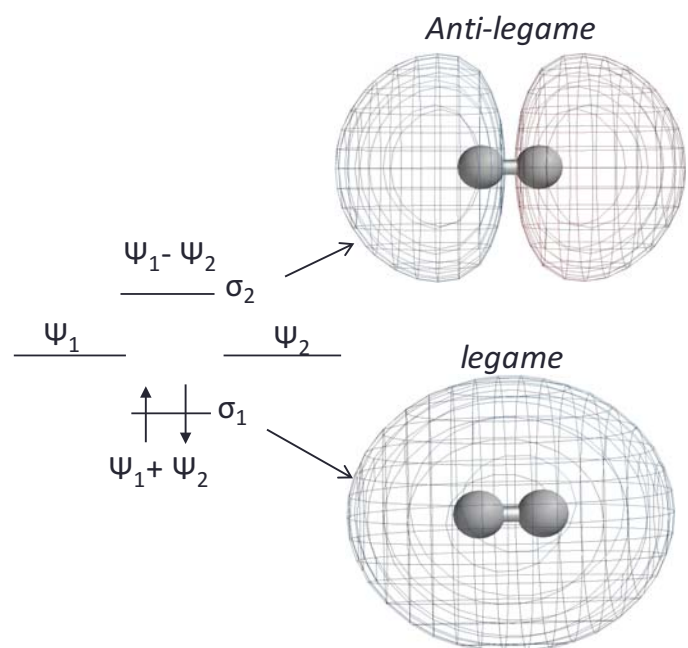


- Per diffusione l'idrogeno atomico adsorbito in superficie si muove all'interno del materiale, fino a raggiungere la superficie opposta. Nel caso del MOSFET questa è l'interfaccia con l'ossido di silicio.



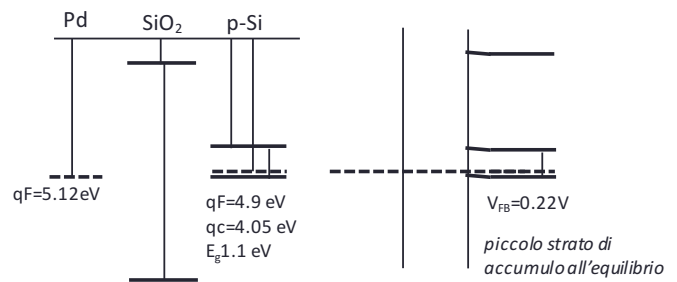
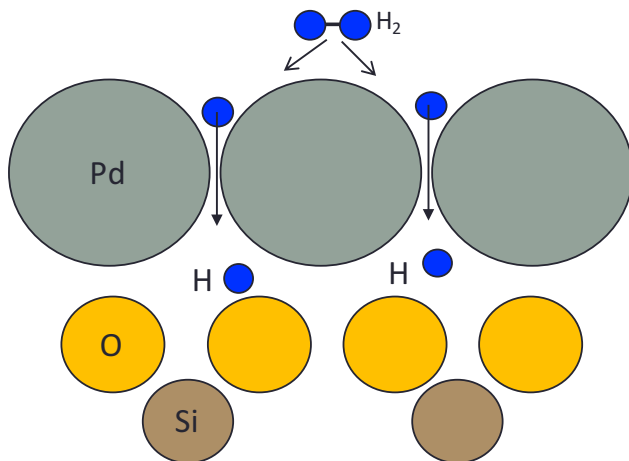
Adsorbimento dissociativo

- Nella molecola di idrogeno l'orbitale molecolare σ_1 (di legame) è pieno e i due atomi sono legati a formare la molecola.
- Approssimandosi alla superficie metallica, gli orbitali liberi possono posizionarsi al di sotto del livello di Fermi degli elettroni nel metallo, per cui un elettrone del metallo può essere trasferito nel primo orbitale libero di H₂
- Il primo orbitale libero è un orbitale di antilegame, quindi il trasferimento di carica comporta un indebolimento del legame molecolare alla dissociazione della molecola.
 - La dissociazione è aiutata dalla temperatura.
- Il sito complessivo di adsorbimento è formato dalla aggregazione di tre vacanze superficiali nel reticolo del palladio.



