



**L'importanza dei materiali nei
Quantum Bits superconduttori:
il futuro della computazione
quantistica**

Benedetta Scandolara

Laurea triennale in Scienze di Materiali

Ingredienti chiave per l'implementazione di un quantum computer:

1) Qubit

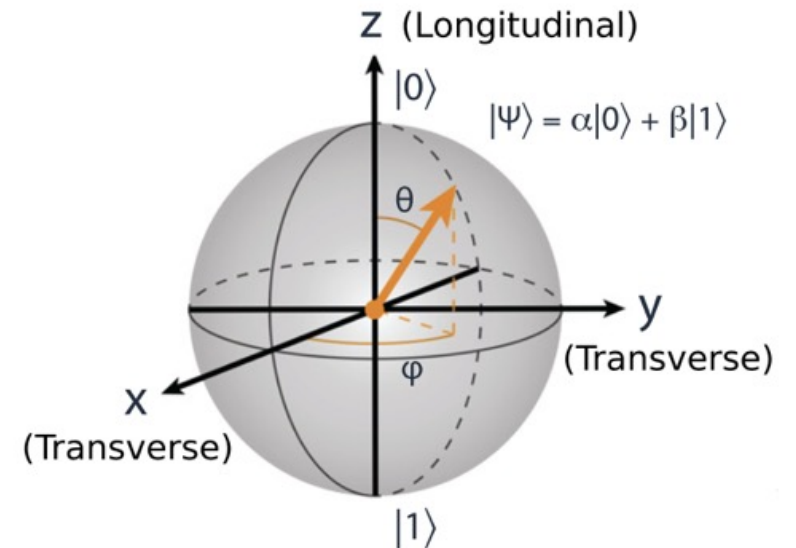
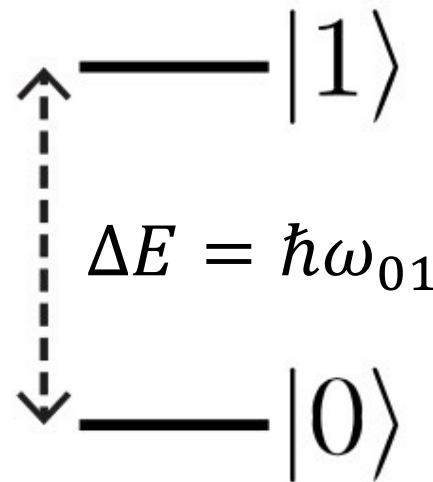
2) Creare entanglement tra qubits

3) Algoritmo

4) Readout

Qubit

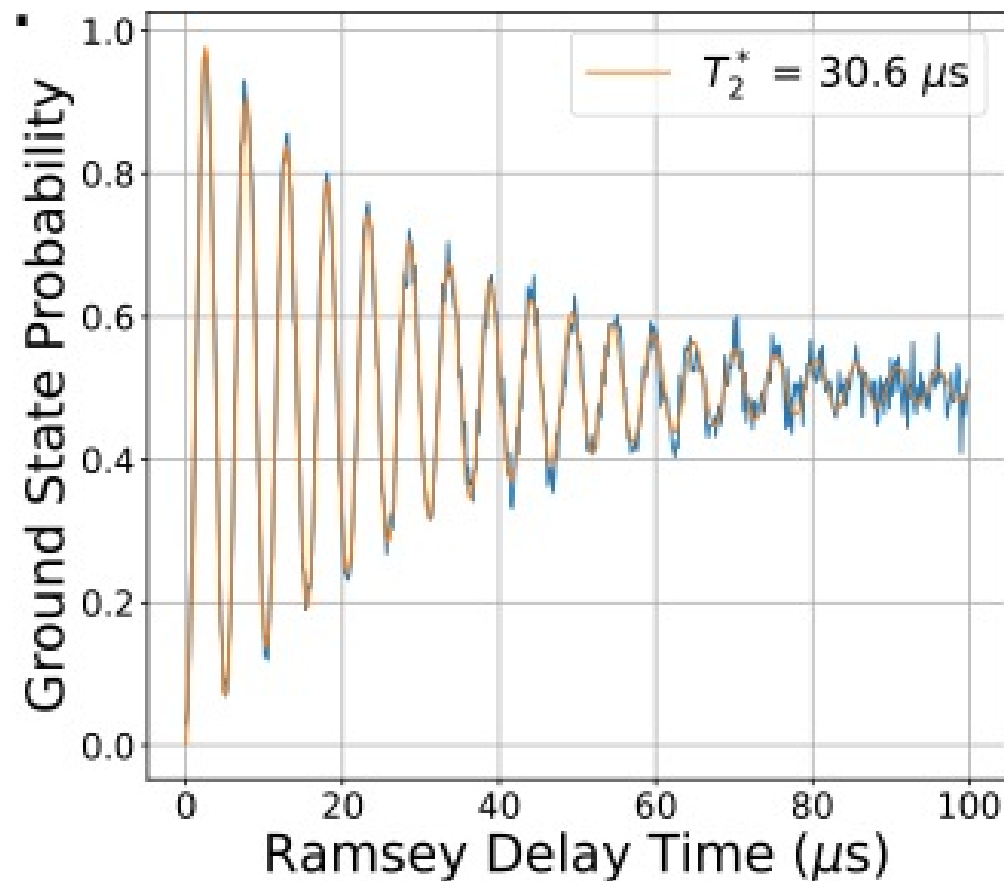
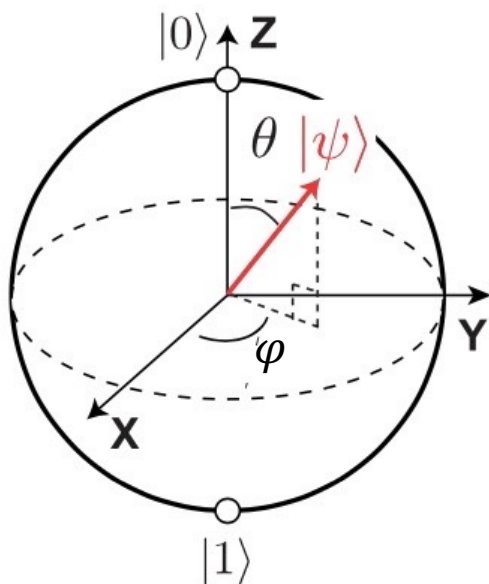
$$\begin{aligned} |\psi\rangle &= \alpha_0 |0\rangle + \alpha_1 |1\rangle \\ &= \cos(\theta/2) |0\rangle + e^{i\varphi} \sin(\theta/2) |1\rangle \end{aligned}$$

