بسم الله الرحمن الرحیم

ساخت مدارات ابررسانایی

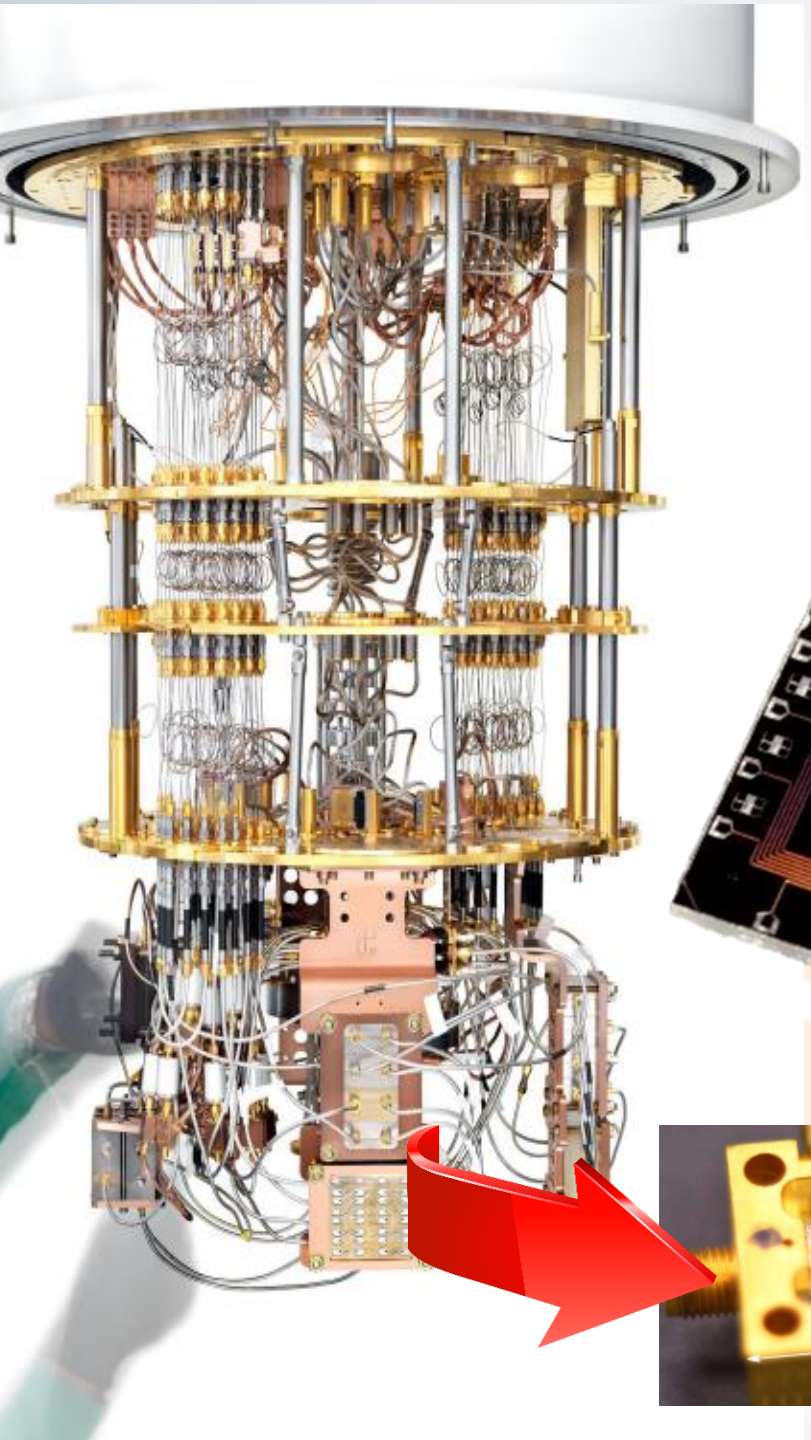
بهاره رحمتی

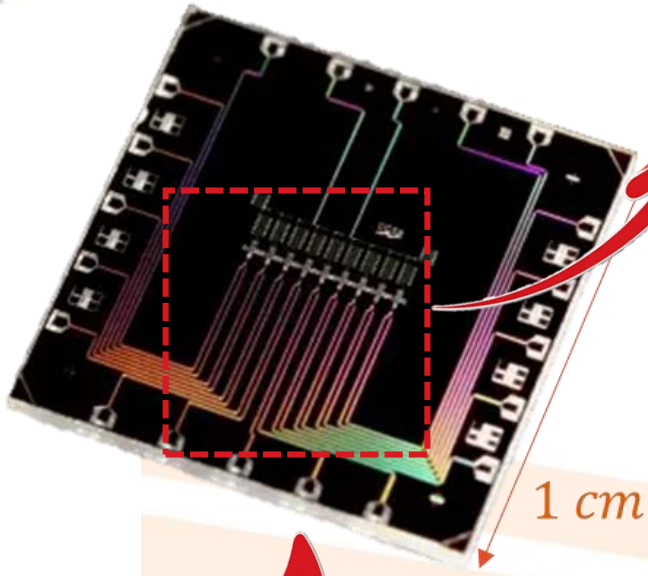
۱۴۰۲

مرکز تحقیقات
فناوری‌های
کوانتومی ایران

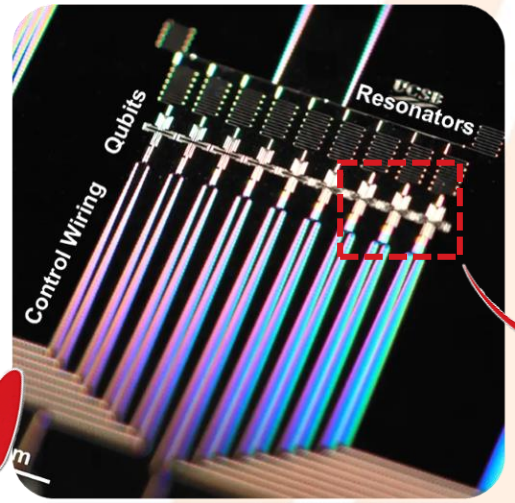
Kharazmi University

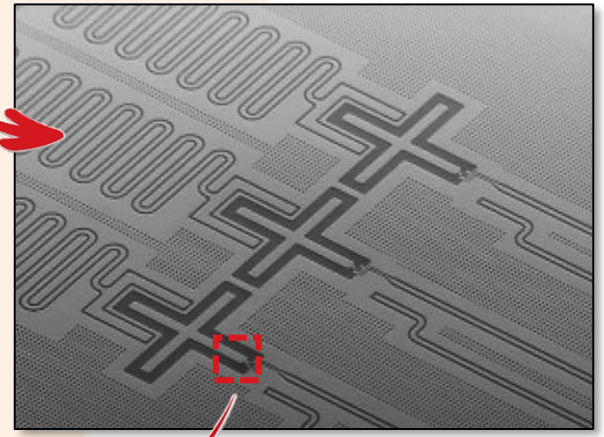
تراشه کیوبیت ابررسانا



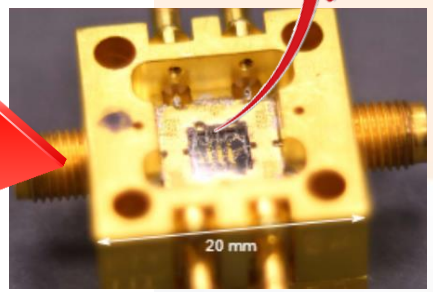


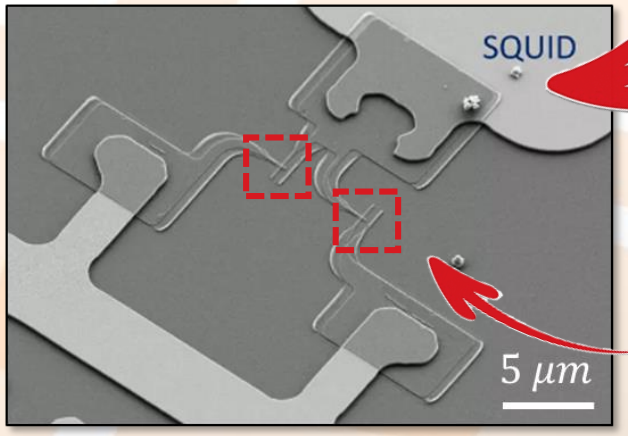
1 cm





1 mm





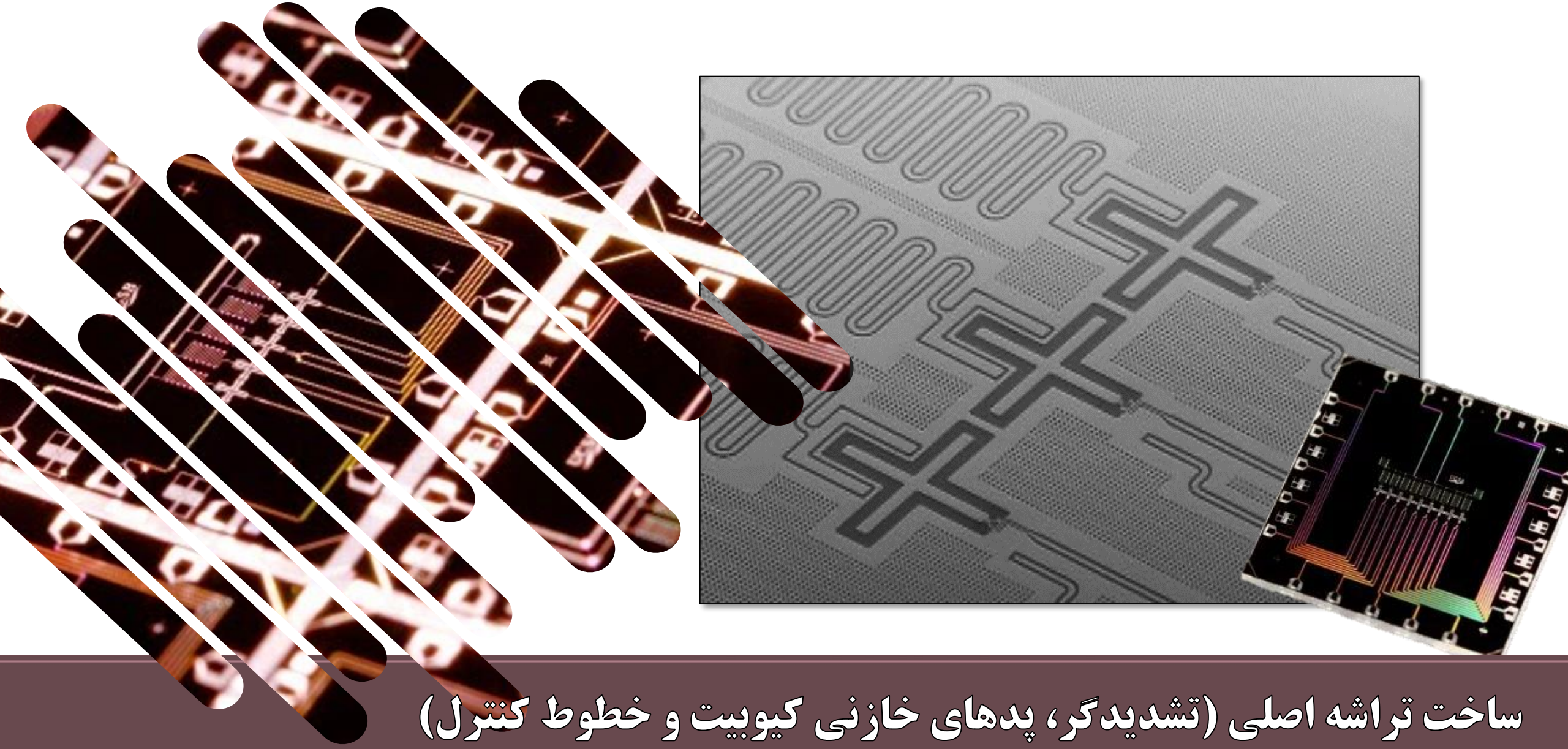
اتصال جوزفسون

SQUID
5 μm
زیرساخت های مورد نیاز و روش های ساخت اتصالات جوزفسون

ساخت تراسه اصلی (تسدیدکر، بدهای خازنی کیوبیت و خطوط کنترل)

چگونه اتصالات
جوزفسون کیوبیت های
سفارشی را بسازیم؟
بیمه سازی اتصال جوزفسون برای کیوبیت سفارشی

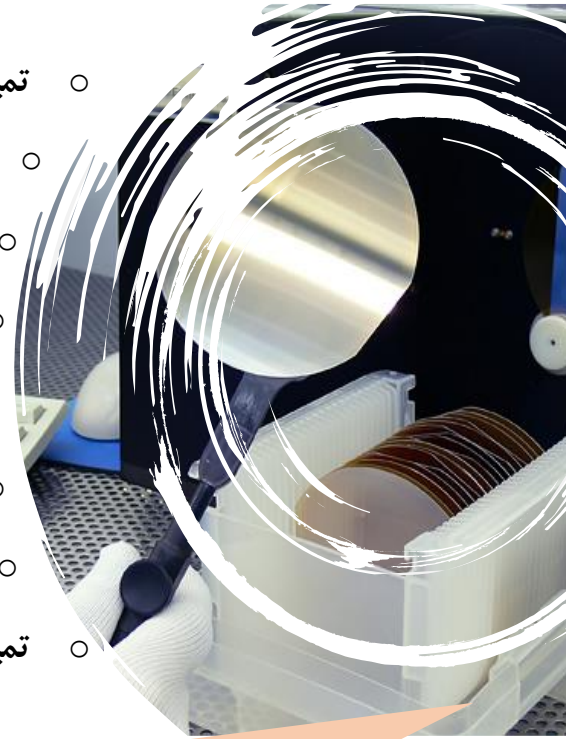
SQUID
5 μm
JJ
مراحل ساخت و بیمه سازی اتصال جوزفسون



ساخت تراشه اصلی (تشدیدگر، پدهای خازنی کیوبیت و خطوط کنترل)

انواع زیرلایه و فلزات مورد استفاده برای ساخت تراشه

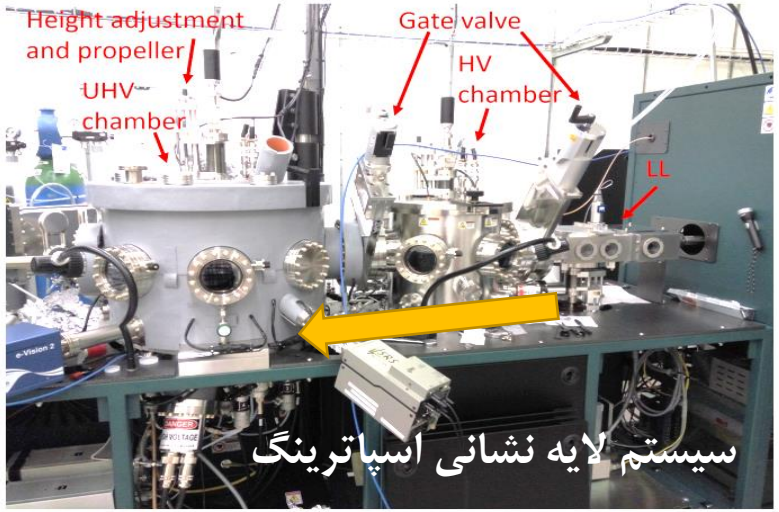
انتخاب زیرلایه و تمیزکاری آن



- تمیزکاری استون – متانول – الکل ایزوپروپیل (AMI)
- تمیزکاری RCA (شامل مخلوطی از NH_4OH ، H_2O_2 و H_2O است)
- تمیزکاری پیرانا (شامل مخلوطی از H_2SO_4 و H_2O_2 است)
- اچ HF و اچ اکسید بافر (BOE)
- تمیز کاری با n-methyl-2-pyrrolidone (NMP)
- تمیزکاری با پلاسما
- تمیزکاری مگاسونیک
- تمیزکاری مبتنی بر گاز

ساخت کیوبیت ها با انتخاب زیرلایه کم تلفات آغاز می‌شود: معمولاً از ویفر Sapphire (C-plane) که با روش تبادل حرارتی (HEM) ساخته می شود یا ویفر ذاتی Si با مقاومت بالا که با فرآیندی به نام منطقه شناور (FZ) رشد می‌کند به عنوان زیرلایه استفاده می شود.