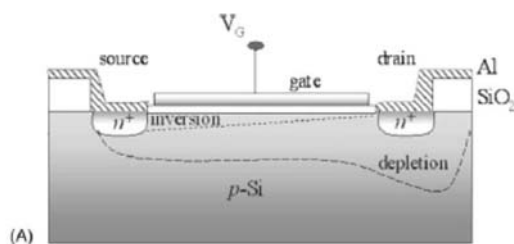
Trasduttore MOS

- L'idrogeno atomico dalla superficie del palladio diffonde fino all'interfaccia con l'ossido dove viene adsorbito formando uno strato di dipoli elettrici.
- Lo strato di dipoli dà luogo ad una caduta di tensione in serie con la V_{GS} .
- In definitiva si osserva una traslazione sia della curva C-V.



Lundstrom et al. Applied Physics Letters, 26 (1975) 55

Equazioni del MOSFET



regione lineare

$$I_{DS} = \mu \cdot C_{OX} \cdot \frac{W}{L} \cdot \left[(V_{GS} - V_{Th}) \cdot V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right]$$

per piccoli V_{DS}

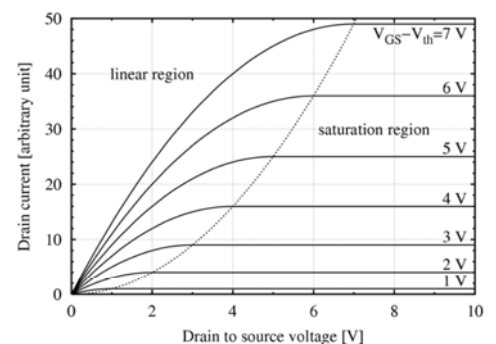
$$I_{DS} = 2 \cdot \mu \cdot C_{OX} \cdot \frac{W}{L} \cdot (V_{GS} - V_{Th}) \cdot V_{DS}$$

Condizione di saturazione

$$V_{DS} > V_{GS} - V_{Th}$$

effetto del gas

$$V_{Th} = V_{Th,0} - \Delta V_{gas}$$



regione di saturazione

$$I_{DS} = \mu \cdot C_{OX} \cdot \frac{W}{2 \cdot L} \cdot (V_{GS} - V_{Th})^2$$

nell'intorno del punto di lavoro

$$I_{DS} = g_m \cdot (V_{GS} - V_{Th})$$

$$\text{dove : } g_m = \mu \cdot C_{OX} \cdot \frac{W}{L} \cdot (V_{GS} - V_{Th})$$

V_{Th} : tensione di soglia; μ : mobilità nello strato di inversione; C_{OX} capacità dell'ossido; W e L ampiezza e lunghezza del canale.

Isoterma di Langmuir dell'adsorbimento dissociativo

L'adsorbimento dissociativo coinvolge contemporaneamente due siti adiacenti. La probabilità di legame è legata alla probabilità di avere due siti liberi.

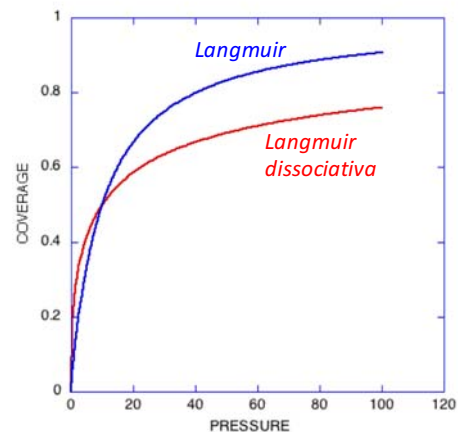
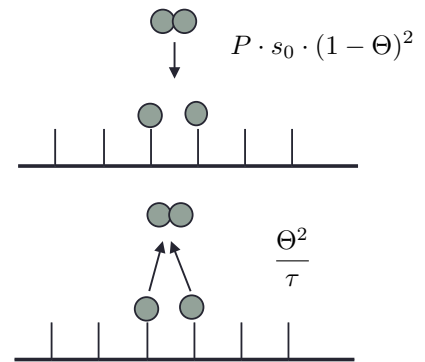
Nel processo di desorbimento è necessario che due siti occupati vengano liberati simultaneamente. L'equilibrio tra adsorbimento e desorbimento è quindi dato da:

$$P \cdot s_0 \cdot (1 - \Theta)^2 = \frac{\Theta^2}{\tau}$$

Da cui si ottiene la isoterma di Langmuir per l'adsorbimento dissociativo:

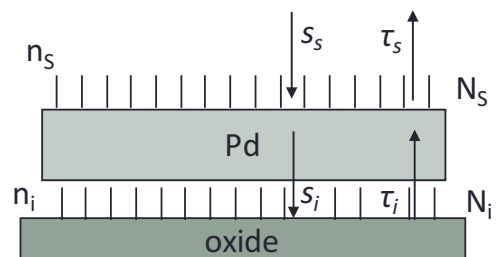
$$\Theta = \frac{\sqrt{P}}{K + \sqrt{P}} \quad \text{con } K = \sqrt{\frac{1}{s_0 \cdot \tau}}$$

a parità di affinità del singolo sito ($1/s_0 \tau$) l'adsorbimento dissociativo è maggiormente sensibile alle basse concentrazioni.



Analisi quantitativa dell'adsorbimento di idrogeno molecolare nel sistema palladio-ossido

- I siti di adsorbimento sia sulla superficie del palladio che dell'ossido sono:
- N_s : densità di siti alla superficie cm^{-2}
- N_i : densità di siti all'interfaccia cm^{-2}
- n_s molecole adsorbite alla superficie
- n_i molecole adsorbite all'interfaccia



Alla superficie (aria-palladio)

Ipotesi di linearità: bassa concentrazione o alta densità di siti

Valgono entrambe in quanto la superficie metallica contiene un numero elevato di siti che si liberano velocemente grazie alla diffusione verso l'interno.

$$1 - \Theta \approx 1 \quad P \cdot s_s = \frac{\Theta^2}{\tau_s} \rightarrow n_s = N_s \sqrt{s_s \tau_s} \sqrt{P}$$

Dalla superficie del Palladio fino all'interfaccia con l'ossido

$$n_s \cdot s_i \cdot (1 - \Theta_i) = \frac{\Theta_i}{\tau_i} \rightarrow n_i = N_i \frac{n_s}{\frac{1}{s_i \tau_i} + n_s} = N_i \frac{N_s \sqrt{s_s \tau_s} \sqrt{P}}{\frac{1}{s_i \tau_i} + N_s \sqrt{s_s \tau_s} \sqrt{P}} = N_i \frac{\sqrt{P}}{K + \sqrt{P}}$$

$$K = \frac{1}{N_s s_i \tau_i \sqrt{s_s \tau_s}}$$

PdFET

- L'andamento di ΔV con la concentrazione dell'idrogeno in atmosfera indica un processo di adsorbimento alla Langmuir.
- ΔV è causato dai fenomeni di adsorbimento che avvengono all'interfaccia Pd- SiO_2
 - Se uno strato sottile di un altro metallo (ad esempio oro) viene interposto tra il palladio e l'ossido la sensibilità del sensore scompare quasi completamente.
- L'adsorbimento primario avviene sulla superficie del palladio, ma il segnale del FET scaturisce dall'adsorbimento tra ossido e palladio.
- Il ChemFET è un dispositivo tipo Kelvin probe sensibile all'interfaccia metallo/ossido piuttosto che all'interfaccia metallo/aria.
- La variazione di tensione osservata è proporzionale alla quantità di idrogeno assorbito all'interfaccia palladio-ossido.

$$\Delta V = \alpha \cdot n_i = \alpha \cdot N_i \cdot \frac{\sqrt{P_{H_2}}}{K_{tot} + \sqrt{P_{H_2}}}$$

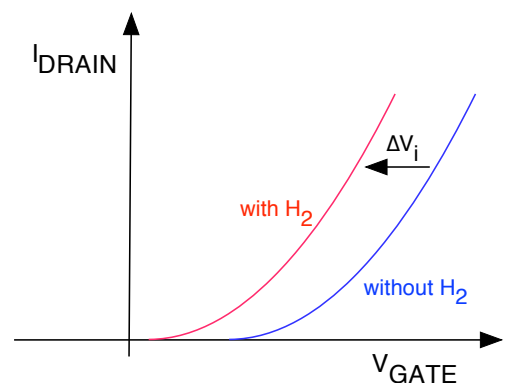
Sensibilità del PdFET in atmosfera inerte

