
A.D. 1308

unipg

DEPARTMENT
OF PHYSICS AND GEOLOGY

Studio di materiali micro e nanostrutturati per l'energy harvesting

giacomo.clementi@unipg.it
igor.neri@unipg.it



Giacomo Clementi, Igor Neri, Francesco Cottone, Alessandro
Di Michele, Maurizio Mattarelli, Luca Gammaitoni

Internet of Things



CR2032 lithium battery - Energizer

Capacità:	235 mAh
-----------	---------

Peso:	3 g
-------	-----

Litio:	109 mg
--------	--------

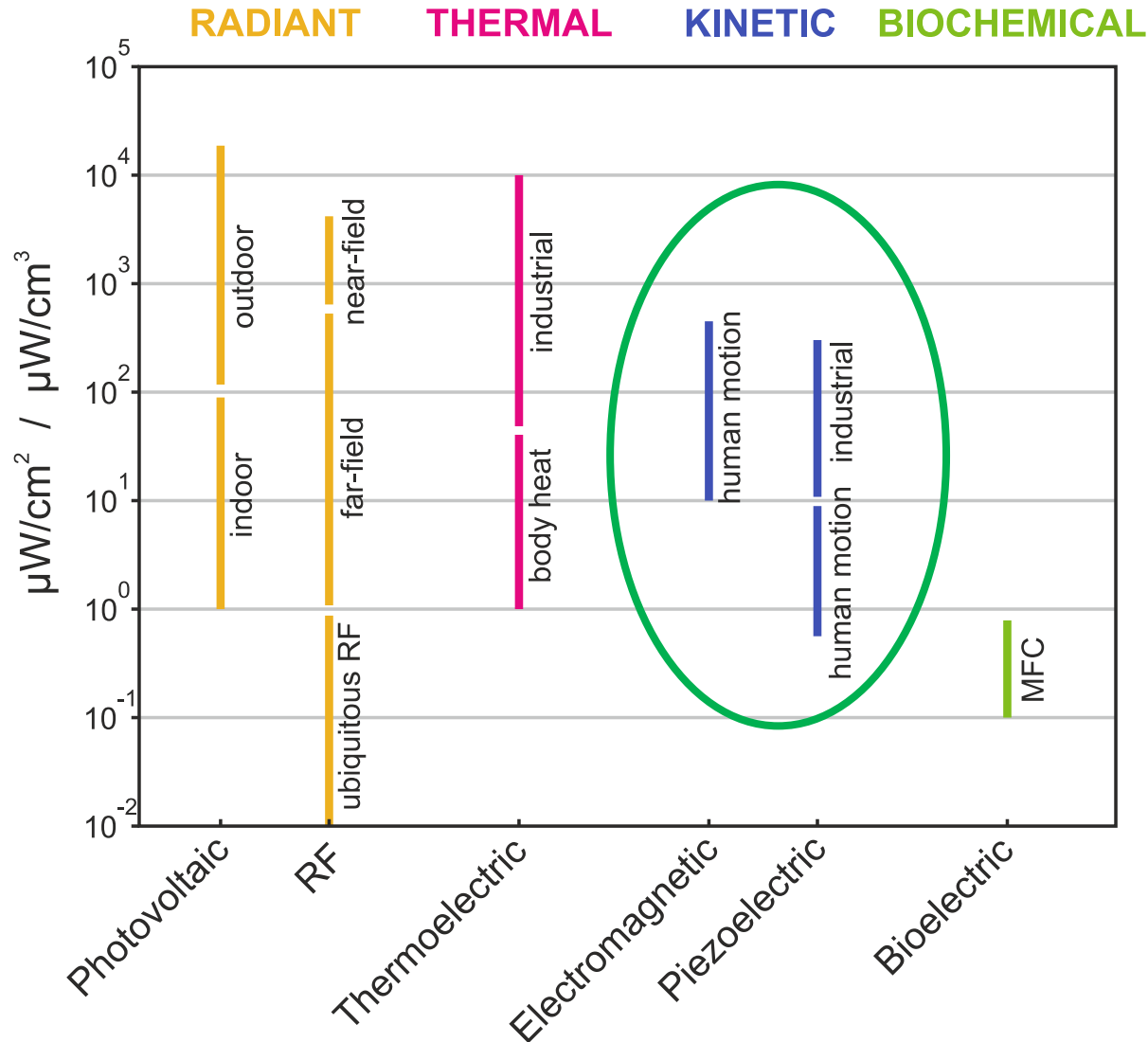
Volume	1 cm ³
--------	-------------------

Manifattura: **180 000 t**
~ 2023 estrazione di Li

Costo: **2 €/batteria**
~ PIL dell'Italia

Sostituzione: **2-3 vita media di una batteria**

Sorgenti di Energia



1) Adattabilità a diverse fonti energetiche

- Soluzioni personalizzate per applicazioni specifiche
- Flessibilità

2) Costi di manutenzione ridotti

- Riduce la necessità di sostituzioni regolari delle batterie
- Utilizzo in condizioni difficili

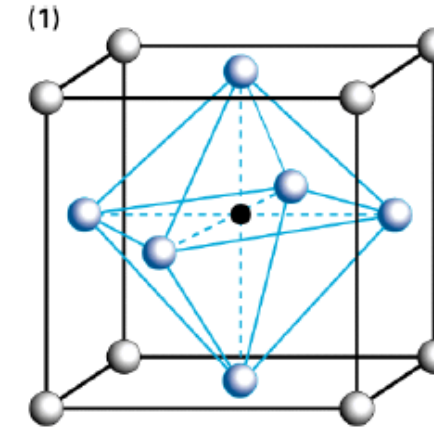
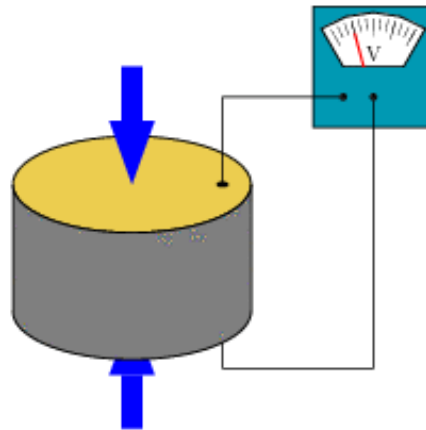
3) Autonomia estesa dei dispositivi

- Consumo energetico minimo per la massima durata della batteria
- Sensori auto-alimentati

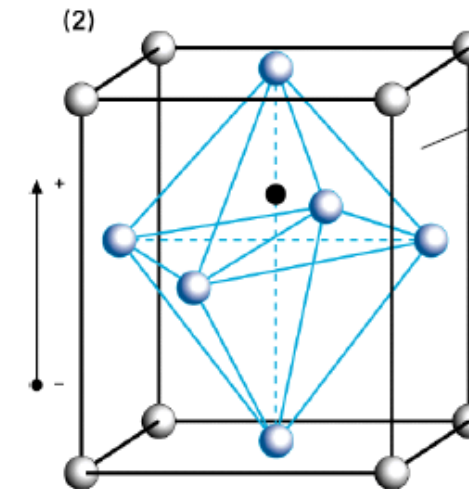
Materiali Elettroattivi: Piezoelettricità