لایه نشانی فلز

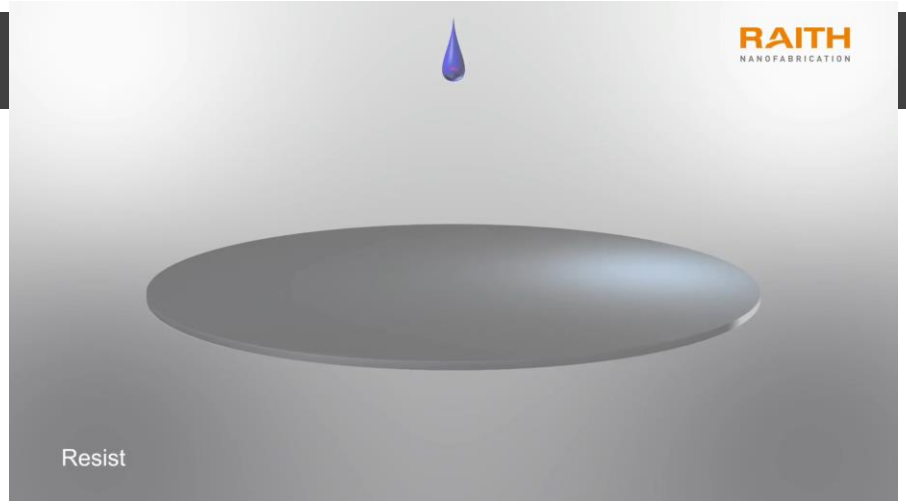


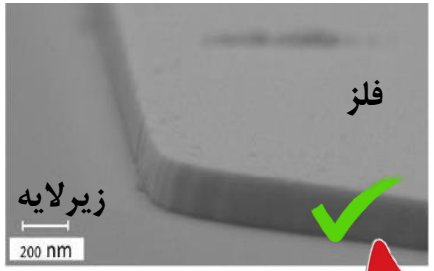
انواع فلزات

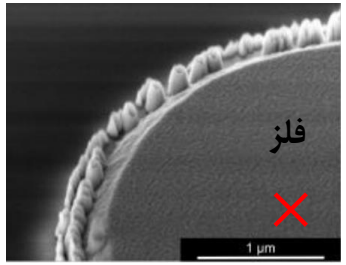
- Al ($T_c \approx 1.2$ k) ← متداول ترین
- Ta ($T_c \approx 4.3$ k) ← بهترین
- Nb ($T_c \approx 9.5$ k)
- TiN ($T_c \approx 4.5$ k)
- NbN ($T_c \approx 16.5$k)
- NbTiN ($T_c \approx 15.5$ k)

پس از رشد، لایه نازک مشخصه یابی می شود و خواص ابررسانایی آن بررسی می شود.

مراحل ساخت تراشه

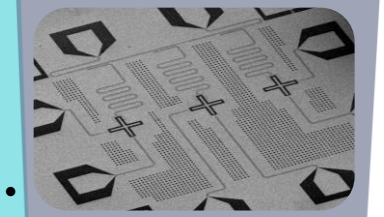






تمیزکاری تراشه | اچینگ فلز | ظاهرسازی الگو | لیتوگرافی | اسپین کوتینگ فوتورزیست | لایه نشانی فلز

6

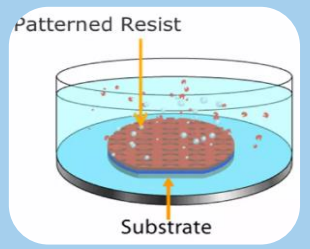


- انتخاب روش تمیزکاری مناسب و حذف فوتورزیست
- مدت زمان

5

- انتخاب روش اچینگ با توجه به نوع فلز
- انتخاب گاز مناسب (زمان، ولتاژ و ...)
- انتخاب محلول اچنت مناسب (زمان نگهداری)

4

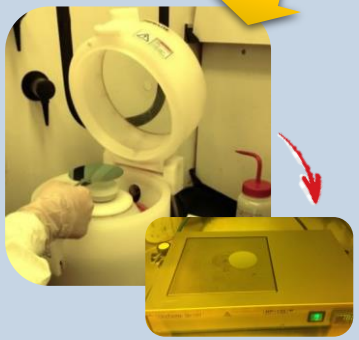


- نوع ماده ظهور
- غلظت
- مدت زمان نگهداری
- روش شستشو

3

- نوع لیتوگرافی
- زمان و دوز پرتودهی

2

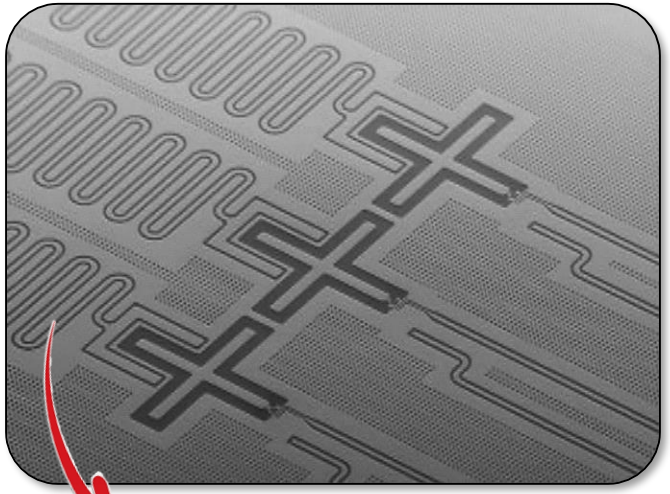


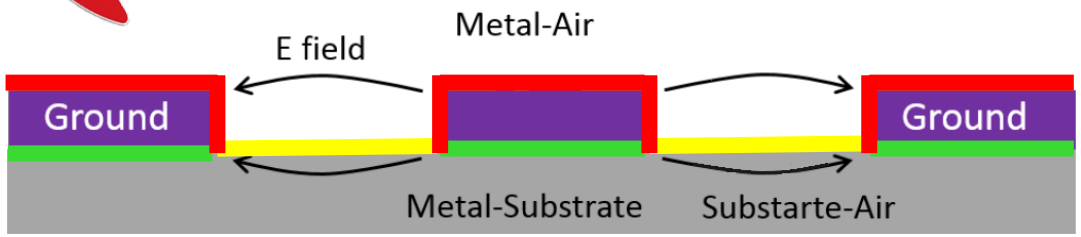
- انتخاب نوع فوتورزیست
- ضخامت مناسب
- سرعت و زمان اسپین کوتینگ
- دما و زمان پخت

1

- فشار، توان، دما و زمان لایه نشانی

انواع فصل مشترک ها





کیفیت ساخت

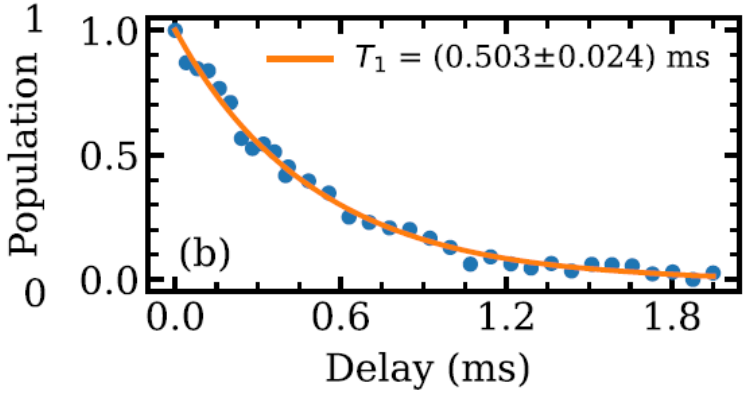
تمیزکاری خوب زیرلایه، کیفیت بالای لایه نشانی فلز و ساخت با کیفیت بالا

اکسیدها، نقص و ناخالصی ها در این فصل مشترک ها عامل اصلی تلفات در مدارهای ابررسانا هستند و فصل مشترک فلز–هوا غالب ترین سهم در تلفات را دارد.

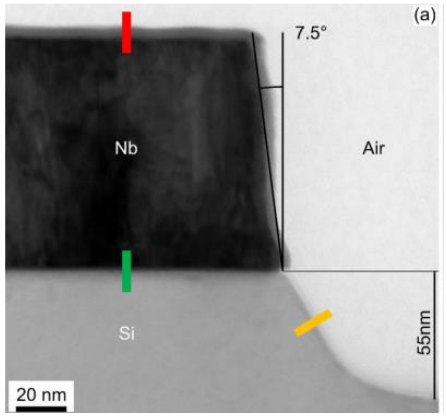
رکورد بهترین همدوسی کیوبیت

تانتالوم

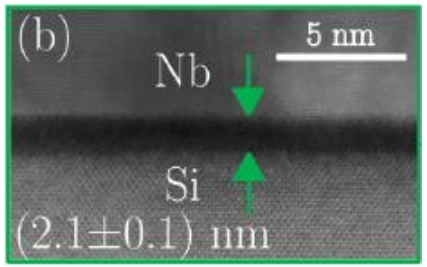
Ta ($T_c \approx 4.3$ k)



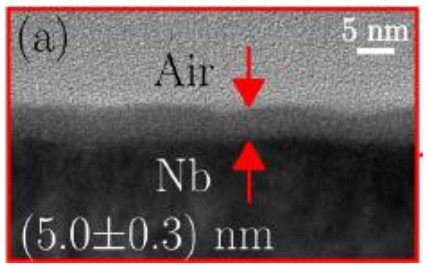
استفاده از این فلز منجر به بهترین رکورد برای زمان واهلش و همدوسی کیوبیت ابررسانا شده است.



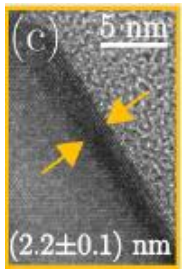
فصل مشترک زیرلایه–فلز



فصل مشترک فلز–هوا

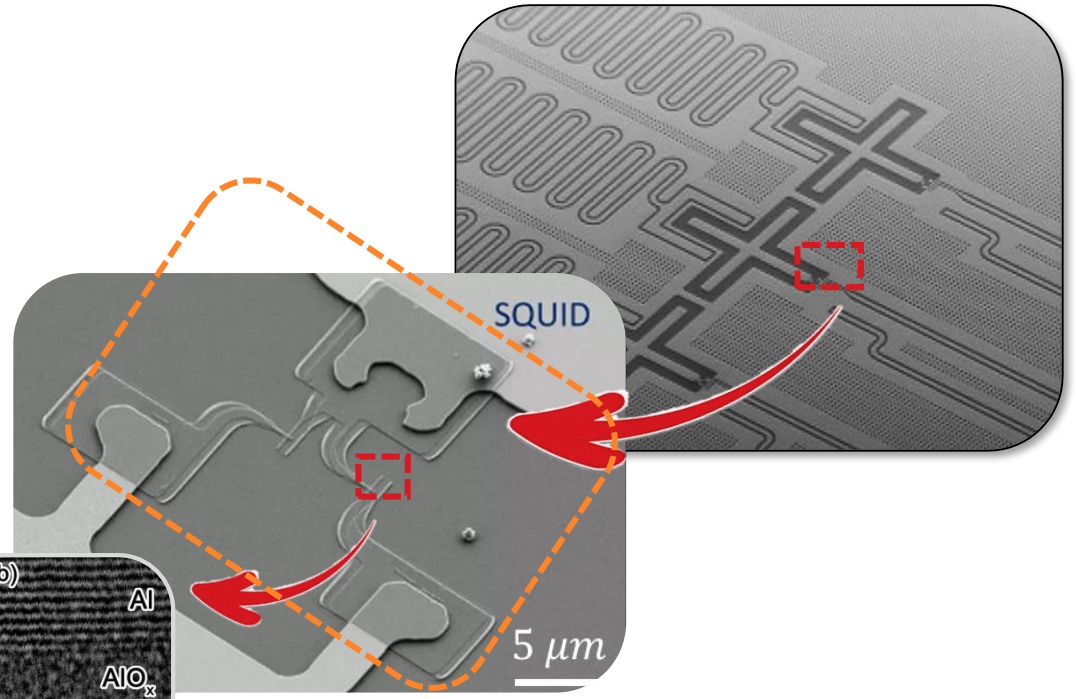


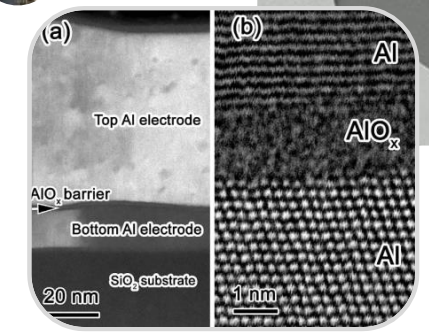
فصل مشترک زیرلایه–هوا



Verjauw, J., et al. "Investigation of microwave loss induced by oxide regrowth in high-Q niobium resonators." *Physical Review Applied* 16.1 (2021): 014018.

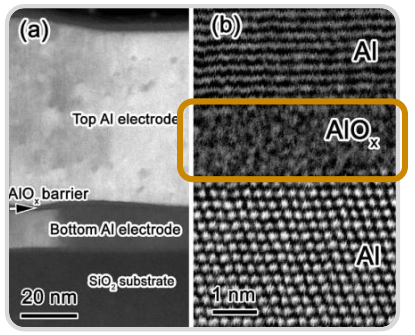
Wang, Chenlu, et al. "Towards practical quantum computers: Transmon qubit with a lifetime approaching 0.5 milliseconds." *npj Quantum Information* 8.1 (2022): 3.

