

Sensori Fisici

Sensori di temperatura

- Termistore
- RTD
- Termocoppia
- Interruttore a lamina bimetallica
- Basati su dispositivi a semiconduttore

Sensori di deformazione

- Strain Gauge

Sensori piezoelettrici

- Principio di funzionamento

Sensori per applicazioni
biomedicali

The diagram consists of two overlapping ovals. The top oval is outlined in red and contains the text 'Sensori per applicazioni biomedicali'. The bottom oval is outlined in green and contains the text 'Elettronica organica'. The intersection of the two ovals is shaded in light green and contains the text 'Sensoristica organica'.

Sensoristica organica

Elettronica organica

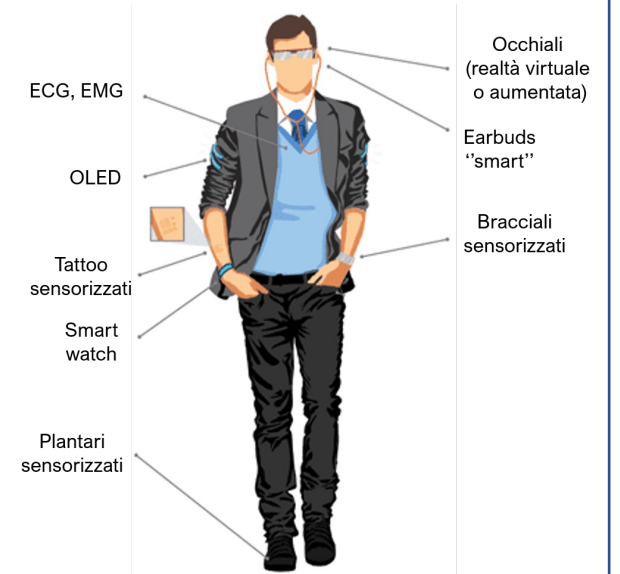
Elettronica organica

Display OLED

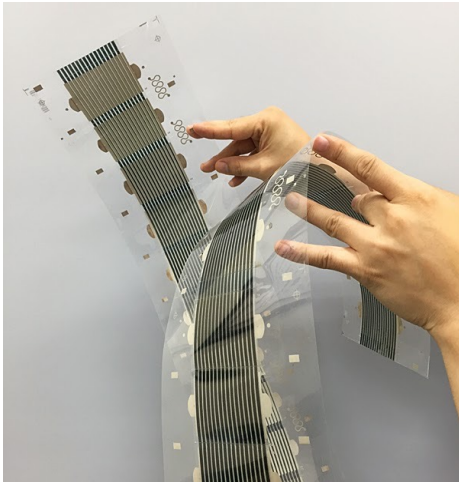


Elettronica organica

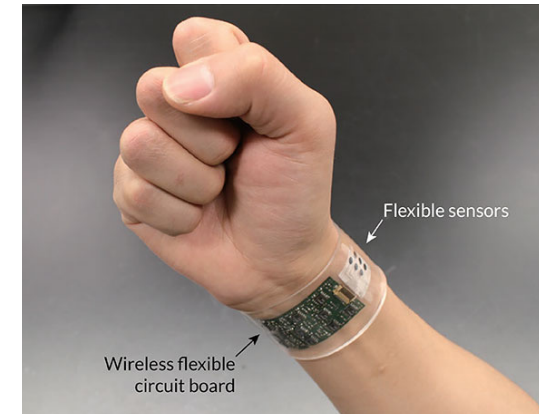
Elettronica indossabile



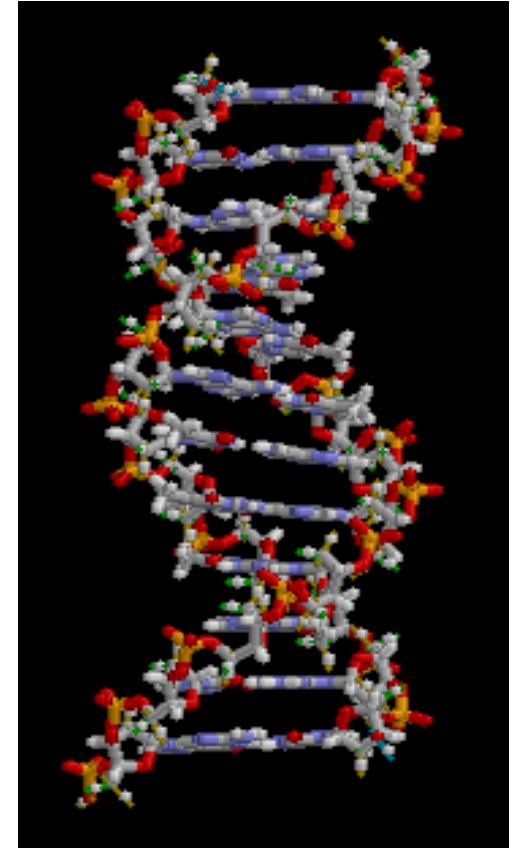
Celle solari flessibili



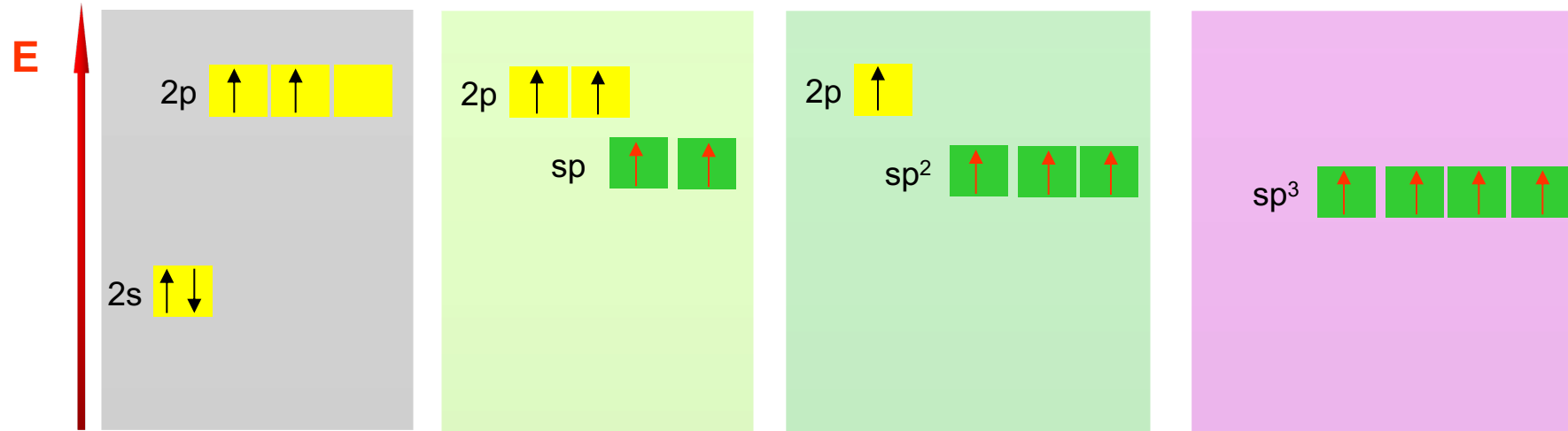
Sensori e biosensori



Elettronica organica



Elettronica organica

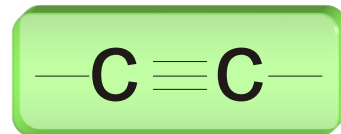


Stato
fondamentale

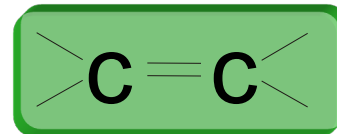
Ibrido sp

Ibrido sp²

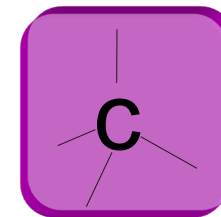
Ibrido sp³



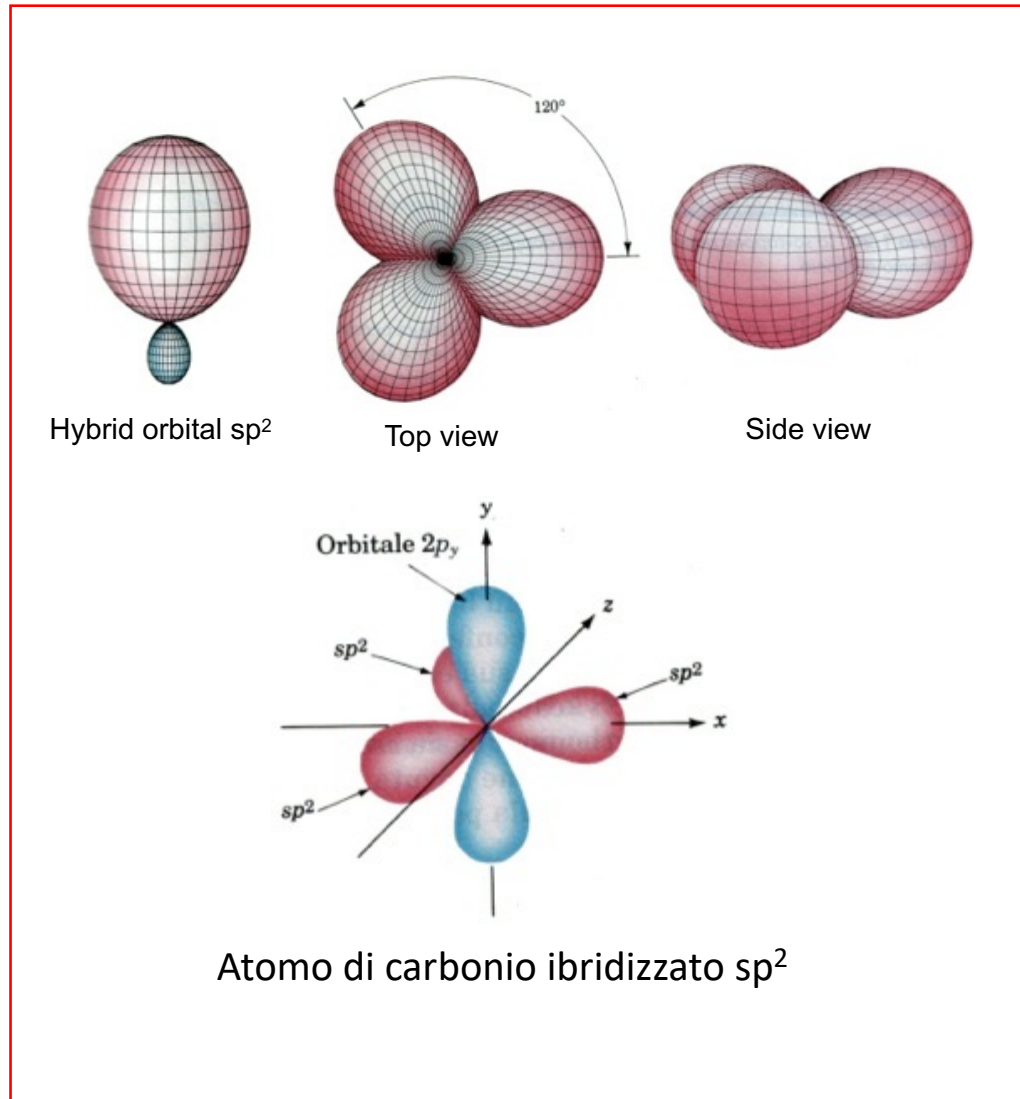
Triplo legame



Doppio legame

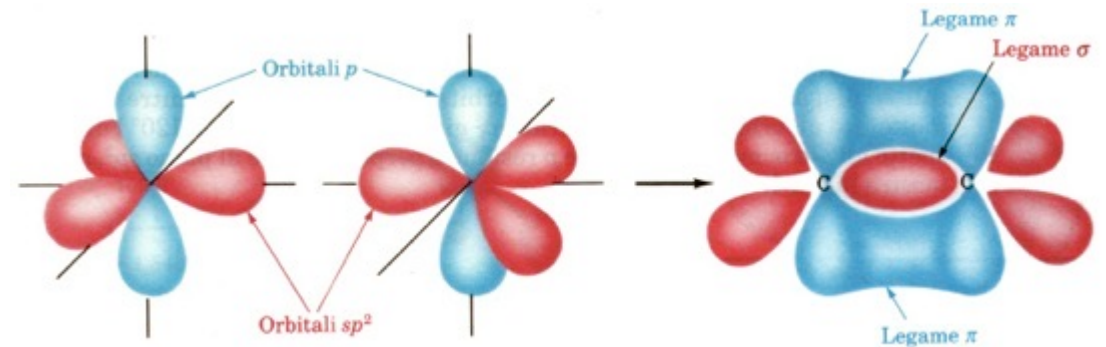


Elettronica organica: legame Carbonio-Carbonio



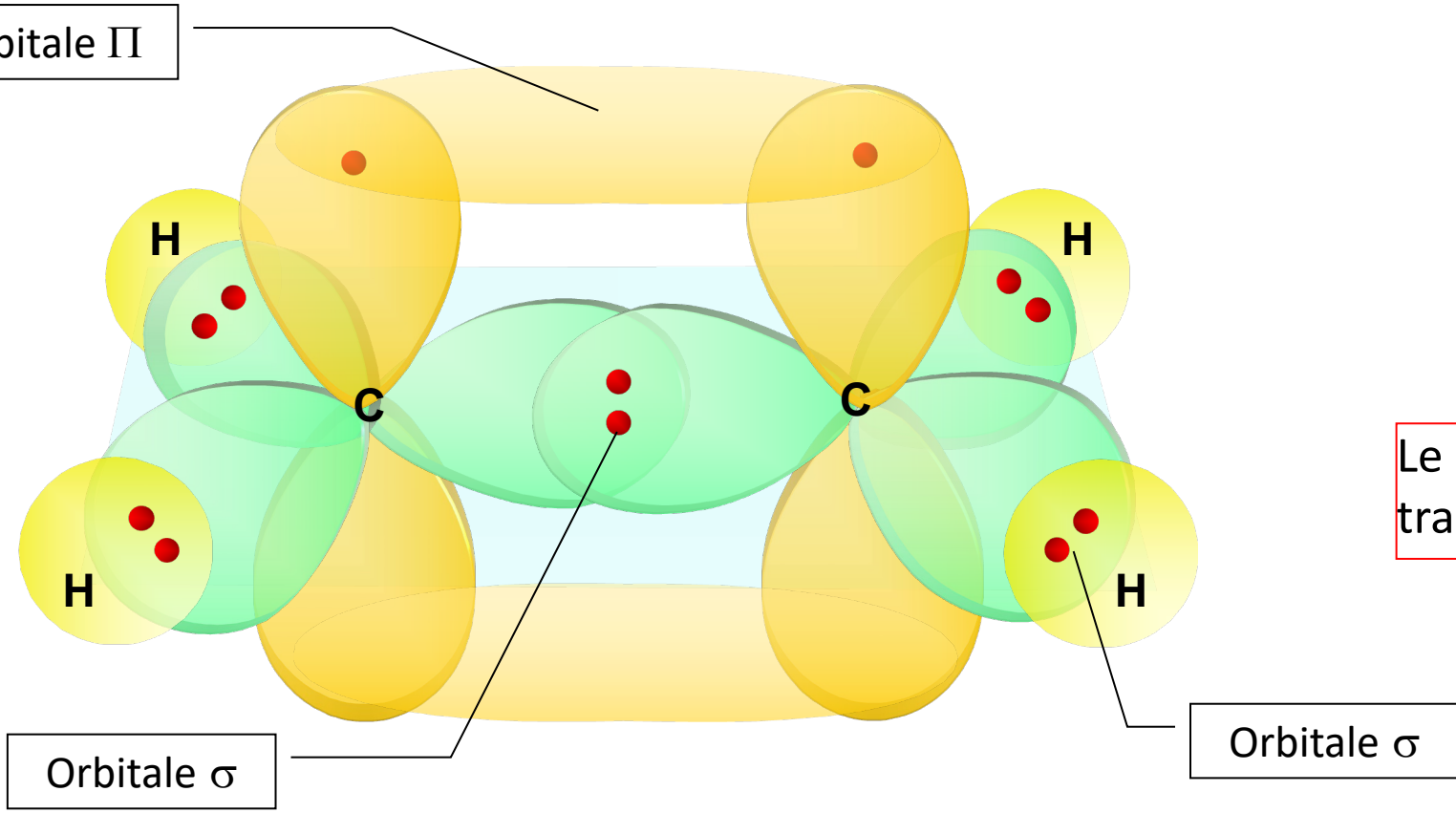
Avviciniamo due atomi di carbonio con ibridazione sp^2 ...

Sovrapposizione orbitalica nel doppio legame carbonio-carbonio

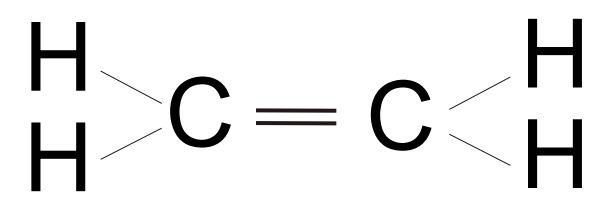
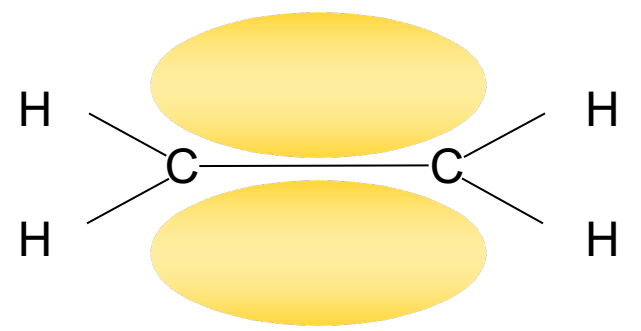


Orbitale molecolare = linear combination of atomic orbitals (LCAO)

Elettronica organica: legame Carbonio-Carbonio



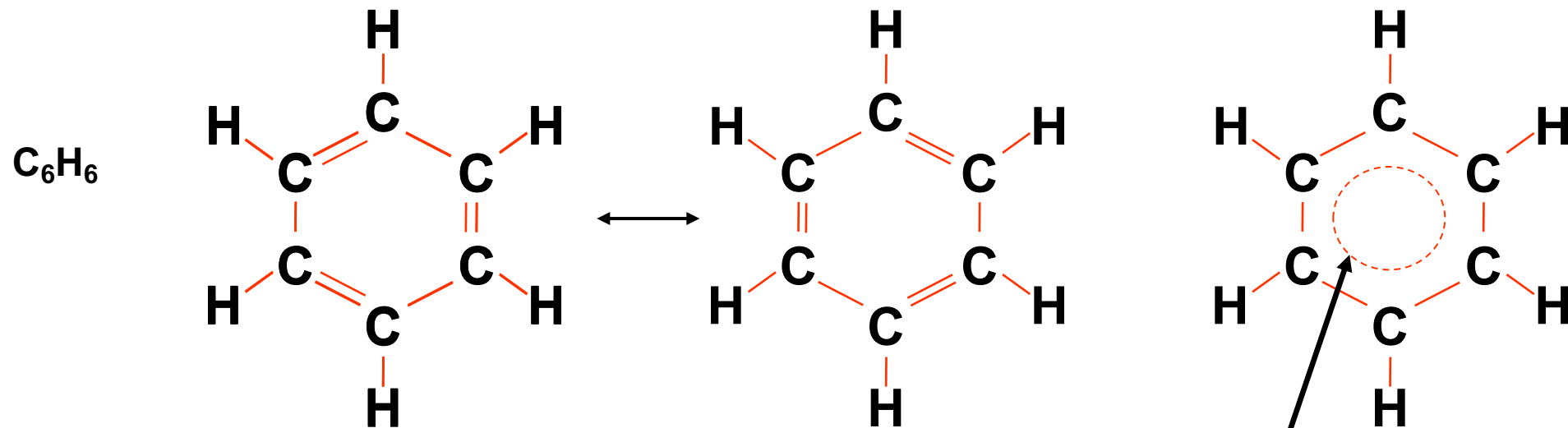
Le cariche negli orbitali Π sono in comune tra i due atomi.



Etilene (o Etene)

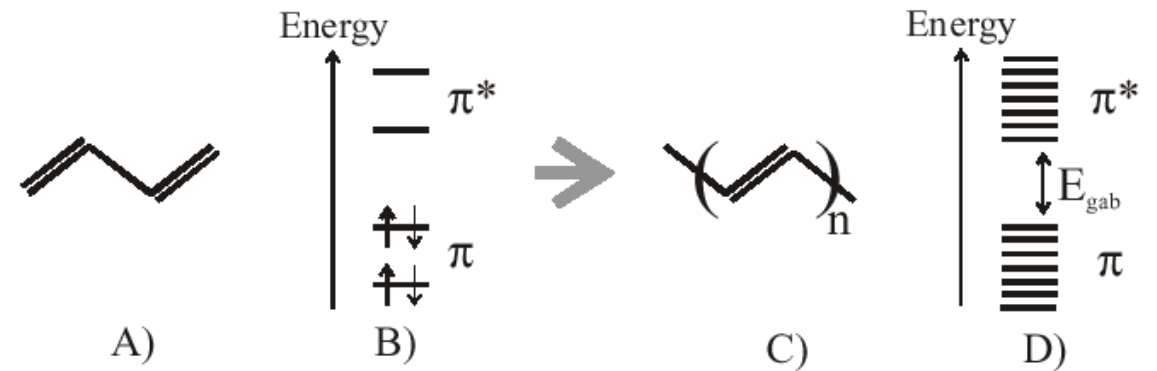
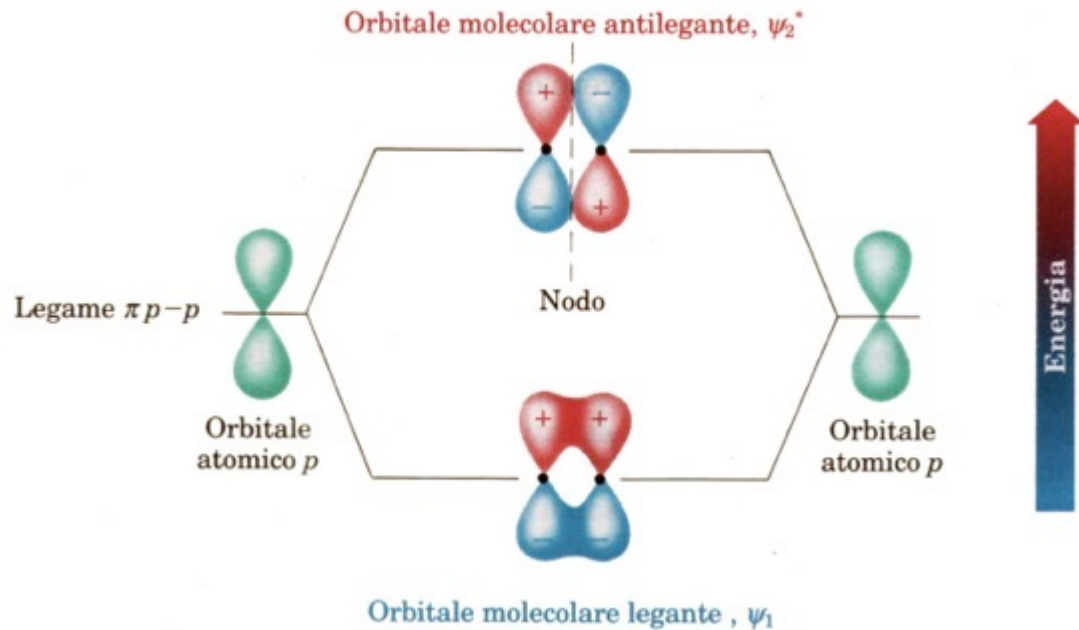
Elettronica organica: legame Carbonio-Carbonio

Sistemi coniugati: molecole che presentano un'alternanza di doppi legami e legami semplici.



La carica è delocalizzata
sull'anello benzenico

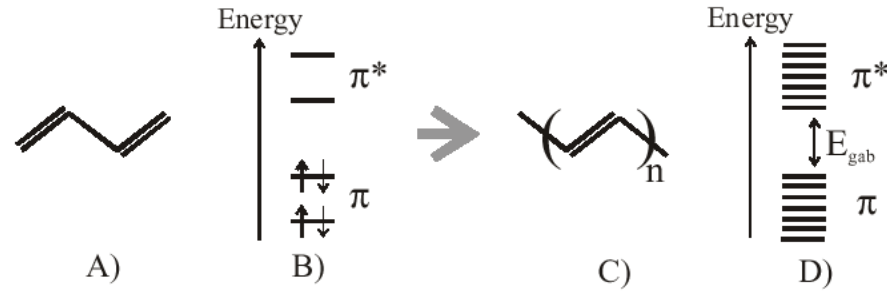
Elettronica organica: legame Carbonio-Carbonio



Quando due atomi di carbonio ibridati sp^2 si legano, si assiste alla formazione di orbitali molecolari **leganti** e **antileganti**.

Man mano che aggiungiamo atomi alla struttura, grazie alla LCAO, i livelli energetici relativi agli orbitali leganti e antileganti formano una vera e propria struttura a bande...ricorda qualcosa?

Elettronica organica: legame Carbonio-Carbonio



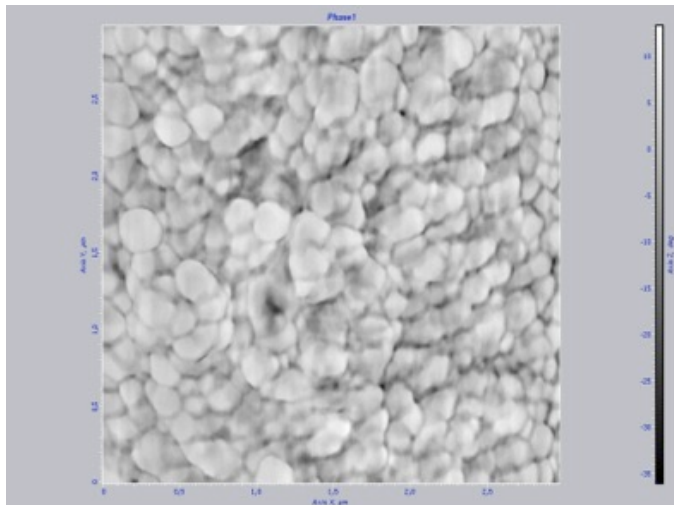
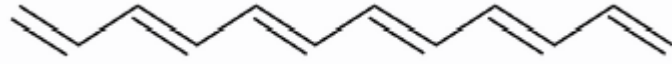
$$E_n = \frac{n^2 h^2}{8mL^2} \longrightarrow \begin{aligned} E(LUMO) &= \frac{\left(\frac{N}{2} + 1\right)^2 h^2}{8m(Nd)^2} \\ E(HOMO) &= \frac{\left(\frac{N}{2}\right)^2 h^2}{8m(Nd)^2} \end{aligned} \longrightarrow E_G = E(LUMO) - E(HOMO) = \frac{(N+1)^2 h^2}{8m(Nd)^2} \approx \frac{h^2}{8md^2 N}$$

L: lunghezza di coniugazione = length of the shortest molecular segment with a perfect alternation of single and double bonds;

N: numero di atomi

d = distanza atomica

Elettronica organica: trasporto di carica



Å

Trasporto all'interno della molecola

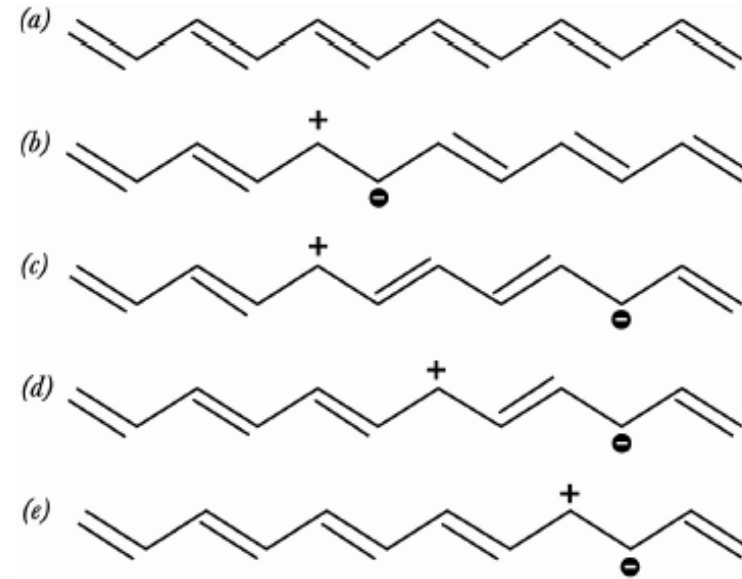
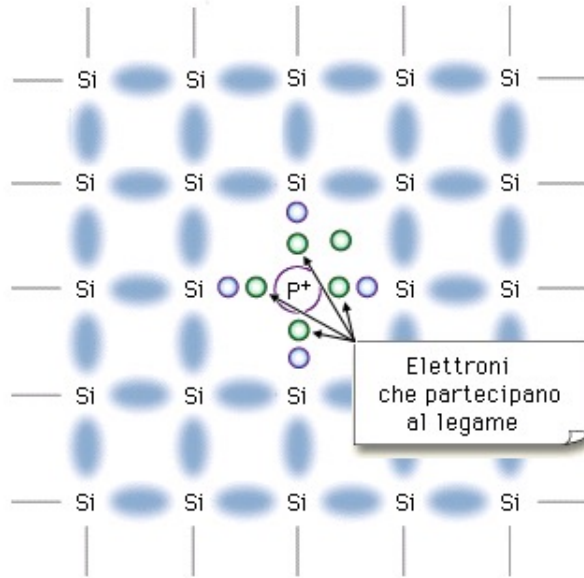
nm

Trasporto all'interno dei **grani**

µm

Trasporto **tra un grano e l'altro**

Elettronica organica: trasporto di carica

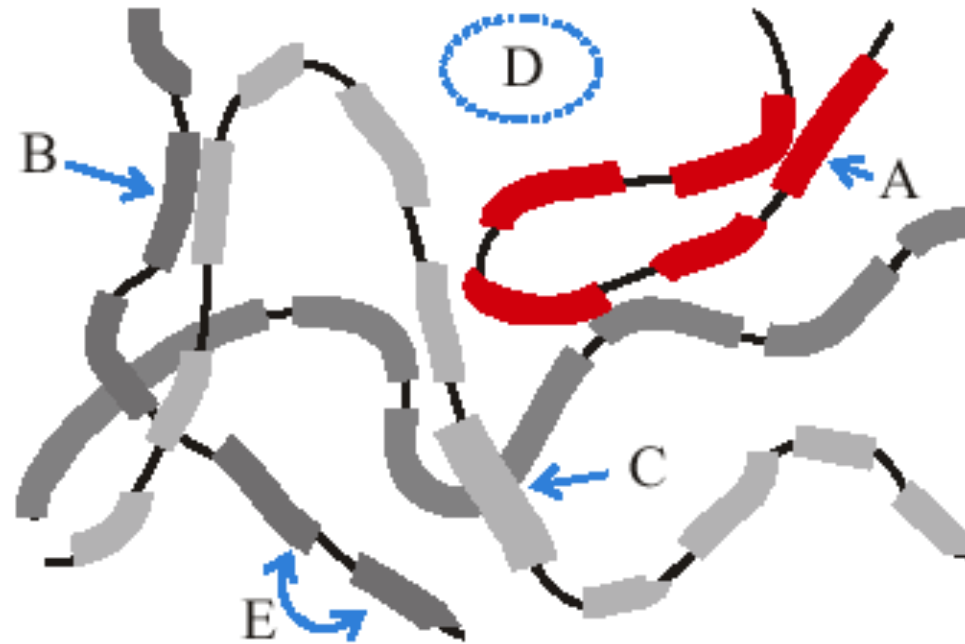


Nei semiconduttori inorganici, il drogaggio è sostituzionale. I portatori sono dunque liberi di muoversi in un potenziale periodico senza sostanziali interazioni con il reticolo cristallino (*band model*).