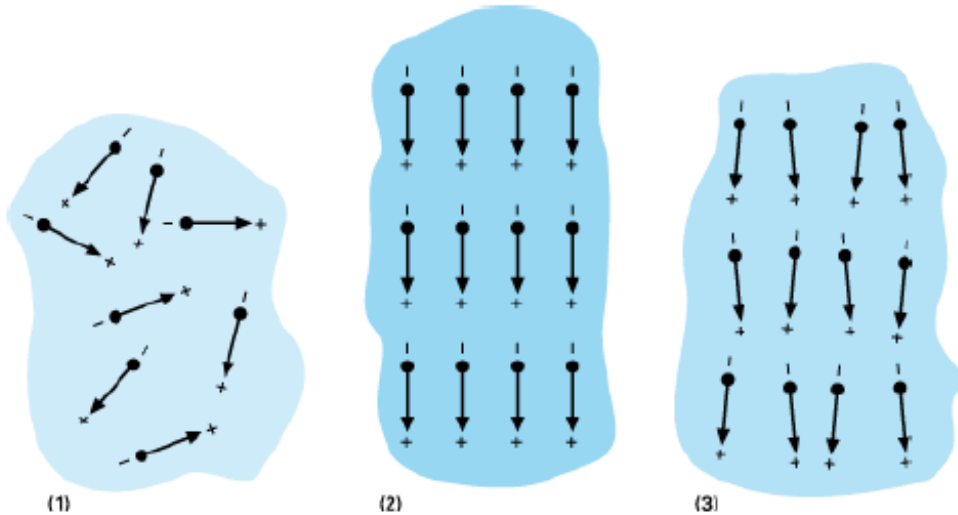
$\text{Pb}(\text{Mg,Nb})\text{O}_3\text{-PbTiO}_3$ (PMN-PT)



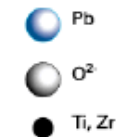
Cristallo non polarizzato



Cristallo polarizzato

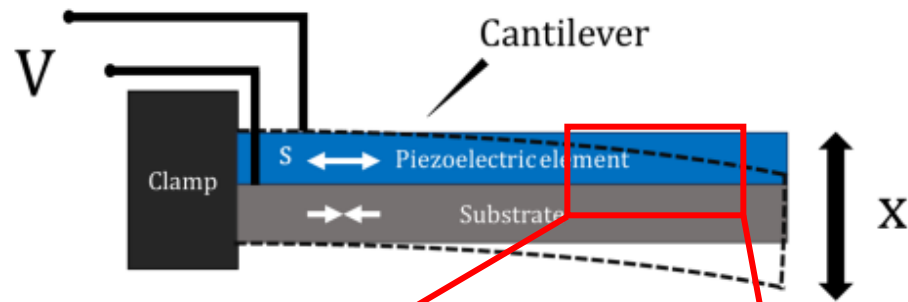


Dopo la polarizzazione gli atomi del all'interno del reticolo assumono una configurazione di dipolo



Recupero di Energia Vibrazionale

Un **materiale piezoelettrico** è un materiale che genera una carica elettrica in risposta a una sollecitazione meccanica applicata (**effetto piezoelettrico diretto**) e, viceversa, si deforma quando viene sottoposto a un campo elettrico (**effetto piezoelettrico inverso**).

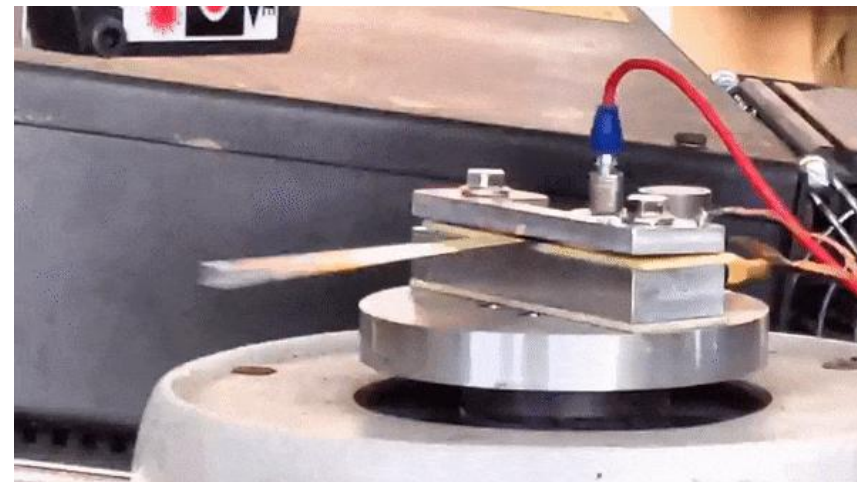
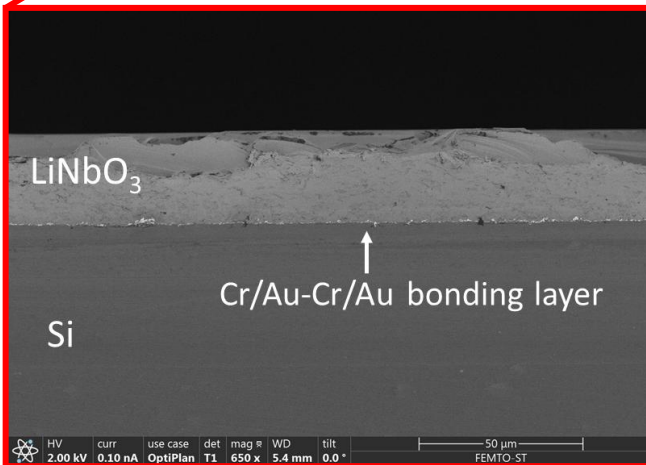


Effetto piezoelettrico diretto:

$$S = s T + d^t E$$

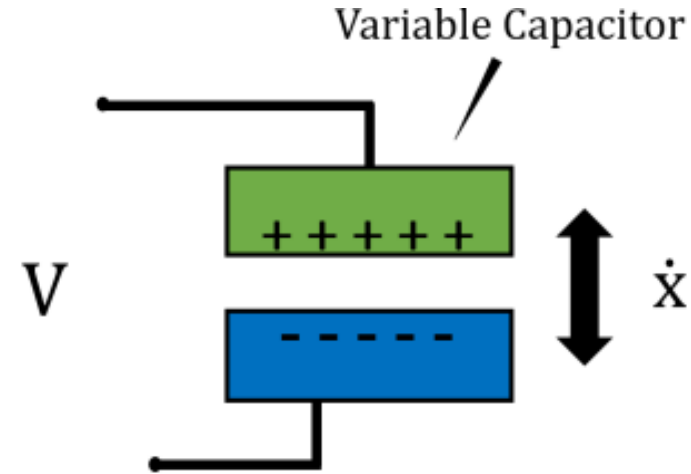
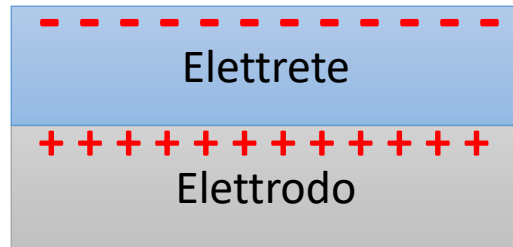
$$D = d T + \varepsilon E$$

Generatori piezoelettrici (1 mW/cm³)

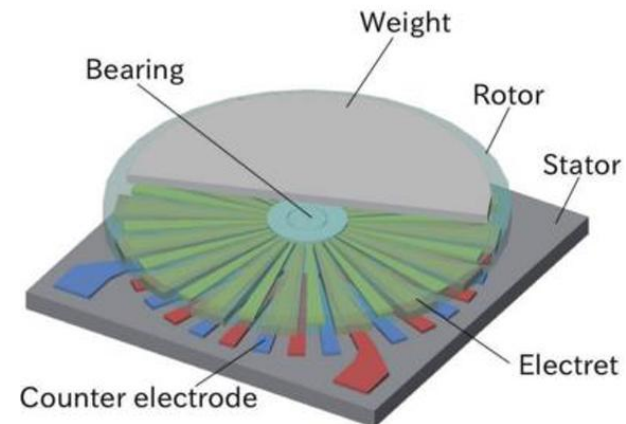
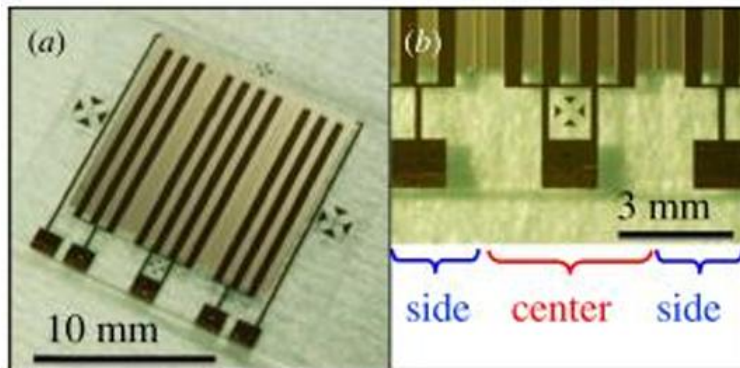


Materiali Elettroattivi: Elettreti

Un **elettrete** è un materiale dielettrico che possiede una carica elettrica quasi permanente o una polarizzazione di dipolo. Gli elettreti sono caratterizzati dalla loro **densità di carica superficiale** e dalla **stabilità nel tempo**.



