

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

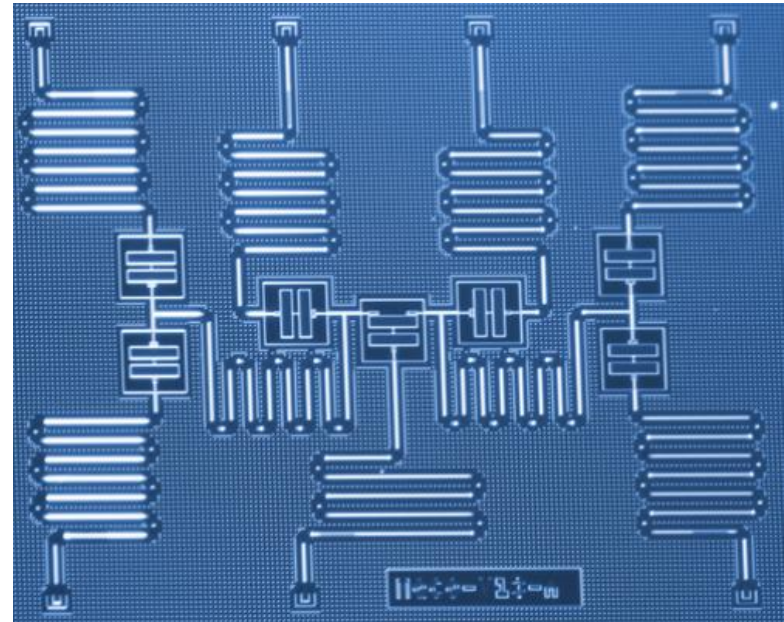
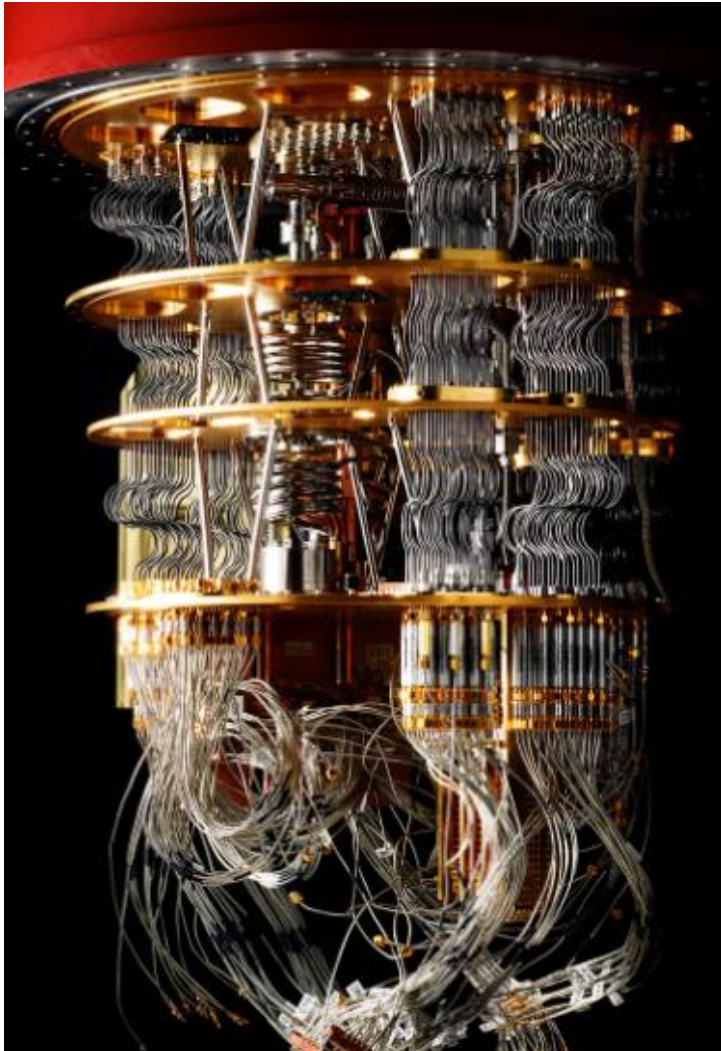


مشخصه یابی و اندازه گیری بیت های کوانتومی ابررسانا

سید ایمان میرزایی

فیزیک ماده چگال دانشگاه تربیت مدرس

۲۶ بهمن ۱۴۰۲



فهرست مطالب

- مقدمه
- چیدمان رایج اندازه گیری بیت های کوانتومی ابررسانا
 - دمای پایین
 - خطوط انتقال موج
 - تجهیزات اندازه گیری
- آزمون های رایج مشخصه یابی و کالیبراسیون
 - خوانش بیت کوانتومی
 - فرکانس رزوناتور و کیوبیت
 - آزمایش رابی
 - آزمایش زمان های واهلش



فناوری های کوانتومی

The quantum technology ecosystem in 2023

Summary of Quantum Technology Monitor findings



Quantum computing

\$9B–\$93B

estimated market size by 2040

\$5.4B

invested
as of Dec 2022

223

start-ups
as of Dec 2022

\$106B

potential quantum technology market
size by 2040¹

350

start-ups in the ecosystem²



\$34B

total government
investment announced

Potential economic value from quantum computing

\$620B–\$1,270B

across four industries by 2035: chemicals,
life sciences, finance, and automotive³

Quantum-capable talent



50

QT master's degree
programs



180

universities with
QT research groups

Scientific progress



1,589

QT-related patents
granted in 2022



44,155

QT-related
publications in 2022

Quantum communications

\$1B–\$7B

estimated market size by 2040

\$1.0B

invested
as of Dec 2022

72

start-ups
as of Dec 2022



Quantum sensing

\$1B–\$6B

estimated market size by 2040

\$0.4B

invested
as of Dec 2022

23

start-ups
as of Dec 2022

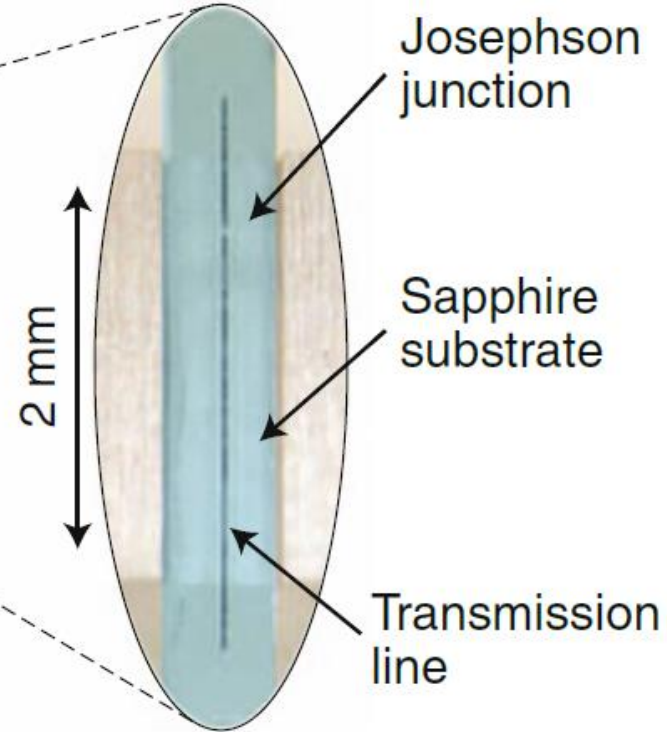
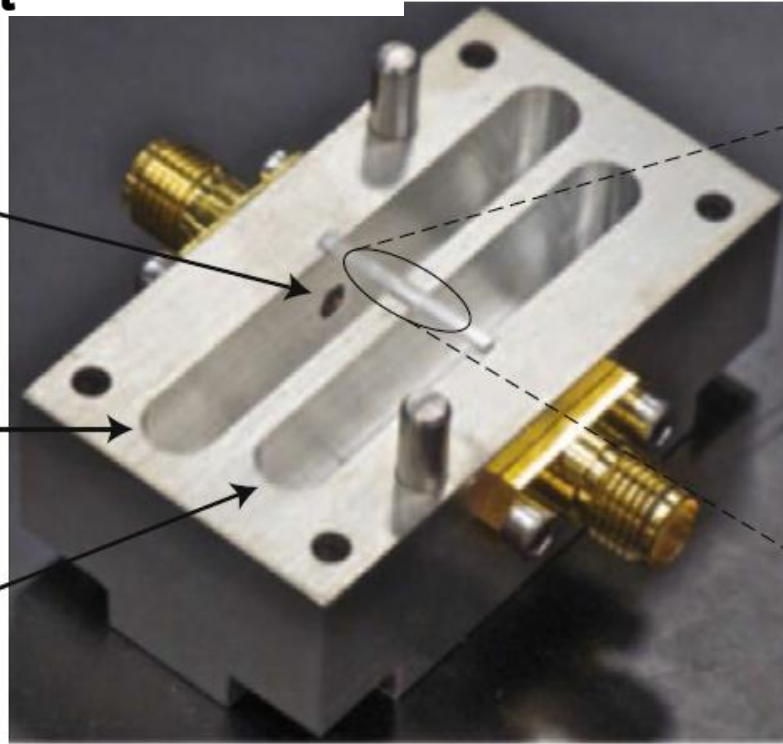
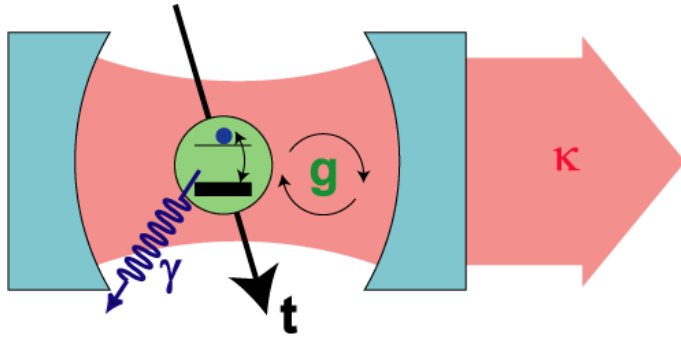
¹ The potential 2040 market size is a sum of the upper ranges across quantum computing, quantum communications, and quantum sensing.

² Total includes 32 companies that do two or more quantum technologies simultaneously.

³ Economic value is defined as the additional revenue and saved costs that the application of quantum computing can unlock. These four industries are the most likely to realize this value earlier than other industries; therefore, they are examined in more depth.