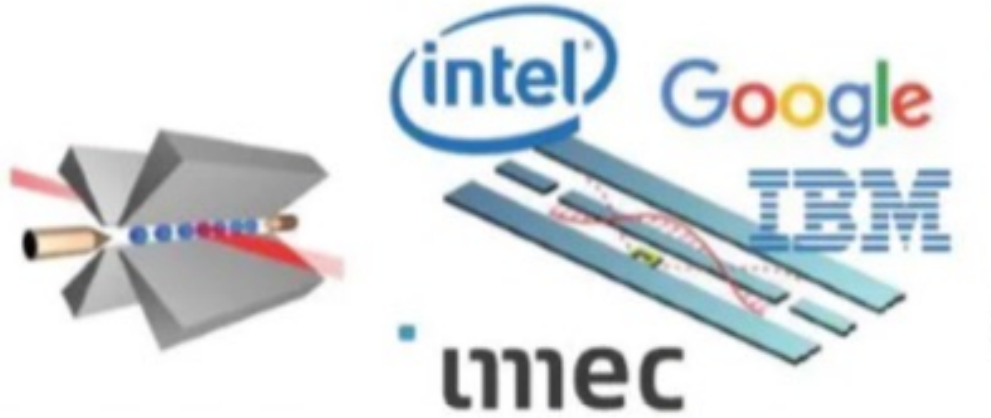


Isolamento della funzione d'onda dal resto dell'universo

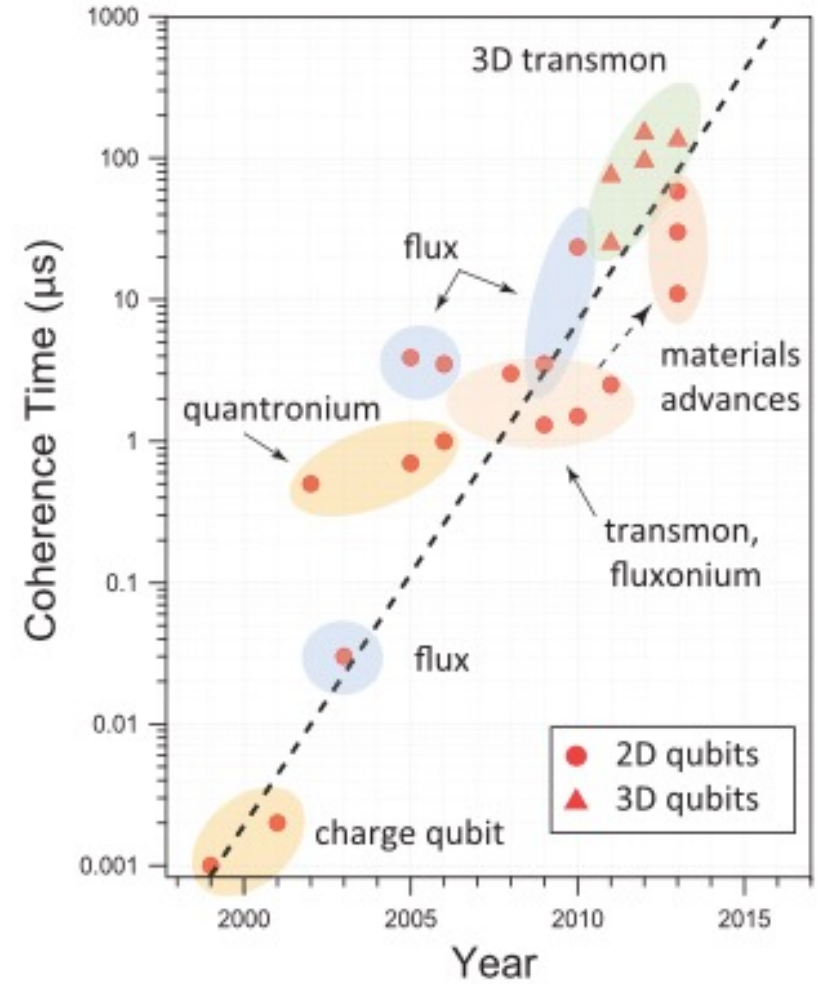
Tempo di coerenza

$$\frac{1}{T_2} = \frac{1}{2T_1} + \frac{1}{T_\phi}$$





	Ion trap	Superconducting
Coherence time	> 1s	~ 90 μ s
# Qubits	~ 10	17 (50)
Materials	$^9\text{Be}^+, ^{43}\text{Ca}^+, \dots$	Al, Nb, TiN, ...
Scalability	-	+

