



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:

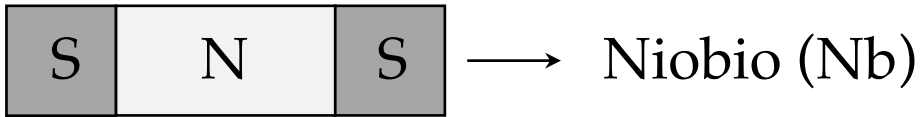
Giulio Cappelli

Appello di laurea di dicembre

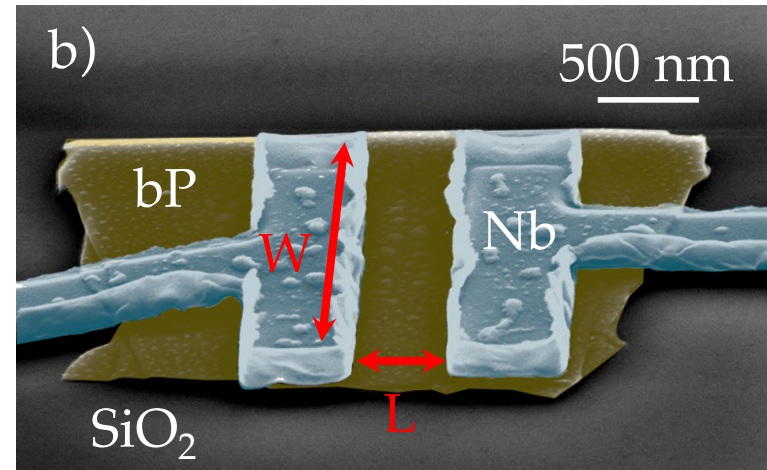
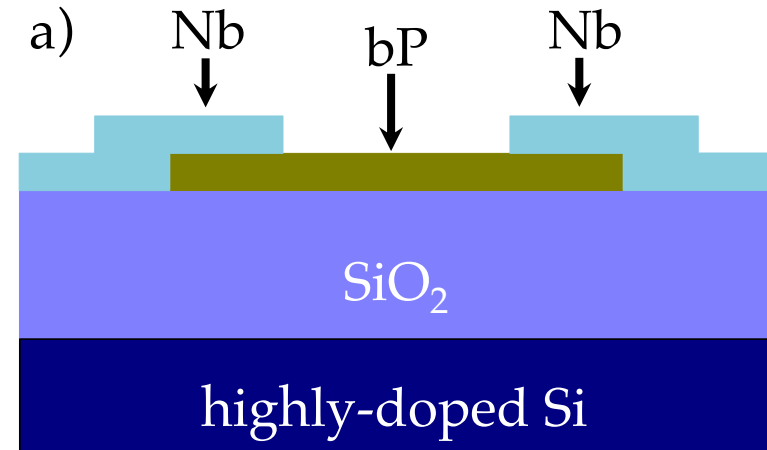
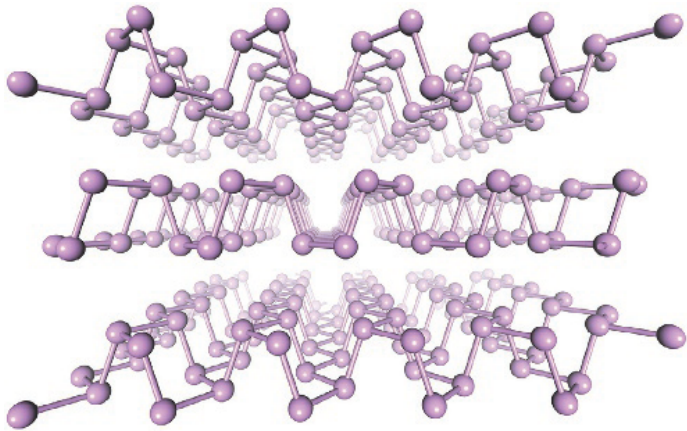
A.A. 2019/2020

Introduzione

➤ Giunzione SNS



black-Phopshorus (bP)



Outline:

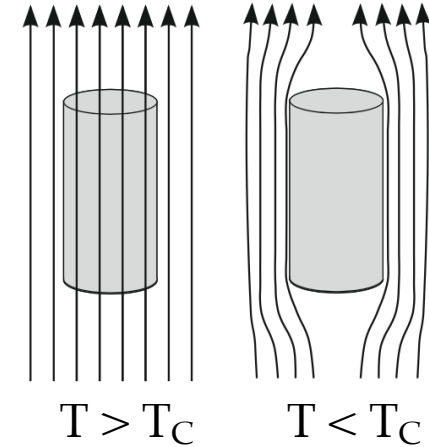
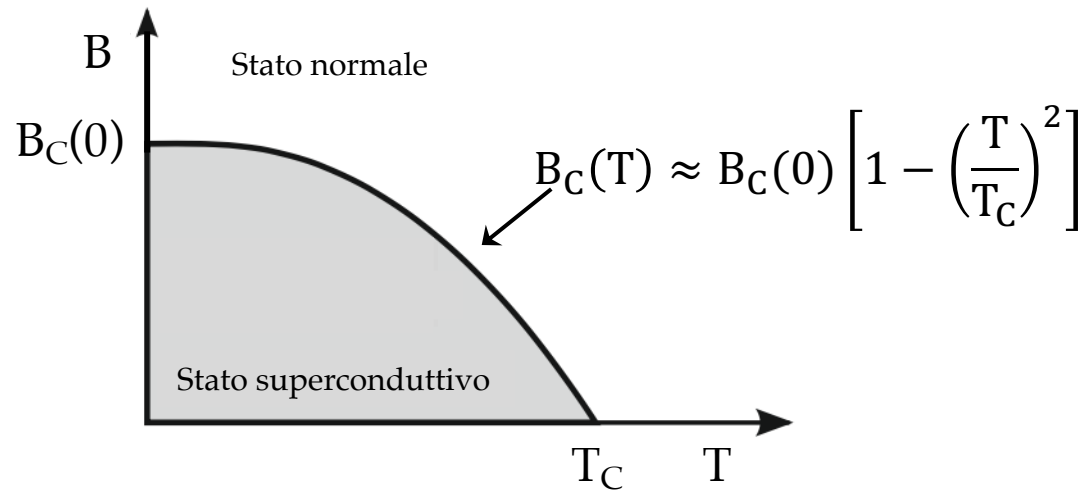
- Superconduttività e giunzioni SNS
- Black-Phosphorus
- Fabbricazione dei dispositivi
- Setup sperimentale
- Risultati sperimentali
- Conclusioni e prospettive future

Outline:

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

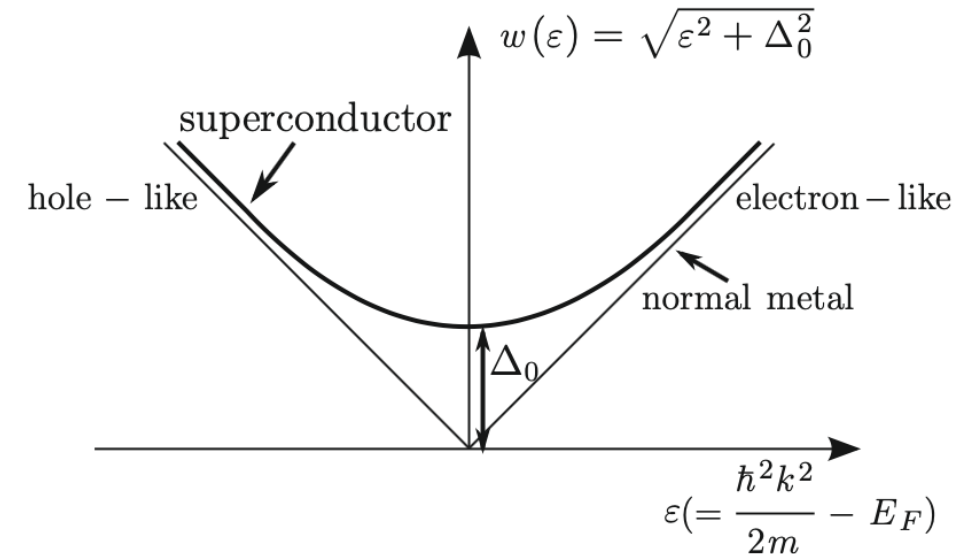
Superconduttività

➤ Superconduttore = Conduttore perfetto + Diamagnete perfetto



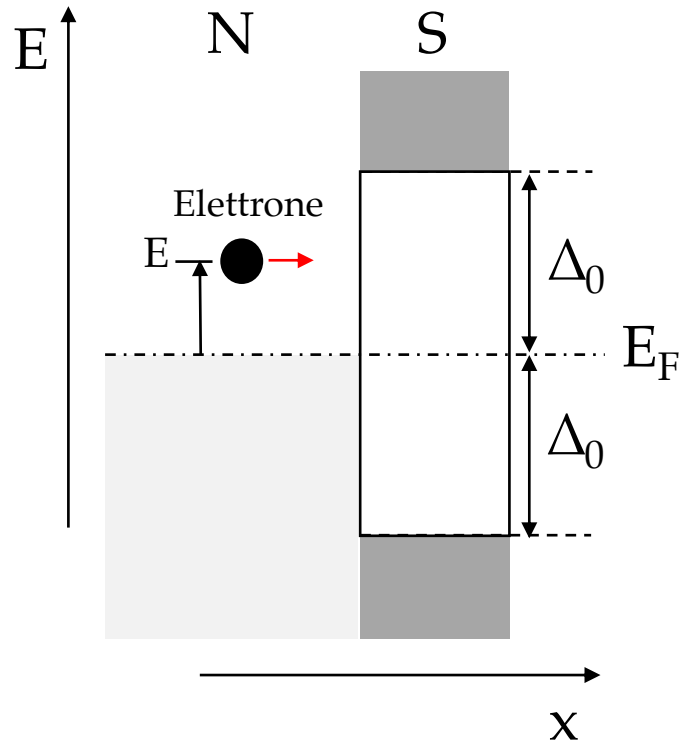
➤ Attrazione efficace fra elettroni \Rightarrow Coppie di Cooper

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



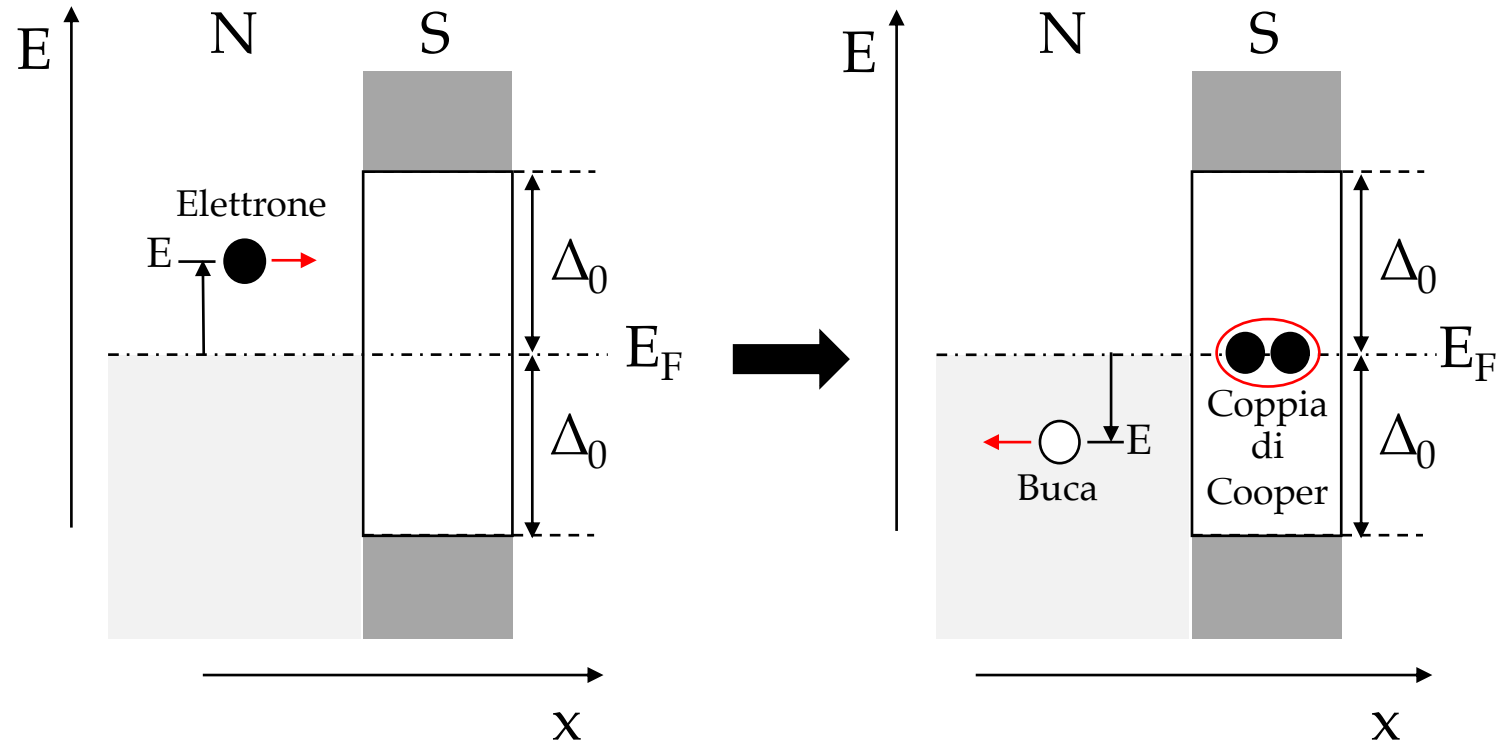
Andreev Reflection

➤ Interfaccia NS

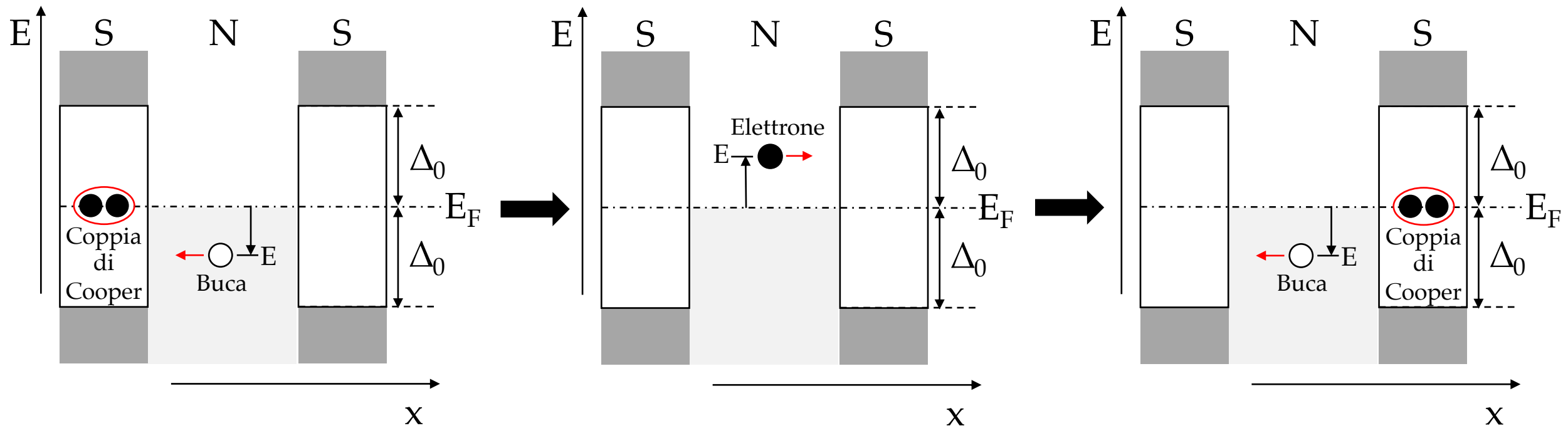


Andreev Reflection

➤ Interfaccia NS



Giunzione SNS



Trasparenza Interfaccia SN

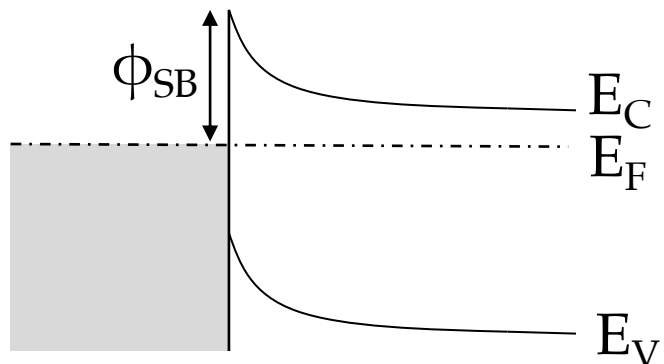
➤ Barriera di potenziale all'interfaccia SN