- Le equazioni precedenti valgono in atmosfera inerte (ad esempio argon)
- Lo spostamento della caratteristica I_D - V_G segue la seguente legge:

$$\Delta V = \Delta V_{max} \cdot \frac{\sqrt{P_{H_2}}}{K + \sqrt{P_{H_2}}}$$

- con $\Delta V_{max} = 0.5 \text{ V}$.
- L'effetto del gas equivale alla variazione della tensione di soglia del dispositivo

$$V_{Th} = V_{Th0} - \Delta V_{GAS} = V_{Th0} - \Delta V_{max} \cdot \frac{\sqrt{P_{H_2}}}{K + \sqrt{P_{H_2}}}$$



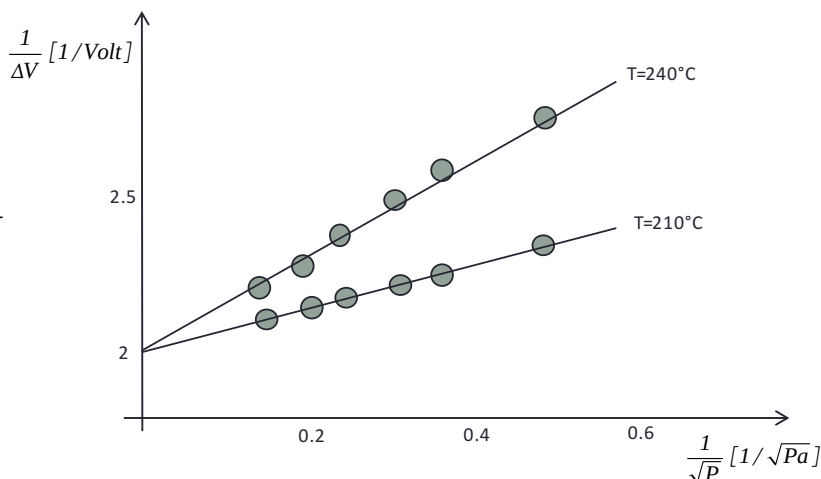
Isoterma linearizzata

$$\Delta V = \Delta V_{\max} \frac{\sqrt{P_{H_2}}}{K + \sqrt{P_{H_2}}}$$

$$\frac{1}{\Delta V} = \frac{K + \sqrt{P_{H_2}}}{\Delta V_{\max} \cdot \sqrt{P_{H_2}}} = \frac{K}{\Delta V_{\max} \sqrt{P_{H_2}}} + \frac{1}{\Delta V_{\max}}$$

$$\frac{1}{\Delta V_{\max}} = \text{intercetta}$$

$$\frac{\Delta V_{\max}}{K} = \text{pendenza}$$



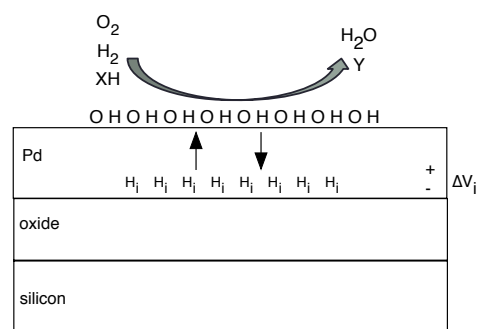
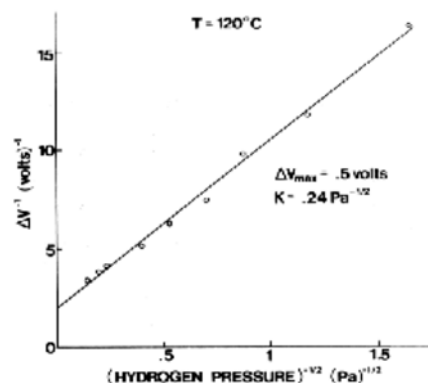
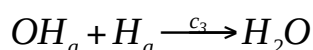
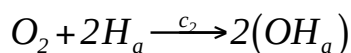
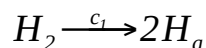
la pendenza dipende dalla temperatura:

$$T=210^\circ\text{C} @ K=0.37 \text{ Pa}^{1/2}$$

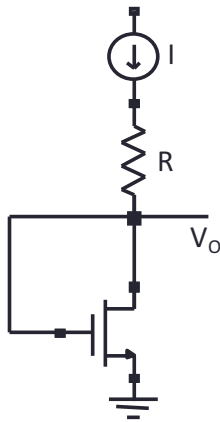
$$T=240^\circ\text{C} @ K=0.80 \text{ Pa}^{1/2}$$

Sensibilità del PdFET in aria (ossigeno+azoto)

- Vale la stessa equazione:
- $\Delta V_{\max}=0.5 \text{ V}$.
- Ma la affinità è minore ($K=4.16 \text{ Pa}^{1/2}$ @ 120°C)
- La presenza dell'ossigeno in atmosfera modifica le reazioni chimiche alla superficie riducendo la sensibilità del sensore.