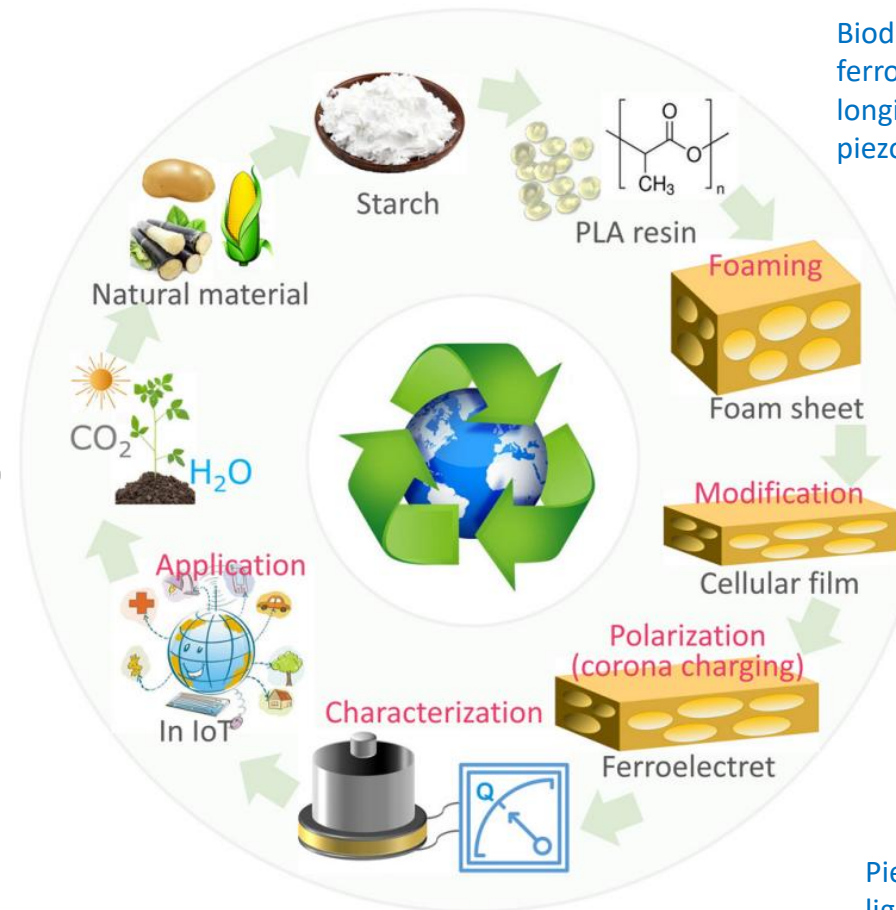
Generatore elettrostatico (0.1 mW/cm^3)



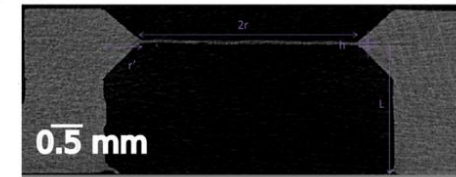
Polimeri Elettroattivi

Acido Polilattico (PLA)

- Piezoeletrete - Voided Charged Polymer
- Biodegradabile and Biocompatibile
- Sostenibile (derivato dell'amido di mais)
- Economico (20€/Kg)
- Fabbricazione con stampa 3D



Biodegradable cellular polylactic acid ferroelectrets with strong longitudinal and transverse piezoelectricity, Zhukov et al. 2020



Piezoelectric microphone via a digital light processing 3D printing process, Tiller et al (2019).

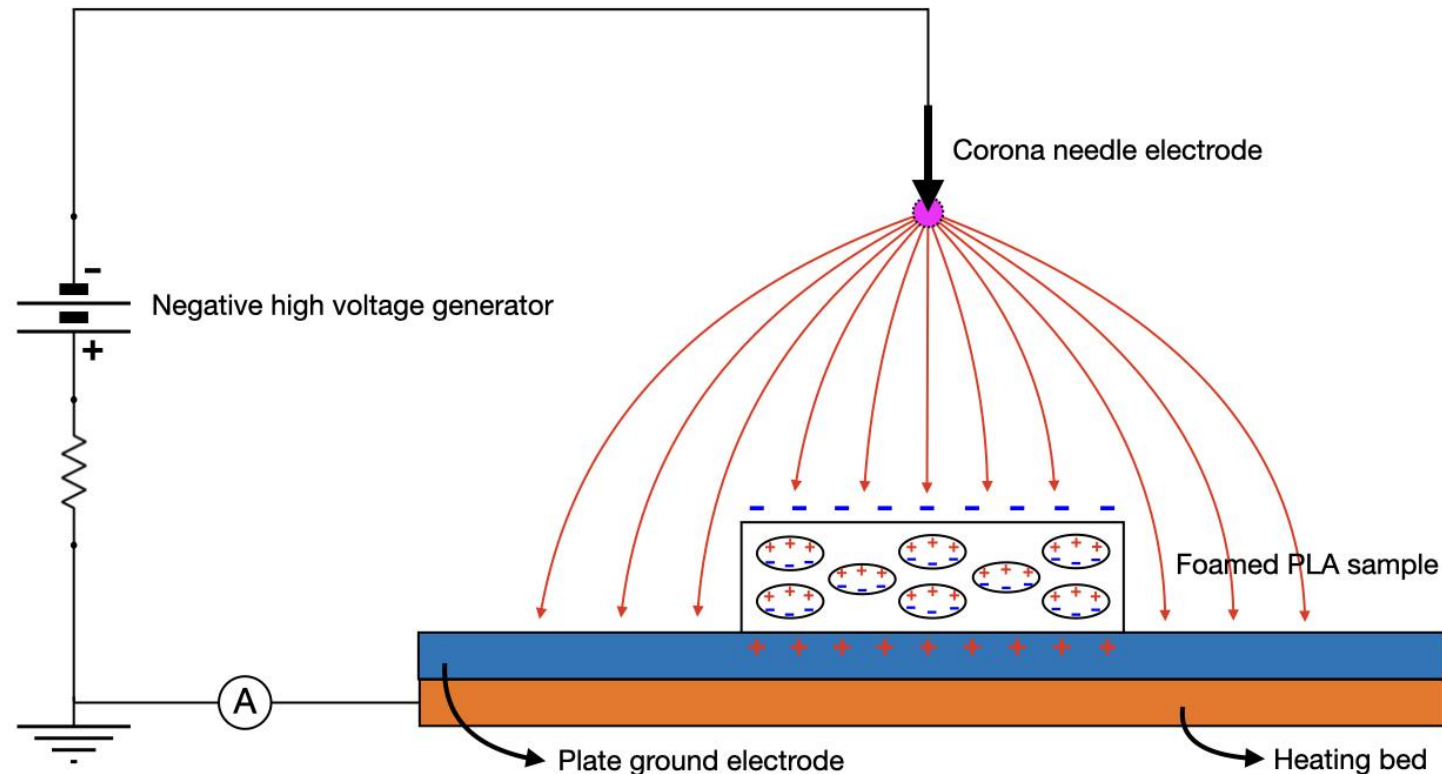
Fabbricazione PLA

Ultimaker3 FDM 3D



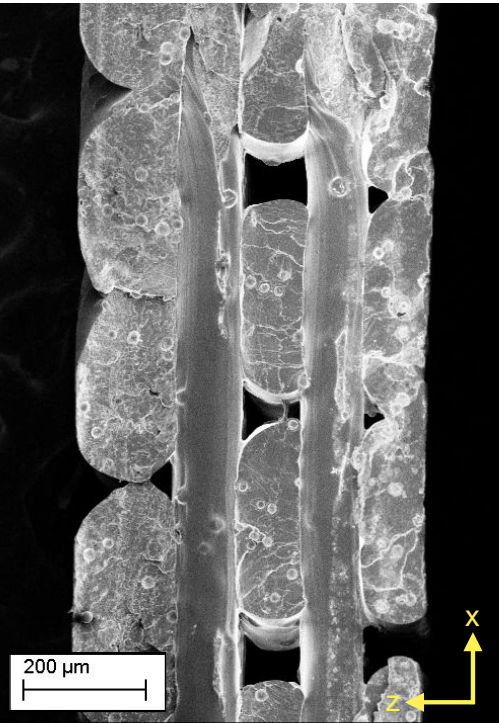
ColorFabb LW-PLA
natural (1.24 g/cm^3)