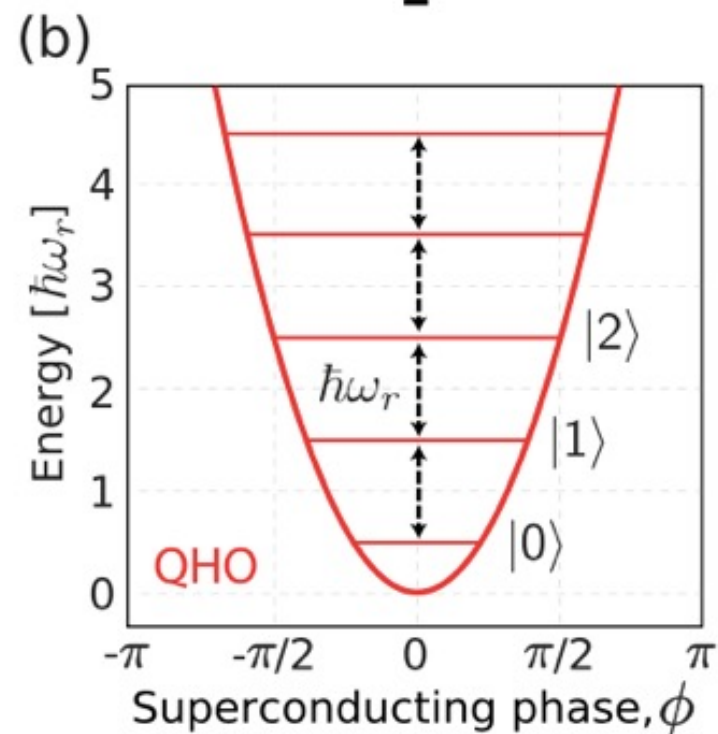
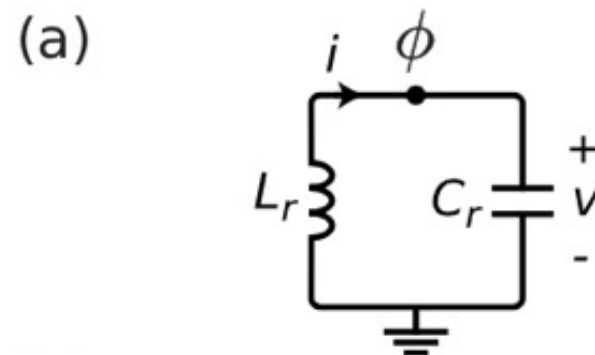


Qubit superconduttivi : come viene generata l'informazione quantistica?

1. Oscillatore armonico

$$\hat{H} = \frac{\hat{Q}^2}{2C} + \frac{\hat{\Phi}^2}{2L}$$

$$\hat{H} |n\rangle = \hbar\omega_0 \left(n + \frac{1}{2} \right) |n\rangle$$



2. Oscillatore anarmonico: Josephson Junction

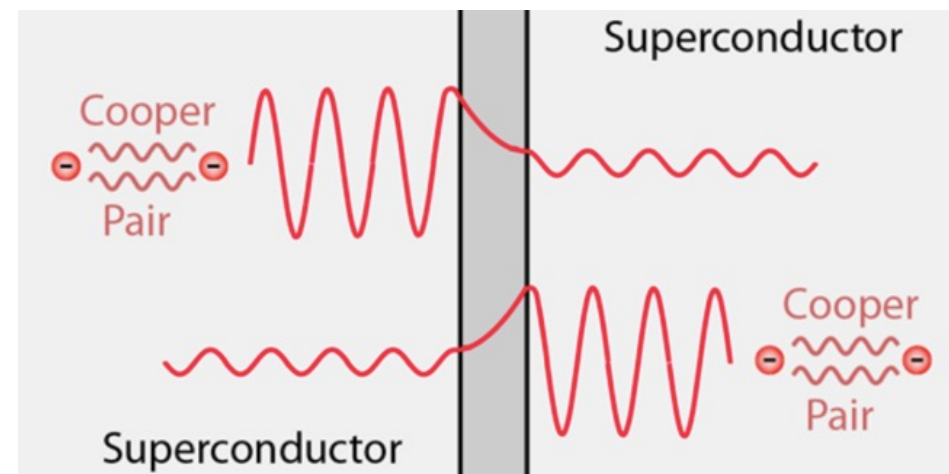
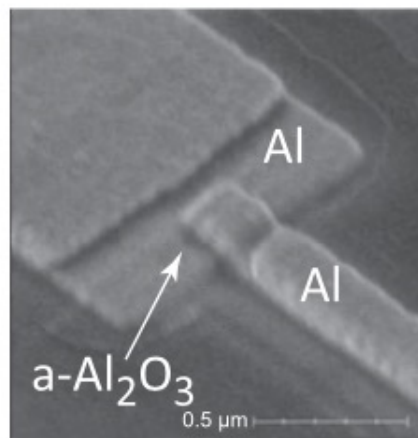
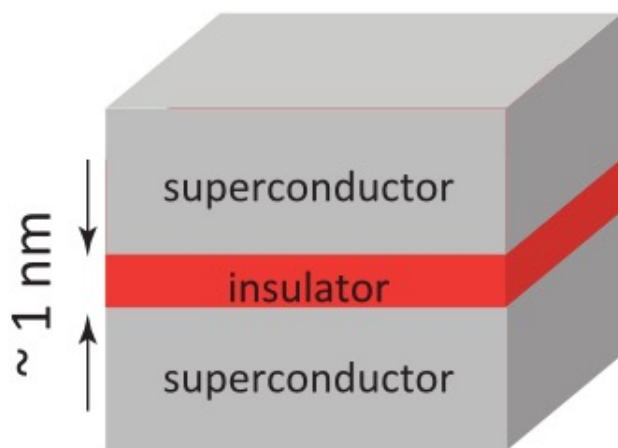
$$\begin{cases} I = I_C \sin(\phi) & \text{Intensità di corrente} \\ V = \frac{\Phi_0}{2\pi} \frac{d\phi}{dt} & \text{Differenza di potenziale} \\ V = L \left(\frac{dI}{dt} \right) & \text{Relazione fondamentale} \end{cases}$$