Polarizzazione in corrente



sensibilità all'idrogeno:

$$V_{th} = V_{th0} - \Delta V_{H_2} = V_{th0} - \Delta V_{max} \frac{\sqrt{P_{H_2}}}{K + P_{H_2}}$$

condizione del circuito:

$$V_O = V_{DS} = V_{GS}$$

→ MOSFET in saturazione:

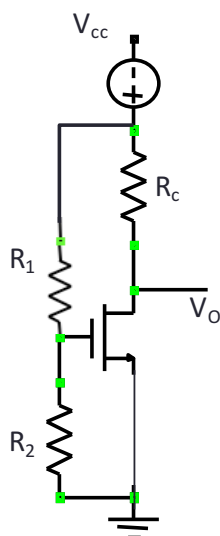
$$I = \mu C_{ox} \frac{w}{2L} (V_{GS} - V_{th})^2 = k(V_{GS} - V_{th})^2$$

$$I = k(V_{GS} - V_{th0} - \Delta V_{H_2})^2 \rightarrow V_O = \sqrt{\frac{I}{k}} + V_{th0} - \Delta V_{H_2}$$

$$V_O = \sqrt{\frac{I}{k}} + V_{th0} - \Delta V_{max} \frac{\sqrt{P_{H_2}}}{K + P_{H_2}}$$

$$S = \frac{dV_O}{d\sqrt{P_{H_2}}} = -\Delta V_{max} \frac{K}{(K + P_{H_2})^2}$$

Polarizzazione in tensione



Sensibilità al gas:

$$V_{th} = V_{th0} - \Delta V_{GAS} = V_{th0} - \Delta V_{max} \frac{\sqrt{P_{H_2}}}{K + \sqrt{P_{H_2}}}$$

ipotesi di saturazione:

$$V_{GS} = V_{CC} \frac{R_2}{R_1 + R_2} \Rightarrow V_{DS} = V_{CC} - V_O > V_{GS} - V_{Th}$$

equazione del mosfet nell'intorno del punto di lavoro:

$$I_{DS} = g_m \cdot (V_{GS} - V_{Th}); \quad g_m = k \cdot (V_{GS} - V_{Th0})$$

$$I_{DS} = g_m \cdot (V_{GS} - V_{th0} + \Delta V_{gas});$$

$$V_O = V_{CC} - R_C \cdot I_{DS} = V_{CC} - R_C \cdot g_m \cdot (V_{GS} - V_{Th0} + \Delta V_{gas});$$

$$V_O = V_{CC} - R_C \cdot g_m \cdot \left(V_{GS} - V_{Th0} + \Delta V_{max} \frac{\sqrt{P_{H_2}}}{K + \sqrt{P_{H_2}}} \right) = V_{O,bias} - R_C \cdot g_m \cdot \Delta V_{max} \frac{\sqrt{P_{H_2}}}{K + \sqrt{P_{H_2}}};$$

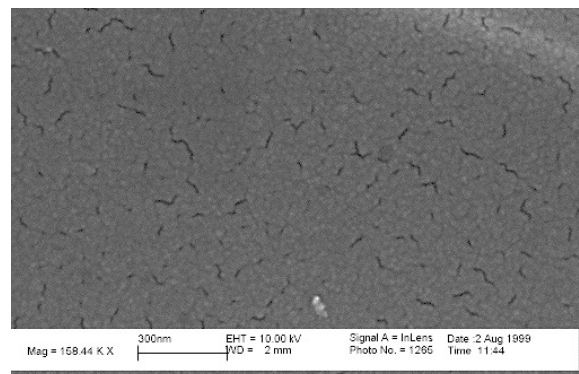
$$S = \frac{dV_O}{d\sqrt{P_{H_2}}} = -R_C \cdot g_m \cdot \Delta V_{max} \frac{K}{(K + \sqrt{P_{H_2}})^2}$$