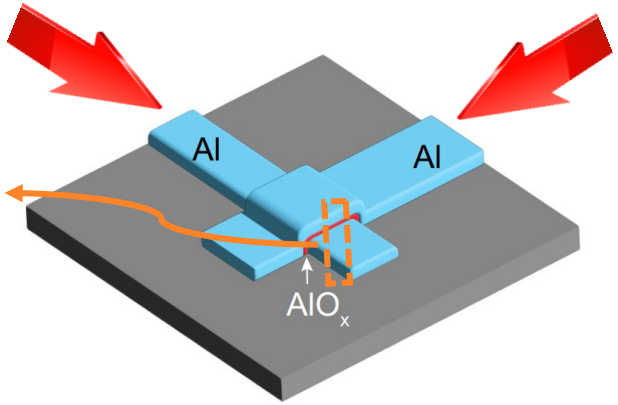


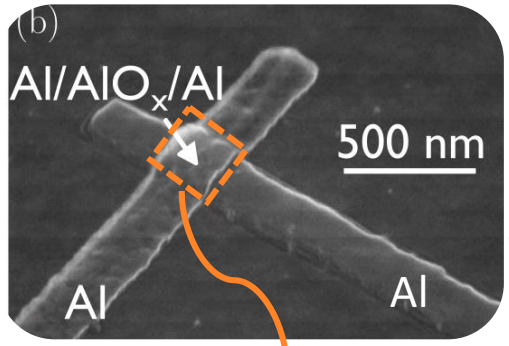


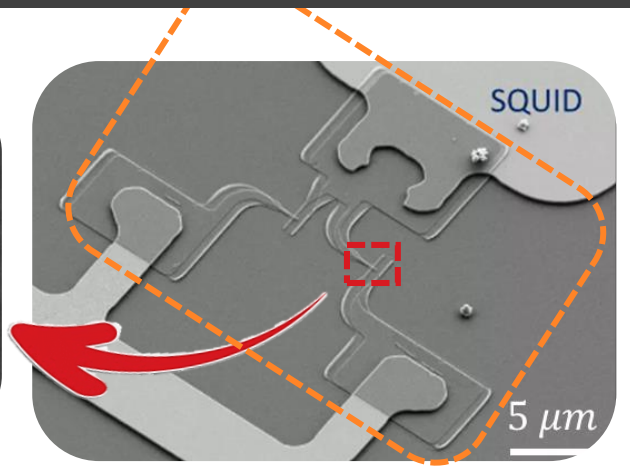
زیرساخت های مورد نیاز و روش های ساخت اتصالات جوزفسون

اصلی ترین زیرساخت های آزمایشگاهی مورد نیاز برای ساخت اتصالات جوزفسون









$250\ nm \times 250\ nm$

ابعاد نانومتری

Aspect	Photolithography	EBL
Wavelength/spot-size	≈ 300 nm	≈ 2 nm
Minimum feature size	≈ 0.5 μm	≈ 6 nm
Alignment accuracy	> 1 μm	> 6 nm

لایه نشانی در دو زاویه، اکسیداسیون کنترل شده و خلاء بالای سیستم

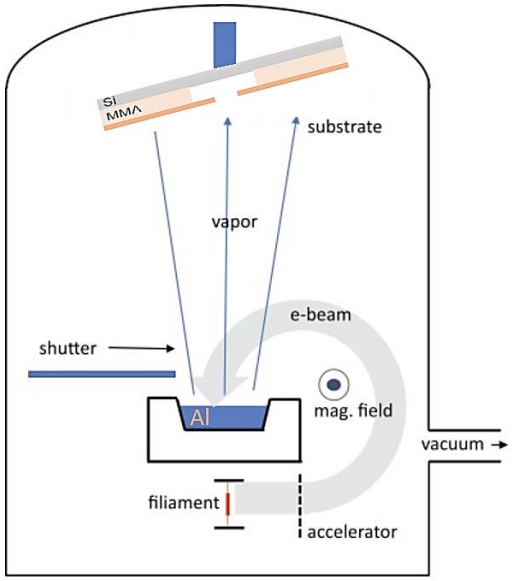
دستگاه لیتوگرافی با باریکه الکترونی

دستگاه تبخیر با باریکه الکترونی

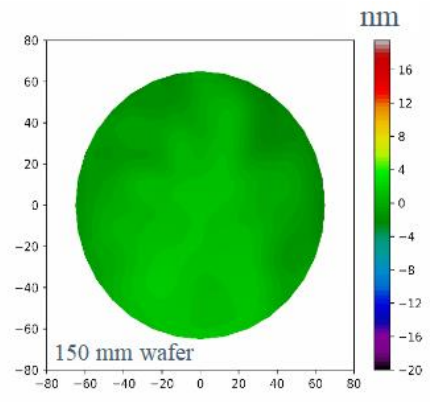
دستگاه لیتوگرافی با باریکه الکترونی

- قابلیت ایجاد الگوهای نانومتری با رزولوشن بالا برای ساخت اتصالات جوزفسون
- دقت بسیار بالا در روی هم انداختن الگوها در دیوایس های چند لایه
- دقت دوخت بسیار بالا در کنارهم قرار دادن الگوها

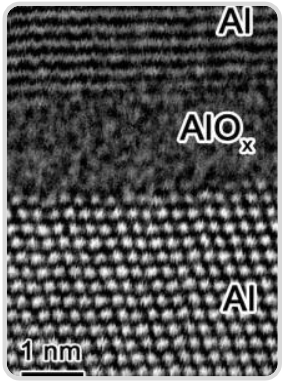
دستگاه تبخیر با باریکه الکترونی



- از قابلیت چرخش و قرارگیری زیرلایه در دو زاویه و برای تبخیر سایه اتصالات جوزفسون استفاده می کنیم.



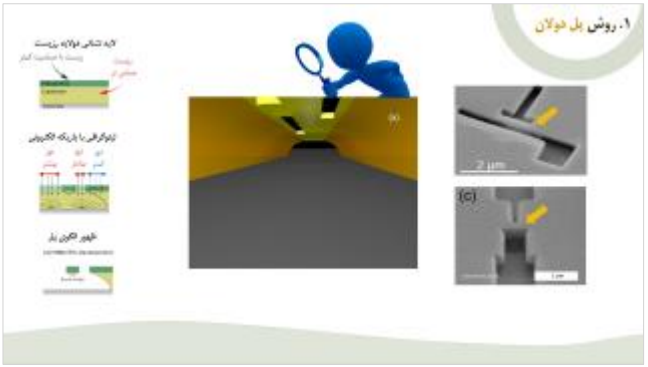
- نرخ لایه نشانی پایدار و کنترل شده (تا ۰.۲ nm/s)

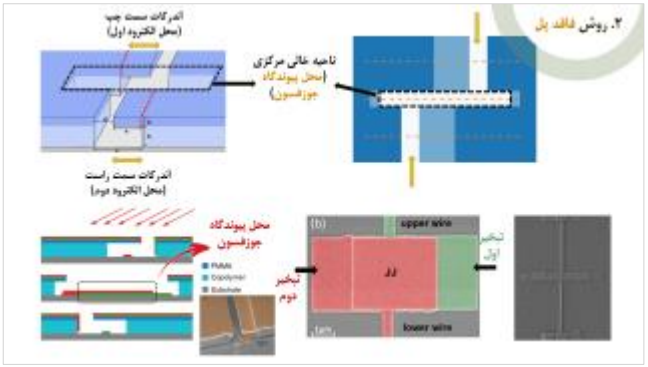


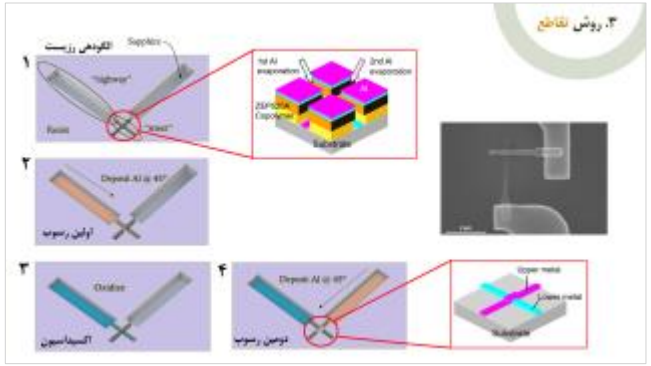
- قابلیت رسیدن به خلاء $2x10^{-9}$ Torr
- اکسیداسیون دقیق با نرخ کنترل شده

روش های ساخت

- پل دولان
- فاقد پل
- تقاطع یا منهتن

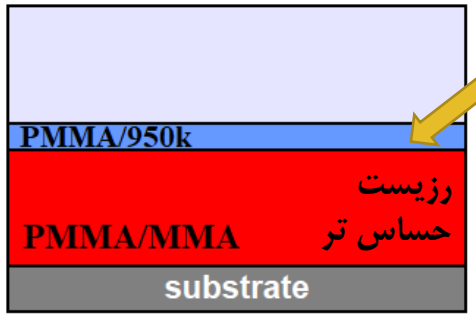






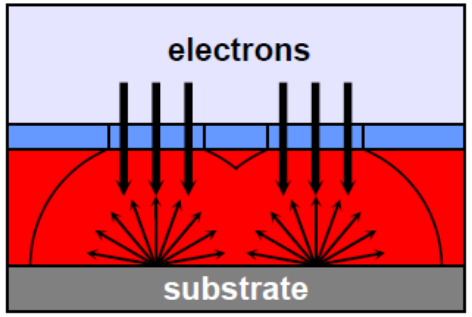
۱. روش پل دولان

لایه نشانی دولایه رزیست

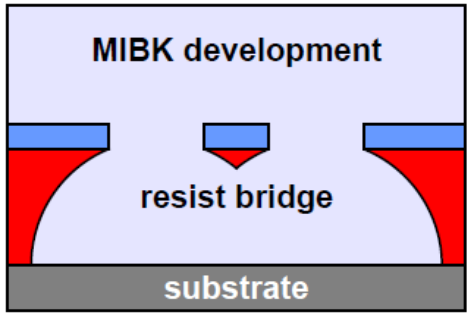


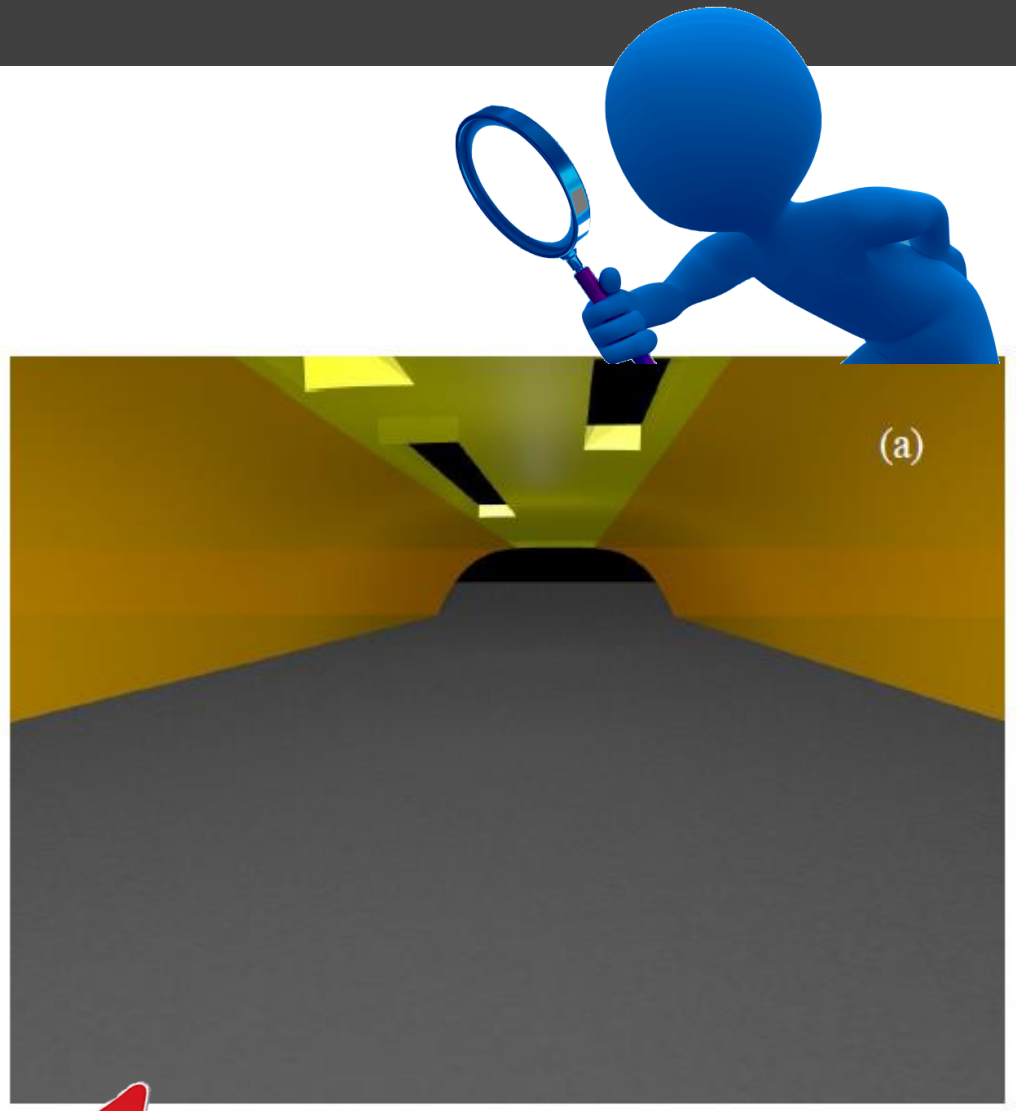
رزیست با حساسیت کمتر

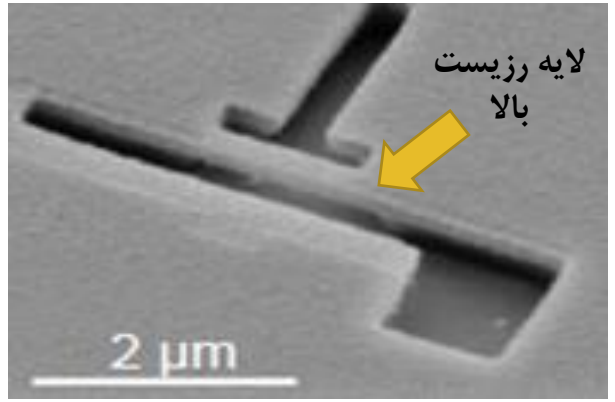
لیتوگرافی با باریکه الکترونی

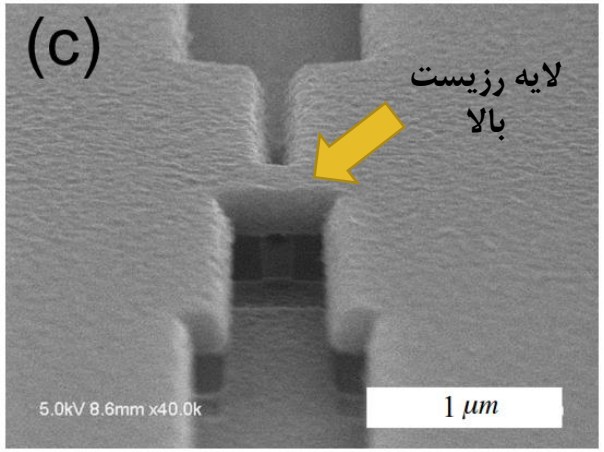


ظهور الگوی پل



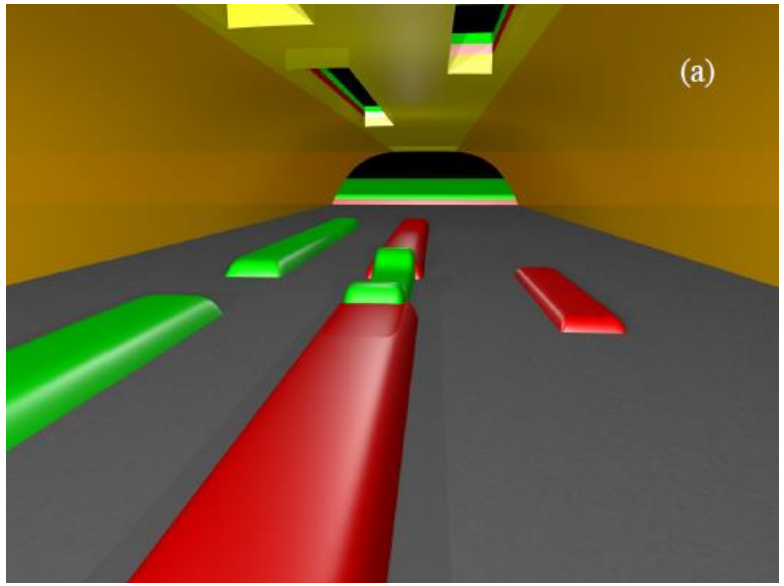




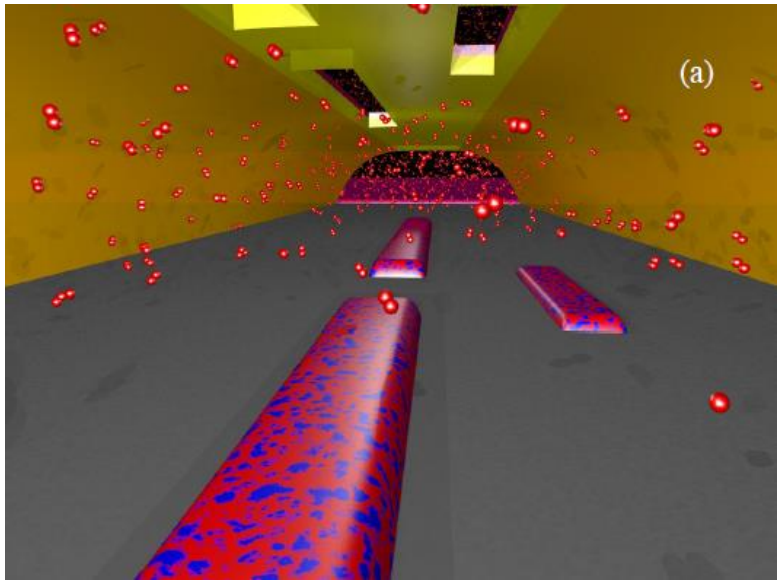


Göppl, Martin Volker. "Engineering quantum electronic chips: realization and characterization of circuit quantum electrodynamics systems." PhD diss., ETH Zurich, 2009.