1. Layer isolante



2. Barriera Schottky

Metallo Semiconduttore



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

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

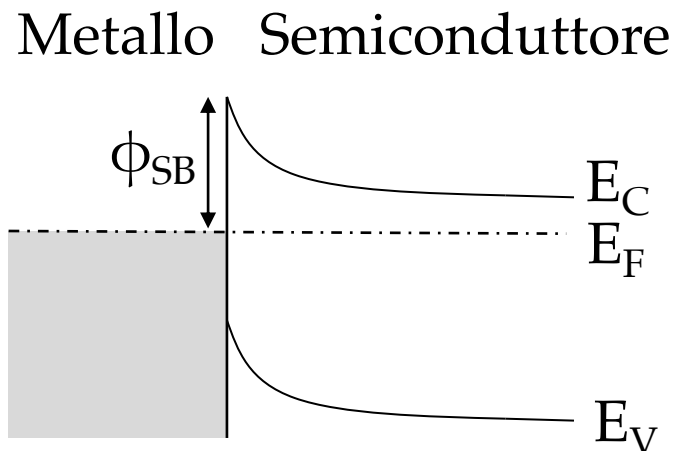
Trasparenza Interfaccia SN

➤ 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

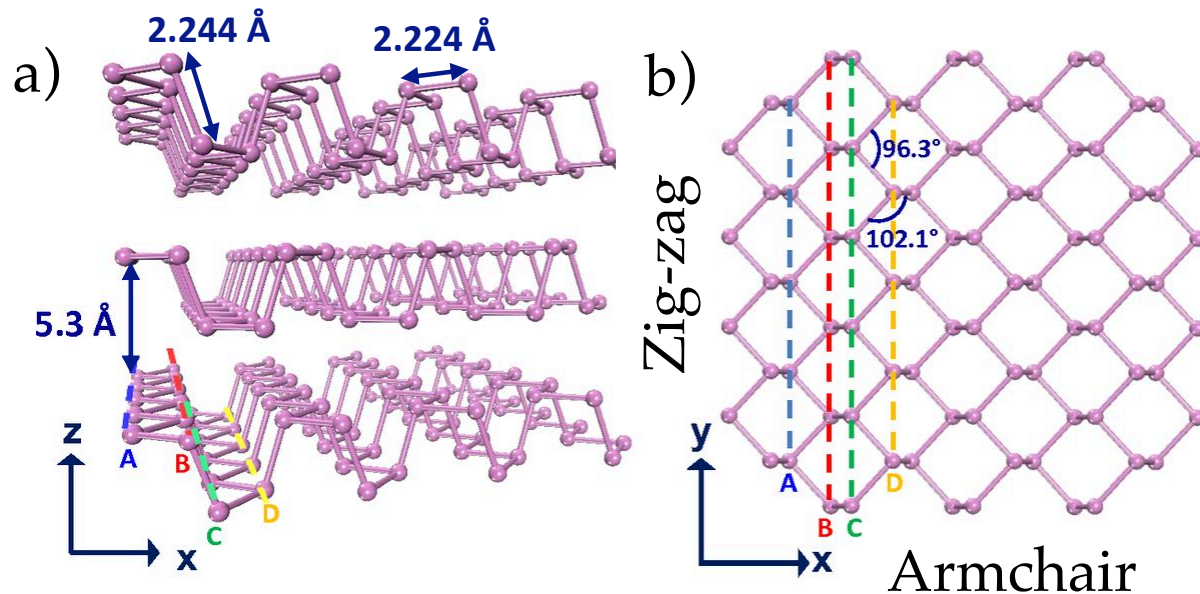
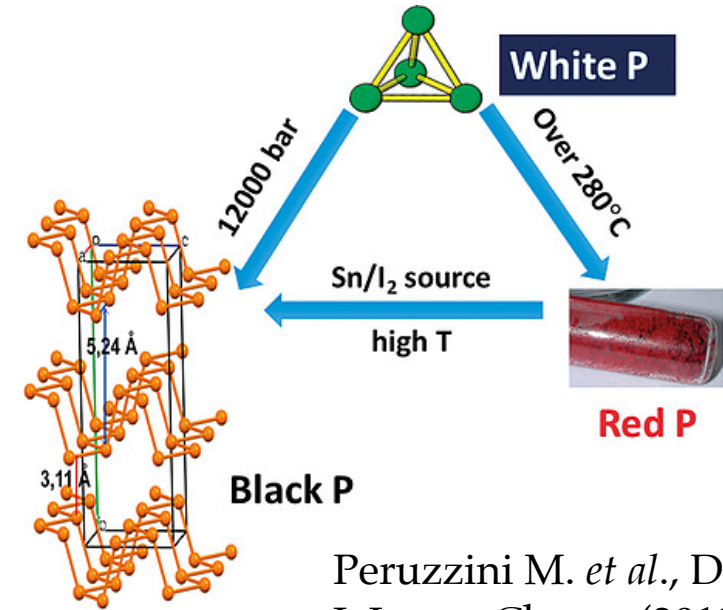
➤ Setup sperimentale

➤ 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**

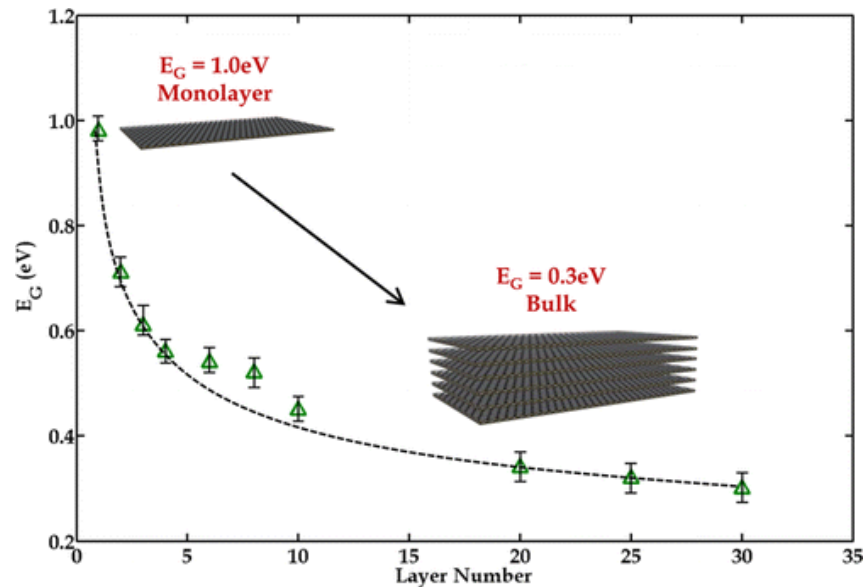


X. Ling *et al.*, *PNAS* 112 (2015) 4523

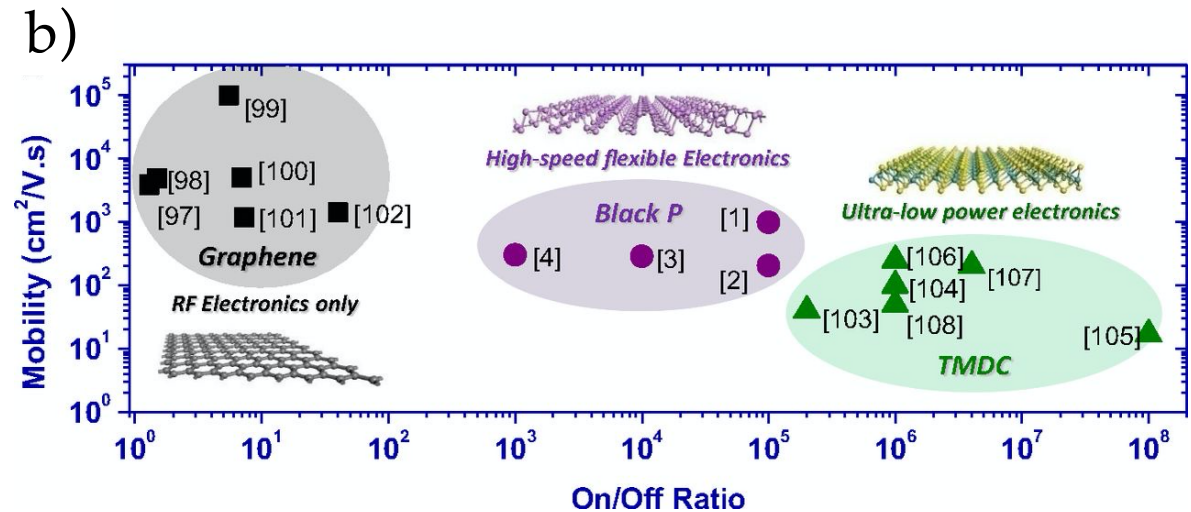
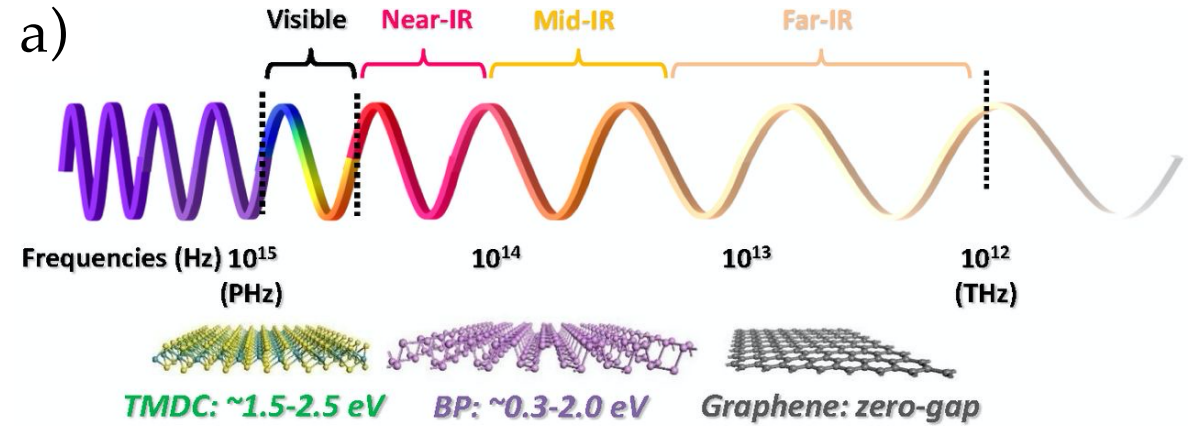
- Un **sigolo layer** di bP non è piatto
 - ⇒ Struttura a nido d'ape corrugata
 - ⇒ **Anisotropia** nel piano

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



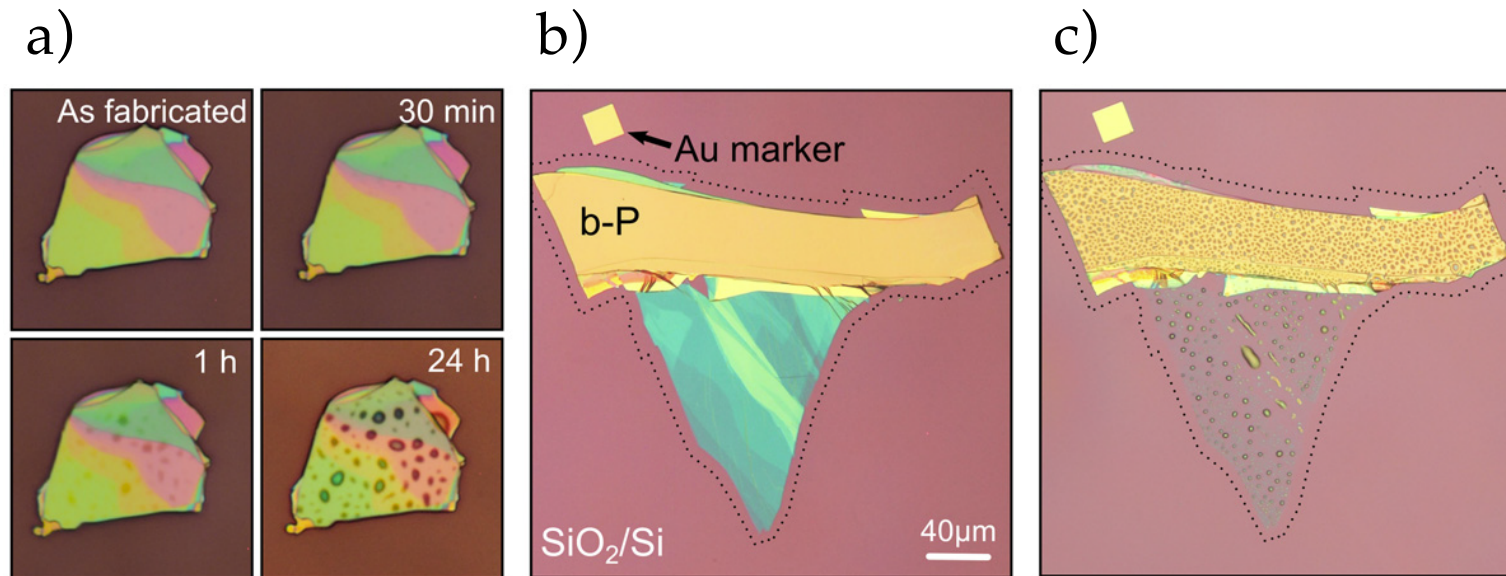
X. Ling *et al.*, *PNAS* 112 (2015) 4523

Stabilità ambientale

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



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



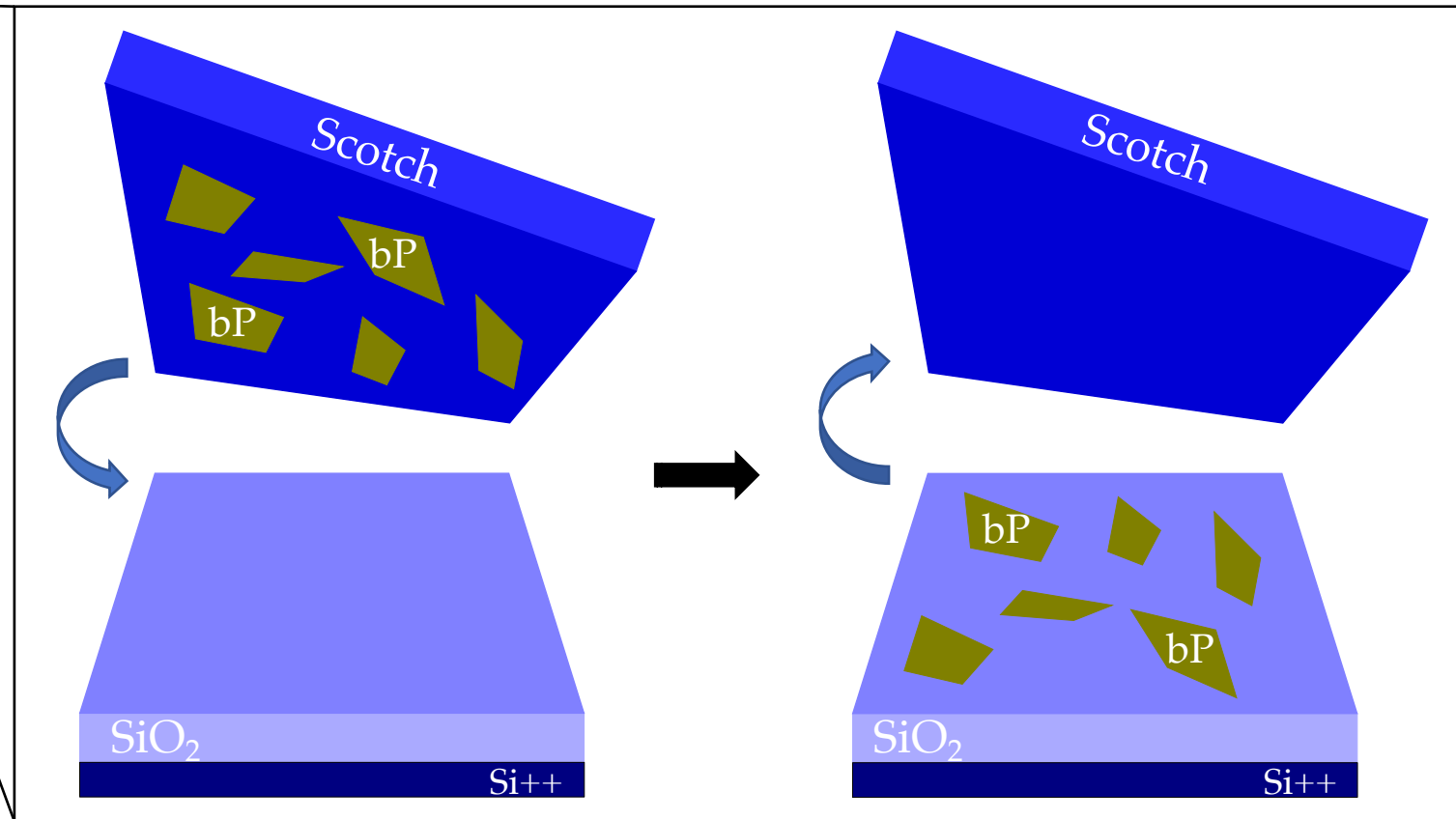
A. Castellanos-Gomez *et al.*, 2014 *2D Mater.* **1** 025001

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)

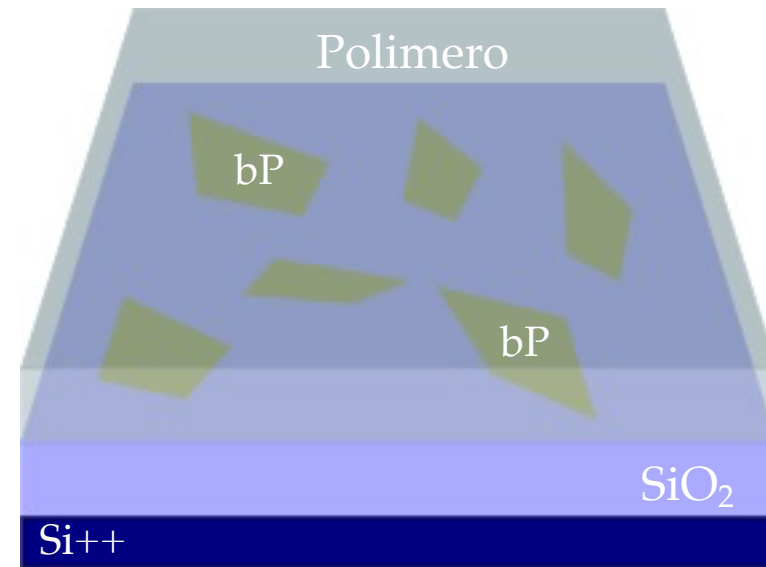


Protocollo di Fabbricazione

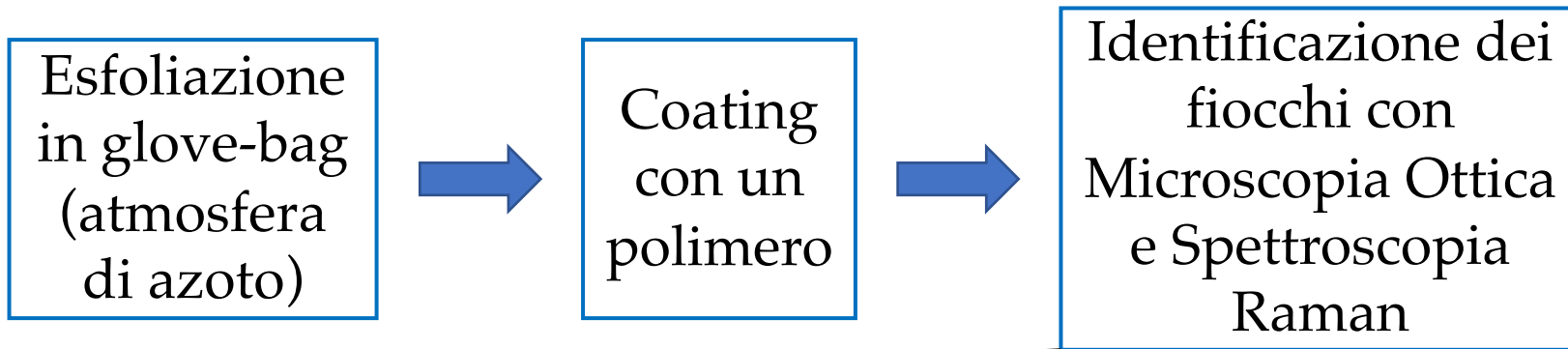
Esfoliazione
in glove-bag
(atmosfera
di azoto)