Esempio di applicazione: cercafughe

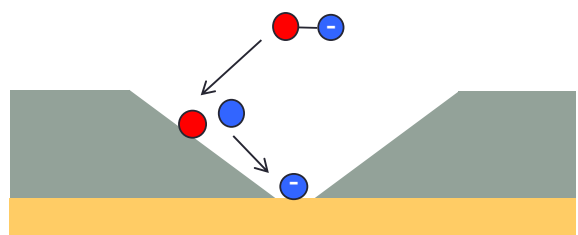


Gate ultra-sottile

- Il PdFET con gate spessi (100-200 nm) è sensibile all' H_2 e alle molecole che, reagendo sulla superficie, liberano idrogeno.
- Le molecole che non producono idrogeno (come l'ammoniaca) possono essere rivelate con dispositivi con gate sottili (5-20 nm).
- I gate sottili sono caratterizzati da una non completa ricopertura dell'ossido. Si creano in questo modo delle regioni in cui l'ossido risulta a contatto con l'aria. Molecole adsorbite direttamente sull'ossido possono dare luogo a variazioni di ΔV .
- In questo caso, il segnale del sensore è dovuto oltre che alle interazioni all'interfaccia metallo-ossido al potenziale di superficie dell'ossido dovuto all'adsorbimento di radicali molecolari che si formano alla superficie del metallo.

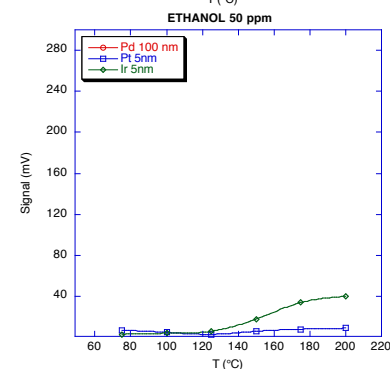
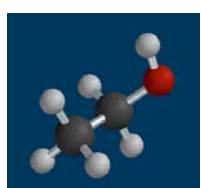
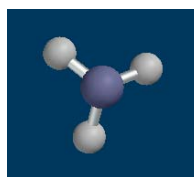
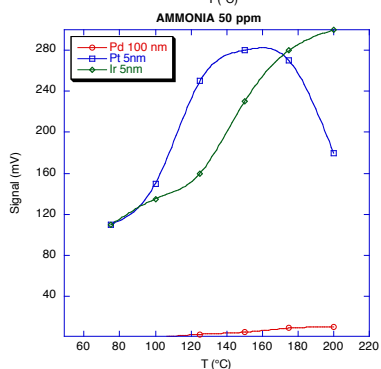
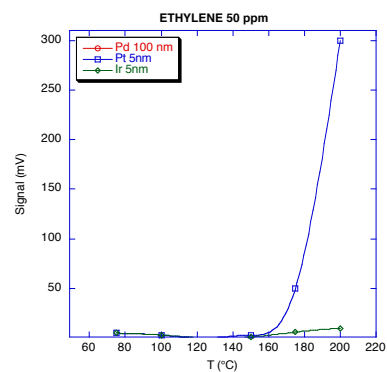
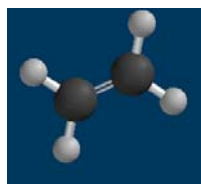
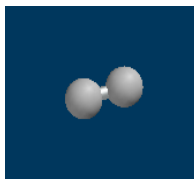
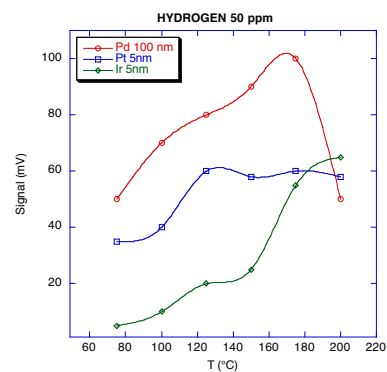


Spessore di 70 Å d'oro sono evidenti delle regioni di circa 100 Å di spessore e centinaia di Å di lunghezza nei quali l'ossido è direttamente a contatto con l'aria.