- Campioni di LW-PLA vengono polarizzati a temperatura ambiente
- Scarica a corona -25 kV a 4 cm per 5 minuti a 85°C .



Caratterizzazione con Microscopio Elettronico

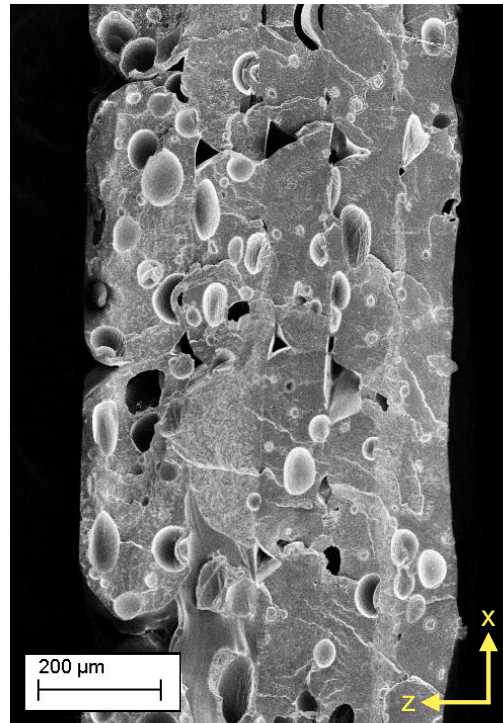
190°C



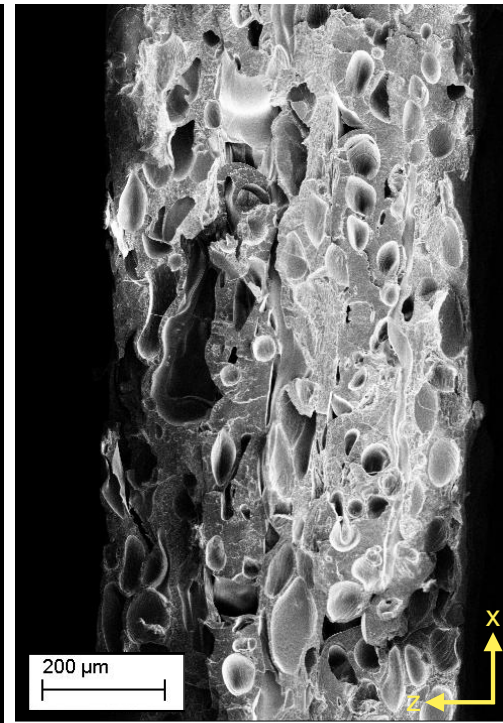
200°C



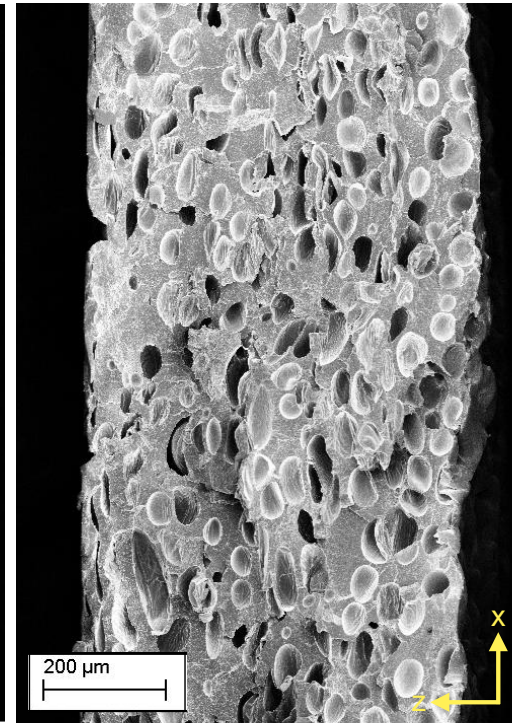
205°C



210°C



220°C

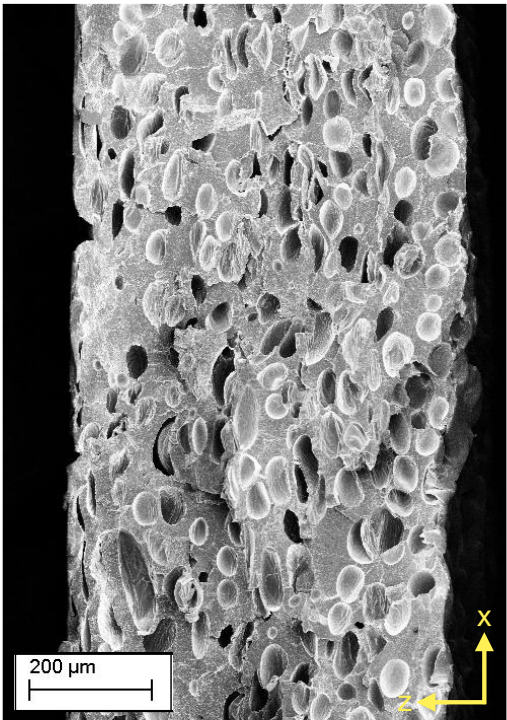


Higher temperatures

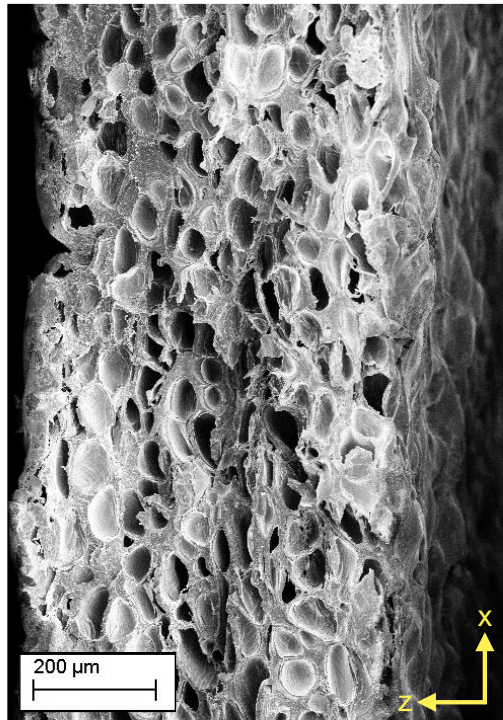