الکترو دینامیک کوانتومی مدار



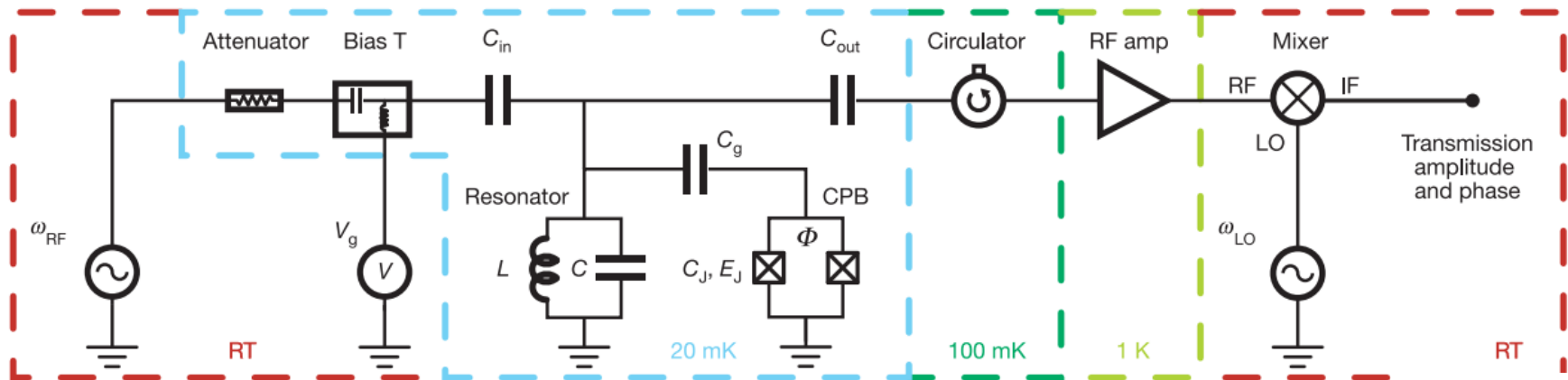
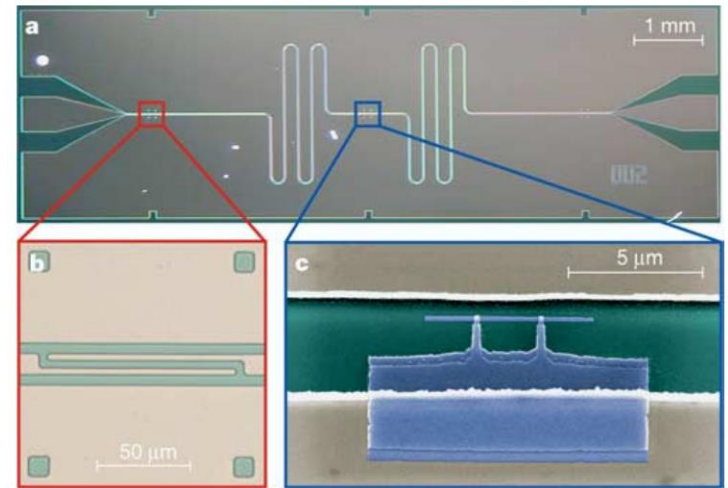
تجمیع کاواک و کیوبیت

Strong coupling of a single photon to a superconducting qubit using circuit quantum electrodynamics

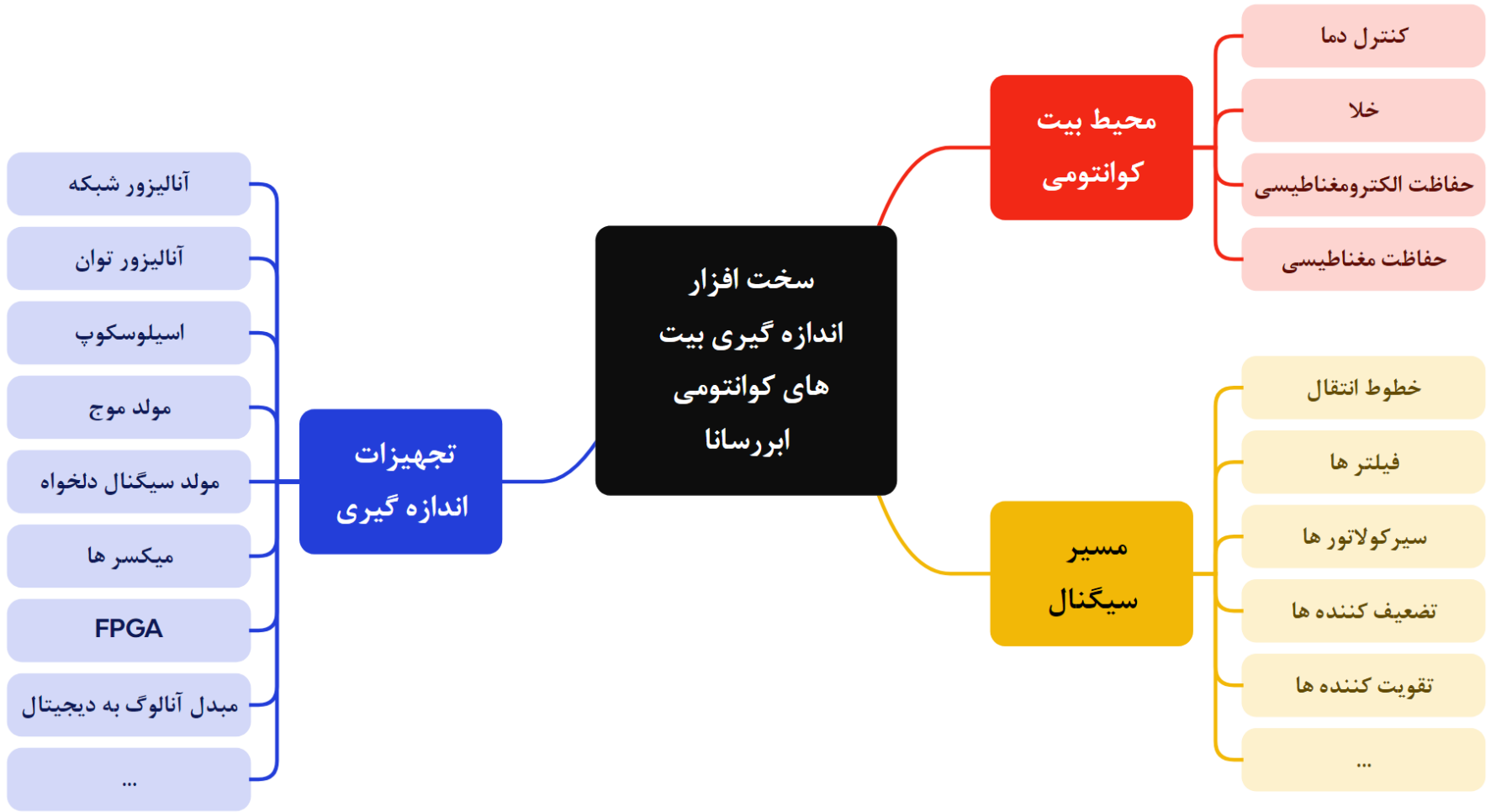
A. Wallraff¹, D. I. Schuster¹, A. Blais¹, L. Frunzio¹, R.- S. Huang^{1,2},
J. Majer¹, S. Kumar¹, S. M. Girvin¹ & R. J. Schoelkopf¹

¹Departments of Applied Physics and Physics, Yale University, New Haven, Connecticut 06520, USA

²Department of Physics, Indiana University, Bloomington, Indiana 47405, USA

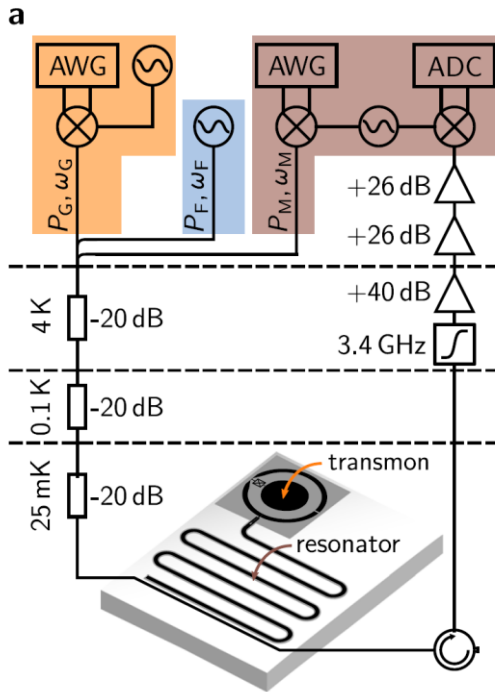


اجزای اساسی اندازه گیری

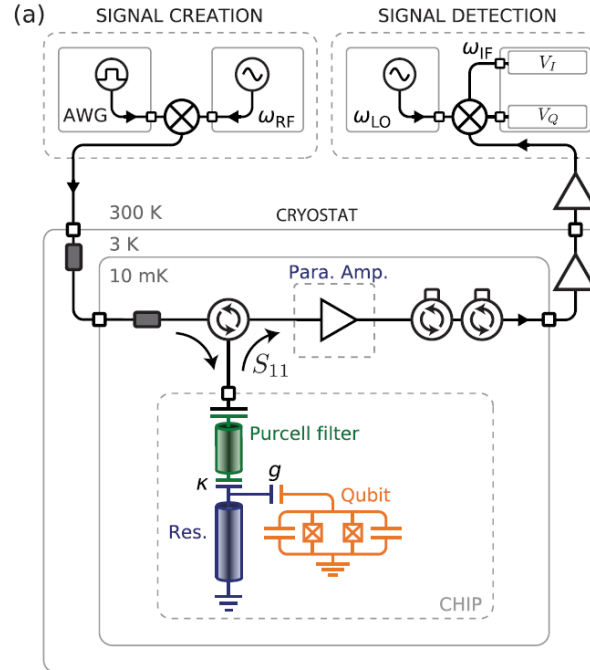


چیدمان آزمایشگاهی: دیاگرام سخت افزار خوانش

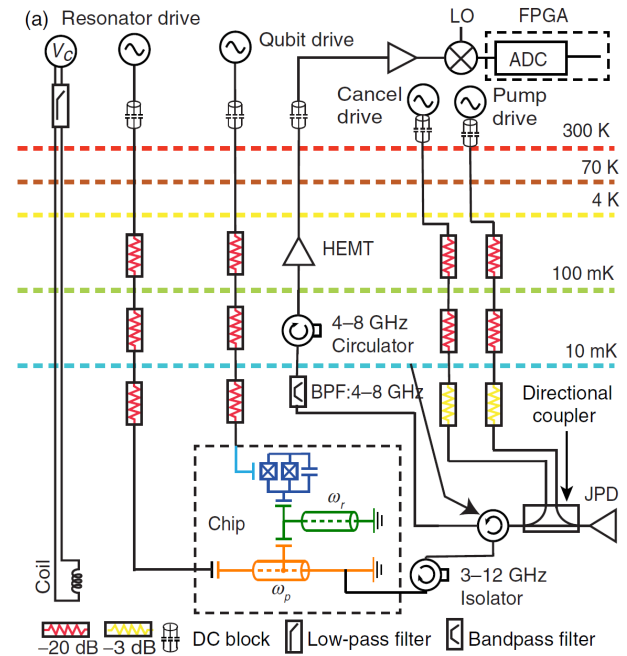
- روش متداول نمایش مسیر خوانش
- عدم نمایش جزئیات سردسازی
- عدم نمایش بعضی از تجهیزات اندازه گیری



npj Quantum Information (2020) 57



Appl. Phys. Rev. 6, 021318 (2019); doi: 10.1063/1.5089550



PHYS. REV. APPLIED 7, 054020 (2017)

