



UNIVERSITÀ DI PISA

Dipartimento di Fisica

Corso di Laurea Magistrale in Fisica della Materia

# Quantum Transport in Planar Niobium/black-Phosphorus/Niobium Junctions

Relatori:

Prof. Stefan Heun

Dr. Francesca Telesio

Prof. Stefano Roddaro

Candidato:

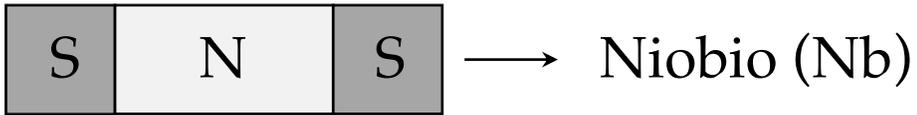
Giulio Cappelli

Appello di laurea di dicembre

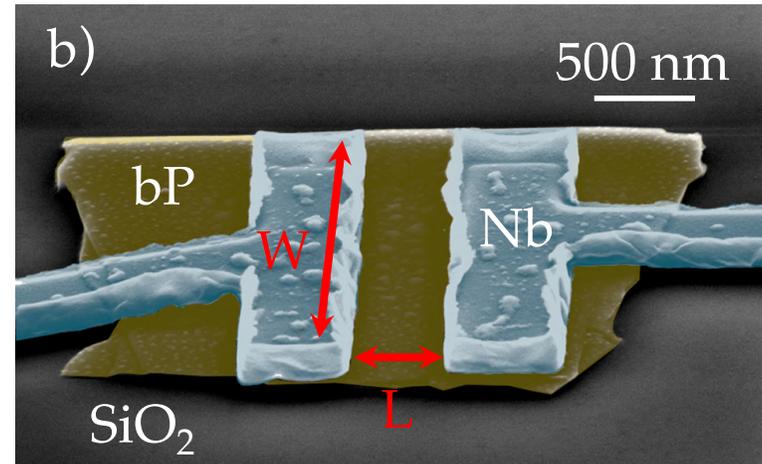
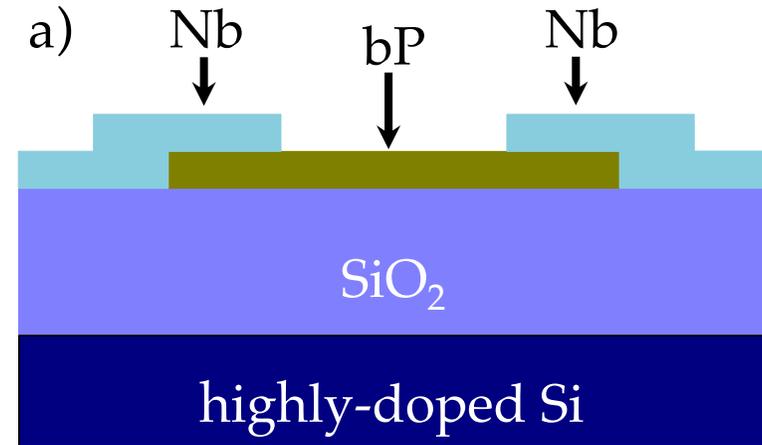
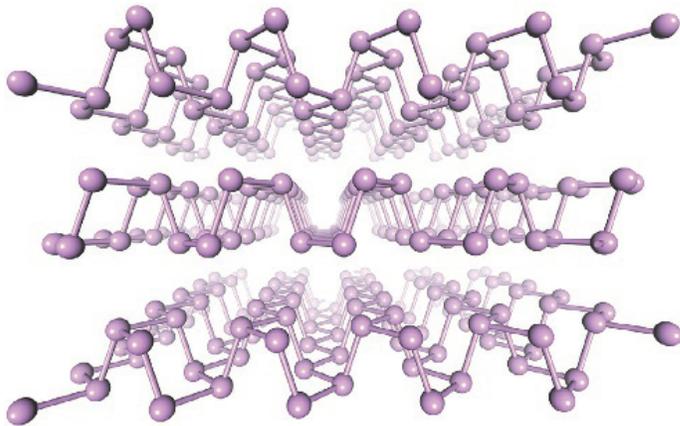
A.A. 2019/2020

# Introduzione

## ➤ Giunzione SNS



black-Phopshorus (bP)



# Outline:

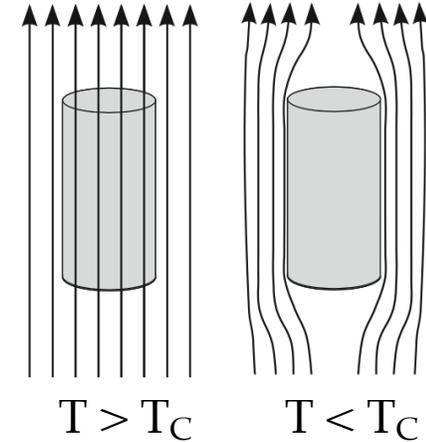
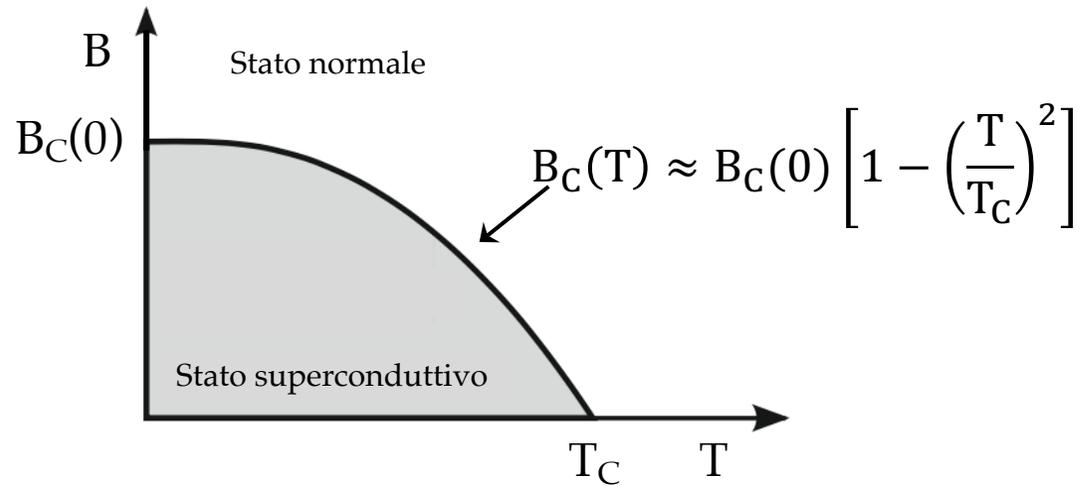
- Superconduttività e giunzioni SNS
- Black-Phosphorus
- Fabbricazione dei dispositivi
- Setup sperimentale
- Risultati sperimentali
- Conclusioni e prospettive future

# Outline:

- **Superconduttività e giunzioni SNS**
- Black-Phosphorus
- Fabbricazione dei dispositivi
- Setup sperimentale
- Risultati sperimentali
- Conclusioni e prospettive future

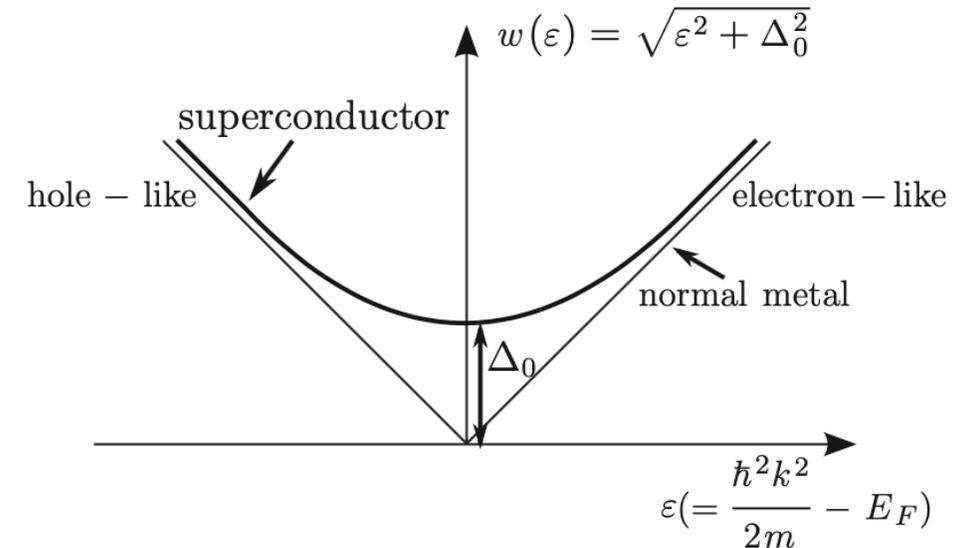
# Superconduttività

➤ Superconduttore = Conduttore perfetto + Diamagnete perfetto



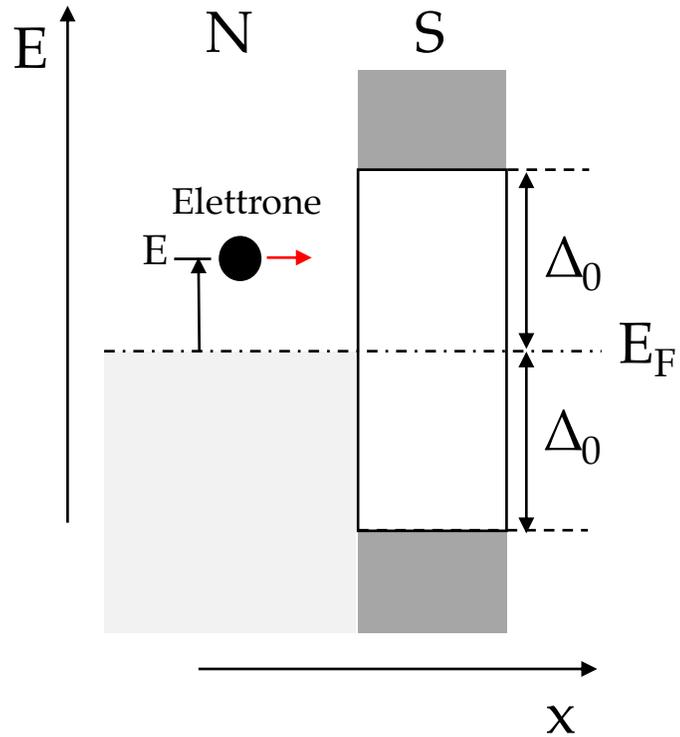
➤ Attrazione efficace fra elettroni  $\Rightarrow$  Coppie di Cooper

$$\rightarrow \Delta_0 = 1.76 k_B T_C$$



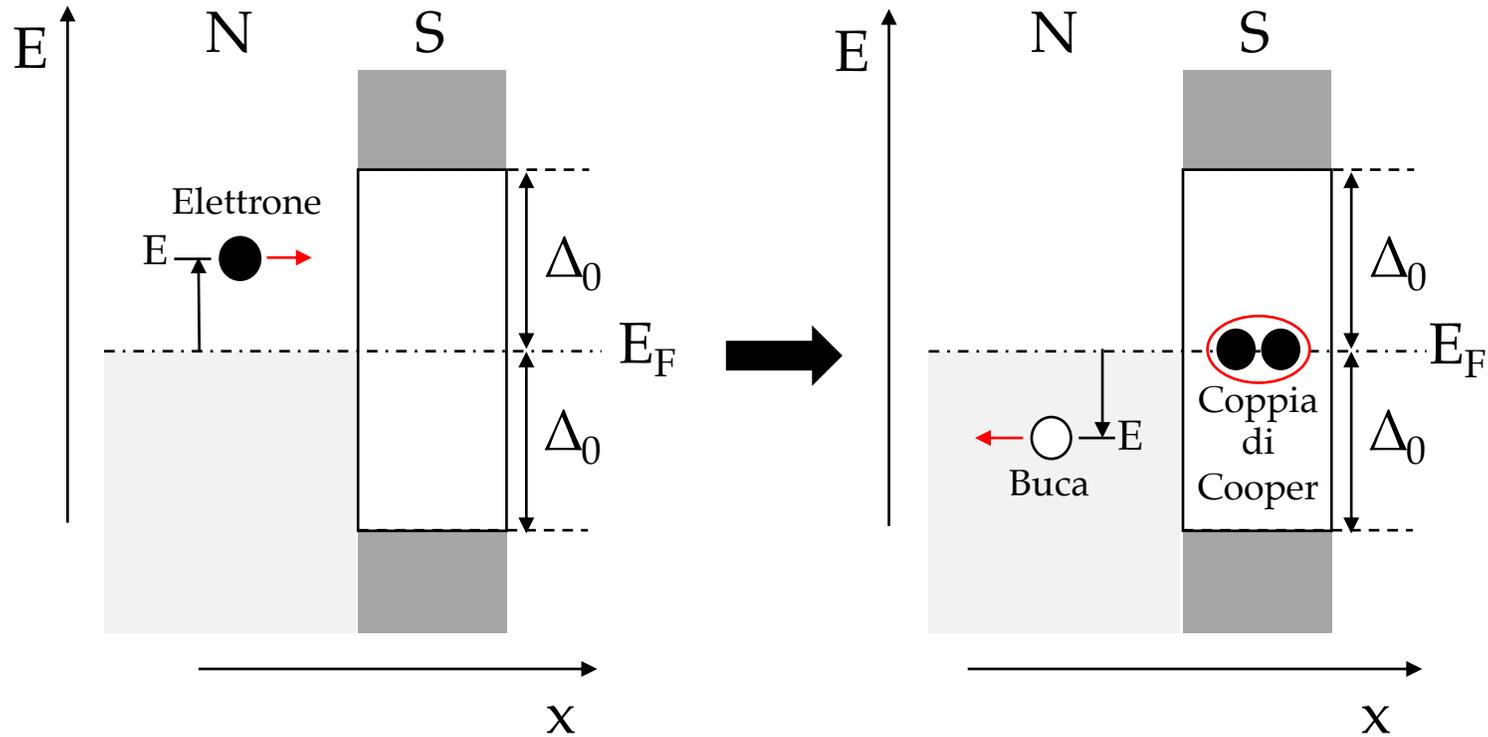
# Andreev Reflection

➤ Interfaccia NS

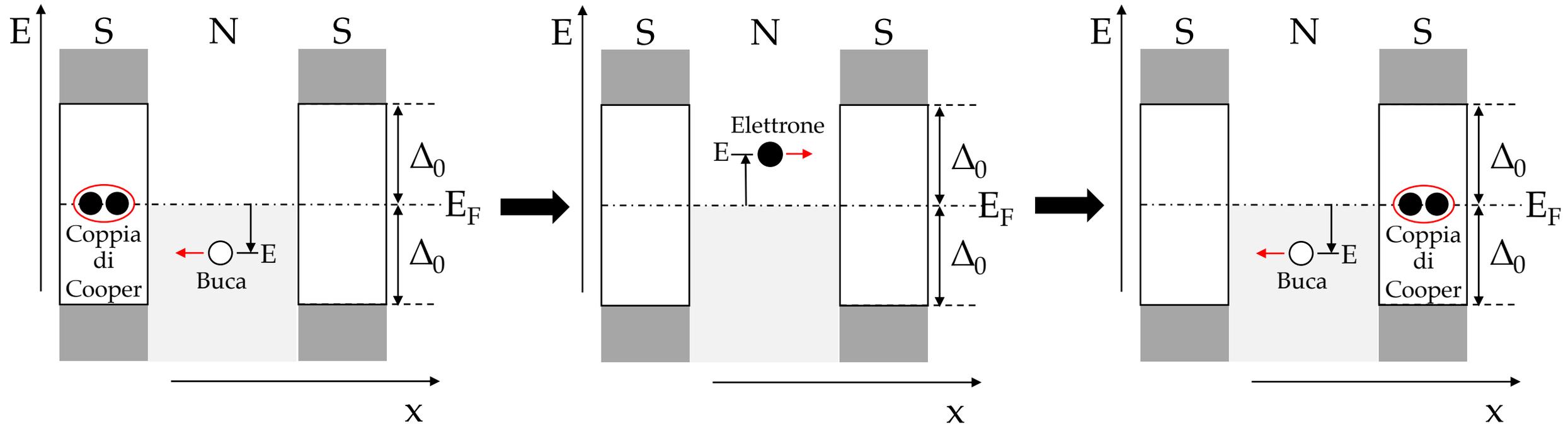


# Andreev Reflection

➤ Interfaccia NS



# Giunzione SNS



# Trasparenza Interfaccia SN

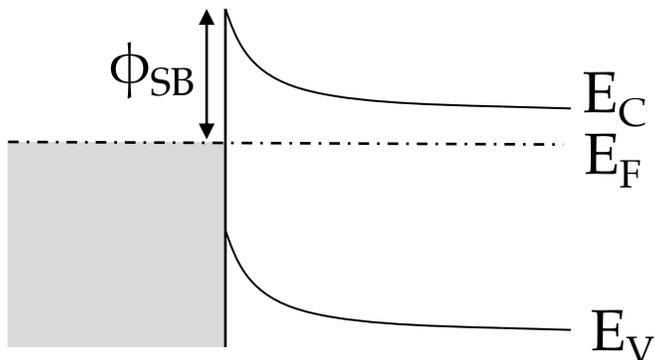
➤ Barriera di potenziale all'interfaccia SN

1. Layer isolante



2. Barriera Schottky

Metallo Semiconduttore



▪ **Andreev reflection**  $\rightarrow I = I_N + I_{\text{excess}}$

▪ **Normal reflection**  $\rightarrow I = I_N - I_{\text{deficit}}$

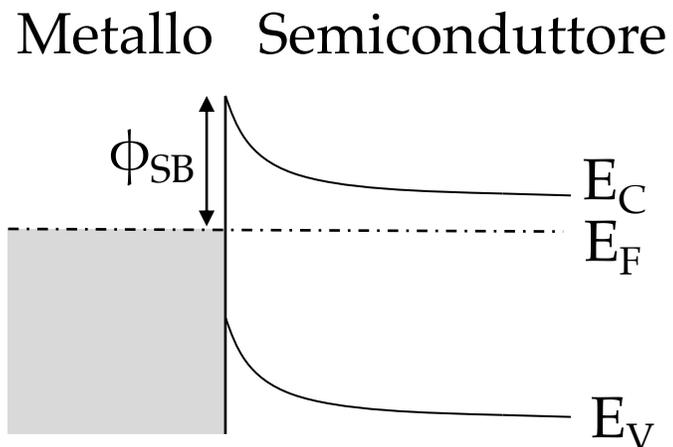
# Trasparenza Interfaccia SN

➤ Barriera di potenziale all'interfaccia SN

1. Layer isolante



2. Barriera Schottky



▪ **Andreev reflection**  $\rightarrow I = \overset{\circ}{I_N} + I_{\text{excess}}$

$$I_N = V/R_N, \quad (V \gg \Delta_0/e)$$

▪ **Normal reflection**  $\rightarrow I = \overset{\circ}{I_N} - I_{\text{deficit}}$