$$L_J = \frac{\Phi_0}{I_C \cos(\phi)} \quad \text{Induttanza della giunzione (non lineare in } \phi \text{)}$$

dove: $\phi = \phi_1 - \phi_2 = \hat{\Phi}/\Phi_0$ Differenza di fase superconduttiva attraverso la giunzione

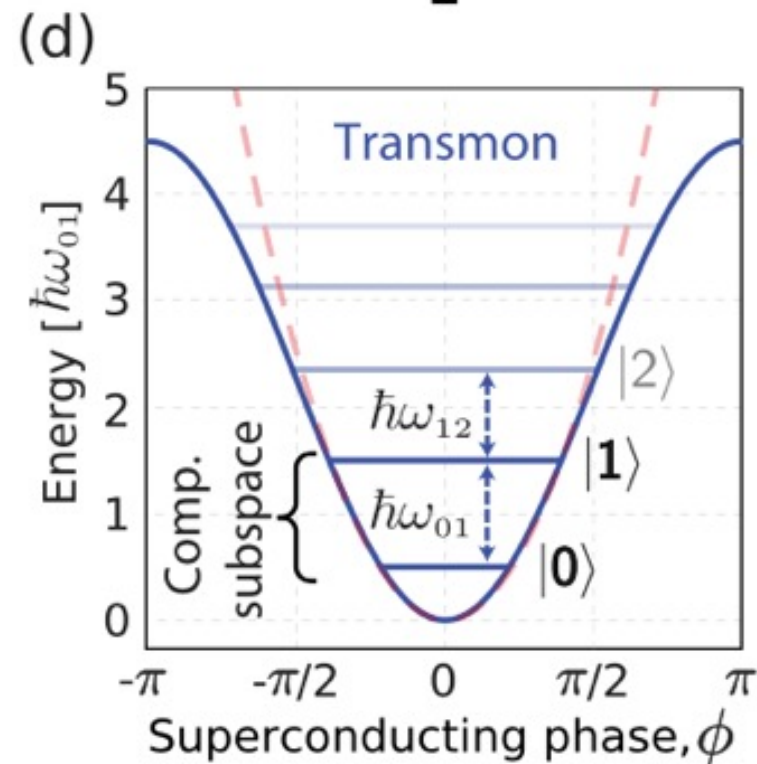
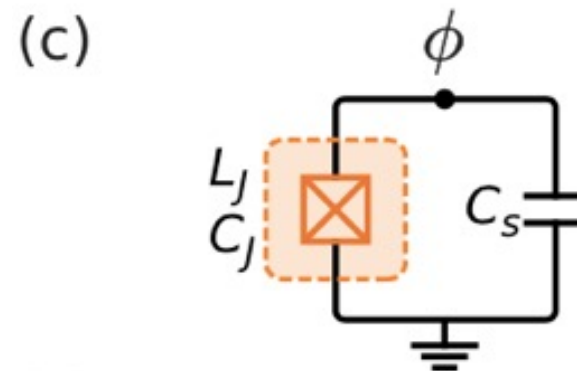
$\Phi_0 = \hbar/2e$ Flusso magnetico superconduttivo