چیدمان آزمایشگاهی: نمای کلی

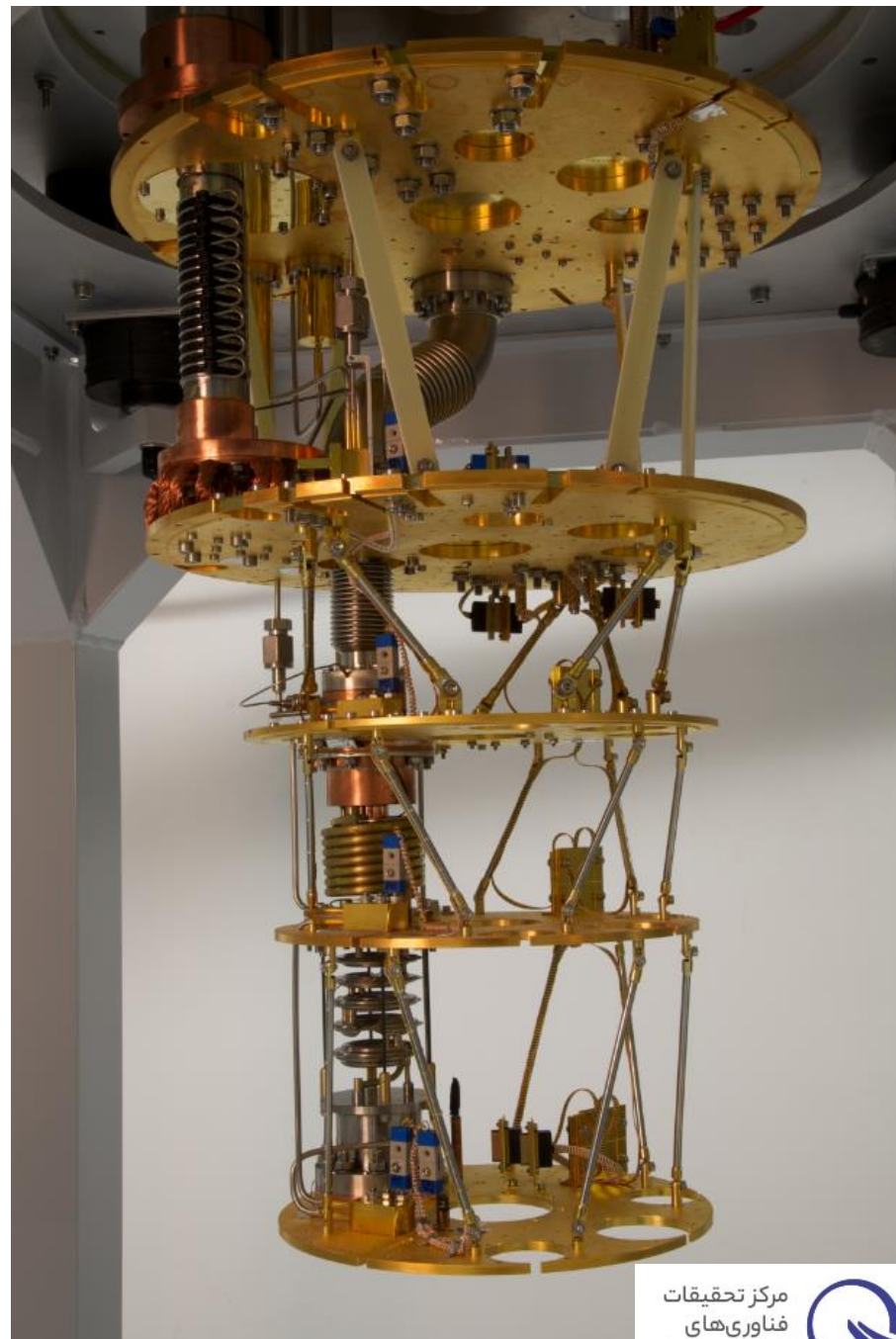


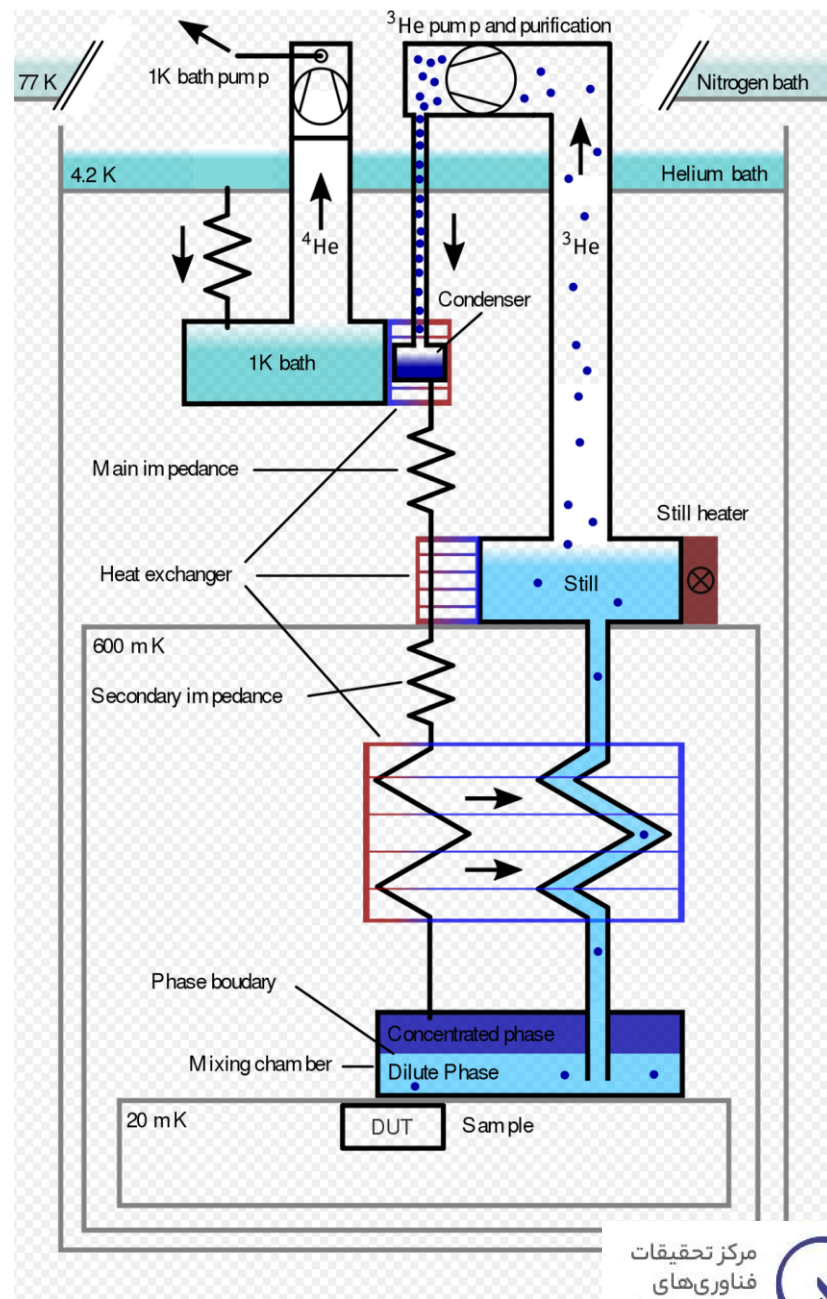
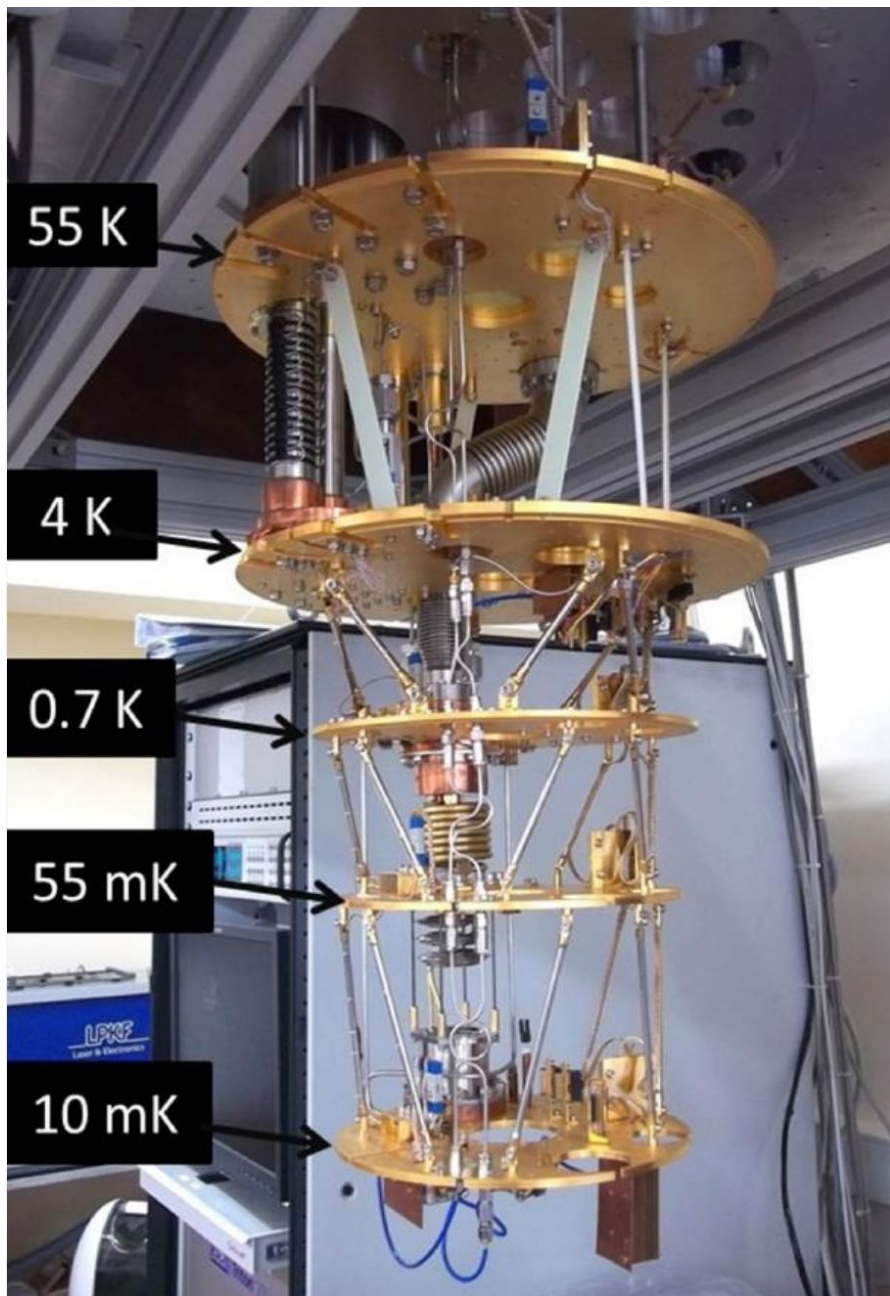
operational
cryostat
&
microwave
wiring