Caratterizzazione con Microscopio Elettronico

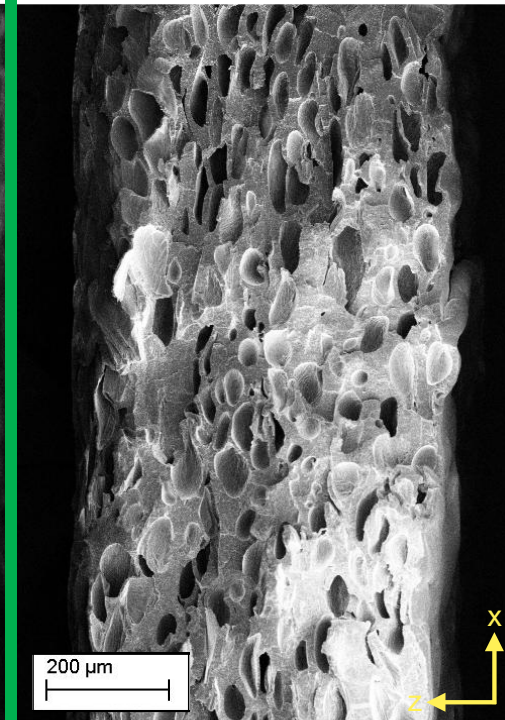
220°C



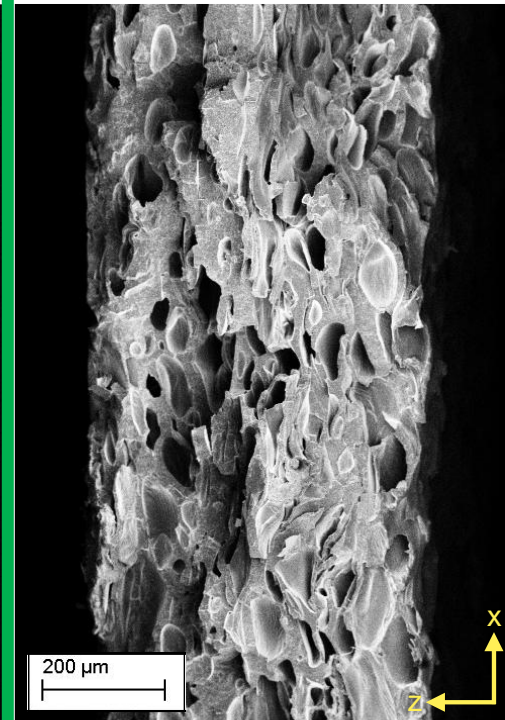
230°C



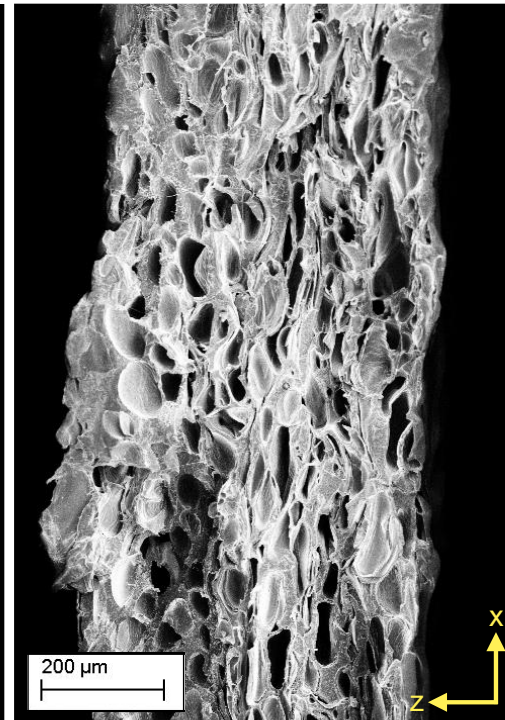
240°C



250°C



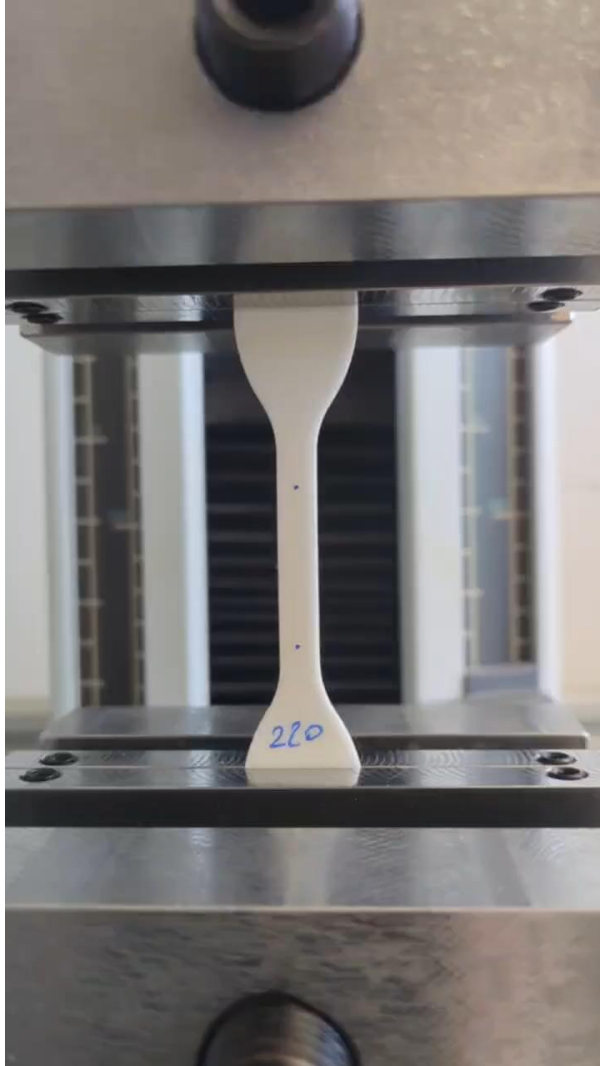
260°C



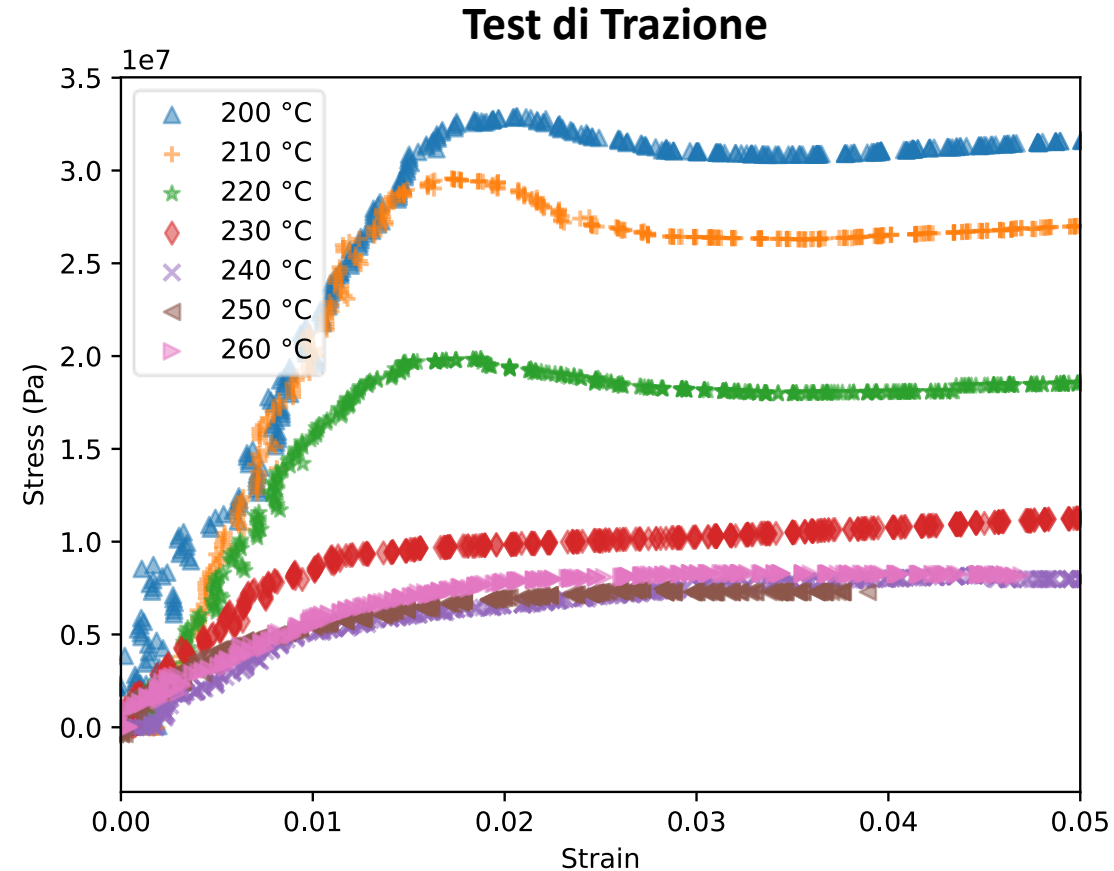
Higher temperatures



Caratterizzazione Meccanica



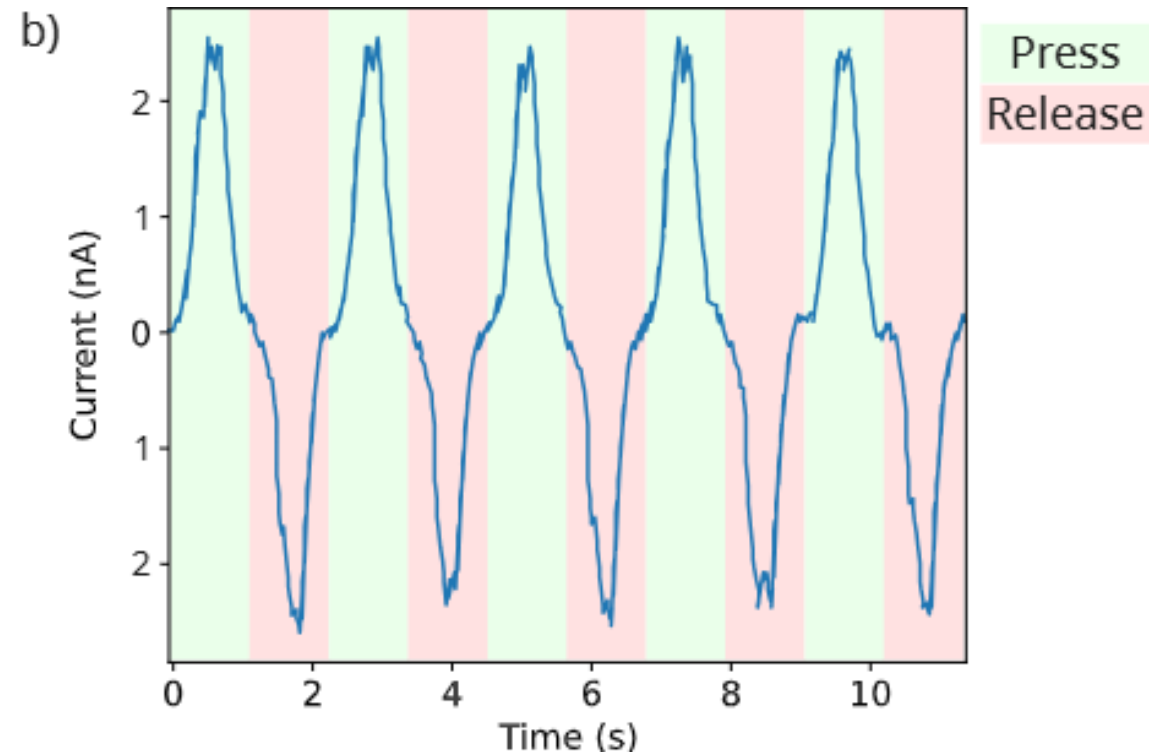
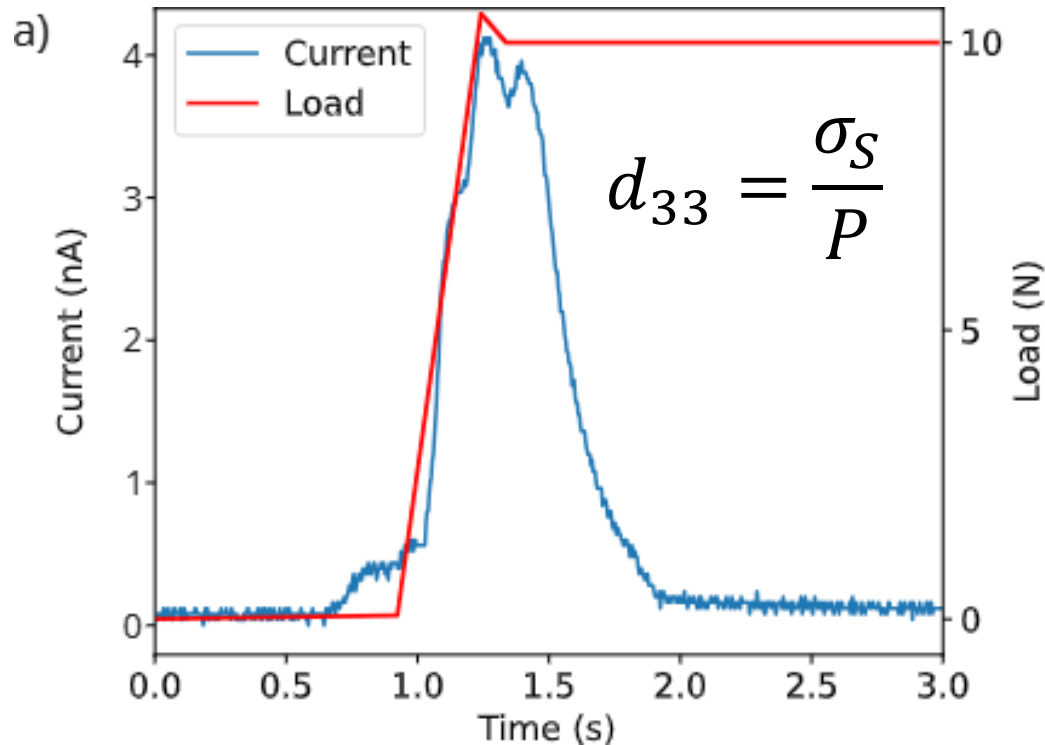