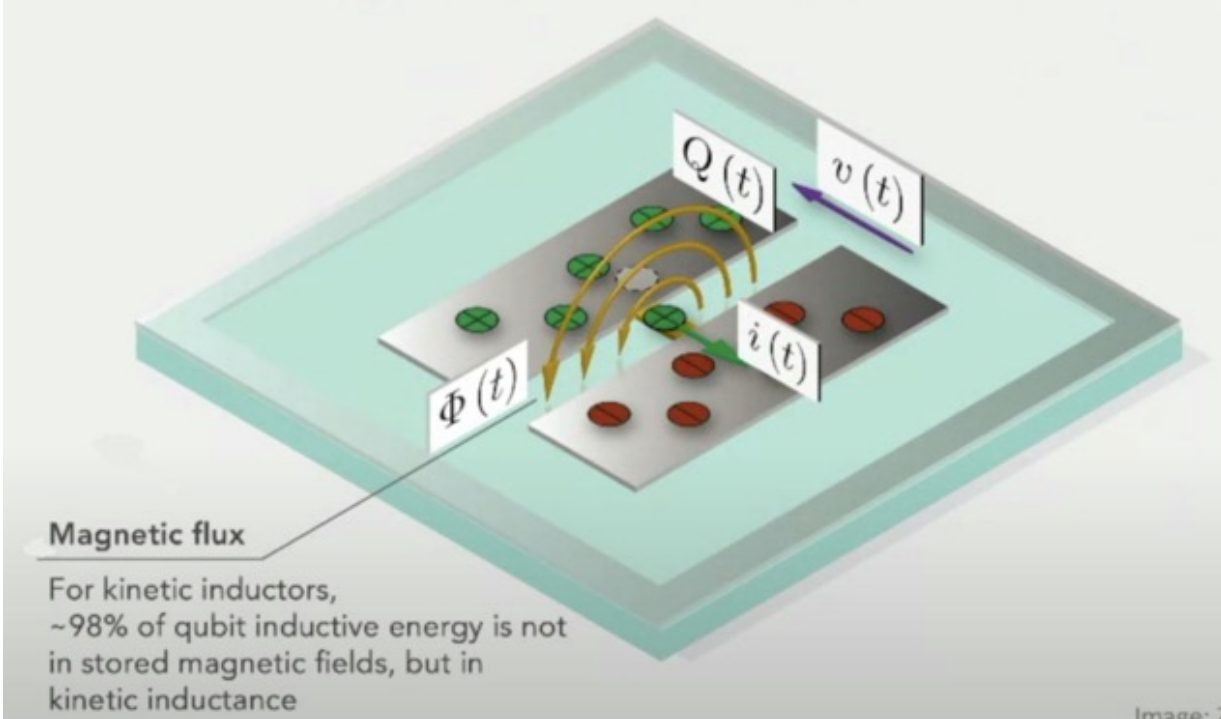
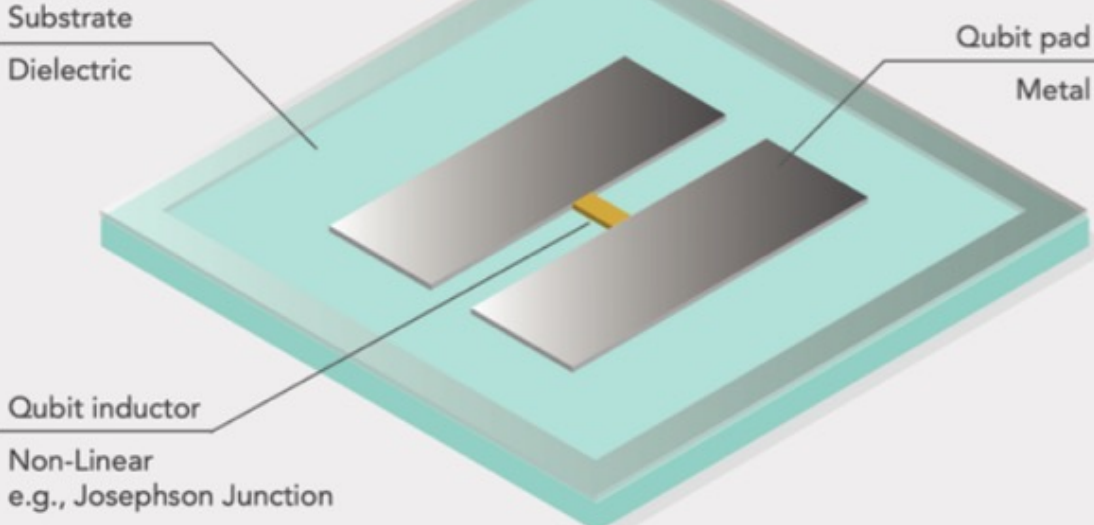
2. Oscillatore anarmonico