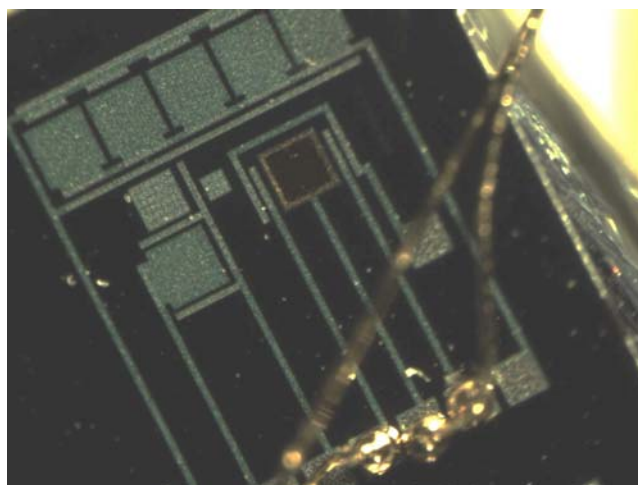
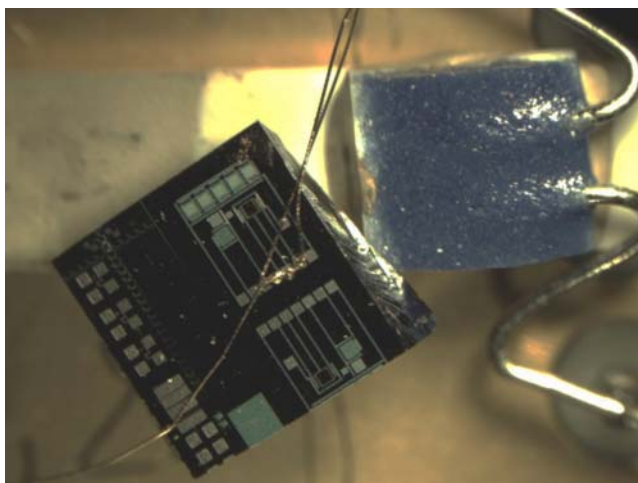
Sensibilità di diversi metalli e spessori di gate

Sensori esposti a 50 ppm di gas in aria sintetica (20% O₂ e 80% di N₂)

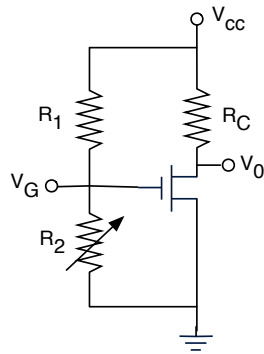


Winquist et al. *Applied Physics Letters*, 43 (1983) 839

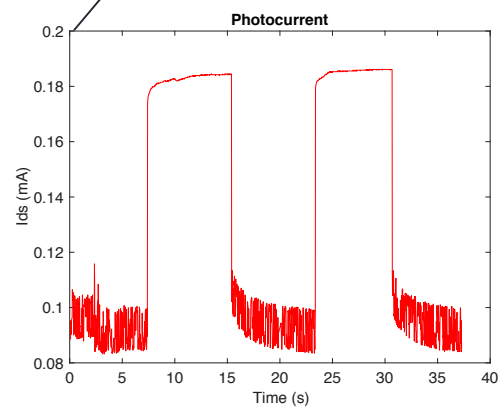
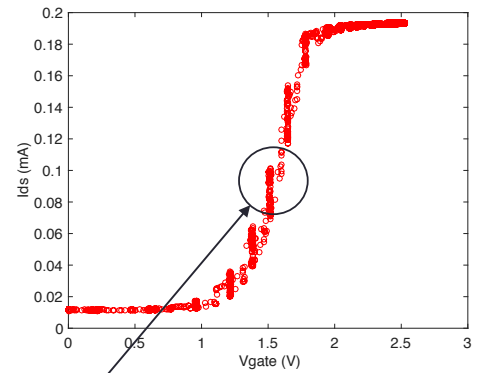
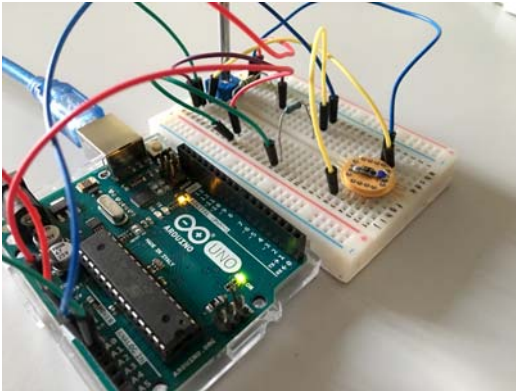
Esempio di ChemFET