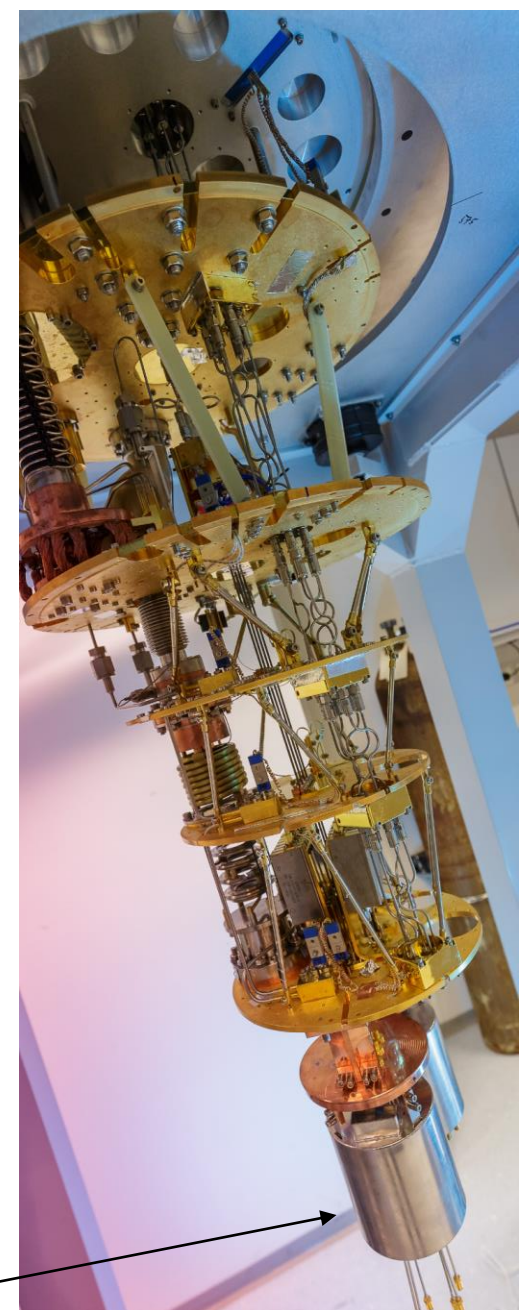
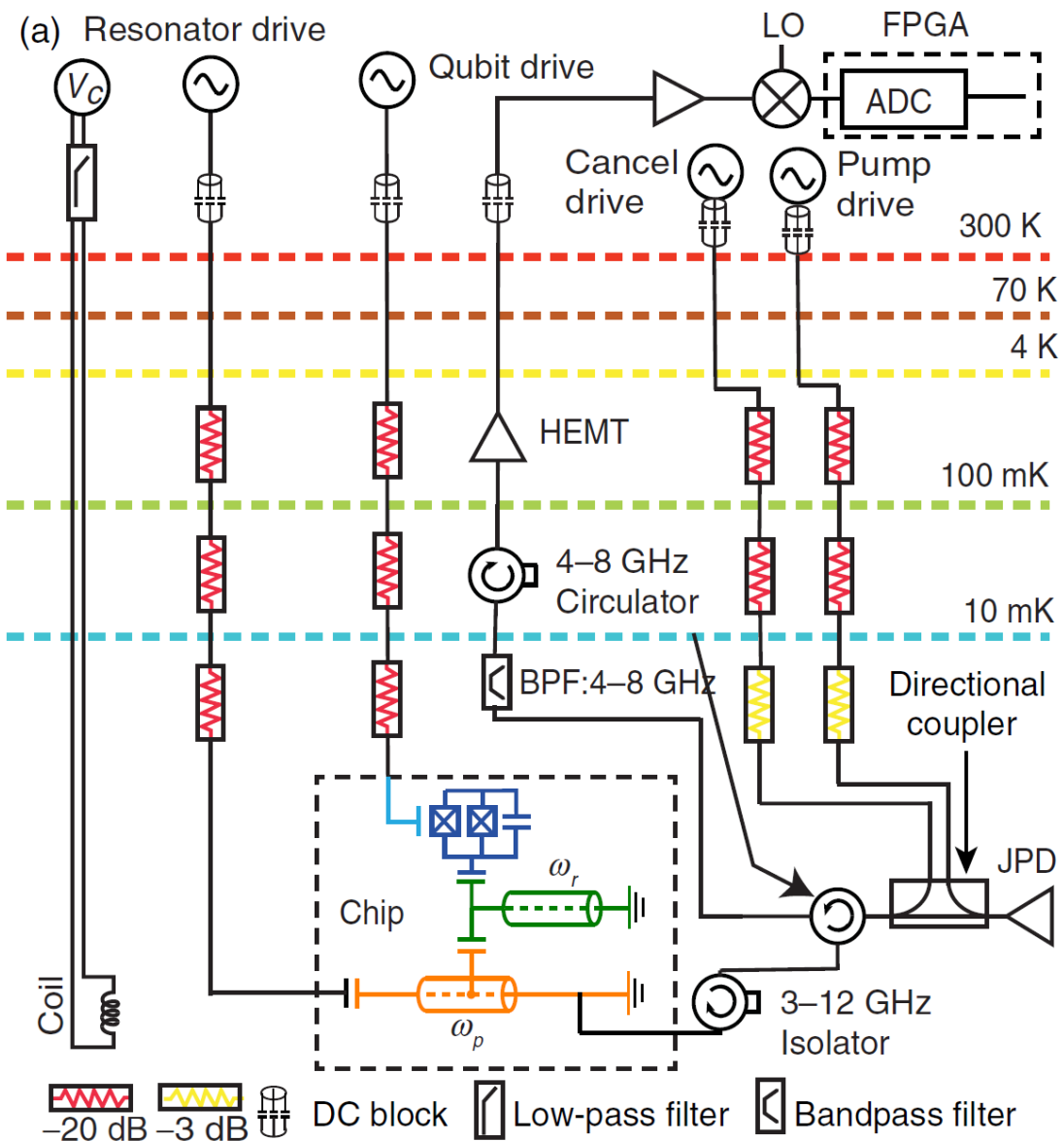
microwave
setup
&
experiment
control
&
pulse
generation

چیدمان آزمایشگاهی: سامانه خنک سازی









محافظت مغناطیسی

خنک سازی با اثر مغناطیس زدایی بی در رو (Adiabatic demagnetization)



چیدمان آزمایشگاهی: مسیر انتقال

خط انتقال فولادی



تضعیف کننده



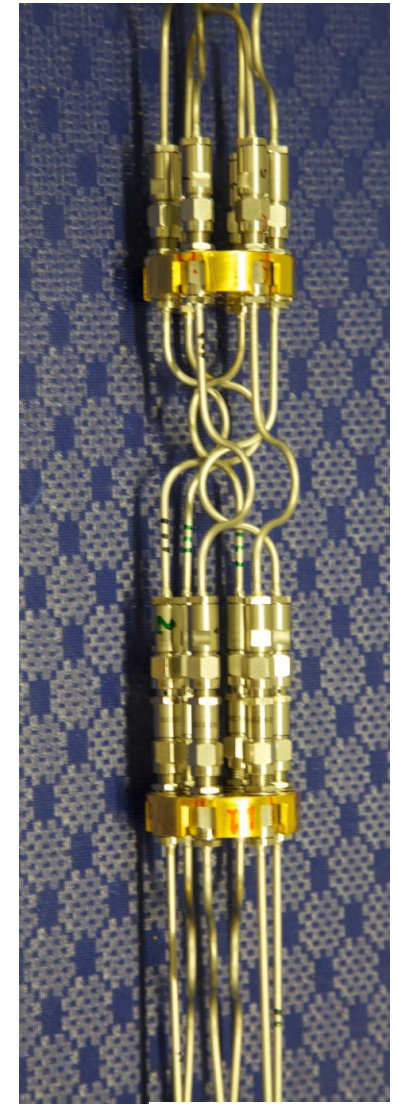
فیلتر میان گذر



تقویت کننده نویز پایین



ایزولاتور (سیرکولاتور)

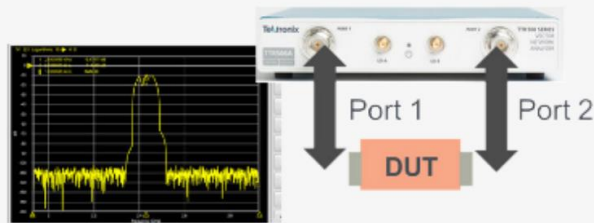


چیدمان آزمایشگاهی: سامانه خنک سازی



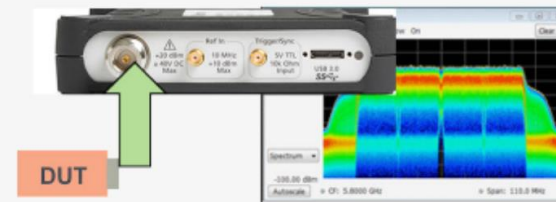
چیدمان آزمایشگاهی: تجهیزات اندازه گیری موج

Network Analyzer



- Contains a source and receiver(s)
- Uses known stimulus
- 2 channels or more
- Ratioed measurements
- Offers advanced calibration, more accurate
- Limited to analog and pulsed signals

Spectrum Analyzer



- Contains a receiver
- Measures unknown signals
- Single channel
- No ratioed measurements
- Limited calibration capability, less accuracy
- Works well with digitally modulated signals

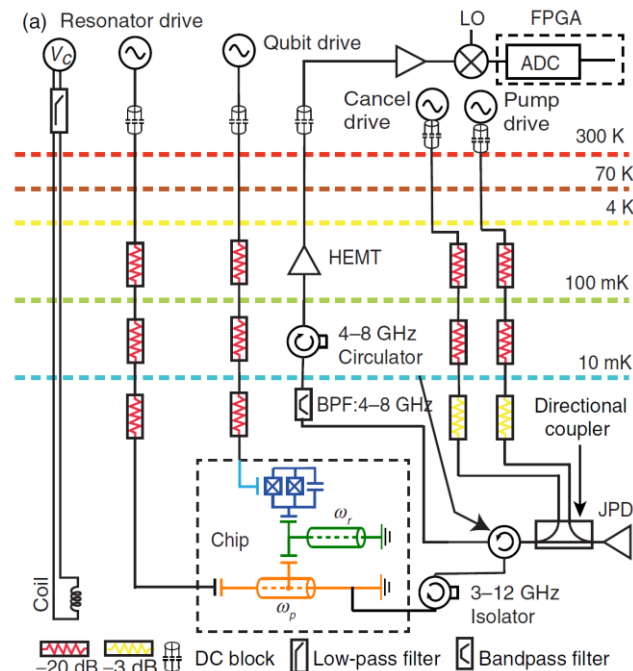


چیدمان آزمایشگاهی: تجهیزات تولید موج



مولد موج دلخواه یا Arbitrary waveform generator (AWG)

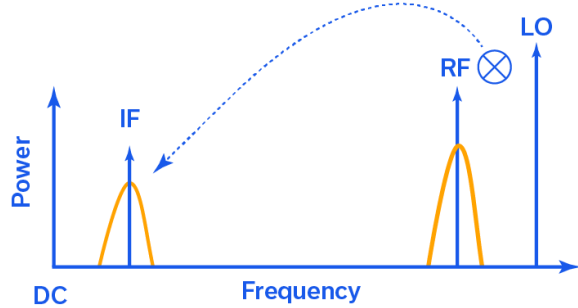
- تولید موج با شکل و فرکانس دلخواه
- قابلیت کنترل و برنامه ریزی شکل موج از نرم افزار