$$\hat{H} = \frac{\hat{Q}^2}{2C} - E_J \cos(\hat{\phi})$$

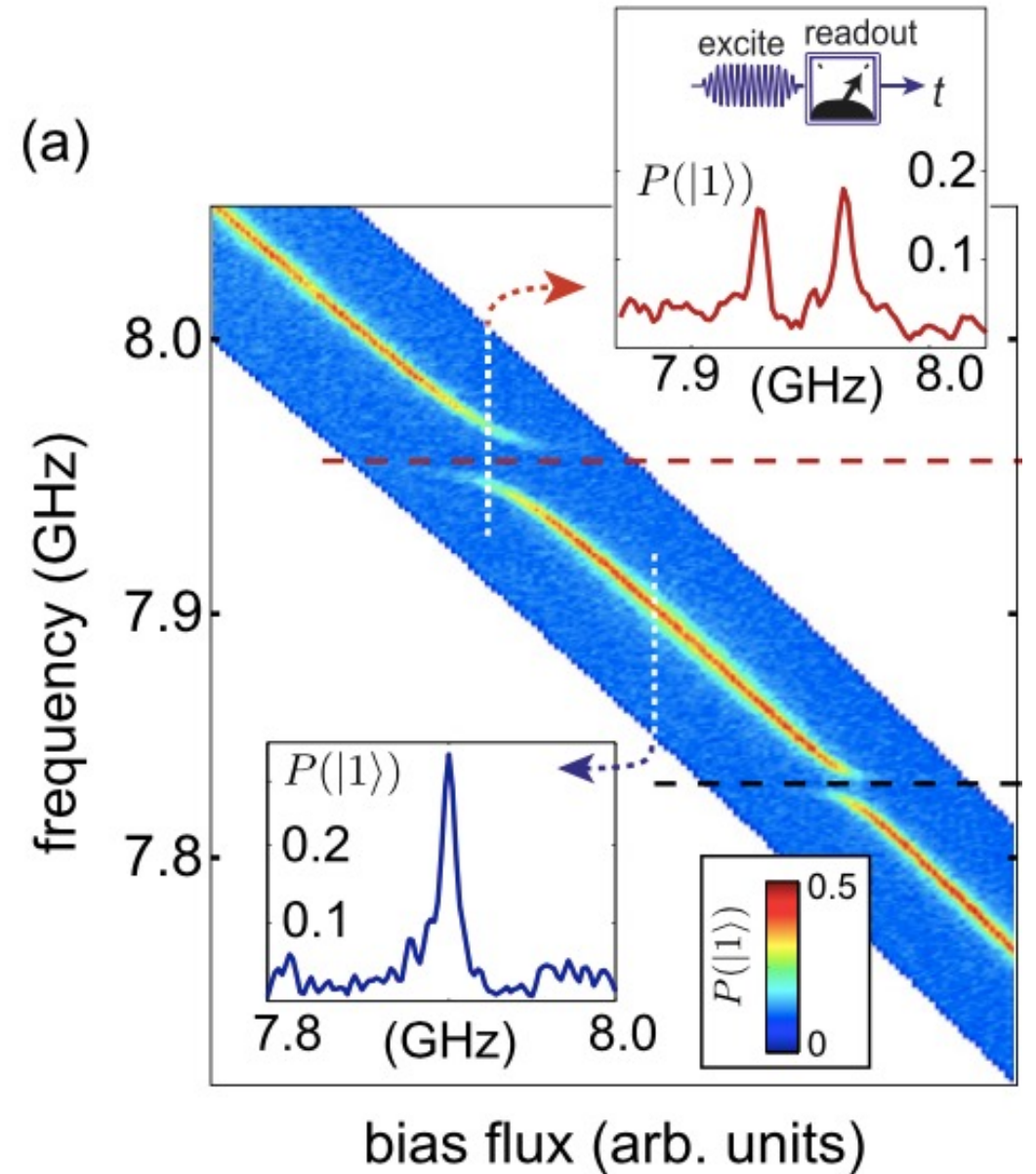
con: $C = C_S + C_J$ e $E_J = I_C \Phi_0$



Transmon qubit



Fonti di decoerenza nei qubit superconduttivi: Two Level Systems (TLS)