- Campioni di prova vengono sottoposti ad una forza in trazione con una velocità 10 mm/min,
- Lloyd Instruments LRX-Plus misura la deformazione dei campioni



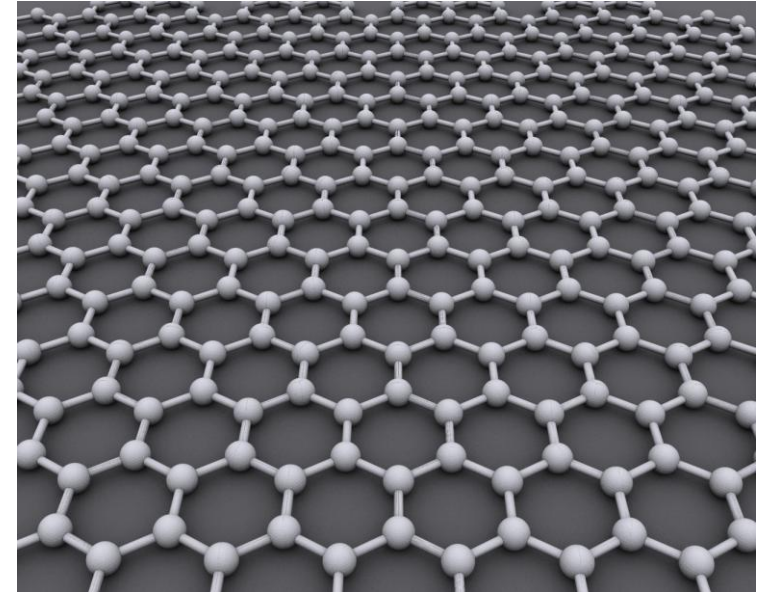
Caratterizzazione Elettro-Meccanica

- Forza di compressione $F = 10 \text{ N}$
- Integrando la carica generata q durante la deformazione, si può misurare il **coefficiente piezoelettrico longitudinale d_{33}**