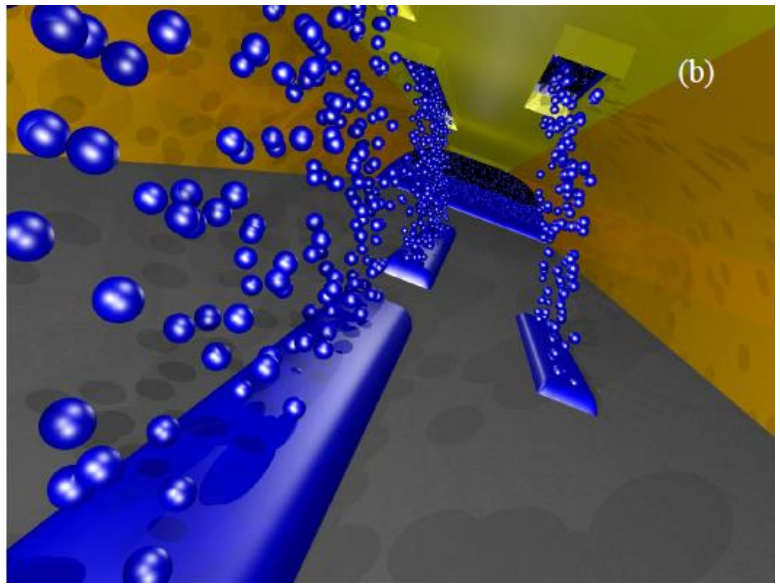
رسوب دومین لایه آلومینیوم



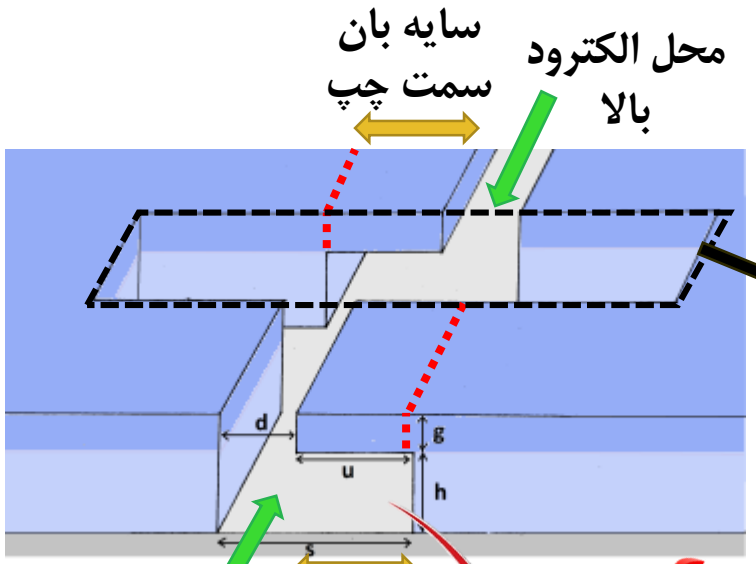
اکسیداسیون

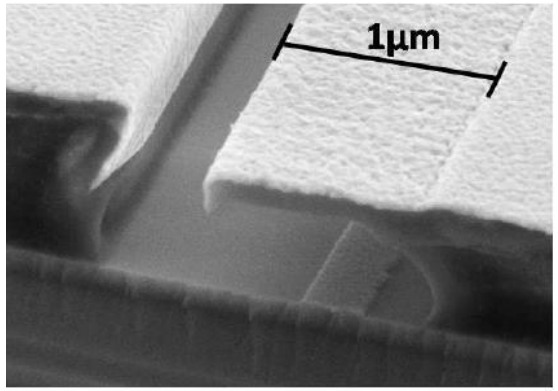


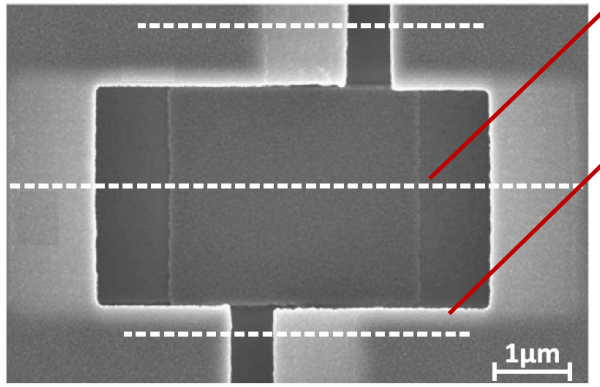
رسوب اولین لایه آلومینیوم

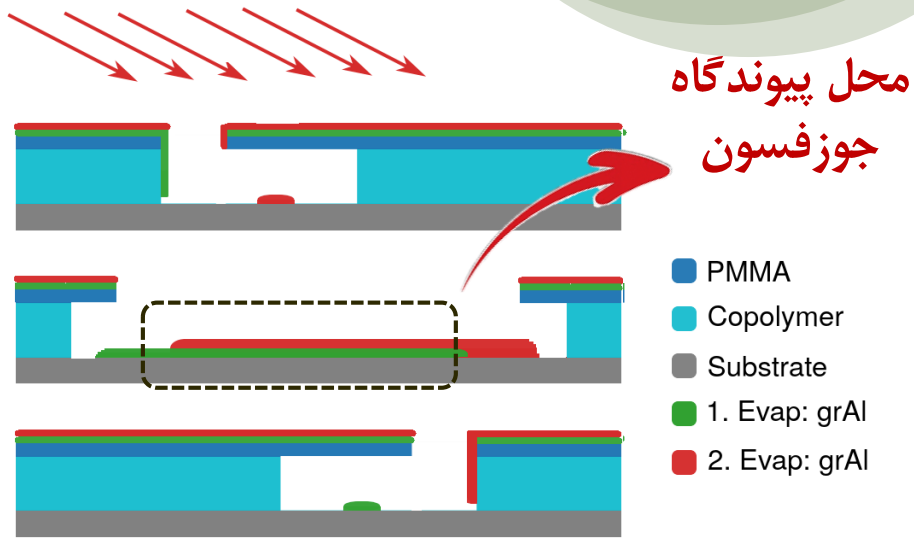


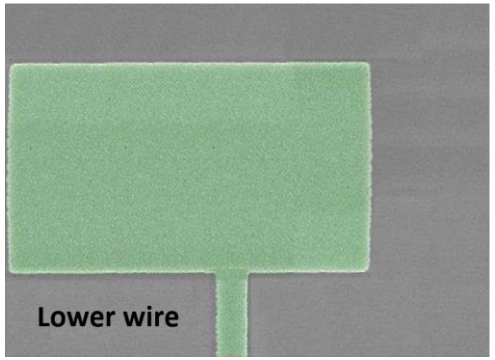
۲. روش بدون پل

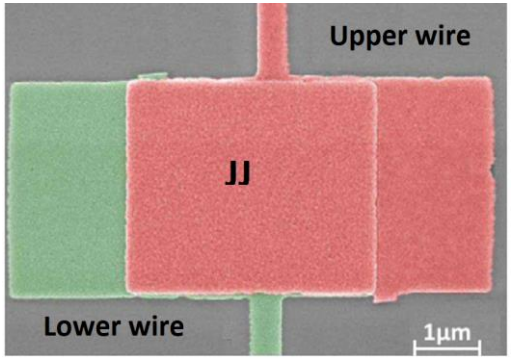








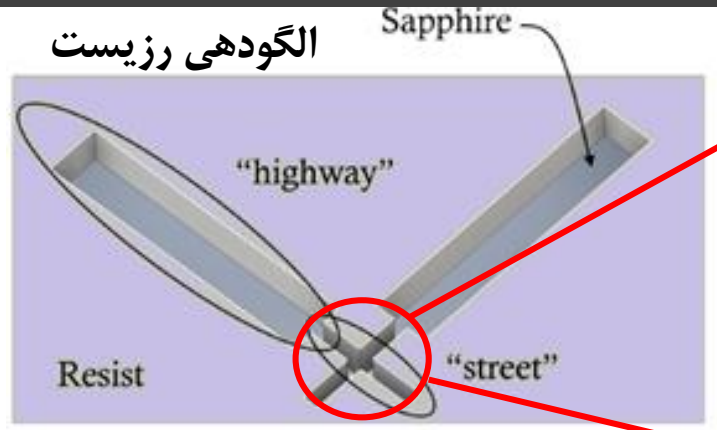


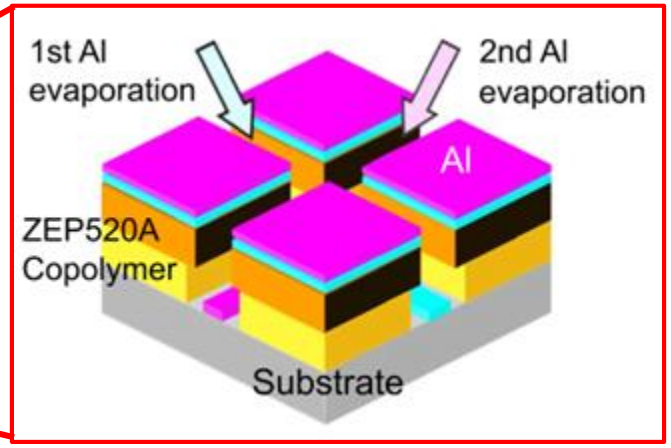


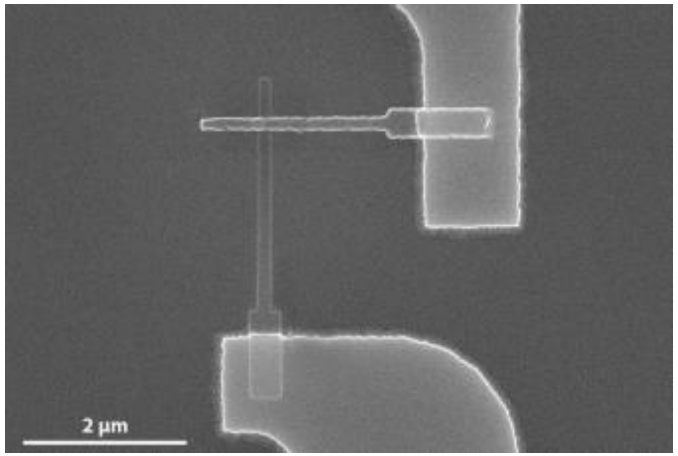
Lecocq, Florent, et al. "Junction fabrication by shadow evaporation without a suspended bridge." *Nanotechnology* 22.31 (2011): 315302.

۳. روش تقاطع یا منهتن

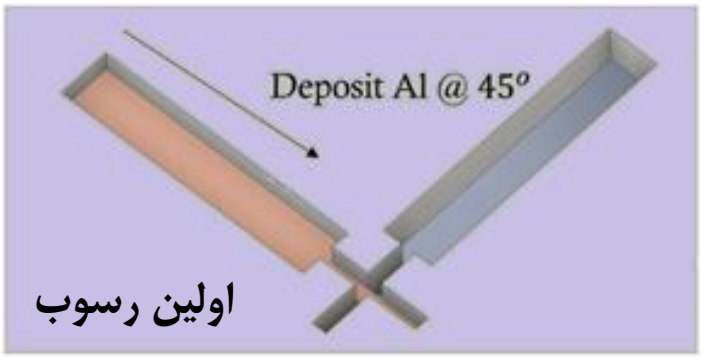
۱ الگودهی رزیست



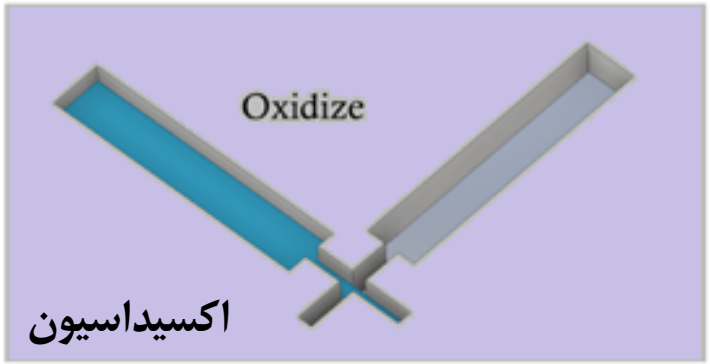




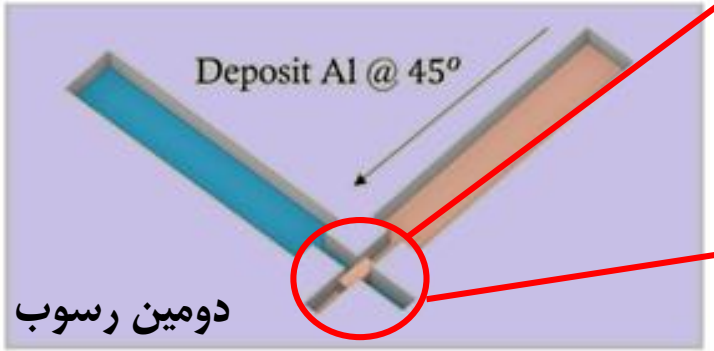
۲

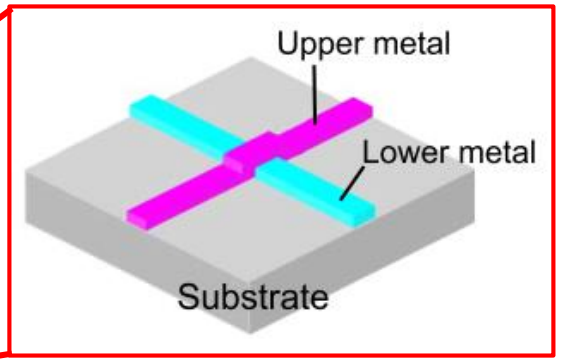


۳



۴



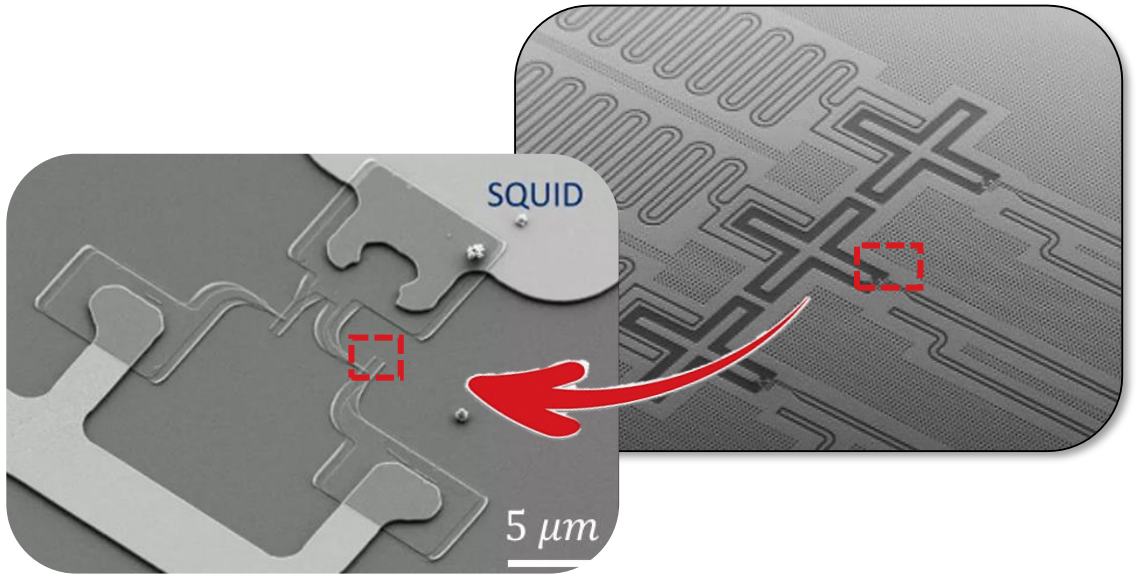


SQUID
5 μm
زیرساخت های مورد نیاز و روش های ساخت اتصالات جوزفسون
8

ساخت تراسه اصلی (تسدیدکر، بدهای خازنی کیوبیت و خطوط کنترل)
4

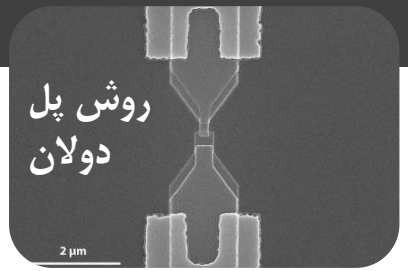
چگونه اتصالات
جوزفسون کیوبیت های
سفارشی را بسازیم؟
بیمه سازی اتصال جوزفسون برای کیوبیت سفارشی
23