چیدمان آزمایشگاهی: میکسر ها

DOWNCONVERSION

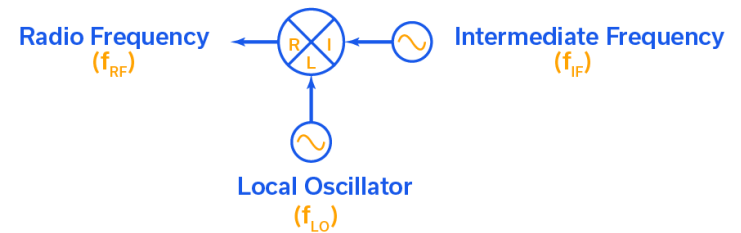
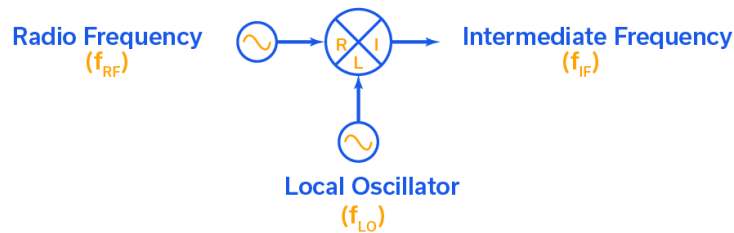
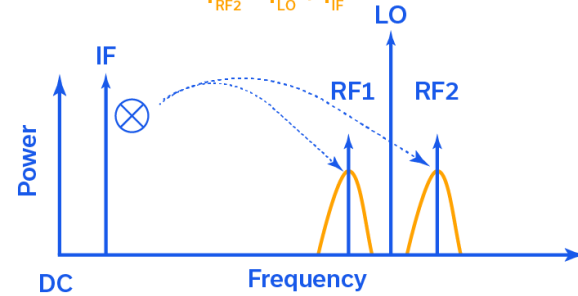
$$f_{IF} = |f_{LO} - f_{RF}|$$



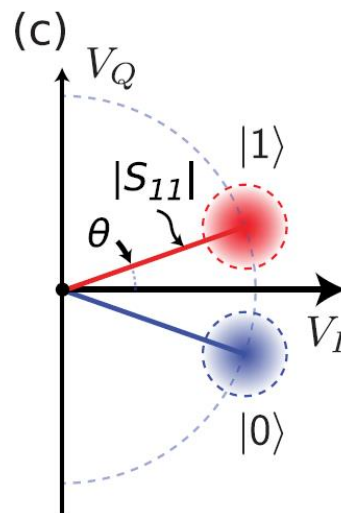
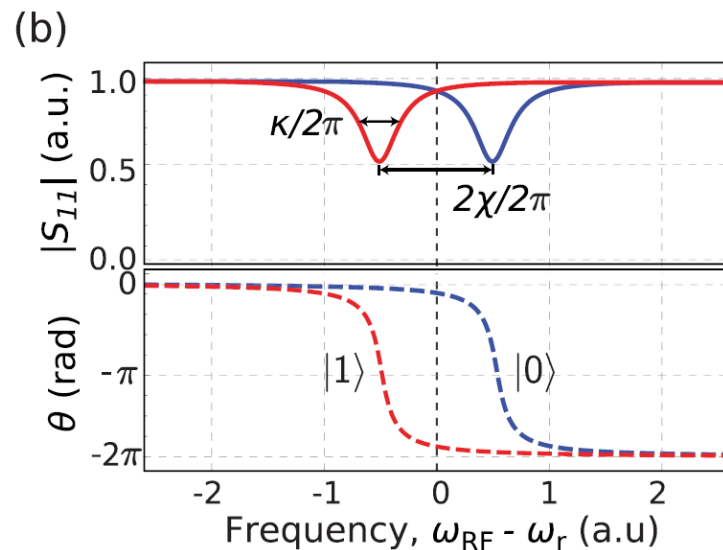
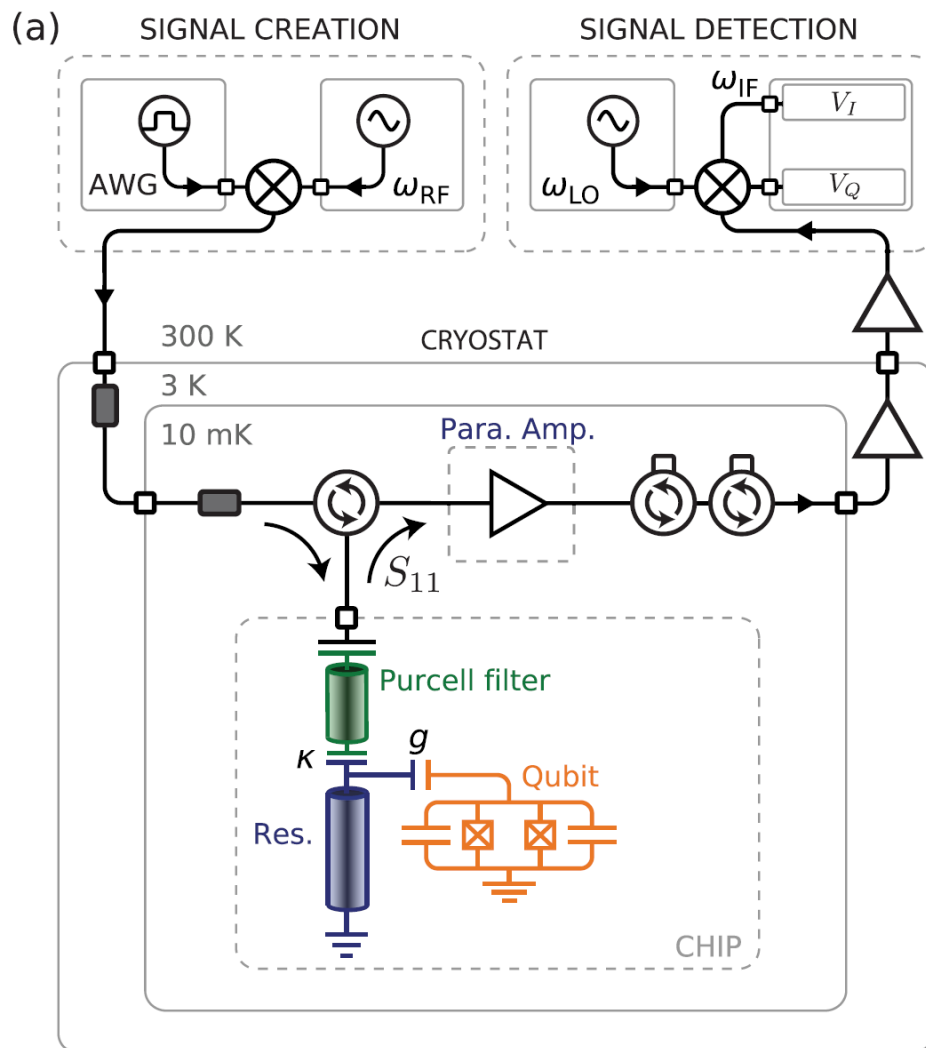
UPCONVERSION