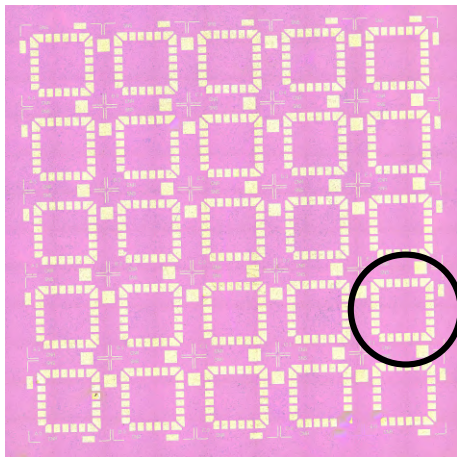
Coating
con un
polimero



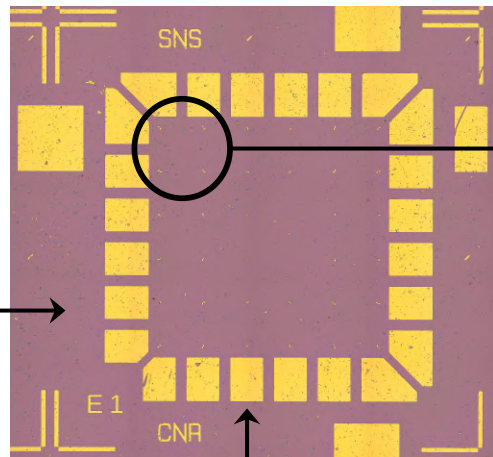
Protocollo di Fabbricazione



a)

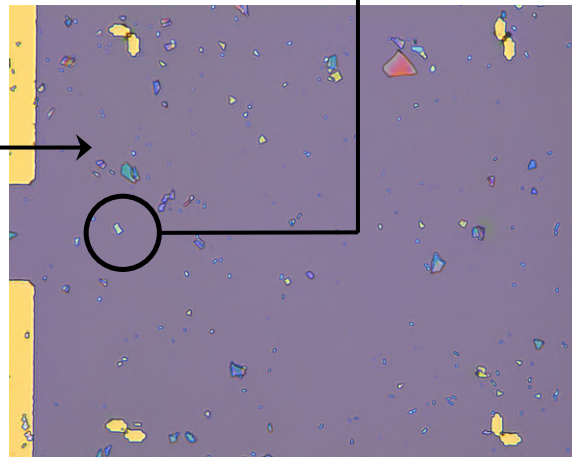


b)

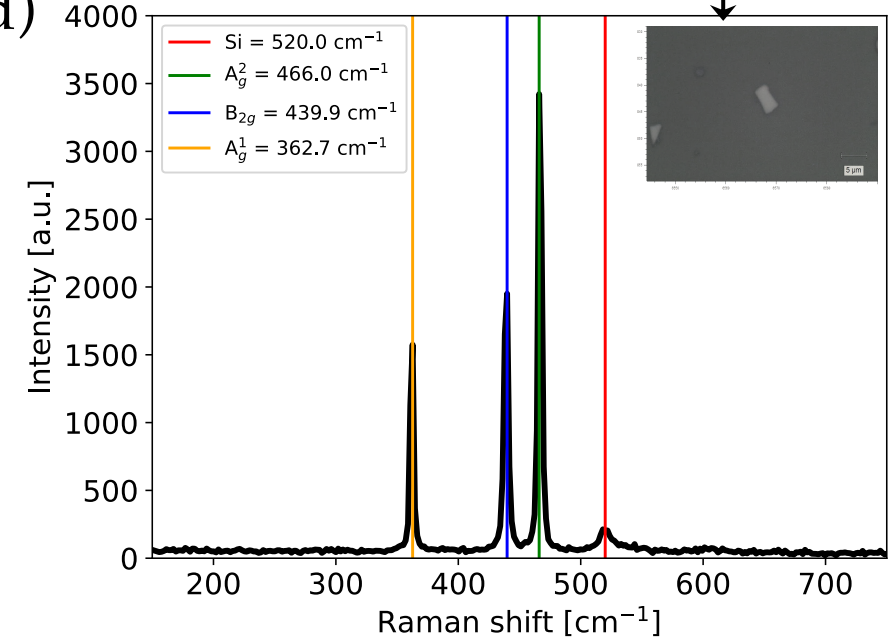


Pad di oro

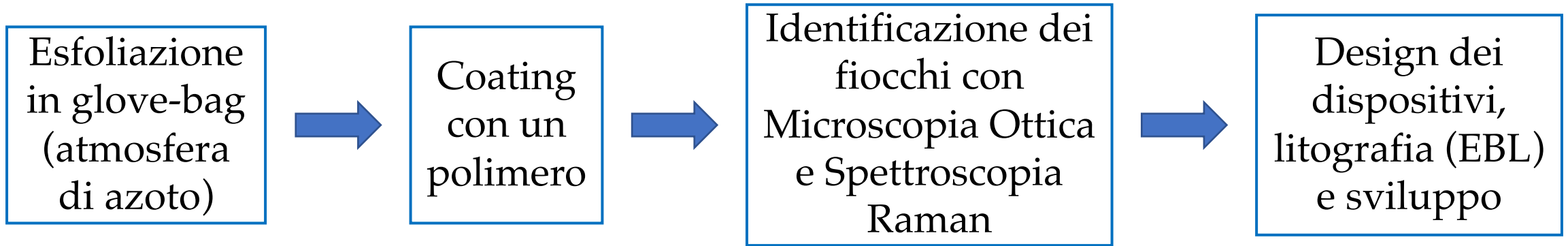
c)



d)



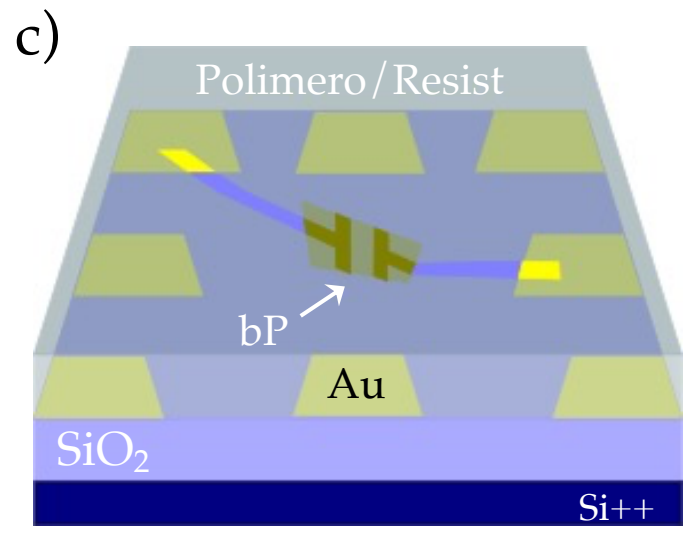
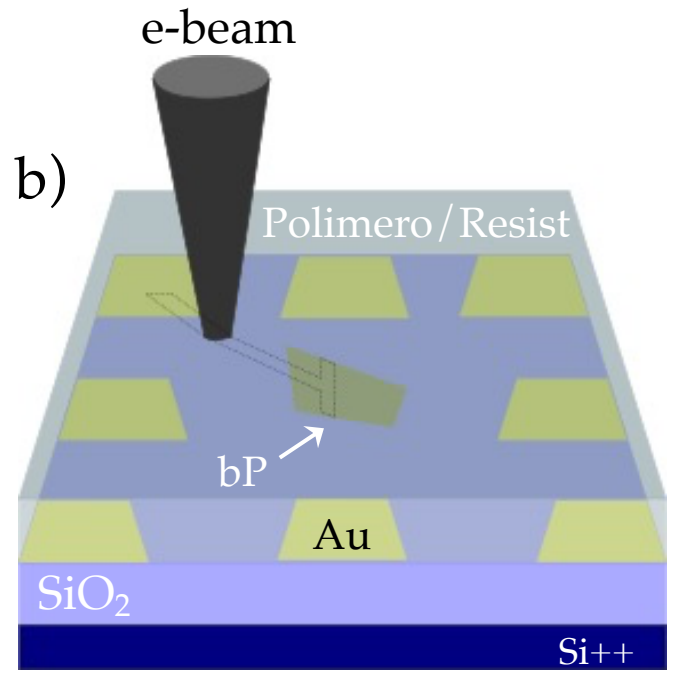
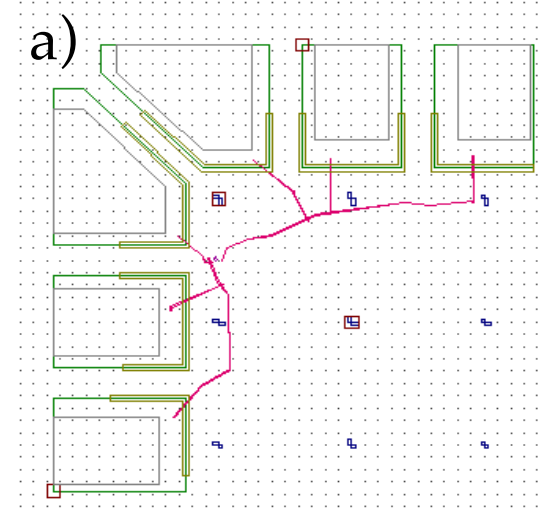
Protocollo di Fabbricazione



Protocollo di Fabbricazione

Esfol
in glo
(atm
di a

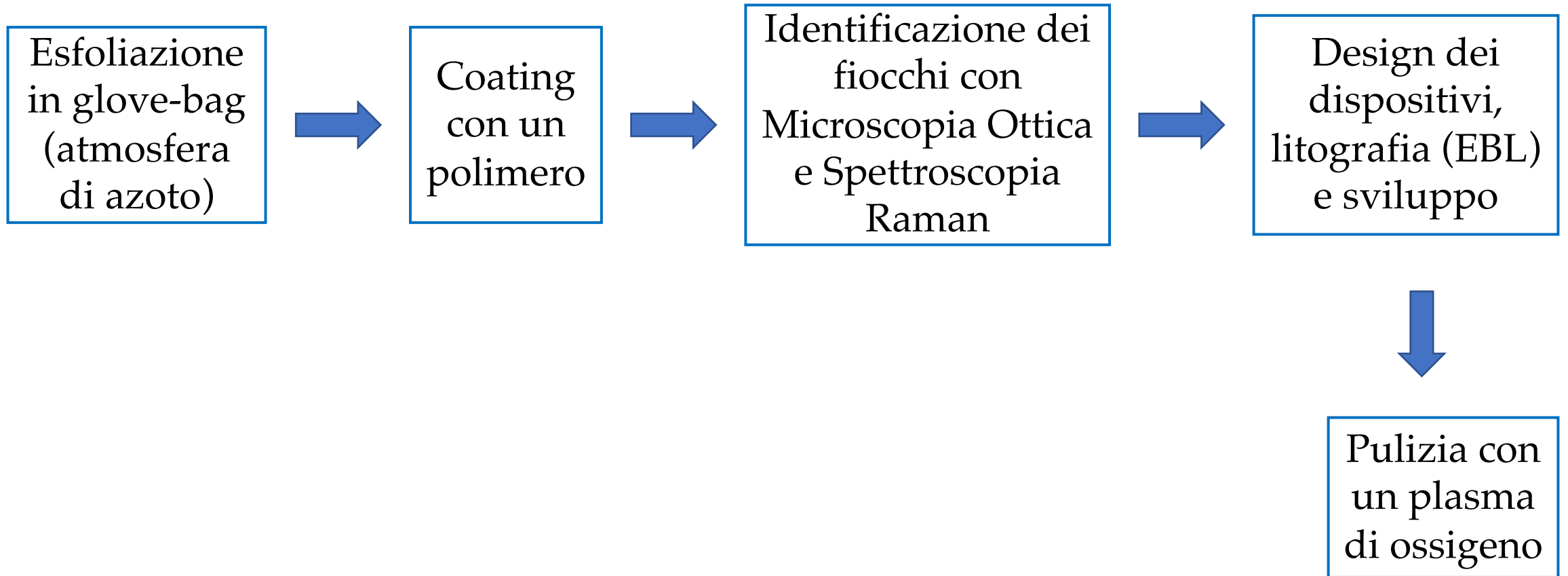
- a) CAD del dispositivo
- b) Esposizione
- c) Sviluppo



Design dei
dispositivi,
litografia (EBL)
e sviluppo

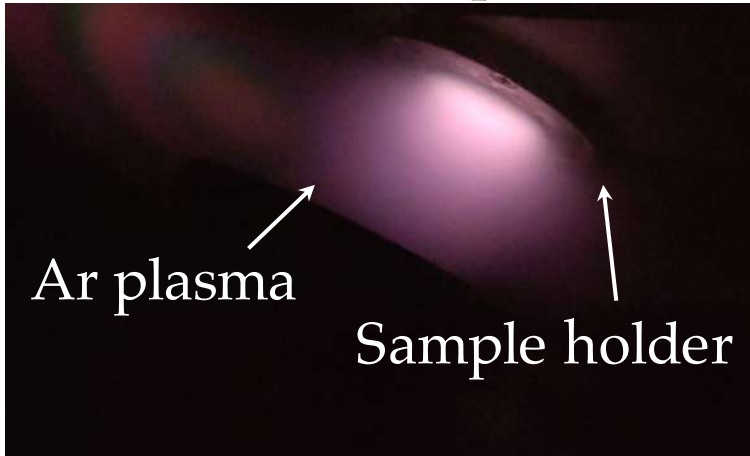


Protocollo di Fabbricazione

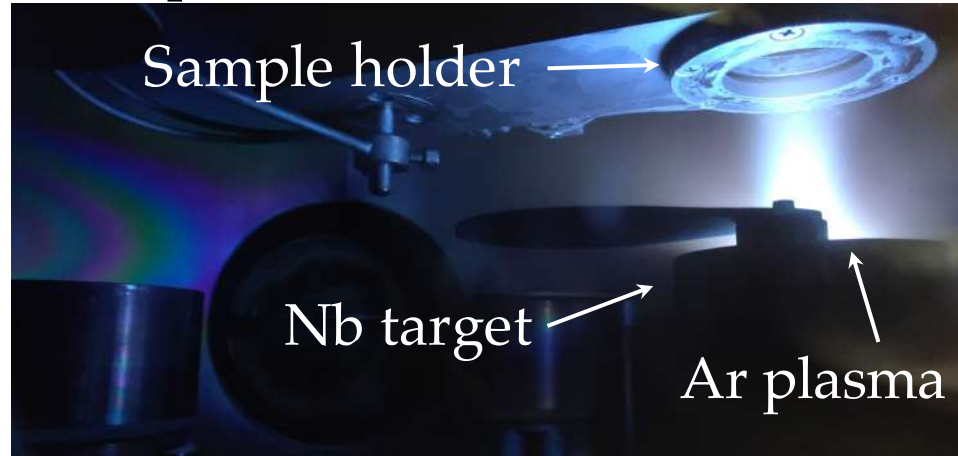


Protocollo di Fabbricazione

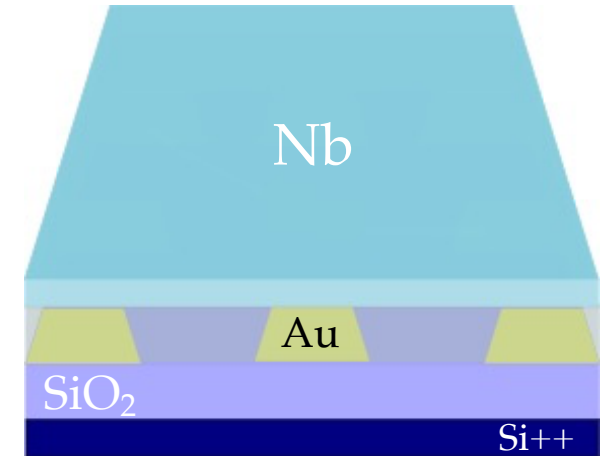
a) Pulizia con Ar plasma



b) Deposizione del Nb



c)