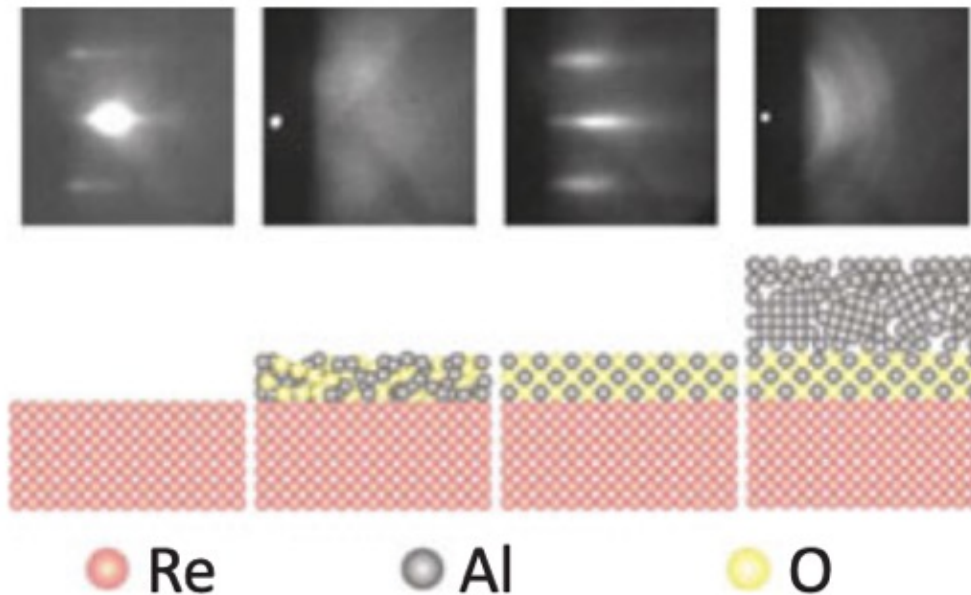


Riduzione dei TLS: l'importante ruolo della scienza dei materiali

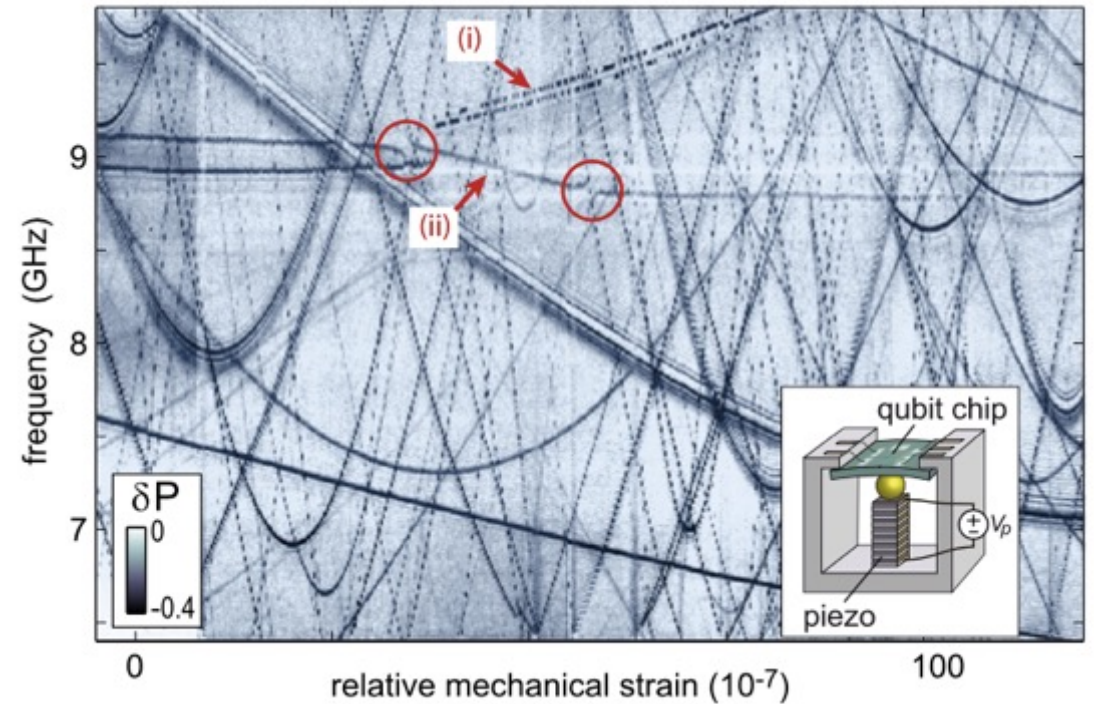
1. TLS nelle Josephson Junction

Sostituendo la convenzionale barriera di ossido amorfo con una cristallina riduci la presenza di TLS.

Epitaxial Al_2O_3 growth

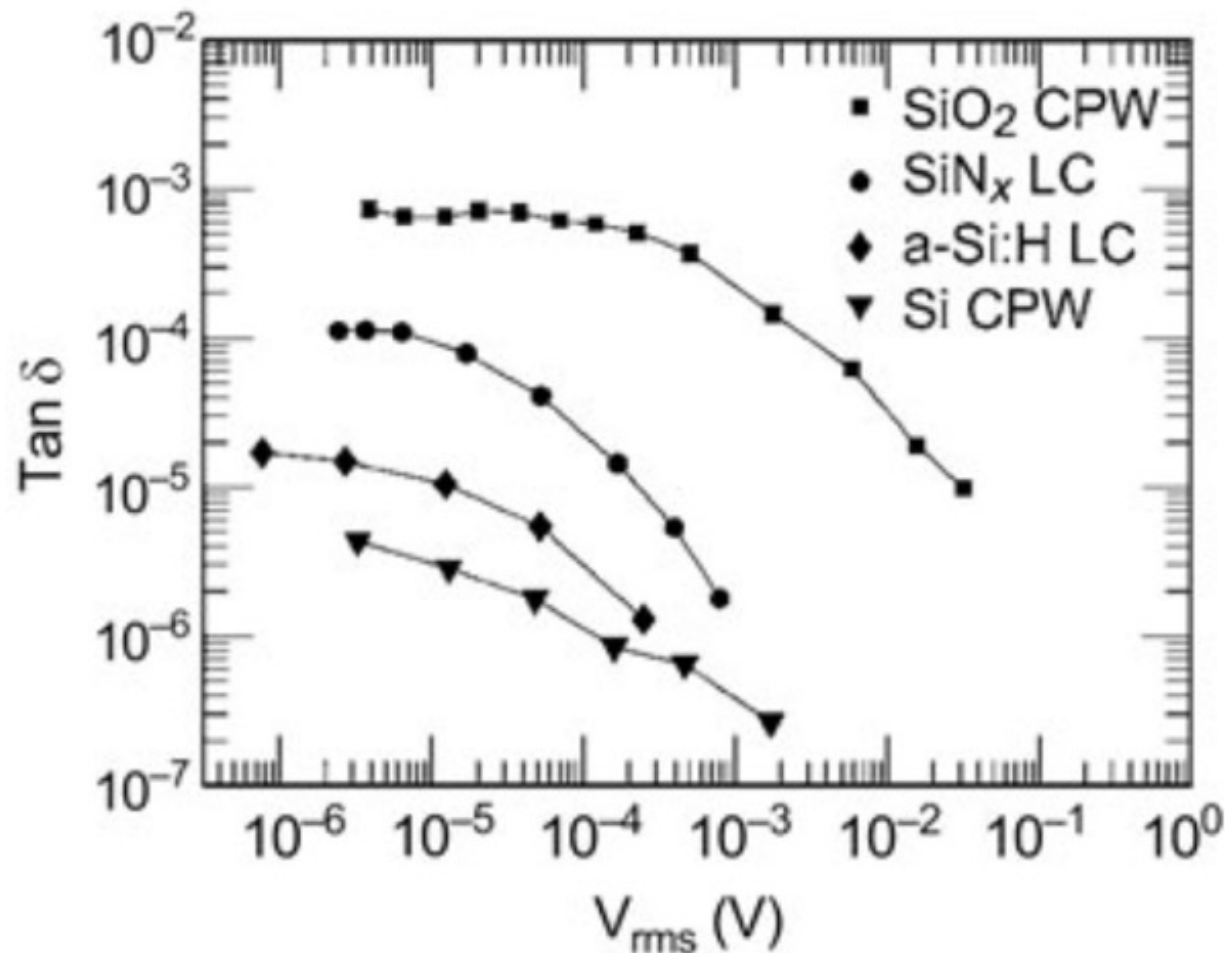


Lo stress meccanico attiva i TLS



2. TLS nei dielettrici

La scelta del dielettrico utilizzato per isolare le varie componenti del circuito è importante: alcuni dielettrici sono caratterizzati da una concentrazione più elevata di TLS.