$$f_{RF1} = f_{LO} - f_{IF}$$

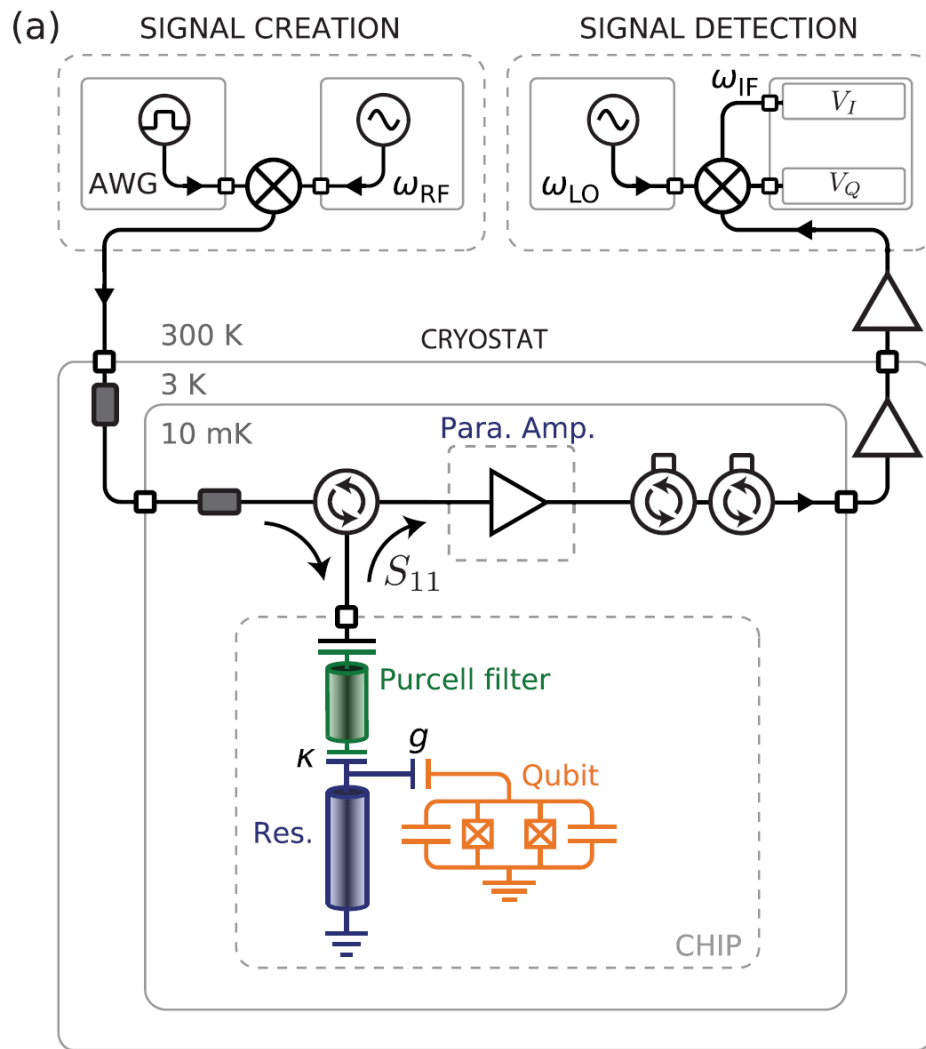
$$f_{RF2} = f_{LO} + f_{IF}$$



مشخصه یابی: مقدمه



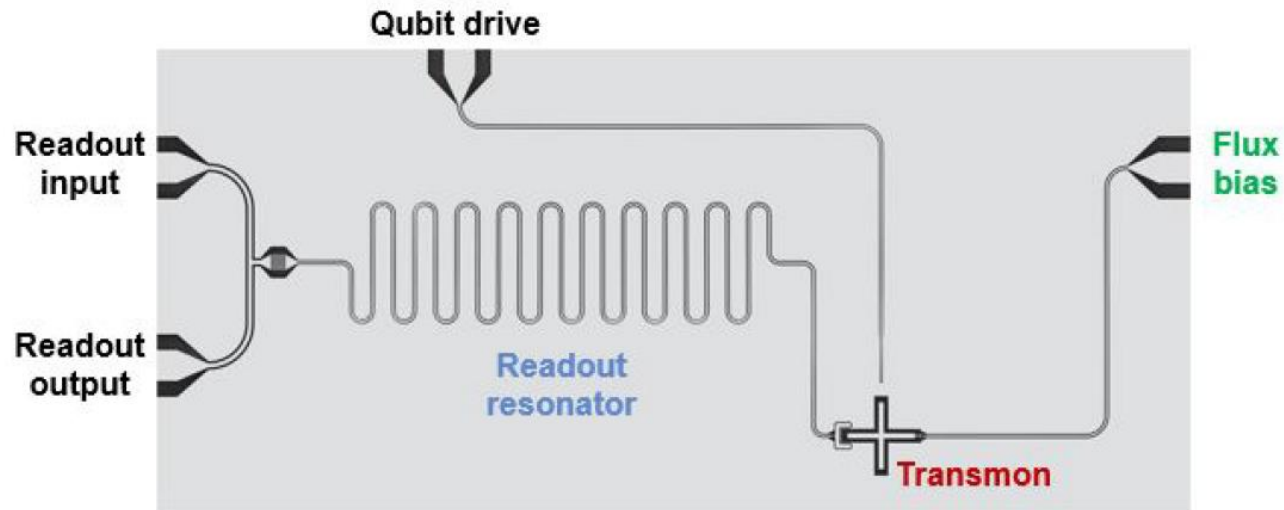
مشخصه یابی: فرکانس کیوبیت و رزوناتور



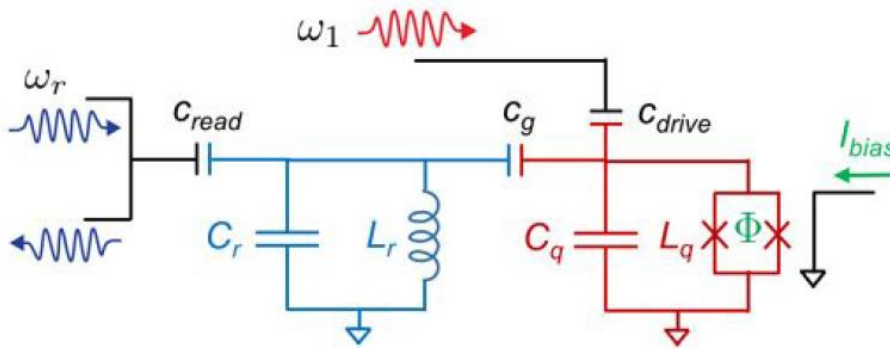
- استفاده از VNA و روبش دقیق
- محدوده پیش بینی شده فرکانسی برای بیت کوانتومی
- وابستگی به قدرت سیگنال و شار مغناطیسی و دیگر عوامل...



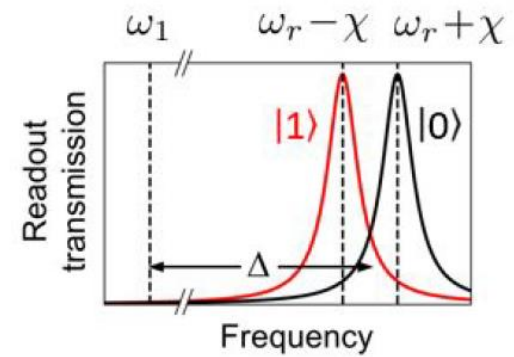
مشخصه یابی: فرکانس کیوبیت و رزوناتور



(a)



(b)

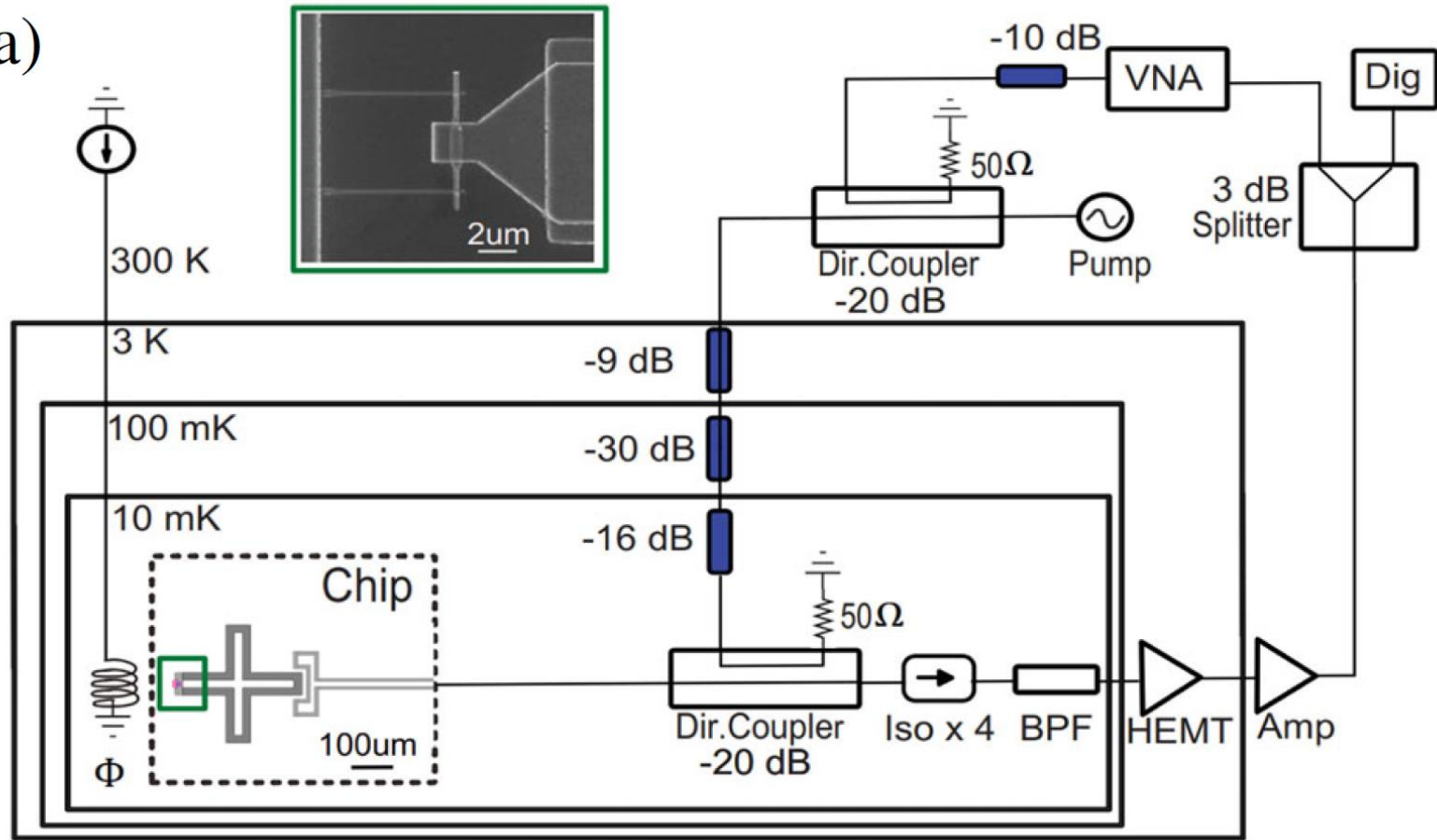


(c)

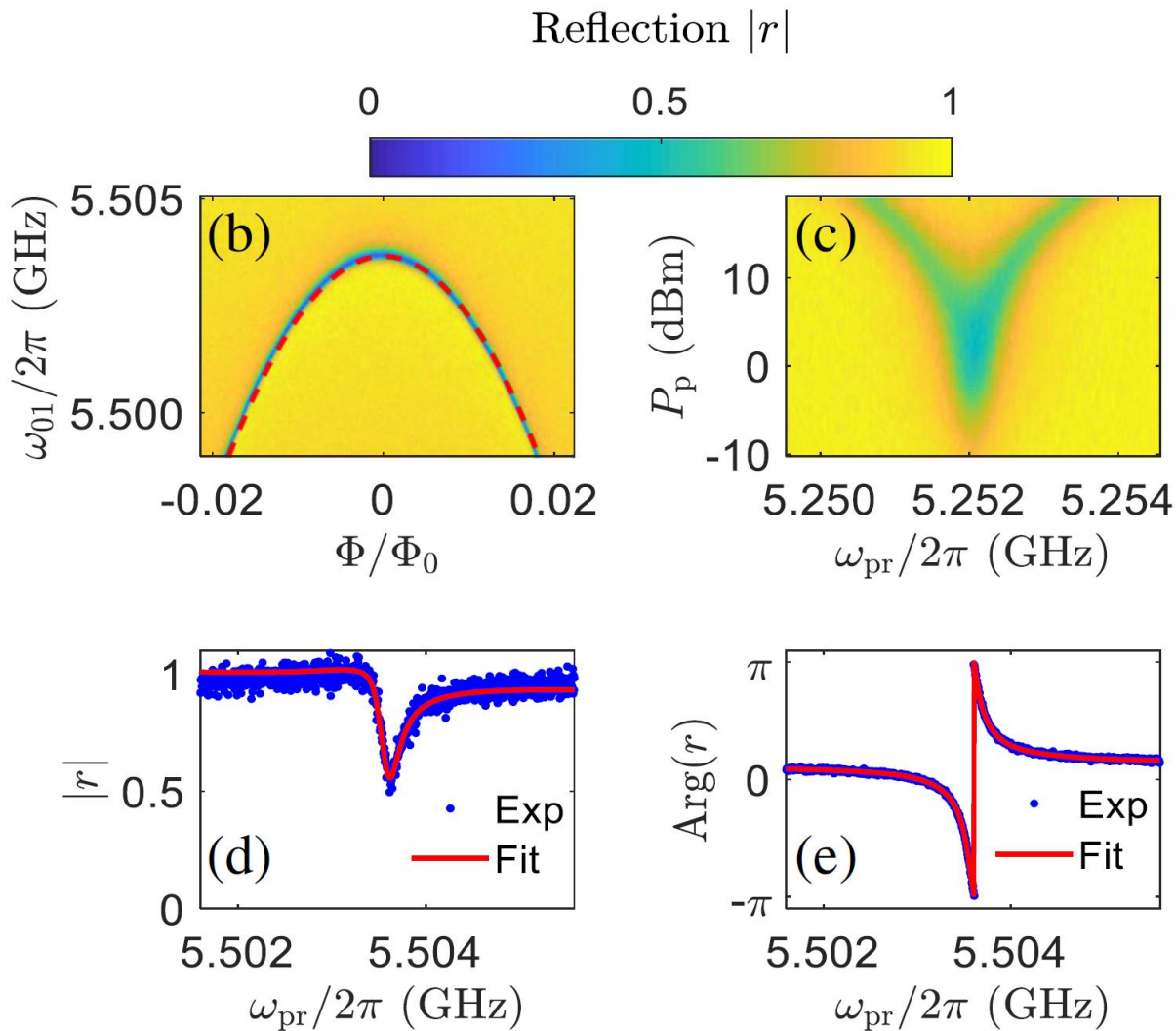


مشخصه یابی: فرکانس کیوبیت و رزوناتور

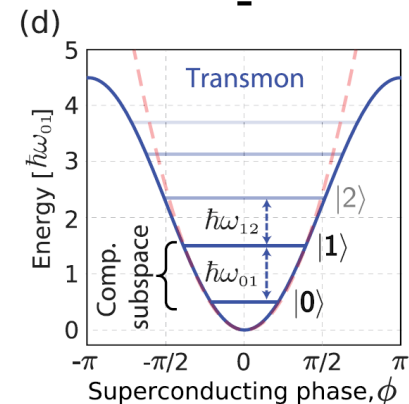
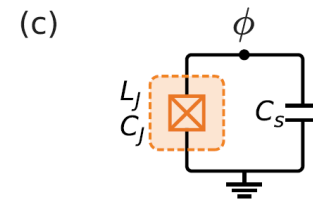
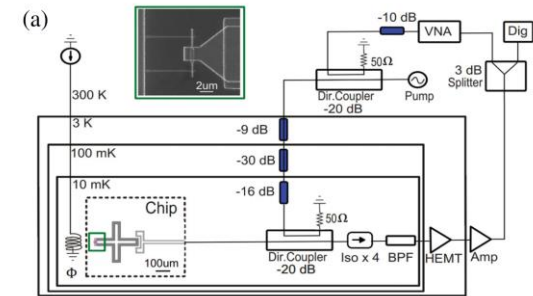
(a)