# Outline:

➤ Superconduttività e giunzioni SNS

## ➤ **Black-Phosphorus**

➤ Fabbricazione dei dispositivi

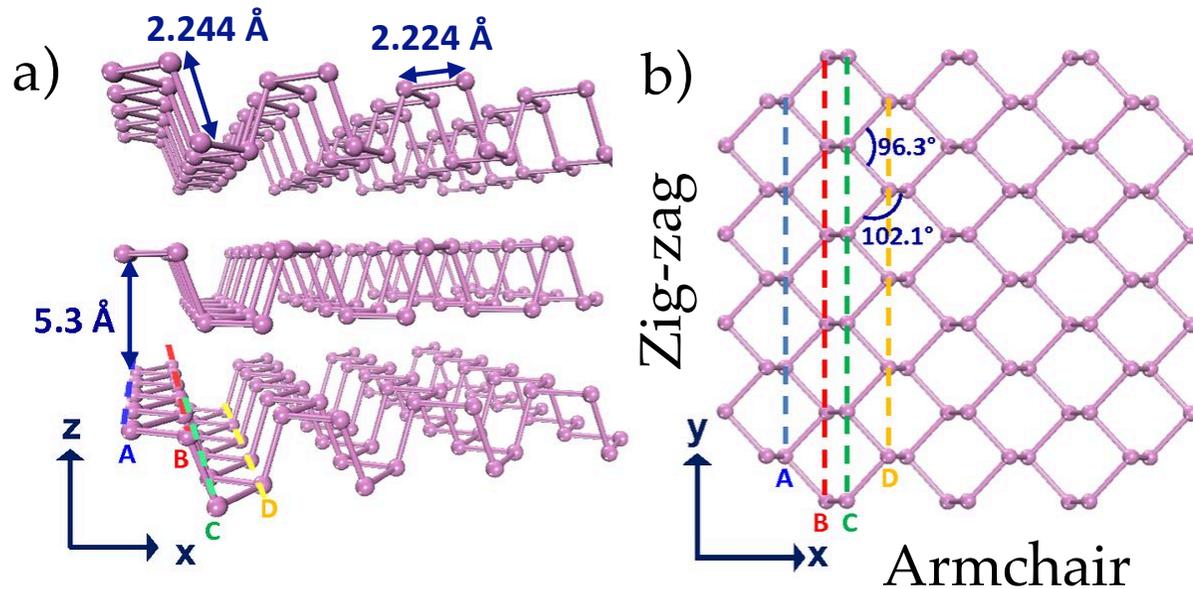
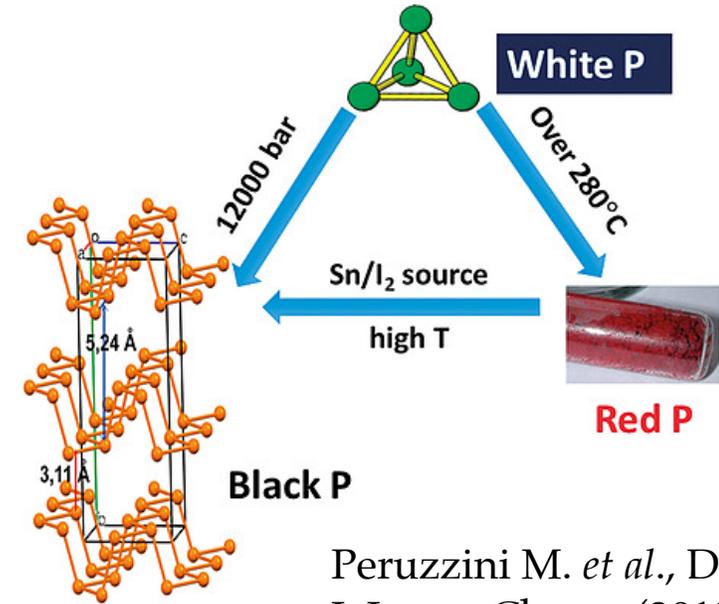
➤ Setup sperimentale

➤ Risultati sperimentali

➤ Conclusioni e prospettive future

# Black-Phosphorus (bP)

- Ottenuto per la prima volta nel 1914
- Simile alla grafite
- Nel 2014 viene "riscoperto" come **materiale 2D**

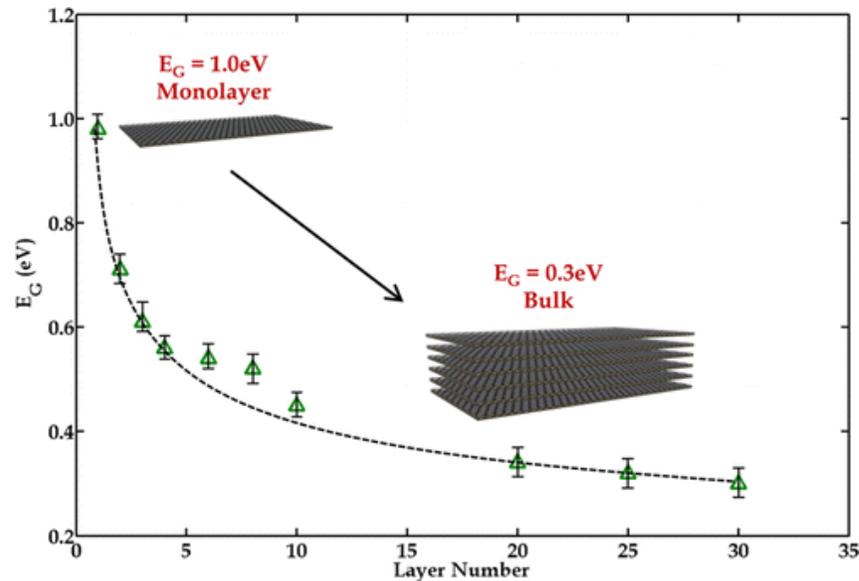


X. Ling *et al.*, *PNAS* 112 (2015) 4523

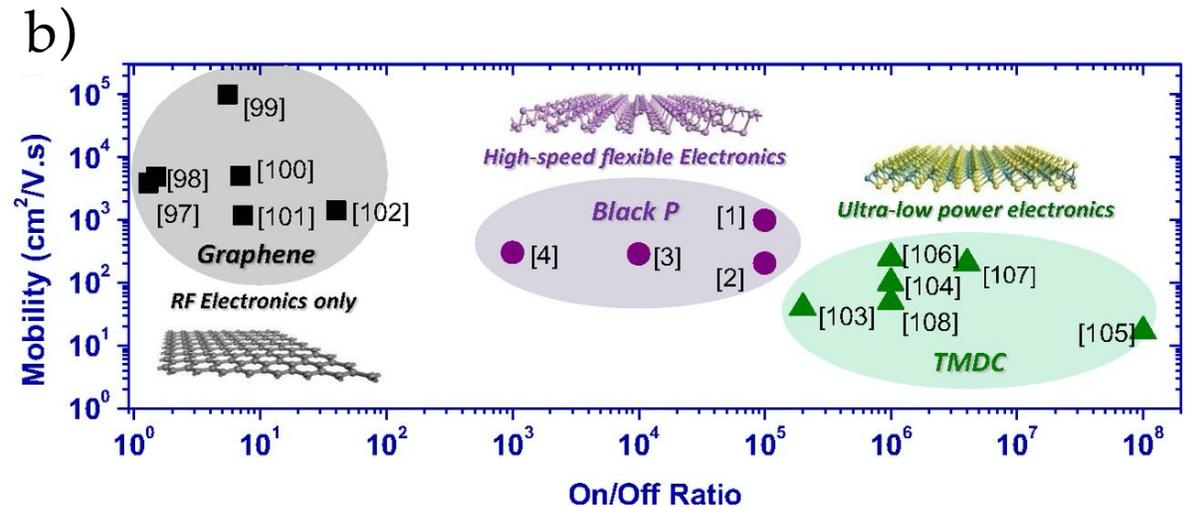
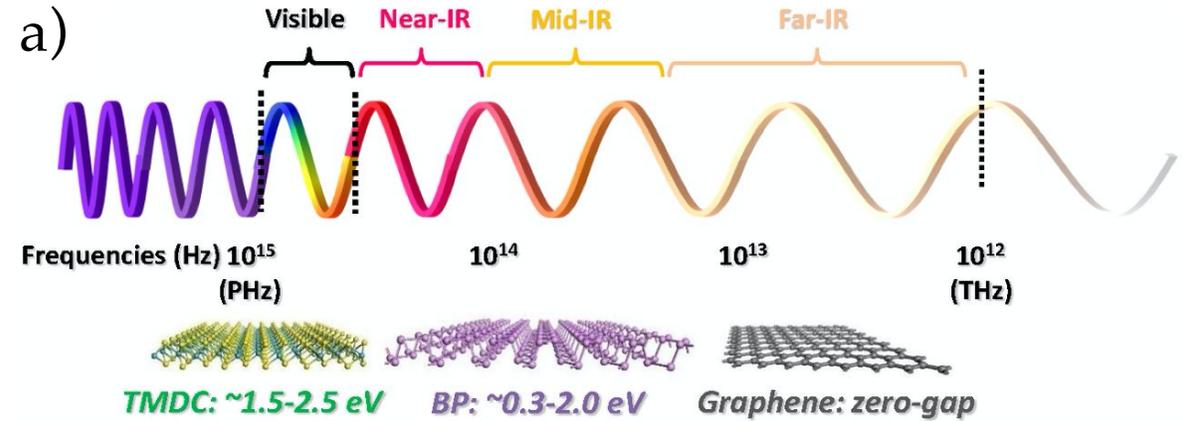
- Un **sigolo layer** di bP non è piatto
  - ⇒ Struttura a nido d'ape corrugata
  - ⇒ **Anisotropia** nel piano

# Black-Phosphorus (bP)

- **Semiconduttore di tipo p**
- **Anisotropia** delle proprietà ottiche e di trasporto elettrico e termico



S. Das *et al.*, *Nano Letters* **2014** 14 (10), 5733-5739



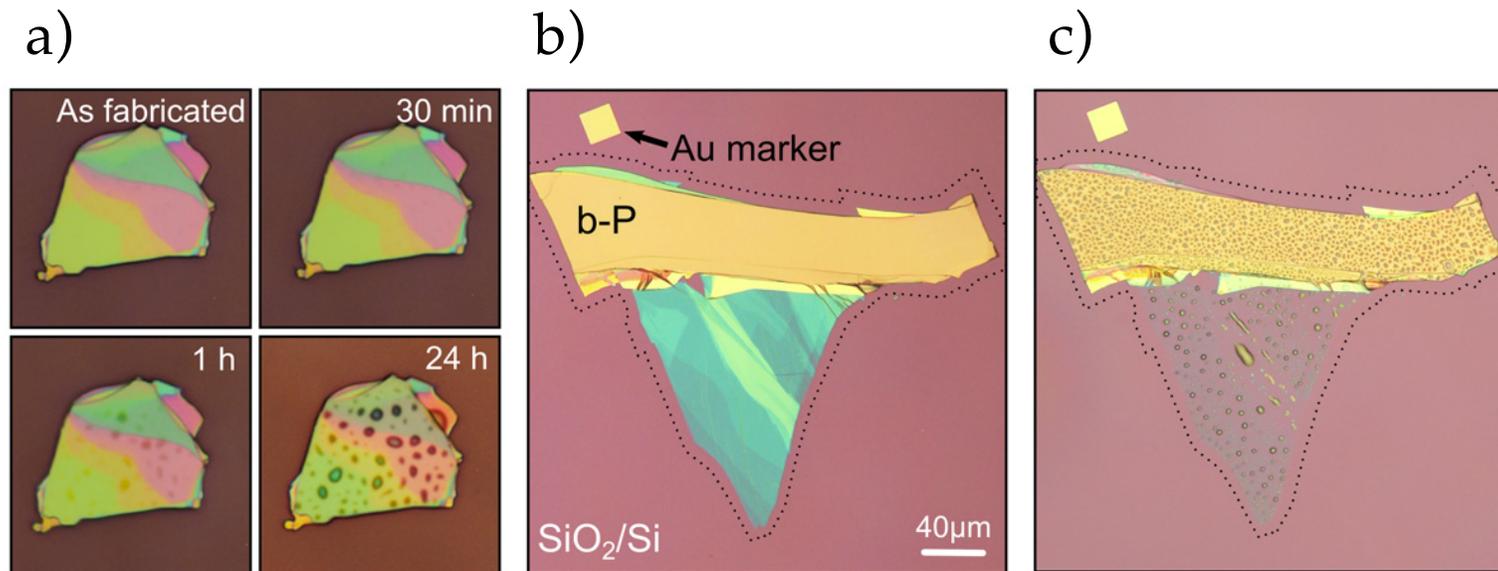
X. Ling *et al.*, *PNAS* 112 (2015) 4523

# Stabilità ambientale

➤ Grande reattività del bP in aria  $\Rightarrow$  **Svantaggio** nella fabbricazione di dispositivi



Azione combinata di ossigeno, acqua e luce è **distruttiva**



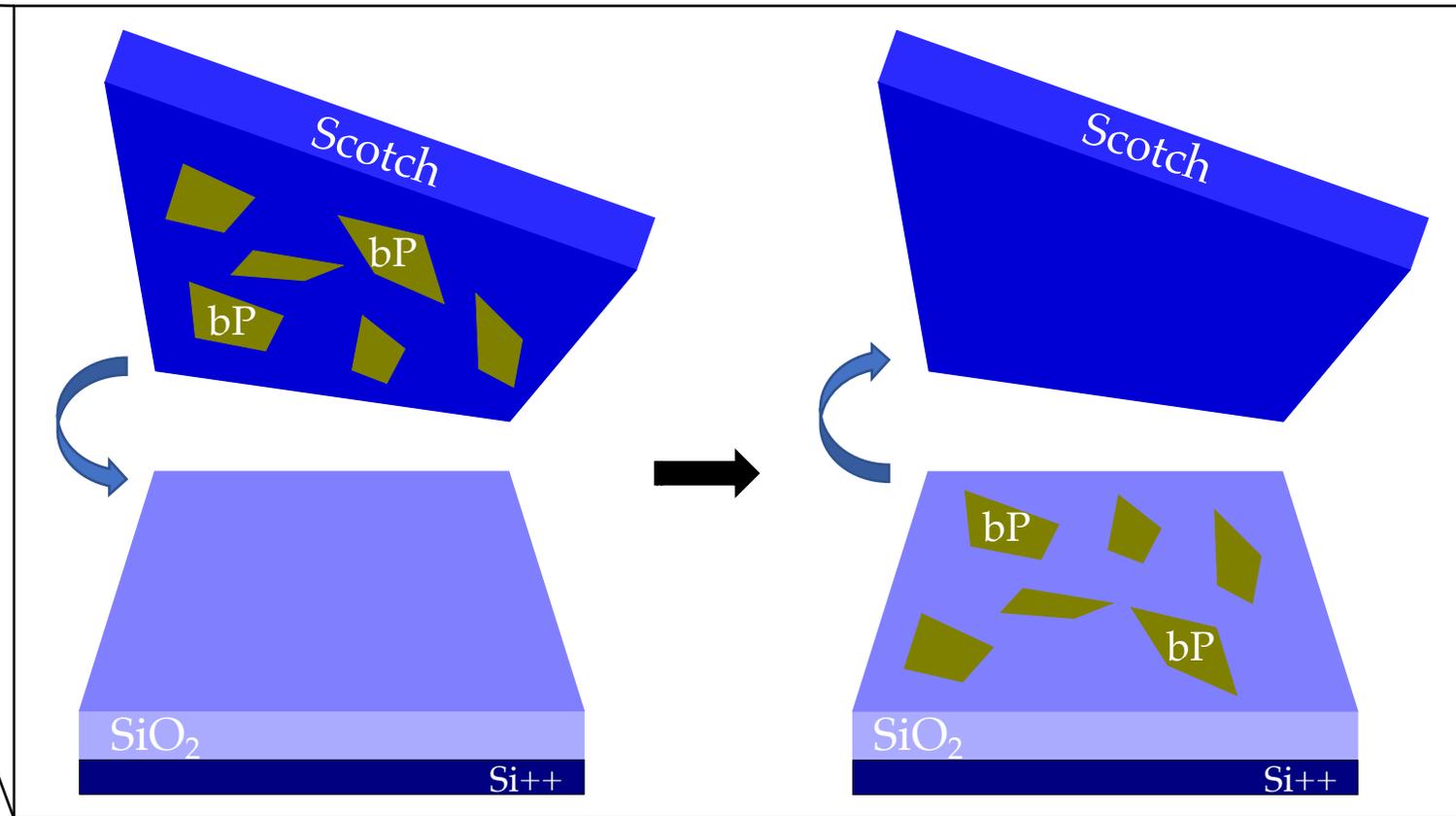
A. Castellanos-Gomez *et al.*, 2014 *2D Mater.* **1** 025001

# Outline:

- Superconduttività e giunzioni SNS
- Black-Phosphorus
- **Fabbricazione dei dispositivi**
- Setup sperimentale
- Risultati sperimentali
- Conclusioni e prospettive future

# Protocollo di Fabbricazione

Esfoliazione  
in glove-bag  
(atmosfera  
di azoto)

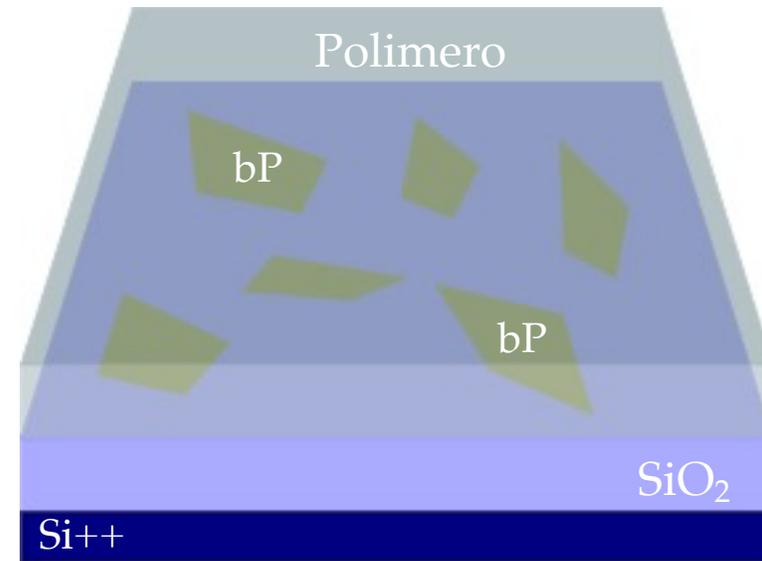


# Protocollo di Fabbricazione

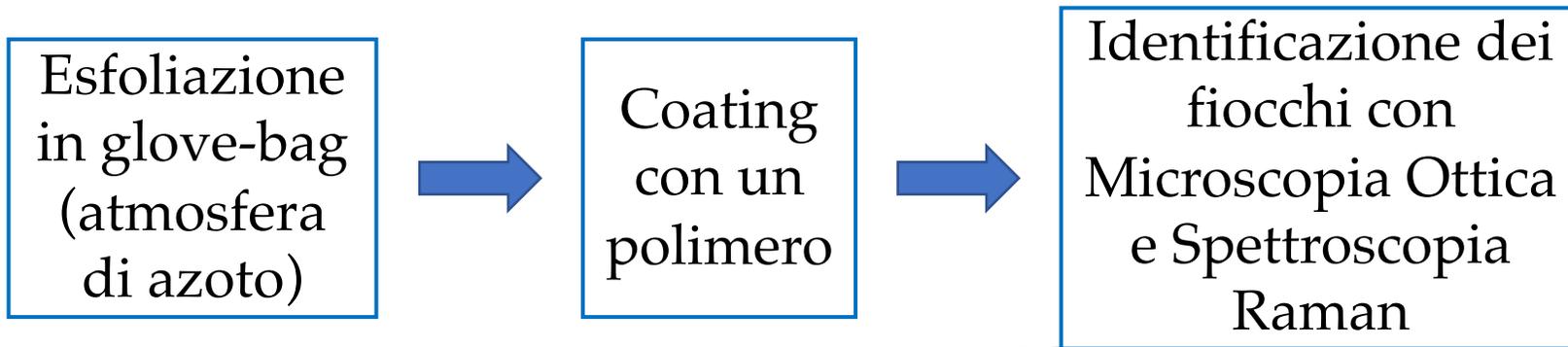
Esfoliazione  
in glove-bag  
(atmosfera  
di azoto)