$$d_{33} = 212 \text{ pC/N}$$

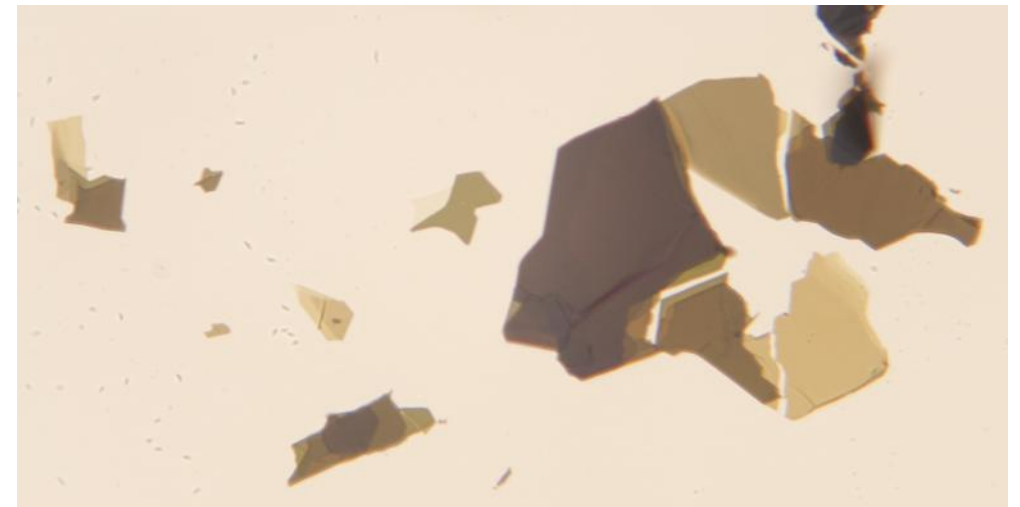
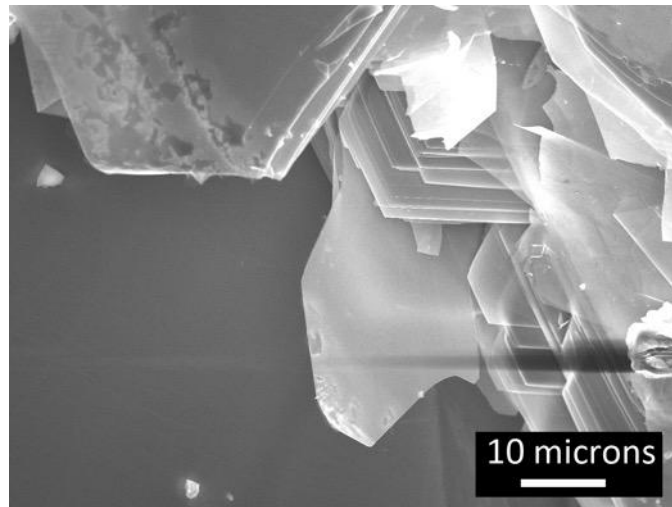
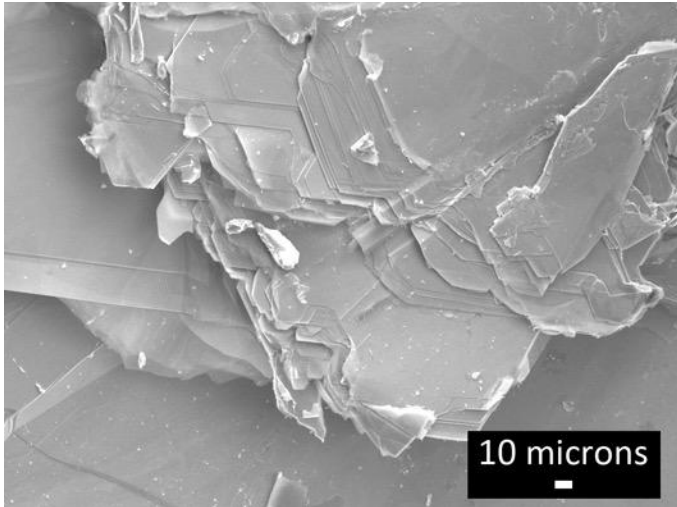
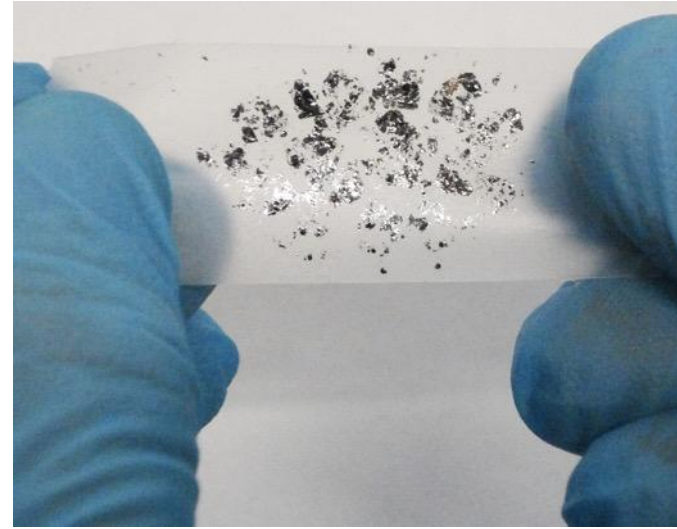


- Materiali costituiti da uno o più (pochi) strati atomici
 - Spessore trascurabile
- Graphene: 1 – 10 layers considerato come materiale 2D
 - Allotropo 2D del carbonio con struttura esagonale
 - Spessore di un singolo layer $\sim 3.4 \text{ \AA}$
 - Quasi trasparente nel visibile (assorbimento $\sim 2.3\%$)
 - 100 volte più robusto dell'acciaio
 - Ossido di grafene ridotto rGO come elettrodo (Prof. Cottone)
- **Solfuro di molibdeno (MoS_2)**
 - Semiconduttore diamagnetico a bandgap indiretto (monolayer 1.8 eV) simile al silicio
 - # dispari di strati è in grado di generare tensioni e correnti piezoelettriche