Caratteristica elettrica

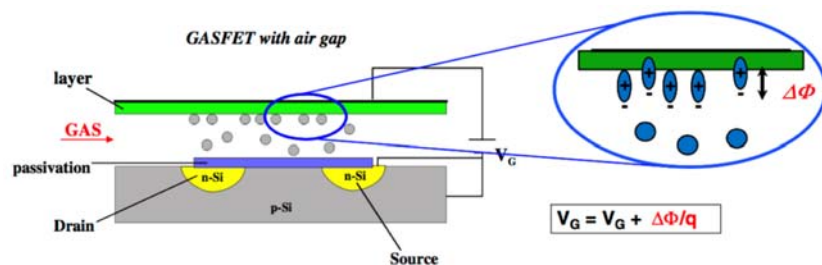


```
figure
clear a0 a1 id
for i=1:2000
    a0(i)=readVoltage(a,0);
    a1(i)=readVoltage(a,1);
    id(i)=(3.5-a0(i))/17.86;
    plot(a1(:),id(:),'r')
    hold on
end
xlabel('Vgate (V)')
ylabel('Ids (mA)')
```



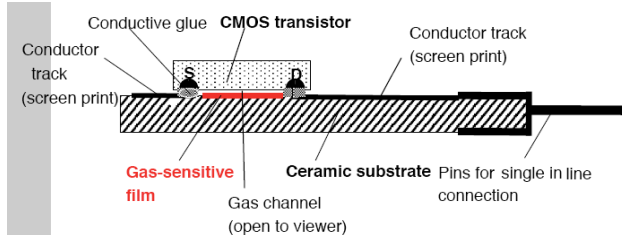
Suspended gate FET

- Il Pd-FET è sensibile alle cariche all'interfaccia ossido-metallo.
- Il Kelvin probe invece è sensibile alle cariche all'interfaccia metallo-aria.
- Per rendere un MOSFET sensibile alle cariche all'interfaccia con l'aria è necessario cambiare la struttura del gate.
- SUSPENDED GATE FET (SGFET)



- L' SGFET consente di usare qualunque materiale sensibile (anche organico e non conduttore) purchè compatibile con le tecniche di fabbricazione.
- Gli svantaggi riguardano la necessaria complicazione costruttiva e una ridotta transconduttanza dovuta ad una minore capacità dell'ossido.

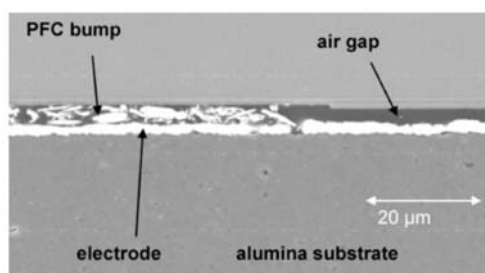
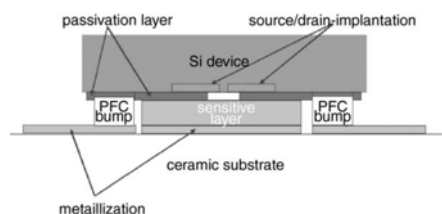
SGFET Sensor



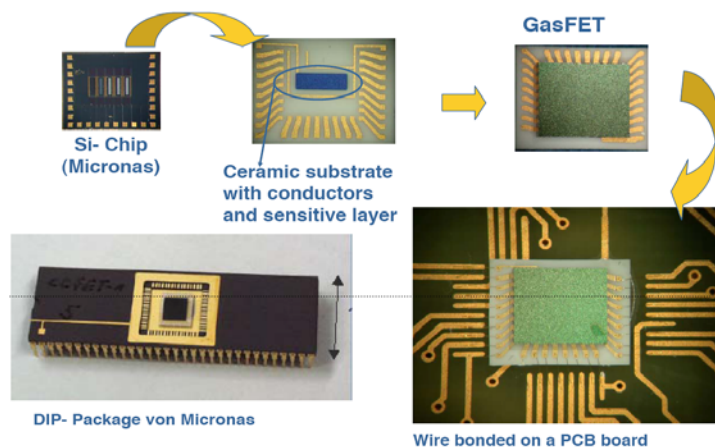
Flip-chip technology:

Source-drain e Gate con il materiale sensibile sono realizzati in due chip che poi vengono uniti per formare una struttura unica.

Semplicità di costruzione ma piccola transconduttanza.



Lo spazio tra il gate (con il materiale sensibile) ed il semiconduttore forma la cella di misura.



Oprea et al. Sensors and Actuators B, 111 (2005) 582

SGFET sensor

- Strato sensibile: Cu-ftalocianina
- Analita: NO₂