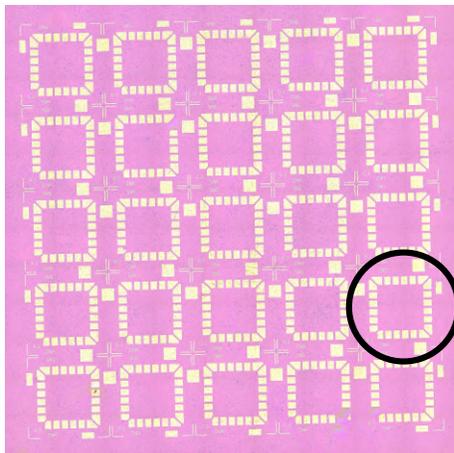
Coating  
con un  
polimero



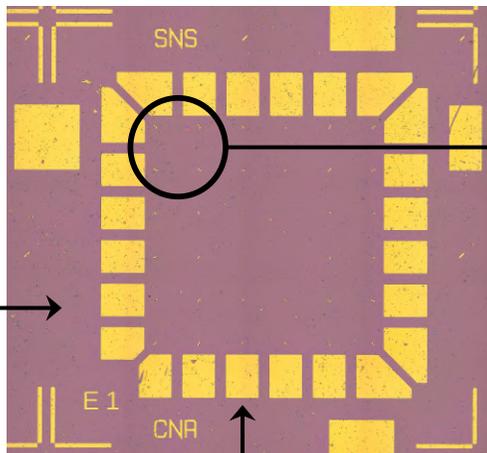
# Protocollo di Fabbricazione



a)

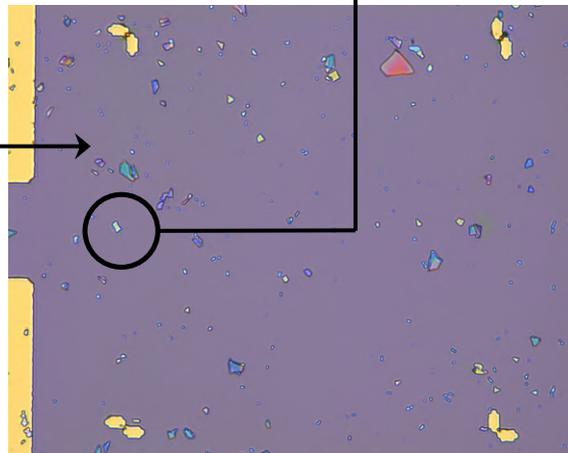


b)

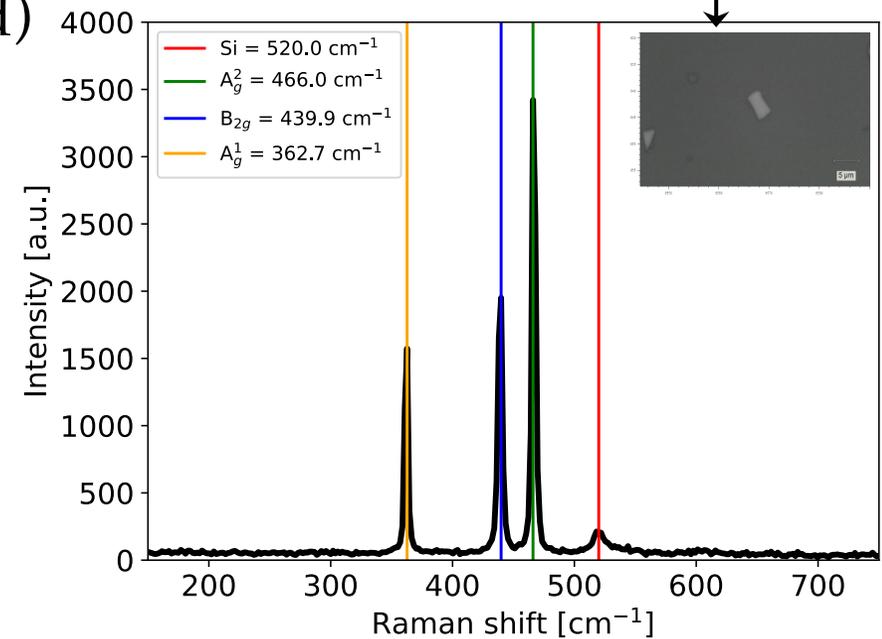


Pad di oro

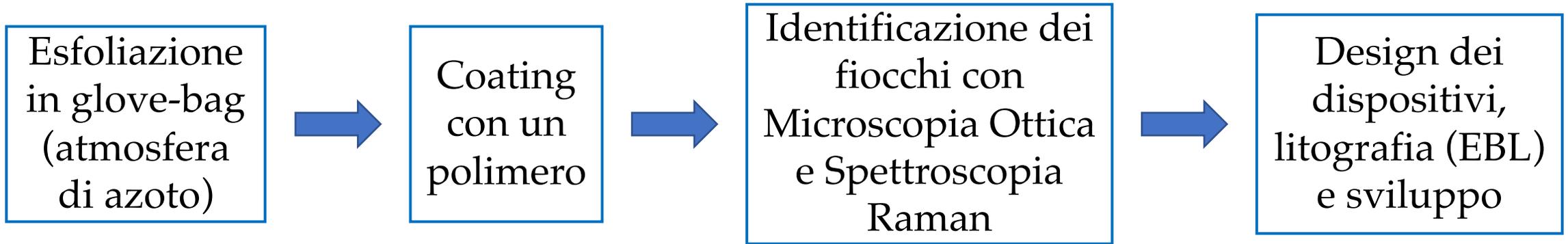
c)



d)



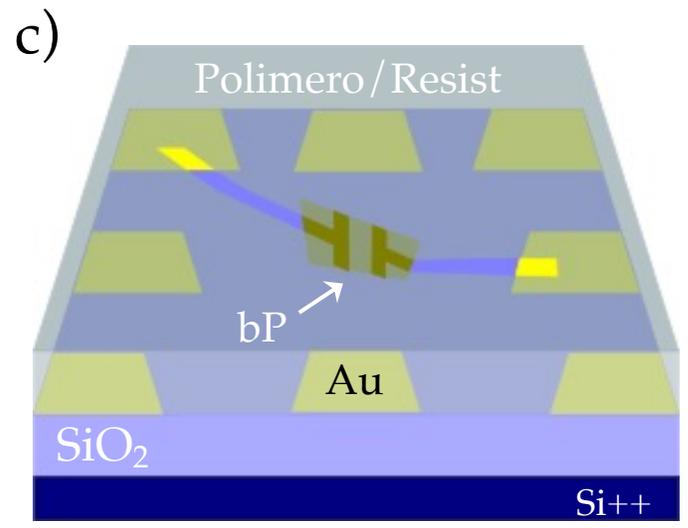
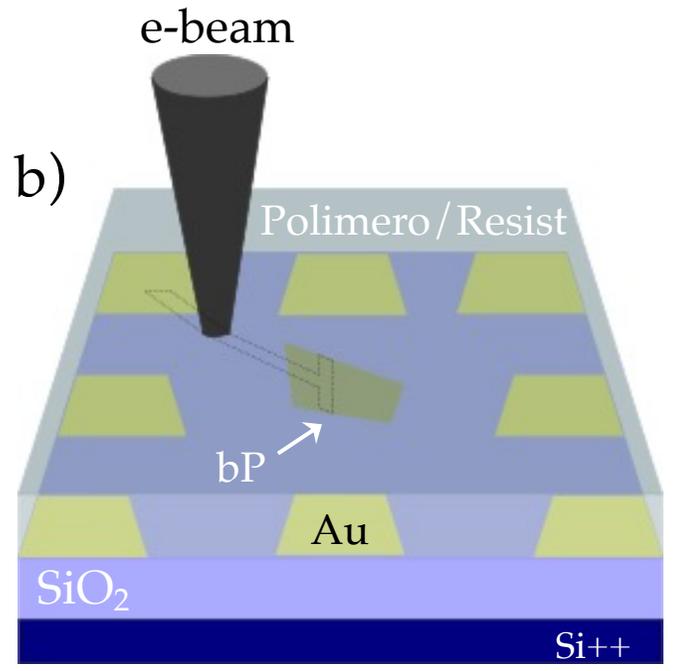
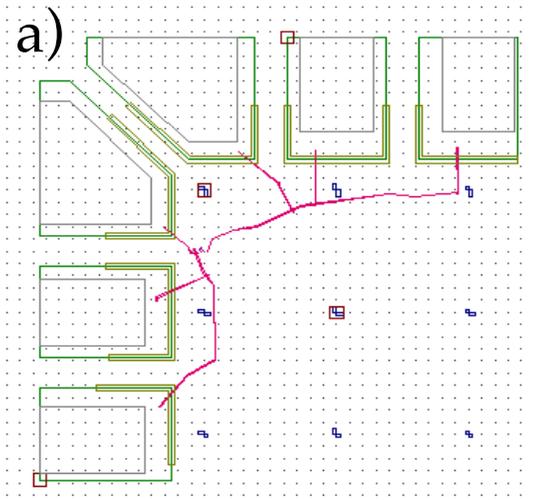
# Protocollo di Fabbricazione



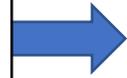
# Protocollo di Fabbricazione

Esfol  
in glo  
(atm  
di a

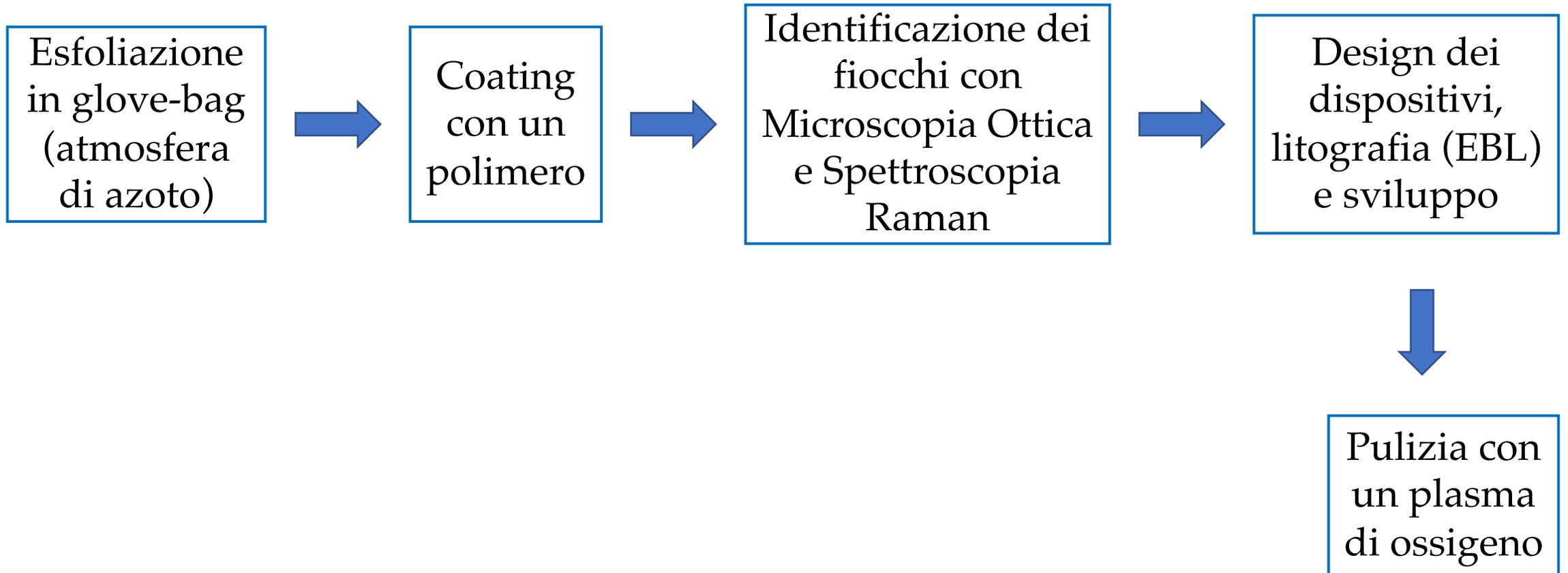
- a) CAD del dispositivo
- b) Esposizione
- c) Sviluppo



Design dei  
dispositivi,  
litografia (EBL)  
e sviluppo

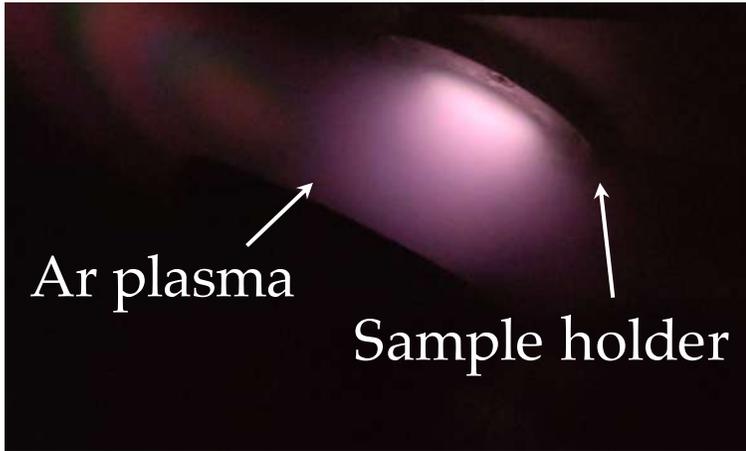


# Protocollo di Fabbricazione

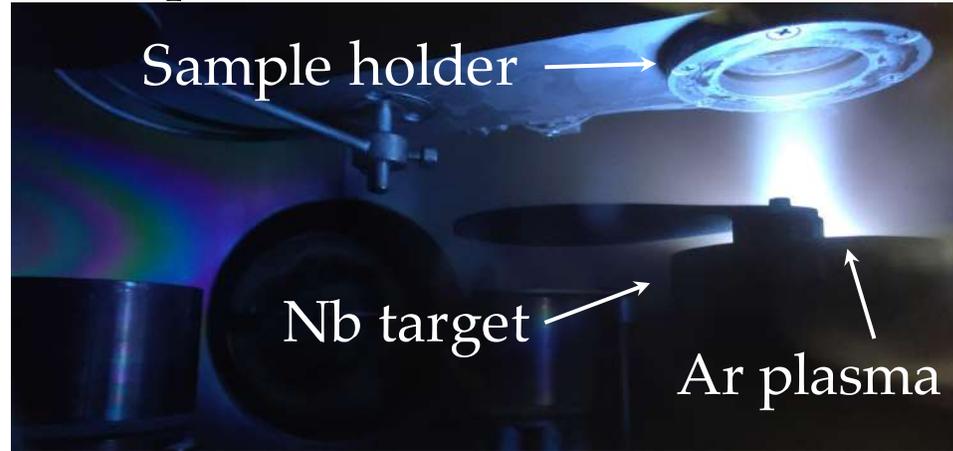


# Protocollo di Fabbricazione

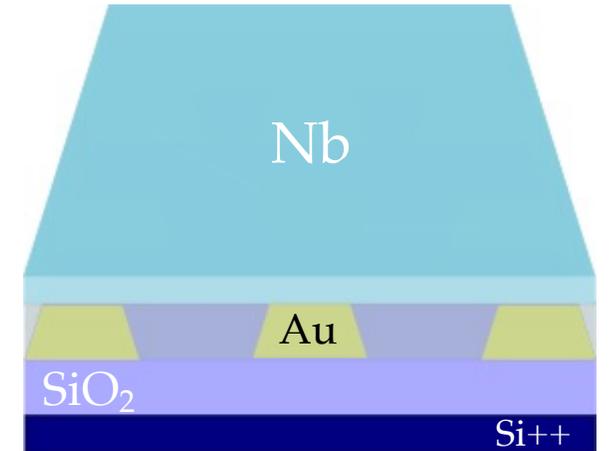
a) Pulizia con Ar plasma



b) Deposizione del Nb



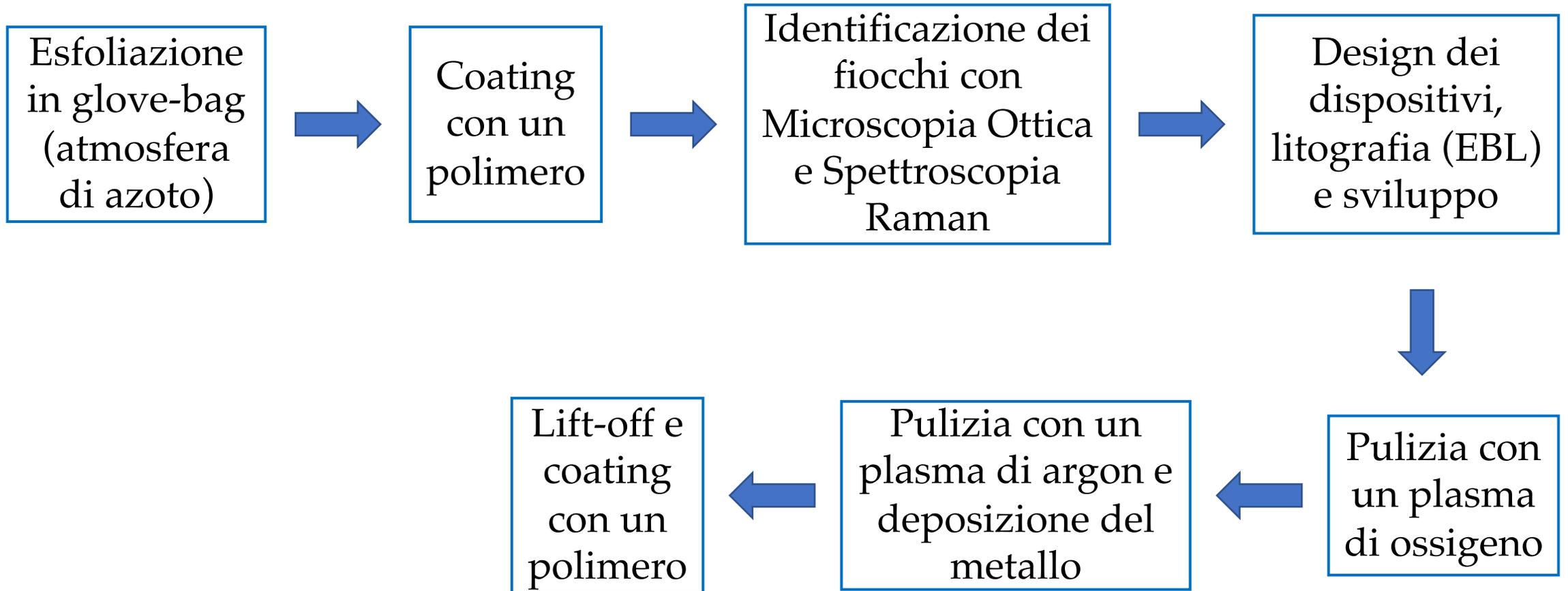
c)