Nelle molecole organiche il doping NON è sostituzionale. Le cariche condivise negli orbitali pi-greco interagiscono fortemente con la molecola inducendo una perturbazione nella sua struttura: questa carica più la perturbazione ad essa associata è chiamata **polarone**.

Il polarone può dunque essere visto, in analogia con i semiconduttori cristallini, come una **carica libera di muoversi lungo ma che interagisce fortemente con il reticolo cristallino** → **mobilità intrinsecamente più basse**.

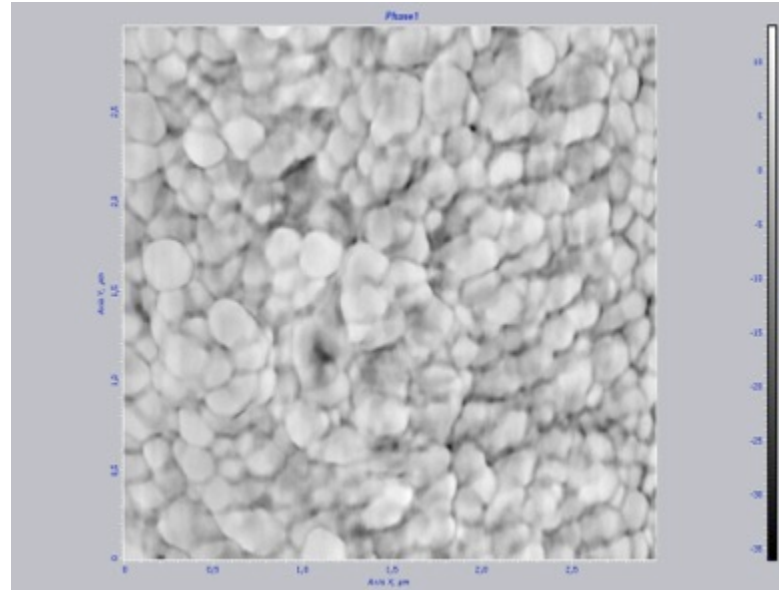
Elettronica organica: trasporto di carica



All'interno di un grano la conduzione avviene attraverso un meccanismo chiamato hopping della carica. L'hopping consiste nel **passaggio della carica tra una catena e l'altra per effetto tunnel**.

A differenza dei semiconduttori cristallini dunque, le cariche nei semiconduttori organici hanno bisogno dell'energia fornita dai fononi per potersi muovere: la **mobilità aumenta con la temperatura**.

Elettronica organica: trasporto di carica



Conduzione in un materiale organico:

- hopping
- promossa dall'agitazione termica
- limitata dall'intrappolamento di carica ai bordi di grano

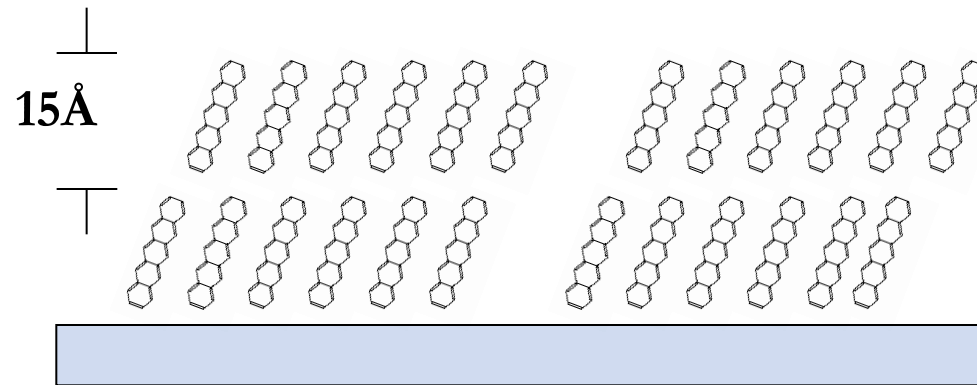
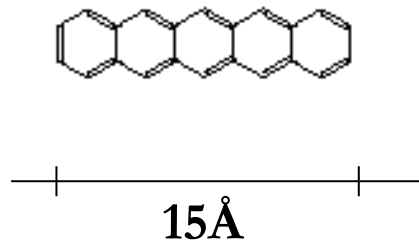
$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu_{grano}} + \frac{1}{\mu_{trappole}}$$

Maggiore è la dimensione dei grani, più alta è la mobilità.

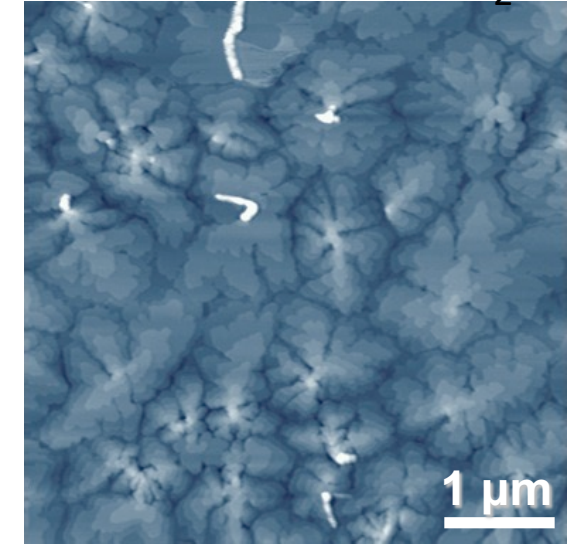
Elettronica organica: trasporto di carica

Uno dei **semiconduttori organici** più studiati e utilizzati è il **Pentacene**:

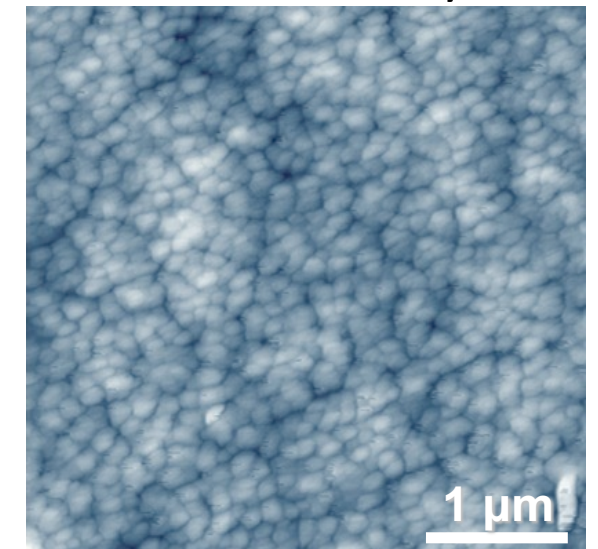
- Composto da 5 anelli benzenici
- Le molecole tendono a disporsi perpendicolarmente al substrato



Pentacene su SiO₂



Pentacene su Mylar

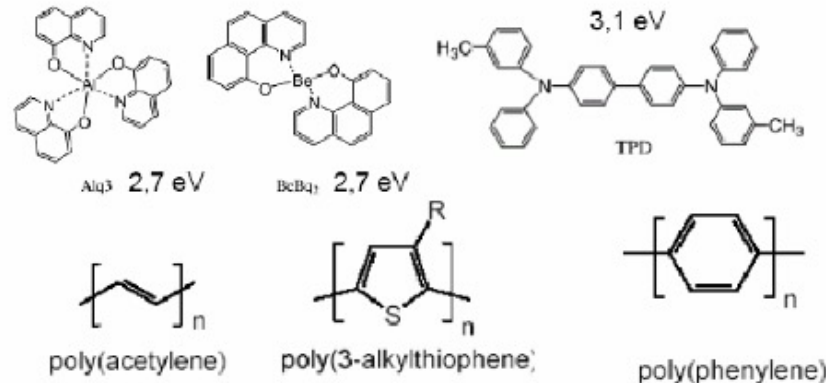


Elettronica organica: materiali e tecniche di fabbricazione

Materiali:

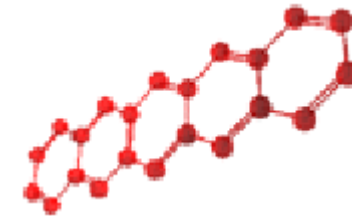
- Elettrodi: metalli, polimeri conduttivi
- Isolanti: polyimide, PVA, PVP,...
- **Semiconduttori organici**

Polimeri processabili
da fase liquida

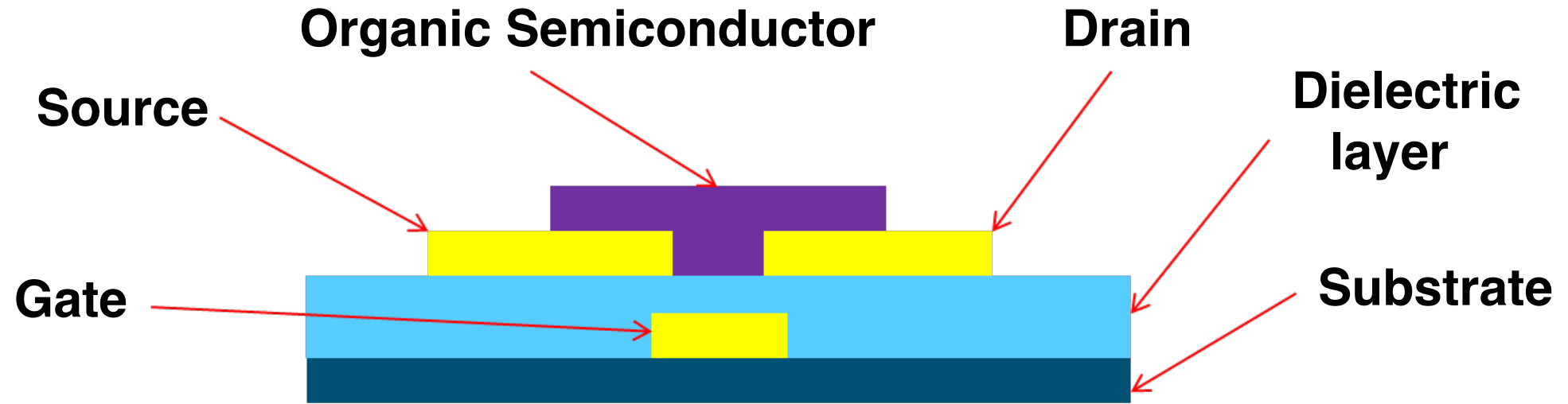


Piccole molecole

(deposizione tramite
evaporazione termica)

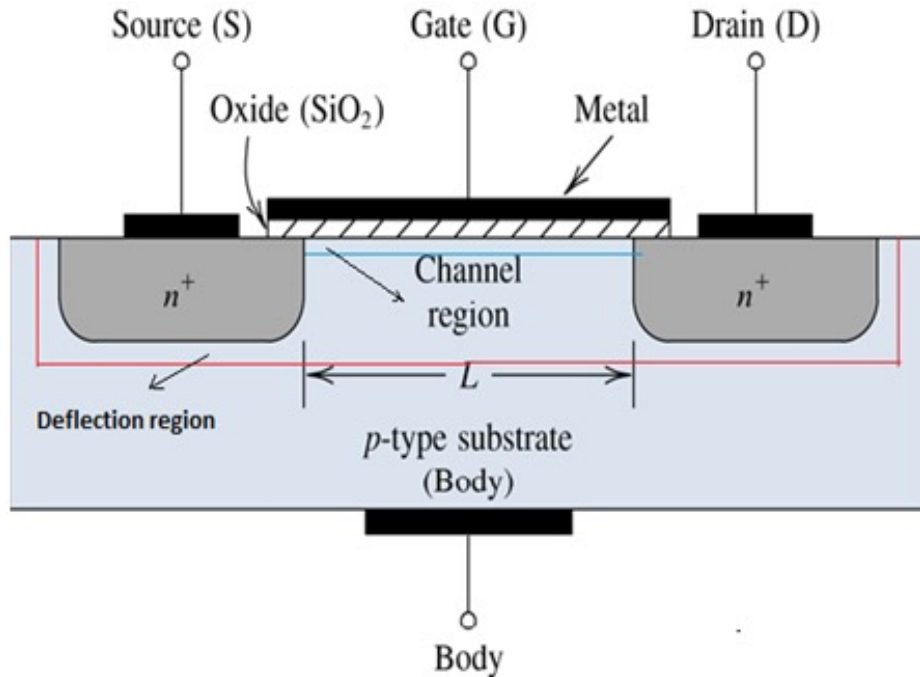


Transistor organici a film sottile (OTFT)



Organic Thin Film Transistor - OTFT

Digressione 3: Analogie col MOSFET



Presenza del BULK

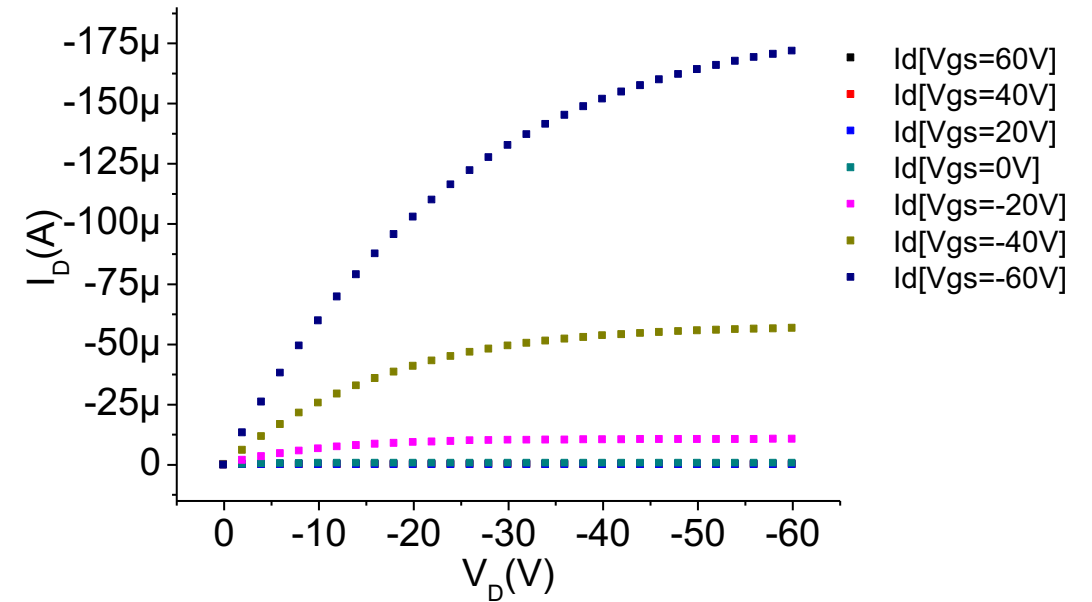
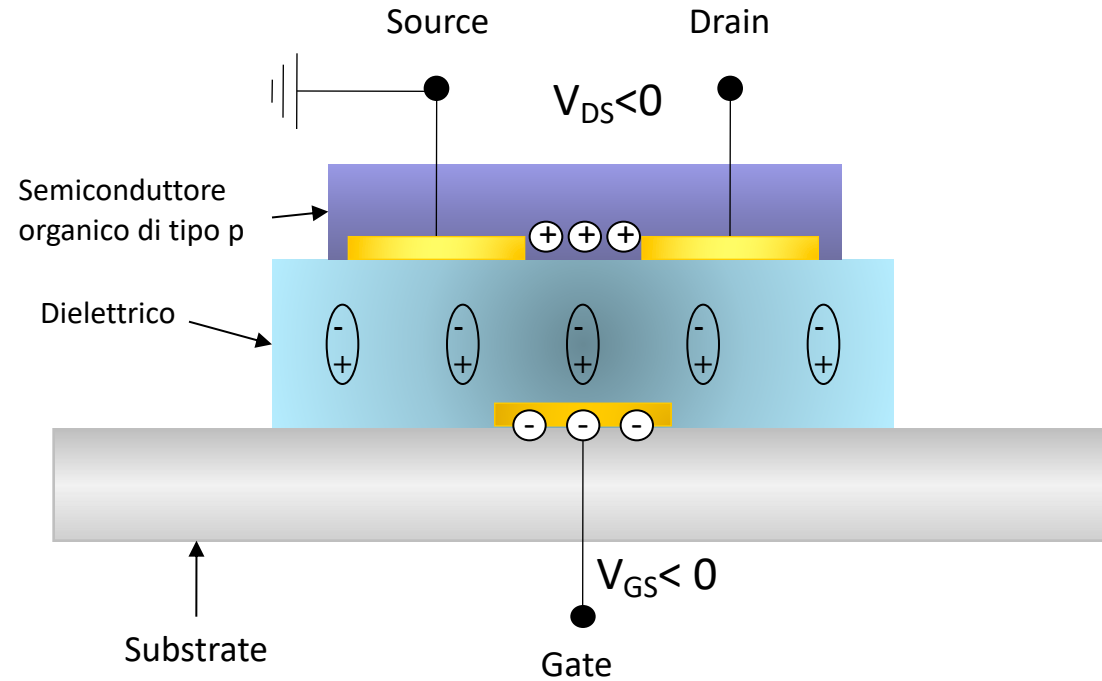
$$I_{DS} = \mu C_{ox} \frac{W}{L} \left[(V_{GS} - V_{TH}) V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right]$$

$$V_{TH} = V_{FB} - \frac{Q_B}{C_{ox}} + 2\phi_F$$

$$V_{FB} = \frac{\phi_M}{q} - \frac{\phi_{Si}}{q} - \frac{Q_0}{C_{ox}}$$

Per descrivere il comportamento dei dispositivi organici ad effetto di campo è possibile utilizzare la terminologia utilizzata per i corrispettivi dispositivi inorganici cristallini. **La relazione corrente di uscita (I_{DS})-tensione di soglia è la stessa ma la definizione di V_{TH} e mobilità è completamente diversa (principi fisici diversi).**

Transistor organici a film sottile (OTFT)



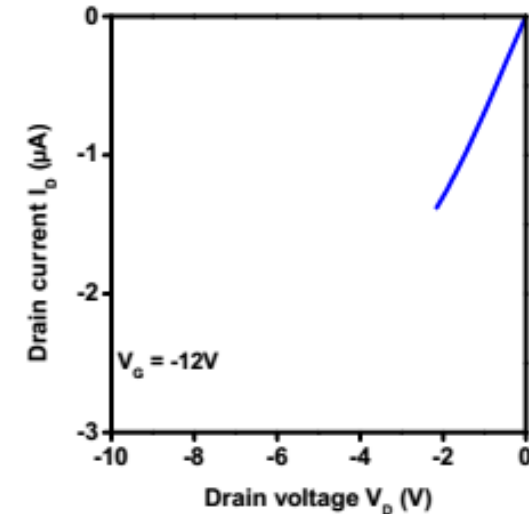
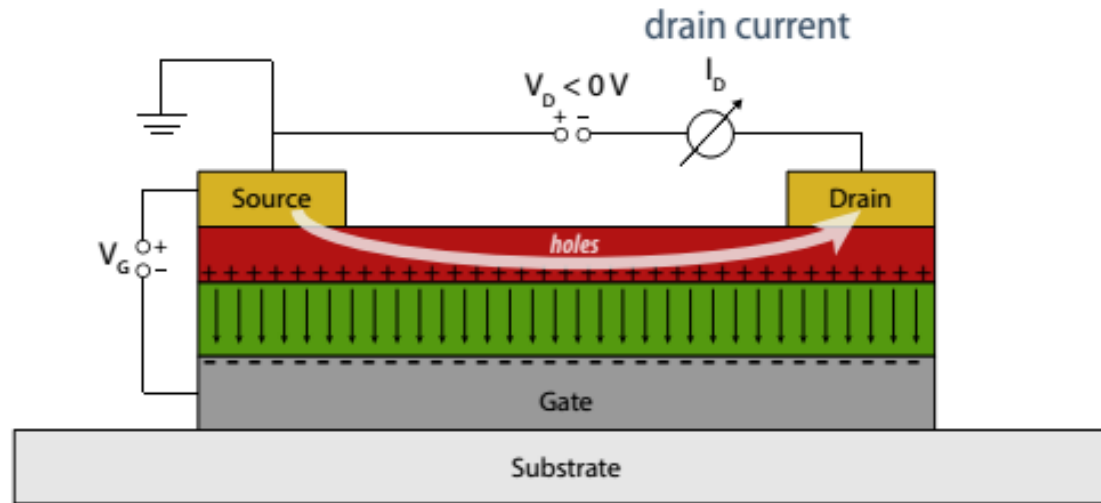
- Configurazione a film sottile → **NO BULK**
- Nessun layer di inversione → questi dispositivi elettronici funzionano in **accumulazione**

Esempio: semiconduttore di tipo p

- $V_{GS} < 0$: lacune sono richiamate all'interfaccia semiconduttore/dielettrico
- $V_{DS} < 0$: quando il canale è formato, le lacune possono muoversi dal source al drain

OTFT: zona lineare

- Per V_{DS} piccole, ($V_{DS} \ll V_{GS} - V_T$) la distribuzione di portatori nel canale è uniforme
 - Comportamento (idealmente) resistivo



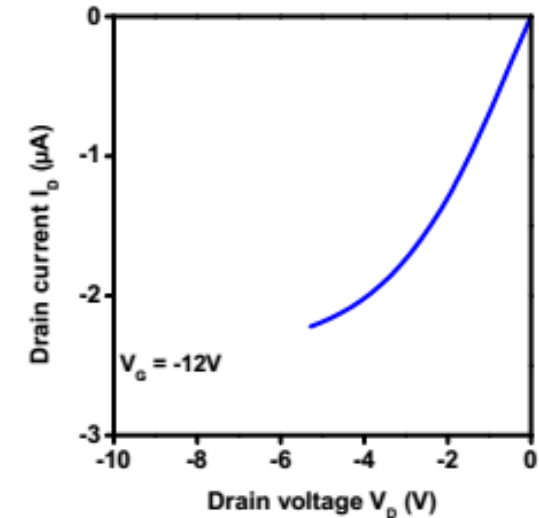
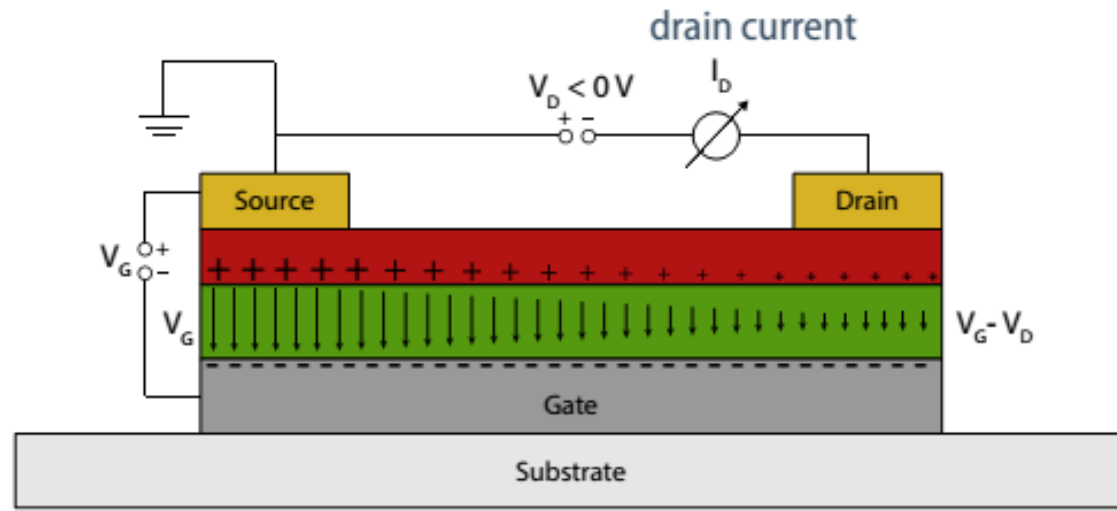
$$I_d = \frac{Z}{L} \mu C_i \left[(V_g - V_t) V_d - \frac{V_d^2}{2} \right]$$

$$I_d = \frac{Z}{L} \mu C_i \cdot (V_g - V_t) V_d$$

- Il termine $V_{DS}^2/2$ può essere considerato nullo
- La corrente I_{DS} dipende da V_{DS}

OTFT: zona di transizione

- Aumentando la V_{DS} , ($V_{DS} \leq V_{GS} - V_T$) la distribuzione di portatori nel canale non può più considerarsi uniforme
 - Regione di transizione

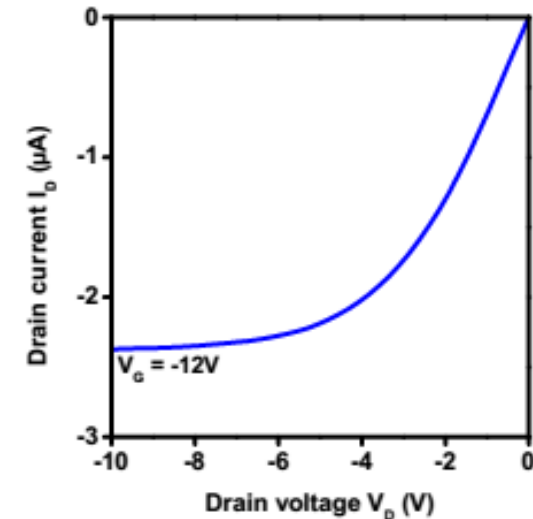
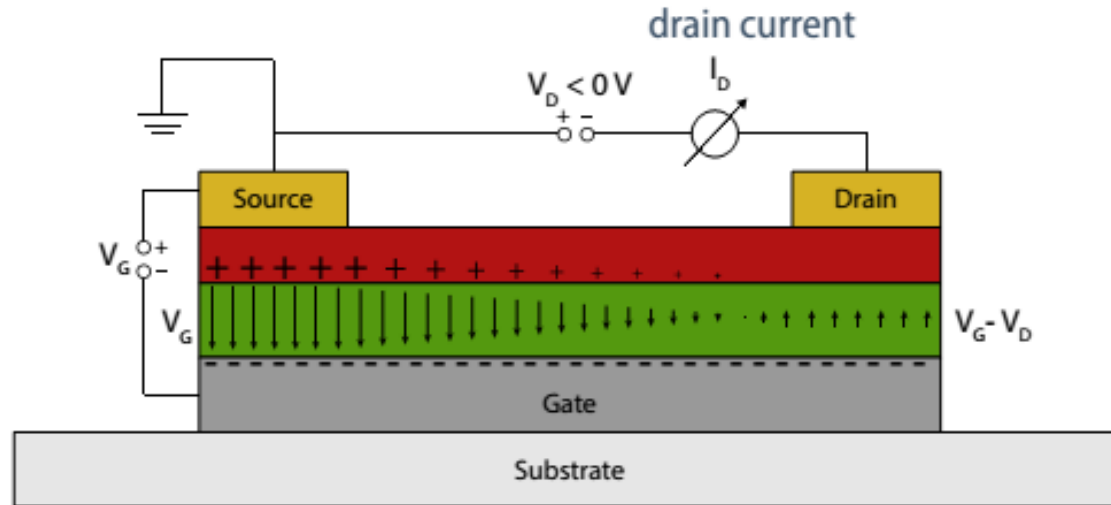


$$I_d = \frac{Z}{L} \mu C_i \left[(V_g - V_t) V_d - \frac{V_d^2}{2} \right]$$

- Il termine $V_{DS}^2/2$ deve essere considerato

OTFT: zona di saturazione

- Se V_{DS} continua a crescere V_{GD} comincia a diminuire ($V_{GD}=V_{GS}-V_{DS}$) determinando il fenomeno cosiddetto di “pinch-off”
 - La caduta di potenziale tra Gate e Drain V_{GD} è dunque inferiore di quella tra Source e Gate V_{GS} e la corrente satura



$$I_{dsat} = \frac{Z}{2L} \mu C_i (V_g - V_t)^2$$

Dipendenza quadratica della I_{DS} dal termine $(V_G - V_T)$

OTFT: estrapolazione dei parametri

Per estrapolare mobilità e tensione di soglia, si parte dall'equazione della corrente **in zona di saturazione** in modo da sfruttare la seguente relazione:

$$I_{DS} = \left(\frac{W}{2L}\right) C\mu (V_{GS} - V_{Th})^2$$

Si estrae la radice da entrambe le parti:

$$\sqrt{I_{DS}} = \sqrt{\frac{1}{2} \mu C \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{Th})} \quad \Rightarrow \quad \sqrt{I_{DS}} = \overset{m}{\sqrt{\frac{1}{2} \mu C \frac{W}{L}}} V_{GS} - \overset{q}{\sqrt{\frac{1}{2} \mu C \frac{W}{L}}} V_{Th}$$

In questo modo, avendo la $\sqrt{I_{DS}}$ in funzione della V_{GS} è possibile calcolare facilmente μ e V_{Th} :

$$V_{Th} = -\frac{q}{m}$$

$$\mu = \frac{m^2}{\frac{1}{2} C \frac{W}{L}}$$

Unità di misura:

$$\mu = \left[\frac{cm^2}{V*s}\right]; \quad V_{TH} = [V]$$

Sensori basati su OTFT

Come può un transistor organico (o un transistor in generale) essere utilizzato come sensore?