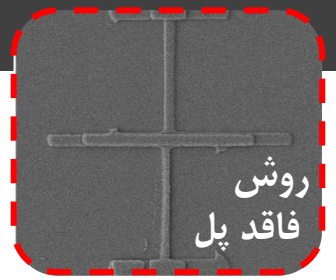
SQUID
5 μm
JJ
مراحل ساخت و بیمه سازی اتصال جوزفسون
17

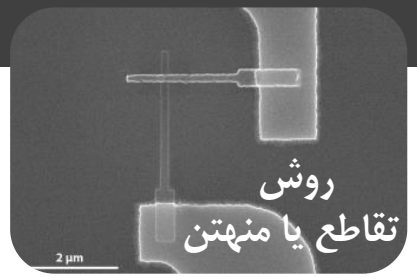


مراحل ساخت و بهینه سازی اتصال جوزفسون

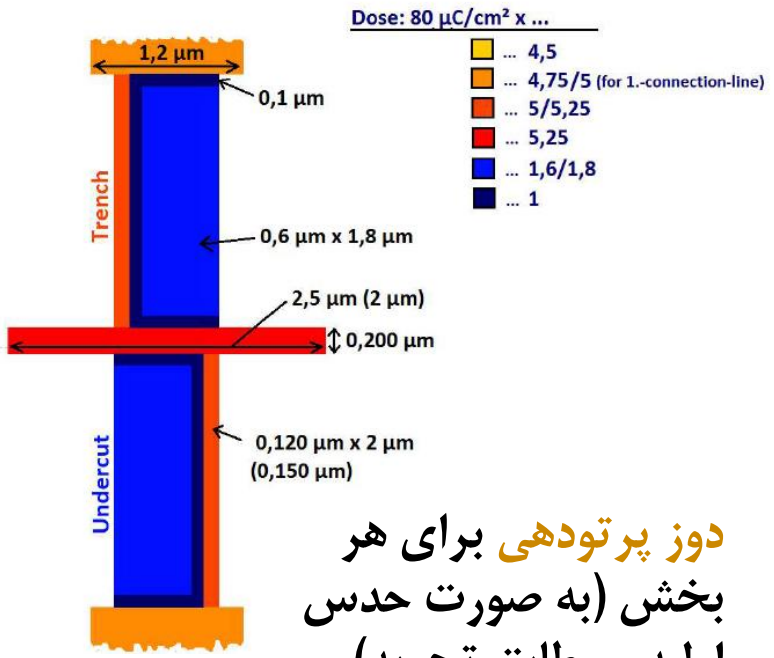
طراحی معماری مناسب برای رزیست ها





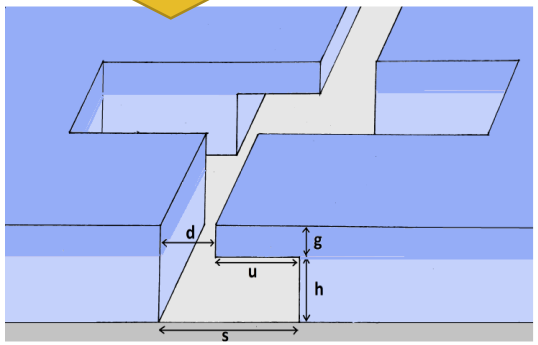


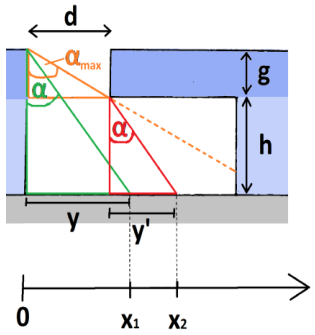
طراحی ماسک ناحیه پیوندگاه

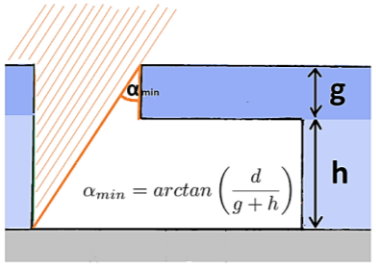


دوز پرتودهی برای هر بخش (به صورت حدس اولیه و مطابق تجربه) تعیین می شوند.

پارامترهای ورودی		
d	250	nm
h	520	nm
g	200	nm



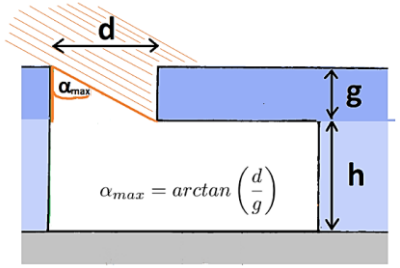


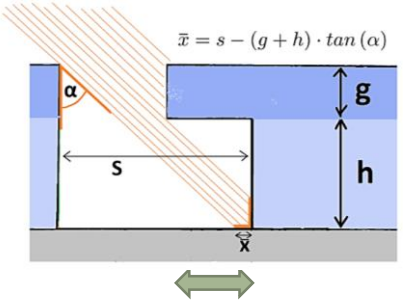


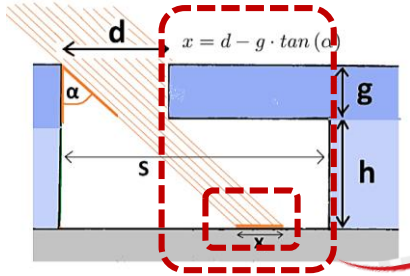
زوایای مناسب تبخیر

$$\underbrace{\alpha_{min} = \arctan\left(\frac{d}{g+h}\right)}_{19.15^\circ} < \alpha < \underbrace{\alpha_{max} = \arctan\left(\frac{d}{g}\right)}_{51.34^\circ}$$

$$\alpha = 30^\circ$$



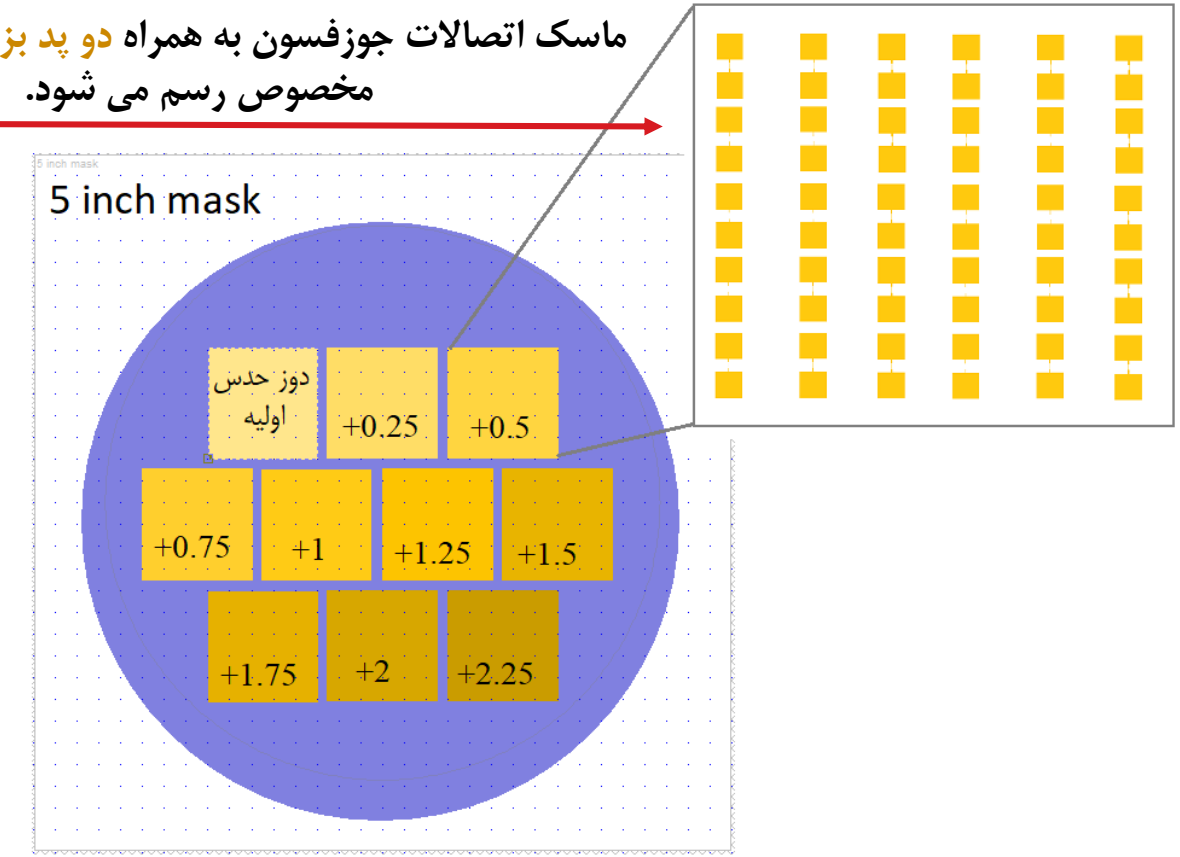


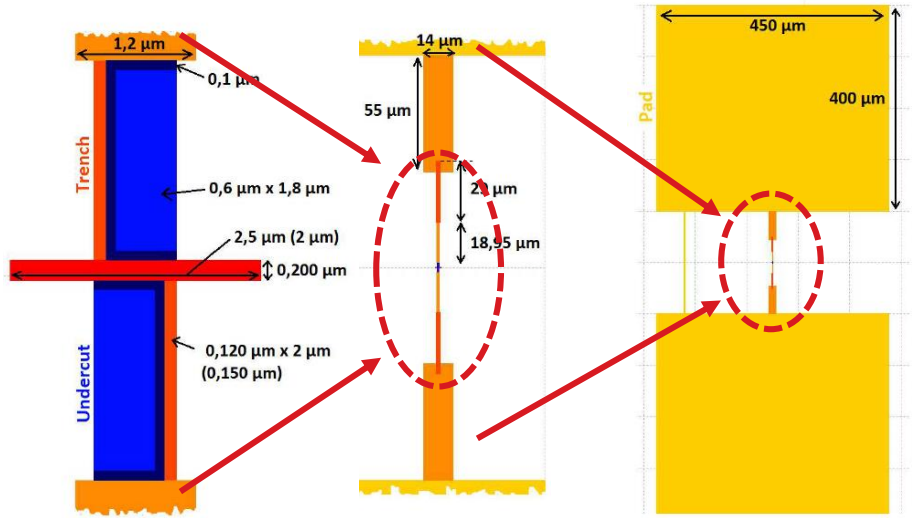


عرض مناسب سایه بان و عرض الکترودها نیز مشخص می شوند.

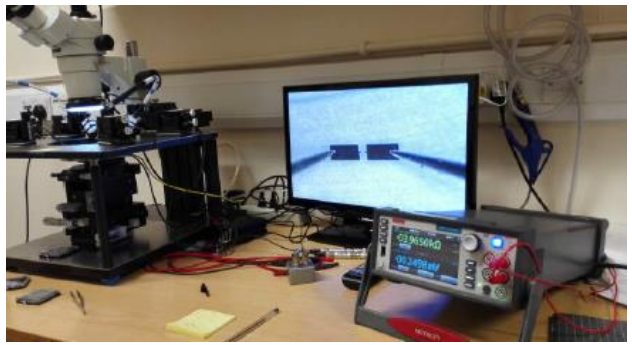
رسم ماسک لیتوگرافی

ماسک اتصالات جوزفسون به همراه دو پد بزرگ در نرم افزار مخصوص رسم می شود.

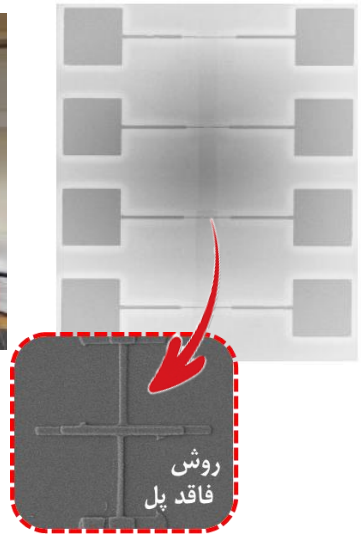




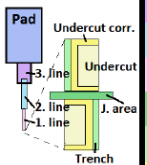
هر رنگ معادل یک دوز پرتودهی در سیستم لیتوگرافی است



سیستم اندازه گیری مقاومت

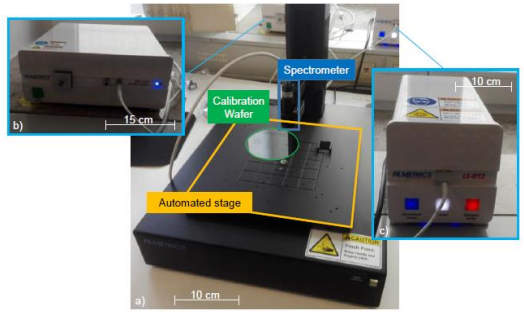


+0.25 +0.25 +0.25 +0.25 ...

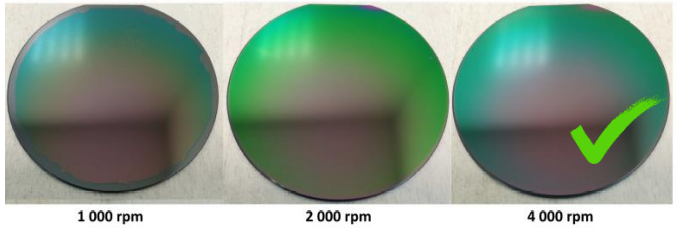
Dose:	حدس اولیه	+0,25	+0,5	+0,75	+1	+1,25	+1,5	+1,75	+2	+2,25
	2,75	3	3,25	3,5	3,75	4	4,25	**4,5**	4,75	5
	3,25	3,5	3,75	4	4,25	4,5	**4,75**	5	5,25	5,5
	3,75	4	4,25	4,5	4,75	**5**	5,25	5,5	5,75	6
	4	4,25	4,5	**4,75**	5	5,25	5,5	5,75	6	6,25
	4,25	4,5	4,75	5	**5,25**	5,5	5,75	6	6,25	6,5
	4,25	4,5	4,75	5	5,25	5,5	**5,75**	6	6,25	6,5
	1	1	1	...						
	1,4	1,4	1,4	...						