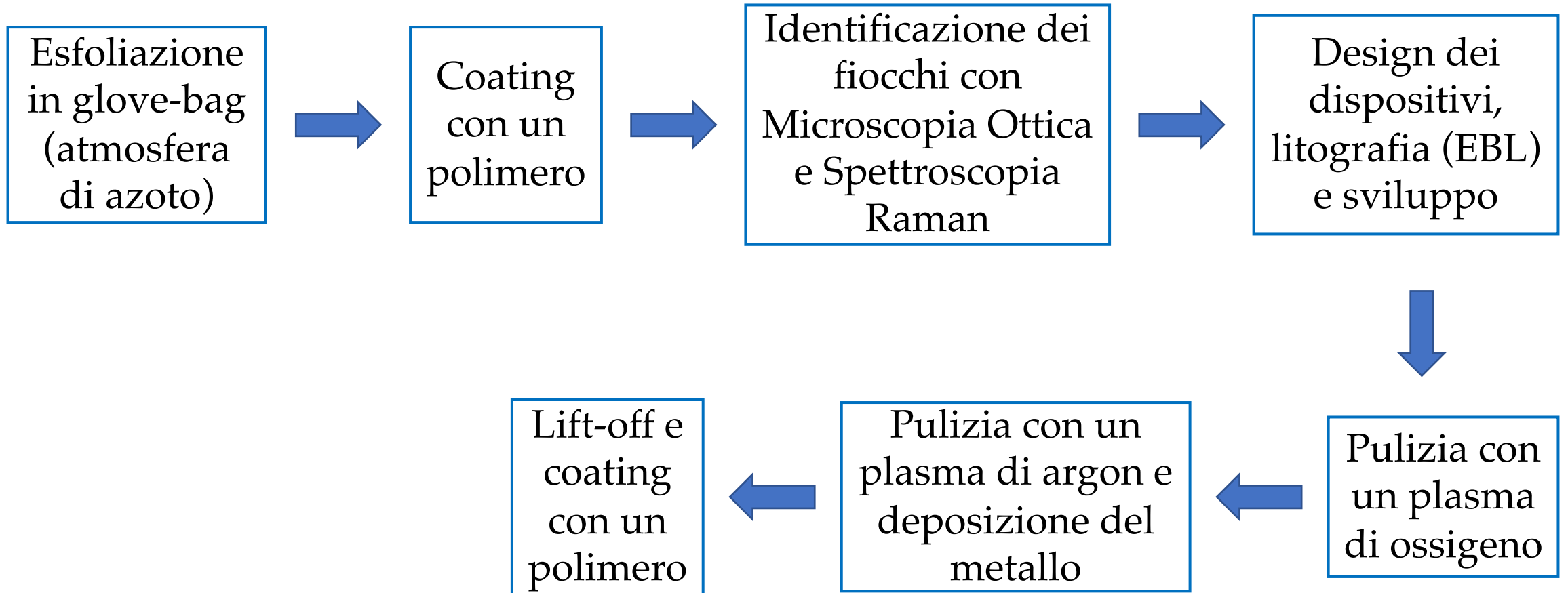


Pulizia con un plasma di argon e deposizione del metallo

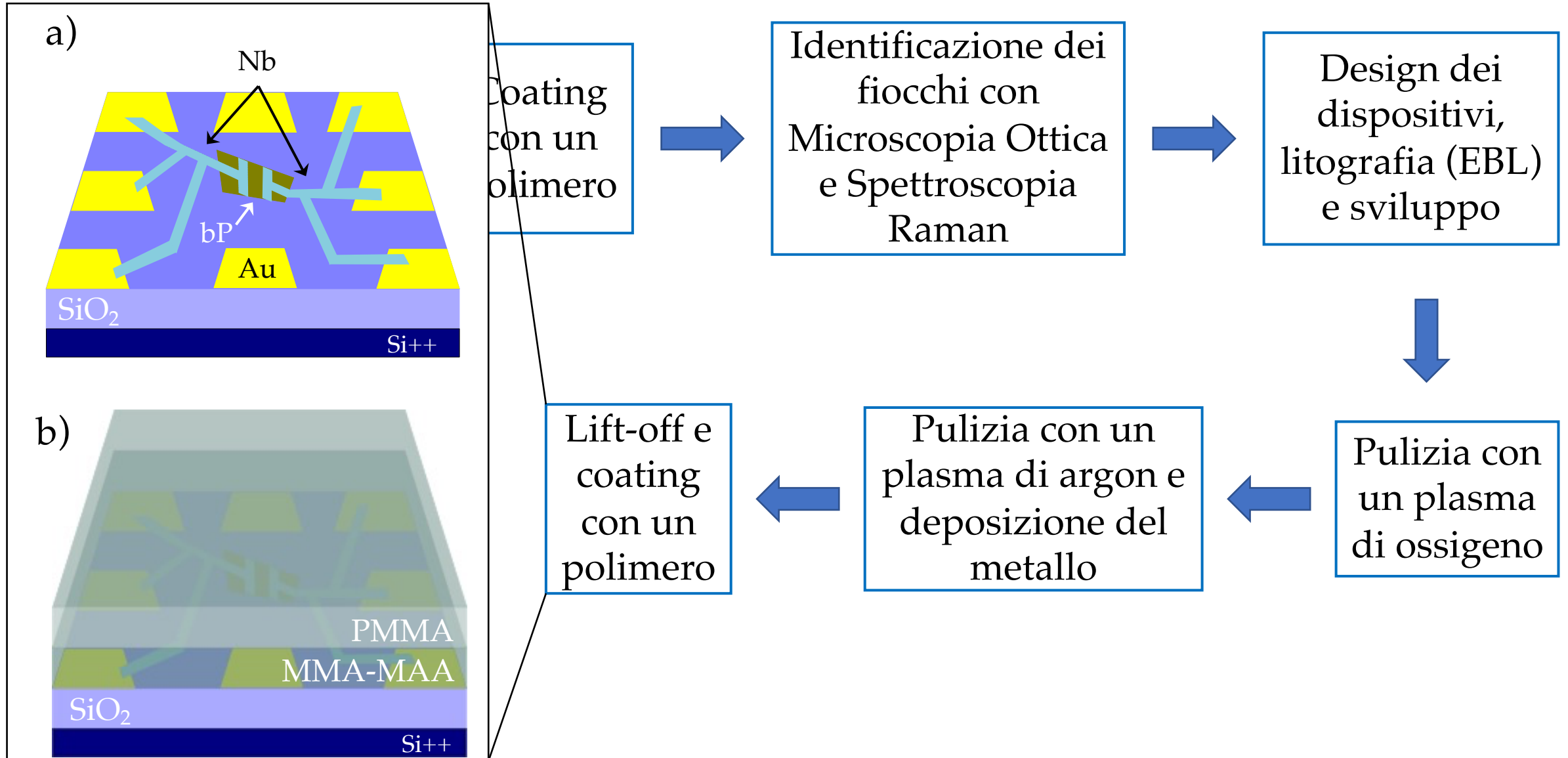
Pulizia con un plasma di ossigeno



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 ₂ + 5 min Ar	70 nm Nb
C	PMMA ($t \sim 300$ nm)	1 min O ₂ + 5 min Ar	10 nm Ti + 60 nm Nb
D	PMMA ($t \sim 300$ nm)	1 min O ₂ + 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 ₂ + 5 min Ar	Rimuove i residui di polimero dopo la litografia (EBL) e lo sviluppo
C	PMMA ($t \sim 300$ nm)	1 min O ₂ + 5 min Ar	10 nm Ti + 60 nm Nb
D	PMMA ($t \sim 300$ nm)	1 min O ₂ + 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 ₂ + 5 min Ar	Contatti Ohmici di buona qualità fra titanio e bP [1]
C	PMMA ($t \sim 300$ nm)	1 min O ₂ + 5 min Ar	
D	PMMA ($t \sim 300$ nm)	1 min O ₂ + 15 min Ar	10 nm Ti + 60 nm Nb

Protocolli di Fabbricazione

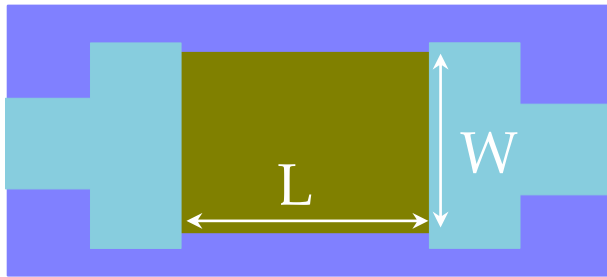
Protocollo	Coating	Pulizia superfici	Metallo depositato
A	MMA-MAA/PMMA ($t \sim 700$ nm)	5 min Ar	70 nm Nb
B	PMMA ($t \sim 300$ nm)	1 min O ₂ + 5 min Ar	70 nm Nb
C	PMMA ($t \sim 300$ nm)		
D	PMMA ($t \sim 300$ nm)	1 min O ₂ + 15 min Ar	10 nm Ti + 60 nm Nb

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

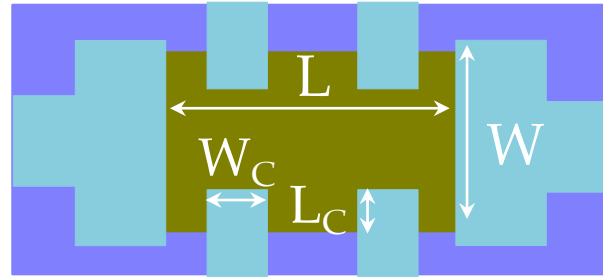


I Dispositivi

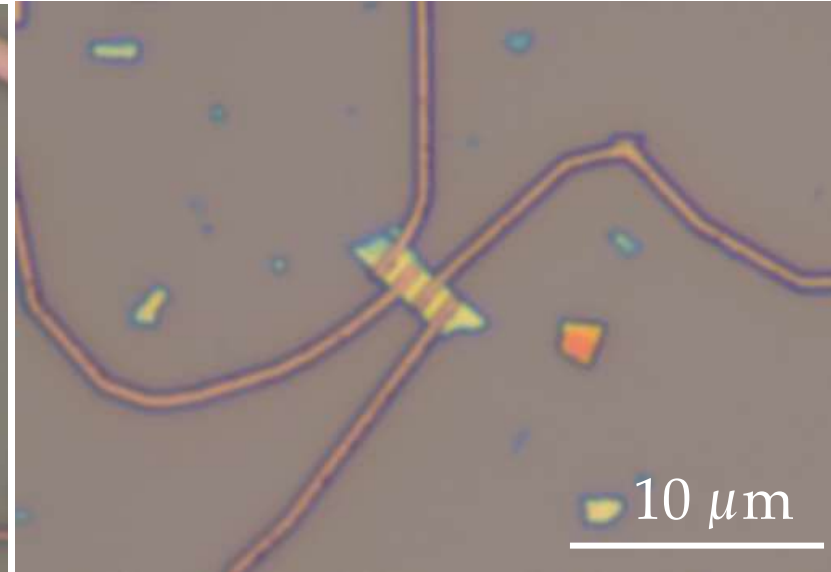
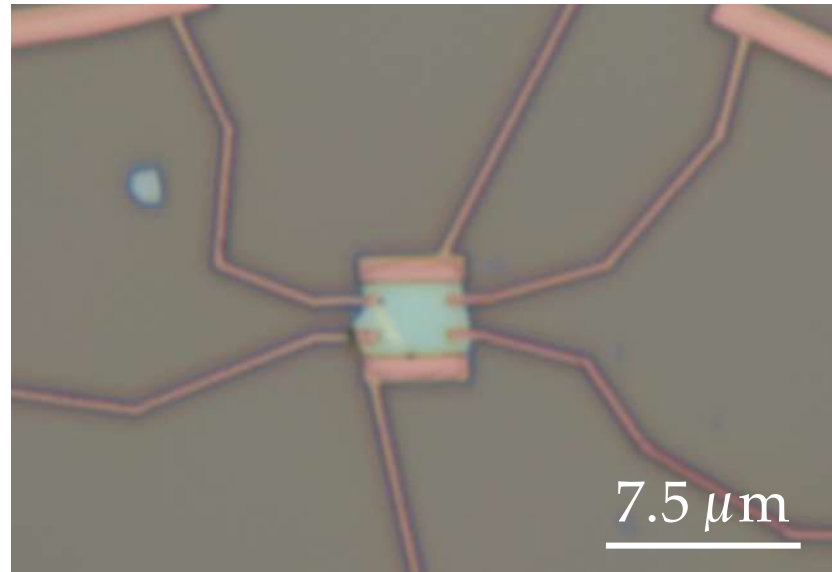
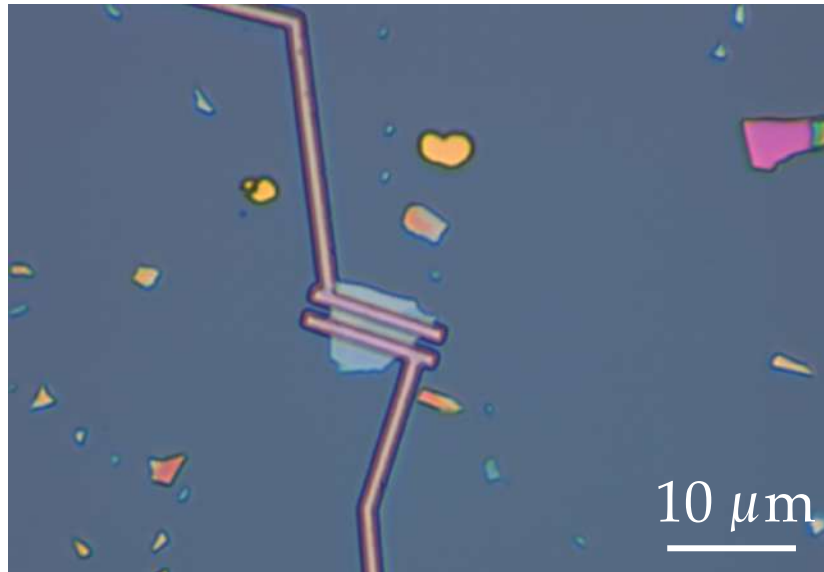
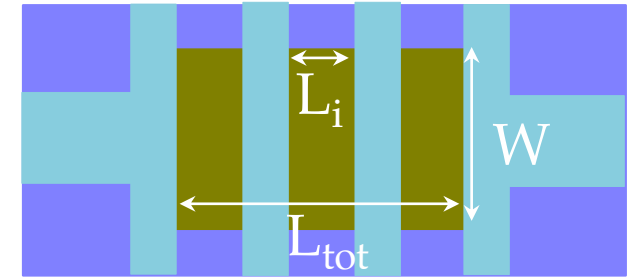
a) Giunzione



b) Hall bar



c) TLM

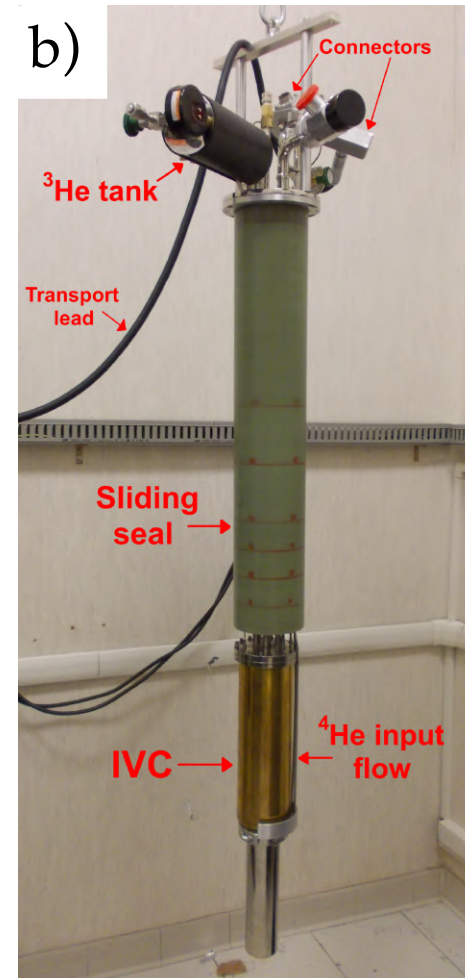
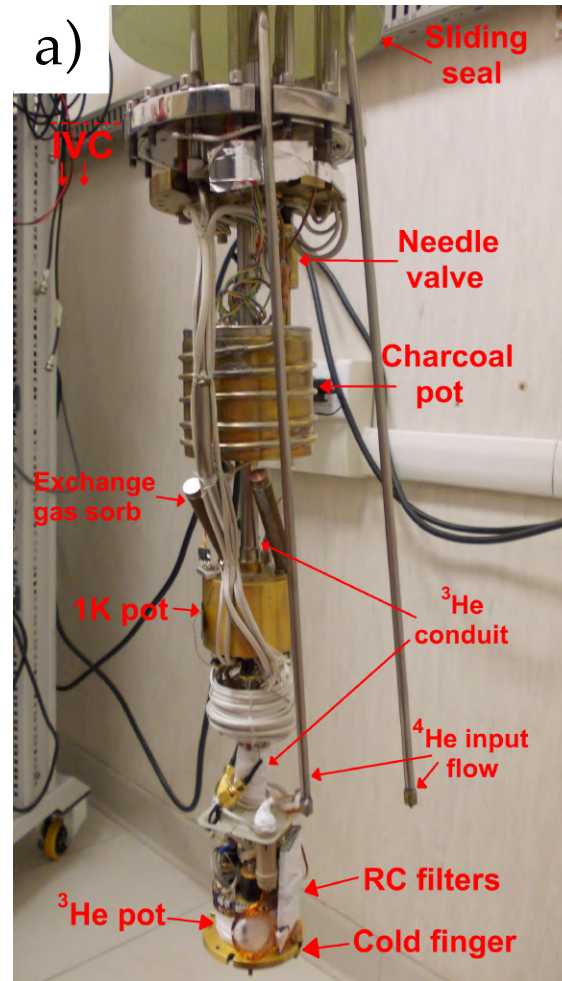


Outline:

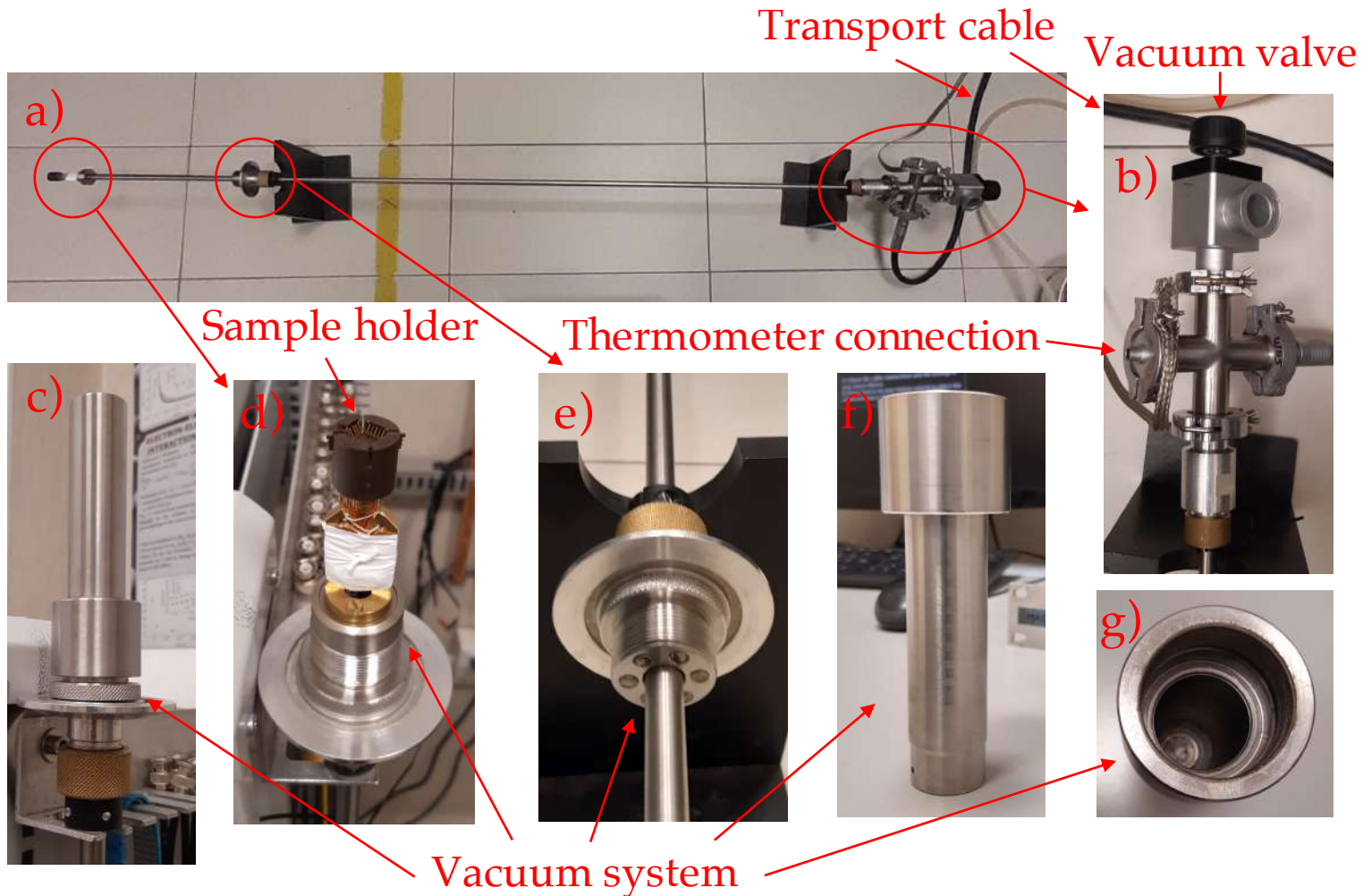
- Superconduttività e giunzioni SNS
- Black-Phosphorus
- Protocolli di fabbricazione
- **Setup sperimentale**
- Risultati sperimentali
- Conclusioni e prospettive future