Si sfrutta il **cambiamento del suo comportamento elettrico (reversibile)** quando è esposto a qualche sostanza o stimolo esterno:

- *Agente Biologico o sostanza chimica*
- *Stimoli meccanici*
- *Variazioni di temperatura*

Vantaggi rispetto ad altri approcci

- a) Il FET può essere usato per **amplificare direttamente il segnale** → semplici circuiti di lettura
- b) Sensing + switching → possibilità di utilizzare **configurazioni a matrice**
- c) Si possono sfruttare le **variazioni di diversi parametri** quali per esempio
 - a) *Mobilità*
 - b) *Corrente di off*
 - c) *Tensione di soglia*
 - d) *Resistenza di contatto*
 - e) *...*

Sensori basati su OTFT

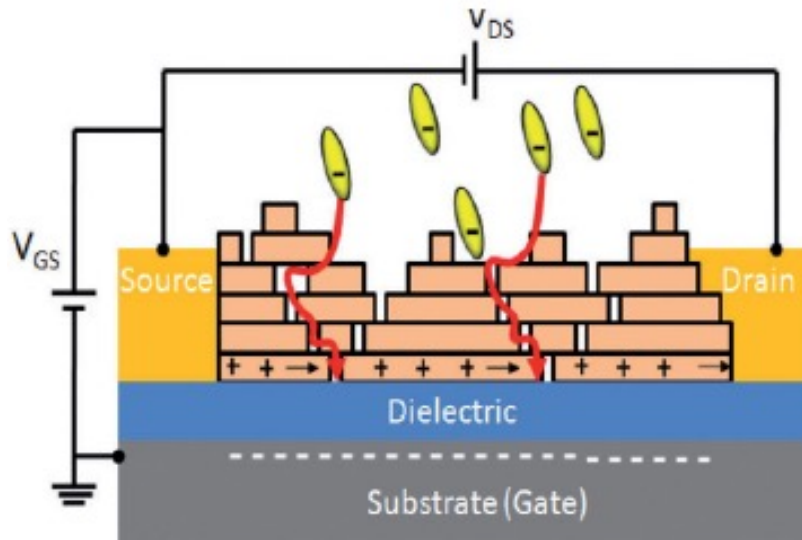
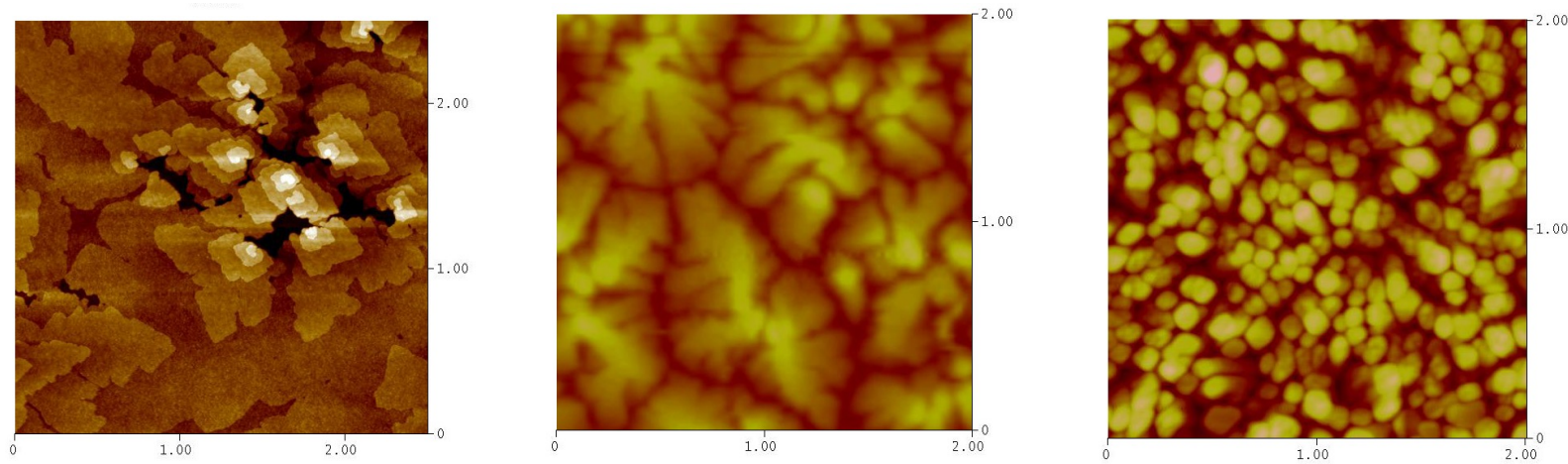
Concetto generale:

sfruttare le **non idealità** del dispositivo, **controllandole** in modo da poterle ricondurre a qualche variabile fisica o chimica d'interesse.

$$I_{DS} \propto (C, \mu, V_{TH}, R_{\text{contatto}}, W, L...)$$

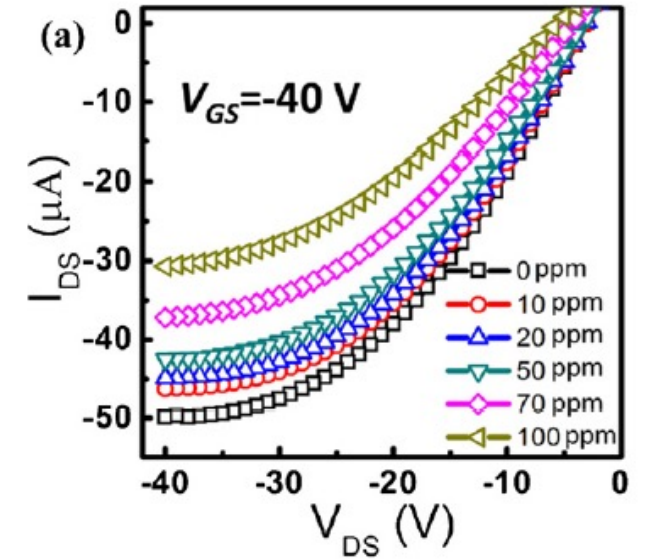
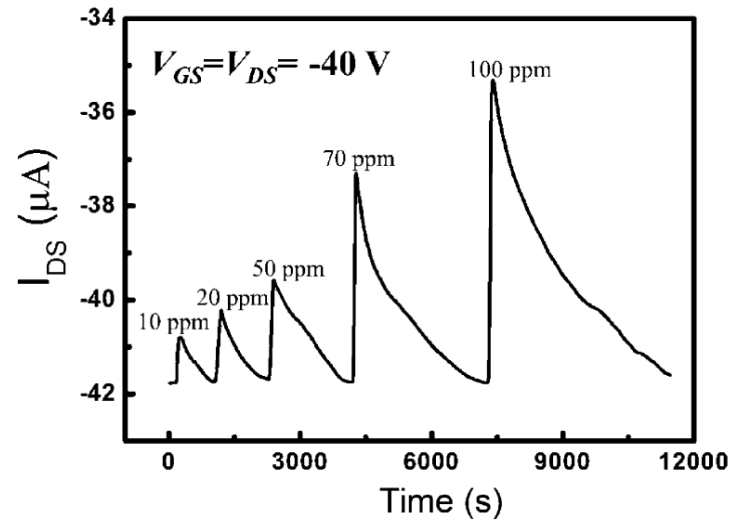
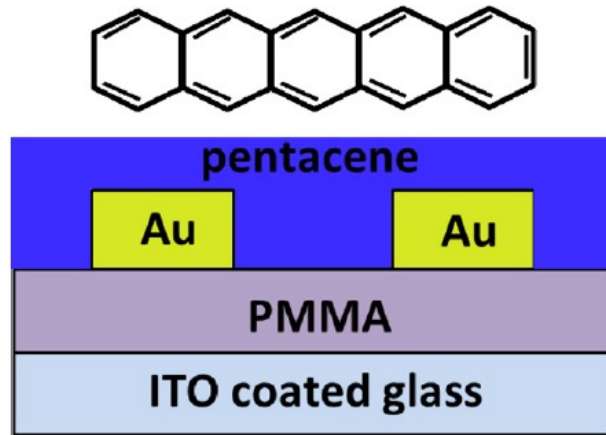
OTFT come sensore chimico: sensing di NH_3 (ammoniaca)

I semiconduttori organici sono generalmente film policristallini, caratterizzati cioè da zone in cui l'ordine molecolare è maggiore (**grani**) e zone "disordinate" (**bordi di grano**).



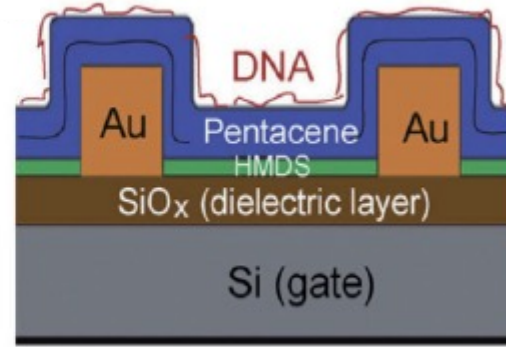
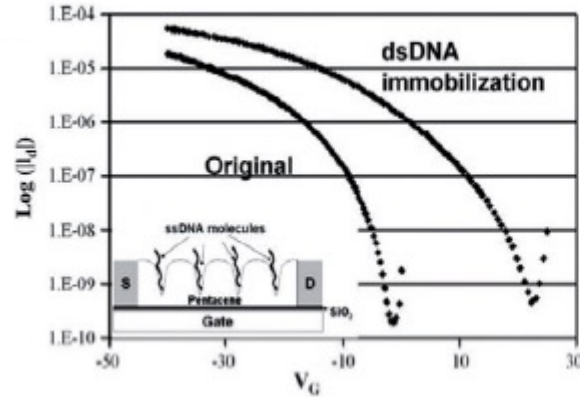
- A causa di questa particolare conformazione, i semiconduttori organici sono molto sensibili a ossigeno, umidità e agenti chimici i quali possono **diffondere nel layer e modularne le proprietà elettriche (principalmente la mobilità)**.

OTFT come sensore chimico: sensing di NH_3 (ammoniaca)

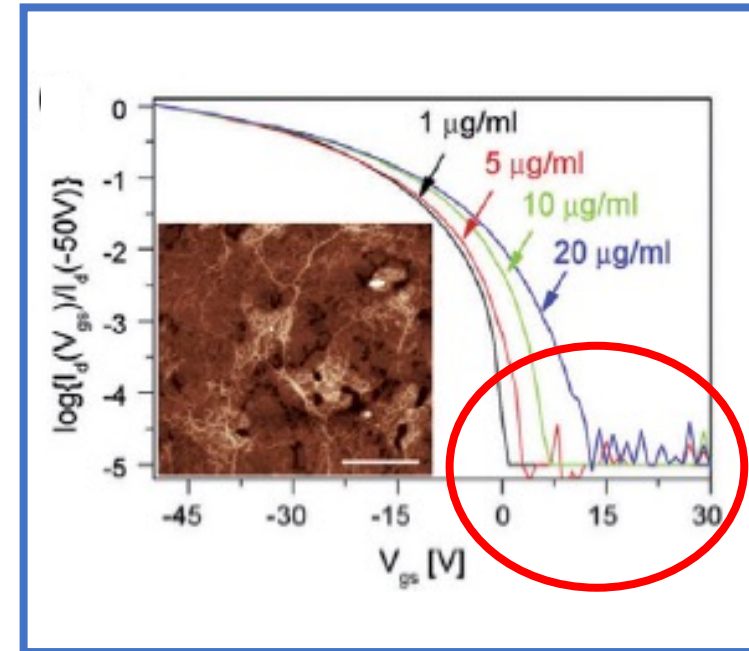


- La struttura del film di semiconduttore permette alle molecole di ammoniaca di diffondere:
 - **Riduzione della mobilità**
 - **Aumento della tensione di soglia** dovuta all'aumento di stati energetici trappola

OTFT come biosensore: sensing di DNA

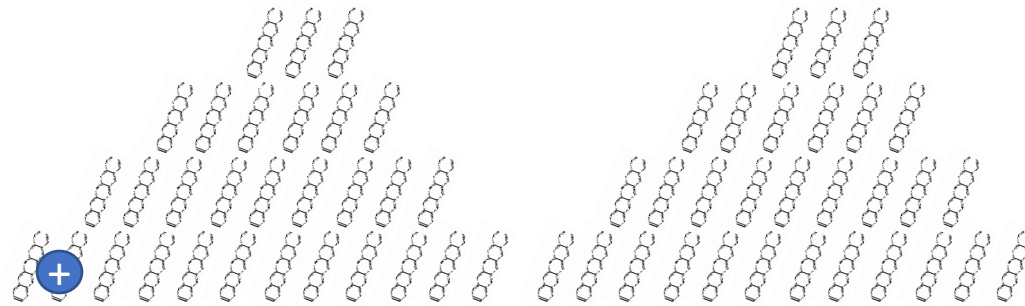
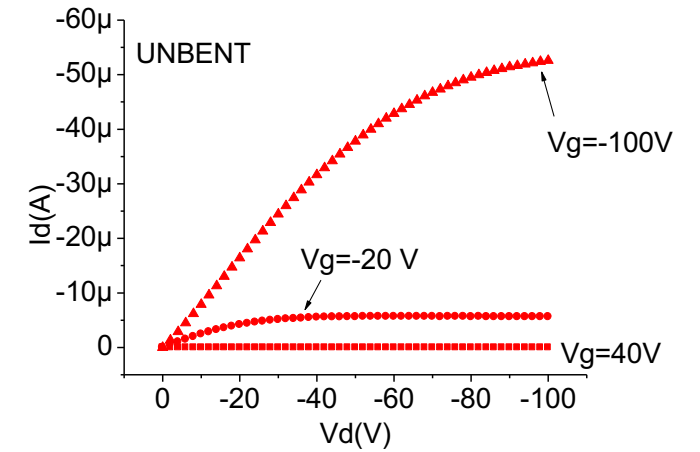
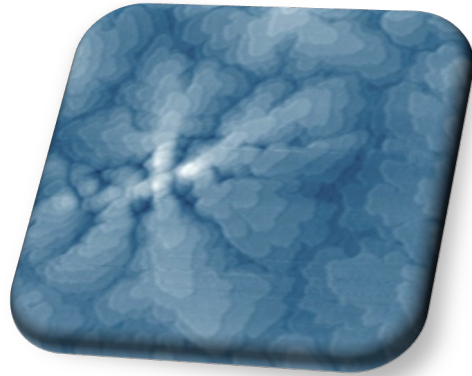


- Le molecole di DNA sono immobilizzate direttamente sulla superficie del semiconduttore (**adsorbimento**).
- Avendo le molecole di DNA una **carica netta non nulla** (negativa a pH fisiologico), esse provocano una **modulazione della densità di portatori di carica** dipendente dalla loro concentrazione
- $\rightarrow V_{TH}$ shift



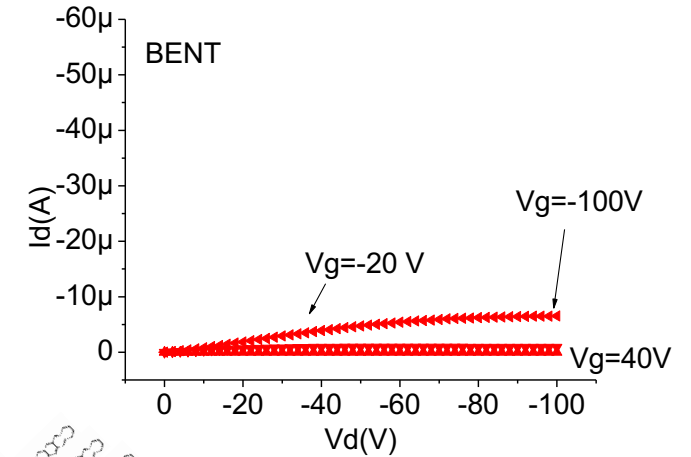
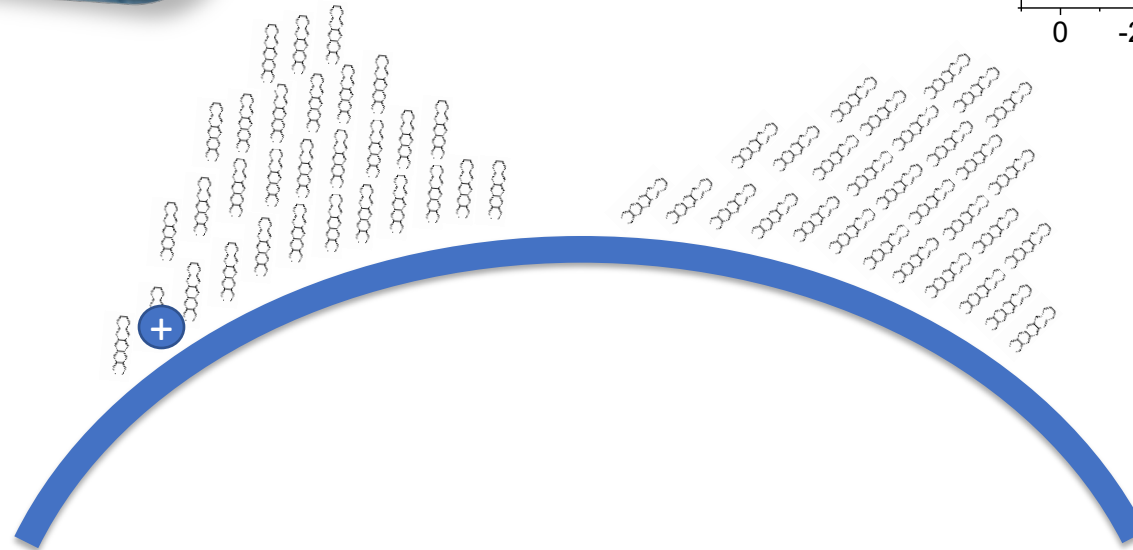
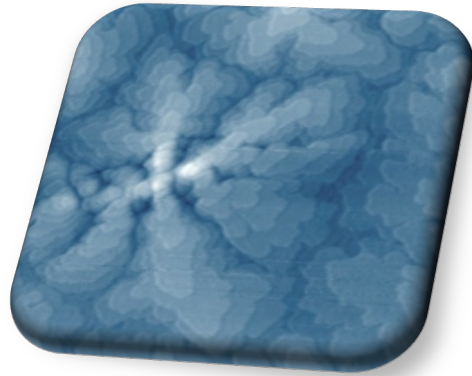
OTFT come sensore di deformazione

- La deformazione meccanica induce cambiamenti nella morfologia del layer di semiconduttore
- L'energia necessaria per permettere al portatore di passare da un grano all'altro aumenta → la corrente diminuisce



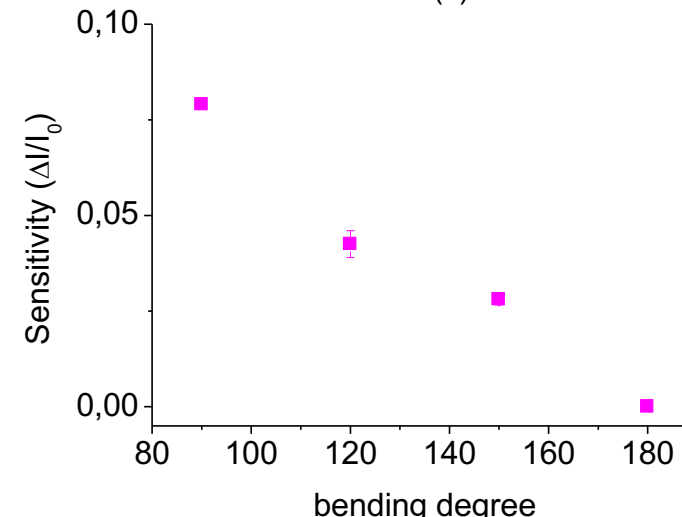
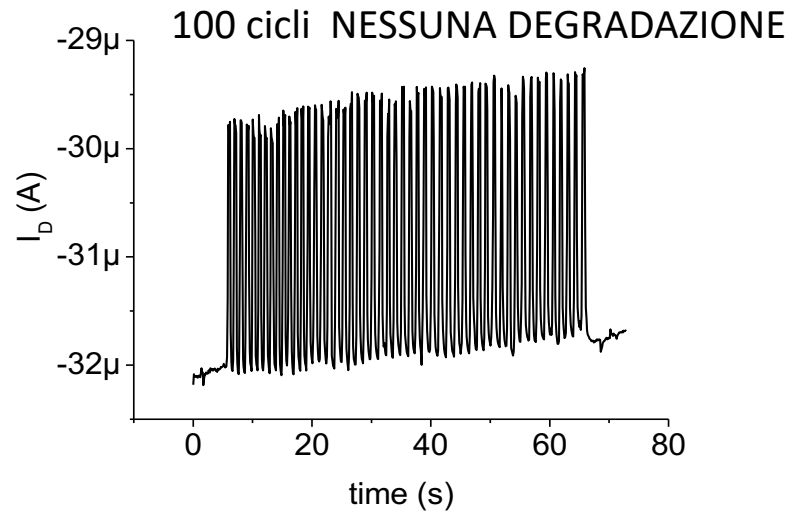
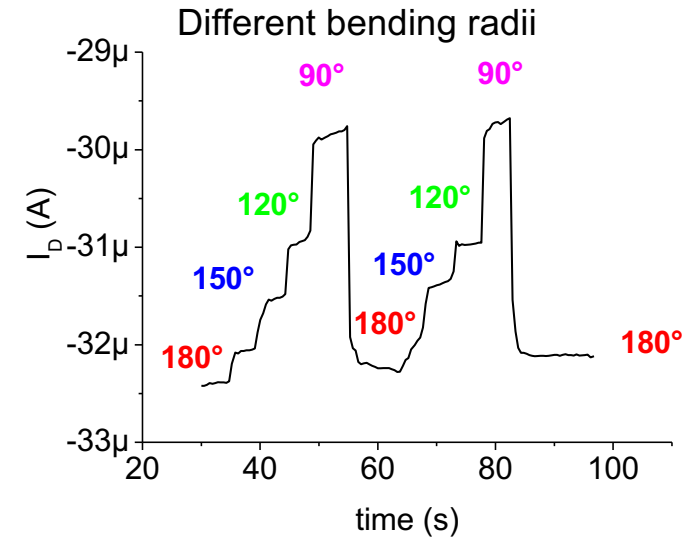
OTFT come sensore di deformazione

- La deformazione meccanica induce cambiamenti nella morfologia del layer di semiconduttore
- L'energia necessaria per permettere al portatore di passare da un grano all'altro aumenta → la corrente diminuisce



OTFT come sensore di deformazione

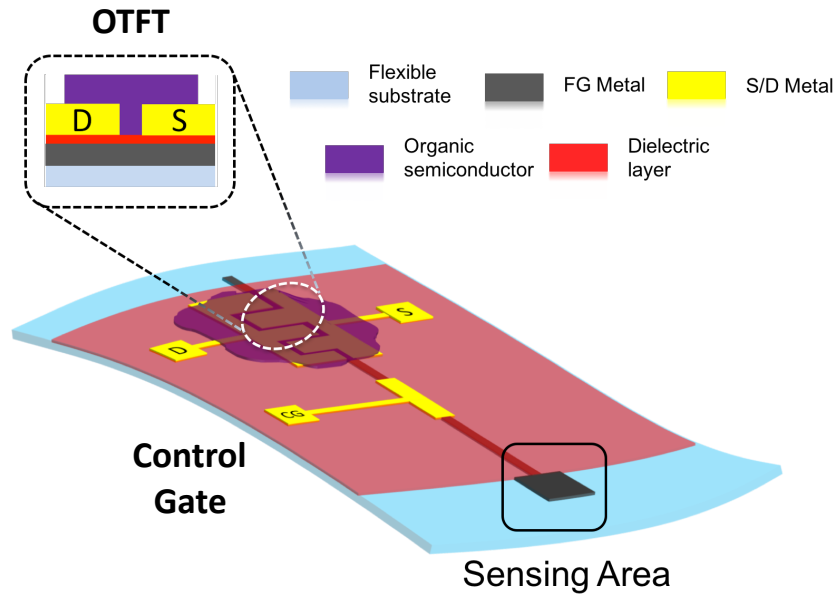
Il dispositivo può essere posizionato su un pezzo di tessuto e utilizzato, per esempio, per monitorare i **movimenti articolari**.