مراحل تجربی ساخت اتصالات جوزفسون

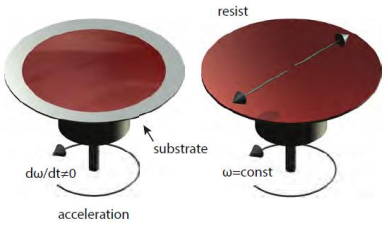
ضخامت سنجی رزیست



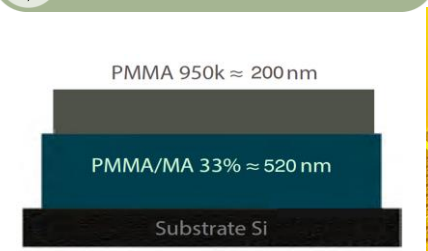
با توجه به دیتاشیت رزیست، سرعت چرخش مناسب برای رسیدن به ضخامت مورد نظر انتخاب می شود.

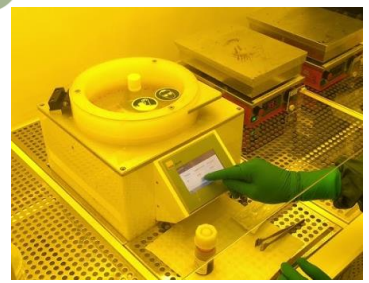


دستگاه پوشش دهی چرخشی (اسپین کوتینگ)

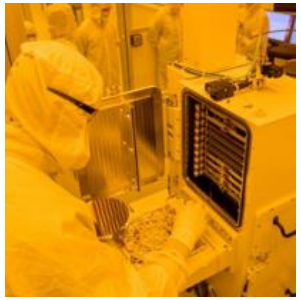


۱ لایه نشانی دو لایه فوتورزیست

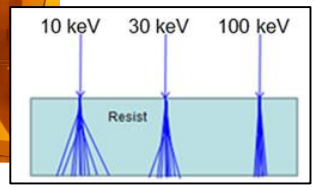




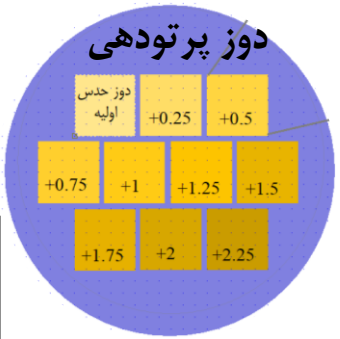
۲ لیتوگرافی باریکه الکترونی



ولتاژ شتاب باریکه

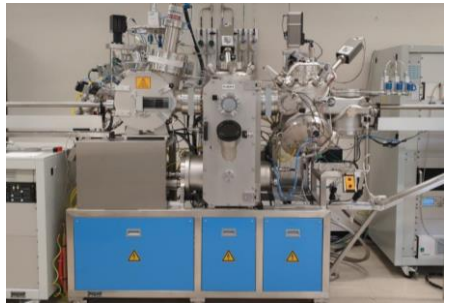


دوز پرتودهی

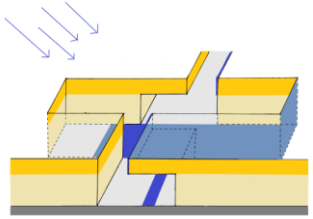


۳ ظهور طرح

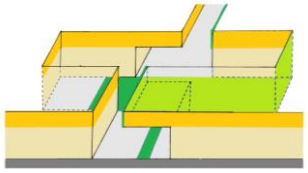
۴ تبخیر با باریکه الکترونی



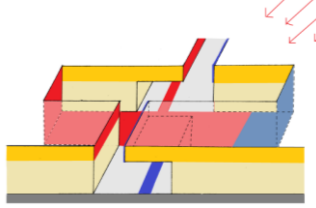
اولین رسوب



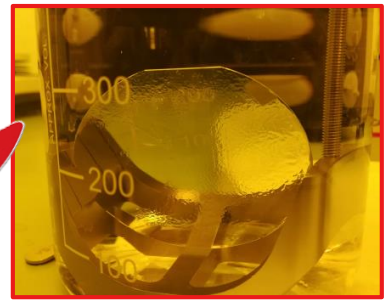
اکسیداسیون



دومین رسوب

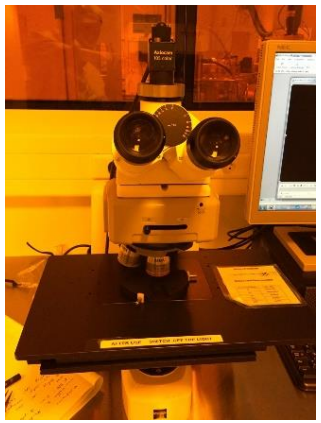


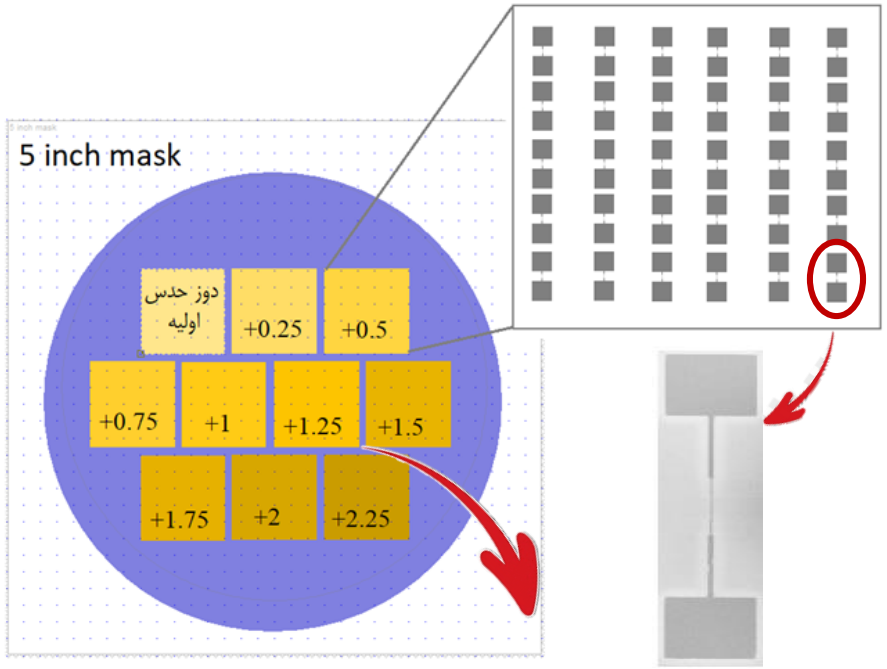
۵ لیفت آف و تمیزکاری تراشه



بررسی نمونه های ساخته شده برای انتخاب دوز مناسب

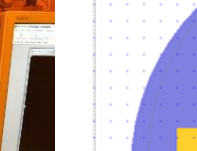
بررسی نمونه های ساخته شده با میکروسکوپ

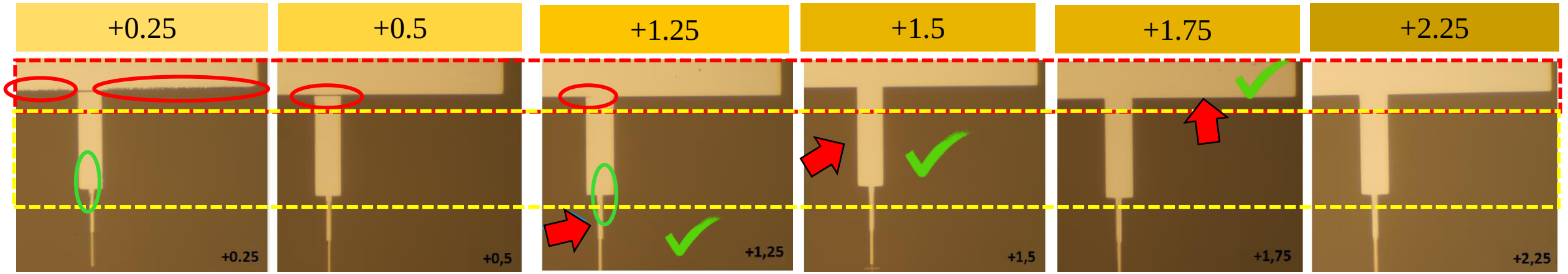




حدس

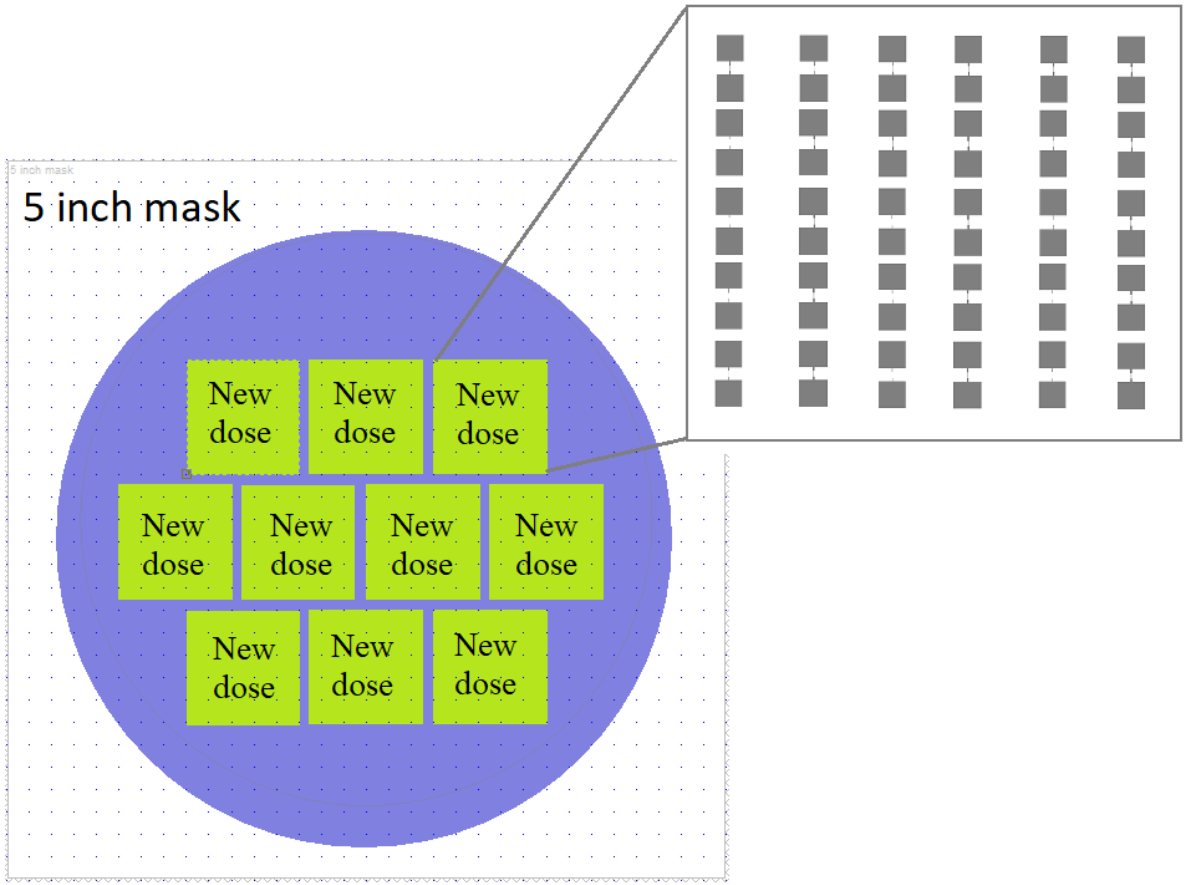
Dose:	اولیه	+0, 25	+0, 5	+0,75	+1	+1,25	+1,5	+1,75	+2	+2,25
	2,75	3	3,25	3,5	3,75	4	4,25	**4,5**	4,75	5
	3,25	3,5	3,75	4	4,25	4,5	**4,75**	5	5,25	5,5
	3,75	4	4,25	4,5	4,75	**5**	5,25	5,5	5,75	6
	4	4,25	4,5	**4,75**	5	5,25	5,5	5,75	6	6,25
	4,25	4,5	4,75	5	**5,25**	5,5	5,75	6	6,25	6,5
	4,25	4,5	4,75	5	5,25	5,5	**5,75**	6	6,25	6,5
	1	1	1	. . .						
	1,4	1,4	1,4	. . .						

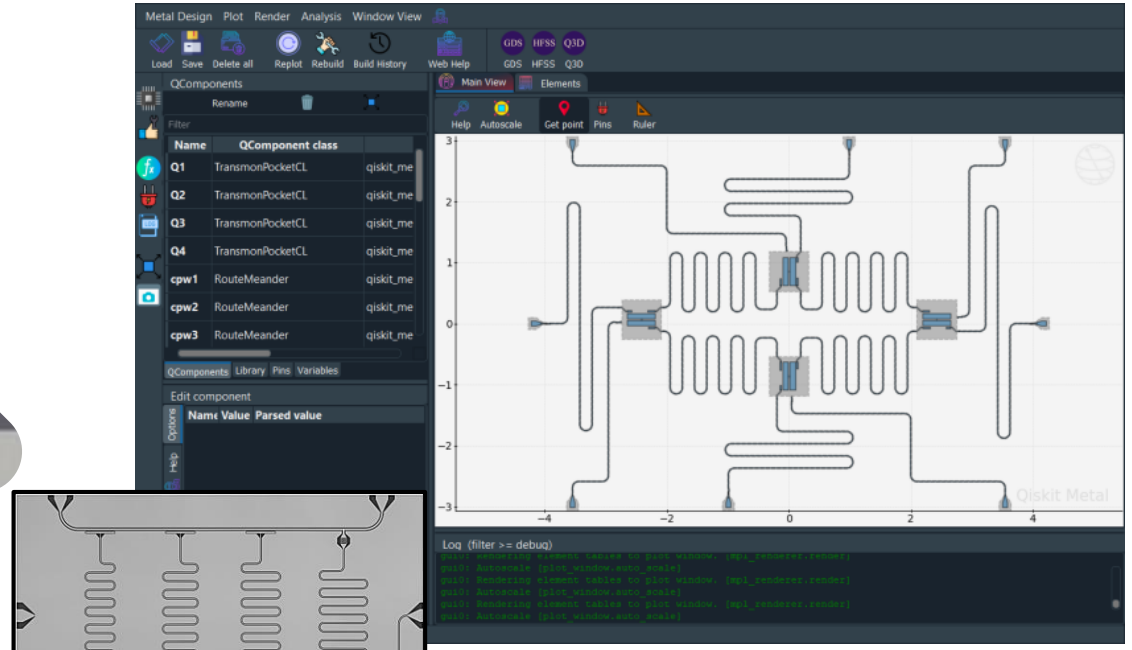


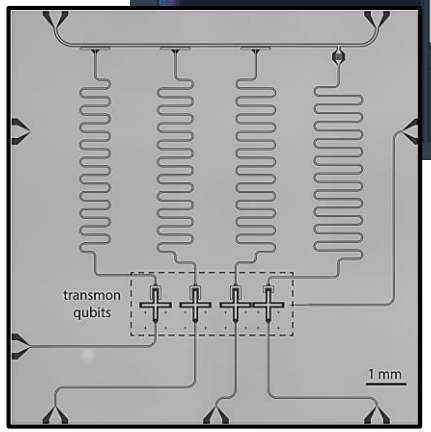


دوز مناسب بهینه سازی می شود و ازین پس کل تراشه با دوزهای جدید لیتوگرافی و ساخته می شود.