مشخصه یابی: فرکانس کیوبیت و رزوناتور



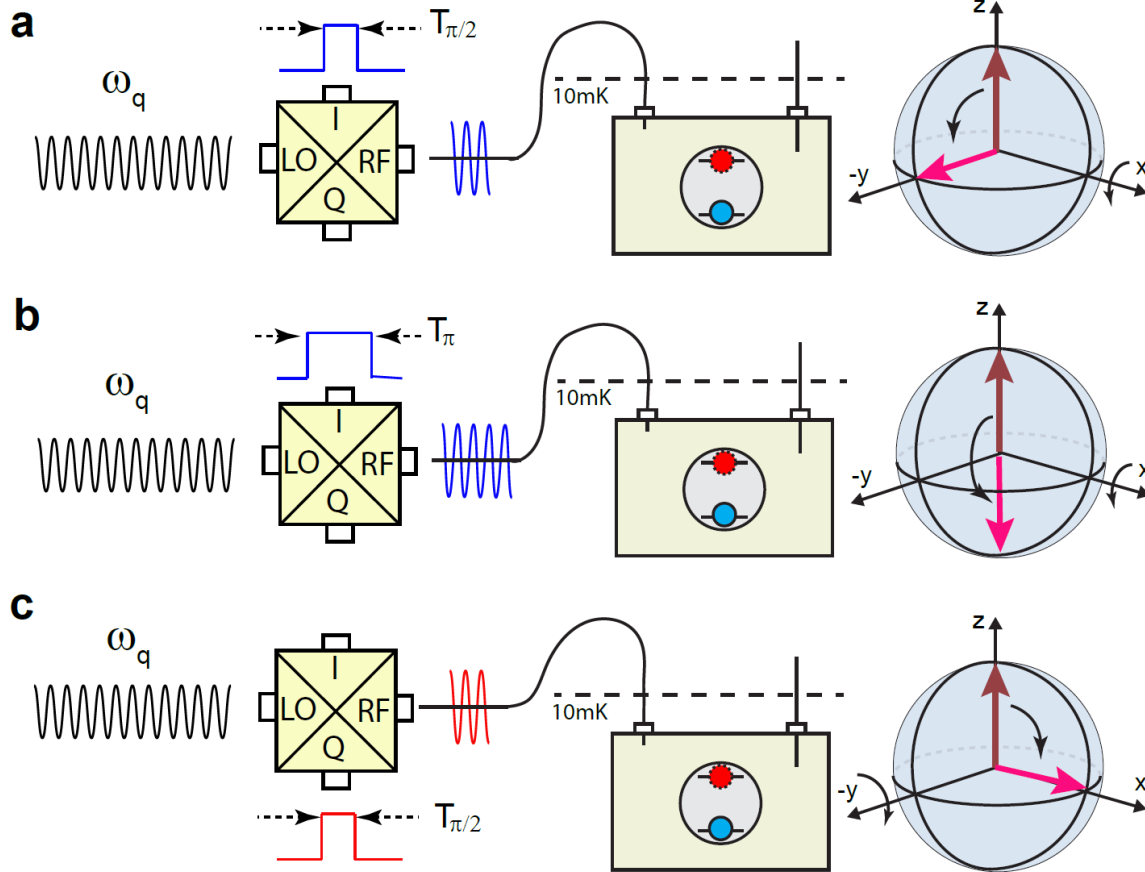
- طیف سنجی تک فرکانسی
- طیف سنجی دو فرکانسی



Appl. Phys. Rev. 6, 021318 (2019); doi: 10.1



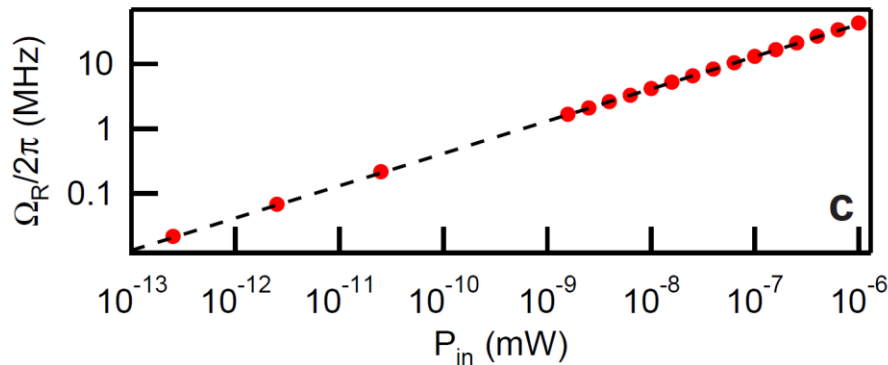
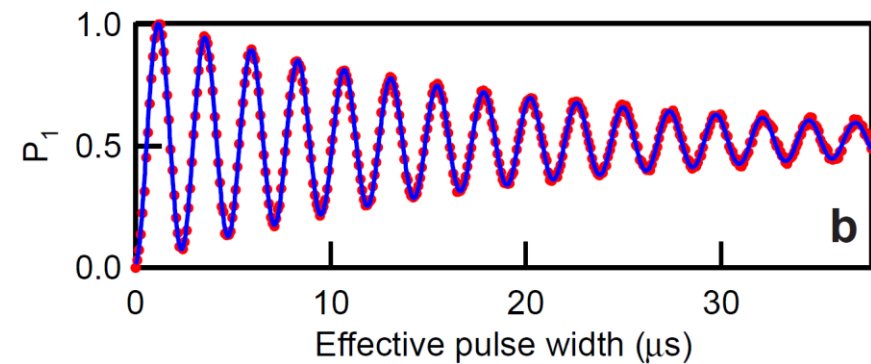
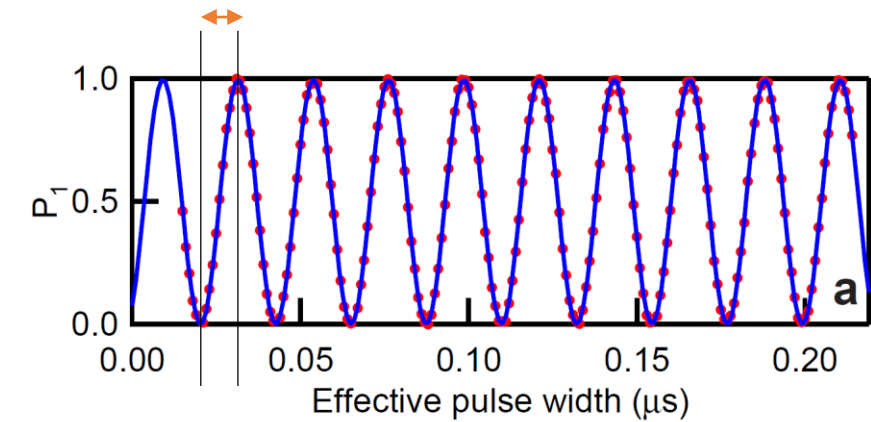
مشخصه یابی: آزمایش رابی



- تغییر وضعیت بیت های کوانتومی از طریق اعمال پالس به آنها
- یافتن طول پالس بهینه؟
- آزمایش رابی

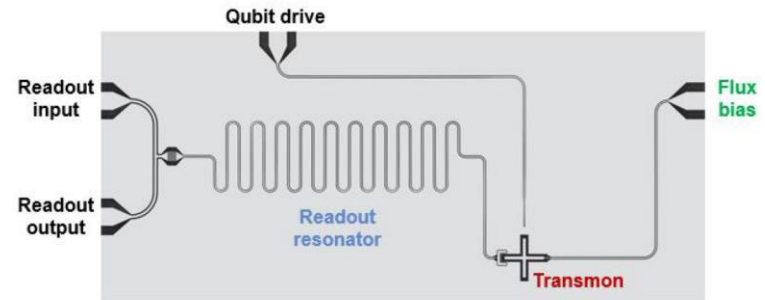


مشخصه یابی: آزمایش رابی

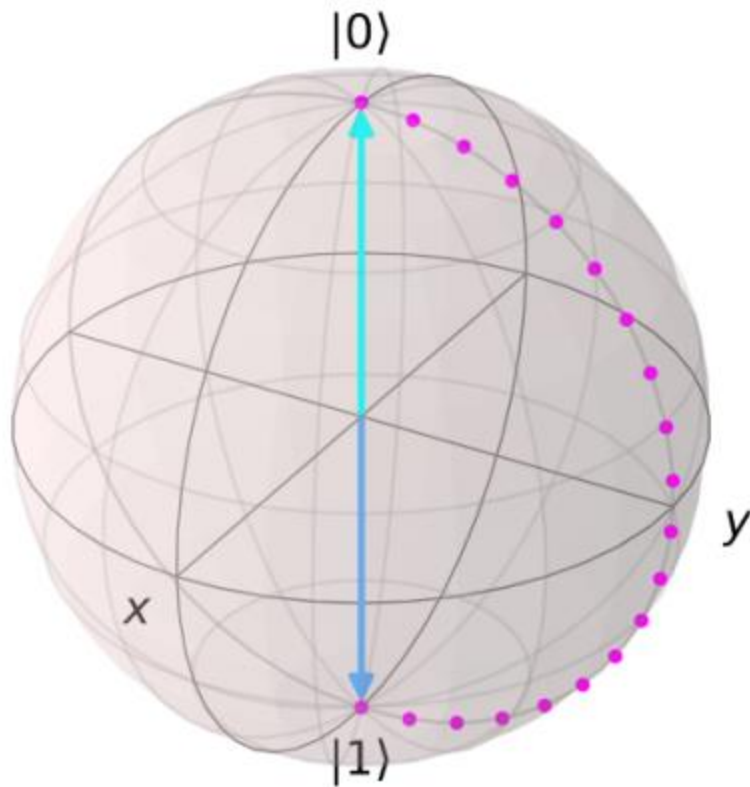


Paik et al. 2011

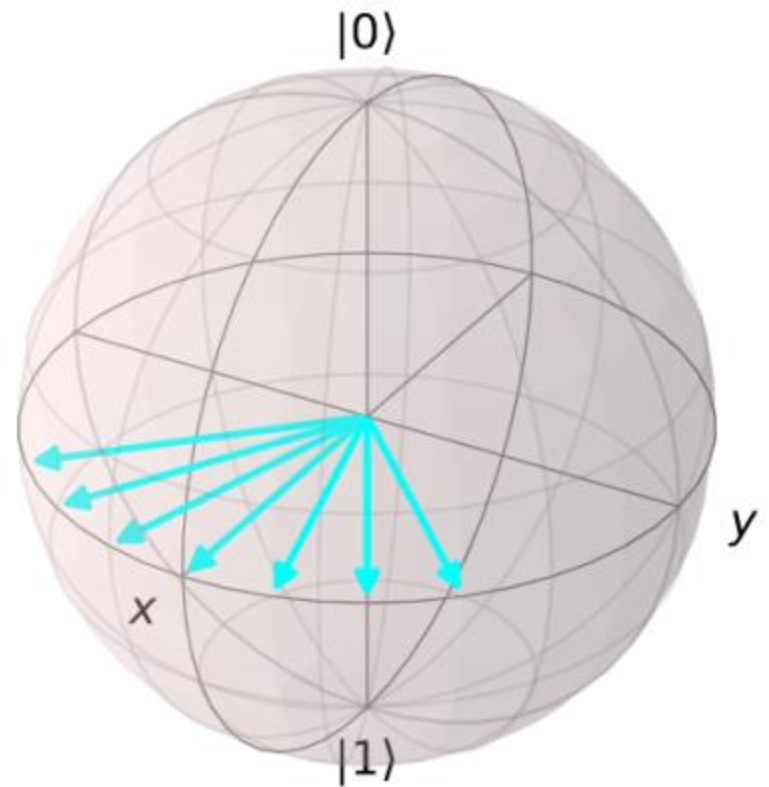
- یافتن طول بهینه پالس ورودی برای چرخش کامل (π) بیت کوانتومی
- اعمال مستقیم پالس به کیوبیت
- خواندن بلافاصله وضعیت از طریق رزوناتور
- پیک نشان دهنده طول بهینه است