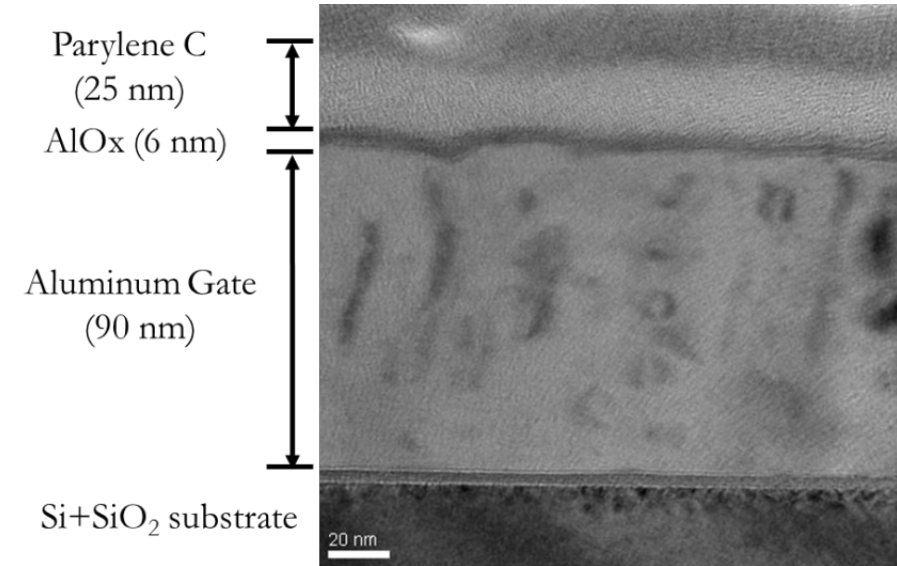


L'Organic Charge Modulated FET

OCMFET: struttura



L'OCMFET è un OTFT a basso voltaggio



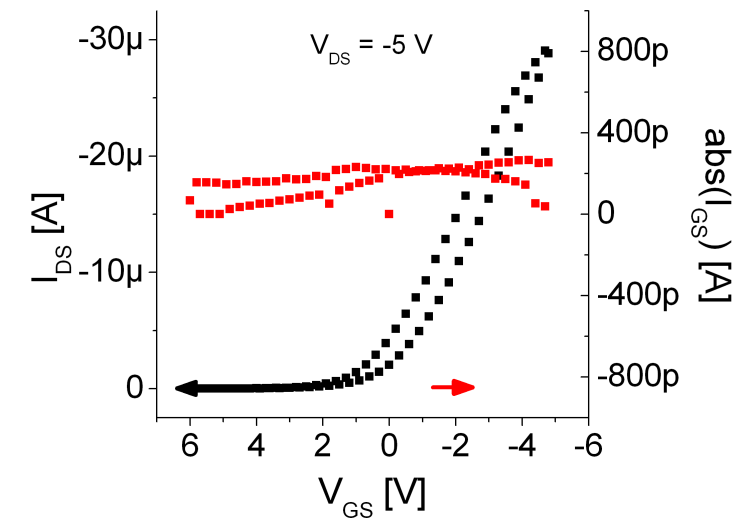
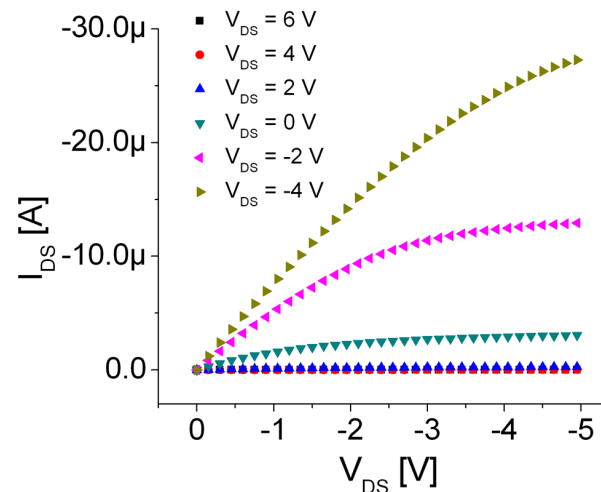
Substrati: PET, PEN, Kapton, Mylar, Parylene C (nanofilm)...

Metalli di floating gate: Al, Ti, Au...

Metallo di source e drain: Au

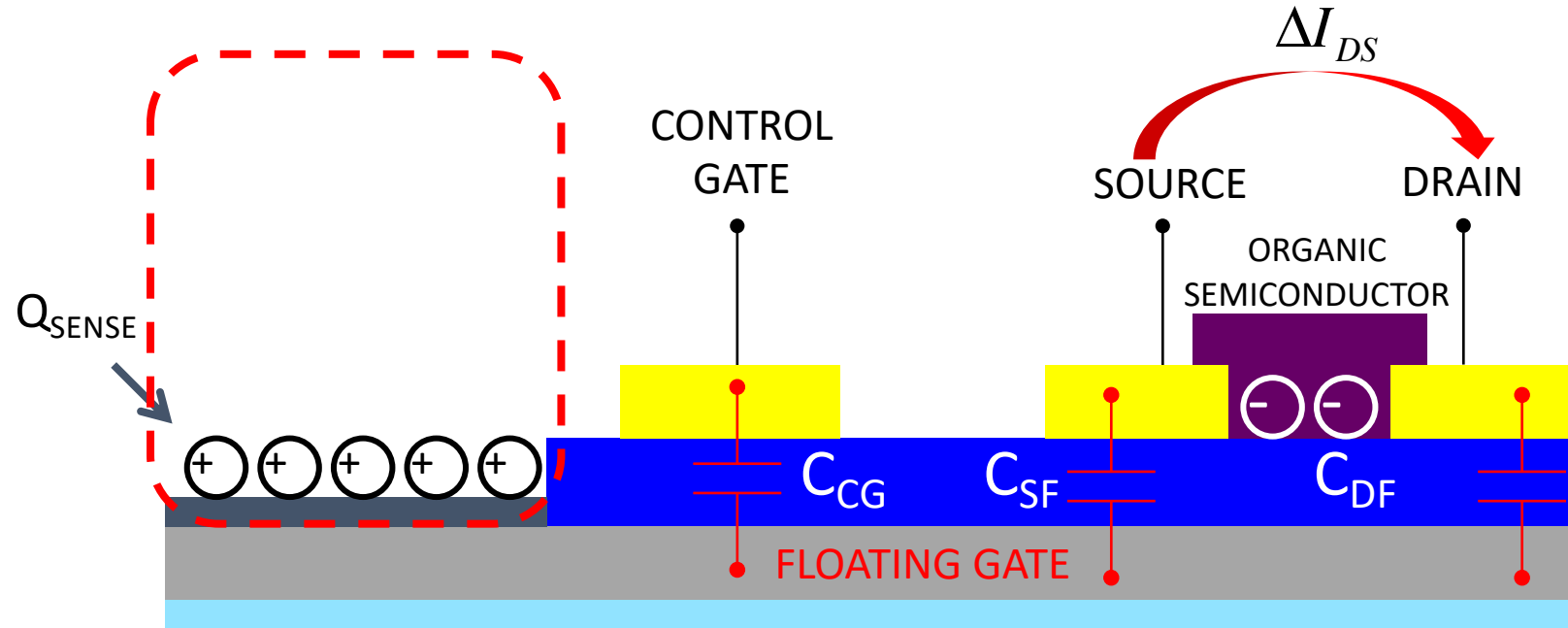
Semiconduttori organici: Pentacene, TIPS, N1400...

Dielettrici: Parylene C (Chemical Vapor Deposition - CVD), SU8 (fotoresist negativo, spin coating)...



OCMFET: struttura

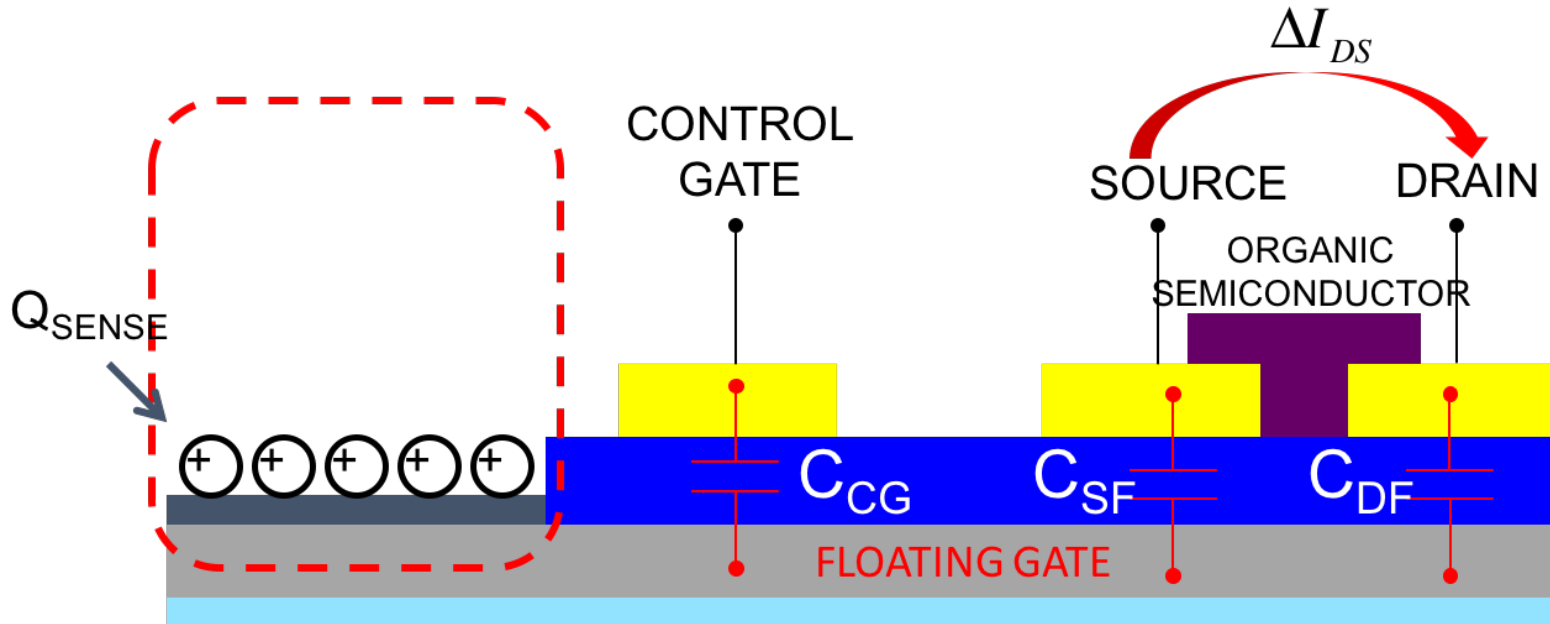
Sensore di carica



$$\Delta V_{TH} = -\frac{Q_{SENSE}}{C_{TOT}}$$

Meccanismo di trasduzione: **variazione della V_{TH} in funzione della carica indotta** sull'area sensibile. Questa variazione è direttamente apprezzabile osservando la **modulazione della corrente di uscita I_{DS}** .

OCMFET: Principio di funzionamento

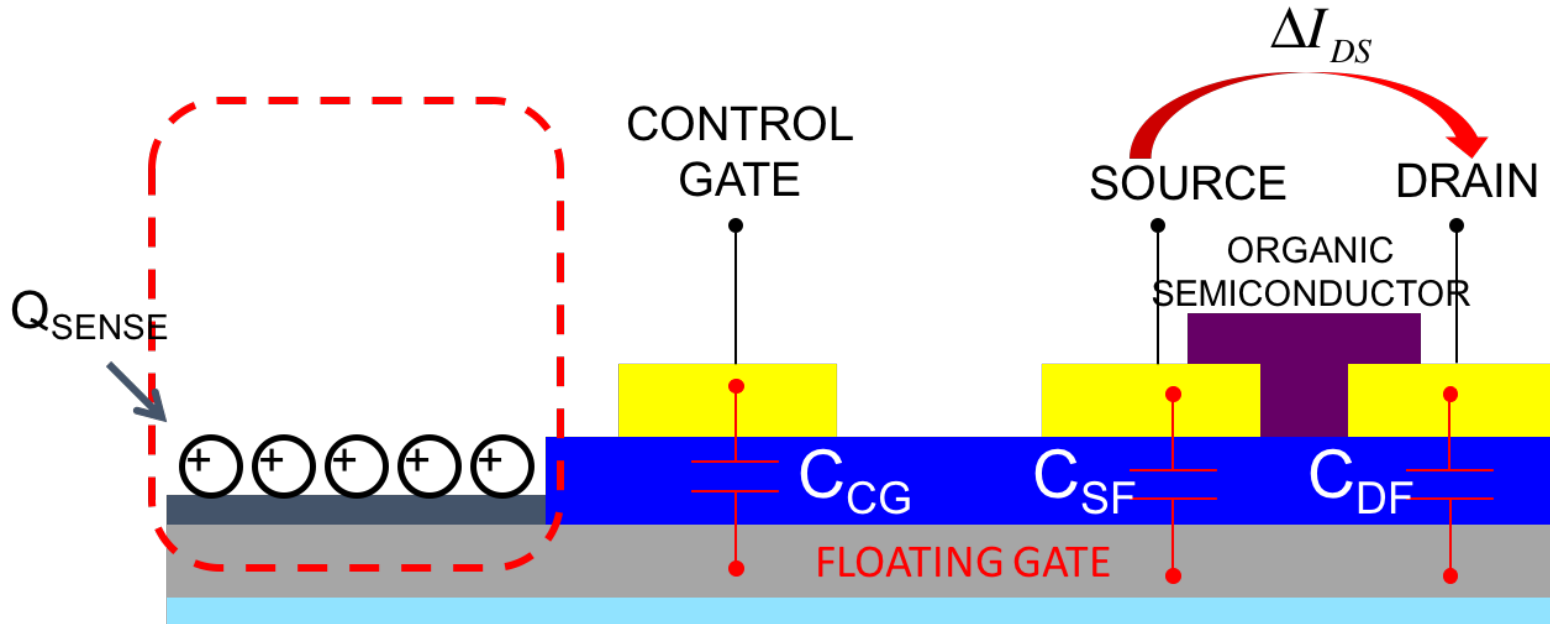


Per definizione, la carica all'interno del floating gate deve rimanere costante:

$$Q_{TOT} = C_{CG}(V_{FG} - V_{CG}) + C_{SF}(V_{FG} - V_S) + C_{DF}(V_{FG} - V_D)$$

$$Q_{TOT} = V_{FG}(C_{CG} + C_{SF} + C_{DF}) - C_{CG}V_{CG} - C_{SF}V_S - C_{DF}V_D$$

OVMFET: Principio di funzionamento

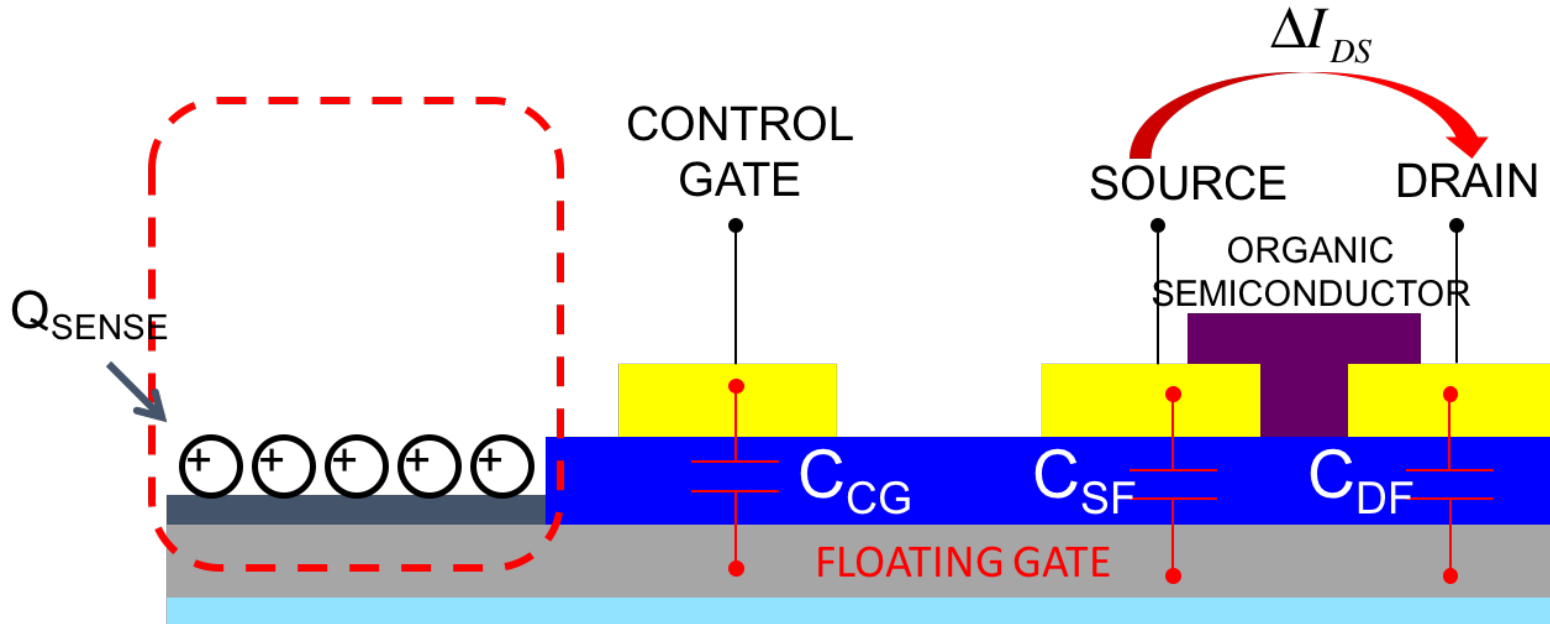


Definendo $C_{TOT} = C_{CG} + C_{SF} + C_{DF}$ ed esplicitando per la V_{FG} si ottiene:

$$V_{FG} = \frac{C_{CG}}{C_{TOT}} V_{CG} + \frac{C_{SF}}{C_{TOT}} V_S + \frac{C_{DF}}{C_{TOT}} V_D - \frac{Q_{TOT}}{C_{TOT}}$$

che rappresenta il potenziale del floating gate.

OCMFET: Principio di funzionamento

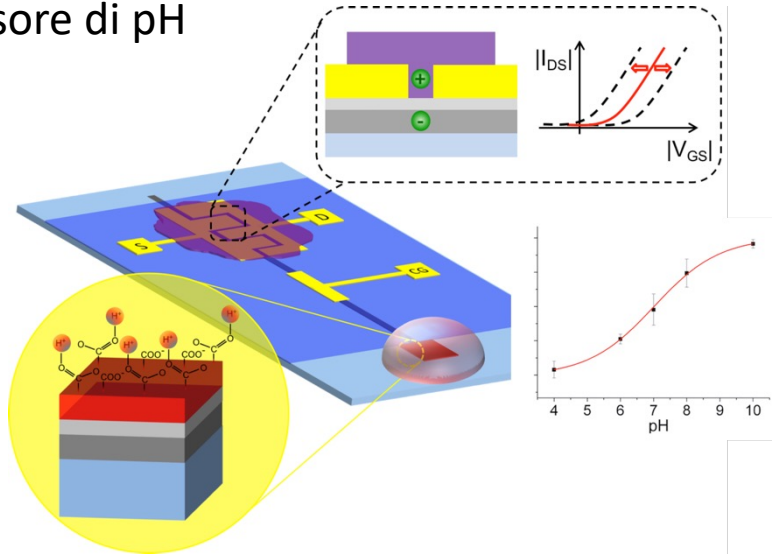


Q_{TOT} è un termine che tiene conto della carica "nativa" presente nel floating gate (Q_0) e della eventuale carica indotta sull'area sensibile da un qualche fenomeno d'interesse (variazione di **pH** di una soluzione, immobilizzazione sulla superficie dell'area sensibile di molecole di **DNA**, applicazione di una **forza**, variazione di **temperatura**...):

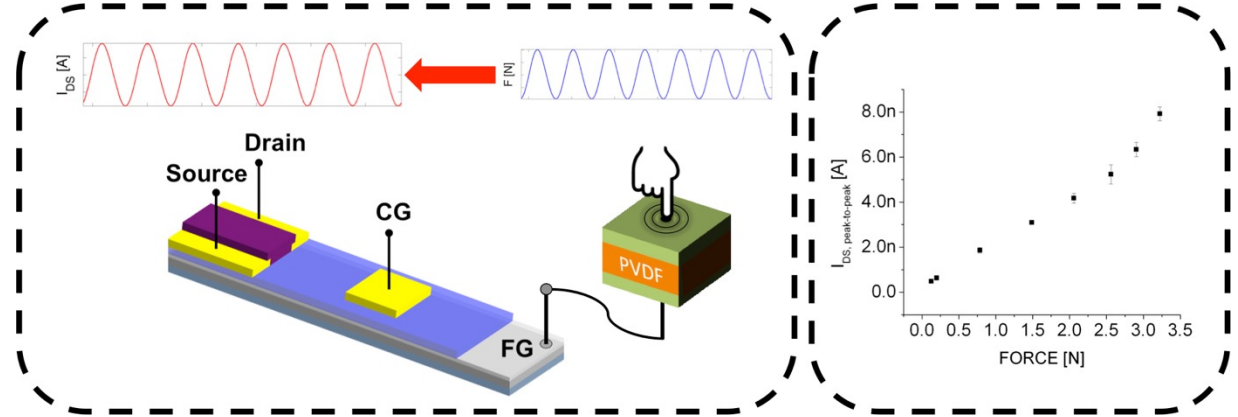
$$Q_{TOT} = Q_0 + Q_{SENSE}$$

OCMFET: qualche applicazione d'interesse biomedico

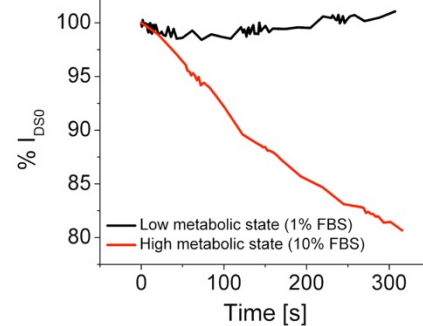
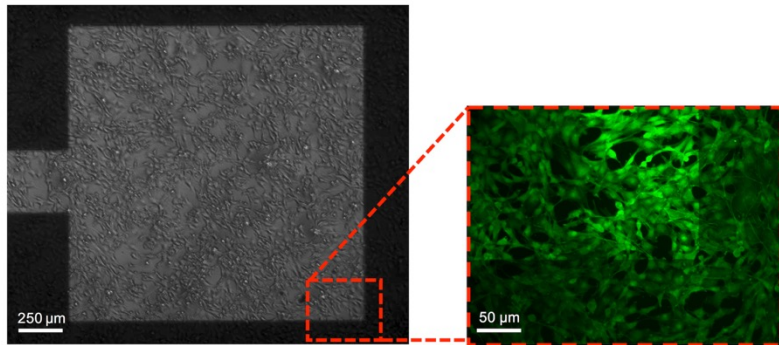
Sensore di pH



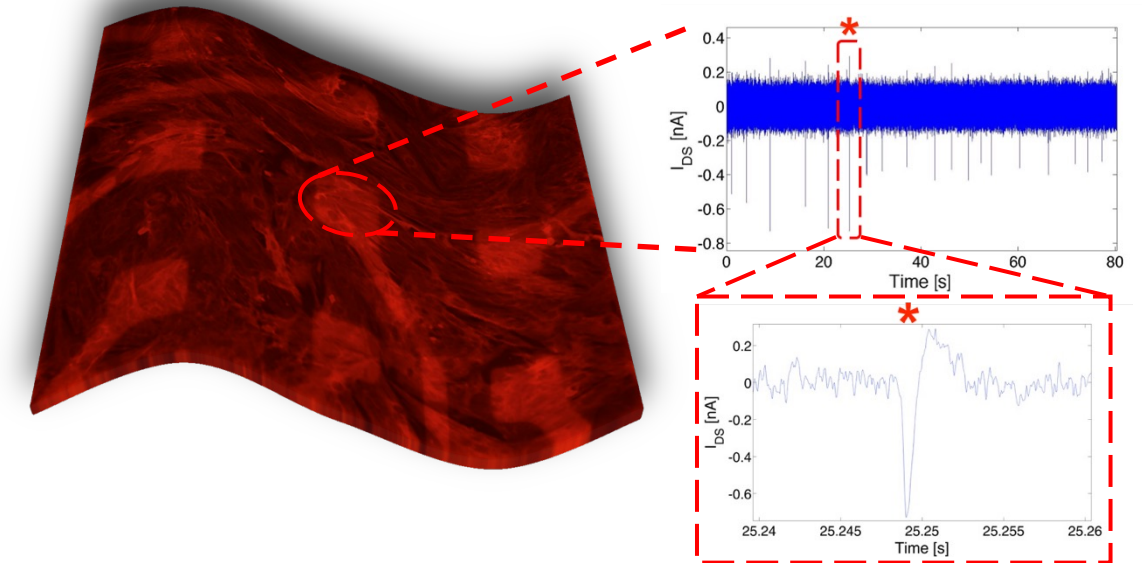
Sensore di forza (e temperatura)



Sensore di attività metabolica cellulare



OCMFET



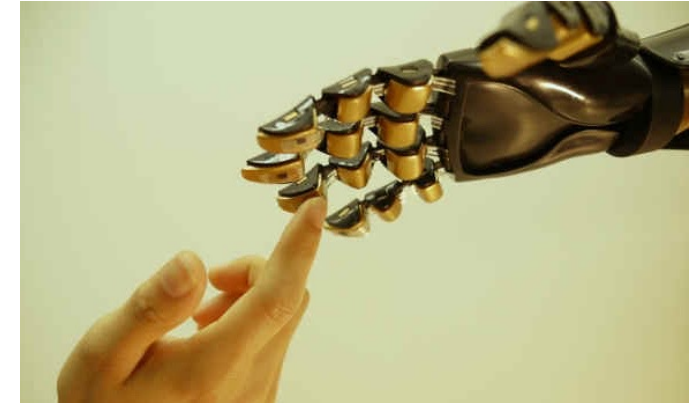
Sensore di attività elettrica cellulare

OCMFET per applicazioni epidermiche

OCMFET per applicazioni epidermiche

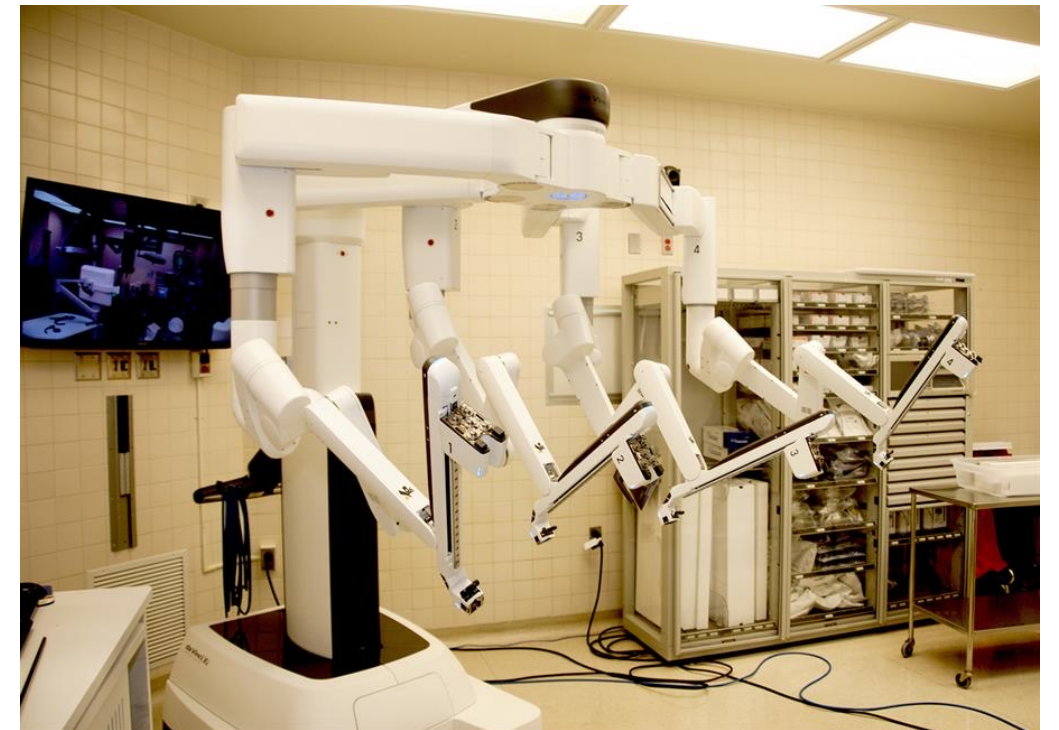
- **Pelle robotica**

- Interazione con l'ambiente (feedback tattile)
- Sicurezza (interazione robot-essere umano)
- Manipolazione degli oggetti (robotic surgery)



- **Pelle artificiale (e-skin)**

- Integrazione di sensori (es. rilevazione del cortisolo)
- Misura ECG o sEMG (surface EMG)



OCMFET per applicazioni epidermiche

- **Pelle robotica**

- Interazione con l'ambiente (feedback tattile)
- Sicurezza (interazione robot-essere umano)
- Manipolazione degli oggetti (robotic surgery)