Doses:	NEW
Pads	4,5
3.-connection-line	4,75
2.-connection-line	5
1.-connection-line	4,75
Junction area	5,25
Trench	5,75
Undercut correction	1
Undercut	1,4



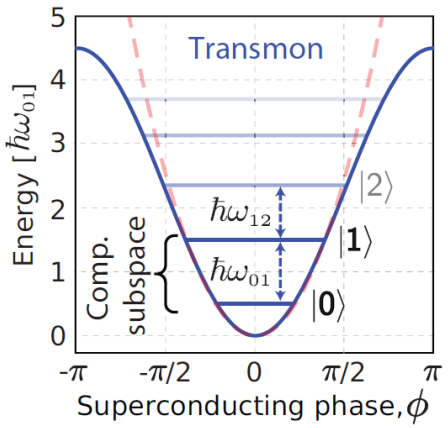


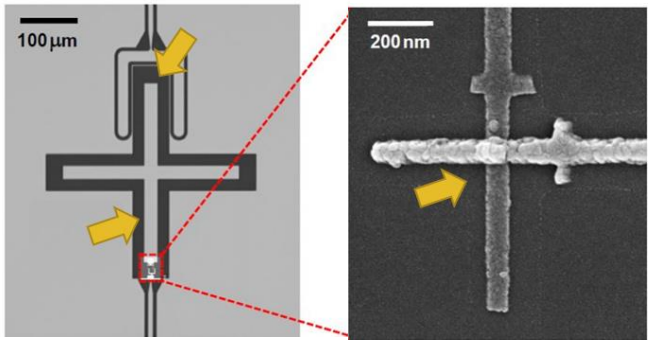


چگونه اتصالات جوزفسون کیوبیت های سفارشی را بسازیم؟

بهینه سازی اتصال جوزفسون برای کیوبیت سفارشی

بهینه سازی اتصال جوزفسون برای کیوبیت سفارشی

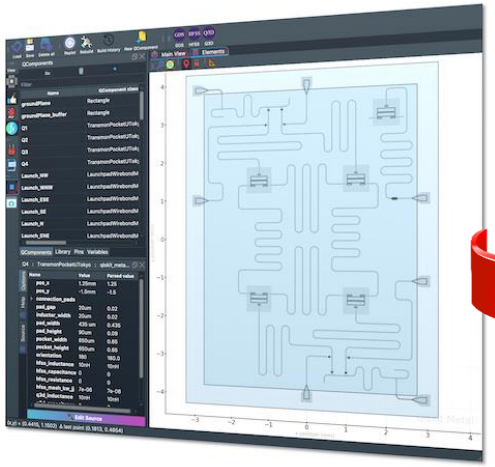




$$f_{01} = \frac{1}{2\pi\hbar}\left(\sqrt{8E_cE_J} - E_c\right)$$

$$E_c = \frac{e^2}{2C_\Sigma}$$

$$E_j = \frac{\Phi_0 I_c}{2\pi} = \frac{\Phi_0 \Delta(T)}{4eR_n}$$

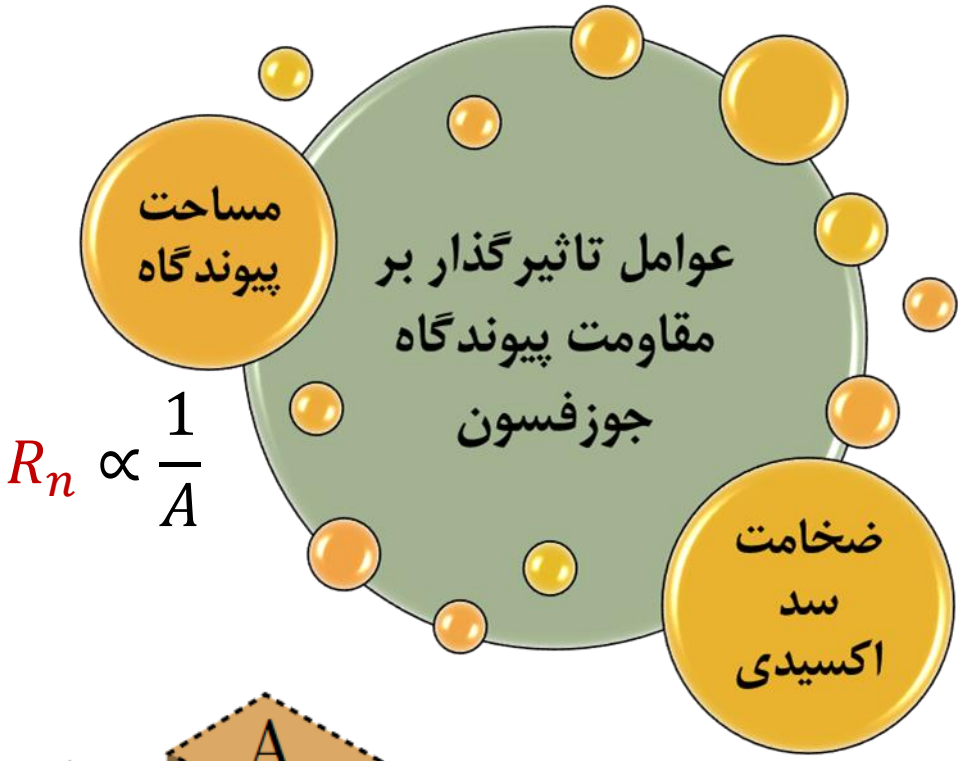


ماسک مورد نظر برای ویفر اصلی طراحی می شود.

شبیه ساز مقدار مقاومت اتصال جوزفسون را نیز اعلام می کند.

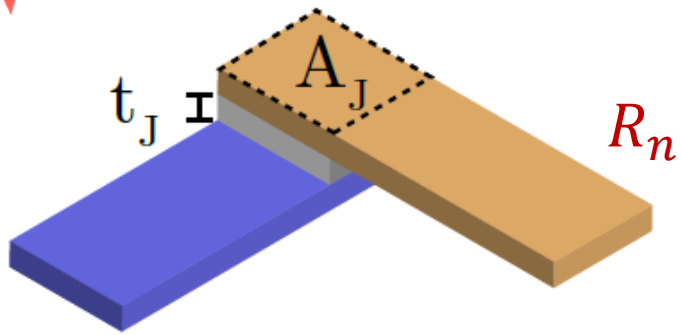
مثال

$$R_n = \frac{\pi\Delta_c(0)}{2eI_c} = \frac{\pi \cdot 180\,\mu eV}{2e \cdot 89.42\,\mathrm{nA}} = 3.16\,\mathrm{k\Omega}$$

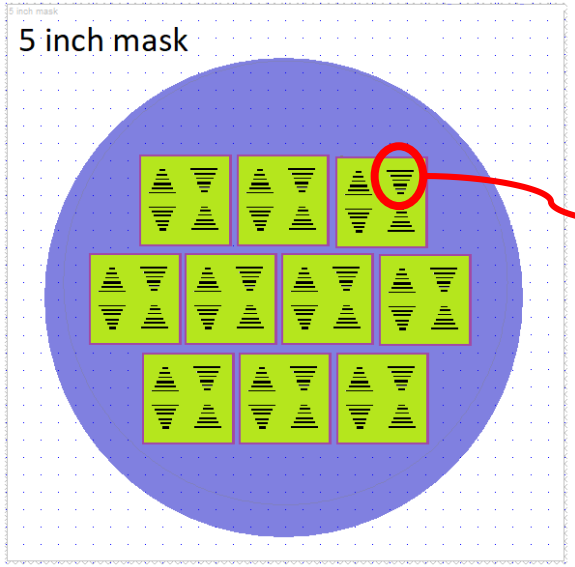


$$R_n \propto \frac{1}{A}$$

$$R_n \propto (t_{ox} \cdot p_{ox})^x$$



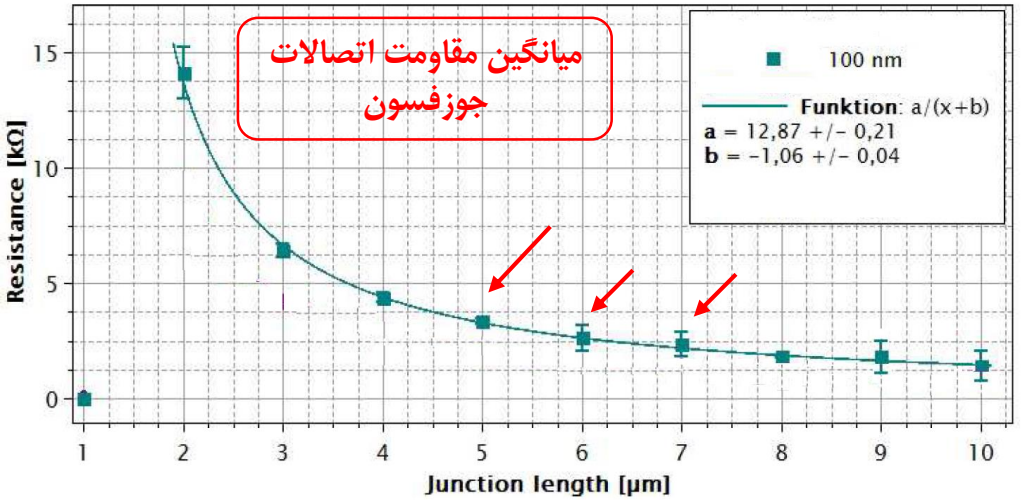
بهینه سازی مساحت اتصال جوزفسون برای رسیدن به مقاومت هدف



رسم ماسک لیتوگرافی با مساحت های اتصال جوزفسون متفاوت

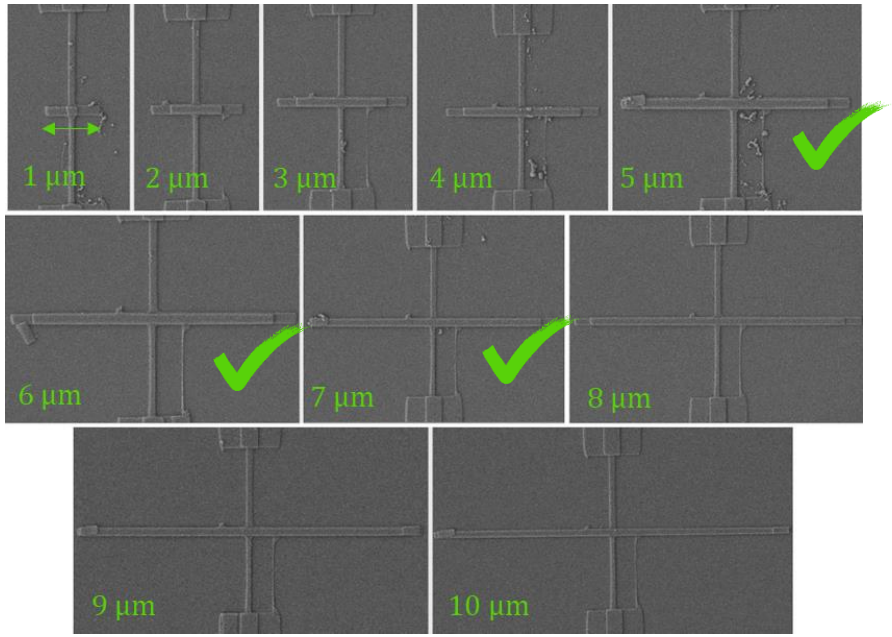
100nm ×1-10µm

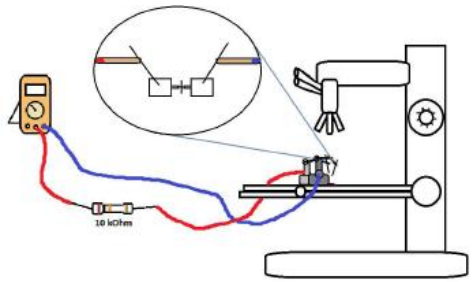
ساخت اتصالات جوزفسون



می دانیم:

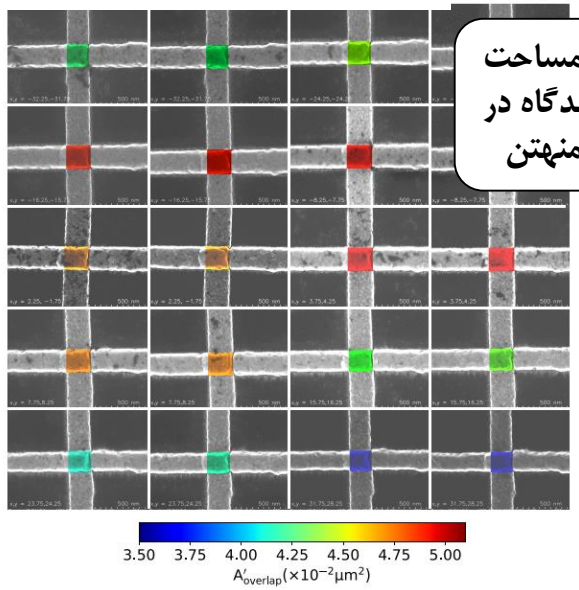
$$R_n \propto \frac{1}{A}$$





بهترین مساحت ها مشخص شدند.

تغییر مساحت پیونـــدگاه در روش منهتن

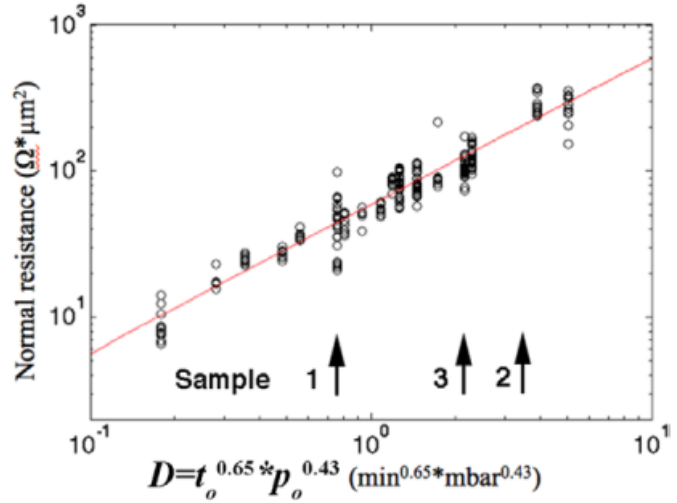


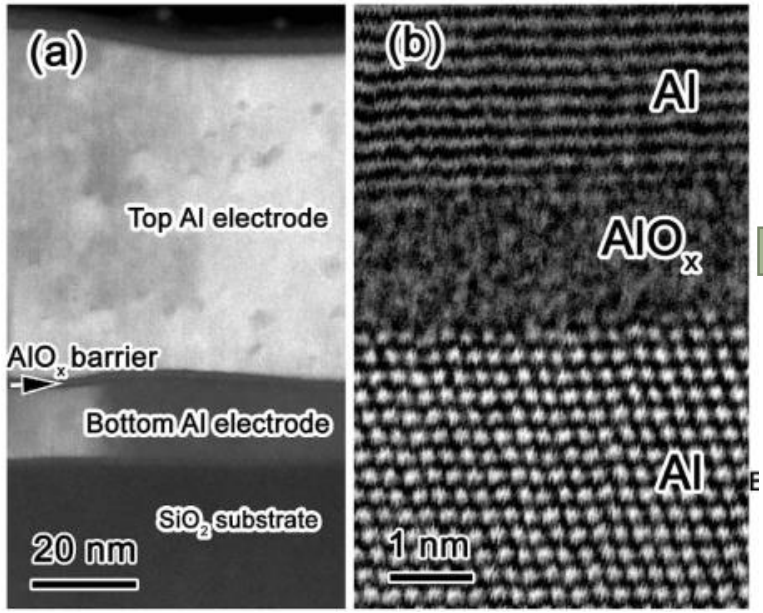
بهینه سازی ضخامت سد اکسیدی اتصال جوزفسون برای رسیدن به مقاومت هدف