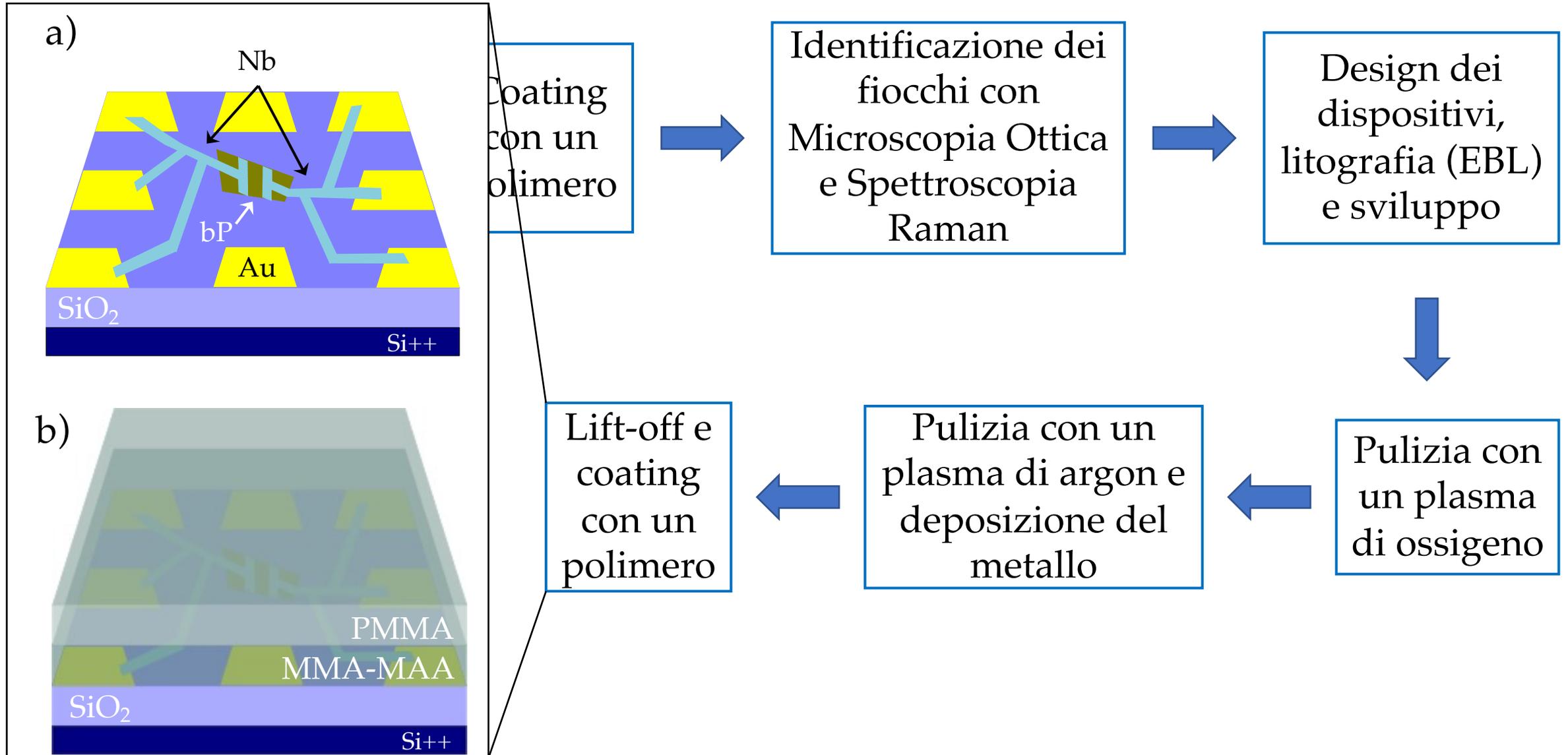
Pulizia con un plasma di argon e deposizione del metallo

Pulizia con un plasma di ossigeno

# Protocollo di Fabbricazione



# Protocollo di Fabbricazione



# Protocolli di Fabbricazione

Protocollo	Coating	Pulizia superfici	Metallo depositato
A	MMA-MAA/PMMA ( $t \sim 700$ nm)	5 min Ar	70 nm Nb
B	PMMA ( $t \sim 300$ nm)	1 min O <sub>2</sub> + 5 min Ar	70 nm Nb
C	PMMA ( $t \sim 300$ nm)	1 min O <sub>2</sub> + 5 min Ar	10 nm Ti + 60 nm Nb
D	PMMA ( $t \sim 300$ nm)	1 min O <sub>2</sub> + 15 min Ar	10 nm Ti + 60 nm Nb

# Protocolli di Fabbricazione

Protocollo	Coating	Pulizia superfici	Metallo depositato
A	MMA-MAA/PMMA ( $t \sim 700$ nm)	5 min Ar	70 nm Nb
B	PMMA ( $t \sim 300$ nm)	1 min O <sub>2</sub> + 5 min Ar	Rimuove i residui di polimero dopo la litografia (EBL) e lo sviluppo
C	PMMA ( $t \sim 300$ nm)	1 min O <sub>2</sub> + 5 min Ar	10 nm Ti + 60 nm Nb
D	PMMA ( $t \sim 300$ nm)	1 min O <sub>2</sub> + 15 min Ar	10 nm Ti + 60 nm Nb

# Protocolli di Fabbricazione

Protocollo	Coating	Pulizia superfici	Metallo depositato
A	MMA-MAA/PMMA ( $t \sim 700$ nm)	5 min Ar	70 nm Nb
B	PMMA ( $t \sim 300$ nm)	1 min O <sub>2</sub> + 5 min Ar	Contatti Ohmici di buona qualità fra titanio e bP [1]
C	PMMA ( $t \sim 300$ nm)	1 min O <sub>2</sub> + 5 min Ar	
D	PMMA ( $t \sim 300$ nm)	1 min O <sub>2</sub> + 15 min Ar	10 nm Ti + 60 nm Nb

# Protocolli di Fabbricazione

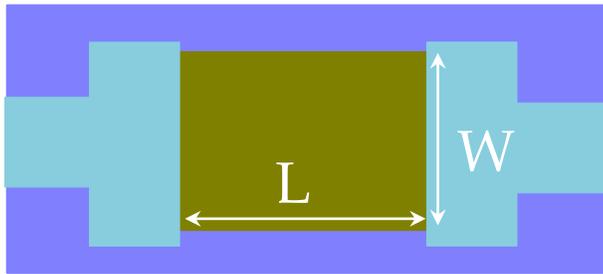
Protocollo	Coating	Pulizia superfici	Metallo depositato
A	MMA-MAA/PMMA ( $t \sim 700$ nm)	5 min Ar	70 nm Nb
B	PMMA ( $t \sim 300$ nm)	1 min O <sub>2</sub> + 5 min Ar	70 nm Nb
C	PMMA ( $t \sim 300$ nm)		
D	PMMA ( $t \sim 300$ nm)	1 min O <sub>2</sub> + 15 min Ar	10 nm Ti + 60 nm Nb

Rimuove un maggiore strato di ossido sopra il bP prima di depositare il metallo

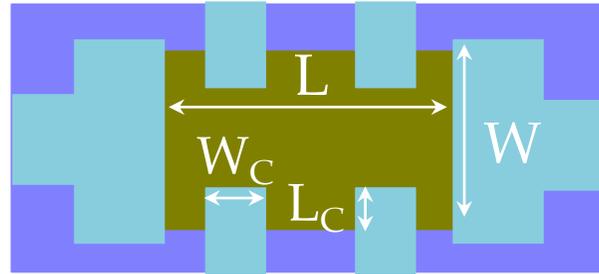


# I Dispositivi

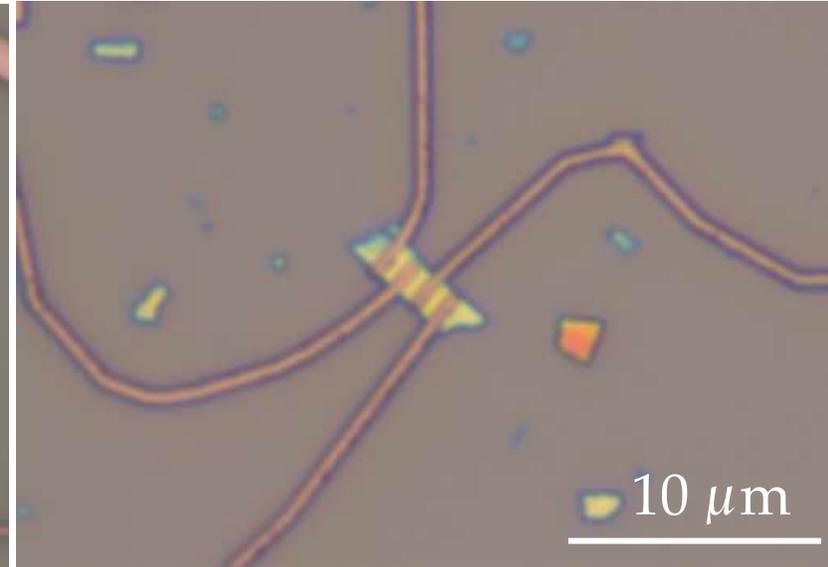
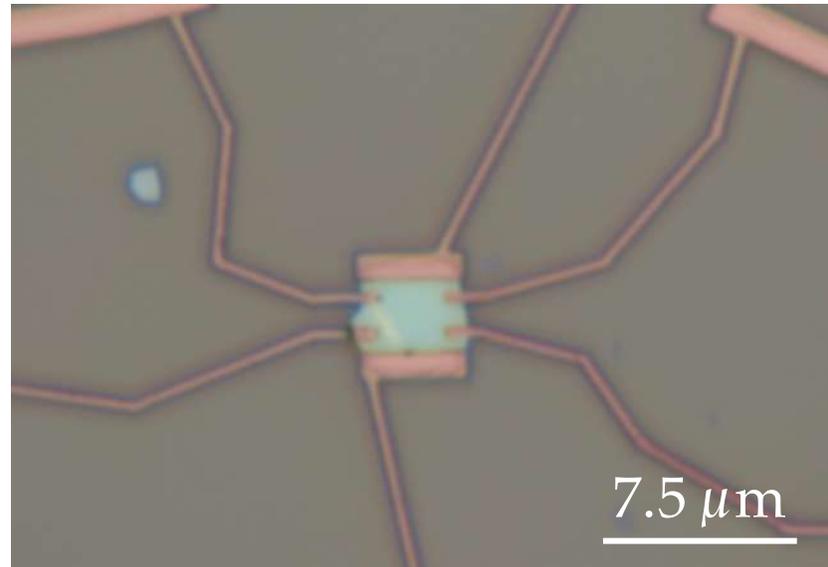
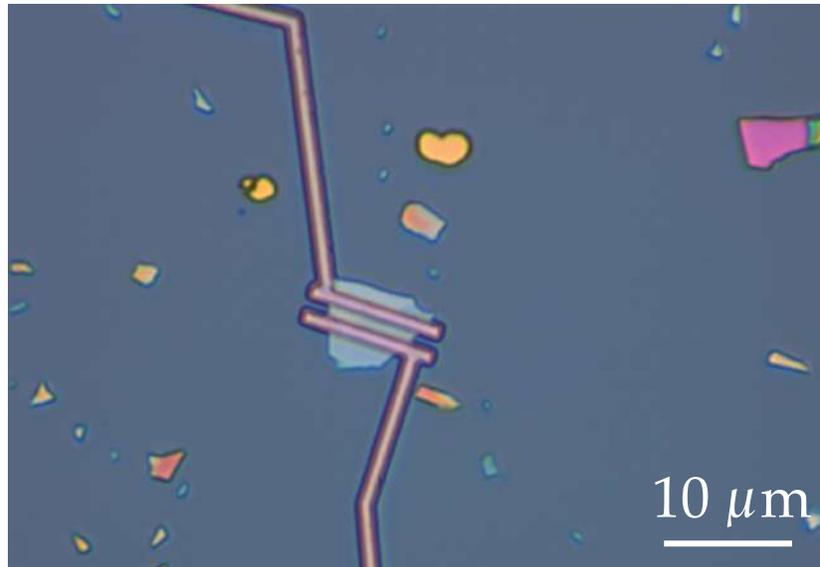
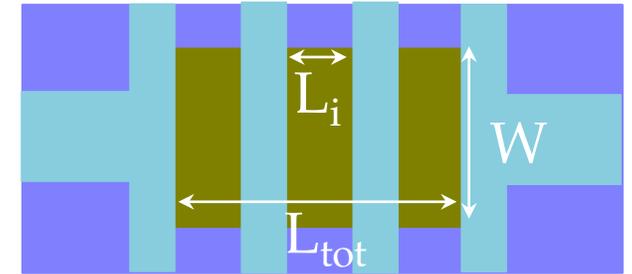
a) Giunzione



b) Hall bar



c) TLM



# Outline:

- Superconduttività e giunzioni SNS
- Black-Phosphorus
- Protocolli di fabbricazione
- **Setup sperimentale**
- Risultati sperimentali
- Conclusioni e prospettive future

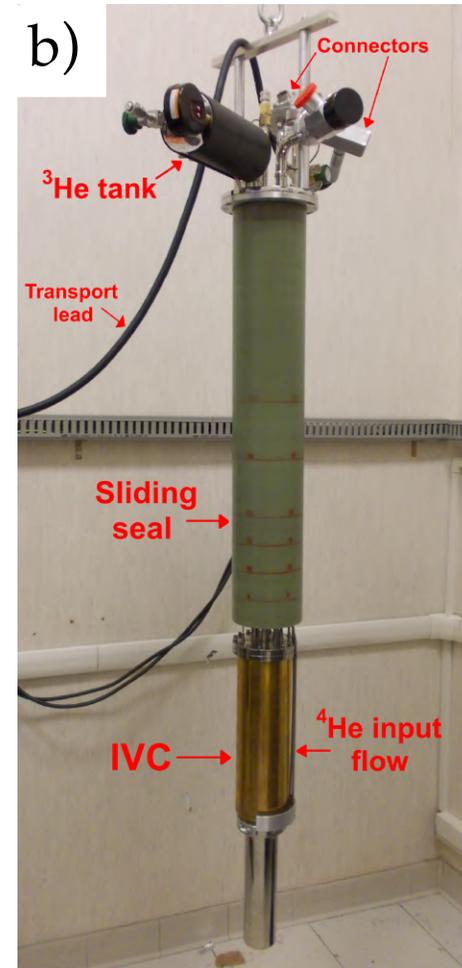
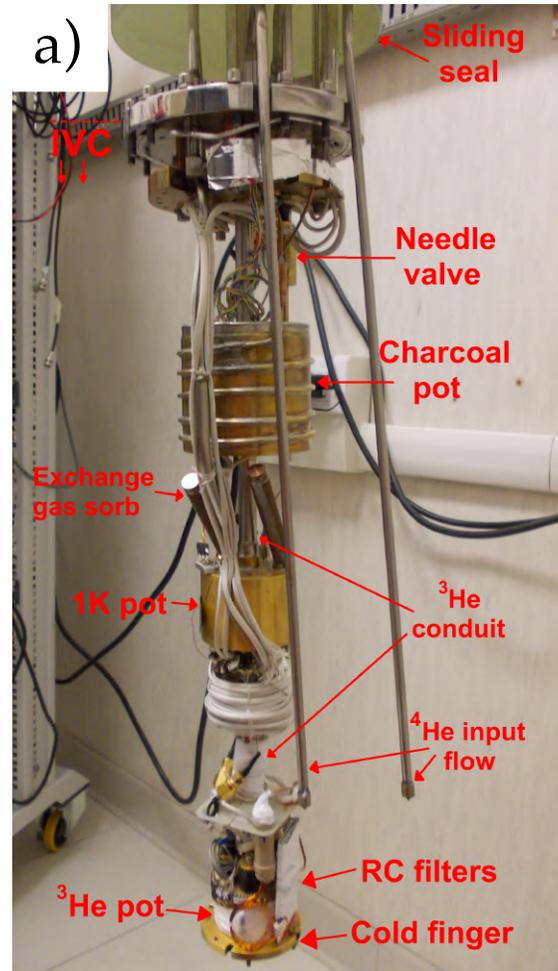
# Criostato $^3\text{He}$

➤ Criostato Janis ad  $^3\text{He}$

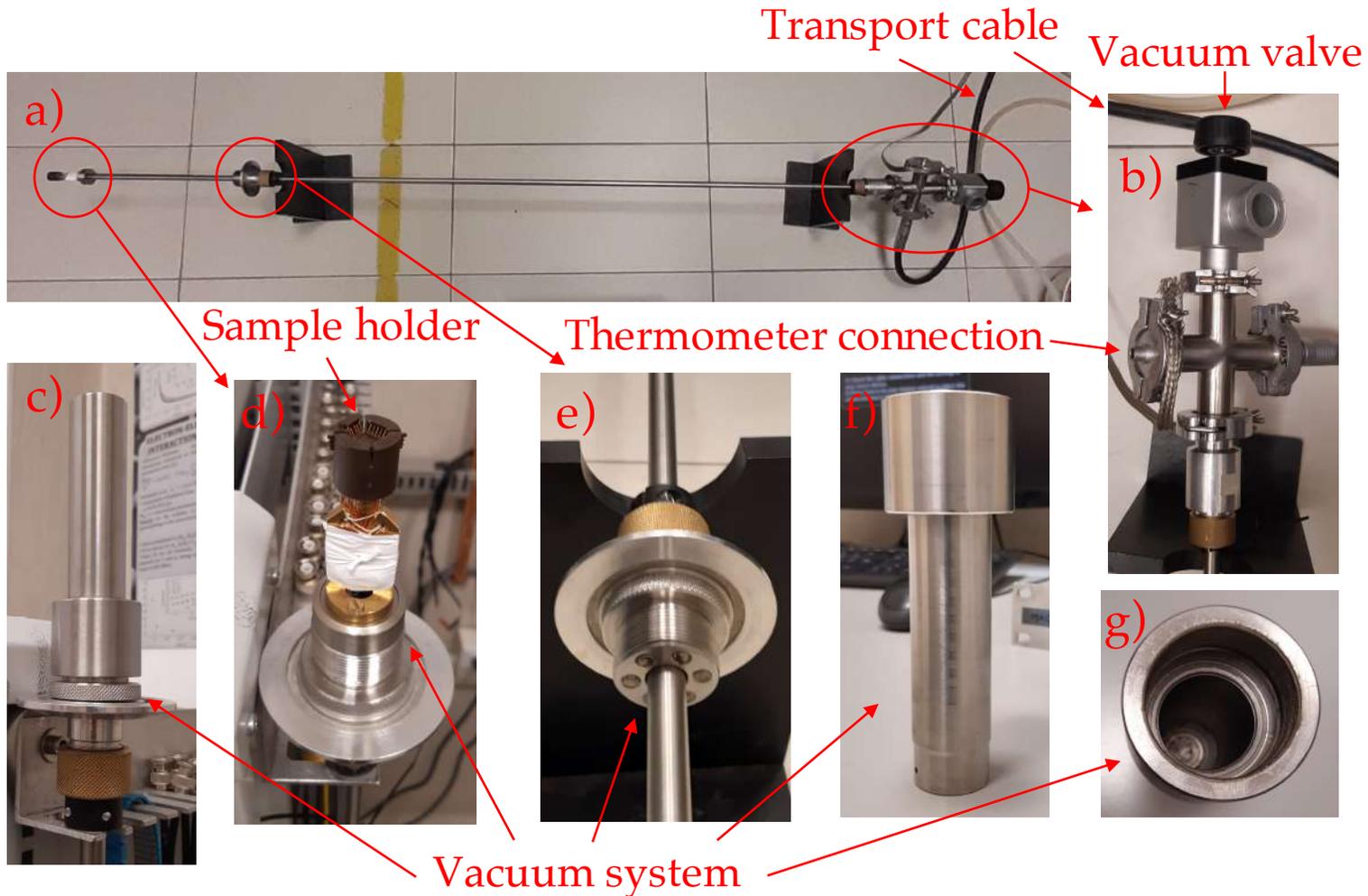
➤  $T_{\text{min}} = 300 \text{ mK}$

➤ Magnete:  $B_{\text{max}} = 9 \text{ T}$

➤  $p = 10^{-6} \text{ mbar}$



# Dipstick



➤ Permette la misura di più dispositivi in un minor tempo

➤ Tre temperature raggiungibili:

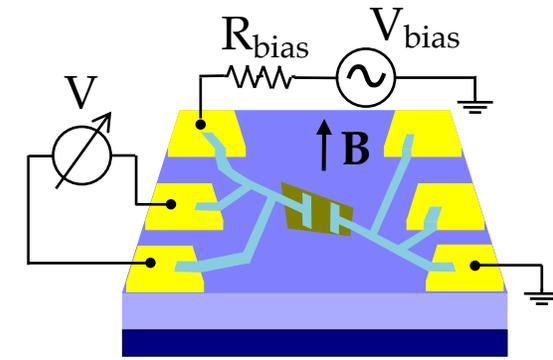
1.  $T_{\text{ambiente}} = 300 \text{ K}$
2.  $T_{\text{LN2}} = 77 \text{ K}$
3.  $T_{4\text{He}} = 4.2 \text{ K}$

➤  $p = 10^{-5} \text{ mbar}$

# Outline:

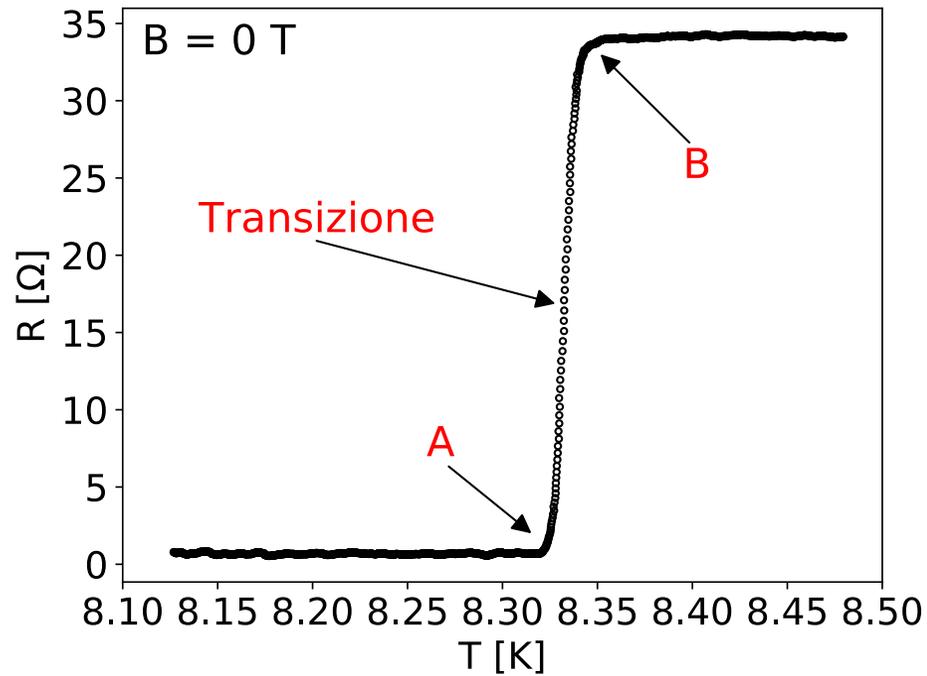
- Superconduttività e giunzioni SNS
- Black-Phosphorus
- Protocolli di fabbricazione
- Setup sperimentale
- **Risultati sperimentali**
- Conclusioni e prospettive future

# Parametri del Superconduttore



$$\Rightarrow R = V / I_{\text{bias}}$$

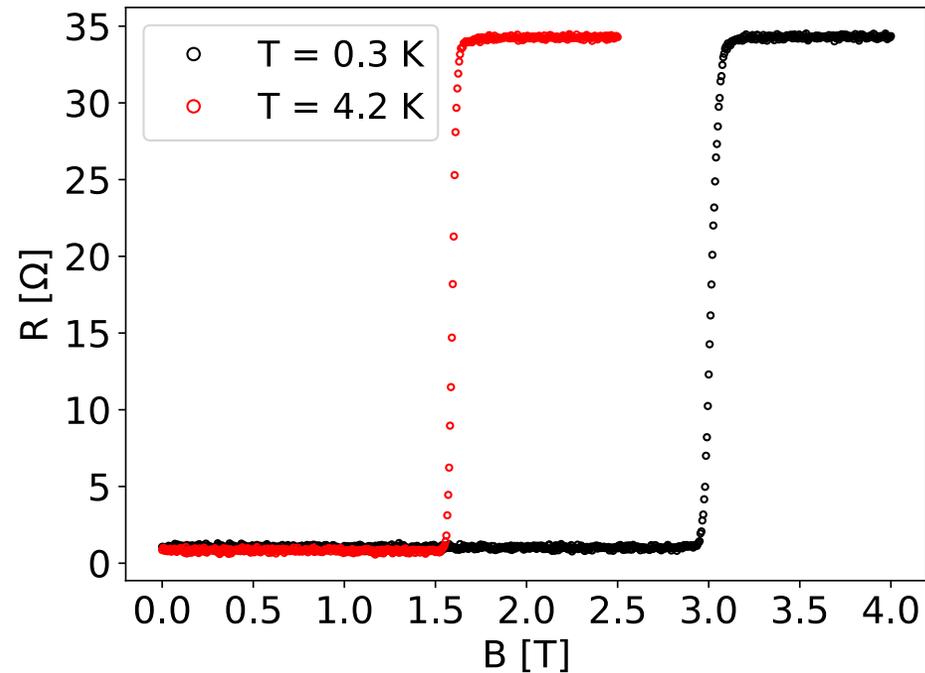
## Temperatura critica



$$T_C = (8.33 \pm 0.04) \text{ K}$$

$$\Delta_0 = (1.26 \pm 0.01) \text{ meV}$$

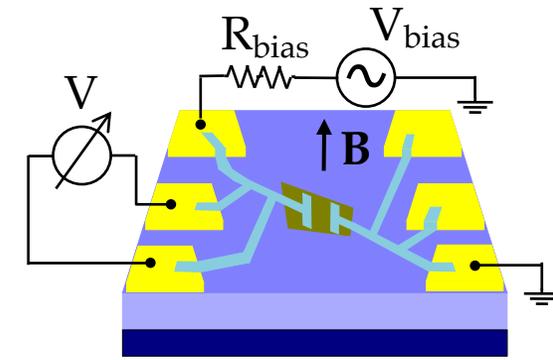
## Campo critico



$$B_C^{0.3\text{K}} = (3.0 \pm 0.1) \text{ T}$$

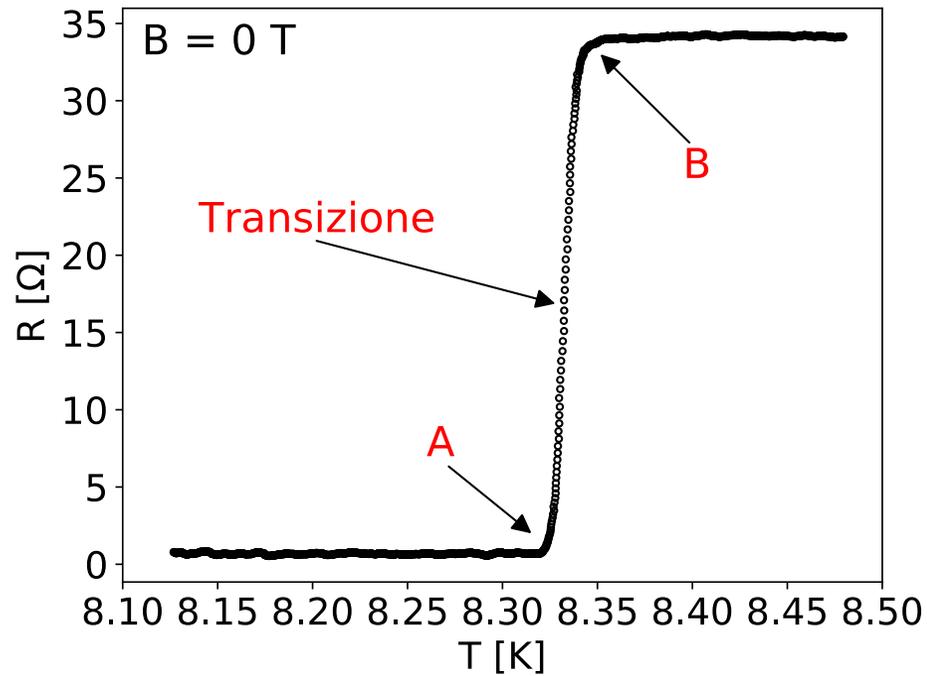
$$B_C^{4.2\text{K}} = (1.6 \pm 0.1) \text{ T}$$

# Parametri del Superconduttore

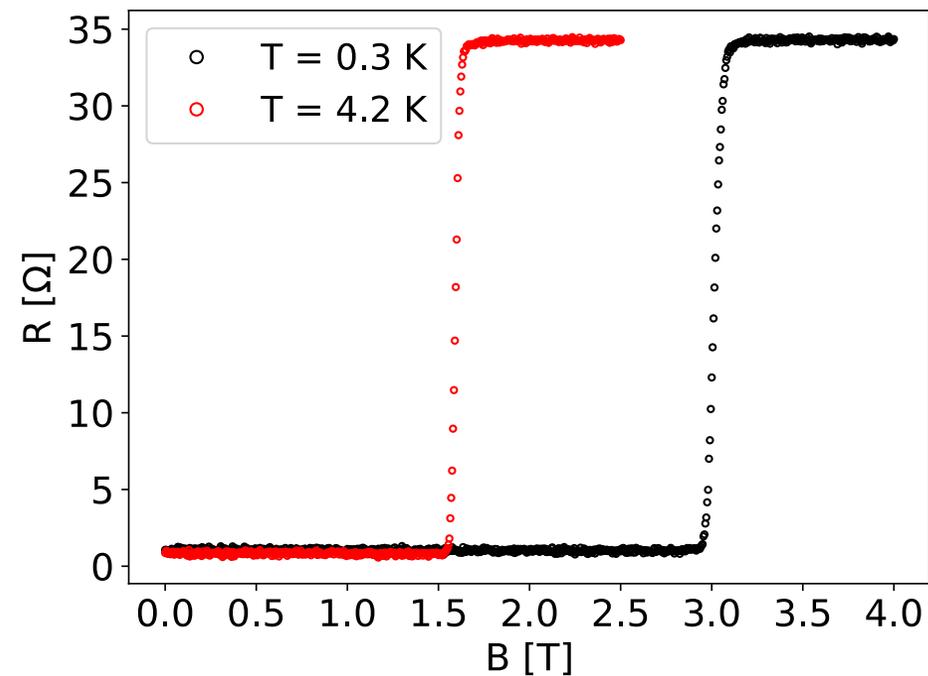


$$\Rightarrow R = V / I_{\text{bias}}$$

## Temperatura critica



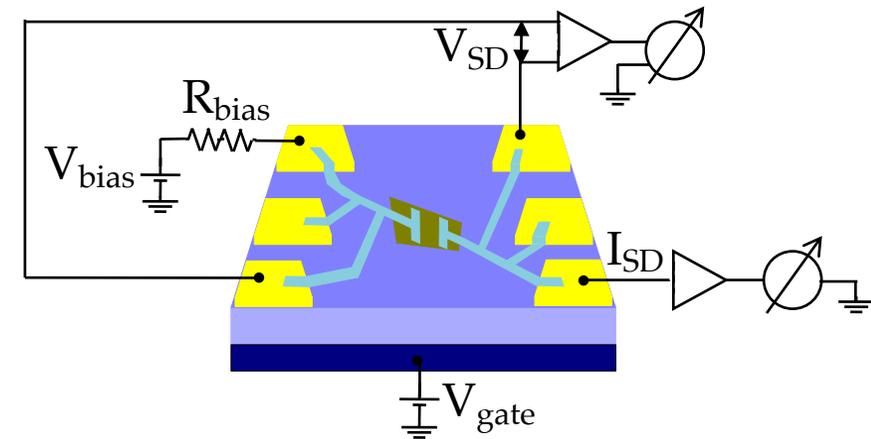
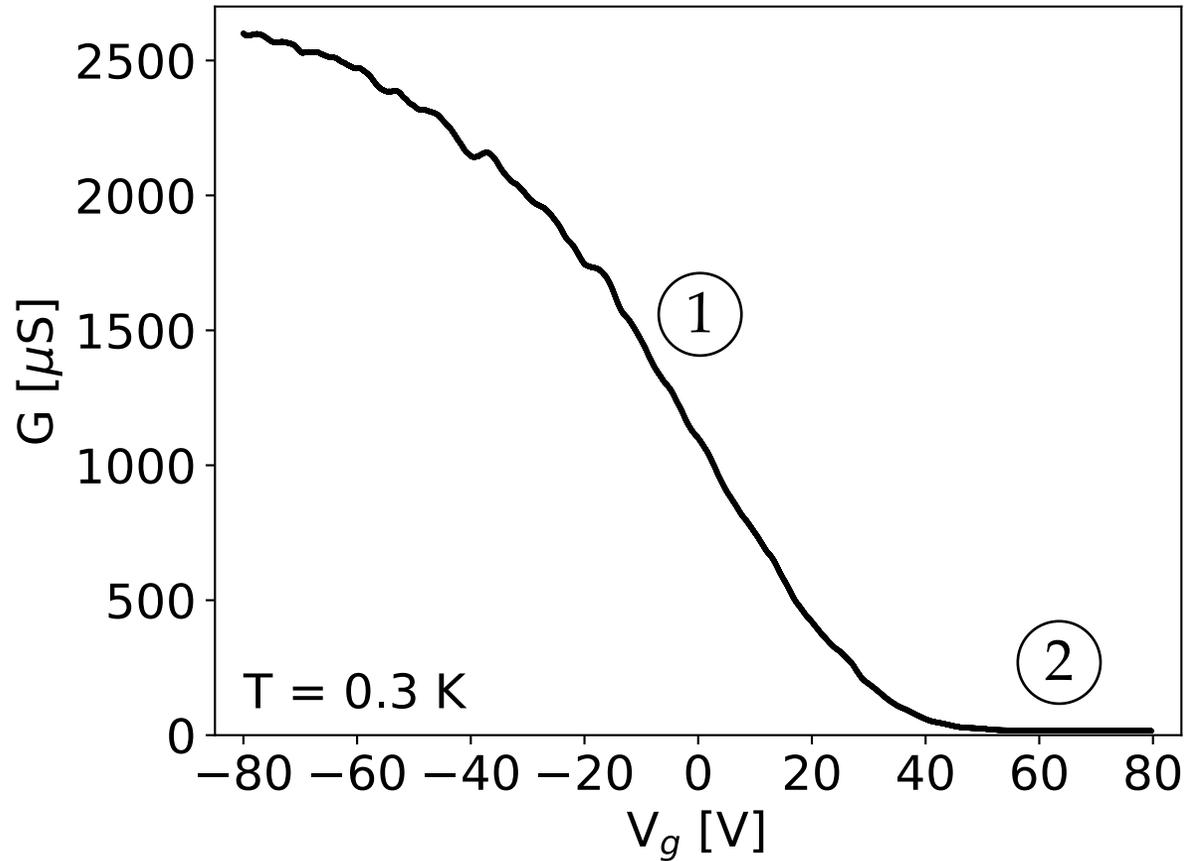
## Campo critico



Protocollo	$T_C$ [K]	$B_C^{0.3\text{K}}$ [T]	$B_C^{4.2\text{K}}$ [T]
A	$6.2 \pm 0.4$	$2.7 \pm 0.2$	$1.0 \pm 0.2$
B	$7.7 \pm 0.1$	$2.8 \pm 0.1$	$1.4 \pm 0.1$
D	$8.3 \pm 0.2$	$3.0 \pm 0.2$	$1.6 \pm 0.2$

# Caratterizzazione del bP

Conduzzanza vs Tensione di gate



$$\Rightarrow G = I_{SD} / V_{SD}$$

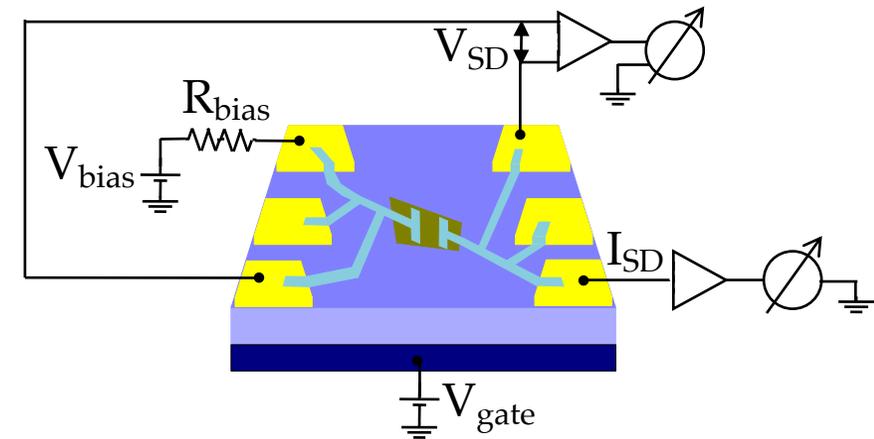
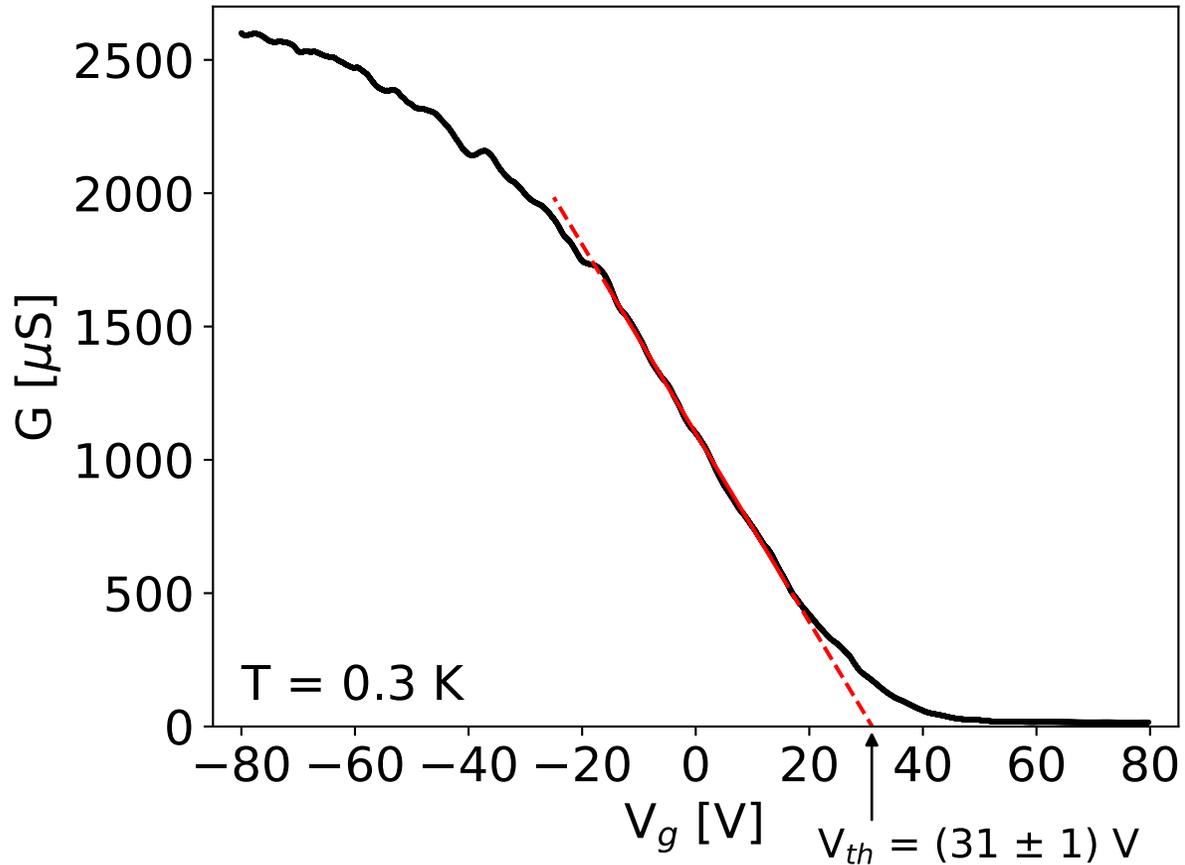
➤  $G \propto \sigma = ne\mu$