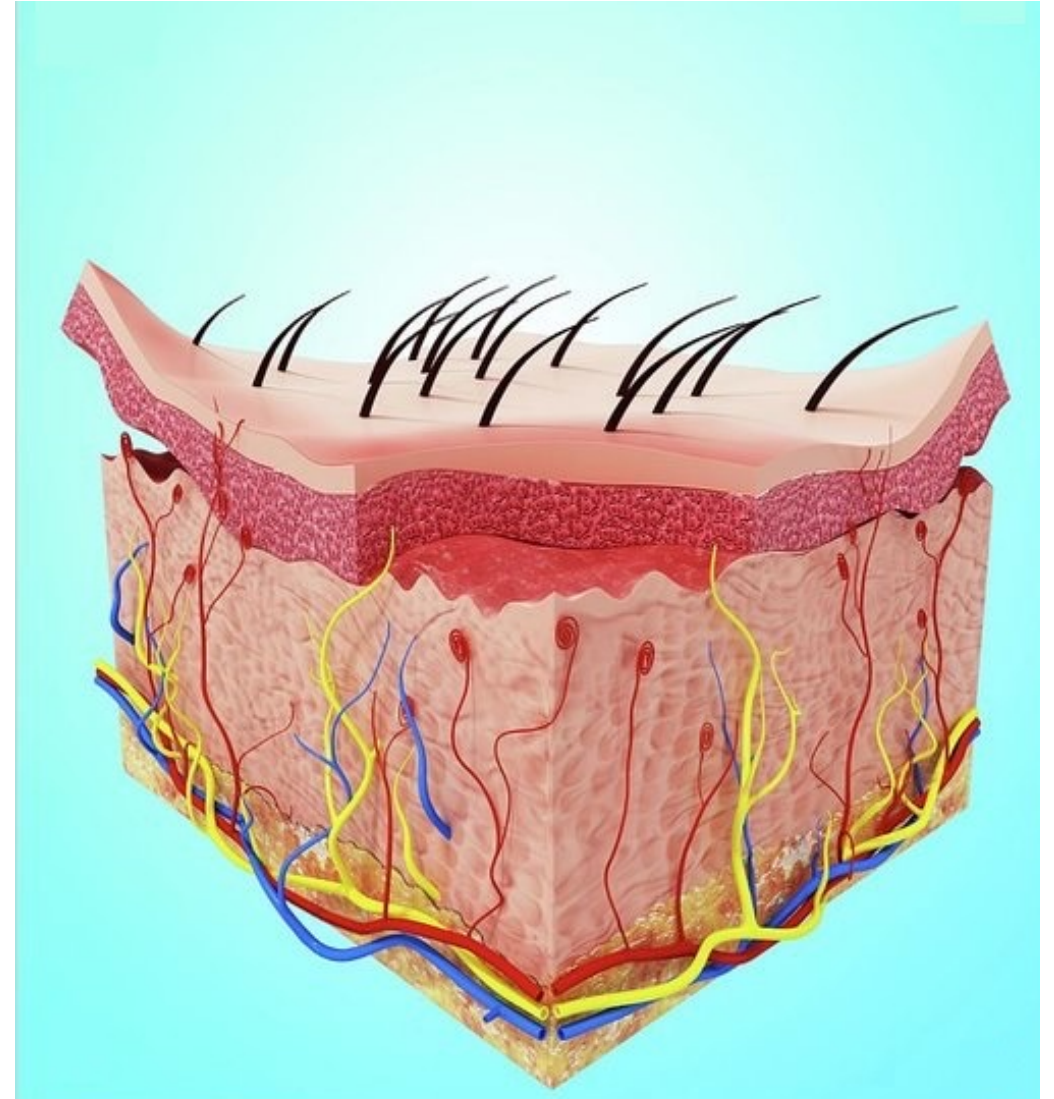
- **Pelle artificiale (e-skin)**

- Integrazione di sensori (es. rilevazione del cortisolo)
- Misura ECG o sEMG (surface EMG)



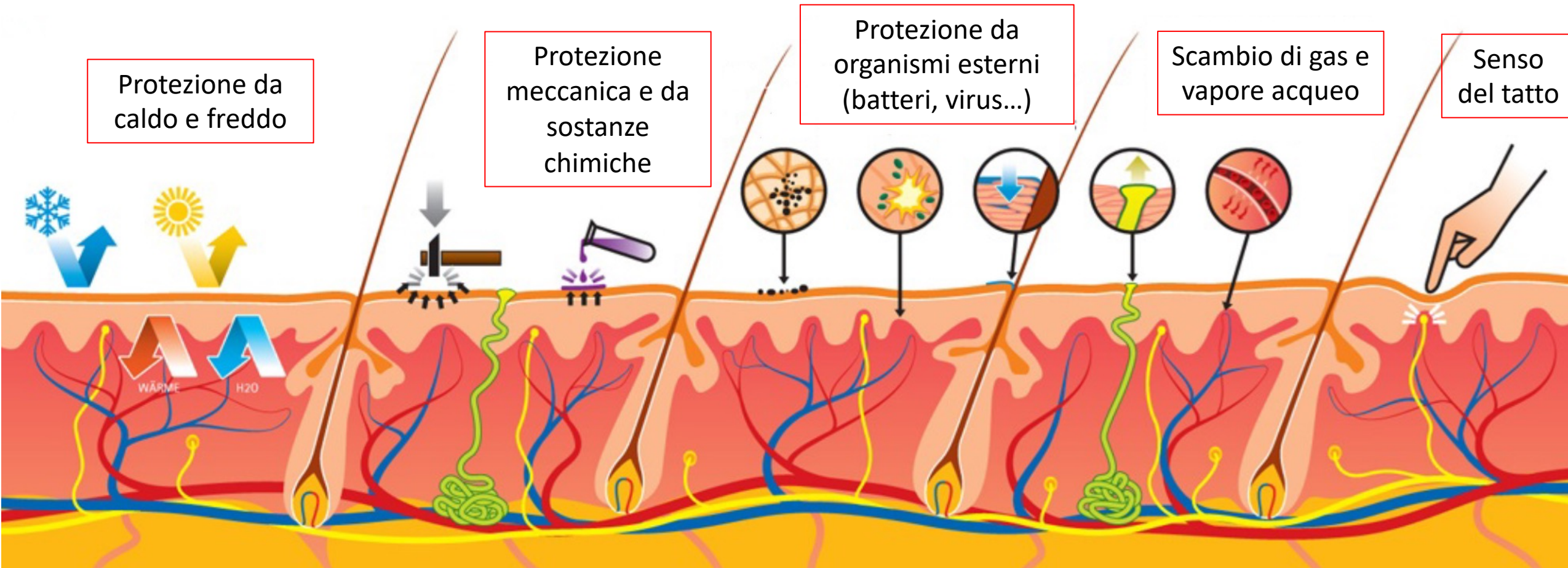
La pelle umana

- Organo più esteso del corpo umano
- Composta da tre diversi strati. Dal più esterno al più interno si trovano:
 - epidermide
 - **derma**
 - ipoderma



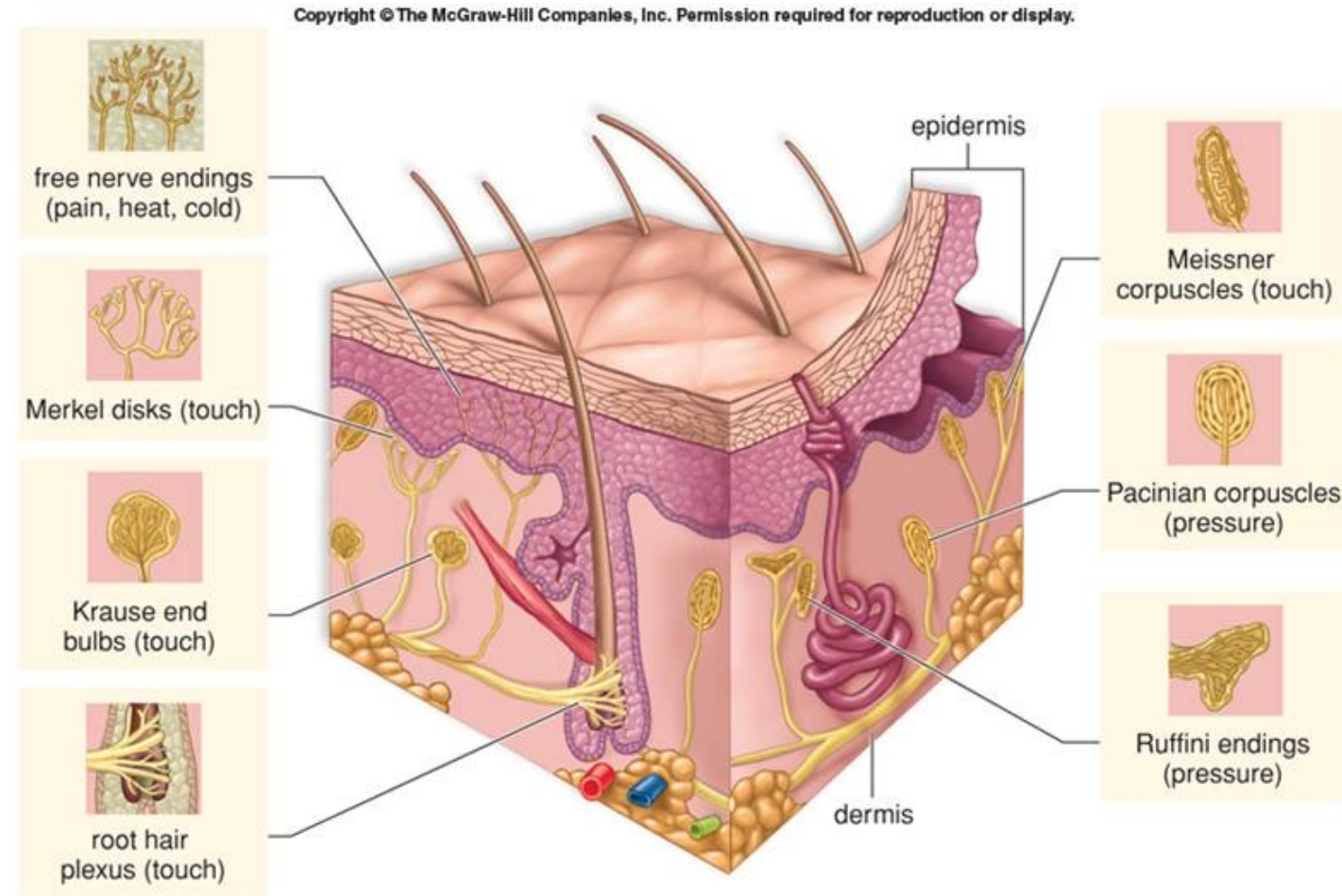
La pelle umana

La pelle svolge un elevato numero di funzioni.



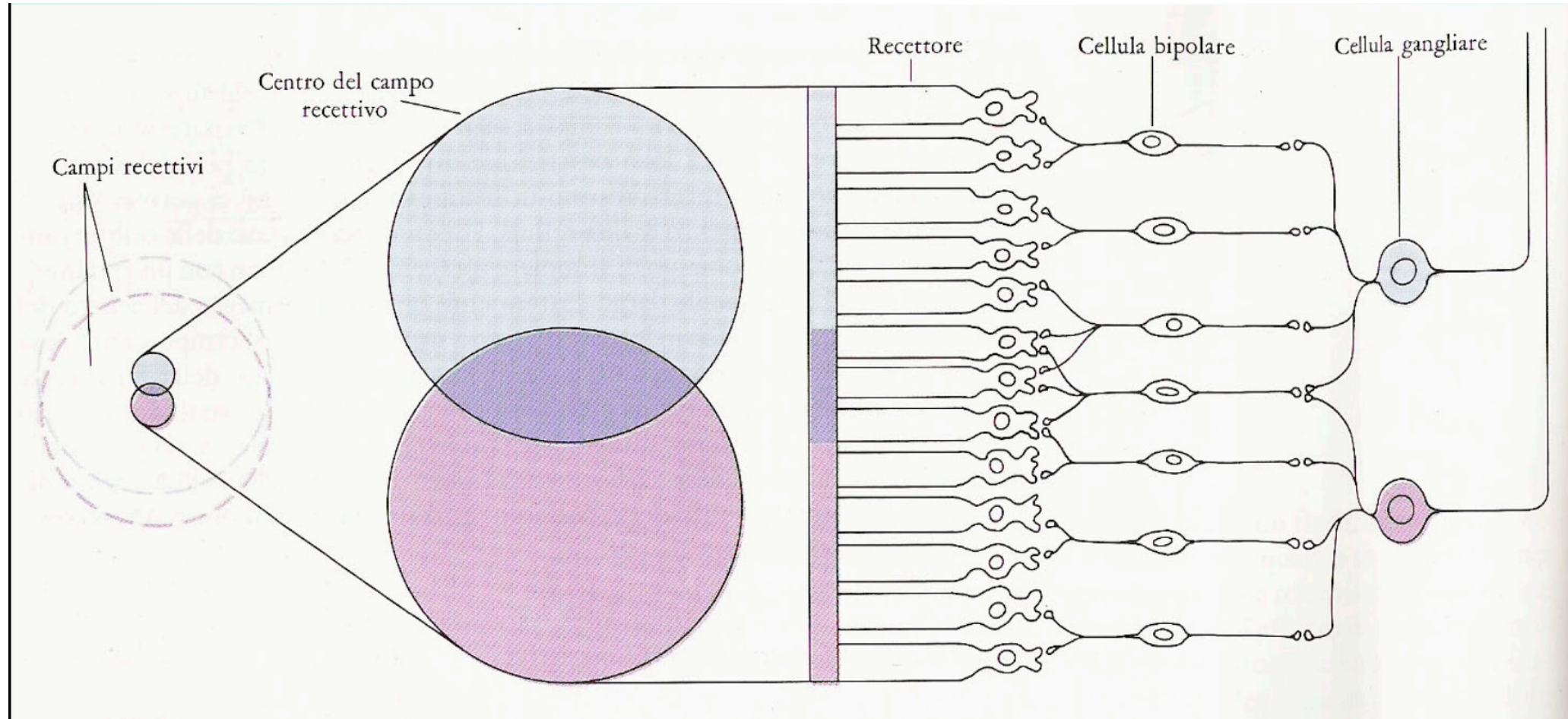
Il senso del tatto

- Trasduzione delle **sollecitazioni meccaniche** sulla pelle
- Percezione delle **variazioni di temperatura**
- Sensazione di **dolore**
- **Propriocezione** (posizione degli arti, forza esercitata dai/sui muscoli e dai/sui legamenti, ...)



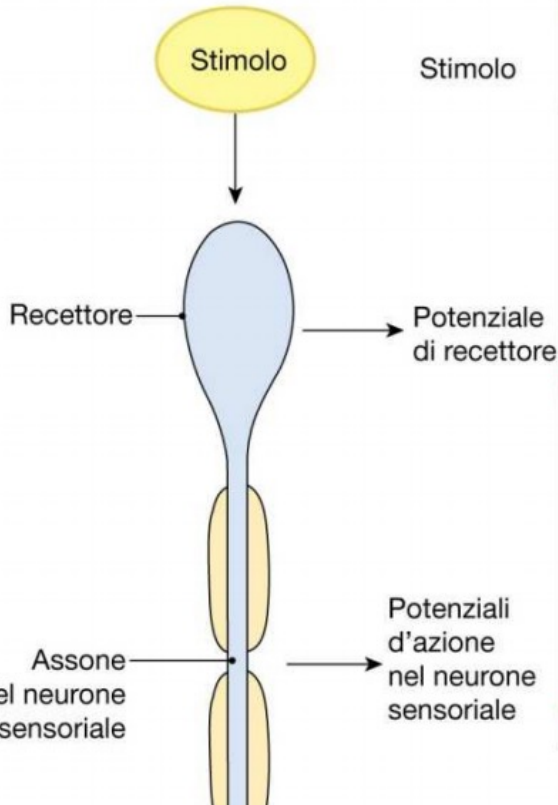
Campi recettivi (in breve)

Esempio: campo recettivo di una cellula visiva. Area della retina in cui la stimolazione luminosa dei fotorecettori determina un aumento o una diminuzione della frequenza di scarica della cellula gangliare a cui i recettori afferiscono.



Adattamento di un recettore (in breve)

Recettore sensoriale



(a) I recettori tonici sono recettori ad adattamento lento che continuano a rispondere per tutta la durata di uno stimolo.

Stimolo

Potenziale di recettore

Potenziali d'azione nel neurone sensoriale

Tempo →

(b) I recettori fasici si adattano rapidamente a uno stimolo costante e si inattivano. Quando lo stimolo cessa, i recettori fasici possono attivarsi brevemente di nuovo.

Stimolo

Potenziale di recettore

Potenziali d'azione nel neurone sensoriale

Tempo →

Adattamento lento.

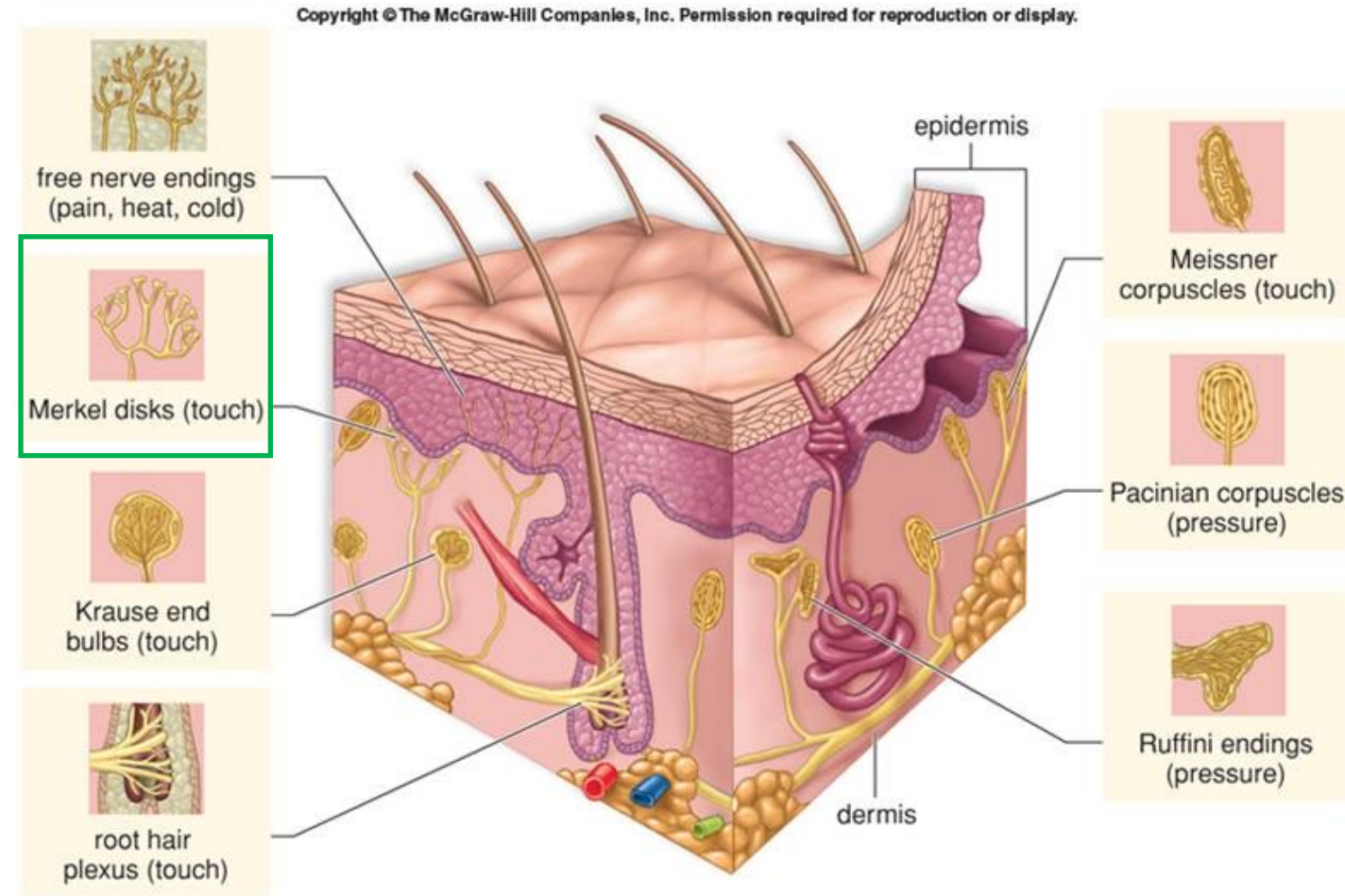
Si attivano durante tutta la durata dello stimolo (info sulla durata)

Adattamento rapido.

Si attivano durante la fase iniziale e finale dello stimolo (info sulla velocità)

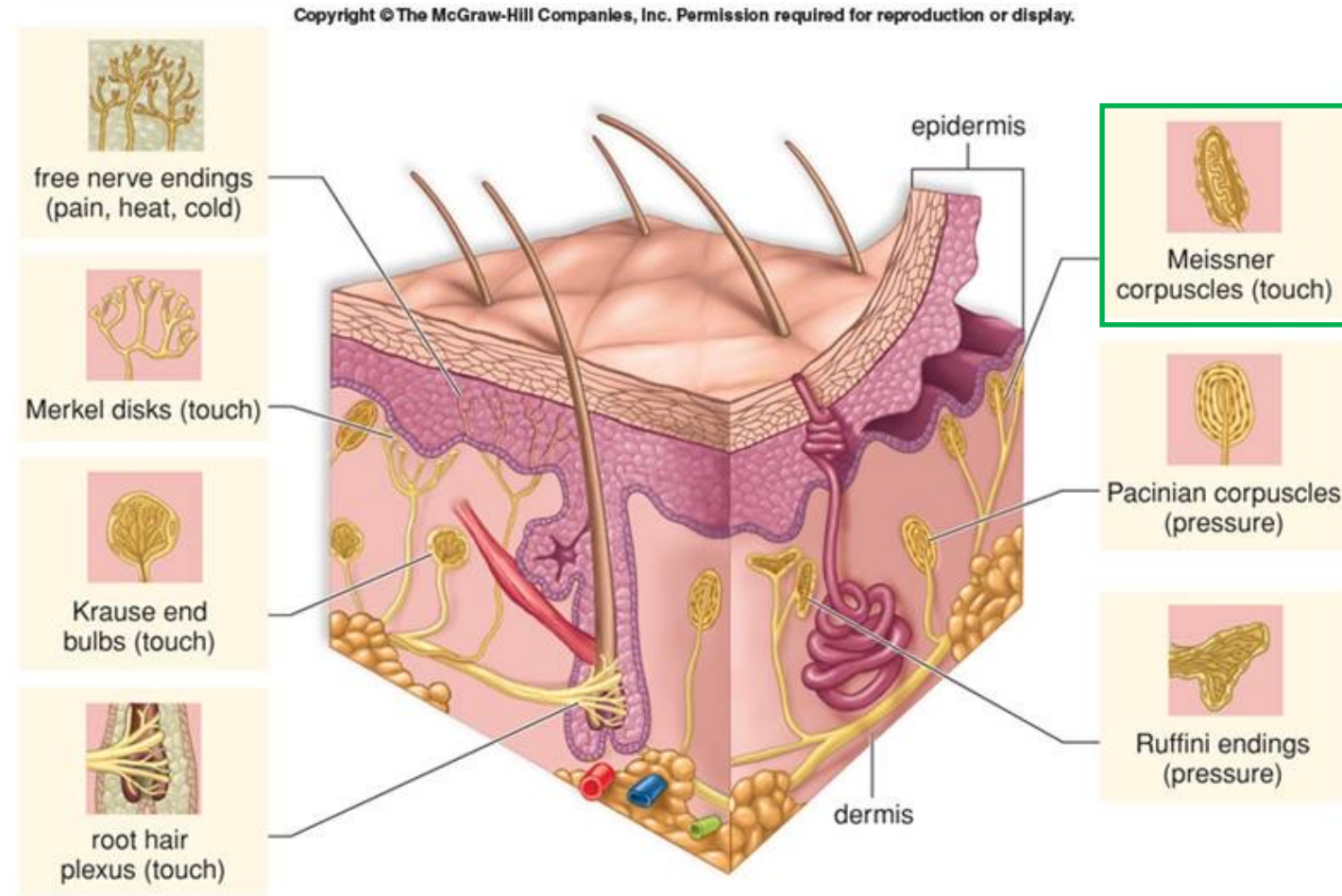
Meccanorecettori

- **Dischi di Merkel:** questi sensori sono caratterizzati da un **rate di adattamento lento**, una **piccola dimensione del campo recettivo** (dunque presentano **un'alta risoluzione**), e permettono di avvertire il contatto continuo di oggetti sulla cute, pressione sulla cute e caratteristiche spaziali di un oggetto
- **Esempio di attivazione:** lettura in Braille



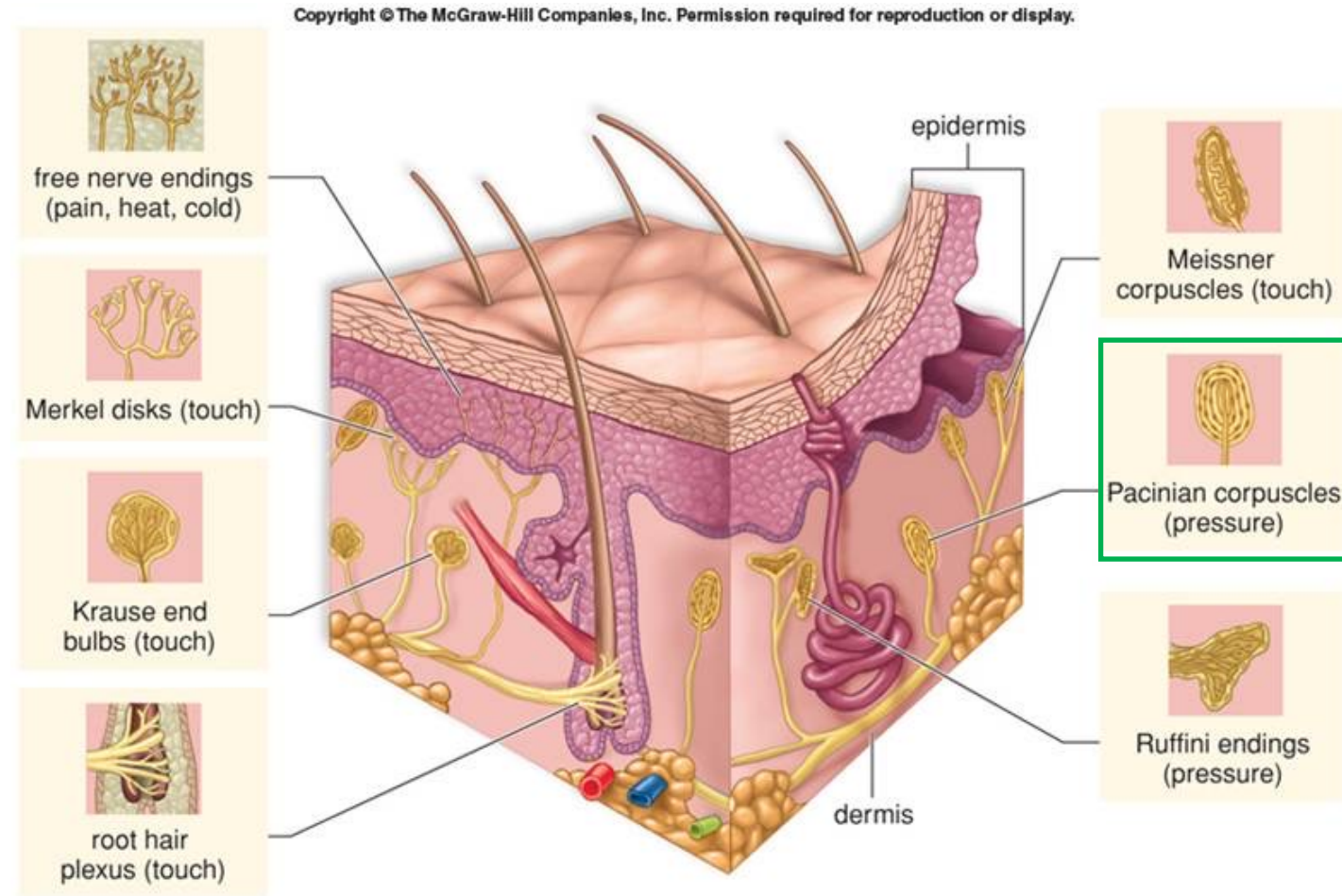
Meccanorecettori

- **Corpuscoli di Meissner**: sono caratterizzati da un **rapido rate di adattamento** e dalla piccola dimensione dei campi recettivi. Sono **sensibili al movimento di oggetti leggeri sulla cute** ed a vibrazioni a bassa frequenza (3-40 Hz).
- **Esempio di attivazione**: ...quando, per esempio, una tazza vi sta scivolando dalla mani...



