

3D-Transmon 与压电振子的量子耦合系统^{*}

卢盛, 潘佳政, 李子硕, 卢亚鹏, 江俊良, 魏兴雨

涂学凑, 曹春海, 孙国柱[†], 吴培亨

南京大学电子科学与工程学院超导电子学研究所, 南京 210023

收稿日期: 2019-09-19; 接收日期: 2020-01-05

【摘要】 微机械振子在量子信息领域有着重要的应用, 可用作量子存储器、量子换能器等. 鉴于三维传输量子比特(3D-Transmon)优良的退相干特性以及 AlN 压电振子较高的谐振频率, 我们利用微纳加工技术, 在蓝宝石基片上成功制备了 3D-Transmon 与 AlN 压电振子的量子耦合系统. 实际测量结果显示, 在外加磁场偏置下, 量子比特的跃迁频率可调范围为 4.1~9.8 GHz, 能量弛豫时间 T_1 约为 4.7 μs , 并且测量到了能级交叉现象. 这些结果为今后超导量子比特与微机械振子耦合系统的深入研究提供了重要参考.

关键词: 超导量子比特, 压电振子, 量子耦合系统, 微纳加工

PACS: 74.20.Mn, 74.25.Jb, 77.55.hd

DOI: 10.13380/j.ltpl.2019.05.004

Quantum Coupled System Based on 3D-Transmon and Piezoelectric Oscillator

LU Sheng, PAN Jiazheng, LI Zishuo, LU Yapeng, JIANG Junliang,

WEI Xingyu, CAO Chunhai, TU Xuecou, SUN Guozhu[†], WU Peiheng

Research Institute of Superconducting Electronics, School of Electronic Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023

Received date: 2019-09-19; accepted date: 2020-01-05

【Abstract】 Micromechanical oscillators have important applications in the field of quantum information, such as being quantum memory, quantum transducer and so on. Considering the excellent coherence of 3D-Transmon and the high resonant frequency of AlN piezoelectric oscillator, we fabricated a quantum coupled system of 3D-Transmon and piezoelectric oscillator on sapphire substrate using micro-nanofabrication technology. The experiment results show that the transition frequency of 3D-Transmon can be adjusted from 4.1 GHz to 9.8 GHz with a tunable external magnetic field, and the energy relaxation time T_1 is about 4.7 μs . An avoid crossing in the spectrum is also measured. These results may help a lot in the further study of the superconducting qubit and micromechanical oscillator coupled systems.

Keywords: Superconducting Quantum Bits, Piezoelectric Oscillators, Quantum Coupled Systems, Micro-nanofabrication

PACS: 74.20.Mn, 74.25.Jb, 77.55.hd

DOI: 10.13380/j.ltpl.2019.05.004

Reference method: LU Sheng, PAN Jiazheng, LI Zishuo, LU Yapeng, JIANG Junliang, WEI Xingyu, CAO Chunhai, TU Xuecou, SUN Guozhu[†], WU Peiheng, Low. Temp. Phys. Lett. **41**, 0349 (2019)

^{*} 国家自然科学基金面上项目(11474154)、江苏高校优势学科建设工程资助项目、中央高校基本科研业务费、南京大学登峰计划等专项资金资助的课题.

[†] gzsun@nju.edu.cn

1 引言

随着摩尔定律不断逼近物理极限,传统半导体计算机的发展受到严重的约束.量子计算机由于具有优越的并行特性,在大数分解、快速搜索以及量子态演化模拟等方面有着巨大的应用潜力^[1].而超导量子比特由于其良好的拓展性、易操控性以及良好的退相干特性成为量子计算机最佳的实现方案之一^[2-4].

超导量子计算不但要解决多个量子比特之间的耦合,还要解决如何存储、传输量子信息.其中实现量子信息存储的一种方案是将超导量子比特与微机械振子耦合,通过机械振动来实现量子信息的转换以及调控^[5-8].2004年加州大学圣芭芭拉分校 Cleland 团队实现了超导相位量子比特与压电声子的耦合^[9];2014年 Gustafsson 等人实现了声表面波与人工原子的耦合^[10];2017 耶鲁大学 Yiwen Chu 等人实现了蓝宝石片上超导比特与压电声子的强耦合^[11].