Criostato ^3He

- Criostato Janis ad ^3He
- $T_{\text{min}} = 300 \text{ mK}$
- 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:

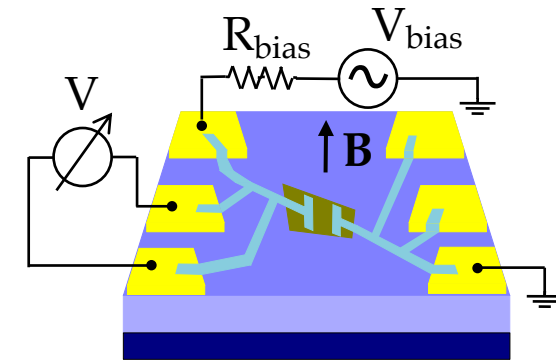
1. $T_{\text{ambiente}} = 300 \text{ K}$
2. $T_{\text{LN2}} = 77 \text{ K}$
3. $T_{\text{4He}} = 4.2 \text{ K}$

➤ $p = 10^{-5} \text{ mbar}$

Outline:

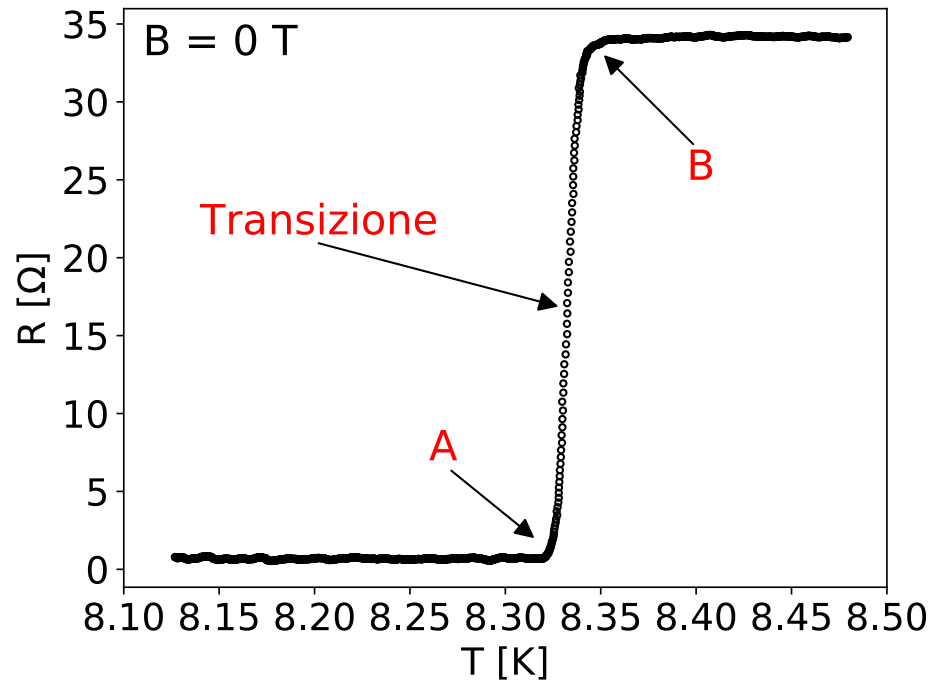
- Superconduttività e giunzioni SNS
- Black-Phosphorus
- Protocolli di fabbricazione
- Setup sperimentale
- **Risultati sperimentali**
- Conclusioni e prospettive future

Parametri del Superconduttore



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

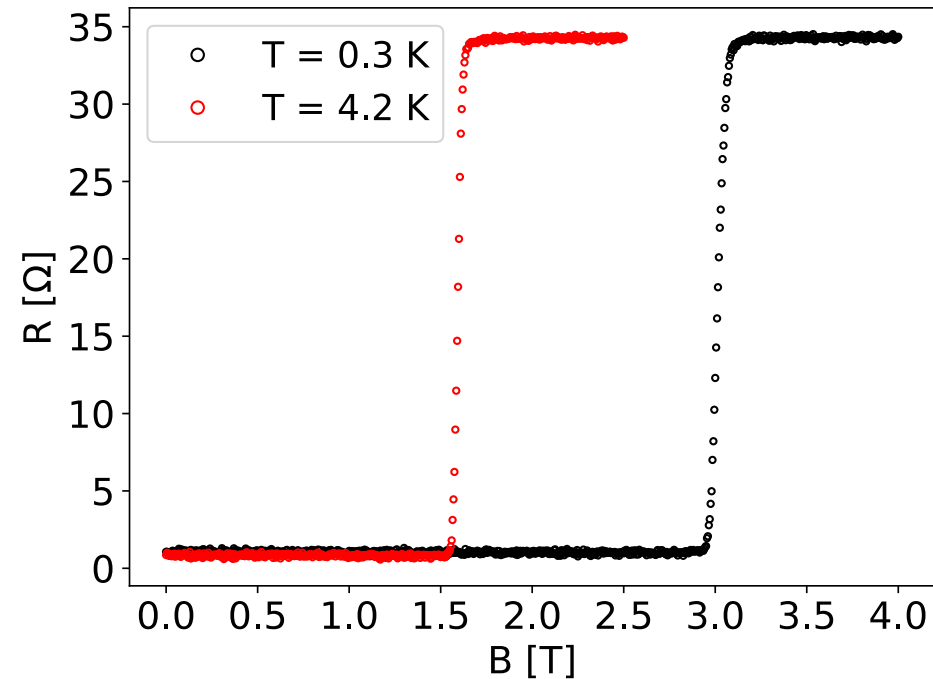
Temperatura critica



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

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

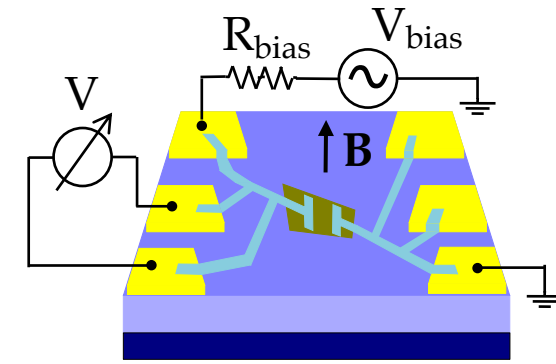
Campo critico



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

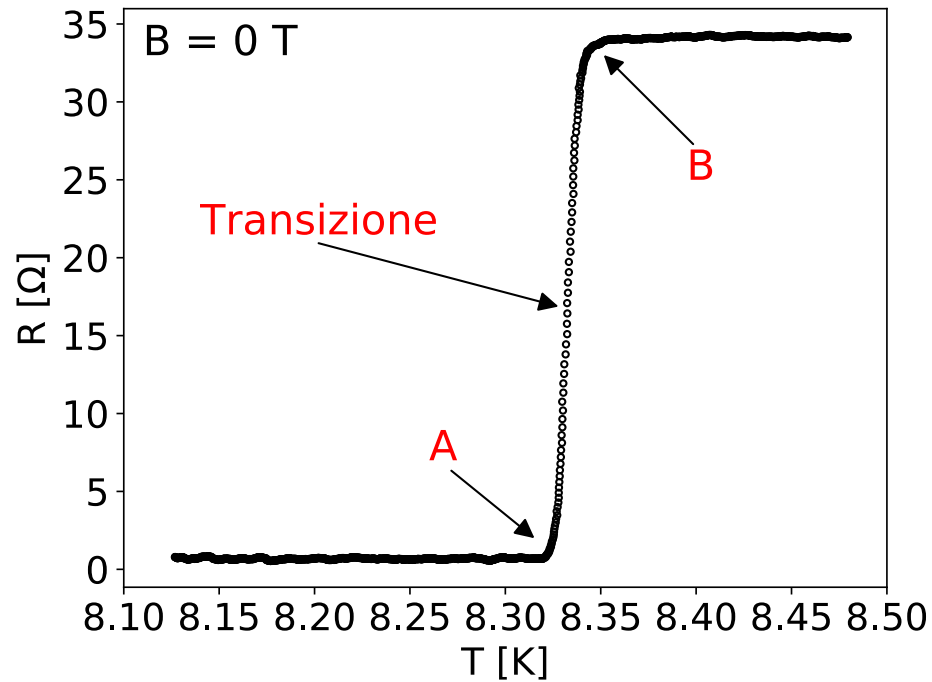
$$B_C^{4.2\text{K}} = (1.6 \pm 0.1) \text{ T}$$

Parametri del Superconduttore

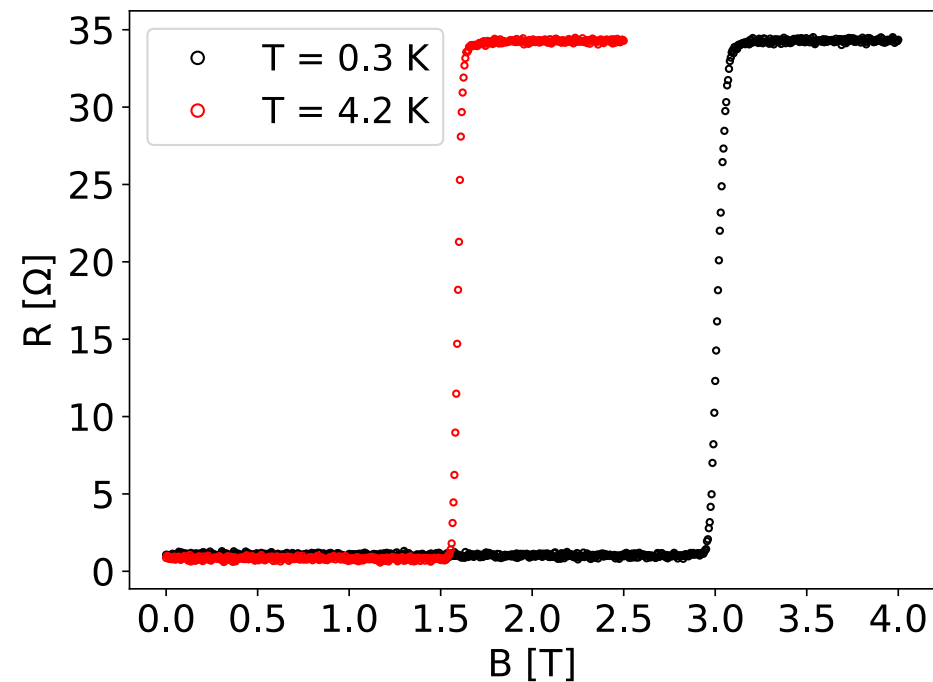


$$\Rightarrow R = V / I_{\text{bias}}$$

Temperatura critica



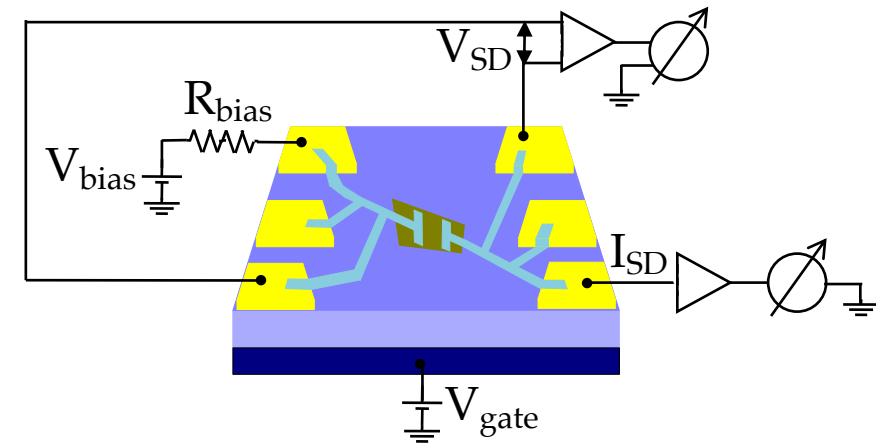
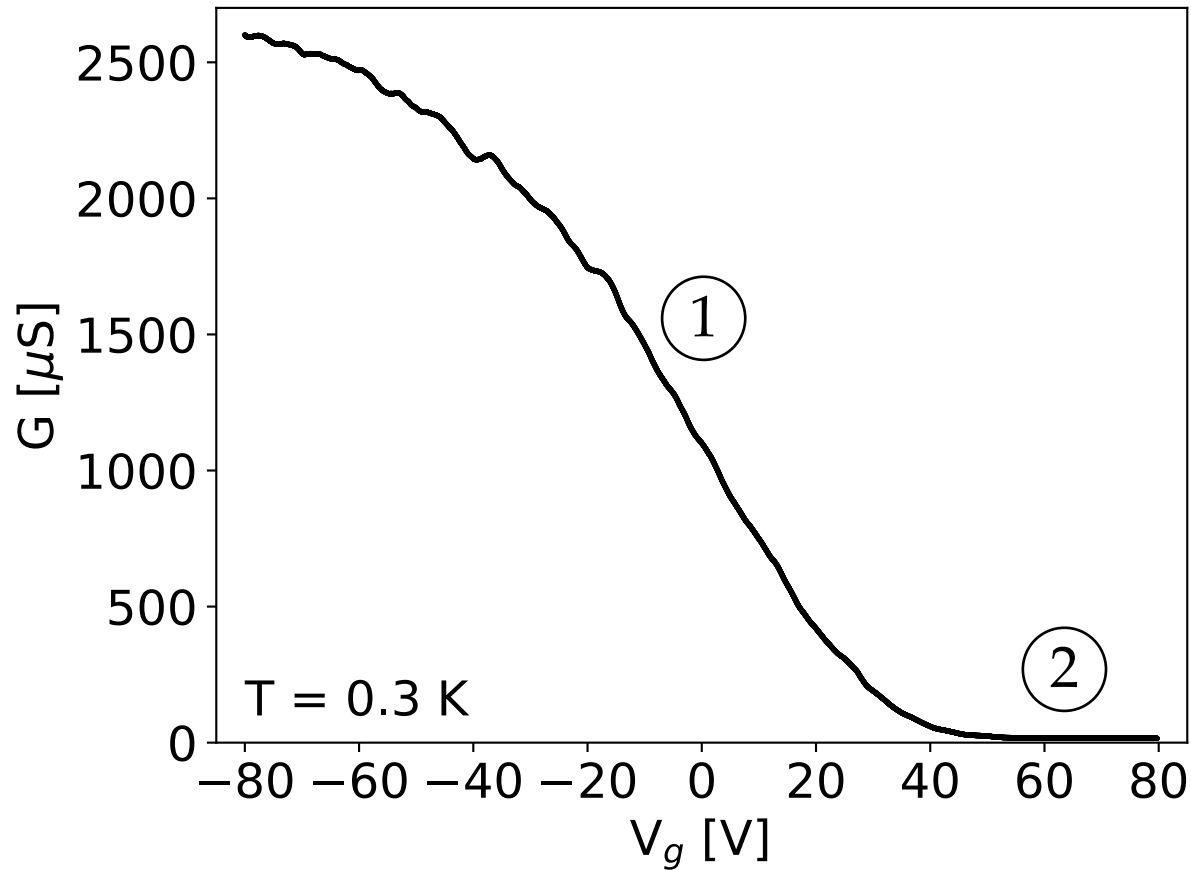
Campo critico



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

Caratterizzazione del bP

Conduzzanza vs Tensione di gate



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

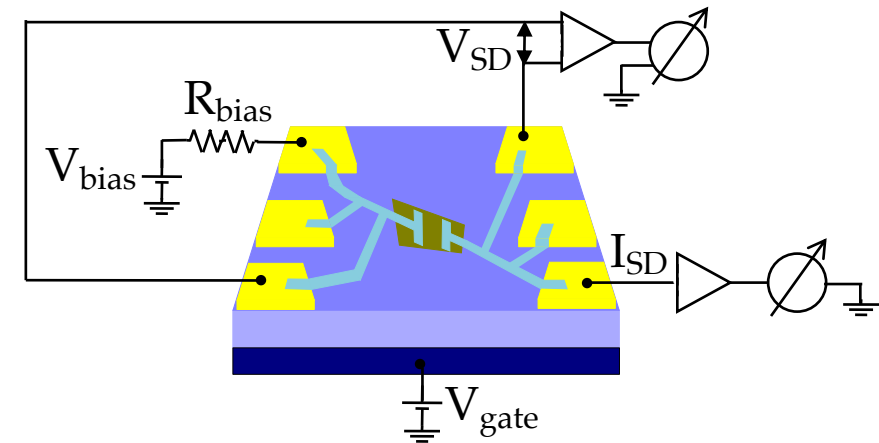
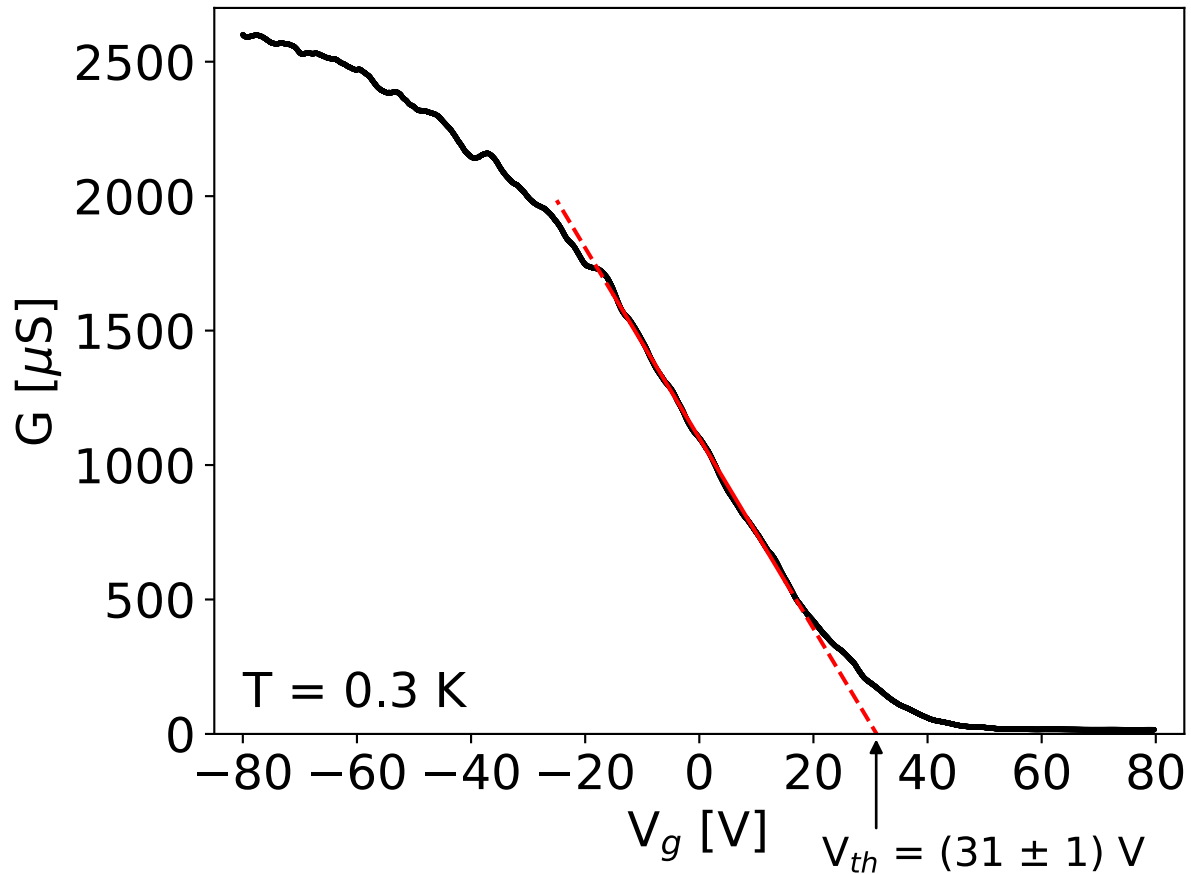
➤ $G \propto \sigma = ne\mu$