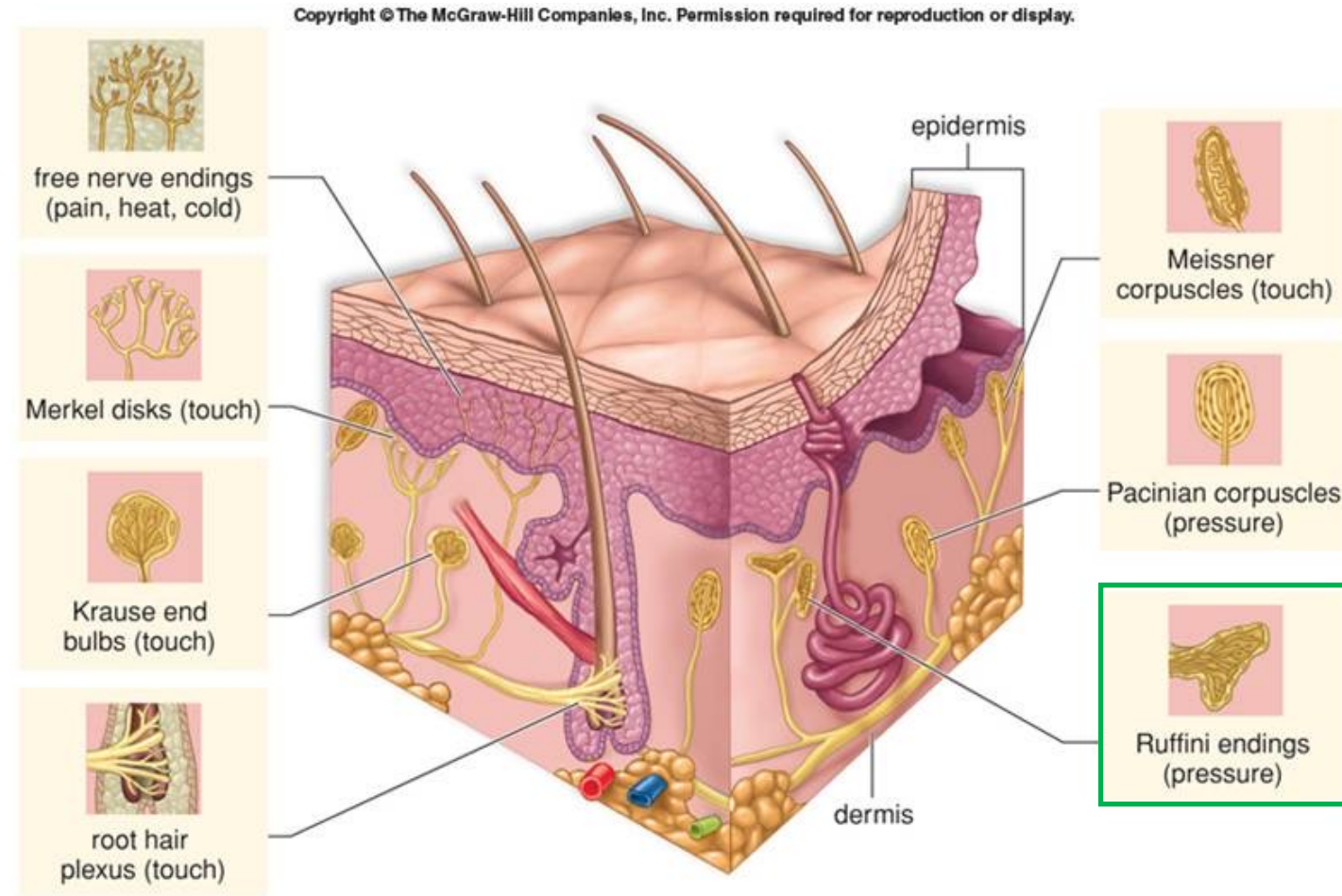
Meccanorecettori

- **Corpuscoli di Pacini:** sono fasci a **rapidissimo adattamento**. Rilevano stimoli vibratori ad alta frequenza (40-500Hz) e sono caratterizzati da alta sensibilità e da una risposta on-off.
- **Esempio di attivazione:** scrittura a mano



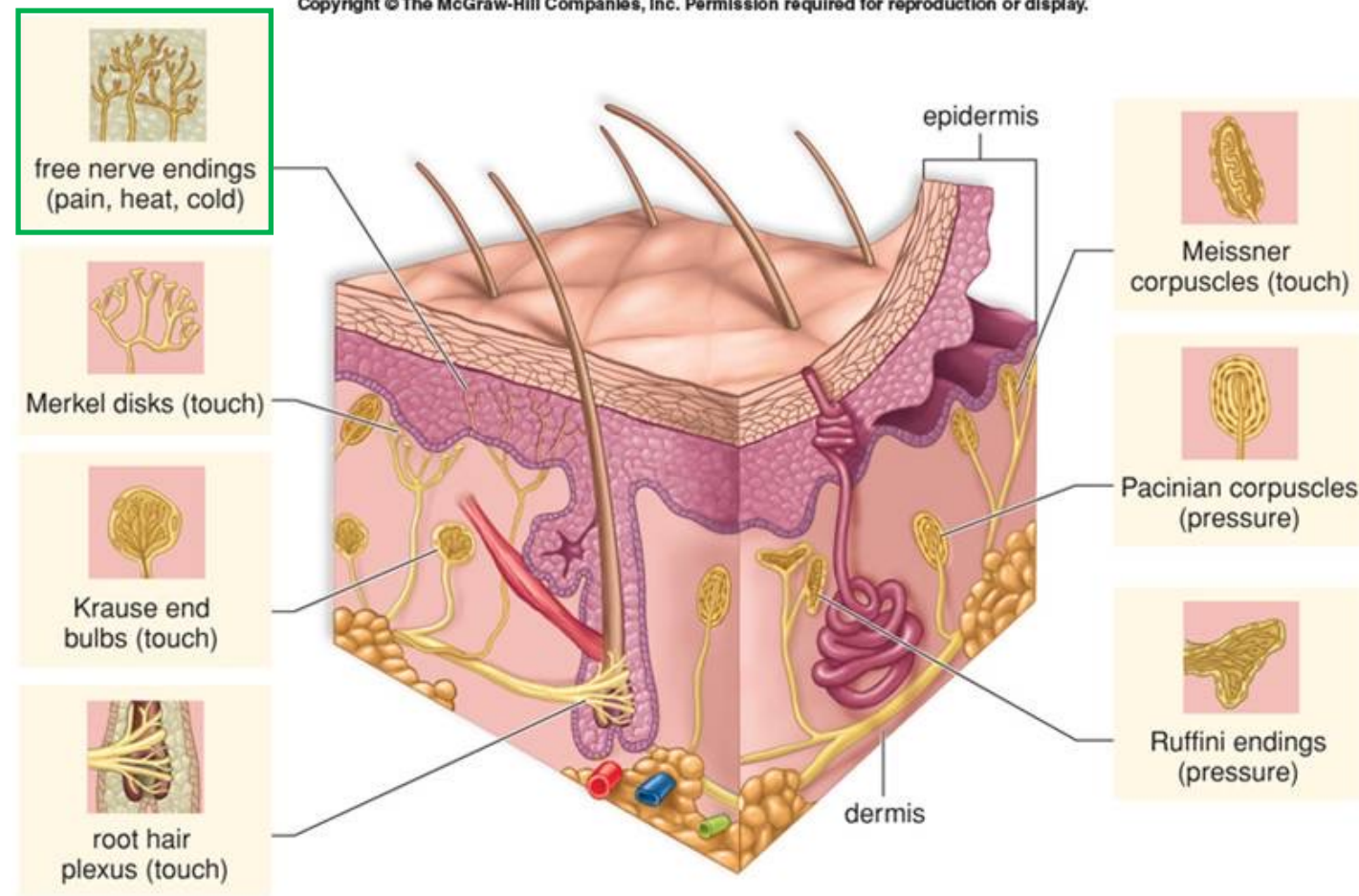
Meccanorecettori

- **Corpuscoli di Ruffini:** presentano uno **scarso adattamento**. Segnalano **stimoli prolungati e intensi** di tipo tattile pressorio (presenti anche nelle capsule articolari)
- **Esempio di attivazione:** Arm wrestling (braccio di ferro)



Meccanorecettori

- **Terminazioni nervose libere:** vengono attivate da variazioni di temperatura, fenomeni dolorosi, ma anche elevate pressioni. Questi sensori sono **detti poli-modali** e, a differenza dei mecano recettori mostrati in precedenza, **non presentano una elevata specificità.**



Dalla pelle alla corteccia sensitiva

Dalla pelle al midollo spinale

Dal midollo spinale al cervello

- Dorsal Column Medial Lemniscal pathway (Fibers A α , A β , A δ)

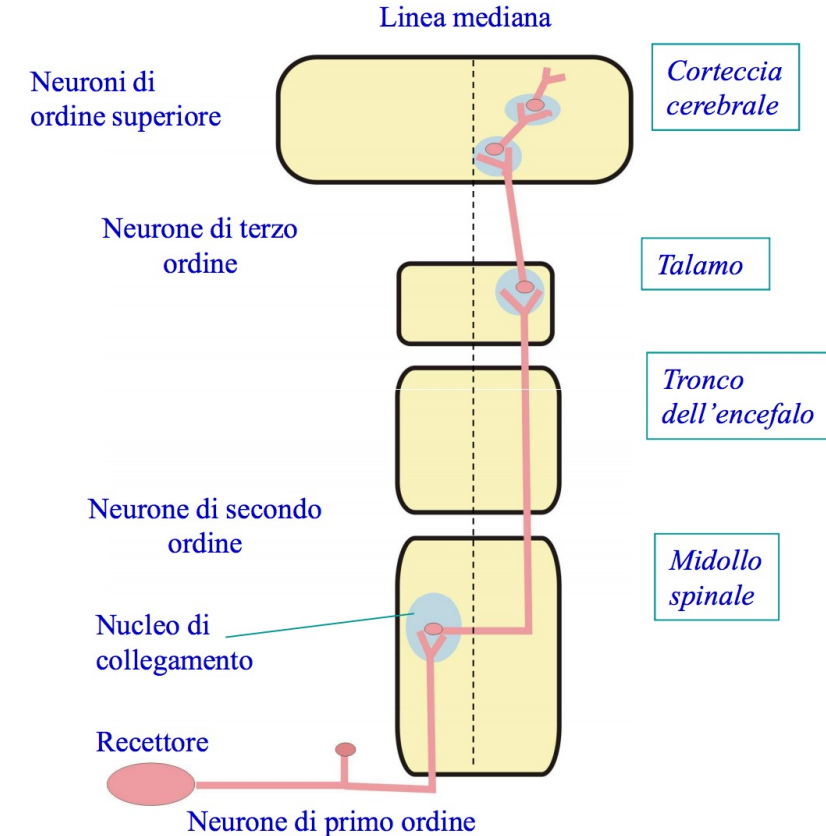
- Tocco
- Vibrazione
- Propriocezione

- Maggior diametro degli assoni
- Via "veloce"

- Ventral Spinothalamic pathway (Fibers C)

- Temperatura
- Dolore

- Assoni più sottili
- Via "lenta"



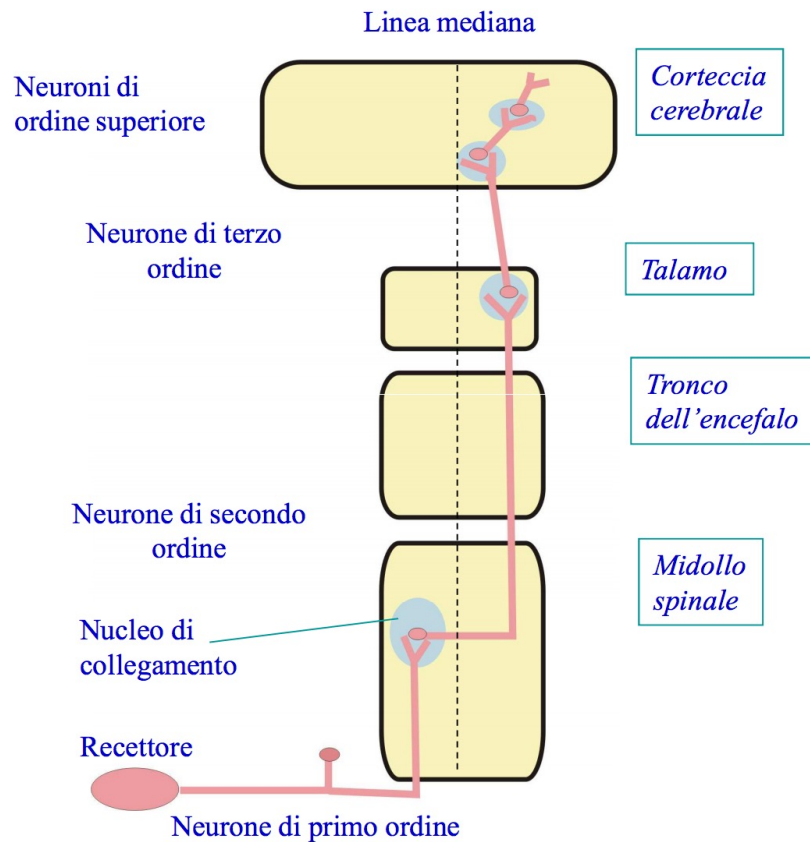
Più recettori convergono su un unico neurone di ordine superiore

Dalla pelle alla corteccia sensitiva

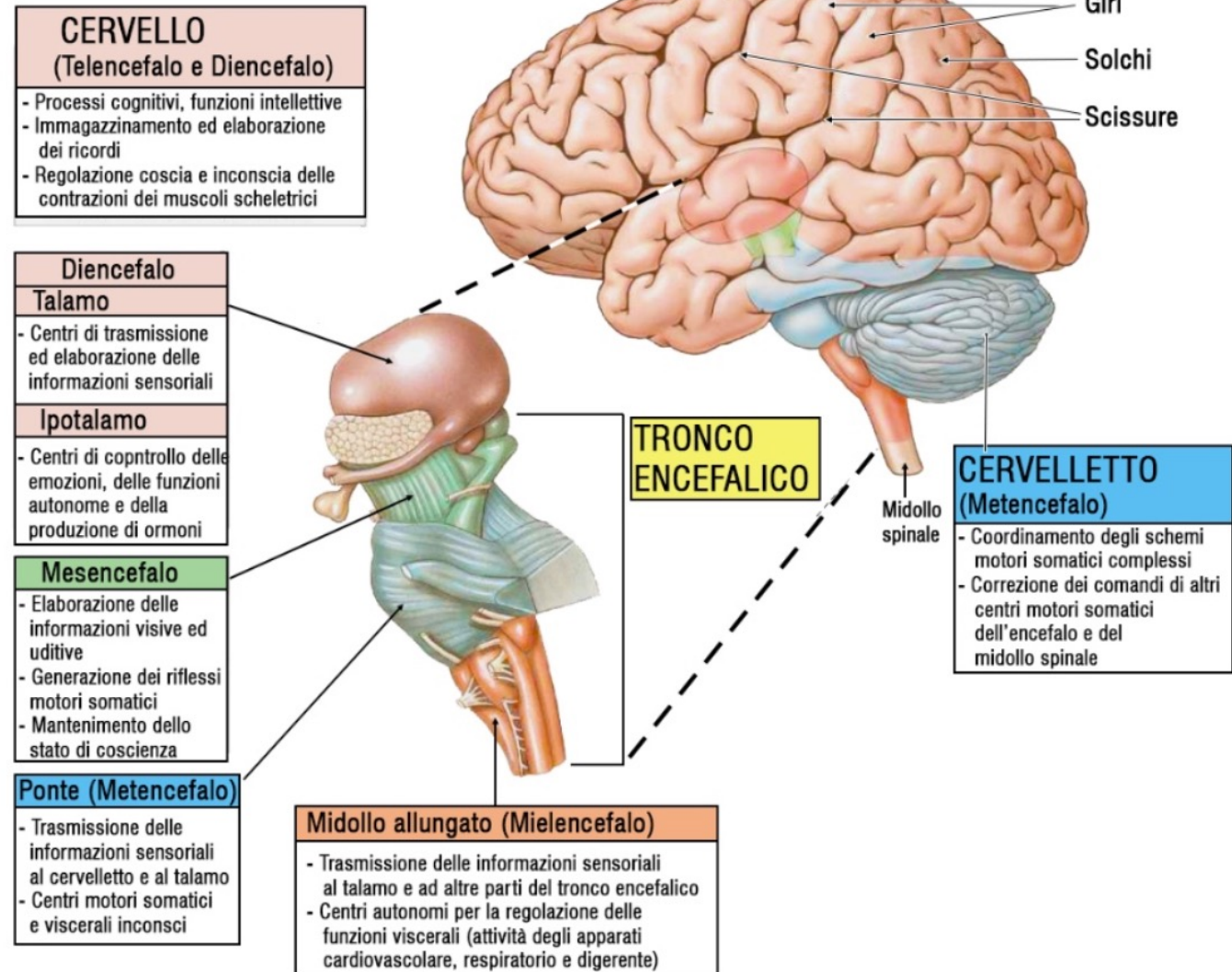
Dalla pelle al midollo spinale

Dal midollo spinale al cervello

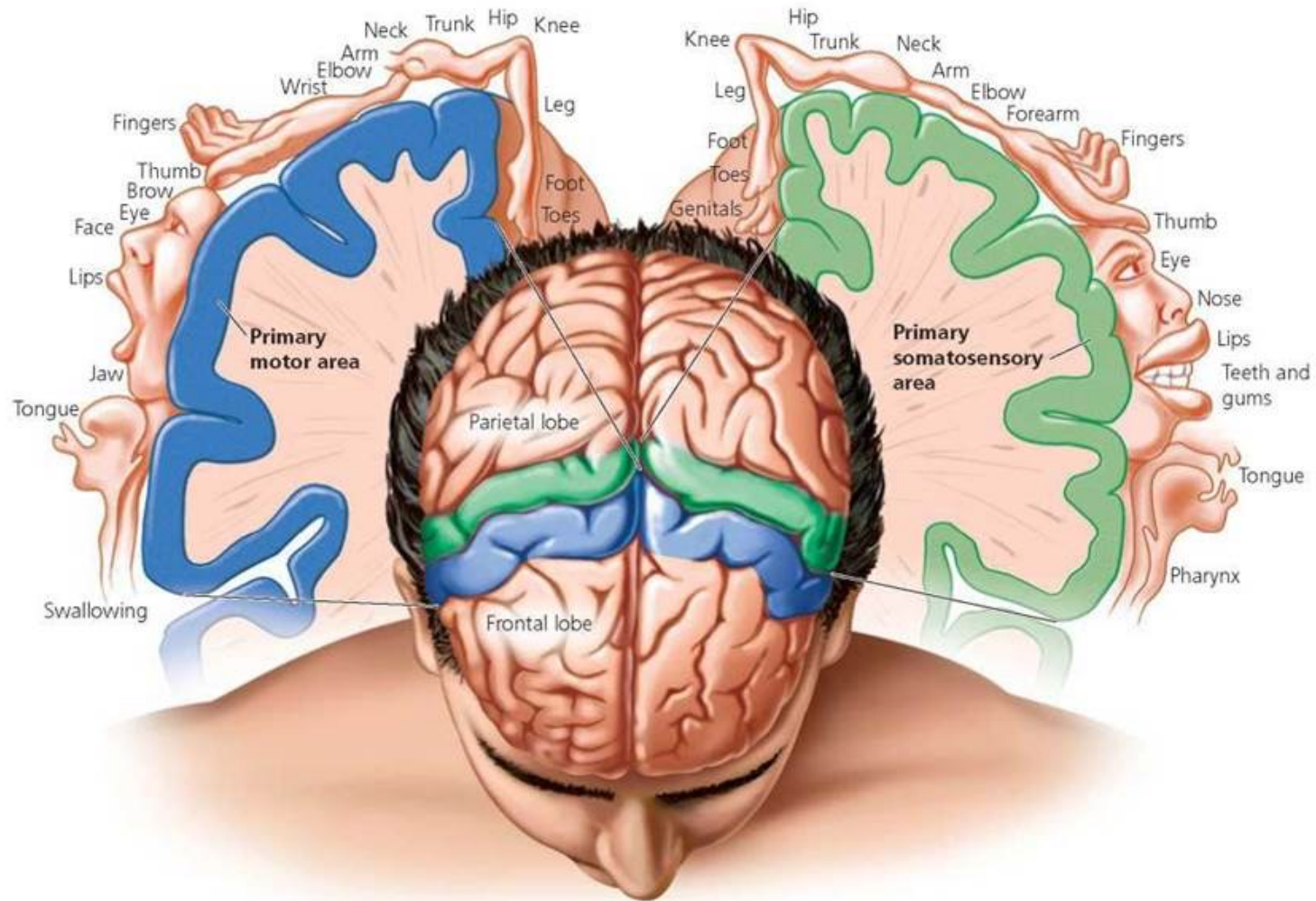
<https://www.appuntioss.it/anatomia-corpo-sistema-nervoso-encefalo/>



Più recettori convergono su un unico neurone di ordine superiore



Mappa somatosensitiva

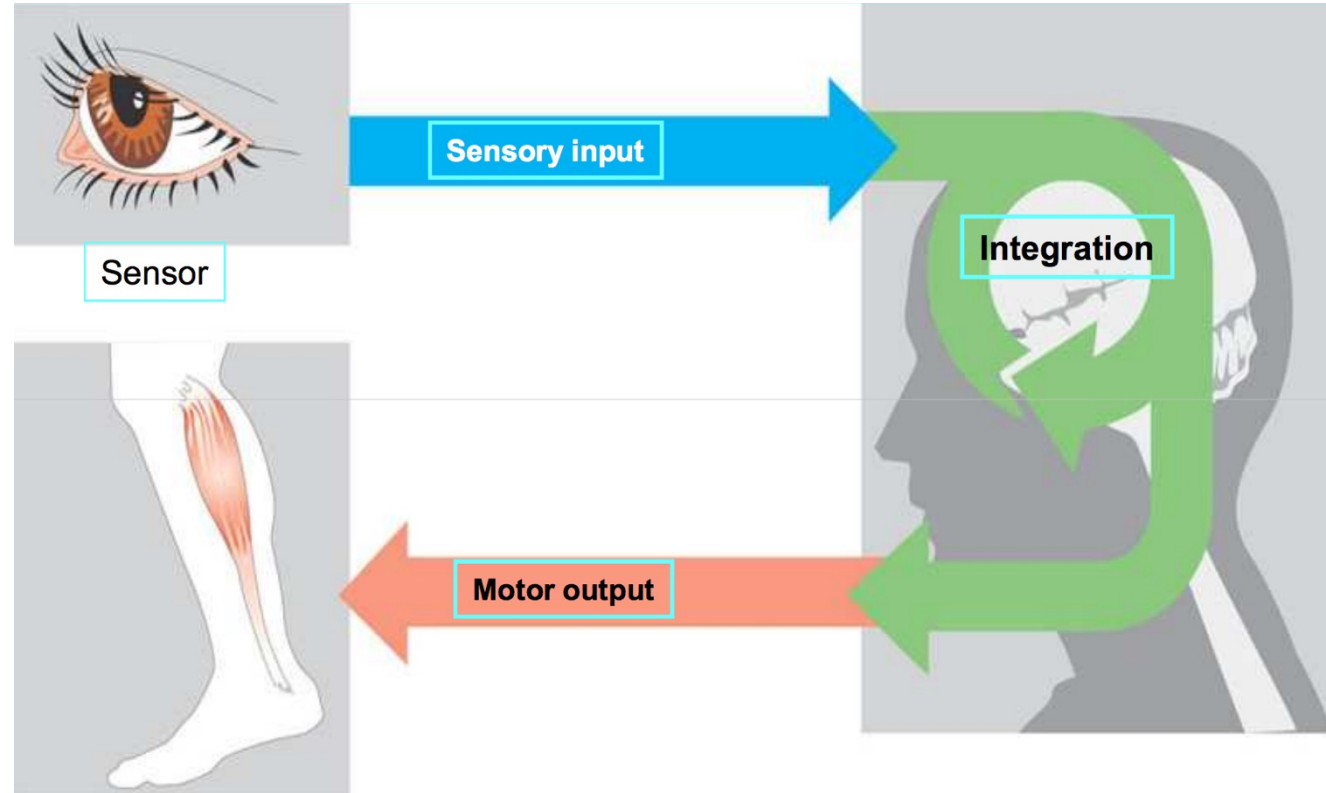
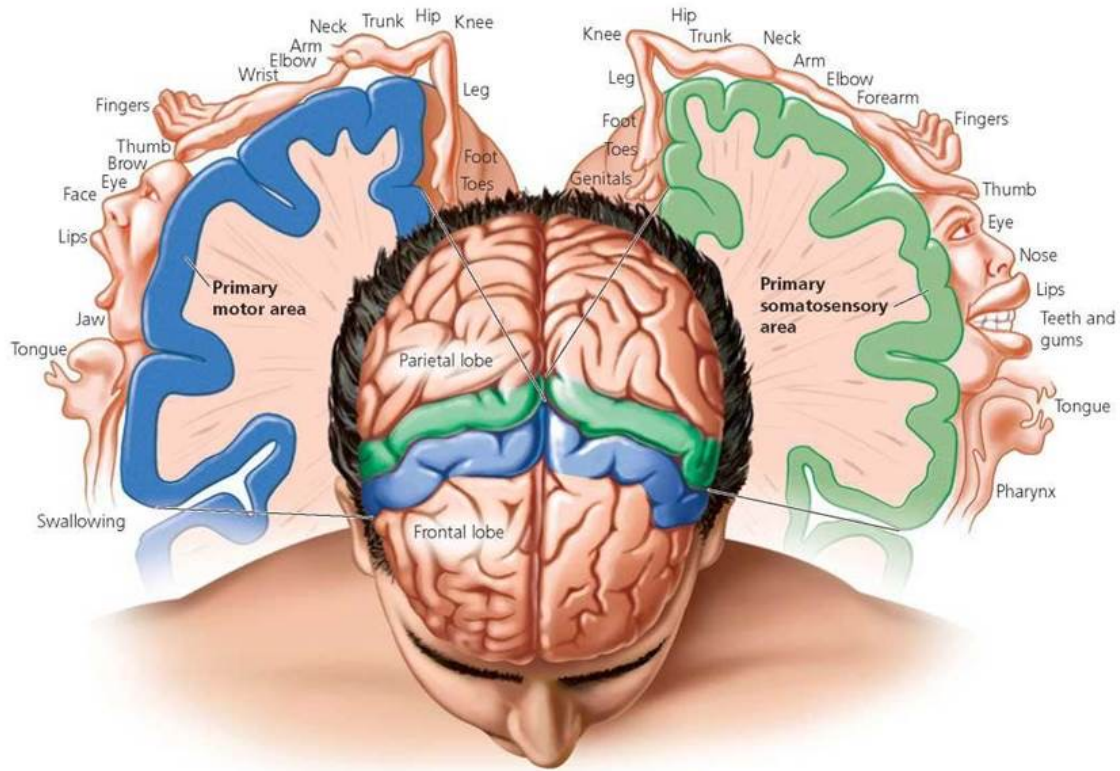


Homunculus corticale



La grandezza delle varie zone dell'homunculus è proporzionale al numero di recettori presenti nella zona.

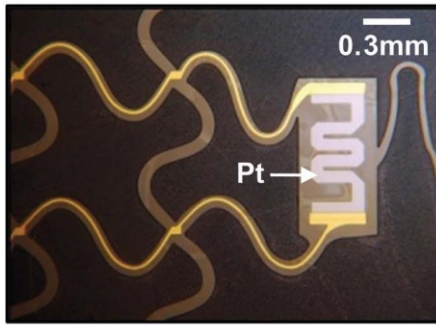
Integrazione senso-motoria



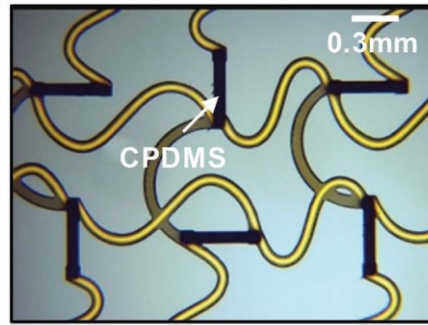
Corteccia primaria somatosensitiva molto vicina alla corteccia primaria motoria...

Electronica epidermica

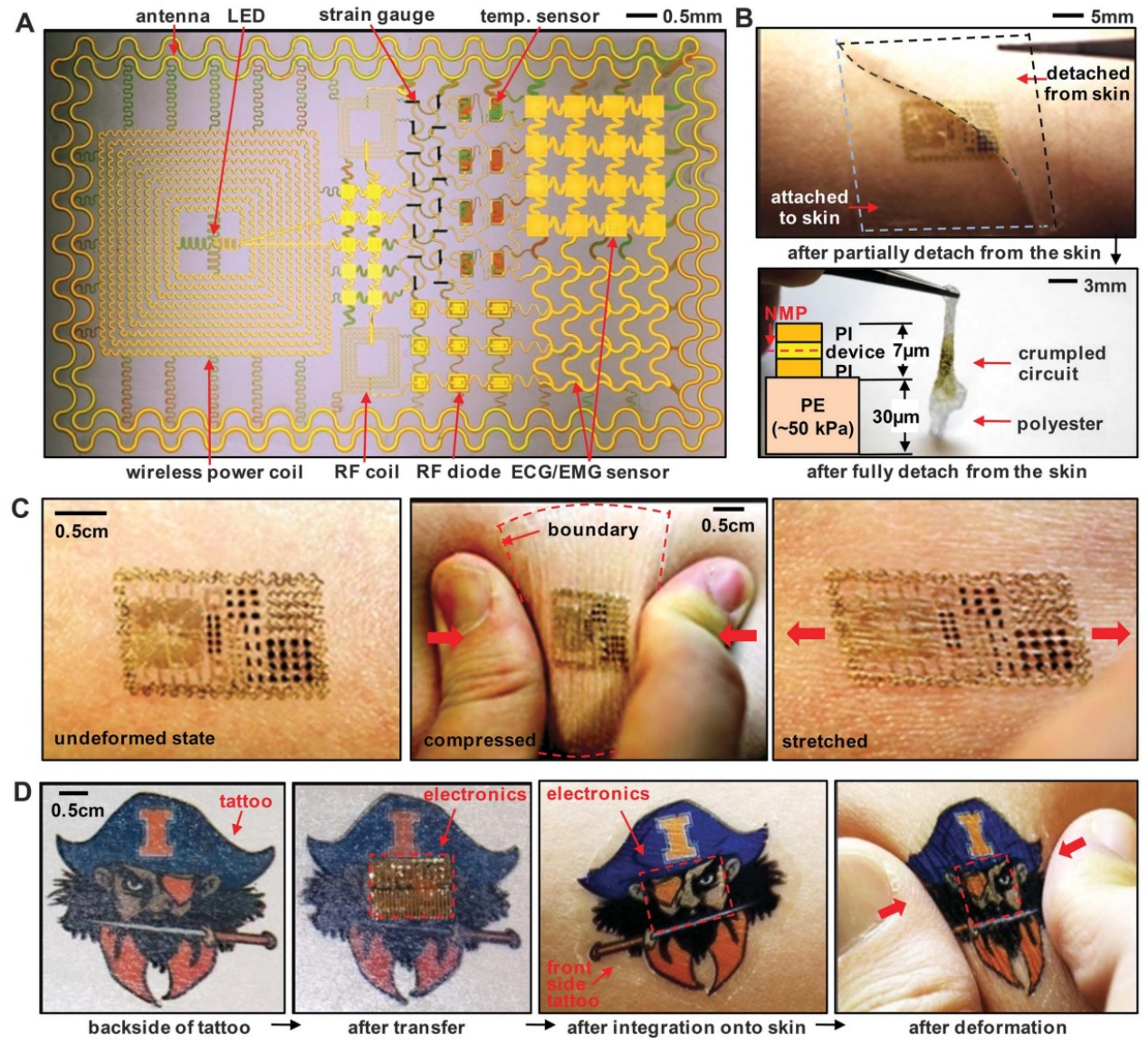
2011: the beginning of the 'epidermal electronics era'.