三维传输子量子比特(3D-Transmon)由于其具备很高的 Q 值以及简单的器件结构,是研究单个量子比特的诸多量子特性的理想平台^[12].另一方面, AlN 振子由于其谐振频率高(可以达到 GHz)以及易加工等特性,是理想的声子振动的来源.本研究通过紫外光刻、ICP 刻蚀、电子束曝光、电子束蒸发等一系列微加工技术,成功制备出了基于蓝宝石基片的量子耦合系统,在谐振频率约为 8 GHz 的三维谐振腔内实现 3D-Transmon 与 AlN 振子的耦合,并通过量子测量系统完成了能谱、能量弛豫时间、拉比振荡等重要参数的测量.

2 耦合系统设计

2.1 可调量子比特的设计

要将 3D-Transmon 与 AlN 振子耦合起来,必须使得量子比特的跃迁频率与 AlN 振子的谐振频率相一致.这里使用具有 dc-SQUID(Direct Current Superconducting Quantum Interference Device)结构的 3D-Transmon 来实现对于跃迁频率的调制^[13].dc-SQUID 是一种由两个约瑟夫森结通过超导环路构成的非线性可调器件,其基本结构如图 1 所示.

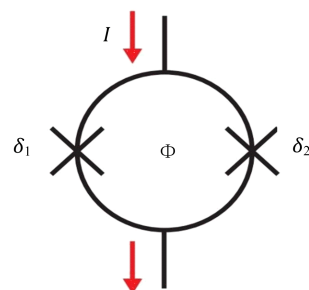


图 1 dc-SQUID 结构示意图

根据约瑟夫森方程

$$I(t) = I_C \sin[\delta(t)]$$

其中 δ 表示约瑟夫森结两端的相位差, I_C 为临界电流.可以得到 dc-SQUID 的超导电流与外加磁通的关系为

$$I(\Phi) = I_C [\sin(\delta_1) + \sin(\delta_2)]$$

考虑到外加磁通满足

$$\Delta\delta = 2\pi \frac{\Phi}{\Phi_0}$$

其中 Φ_0 为磁通量子,可以推导出

$$I(\Phi) = 2I_C \sin\left(\frac{\delta_1 + \delta_2}{2}\right) \cos\left(\frac{\pi\Phi}{\Phi_0}\right)$$

取电流最大有效值,则

$$I(\Phi) = 2I_C \left| \cos\left(\frac{\pi\Phi}{\Phi_0}\right) \right|$$

上式表明 dc-SQUID 的超导电流随着外加偏置磁场呈周期性变化.

考虑到 Transmon 中基态和第一激发态之间的跃迁频率 f_{01} 与约瑟夫森耦合能 E_J 以及约瑟夫森电荷能 E_C 的关系^[14]

$$f_{01} = \sqrt{8E_J E_C} / h$$

$$E_J = \frac{\hbar I_C}{2e}$$

可以得到跃迁频率与外加磁通的关系为

$$f_{01} = f_C \sqrt{\left| \cos\left(\frac{\pi\Phi}{\Phi_0}\right) \right|}$$

其中

$$f_C = \sqrt{\frac{4I_C E_C}{\pi e h}}$$

其数学图像如图 2 所示.

由此可见,我们可以制备参数合适的约瑟夫森结来实现一个可调范围覆盖 AlN 振子谐振频率的 3D-Transmon.

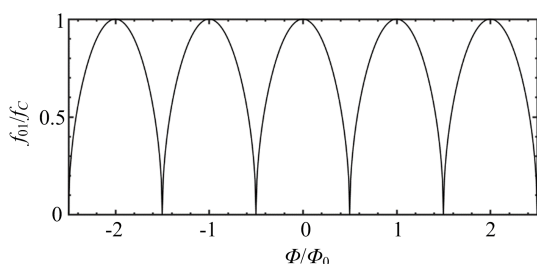


图2 量子比特跃迁频率与外加磁通量关系

2.2 压电振子的设计

对于薄片圆柱形压电振子(如图3所示),其厚度伸缩和频率满足^[15]

$$f_p \approx \frac{c}{2l}$$

其中 c 为声波在该介质中的传播速度, l 为厚度.

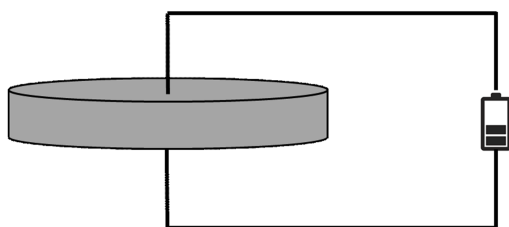
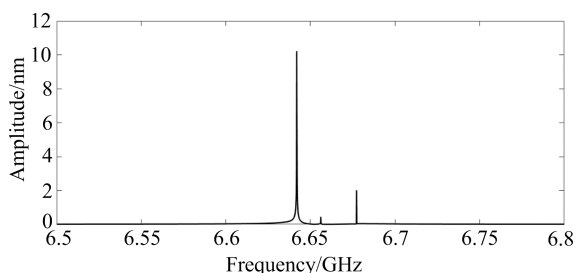


图3 薄片圆柱压电振子

对于厚度为 1000 nm 的 AlN 压电振子,用电磁仿真软件进行模拟得到如图4所示的结果.