Densità di carica: $n(V_g)$

- Due regioni:
1. Accumulazione
 2. Deplezione

Caratterizzazione del bP

Conduzzanza vs Tensione di gate



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

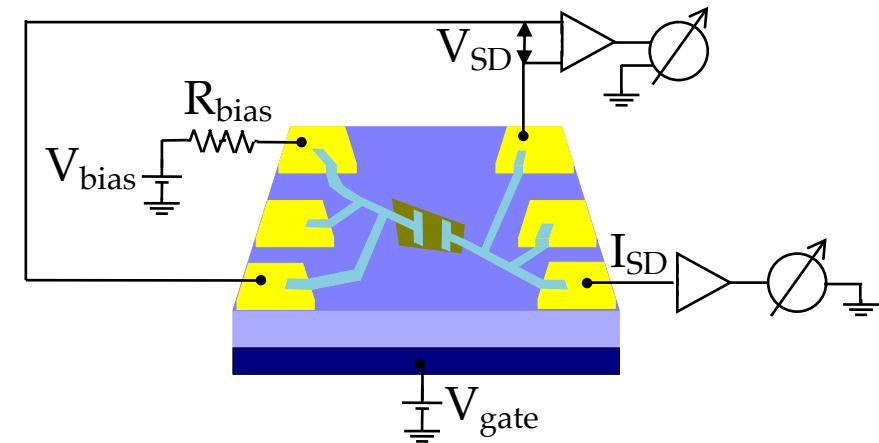
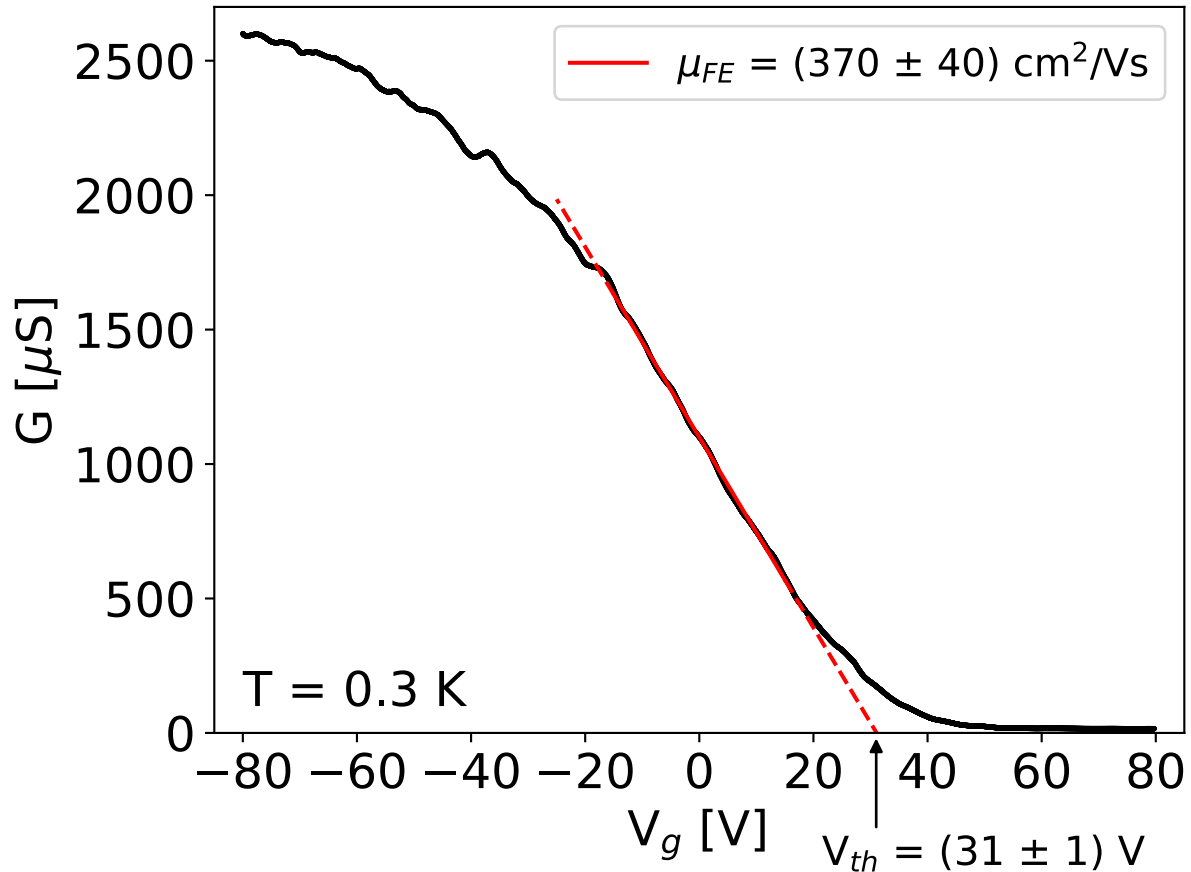
➤ $G \propto \sigma = ne\mu$

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: $\mu \propto \tau_{\text{scattering}}$

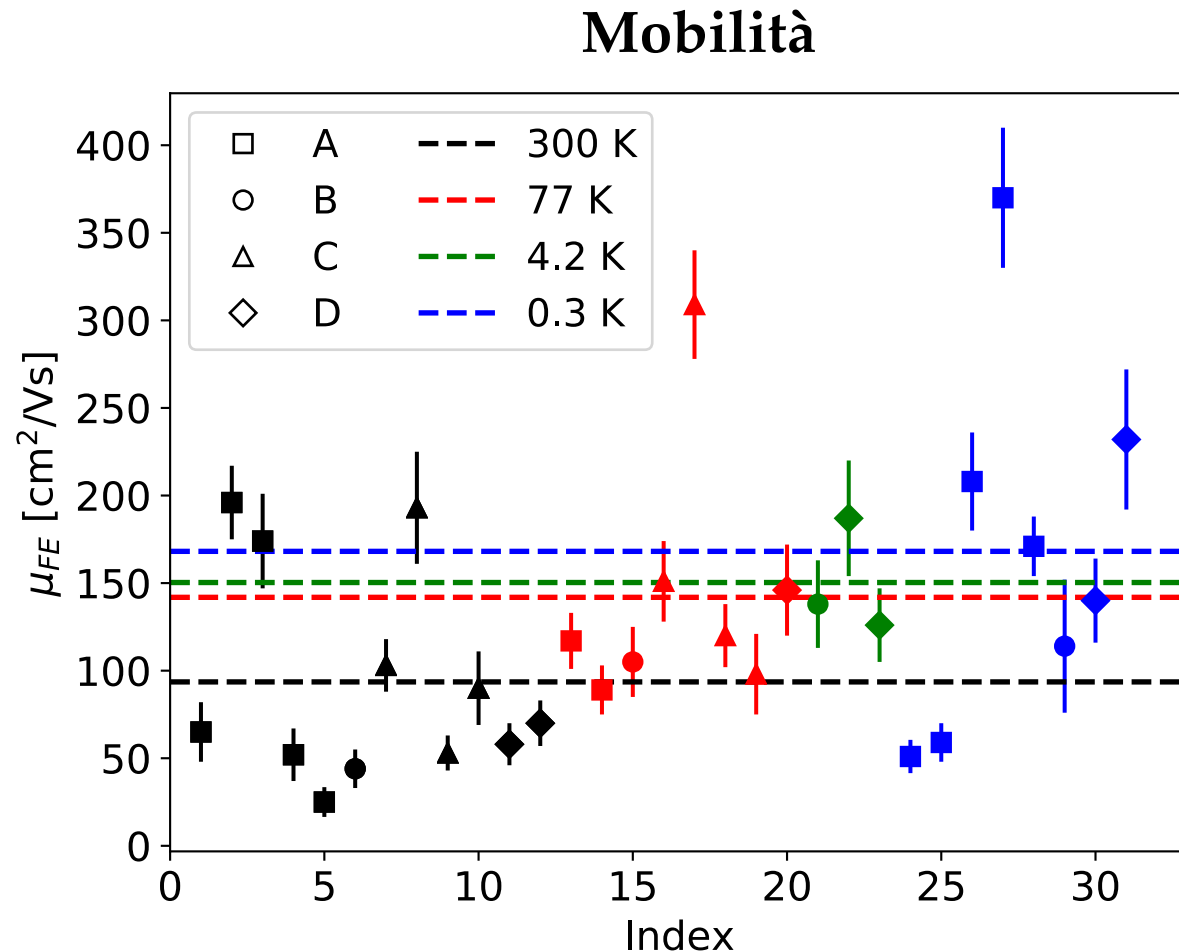
Densità di carica: $n \propto (V_g - V_{th})$

➤ 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

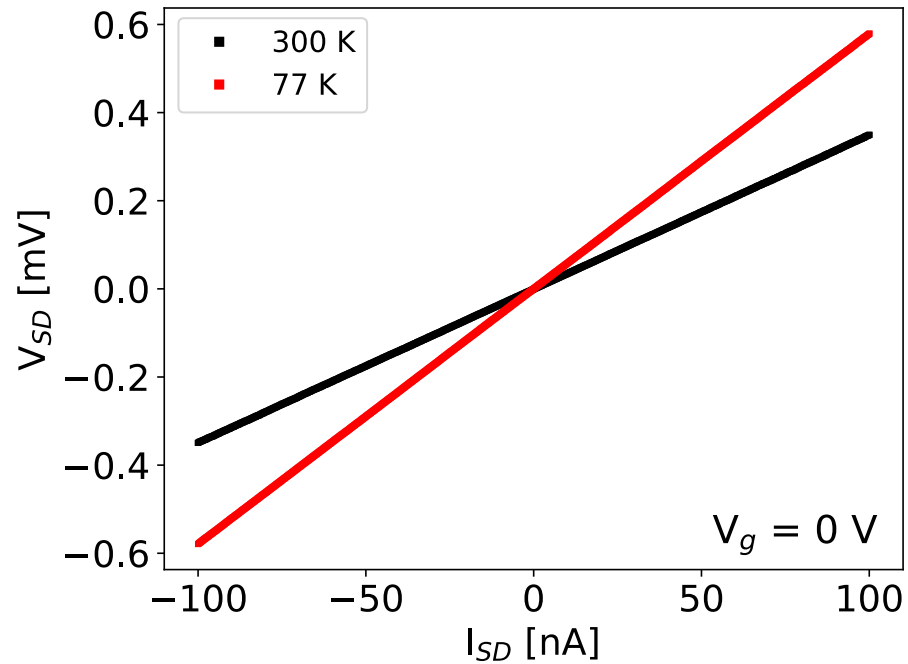


- La mobilità aumenta al diminuire della temperatura
- L'aumento della durata dell'Ar plasma (**protocollo D**) ha mantenuto la qualità del bP

} Media per ogni temperatura

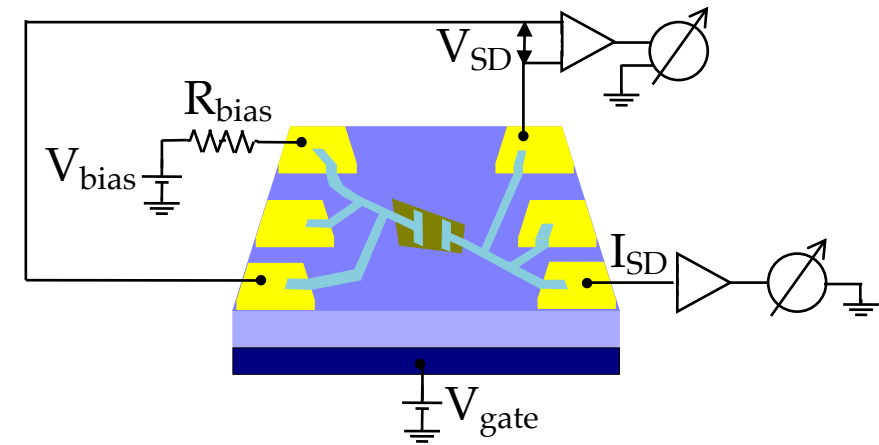
Caratteristiche I-V

Dipendenza dalla Temperatura



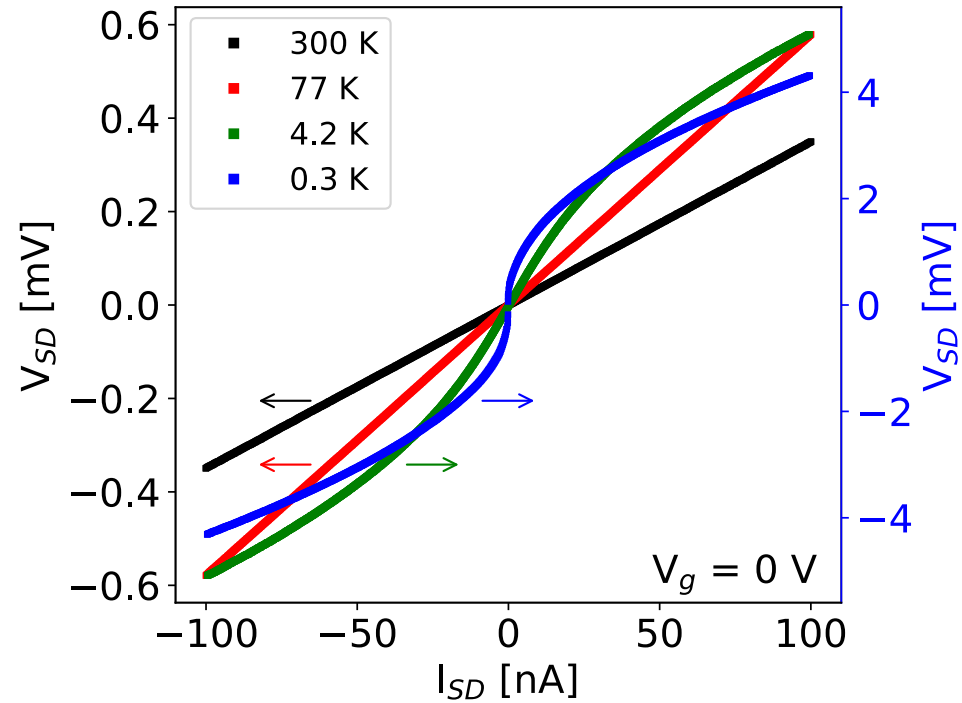
➤ Contatti Ohmici a 300 K e a 77 K

$$V = RI$$

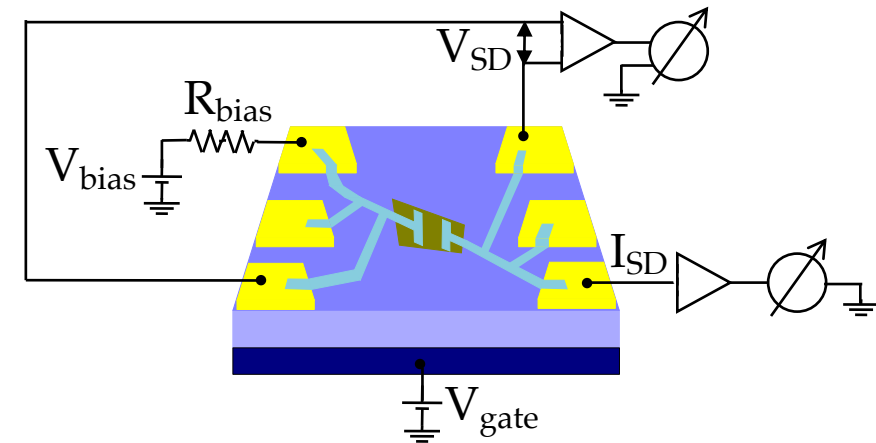


Caratteristiche I-V

Dipendenza dalla Temperatura

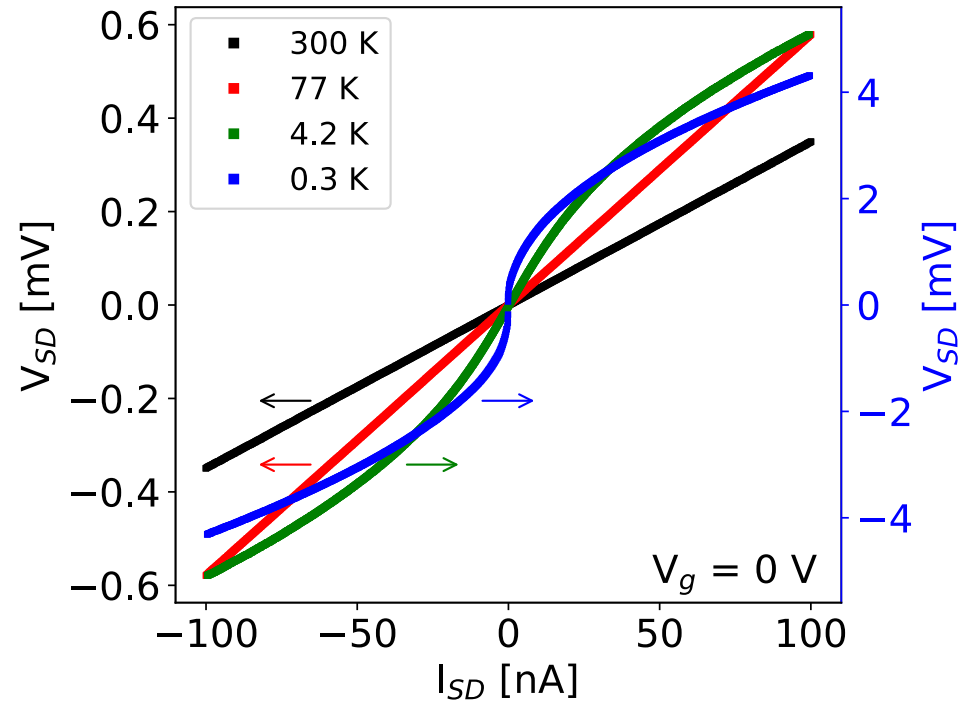


- Non-linearità diminuendo la temperatura
⇒ Barriera di potenziale all'interfaccia