Pt RTD temperature sensor



Conductive PDMS-based strain gauge



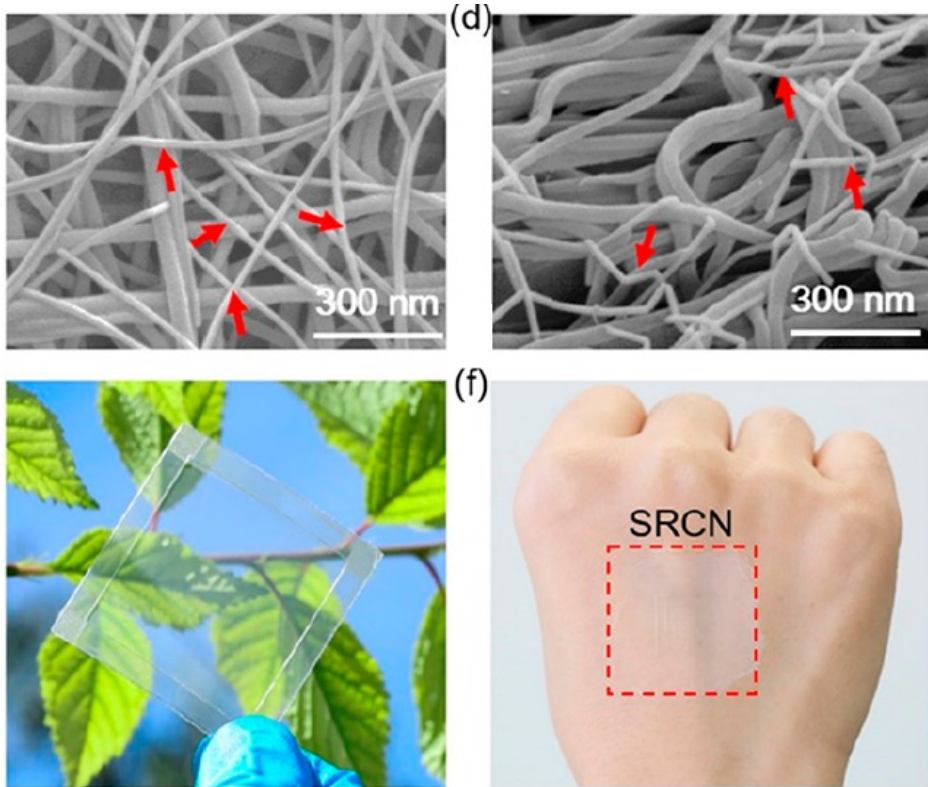
Elettronica epidermica

Useful for several applications, to new generation robotic skin to neonatal and elderly care.



Elettronica epidermica

Breathability

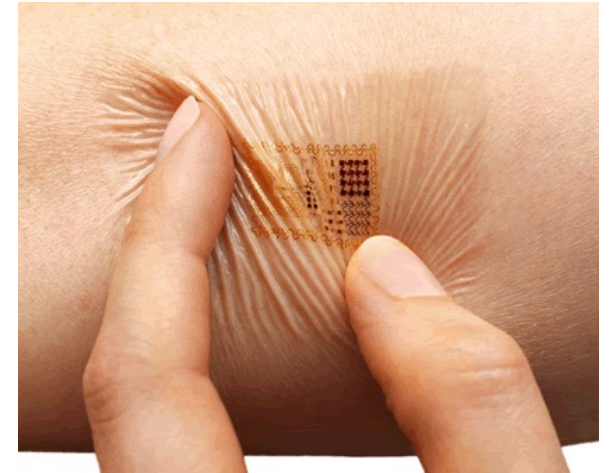


Fan, You Jun, et al. *ACS nano* 12.9 (2018): 9326-9332.

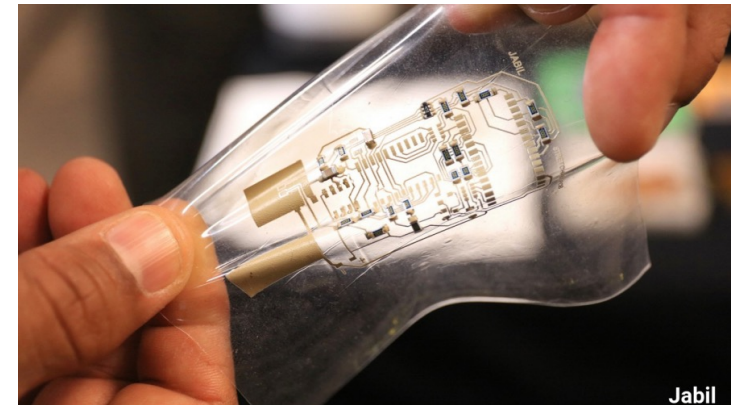
Conformability



Kim, D.-J, et al. *Science* (2011)



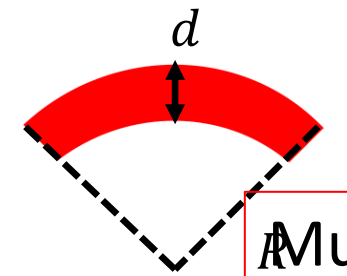
Stretchability and optical transparency



Jabil

Elettronica epidermica

Reduced superficial strain

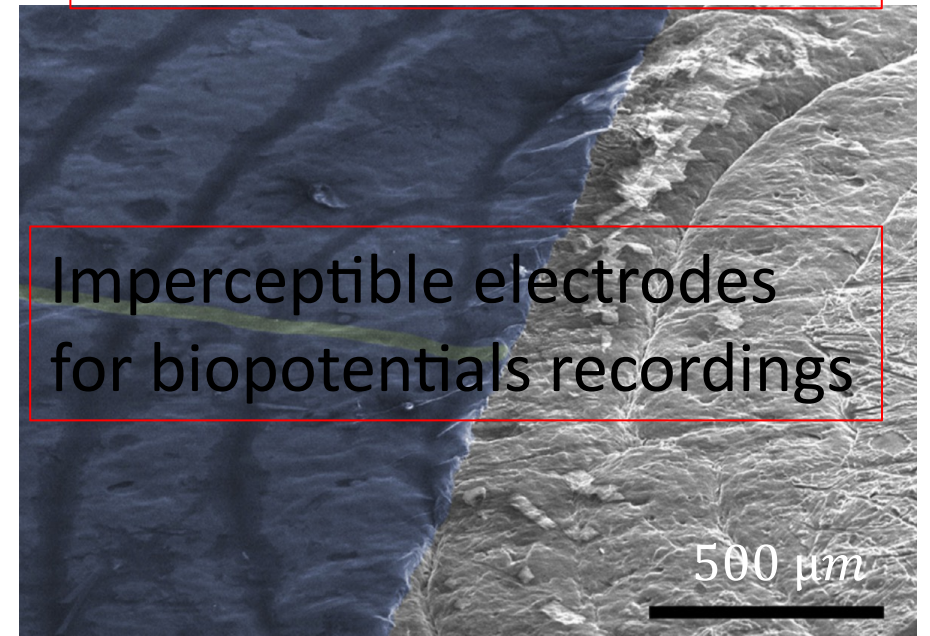


$$\text{Strain} \propto \frac{d}{2 \cdot R}$$

Mult



Improved conformability
(contact area maximization and
comfort)



Imperceptible electrodes
for biopotentials recordings

Elettronica epidermica

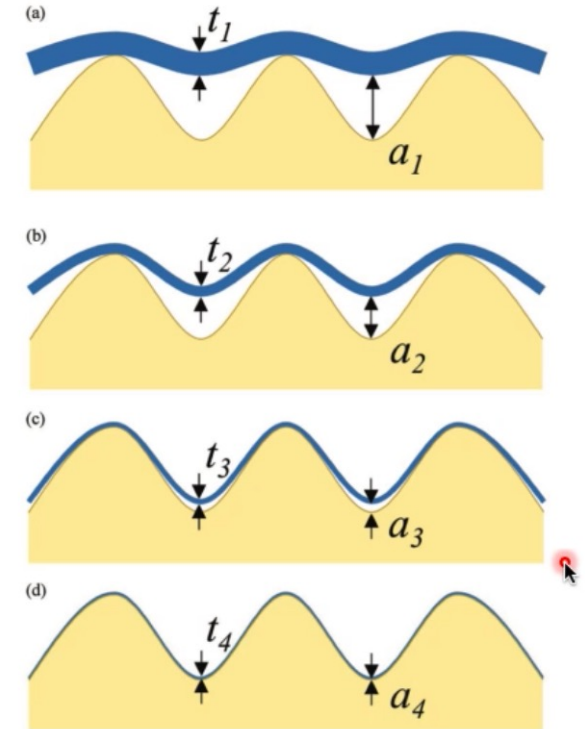
Conformability and mechanical flexibility in general are related to the bending stiffness of the material:

Bending stiffness (EI):

$$EI \propto E * h^3$$

Young modulus ← thickness

	Young Modulus (E) GPa	elongation
skin	0.0001 – 0.0008	70%
Si (a, poly)	80 – 130	< 1%
SiO ₂	50	< 1%
Au	70	< 1%
P3HT	1 – 1.5	1%
PEDOT:PSS	1.5 – 2	4% – 5%
P3HT + PDMS	0.3	180%
PEDOT:PSS + ionic liquid	0.004	100% – 170%

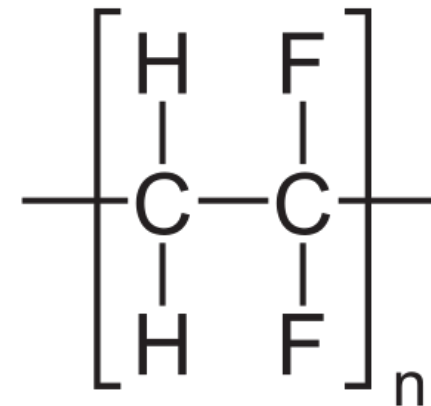


A red oval border is drawn around the text, centered on the page.

OCMFET + PVDF

OCMFET e PVDF per applicazioni tattili

- Rilevazione di temperatura e forza/pressione
- Materiale sensibile utilizzato: **polivinilidenfluoruro (PVDF)**
- Il PVDF è un fluoropolimero (monomero: fluoruro di vinilidene) caratterizzato da inerzia chimica e biologica, resistenza ad acidi e basi, biocompatibilità.
- Oltre alle sue ottime proprietà chimiche, il PVDF presenta proprietà **piroelettriche** e **piezoelettriche**.
 - Sensori di temperatura
 - Sensori di forza
 - Trasduttori acustici



OCMFET e PVDF per applicazioni tattili

PFM: Piezo-response force microscopy

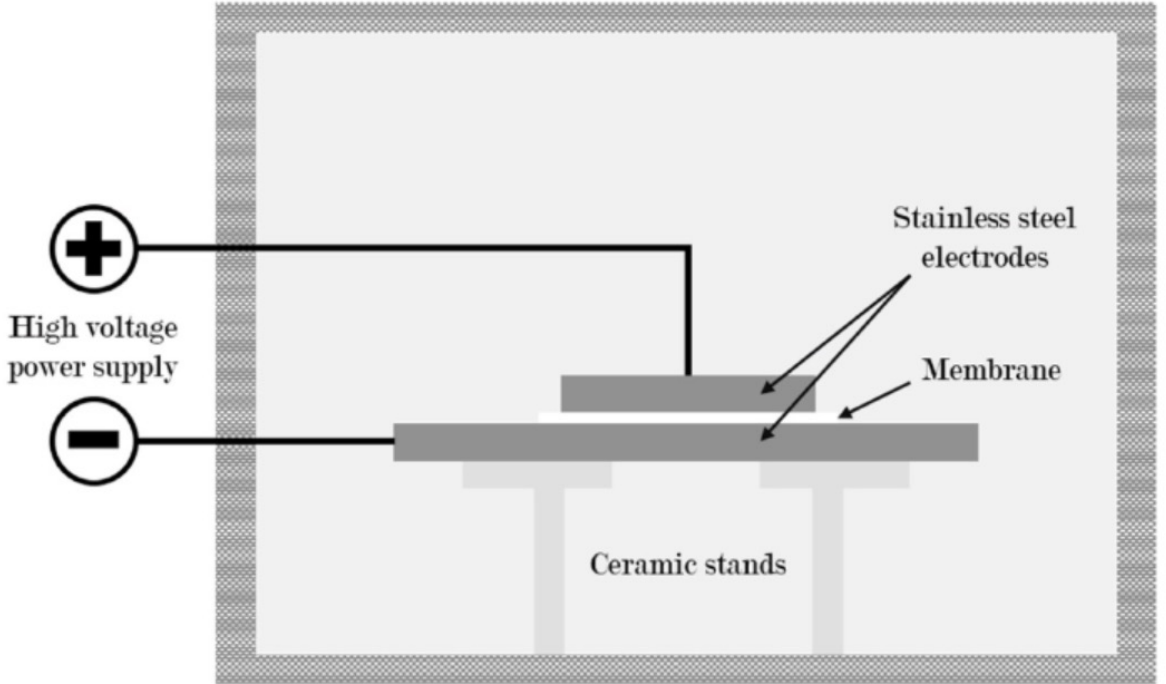
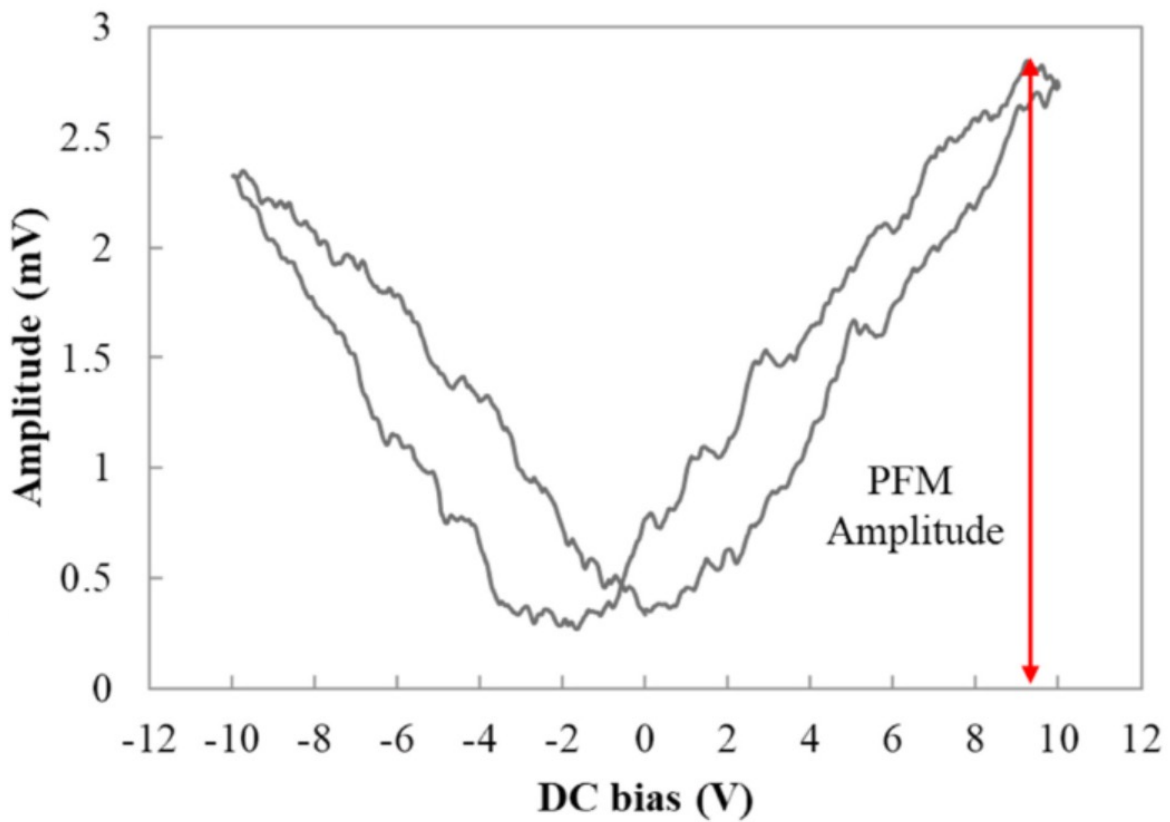
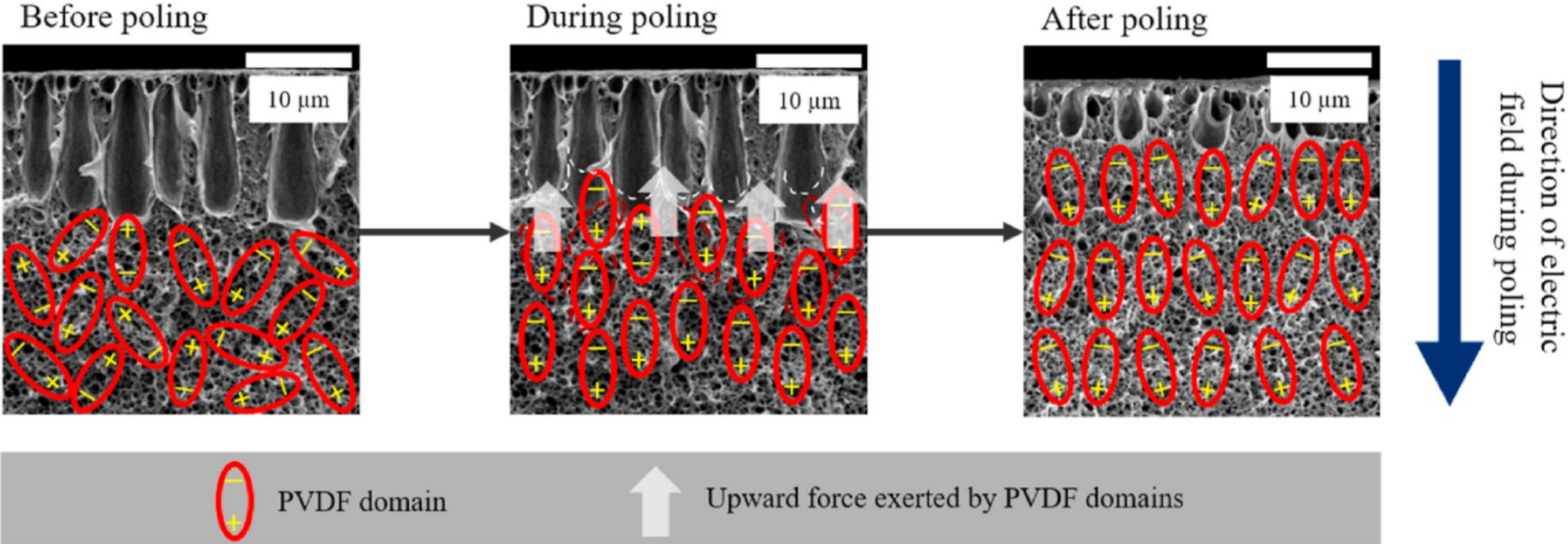


Fig. 2. Electrical poling setup enclosed within the oven.

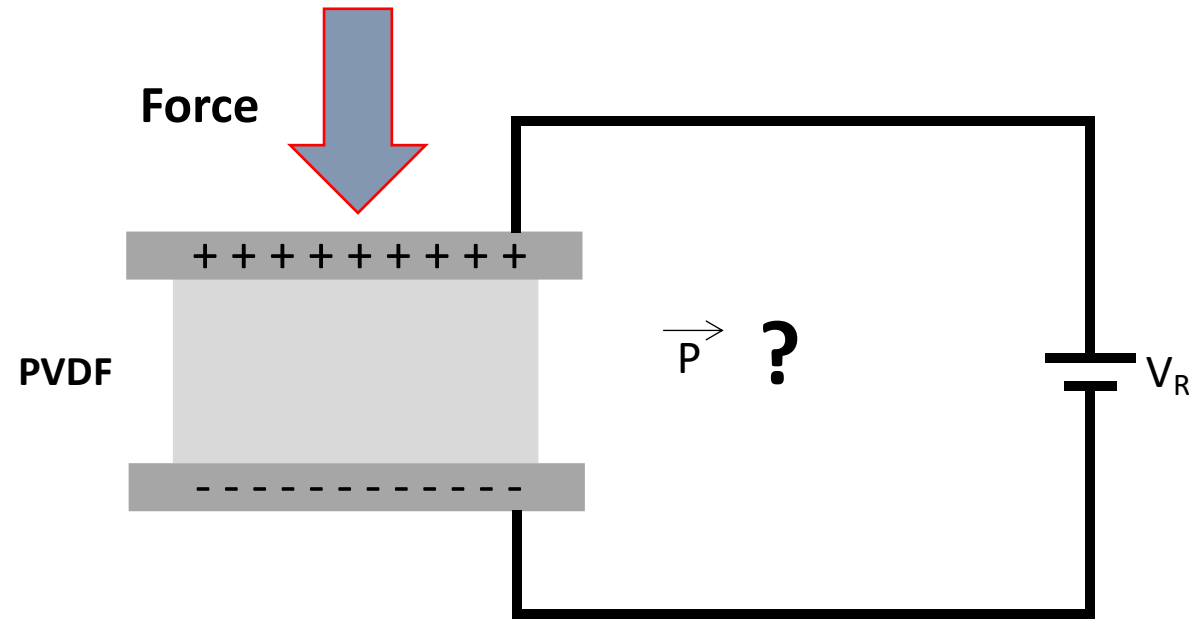
Su, Yu Ping, et al. "Anti-fouling piezoelectric PVDF membrane: Effect of morphology on dielectric and piezoelectric properties." *Journal of Membrane Science* 620 (2021): 118818.

OCMFET e PVDF per applicazioni tattili



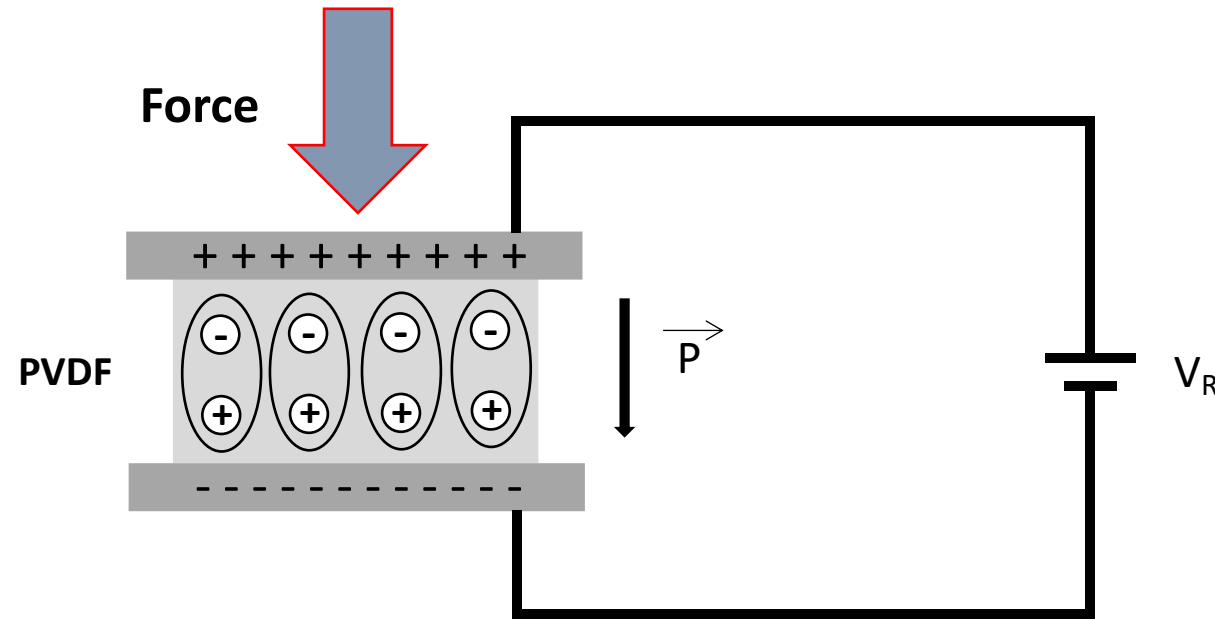
Su, Yu Ping, et al. "Anti-fouling piezoelectric PVDF membrane: Effect of morphology on dielectric and piezoelectric properties." *Journal of Membrane Science* 620 (2021): 118818.

OCMFET e PVDF per applicazioni tattili: sensing di forza



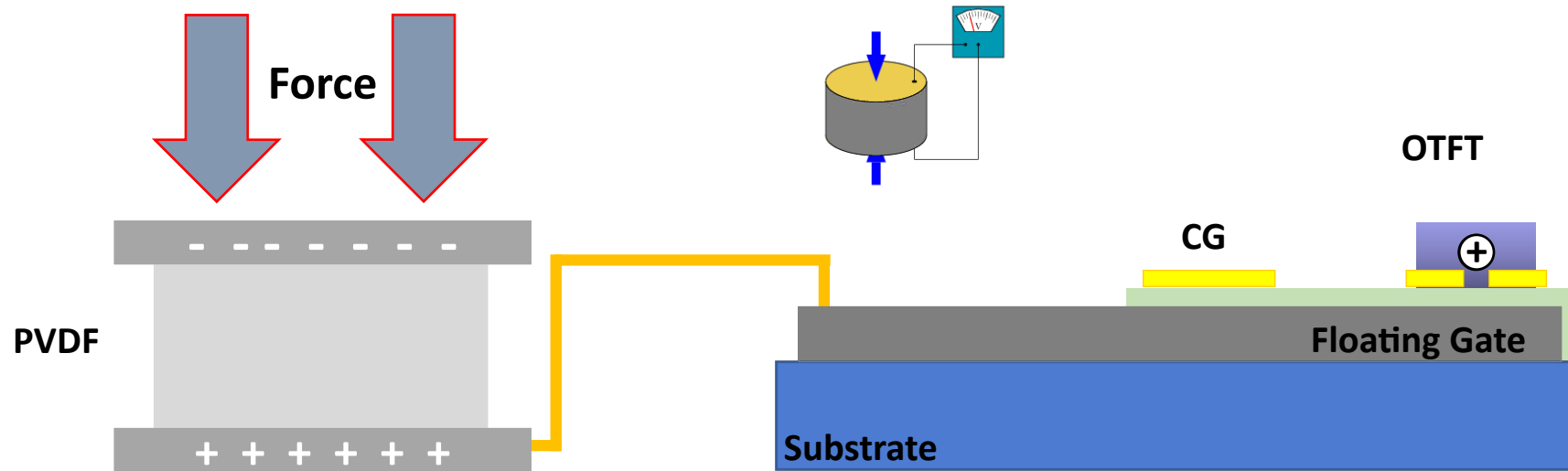
- Consideriamo la seguente situazione: un condensatore costituito da un film sottile di PVDF e due elettrodi metallici viene sottoposto ad una sollecitazione a compressione.
- Viene rilevata una tensione V_R del segno mostrato in figura.
- Che direzione avrà il vettore di polarizzazione del materiale piezoelettrico?
- Il campo interno ha direzione opposta a quello esterno.