 图4 AlN 振子的本征频率

仿真结果表明压电振子的本征频率在 6.65 GHz 左右,并且存在数个不同频率的副峰.

2.3 3D-Transmon 与 AlN 振子的耦合

3D-Transmon 与 AlN 振子的设计已经完成,在实际实验中只需要通过外置线圈调节 dc-SQUID 中的磁通量大小,即可以使得 3D-Transmon 的跃迁频率与压电振子的本征频率一致.

在这种情况下,3D-Transmon 两个平行极板之间的电势会引起压电振子的振动,从而实现二者之

间的能量耦合与传输.

3 样品制备

由于需要在 3D-Transmon 结构的基础上加入 AlN 压电振子,所以在工艺上和 3D-Transmon 的制备稍有不同,其基本制备流程如图5所示.

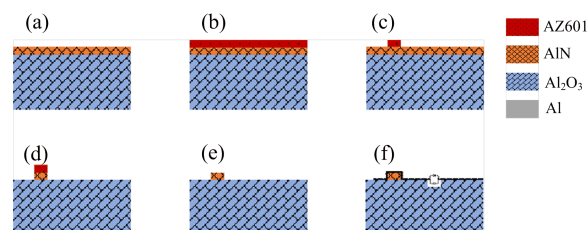
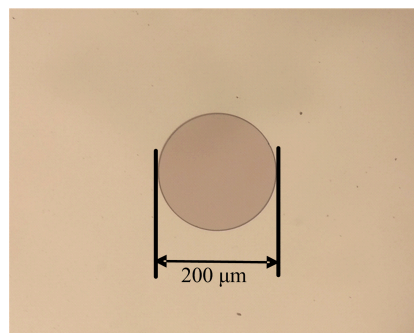


图5 样品制备流程:(a)覆盖 AlN 的蓝宝石衬底;(b)旋涂 AZ601 光刻胶;(c)紫外光刻形成掩膜;(d)ICP 刻蚀形成圆柱体;(e)丙酮去除有机掩膜;(f)常规 3D-Transmon 工艺

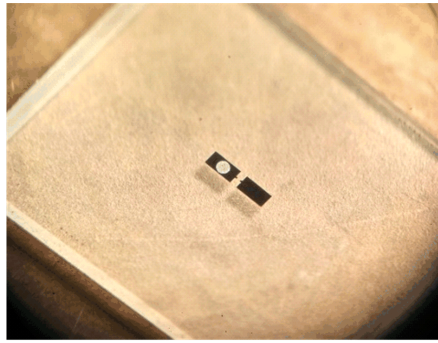
首先,需要在生长有 AlN 薄膜的蓝宝石衬底上制作出压电振子.通过使用 AZ601 光刻胶作为 ICP 刻蚀的掩膜,在气体配方为 $Cl_2/BCl_2/Ar = 4/26/10$ sccm,气压为 8 mTorr、横向刻蚀功率为 350 W、纵向刻蚀功率为 70 W 的条件下刻蚀 20 分钟后,用丙酮去除残余的 AZ601 光刻胶,可以得到厚度为 1000 nm 的 AlN 圆柱,如图6所示.


 图6 经刻蚀形成的 AlN 圆柱

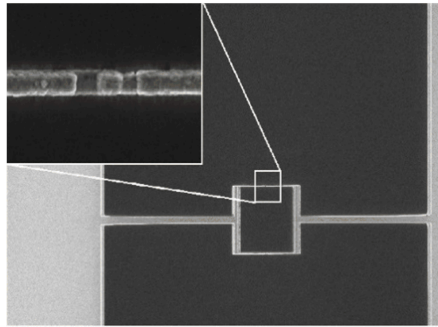
此后,结合蓝宝石表面制备 3D-Transmon 的基本工艺流程,如电子束曝光、电子束斜蒸发以及剥离等,在 AlN 振子表面成功制备出了具有 dc-SQUID 结构的 3D-Transmon,其光学以及 SEM 照片如图7所示.