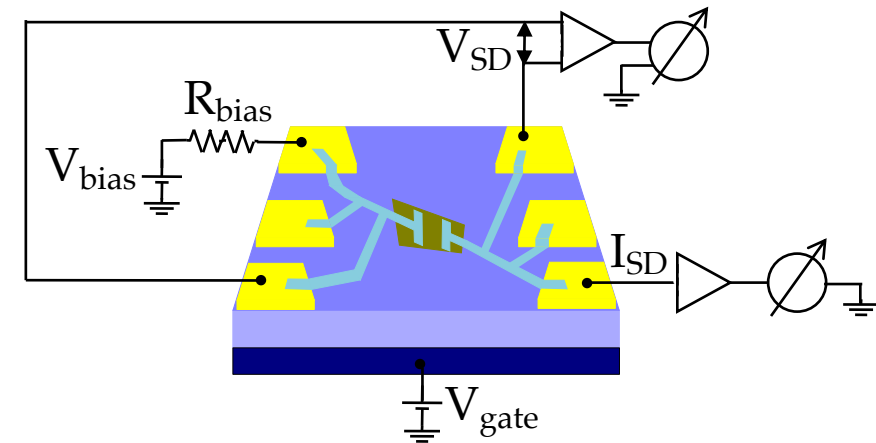


Caratteristiche I-V

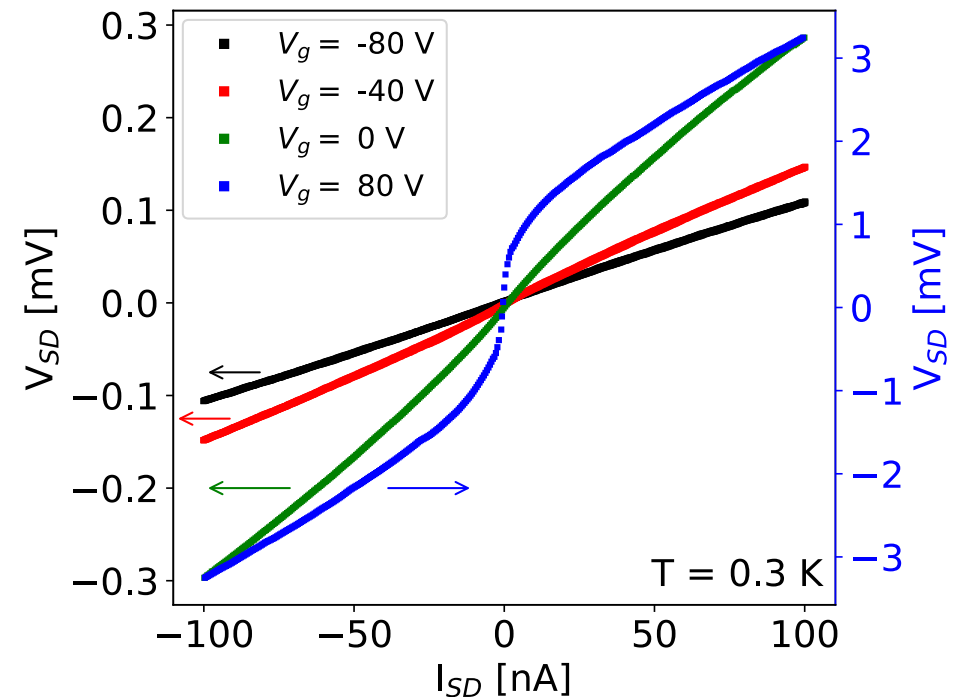
Dipendenza dalla Temperatura



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



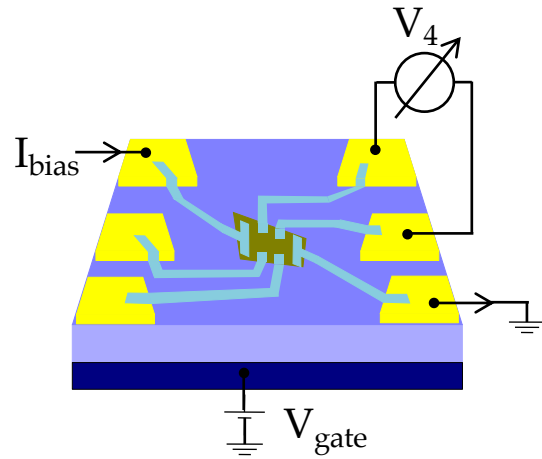
Dipendenza dalla Tensione di gate



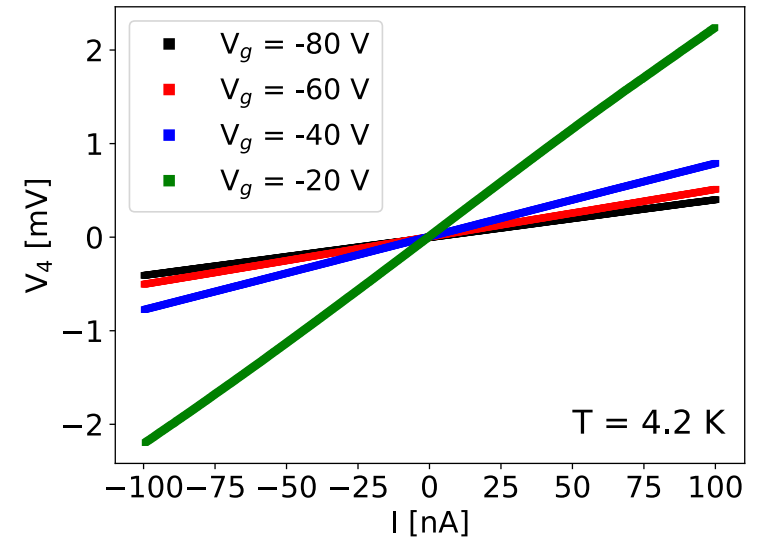
- Contatti migliori in accumulazione

Resistenza di Contatto

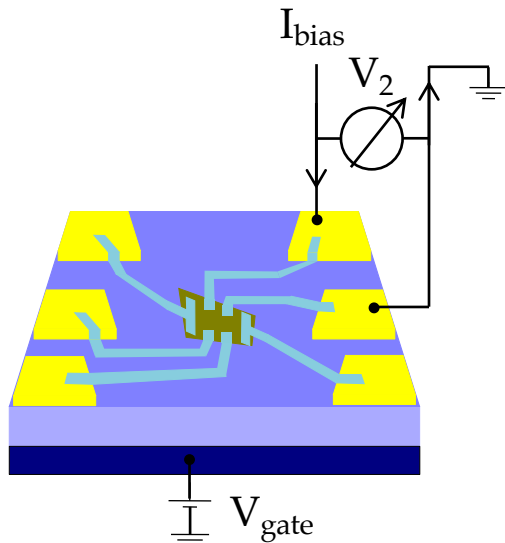
➤ Misura a 4 fili



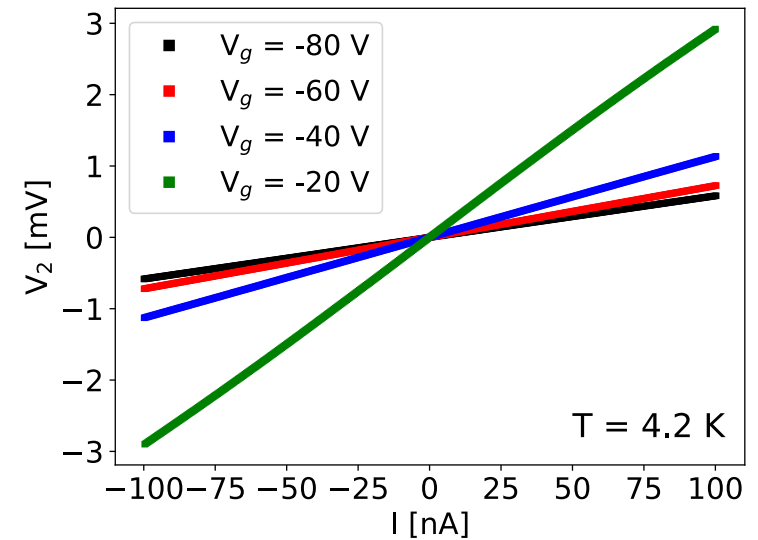
$$\Rightarrow V_4 = R_4 I = R_{bP} I$$



➤ Misura a 2 fili

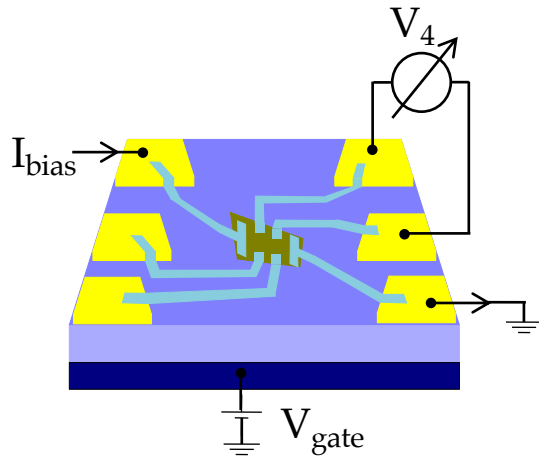


$$\Rightarrow V_2 = R_2 I = (2R_C + R_{bP}) I$$



Resistenza di Contatto

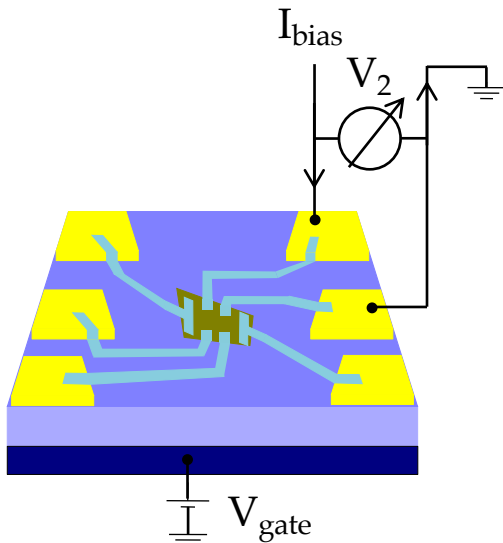
➤ Misura a 4 fili



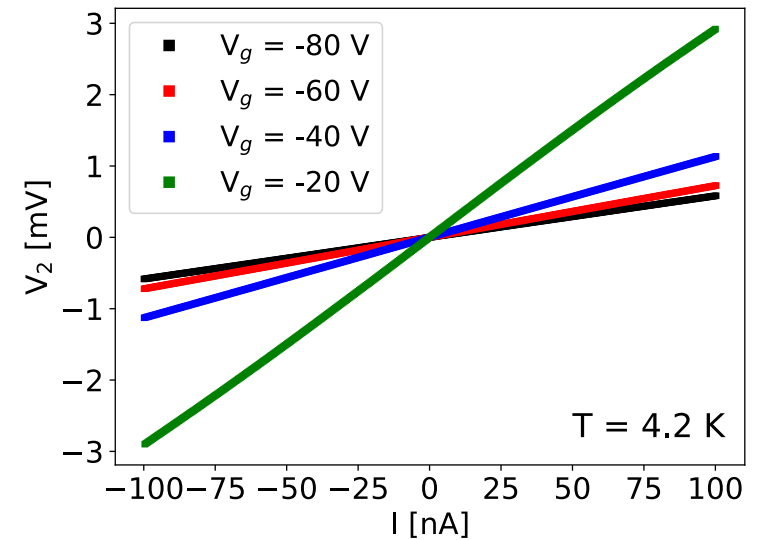
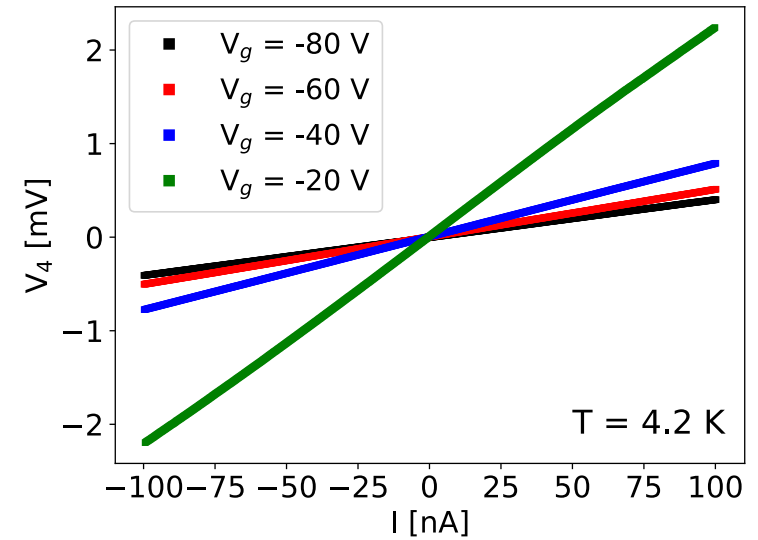
$$\Rightarrow V_4 = R_4 I = R_{bP} I$$