Densità di carica:  $n(V_g)$

- Due regioni:
1. Accumulazione
  2. Deplezione

# Caratterizzazione del bP

Conduzzanza vs Tensione di gate



$$\Rightarrow G = I_{SD} / V_{SD}$$

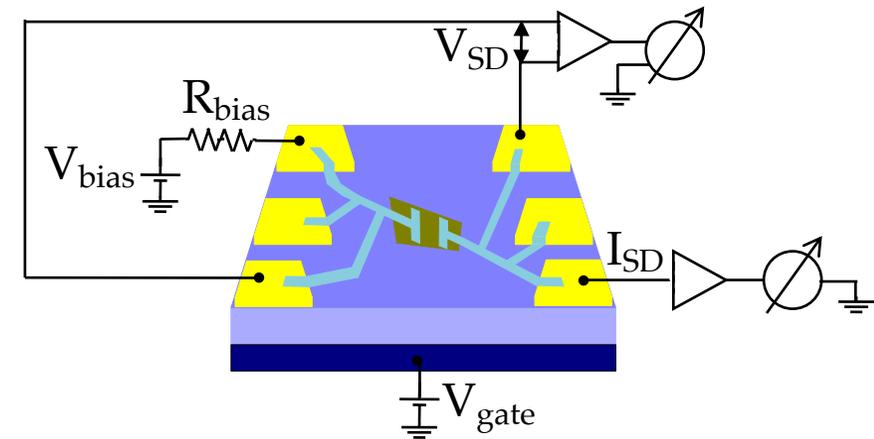
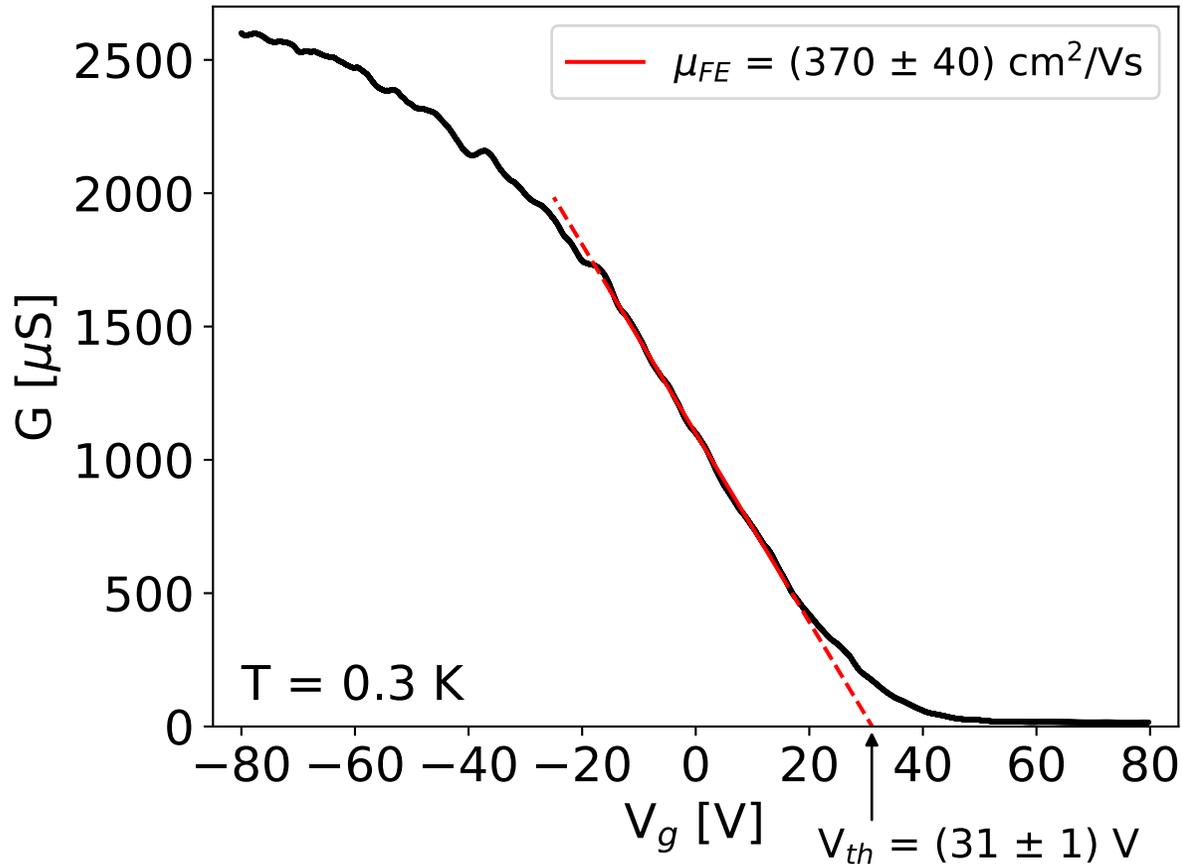
➤  $G \propto \sigma = ne\mu$

Densità di carica:  $n \propto (V_g - V_{th})$

➤  $V_{th}$  → Tensione di soglia

# Caratterizzazione del bP

Conduzzanza vs Tensione di gate



$$\Rightarrow G = I_{SD} / V_{SD}$$

➤  $G \propto \sigma = ne\mu$  → Mobilità:  $\mu \propto \tau_{scattering}$

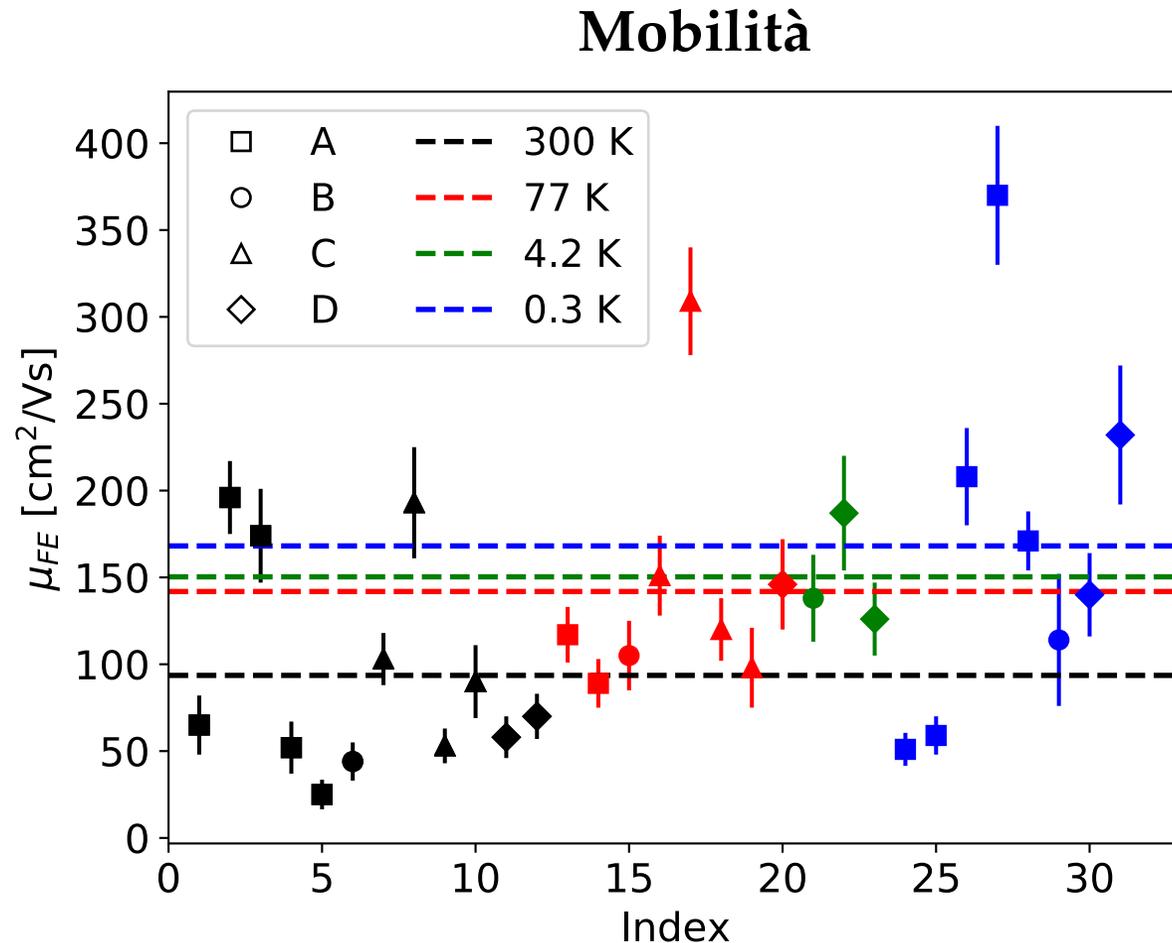
Densità di carica:  $n \propto (V_g - V_{th})$

➤  $V_{th}$  → Tensione di soglia

$$\mu_{FE} = \frac{1}{C_{ox}} \frac{dG}{dV_g} \frac{L}{W}$$

Capacità dell'ossido per unità di superficie

# Mobilità del bP



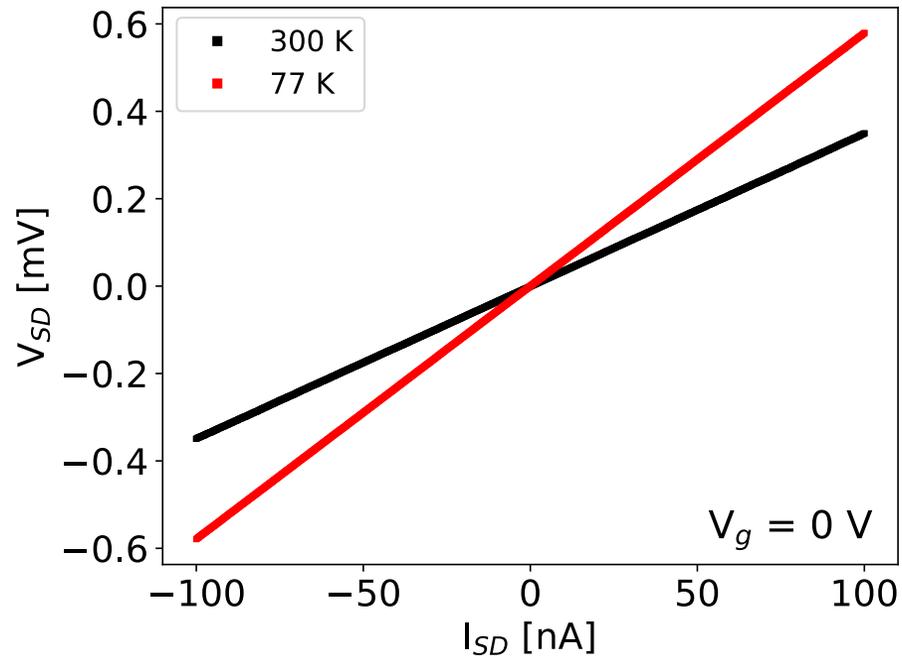
➤ La mobilità aumenta al diminuire della temperatura

➤ L'aumento della durata dell'Ar plasma (**protocollo D**) ha mantenuto la qualità del bP

} Media per ogni temperatura

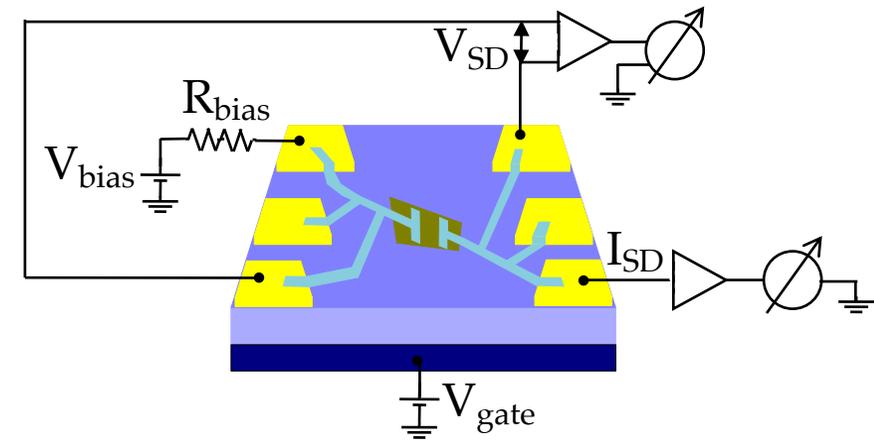
# Caratteristiche I-V

## Dipendenza dalla Temperatura



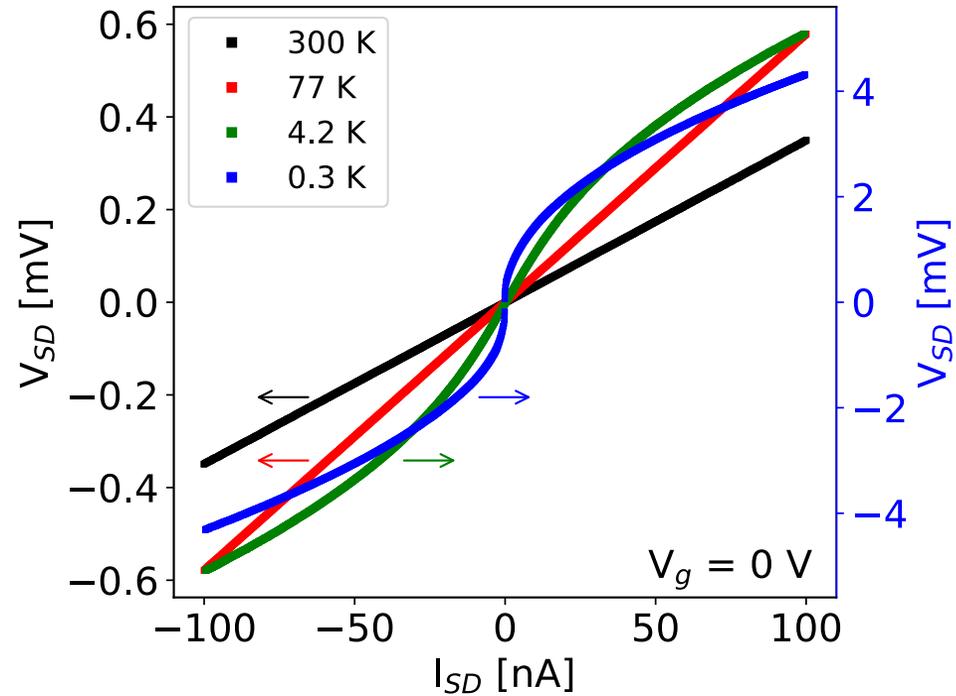
➤ Contatti Ohmici a 300 K e a 77 K

$$V = RI$$

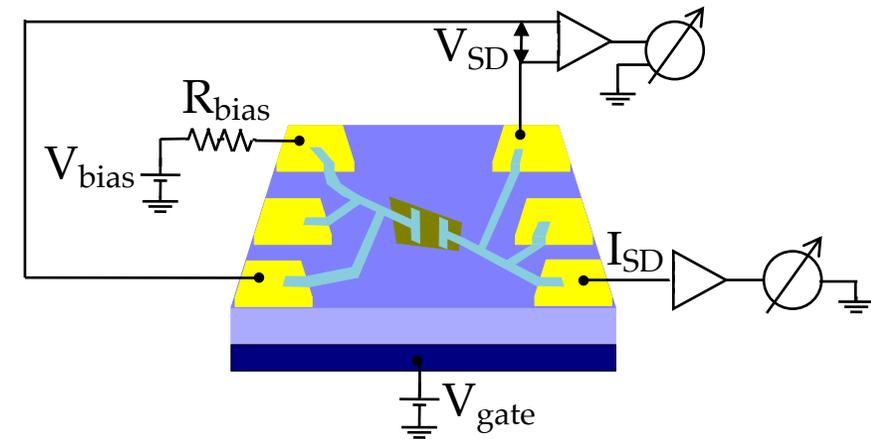


# Caratteristiche I-V

## Dipendenza dalla Temperatura

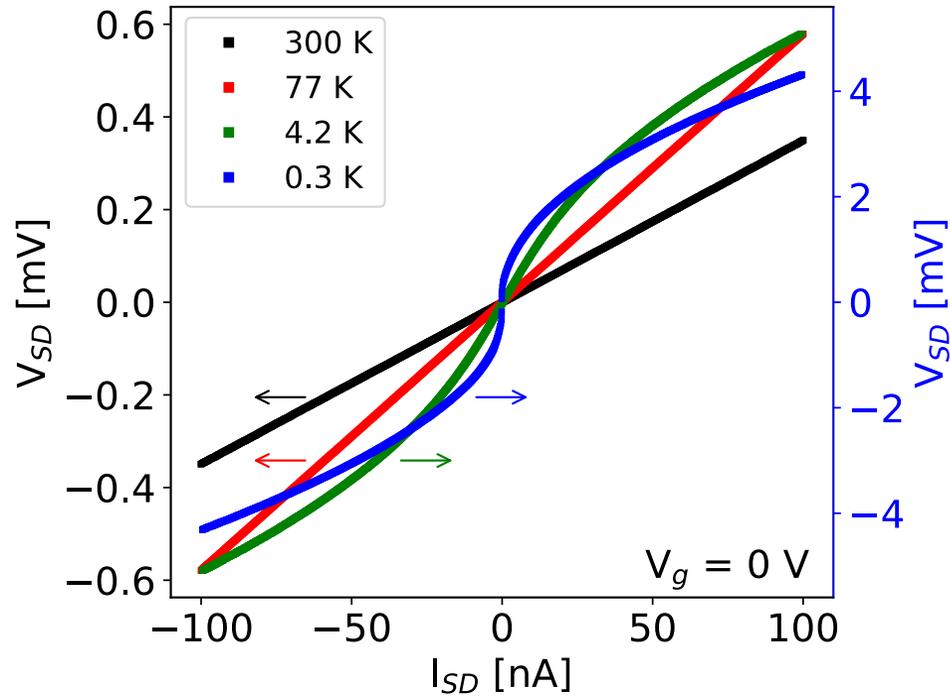


- Non-linearità diminuendo la temperatura  
⇒ Barriera di potenziale all'interfaccia