4 测量与结果分析

3D-Transmon 的基本原理就是让量子比特处



(a) 3D-Transmon与振子耦合系统



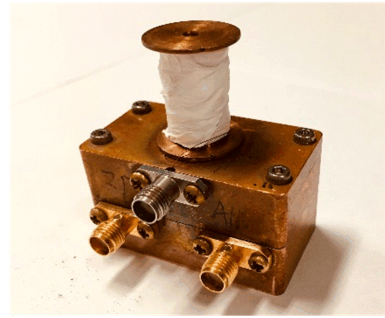
(b) dc-SQUID结构SEM图像

图 7 样品图片

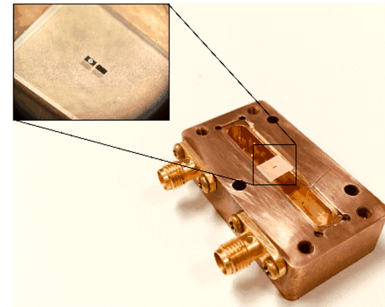
于封闭的矩形谐振腔内,通过量子比特与矩形谐振腔形成耦合,从而可以通过测量矩形谐振腔谐振峰的强度变化,完成对量子比特的测量与调控^[16-17].

我们使用了一个 TE_{101} 模式对应的频率约为 8 GHz 的可调铜腔作为谐振腔,如图 8 所示,将量子

比特放置在谐振腔的中心是为了增强量子比特和腔的耦合,并减少其他谐振频率杂波的影响^[12].



(a)底部两个SMA接头为微波输入输出端,上端SMA接头为偏置电压输入端



(b)放置于矩形谐振腔中心的样品

图 8 可调矩形谐振腔

将该 3D-Transmon 装入低温测量系统(低于 20 mK)中,该测量系统包括两个部分,信号输入模块以及信号采集模块,如图 9 所示.

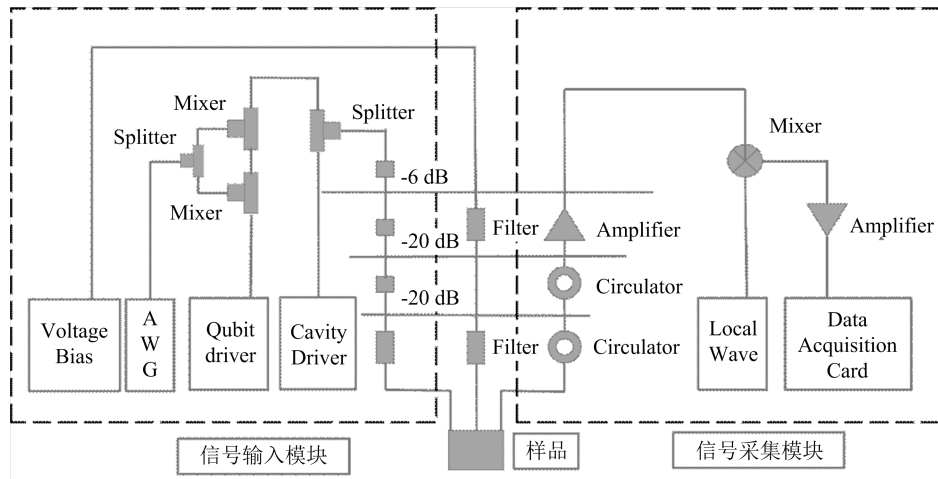


图 9 低温测量系统组成

我们首先测量了量子比特跃迁频率随着外加偏置线圈电压的关系,如图 10 所示,测量结果表明通过调节偏置电压可实现跃迁频率在 4.1~9.8 GHz 范围内可调,验证了之前的理论.在偏置电压为 0.1 V 左

右,频率变化出现了不连续的免交叉,这是由于比特与矩形谐振腔相互作用导致.

当偏置电压为 0.408 V 时,我们测得量子比特的能量弛豫时间为 $T_1 = 4.7 \mu\text{s}$,如图 11 所示,并测

得了拉比振荡曲线,如图 12 所示.