مشخصه یابی: زمان های واهلش

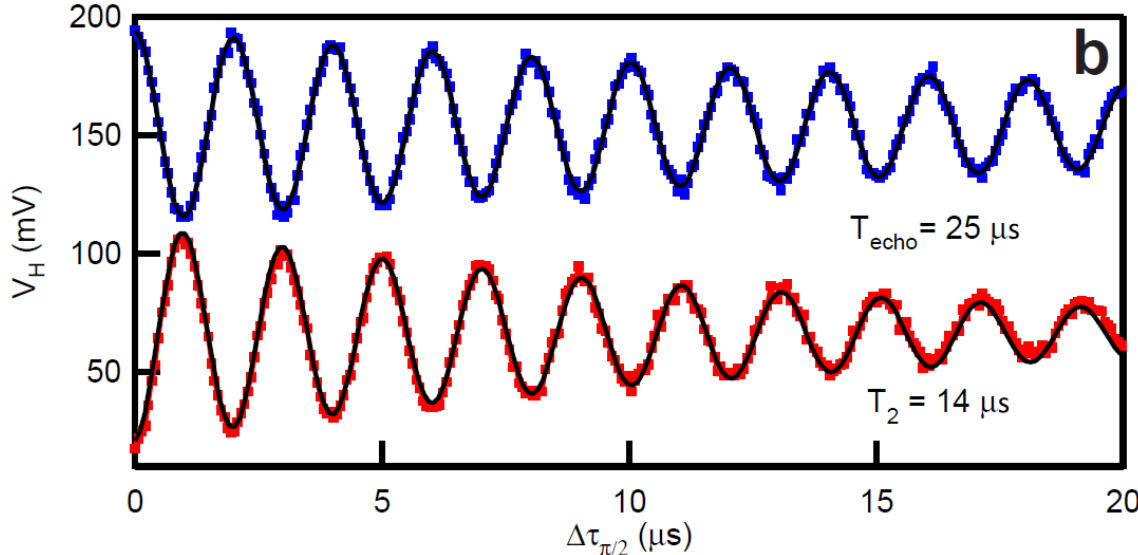
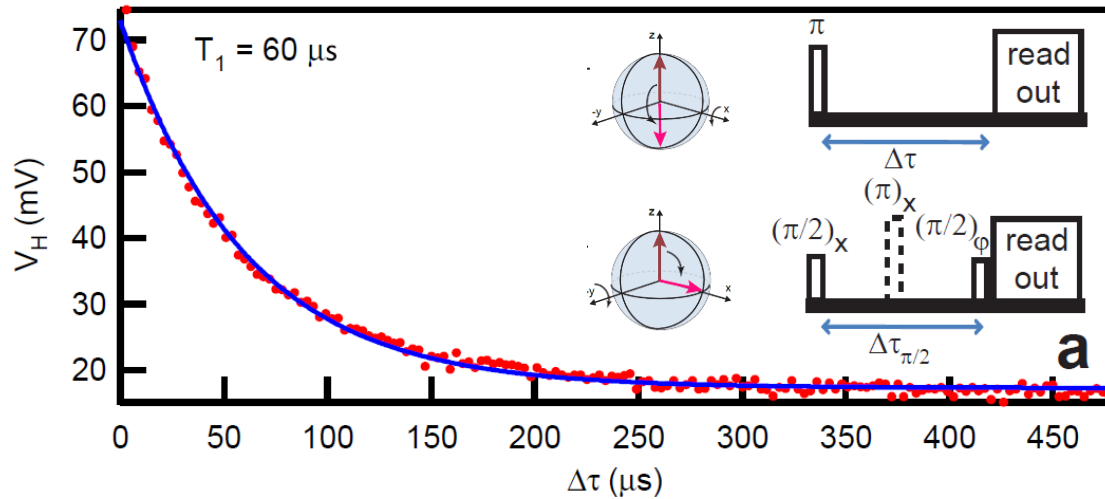


(a) Relaxation



(b) Pure dephasing

مشخصه یابی: زمان های واهلش

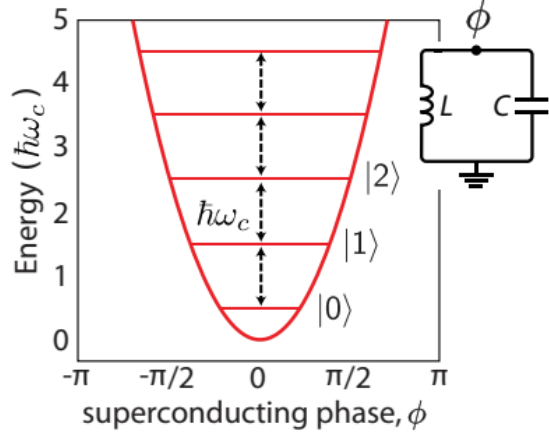


- یافتن زمان واهلش T1
 - تحریک کیوبیت به حالت ۱
 - صبر کردن به اندازه $\Delta\tau$
 - اندازه گیری وضعیت
 - تکرار برای تاخیر های مختلف
 - برازش نمودار و یافتن ضریب افت
- یافتن زمان وافازی T2 (آزمایش رمزی Ramsey)
 - آماده سازی در حالت میانی با اعمال پالس $\frac{\pi}{2}$
 - صبر کردن به اندازه $\Delta\tau$
 - اعمال مجدد پالس $\frac{\pi}{2}$
 - اندازه گیری بلافاصله
 - تکرار برای تاخیر های مختلف
 - برازش نمودار
 - انجام آزمایش رمزی به همراه اکو:
 - به منظور کاهش نویز های فرکانس پایین در اندازه گیری T2

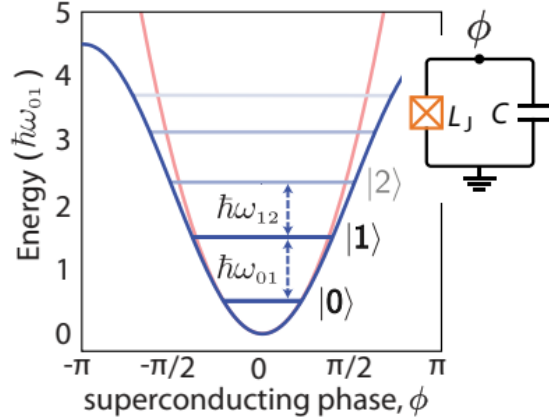


زمان همدوسی کیوبیت

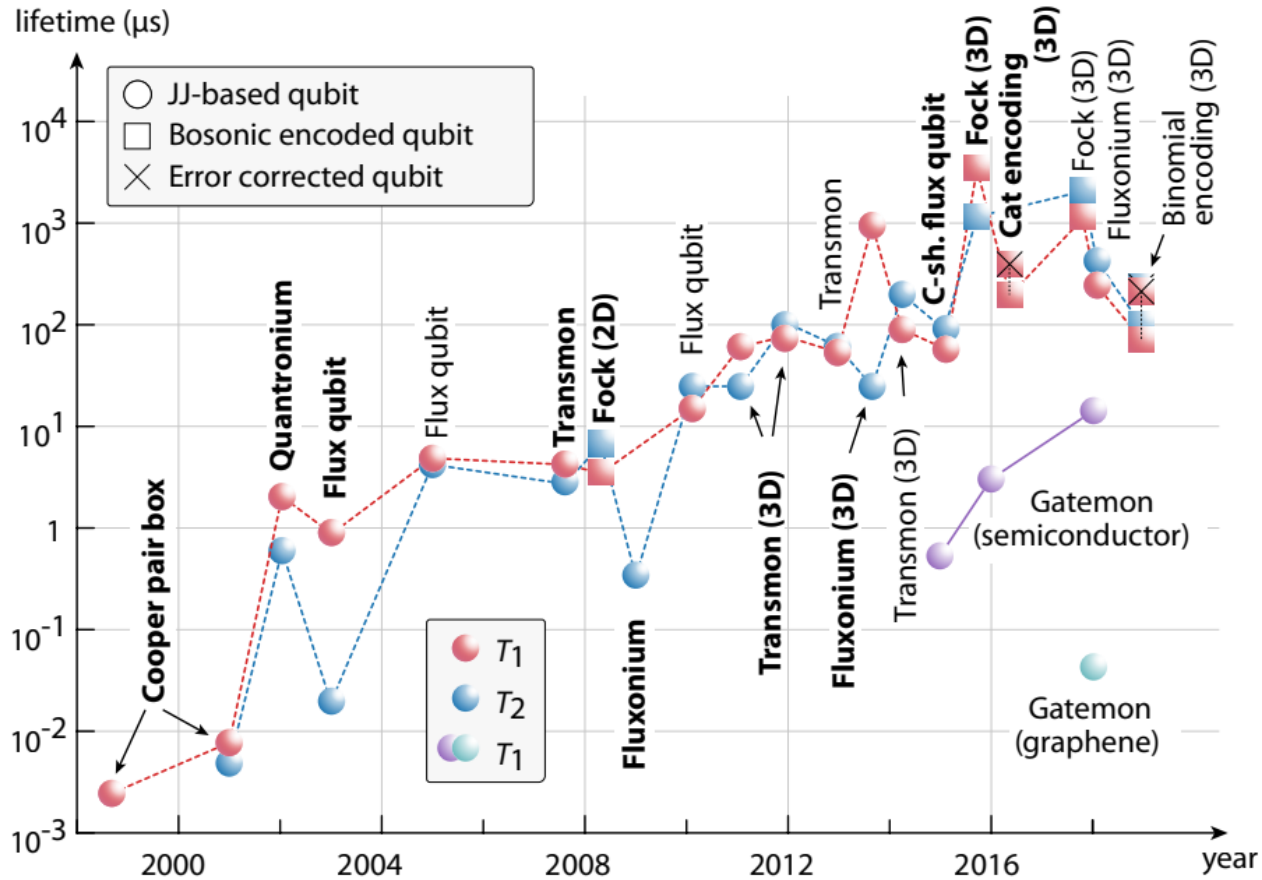
a quantum harmonic oscillator



b Transmon



c



با تشکر