OCMFET e PVDF per applicazioni tattili: sensing di forza



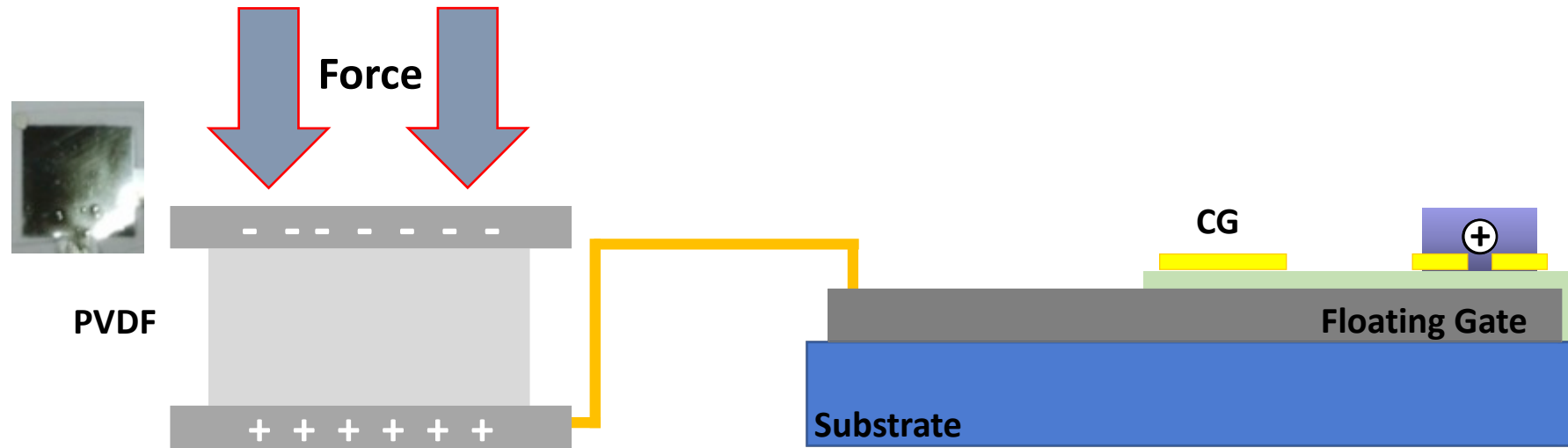
- Consideriamo la seguente situazione: un condensatore costituito da un film sottile di PVDF e due elettrodi metallici viene sottoposto ad una sollecitazione a compressione.
- Viene rilevata una tensione V_R del segno mostrato in figura.
- Che direzione avrà il vettore di polarizzazione del materiale piezoelettrico?
- Il campo interno ha direzione opposta a quello esterno.

OCMFET e PVDF per applicazioni tattili: sensing di forza



- L'applicazione di una forza determina l'induzione di una carica in virtù delle proprietà piezoelettriche del PVDF.
- Il segno della carica indotta dipende da quale piatto è connesso al nostro dispositivo dato che sui due piatti viene indotta una carica di segno opposto. L'entità della carica è proporzionale alla forza applicata.
- Questa carica provoca una variazione della tensione di soglia la quale determina (a seconda del segno della carica) una accensione o uno spegnimento del transistor.

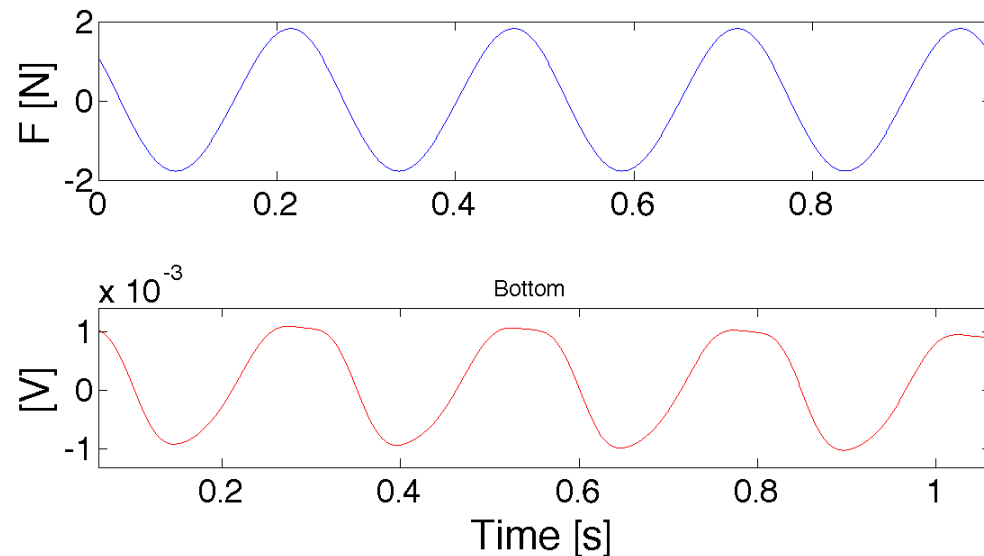
OCMFET e PVDF per applicazioni tattili: sensing di forza



OCMFET

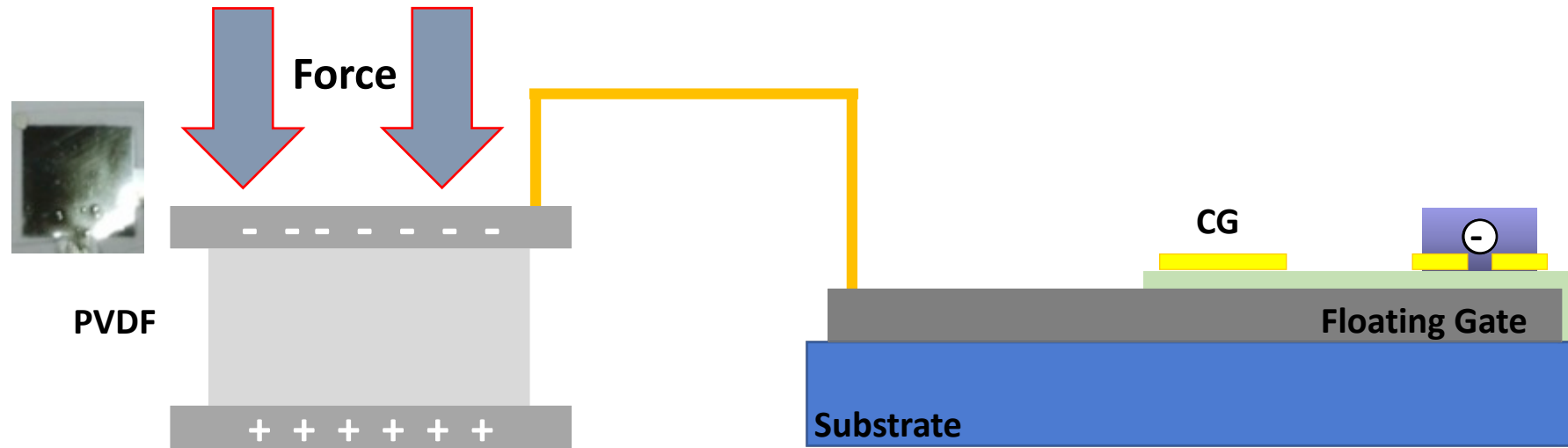


Shaker +
Cella di carico



Connettendo un piatto (per esempio quello inferiore) otterremo l'induzione di una carica nel floating gate (per esempio positiva), la quale determinerà una variazione della tensione di soglia.

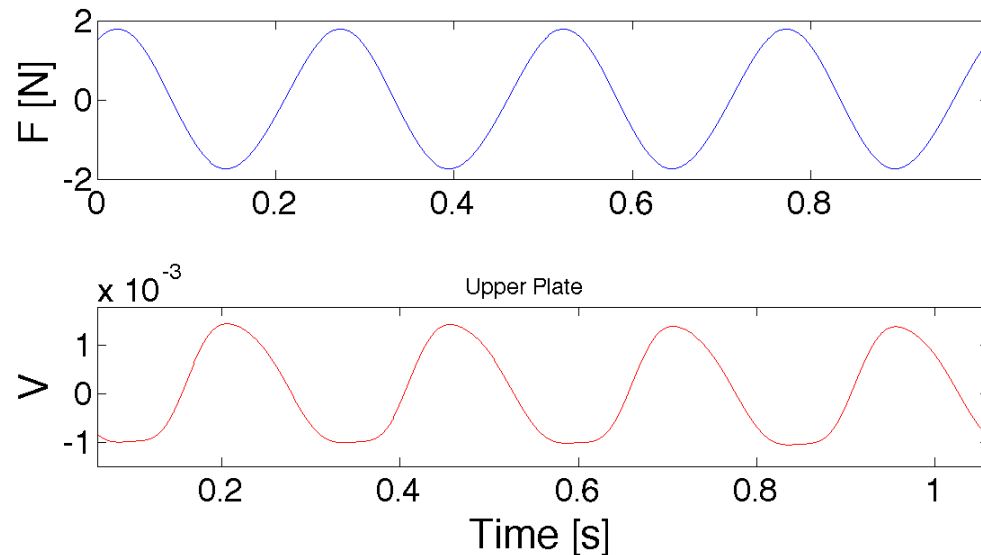
OCMFET e PVDF per applicazioni tattili: sensing di forza



OCMFET

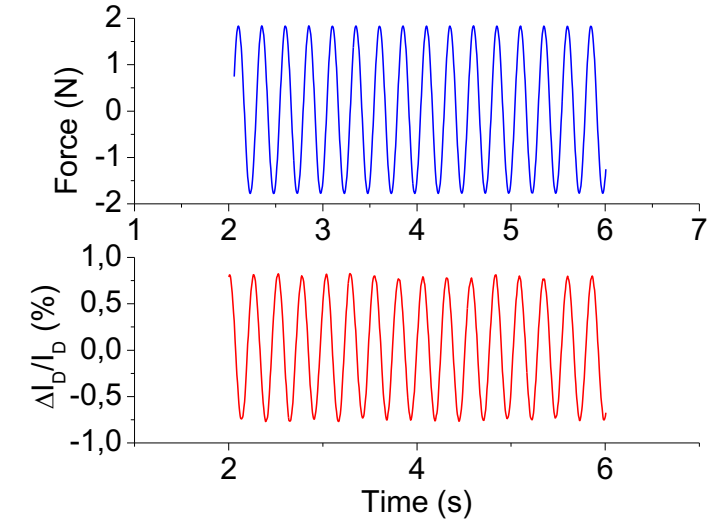
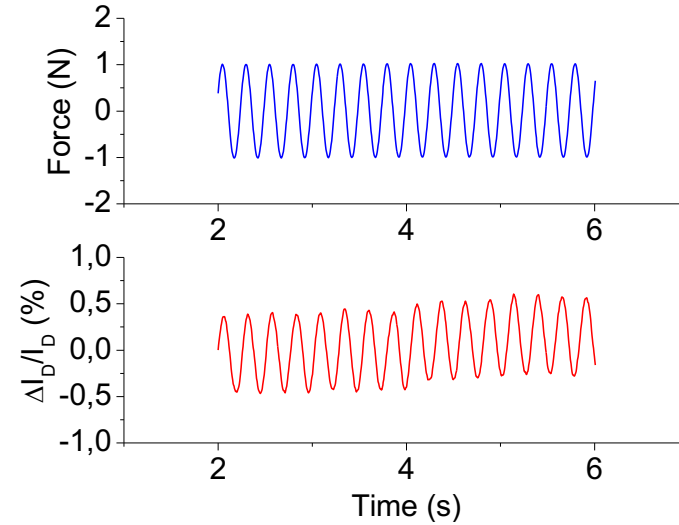
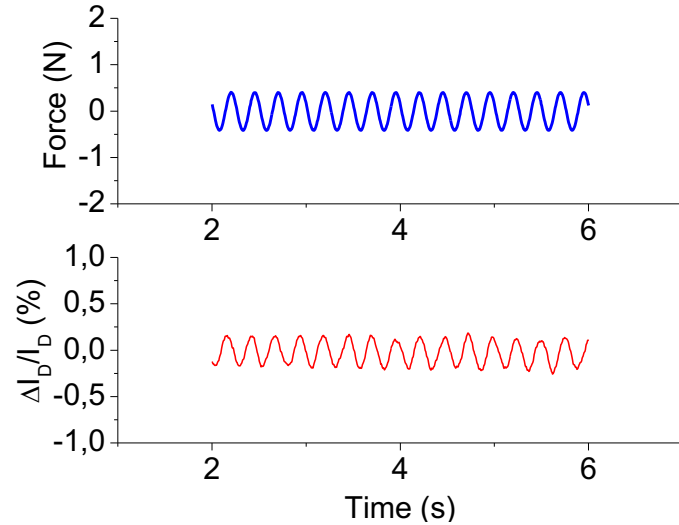


Shaker +
Cella di carico

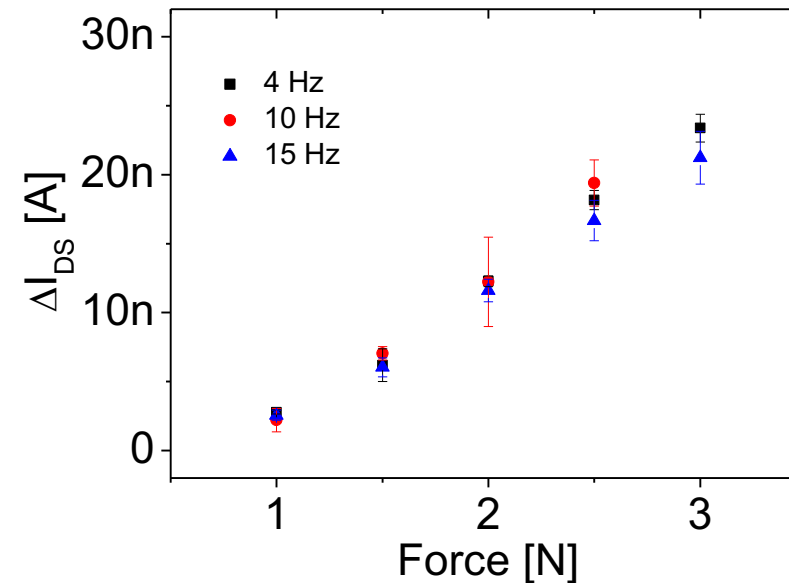


Connettendo l'altro piatto (quello superiore) otterremo l'induzione di una carica nel floating gate (in questo caso negativa), la quale determinerà una variazione della tensione di soglia opposta rispetto al caso precedente.

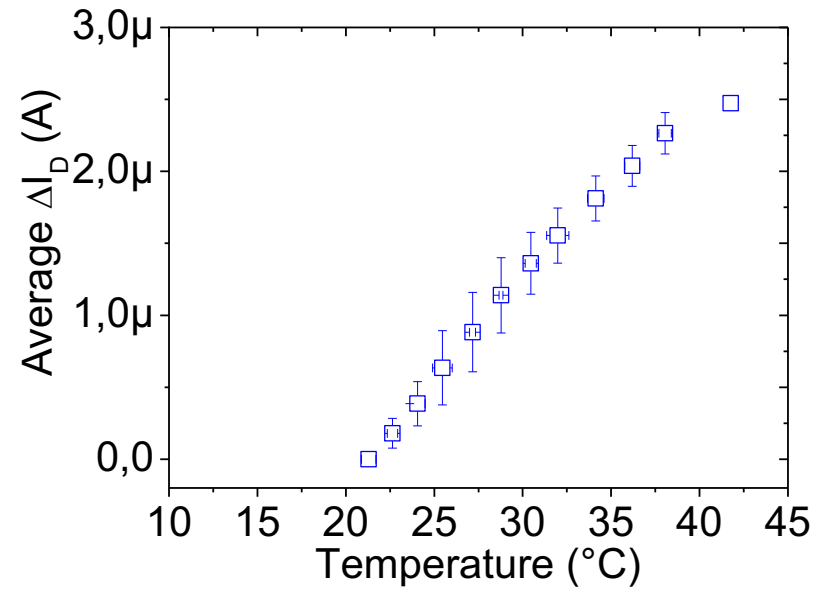
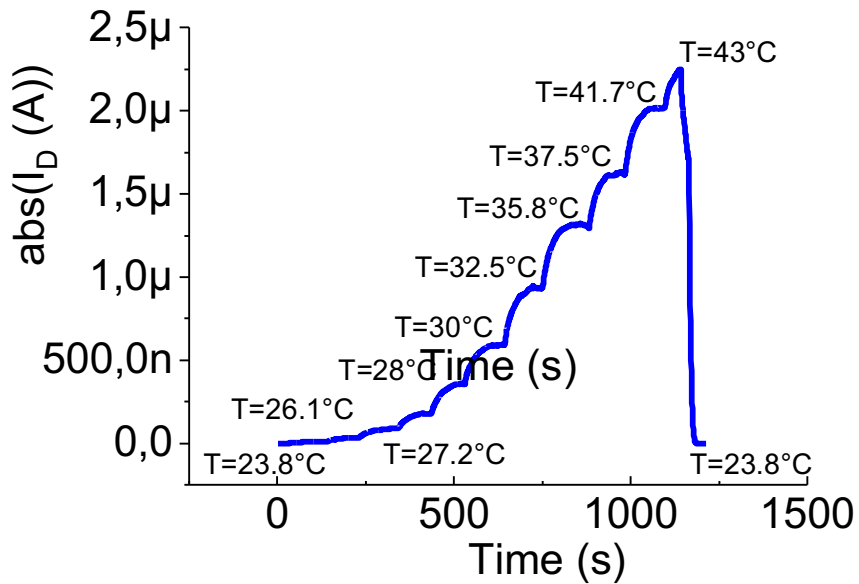
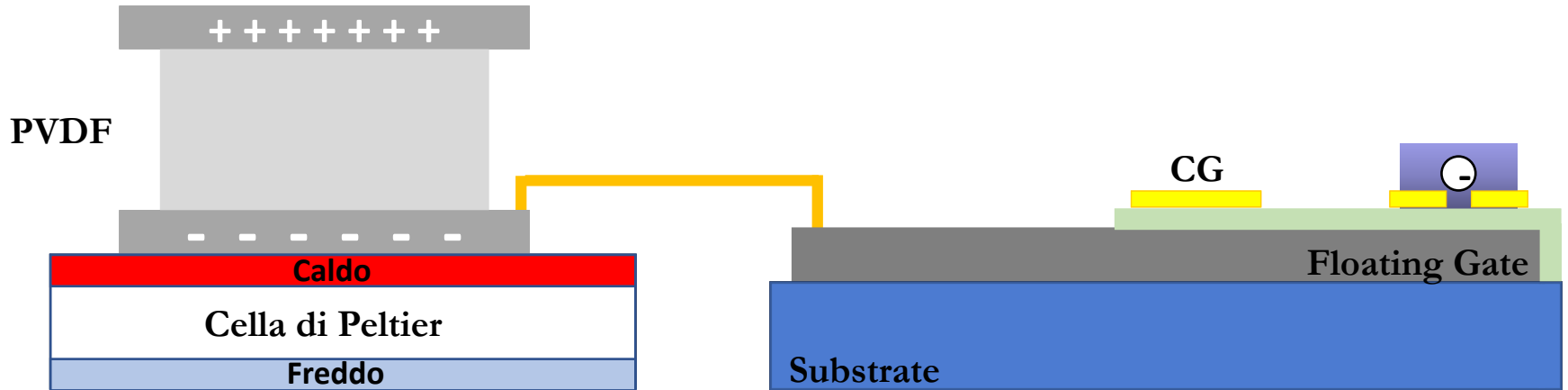
OCMFET e PVDF per applicazioni tattili: sensing di forza



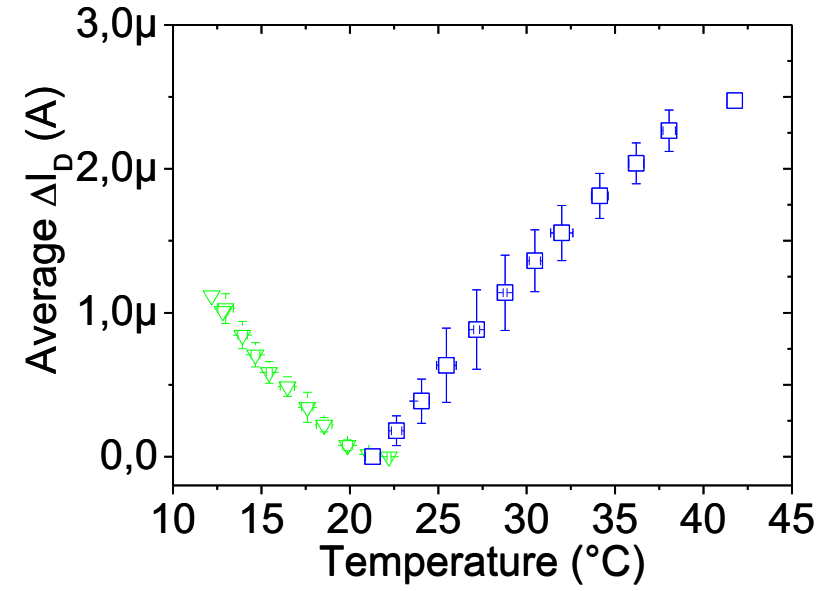
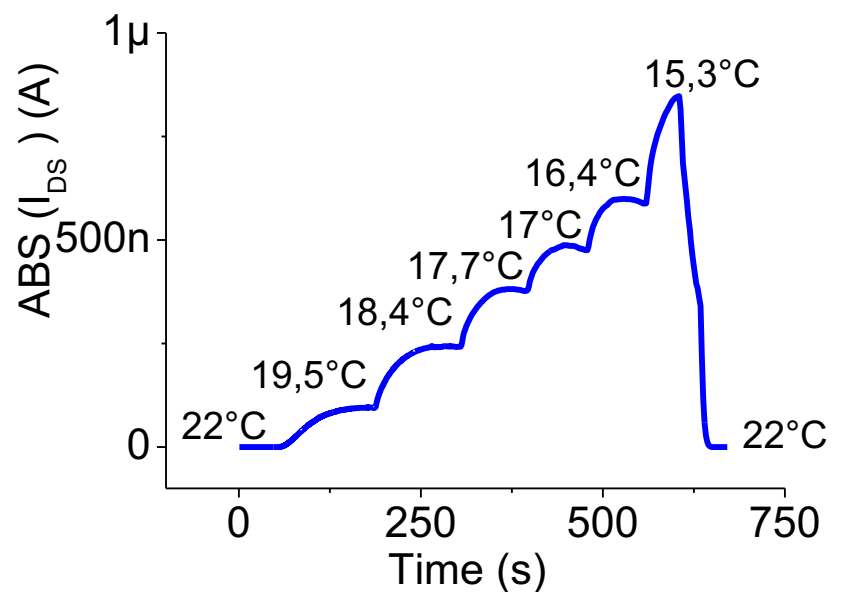
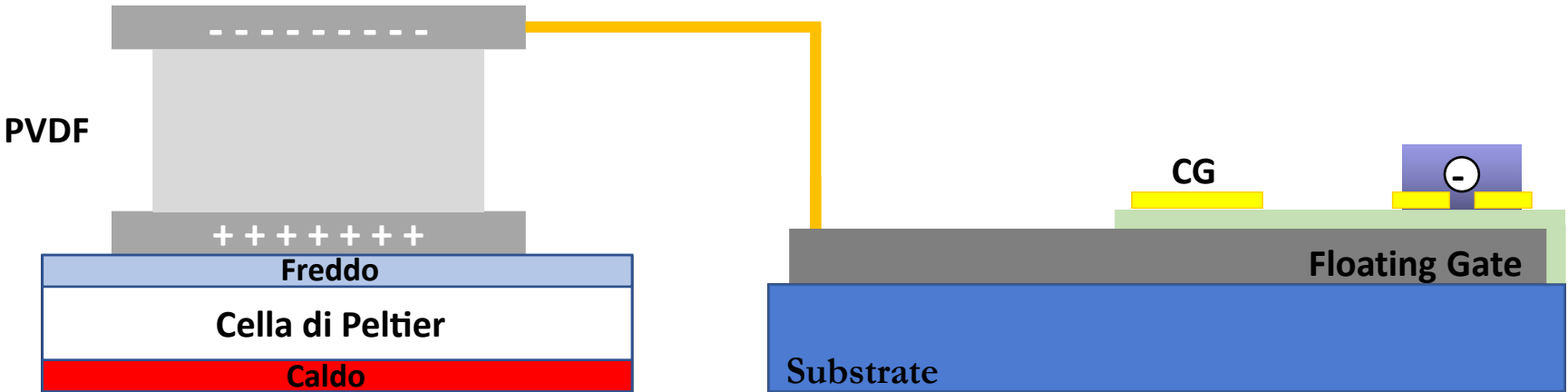
- Risposta lineare
- Range di lavoro: 0-3.5 N
- Risoluzione 0.1 N
- Range di frequenza: 0-15 Hz



OCMFET e PVDF per applicazioni tattili: sensing di temperatura

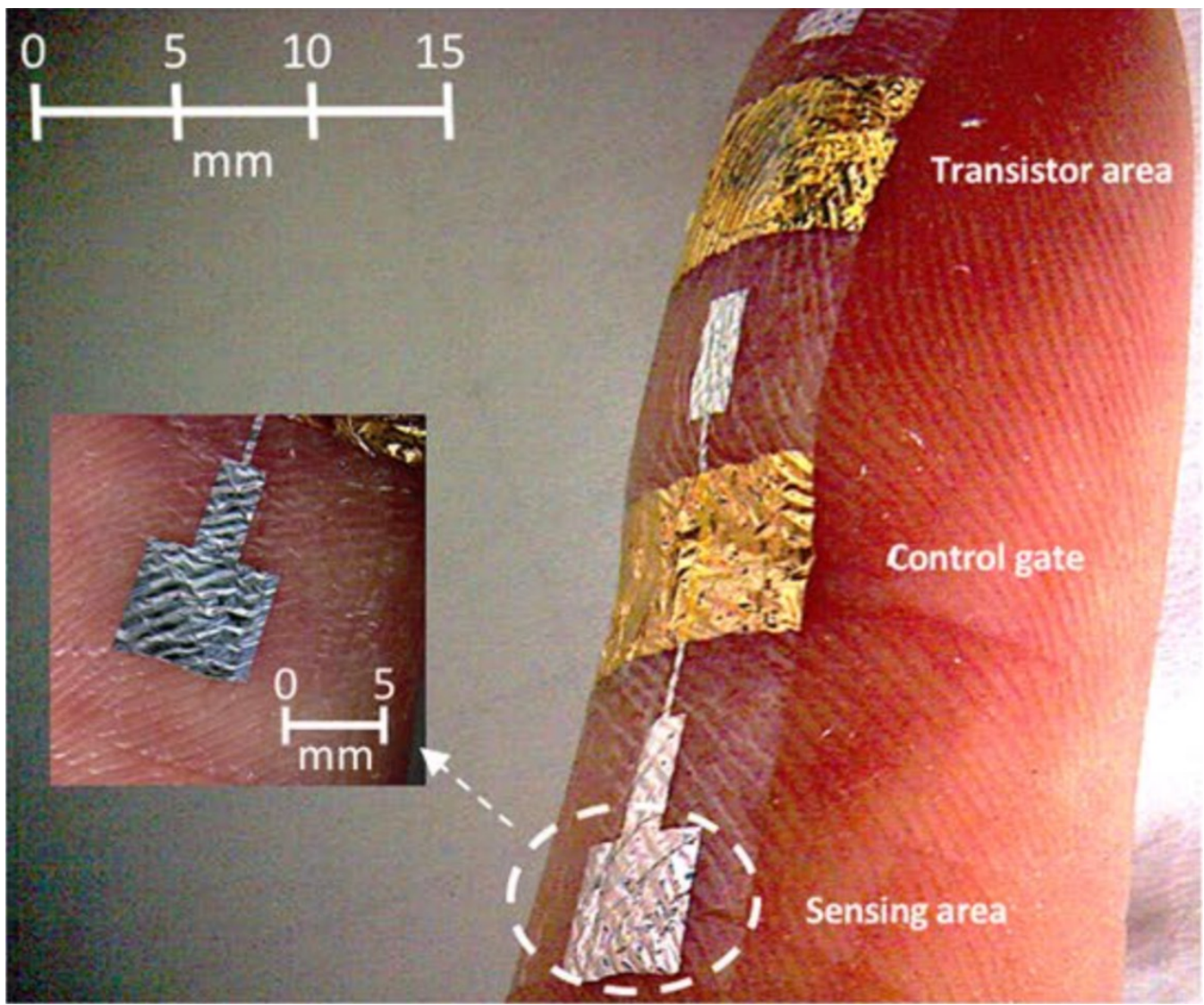


OCMFET e PVDF per applicazioni tattili: sensing di temperatura

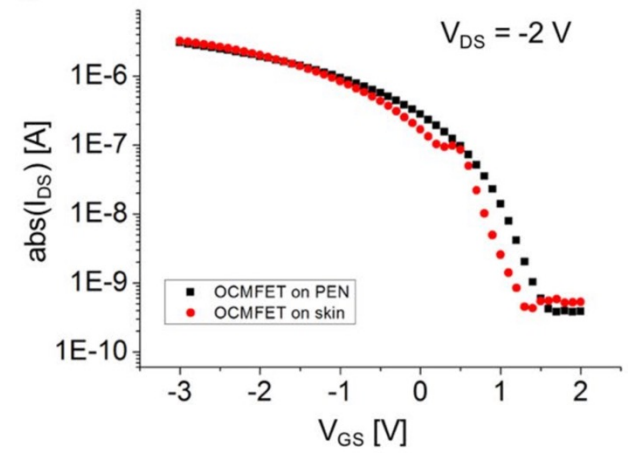


OCMFET e PVDF per applicazioni tattili: sensing di temperatura

Esempio di OCMFET su nanofilm per applicazioni di **elettronica tattoo**



Le proprietà non cambiano dopo il trasferimento su pelle



Risposta al caldo e al freddo