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

➤ Misura a 2 fili

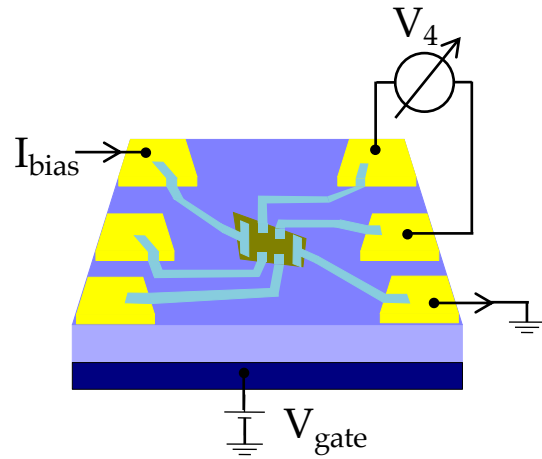


$$\Rightarrow V_2 = R_2 I = (2R_C + R_{bP}) I$$



Resistenza di Contatto

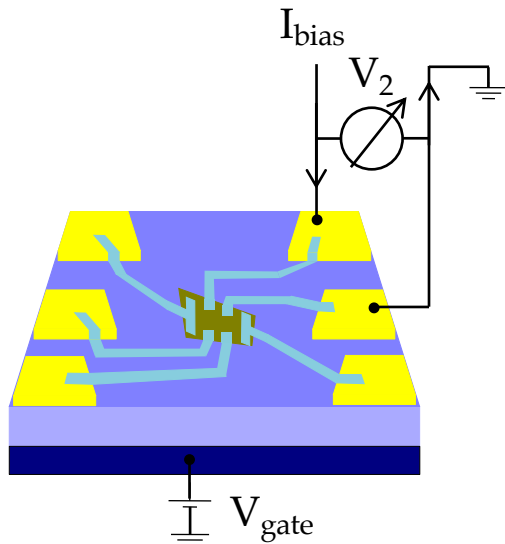
➤ Misura a 4 fili



$$\Rightarrow V_4 = R_4 I$$

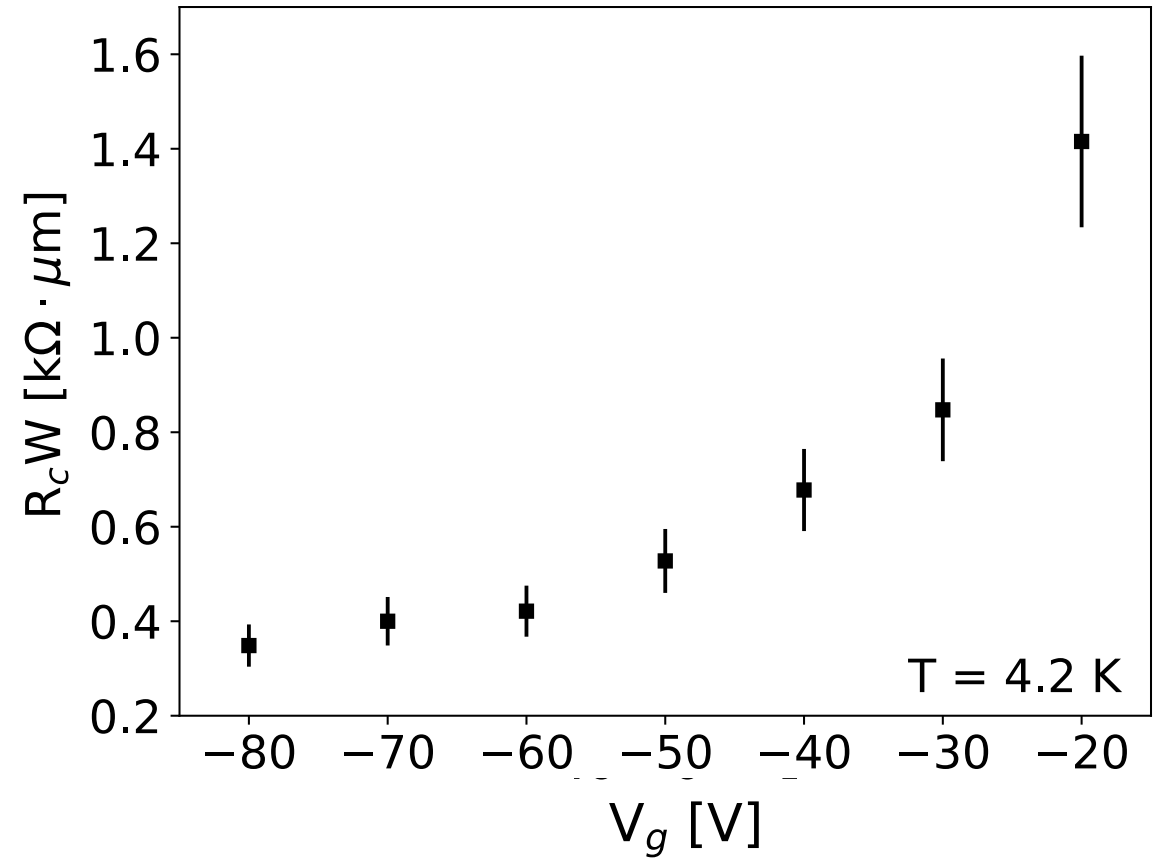
$$R_C = (R_2 - R_4) / 2$$

➤ Misura a 2 fili



$$\Rightarrow V_2 = R_2 I$$

Resistenza di contatto normalizzata



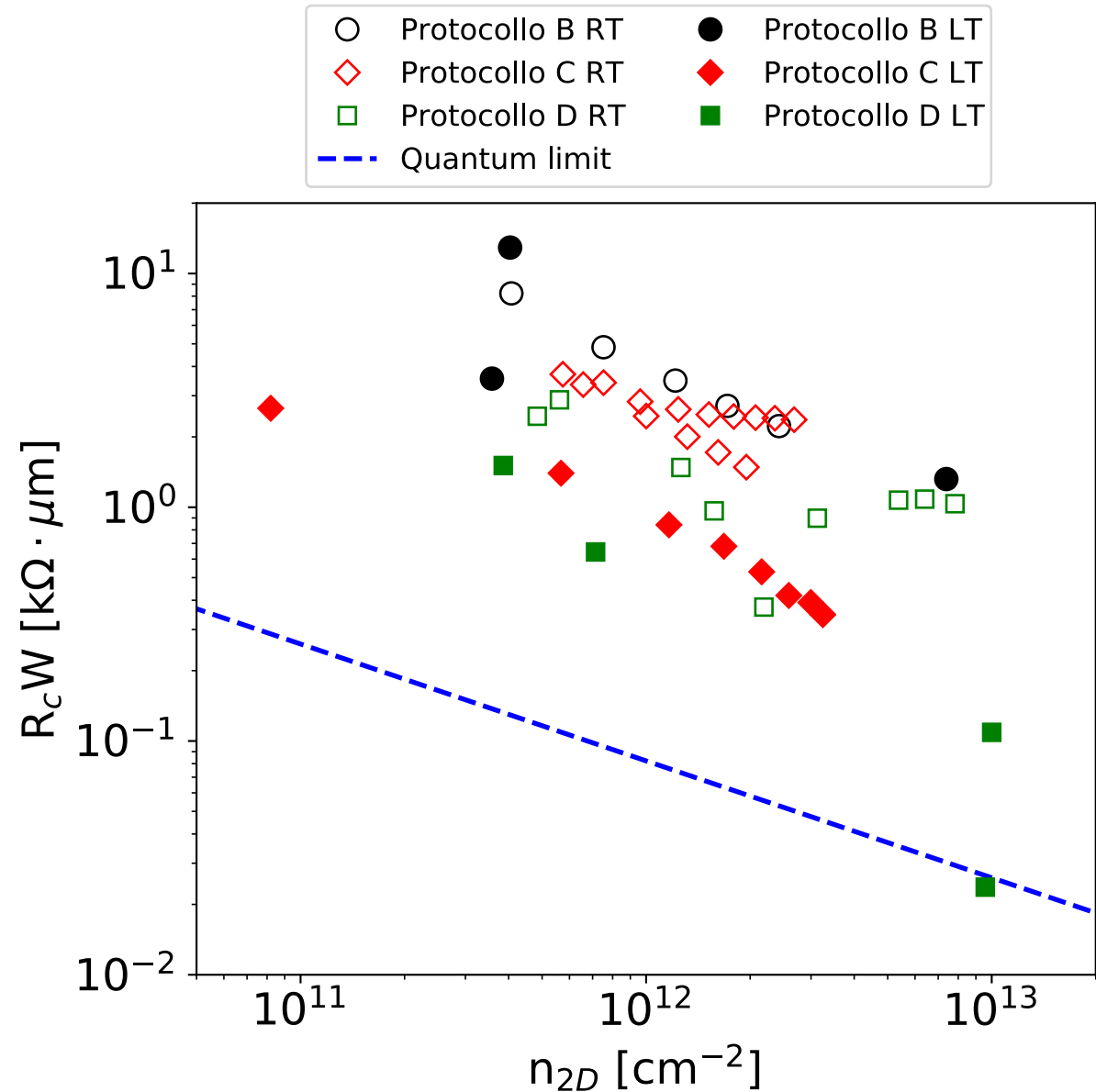
Resistenza di Contatto

➤ Minima resistenza di contatto per un sistema 2D:

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

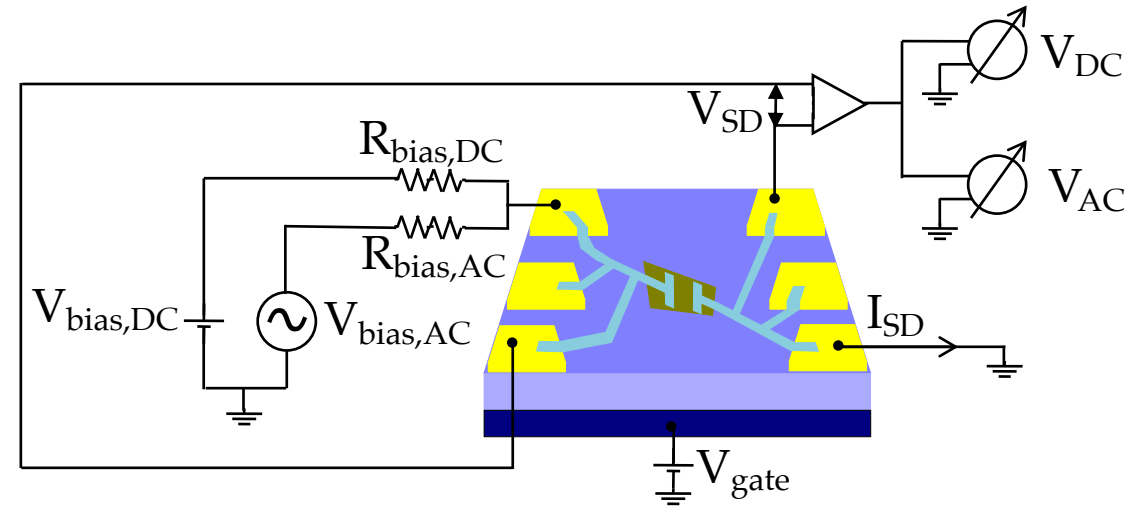
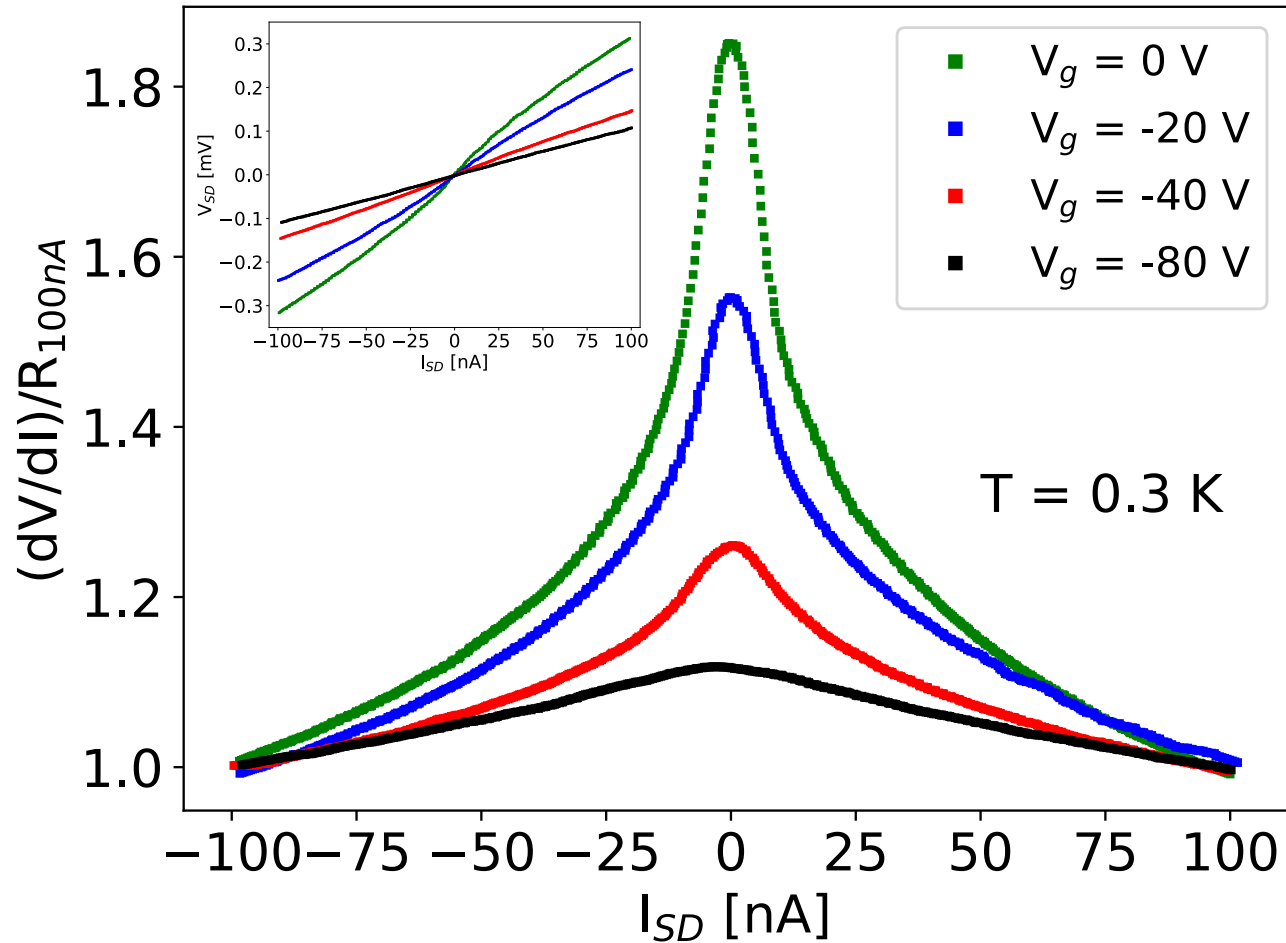
➤ Modello di Drude $\rightarrow n_{2D} = \sigma / e\mu$

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



Resistenza Differenziale

Resistenza differenziale normalizzata

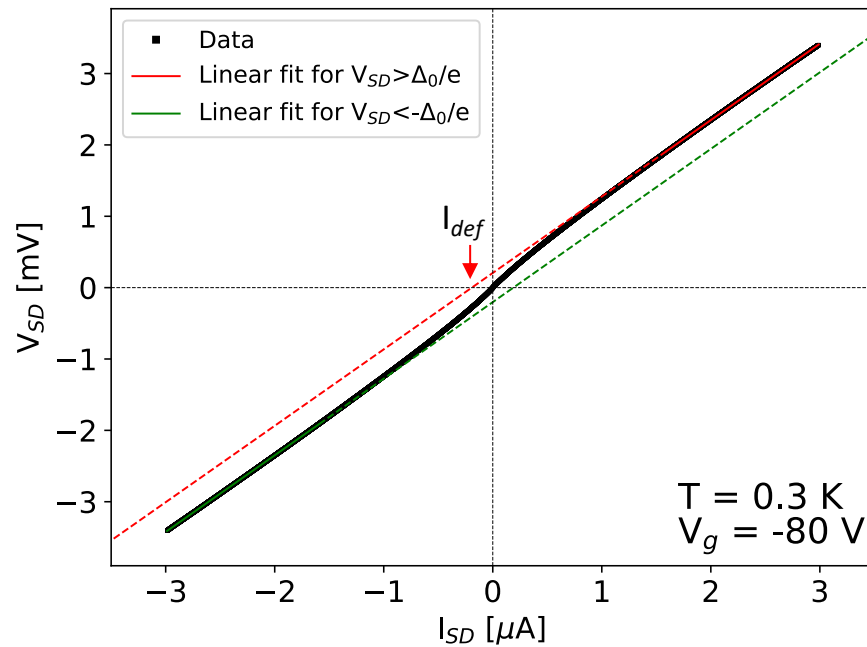
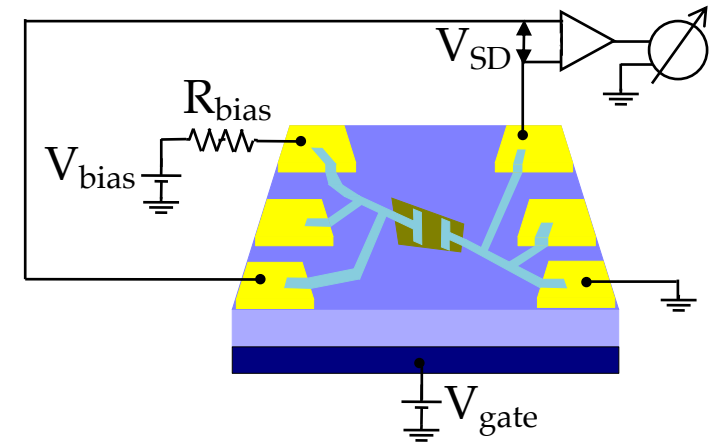


$$\Rightarrow dV/dI \propto V_{AC}/I_{bias,AC}$$

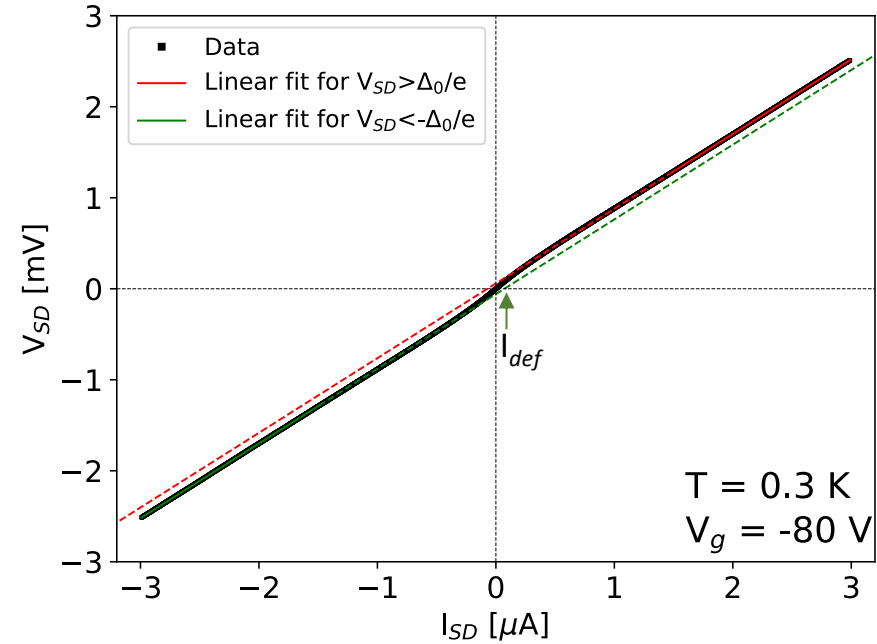
\Rightarrow Non si osserva un regime superconduttivo

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:

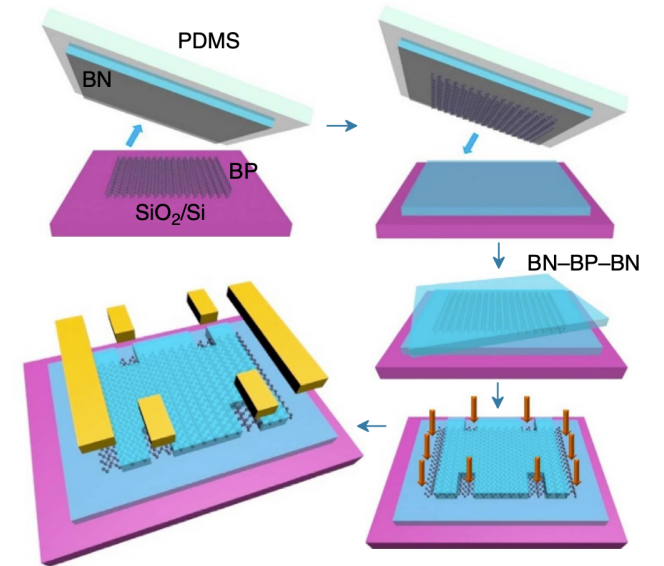
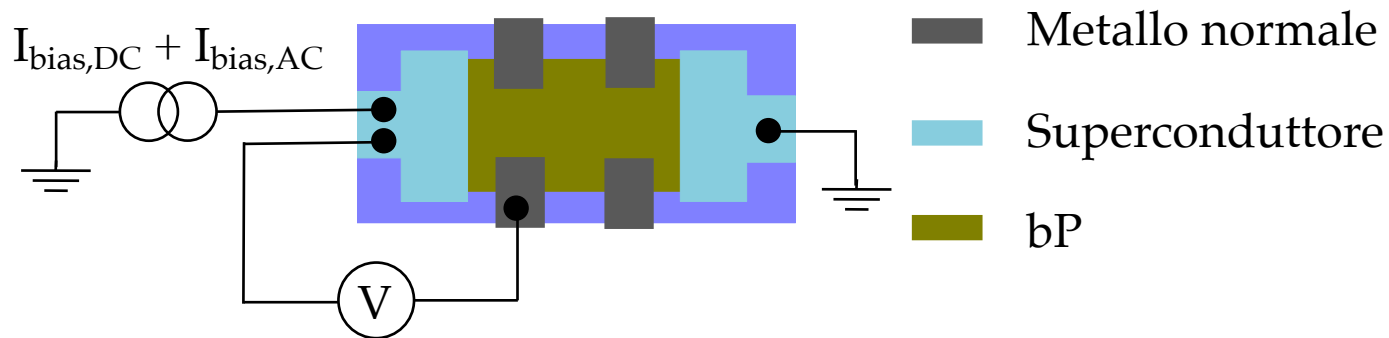
- Superconduttività e giunzioni SNS
- Black-Phosphorus
- Protocolli di fabbricazione
- Setup sperimentale
- Risultati sperimentali
- **Conclusioni e prospettive future**

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

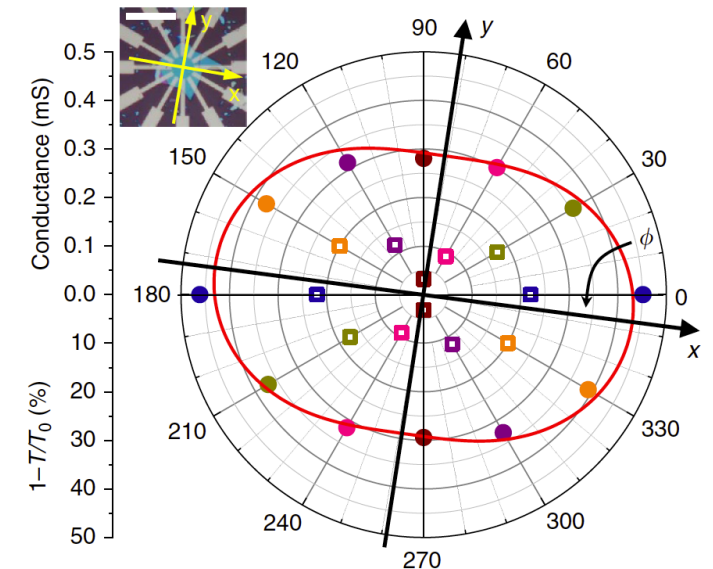
- Proseguire sulla strada tracciata dal protocollo D aumentando ulteriormente la durata dell'Ar plasma
- Minimizzare ulteriormente la degradazione del bP esfoliando in una glove-box e incapsulando i fiocchi in h-BN (hexagonal Boron Nitride)
- Studiare una singola interfaccia SN



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!