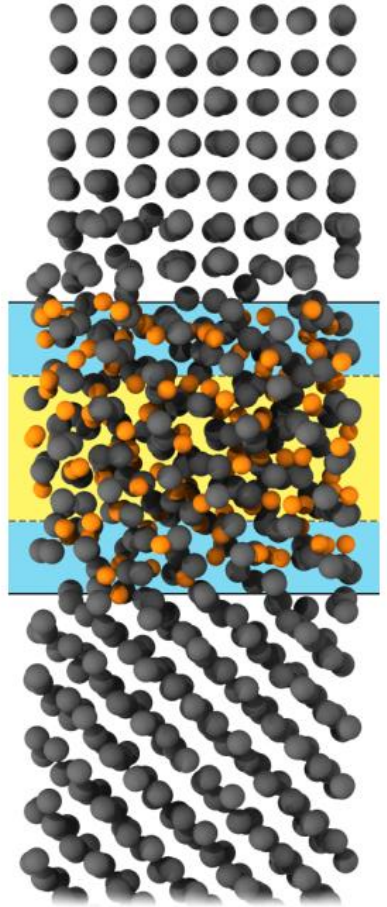
$$R_n \propto (t_{ox}.p_{ox})^x$$

Table 1. Oxidation parameters (partial oxygen pressure (p_o) and oxidation time (t_o)) and barrier thickness measurement results (average barrier thickness ($\langle l \rangle$) and standard deviation (σ_l) for the three samples analysed in this study.

	p_o (mbar)	t_o (min)	$\langle l \rangle$ (nm)	σ_l (nm)
Sample 1	0.1	3	1.66	0.35
Sample 2	0.1	30	1.88	0.32
Sample 3	1	3	1.73	0.37





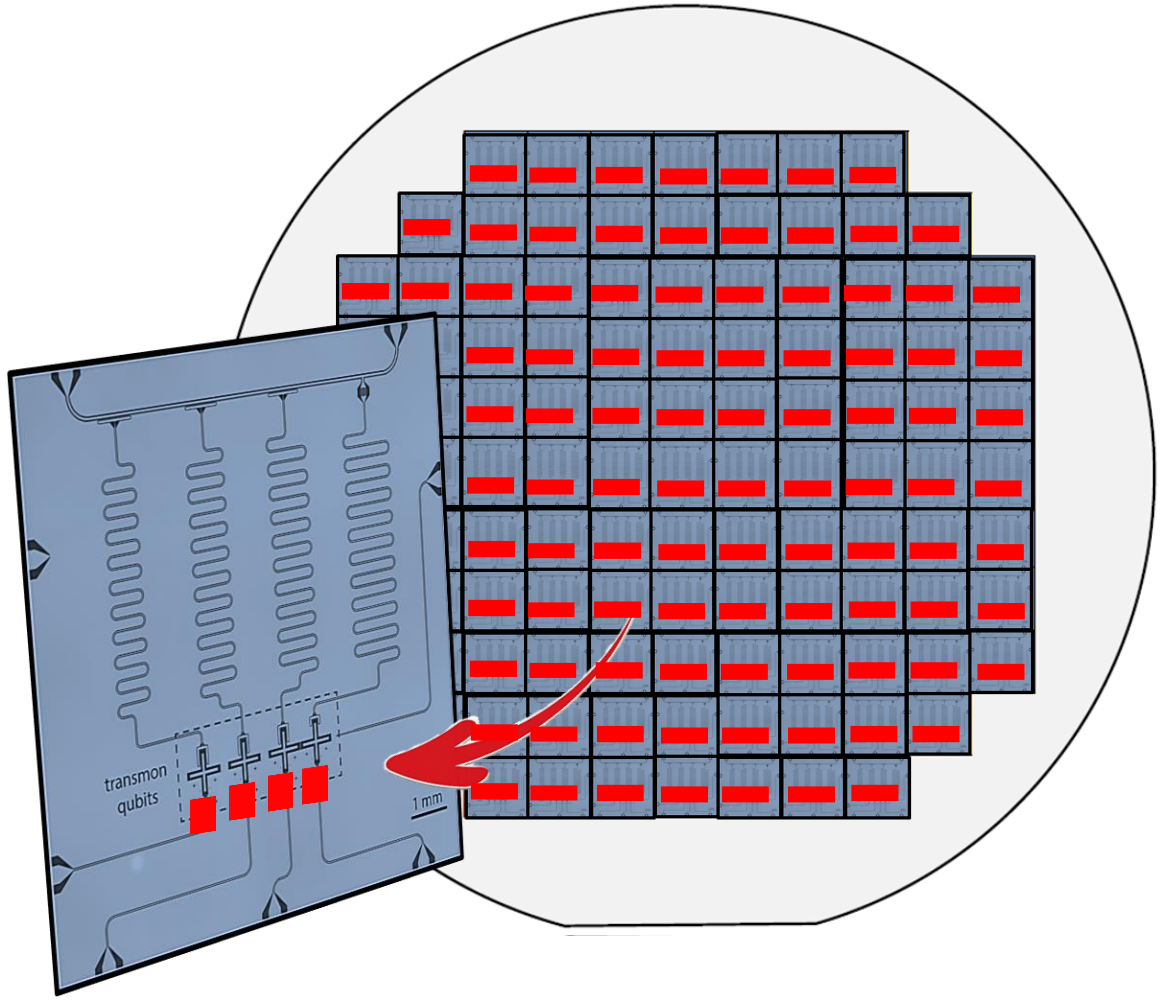


Zeng, L. J., et al. "Direct observation of the thickness distribution of ultra thin AlOx barriers in Al/AlOx/Al Josephson junctions." *Journal of Physics D: Applied Physics* 48.39 (2015): 395308.

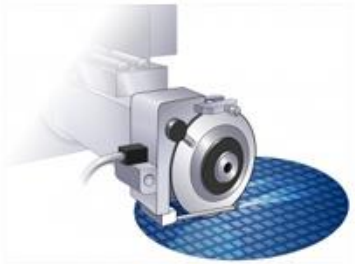
مراحل ساخت کیوبیت اصلی

۱. ساخت تراشه اصلی

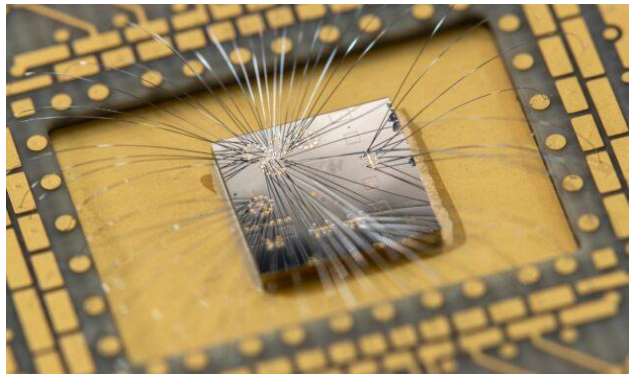
۲. ساخت اتصالات جوزفسون بر روی تراشه اصلی

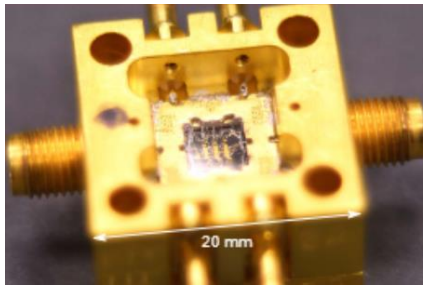


برش ویفر

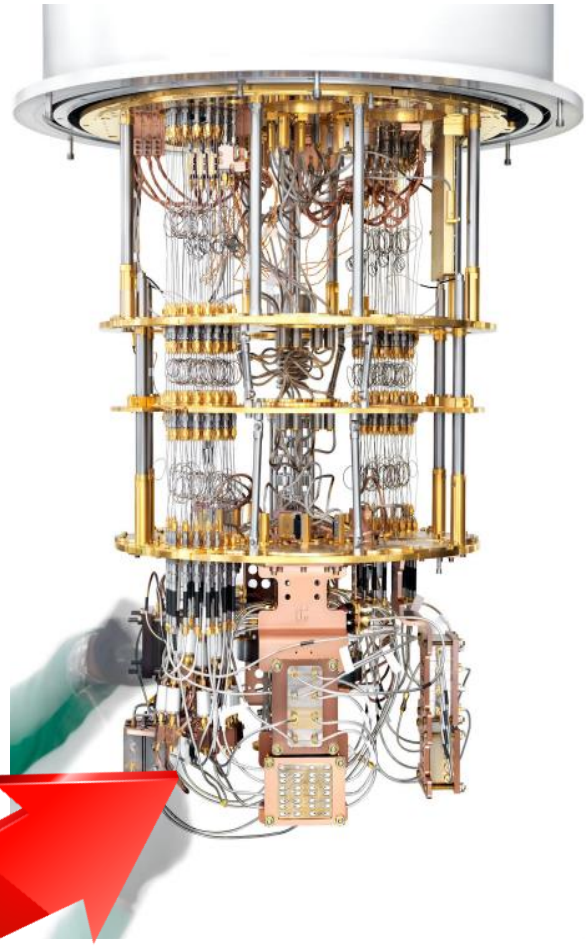


سیم کشی و بسته بندی

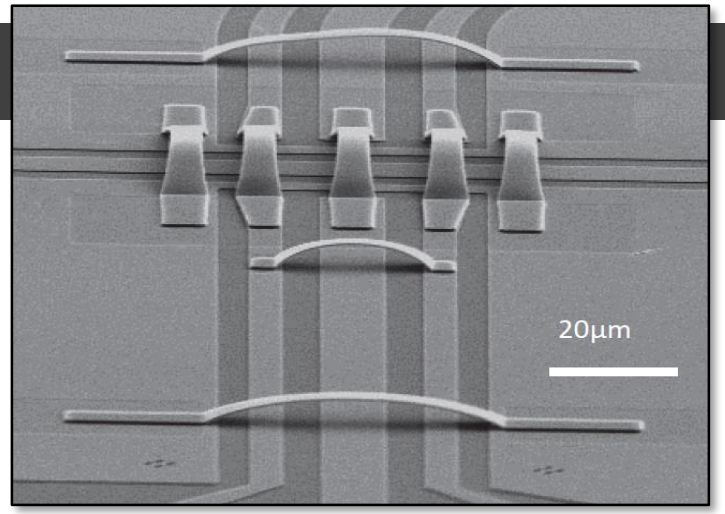




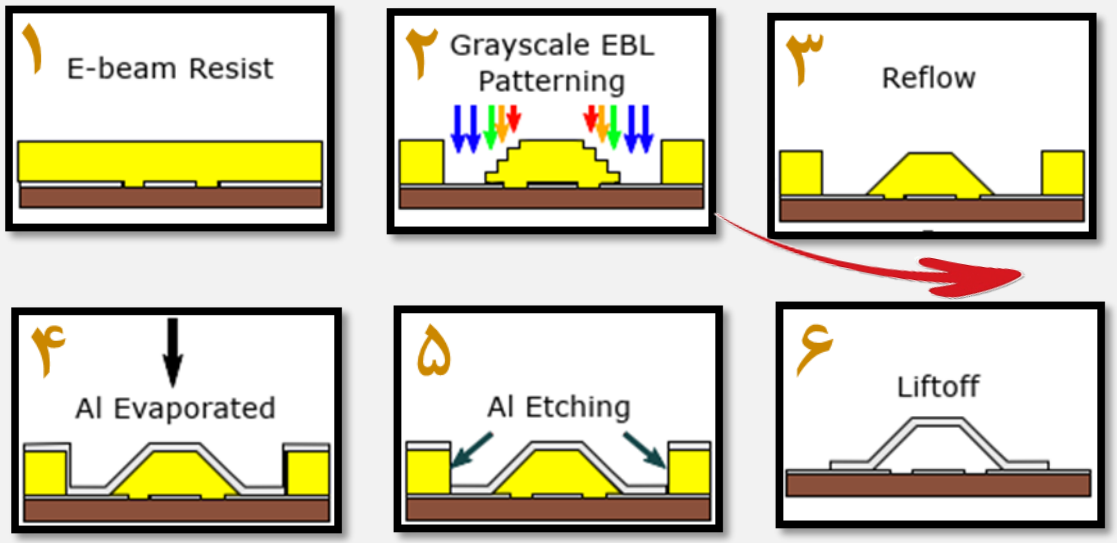
ارسال برای مشخصه یابی و اندازه گیری



ساخت پل های هوایی

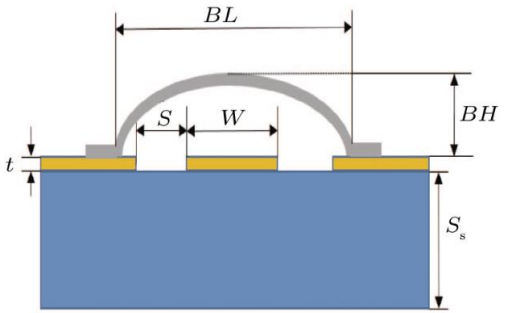


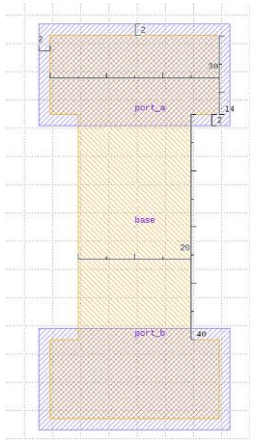
ساخت

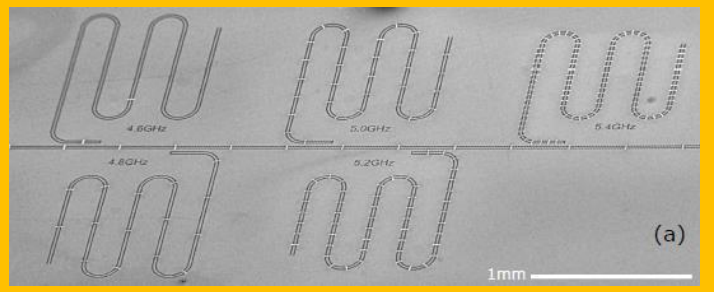


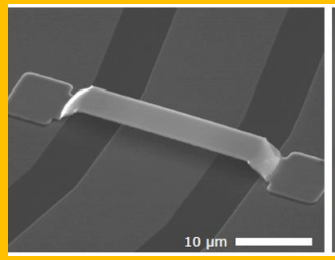
مشخصه یابی

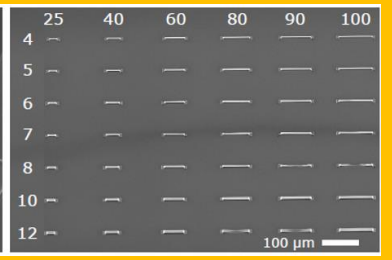
طراحی

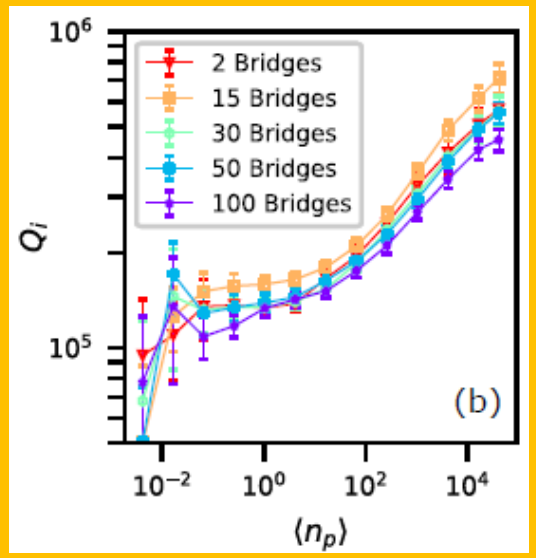












با تشکر از توجه شما

۱۴۰۲

مرکز تحقیقات
فناوری‌های
کوانتومی ایران

Kharazmi University