3. TLS alle interfacce

Attraverso un accurata preparazione del substrato, prima della deposizione del metallo, è possibile ridurre la presenza di TLS.

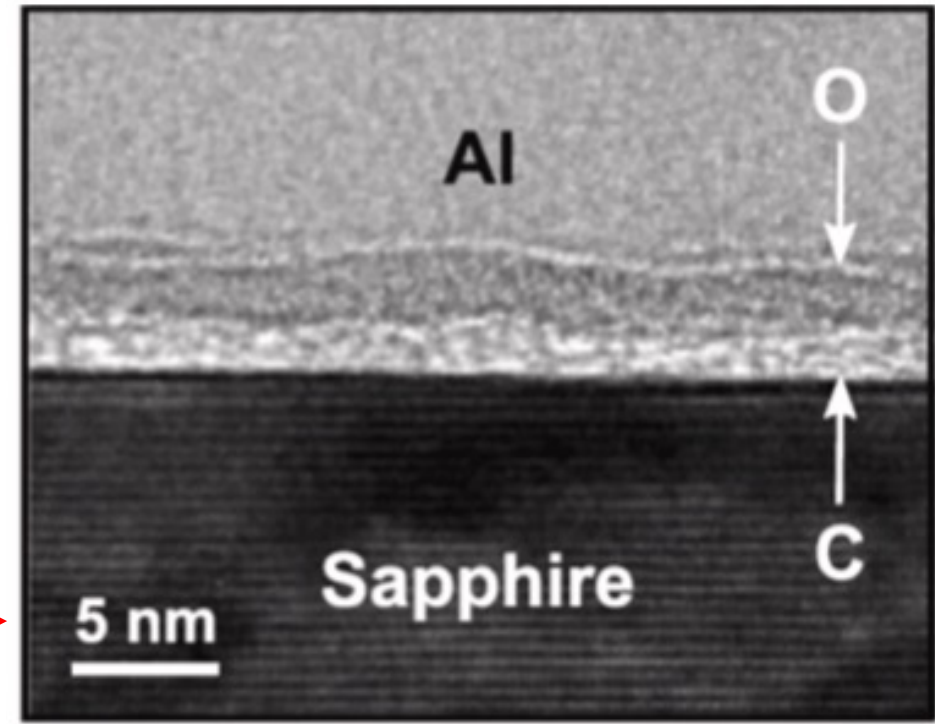
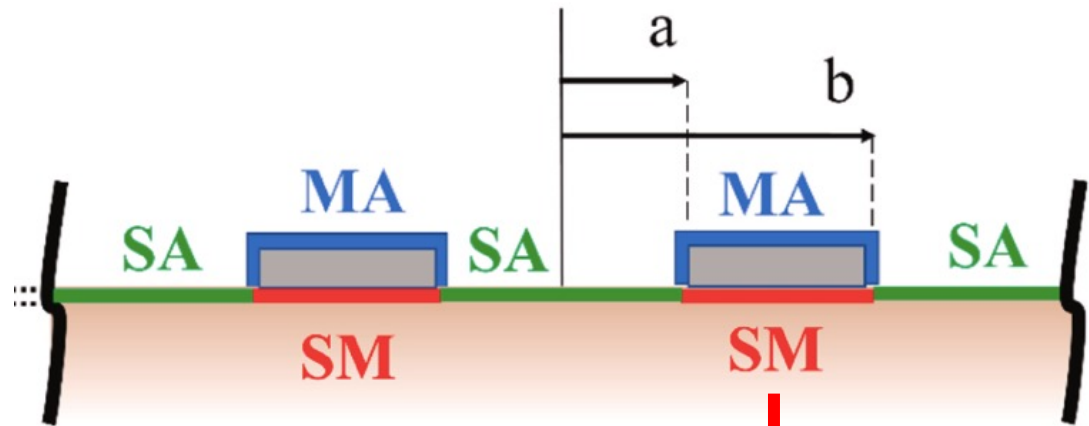


Immagine HRTEM dell'interfaccia metallo/substrato mostra la presenza di impurezze.

Conclusioni

Non è ancora chiaro quale combinazione di processi di fabbricazione prometta il maggiore miglioramento nella coerenza e nelle prestazioni dei circuiti quantistici. Tuttavia, sarà fondamentale che questa questione venga affrontata presto, dati i potenziali vantaggi di un processore quantistico superconduttore e l'importanza del rumore e delle perdite indotte da TLS per il suo funzionamento.

Bibliografia

- Krantz, P., Kjaergaard, M., Yan, F., Orlando, T. P., Gustavsson, S., & Oliver, W. (2019). A quantum engineer's guide to superconducting qubits. *Applied Physics Reviews*, 6(2), 021318. <https://doi.org/10.1063/1.5089550>
- Bardin, J. C., Slichter, D., & Reilly, D. (2021). Microwaves in quantum computing. *IEEE Journal of Microwaves*, 1(1), 403–427. <https://doi.org/10.1109/jmw.2020.3034071>
- Oliver, W., & Welander, P. B. (2013). Materials in superconducting quantum bits. *Mrs Bulletin*, 38(10), 816–825. <https://doi.org/10.1557/mrs.2013.229>
- Murray, C. E. (2021). Material matters in superconducting qubits. *Materials Science and Engineering R*, 146, 100646. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2021.100646>