Materiali 2D: produzione

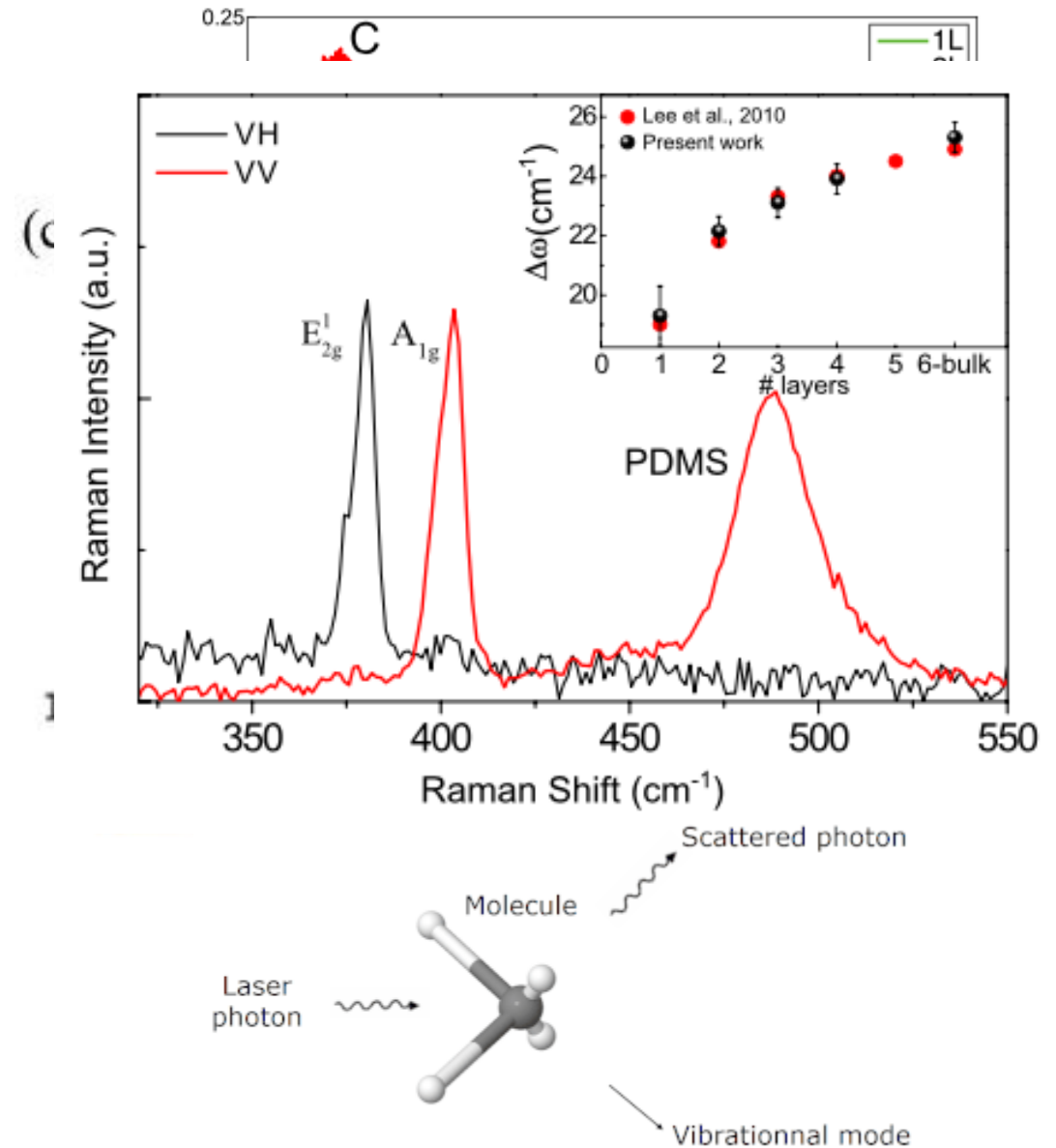
igor.neri@unipg.it



Materiali 2D: caratterizzazione

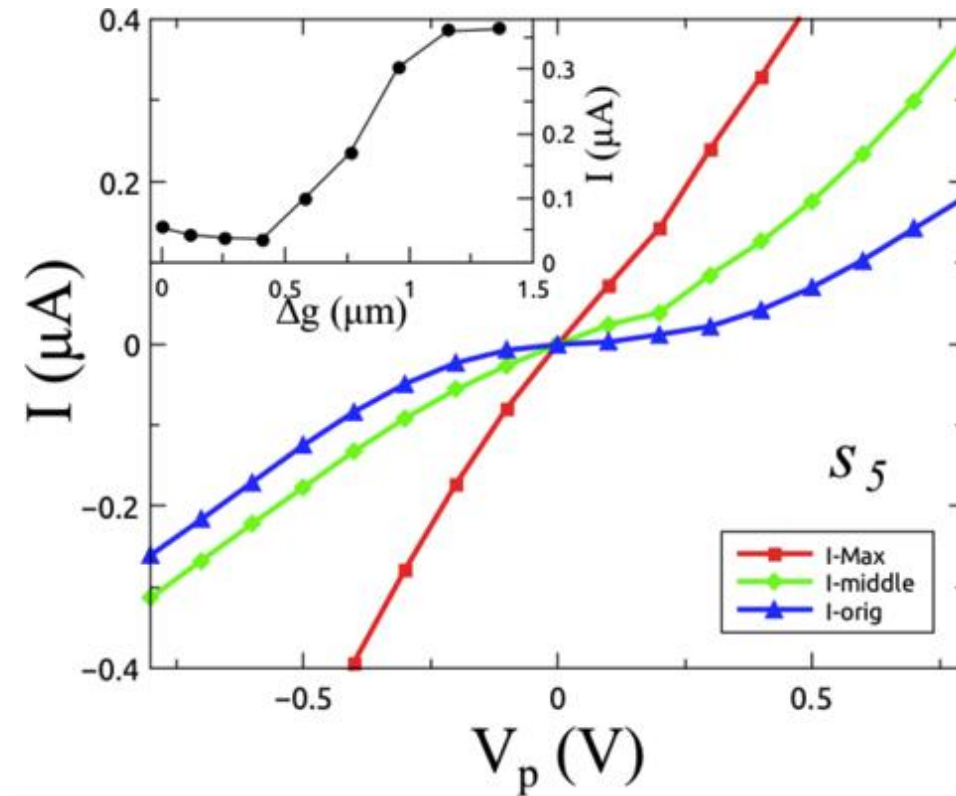
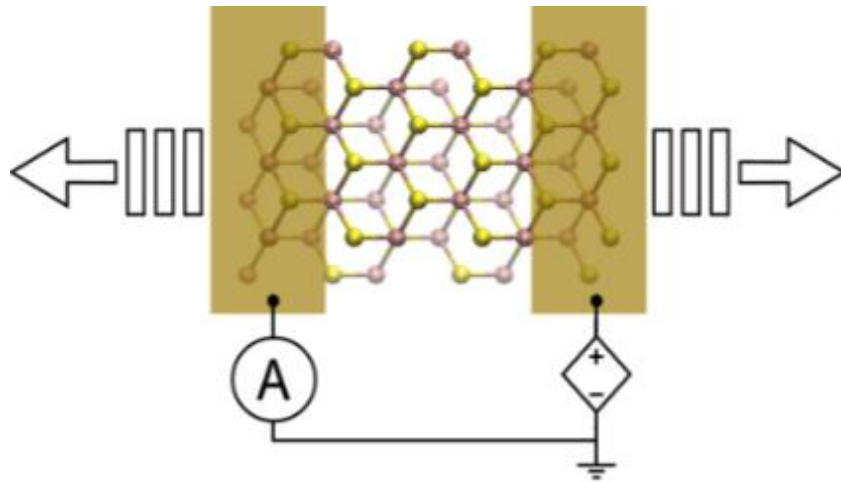
Caratterizzazione e studio sperimentale:

- Microscopia elettronica (SEM)
- Micro-spettroscopia UV-VIS
- Microscopia AFM
- Micro-spettroscopia Raman
- Micro-spettroscopia Brillouin
- Bande elettroniche



Materiali 2D: applicazione – sensore strain

igor.neri@unipg.it



Tunable MoS2 strain sensor, I Neri, M López-Suárez, L Gammaitoni, IEEE Instrumentation & Measurement Magazine 23 (1), 30-33 (2020)

Electronic transport modulation on suspended few-layer under strain, I Neri, M López-Suárez, Physical Review B 97 (24), 241408 (2018)

Proposte di tesi

Materiali Elettroattivi

- Caratterizzazione e design di dispositivi elettroattivi stampati in 3D
- Sviluppo di sensori autoalimentati per applicazioni di monitoraggio ambientale

Materiali 2D

- Studio delle proprietà piezoelettriche del MoS₂ in condizioni di deformazione controllata
- Ottimizzazione di elettrodi mediante litografia elettronica per la caratterizzazione piezoelettrica di nanostrutture di MoS₂

Collaborazioni e Progetti

- **VITALTY** – Nanostructured and advanced materials and devices for energy harvesting
- **NANOFAB** – Progetto Ateneo – Facility per micro e nano fabbricazione di NEMS/MEMS



A.D. 1308
unipg
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI
DI PERUGIA



WISEPOWER

RFμmicrotech
Innovation and Technology at Your Service

ST
life.augmented



POLITECNICO
MILANO 1863

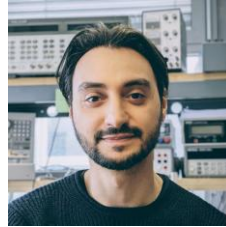
ESIEE
PARIS



Gruppo di Ricerca



Igor Neri
igor.neri@unipg.it



Giacomo Clementi
giacomo.clementi@unipg.it



Maurizio Mattarelli
maurizio.mattarelli@unipg.it



Alessandro Di Michele
alessandro.dimichele@unipg.it



Francesco Cottone
francesco.cottone@unipg.it



Luca Gammaitoni
luca.gammaitoni@unipg.it