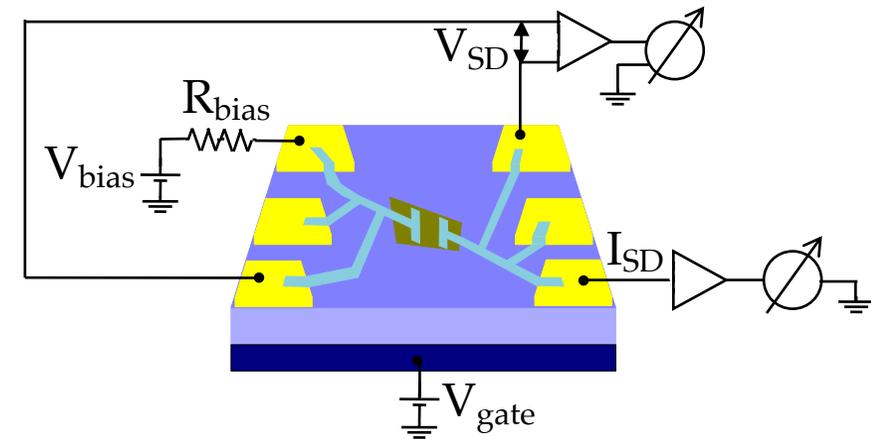


# Caratteristiche I-V

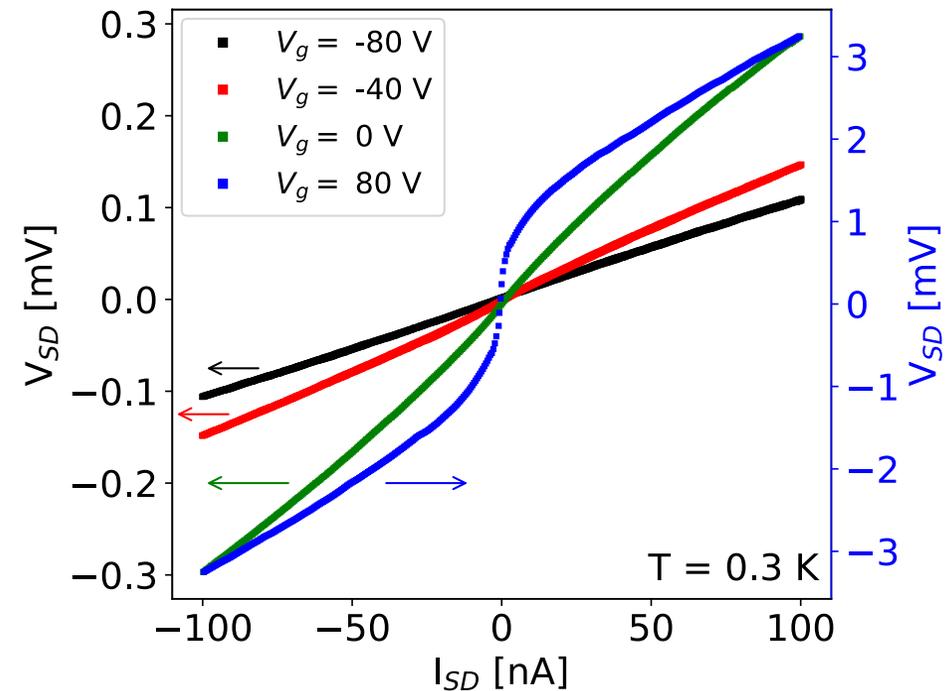
## Dipendenza dalla Temperatura



- Non-linearità diminuendo la temperatura  
⇒ Barriera di potenziale all'interfaccia



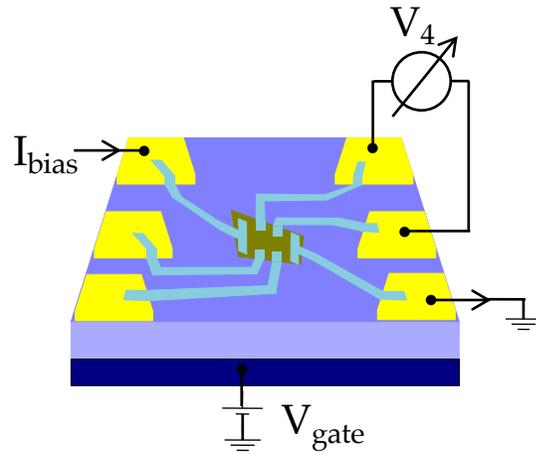
## Dipendenza dalla Tensione di gate



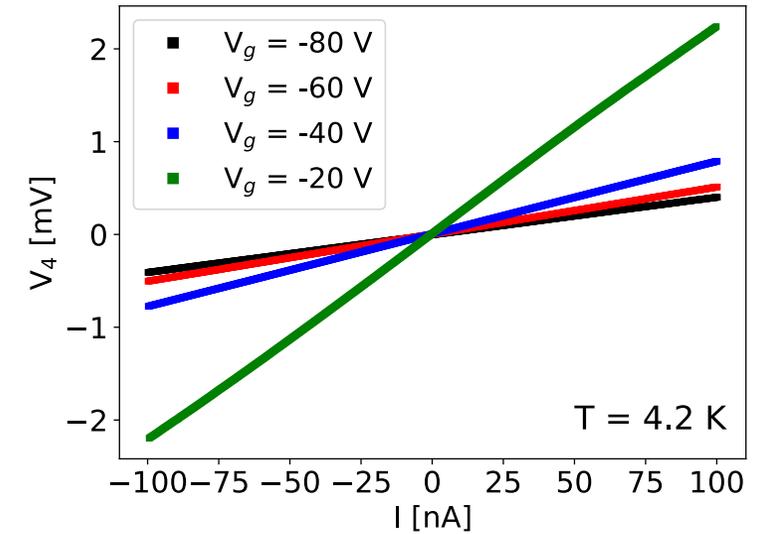
- Contatti migliori in accumulazione

# Resistenza di Contatto

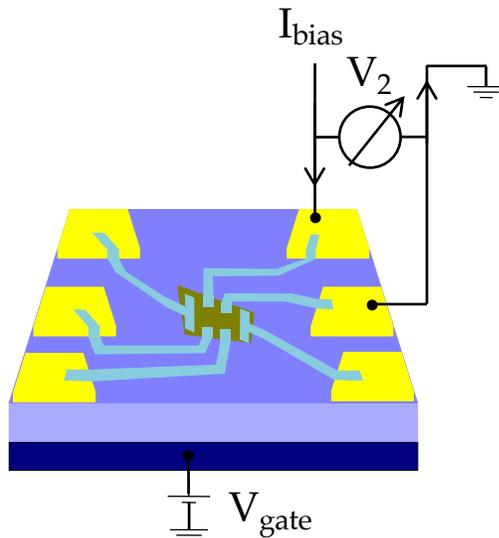
## ➤ Misura a 4 fili



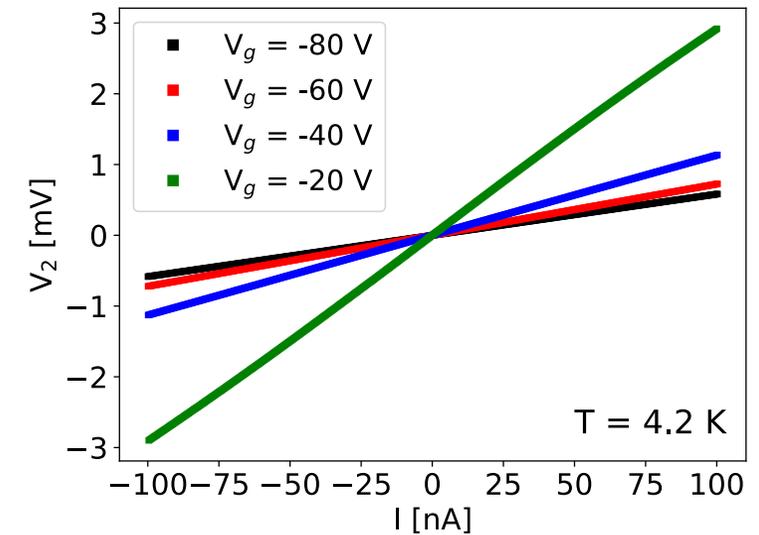
$$\Rightarrow V_4 = R_4 I = R_{bP} I$$



## ➤ Misura a 2 fili

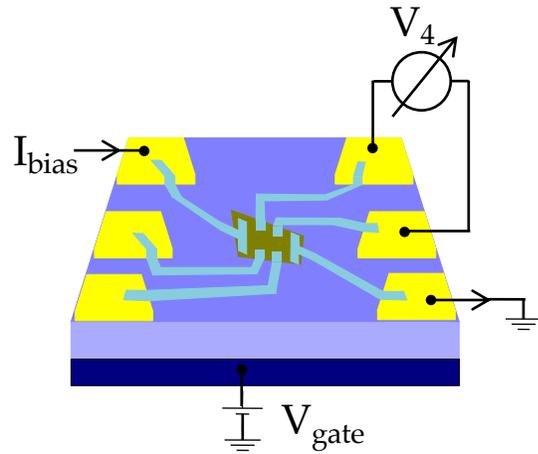


$$\Rightarrow V_2 = R_2 I = (2R_C + R_{bP}) I$$



# Resistenza di Contatto

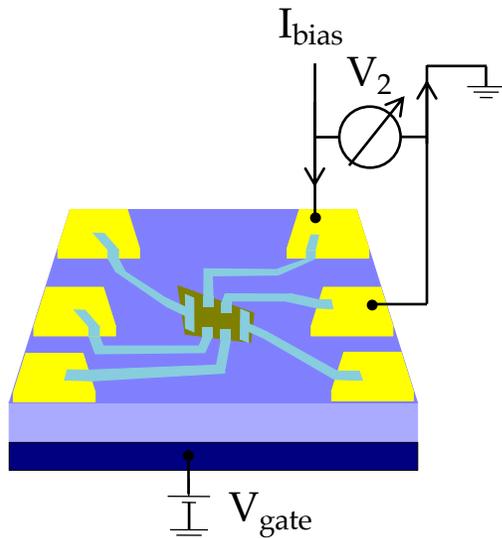
## ➤ Misura a 4 fili



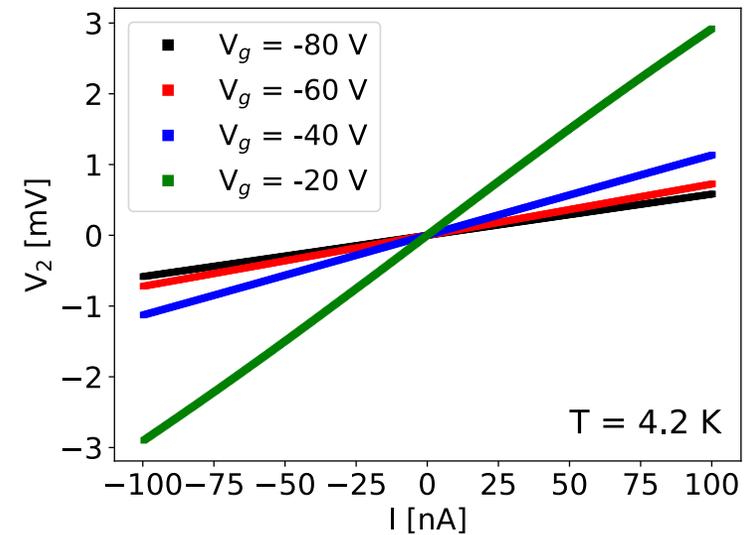
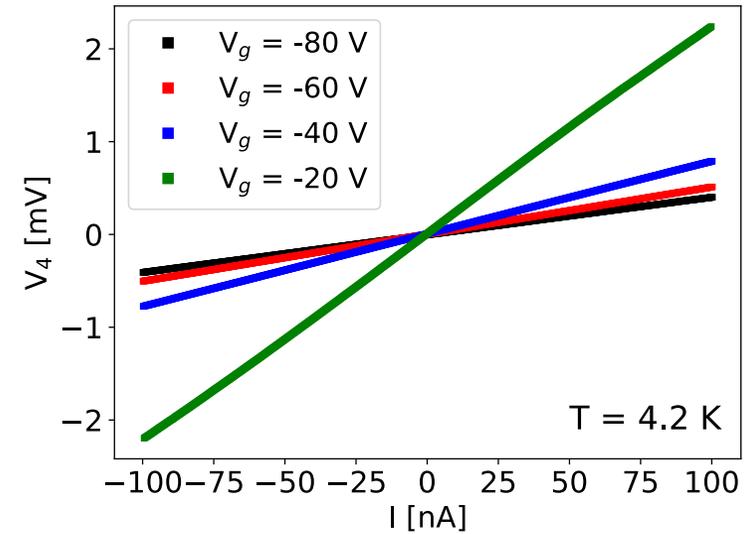
$$\Rightarrow V_4 = R_4 I = R_{bP} I$$

$$R_C = (R_2 - R_4) / 2$$

## ➤ Misura a 2 fili

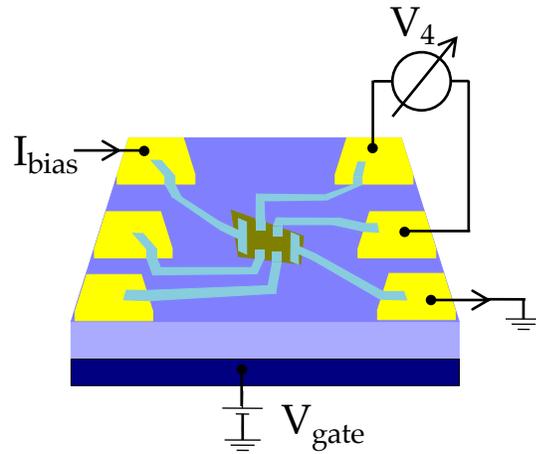


$$\Rightarrow V_2 = R_2 I = (2R_C + R_{bP}) I$$



# Resistenza di Contatto

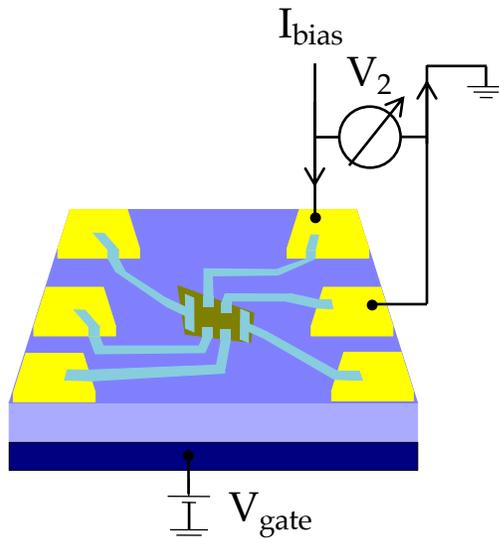
## ➤ Misura a 4 fili



$$\Rightarrow V_4 = R_4 I$$

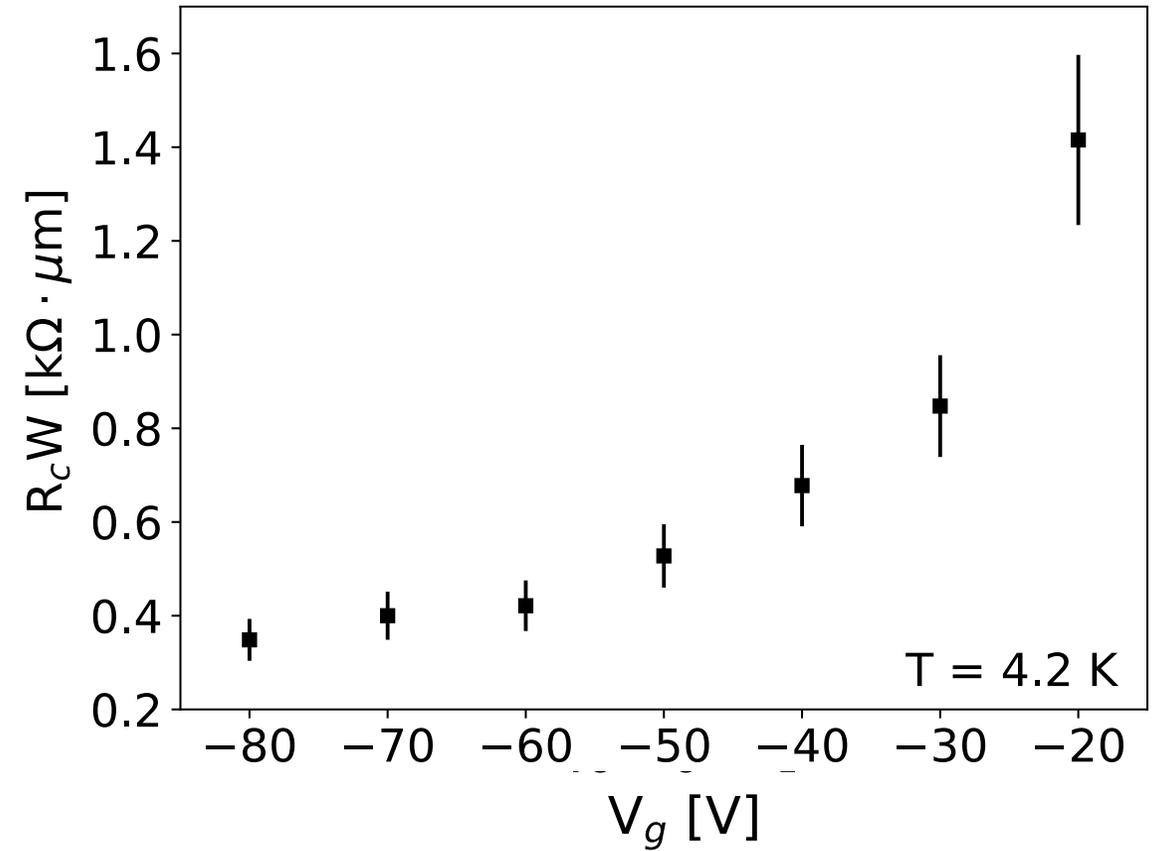
$$R_C = (R_2 - R_4) / 2$$

## ➤ Misura a 2 fili



$$\Rightarrow V_2 = R_2 I$$

## Resistenza di contatto normalizzata



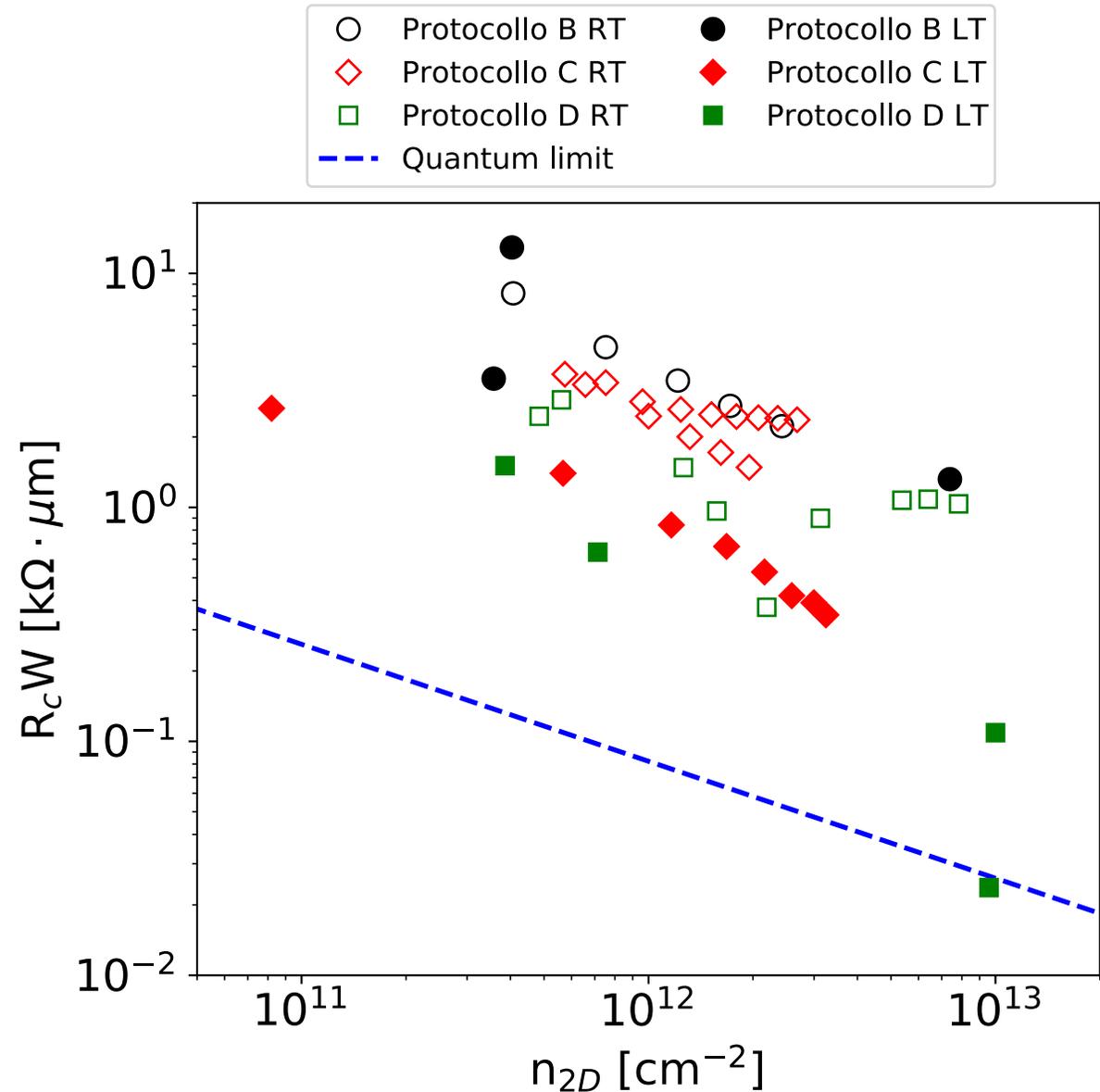
# Resistenza di Contatto

➤ Minima resistenza di contatto per un sistema 2D:

$$\rightarrow R_C^{\min} W [\text{k}\Omega \cdot \mu\text{m}] \sim \frac{h}{2e^2 k_F} \sim \frac{0.026}{\sqrt{n_{2D} [10^{13} \text{cm}^{-2}]}}$$

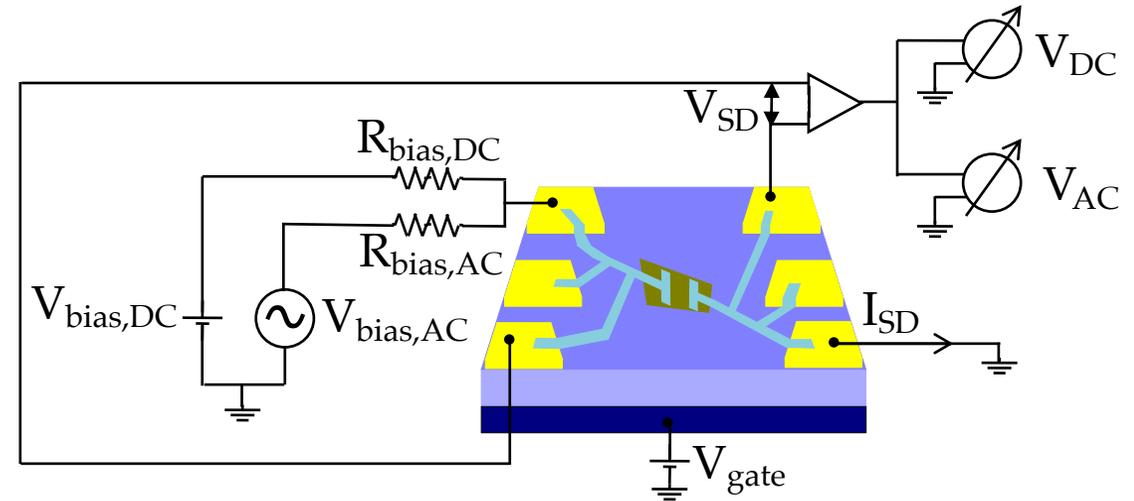
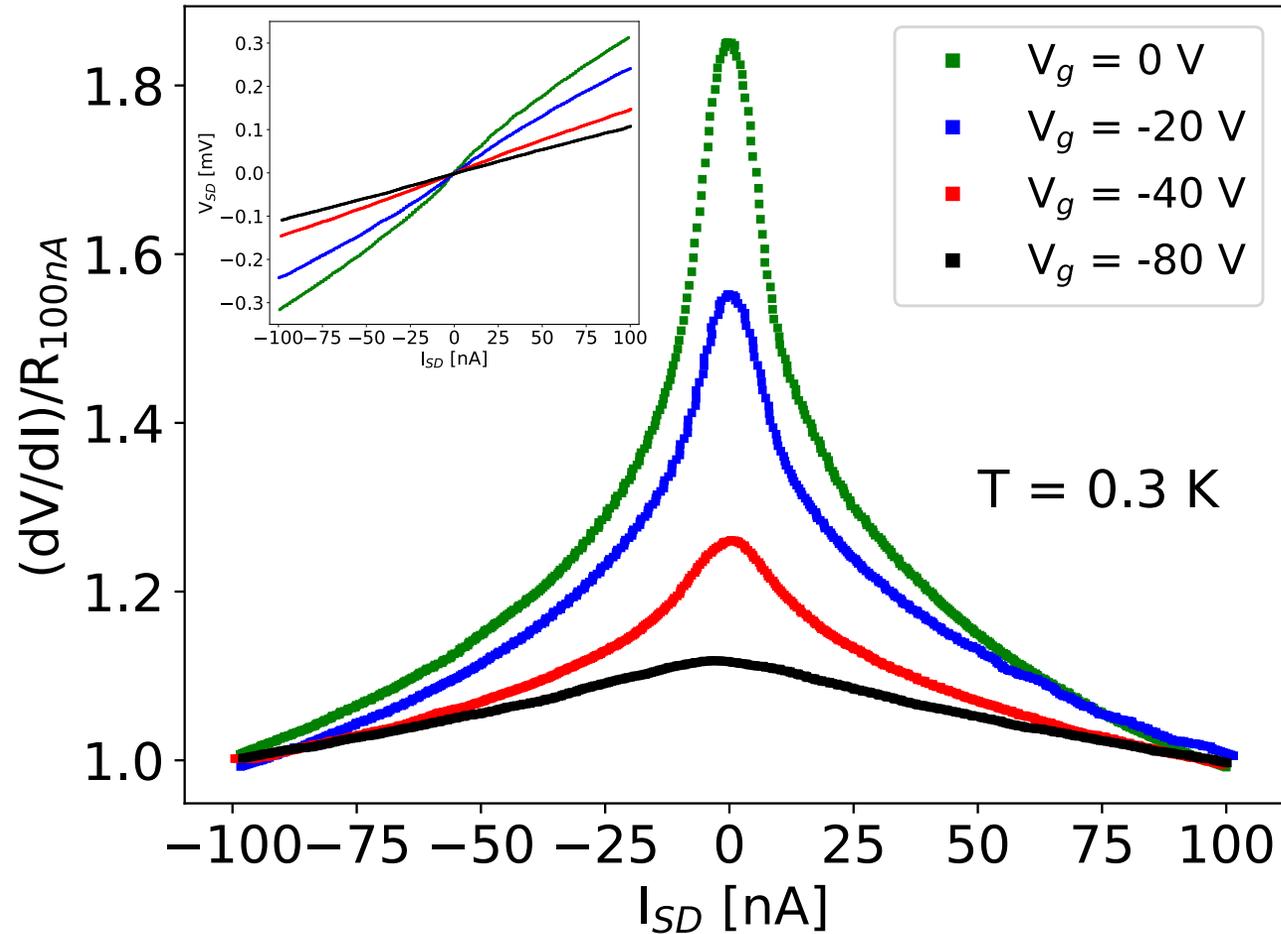
➤ Modello di Drude  $\rightarrow n_{2D} = \sigma / e\mu$

$$\sigma \equiv G_S = G \frac{L}{W}$$



# Resistenza Differenziale

## Resistenza differenziale normalizzata

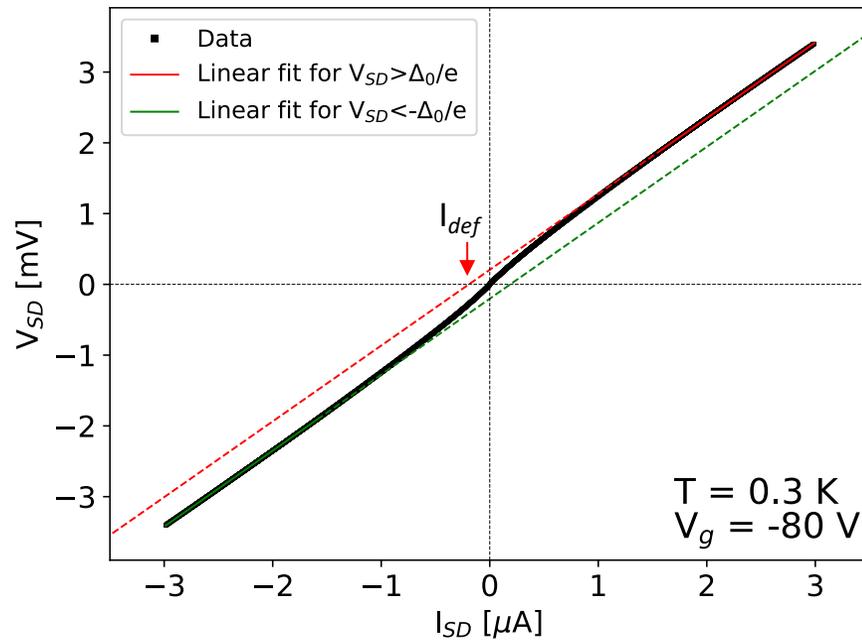
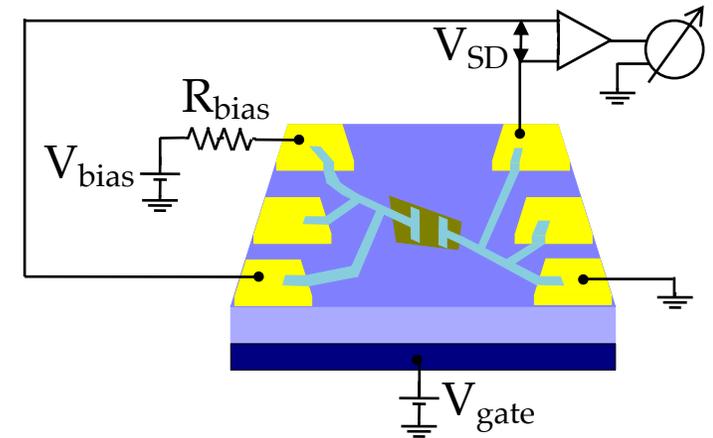


$$\Rightarrow dV/dI \propto V_{AC}/I_{bias,AC}$$

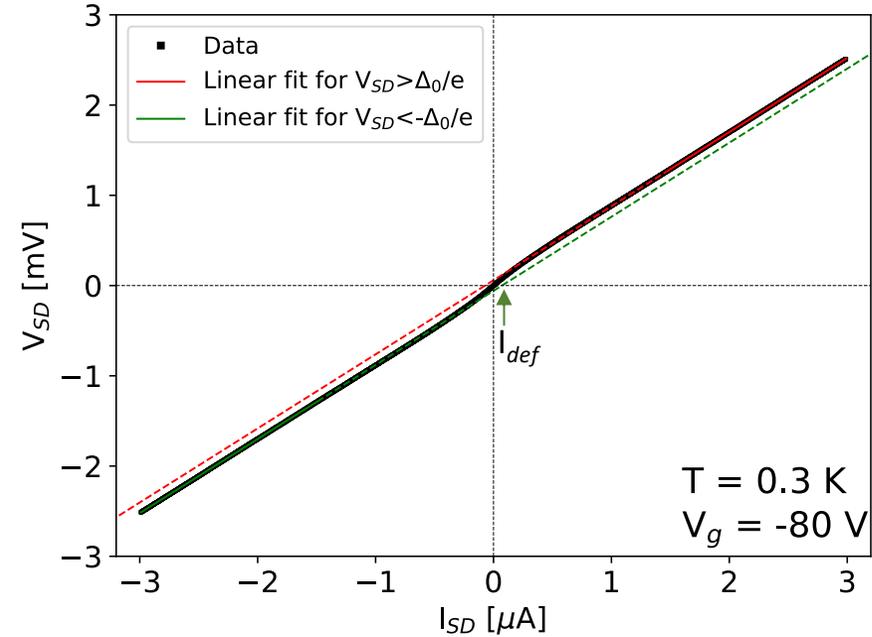
$\Rightarrow$  Non si osserva un regime superconduttivo

# Excess or Deficit Current?

- Andreev reflection  $\Rightarrow I_{\text{exc}}$
- Normal reflection  $\Rightarrow I_{\text{def}}$



- $I_{\text{def}} = (191 \pm 3) \text{ nA}$



- $I_{\text{def}} = (73 \pm 2) \text{ nA}$

# Outline:

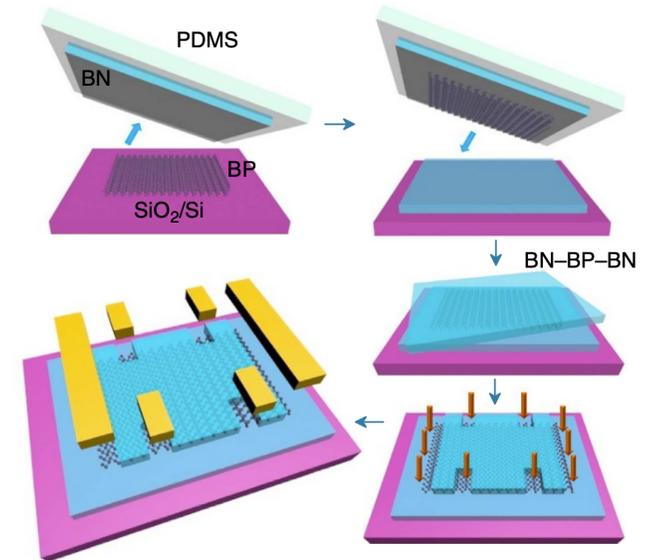
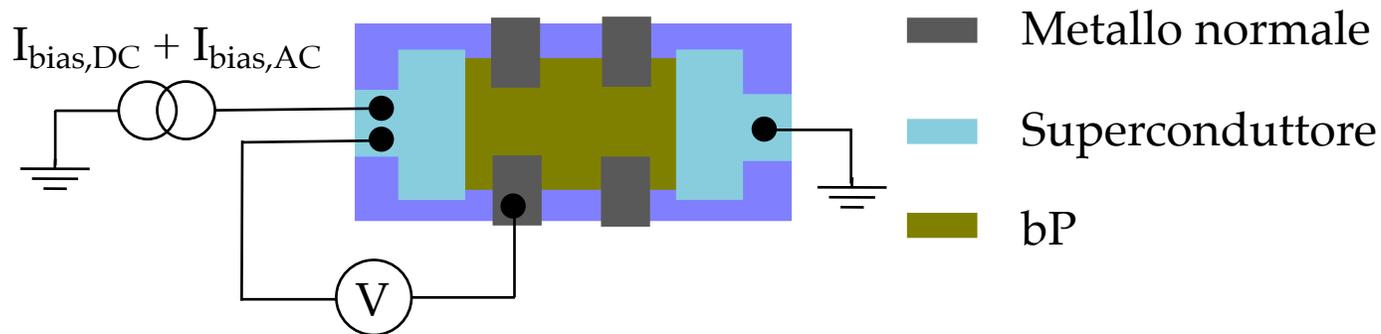
- Superconduttività e giunzioni SNS
- Black-Phosphorus
- Protocolli di fabbricazione
- Setup sperimentale
- Risultati sperimentali
- **Conclusioni e prospettive future**

# Conclusioni

- La qualità del bP si è mantenuta cambiando il protocollo di fabbricazione.
- Miglioramento della qualità del superconduttore: aumento di  $T_C$  del 23% fra il protocollo A e il protocollo D.
- Diminuzione di un'ordine di grandezza di  $\overline{R_C W}$  fra il protocollo A e il protocollo D.
- Valori di  $R_C W$  che si avvicinano al quantum limit.
  - ⇒ Protocollo di fabbricazione molto promettente per ottenere contatti Ohmici di qualità su dispositivi basati sul bP
  - ⇒ Protocollo di fabbricazione applicabile anche ad altri materiali 2D instabili in condizioni ambientali (GeSe)

# Prospettive Future

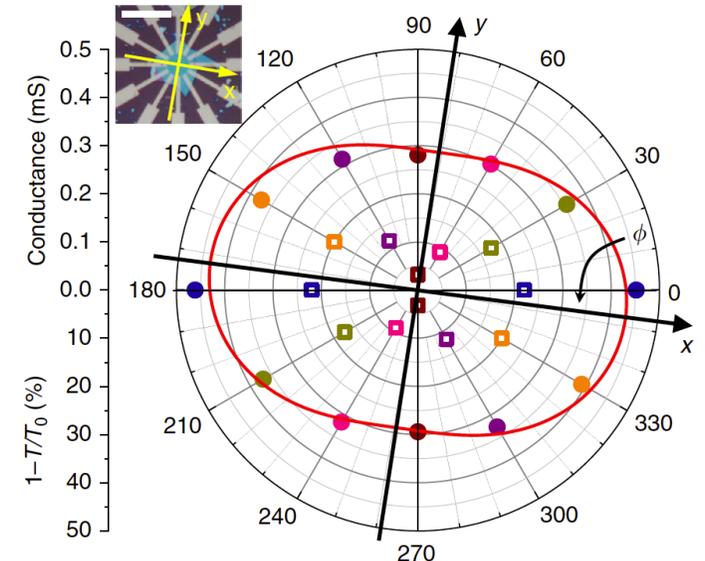
- Proseguire sulla strada tracciata dal protocollo D aumentando ulteriormente la durata dell'Ar plasma
- Minimizzare ulteriormente la degradazione del bP esfoliando in una glove-box e incapsulando i fiocchi in h-BN (hexagonal Boron Nitride)
- Studiare una singola interfaccia SN



Chen X. *et al.*, *Nat Commun* **6**, 7315 (2015).

# Prospettive Future

- Proseguire sulla strada tracciata dal protocollo D aumentando ulteriormente la durata dell'Ar plasma
- Minimizzare ulteriormente la degradazione del bP esfoliando in una glove-box e incapsulando i fiocchi in h-BN (hexagonal Boron Nitride)
- Studiare una singola interfaccia SN
- Studiare il trasporto di supercorrente in funzione dell'orientazione degli elettrodi e della tensione di gate



**Grazie per l'attenzione!**