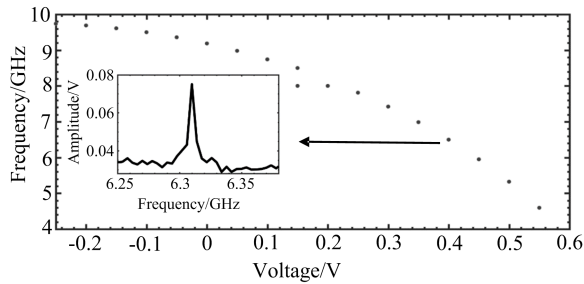


图 10 量子比特跃迁频率随偏置电压变化以及偏置电压为 0.408 V 时的一维能谱图

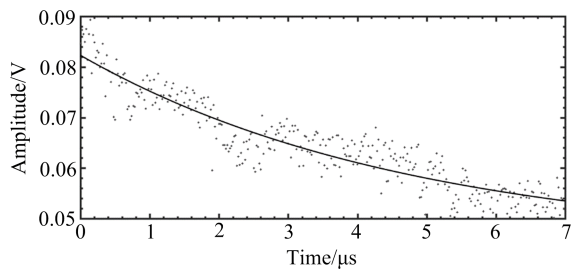


图 11 偏置电压为 0.408 V 时的能量弛豫

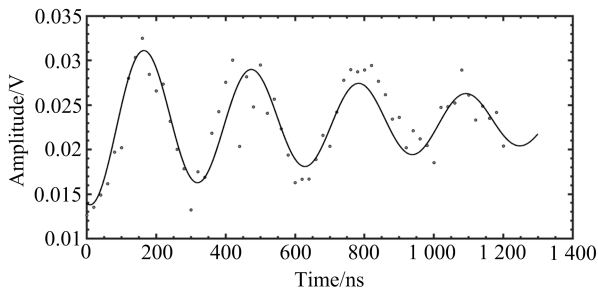


图 12 拉比振荡曲线

由于 AlN 压电振子工作在 6.4 GHz 左右,我

们对该区域进行仔细扫描,偏置电压控制在 0.36~0.48 V 之间.在偏置电压为 0.415 V 左右出现了免交叉现象,如图 13 所示.但从免交叉带宽(约 75 MHz)来看,并不能完全证明 3D-Transmon 与 AlN 振子耦合成功,也许是其他原因造成了免交叉现象,如样品中的微观二能级缺陷导致的^[18-20].由于基片、微纳加工工艺等方面的原因,压电振子的 Q 值有可能达不到强耦合的要求,只有少数的能量从量子比特转移到压电振子上,从而导致没有明显的耦合现象.

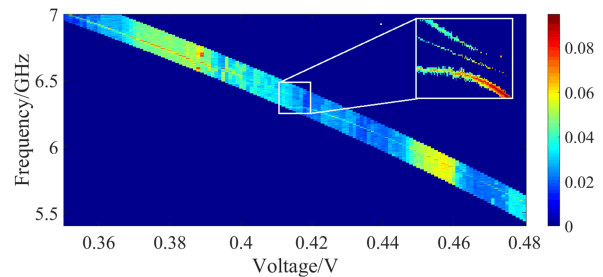


图 13 能谱图,插图为能谱的免交叉

5 总 结

本实验设计了 3D-Transmon 与 AlN 压电振子耦合系统的相关参数,并且借助微纳加工技术制备了相关样品.测量结果显示,具有 dc-SQUID 结构的量子比特跃迁频率可调范围为 4.1~9.8 GHz,而且具有良好的退相干特性.在压电振子谐振频率附近测量到了免交叉现象,但是免交叉带宽较宽,表明该免交叉不一定是由于量子比特与压电振子耦合造成的,进一步的研究正在进行中.

参 考 文 献

- [1] L. K. Grover, *Phys. Rev. Lett.*, **79**(1997), 325.
- [2] J. Koch, T. M. Yu, J. Gambetta, A. A. Houck, D. I. Schuster, J. Majer, A. Blais, M. H. Devoret, S. M. Girvin, R. J. Schoelkopf, *Phys. Rev. A*, **76**(2007), 538.
- [3] Devoret M H, Schoelkopf R J, *Science*, **339**(2013), 1169.
- [4] Wendin, Goran, *Reports on Progress in Physics*, **80** (2017), 106001.
- [5] Martin V. Gustafsson, Thomas Aref, Anton Frisk Kockum, Maria K. Ekström, Göran Johansson, *Science*, **100** (2014), 938.
- [6] Boudot R, Martin G, Friedt J M, *Journal of Applied Physics*, **120**(2016), 224903.
- [7] C. T. Hann, S. S. Elder, C. S. Wang, K. Chou, R. J. Schoelkopf, L. Jiang, *Phys. Rev. A*, **98**(2018), 022305.
- [8] R. N. Patel, Z. Wang, W. Jiang, C. J. Sarabalis, J. T. Hill, A. H. Safavi-Naeini, *Phys. Rev. Lett.*, **121**(2018), 040501.
- [9] A. N. Cleland, M. R. Geller, *Phys. Rev. Lett.*, **93** (2004), 070501.
- [10] M. J. A. Schuetz, E. M. Kessler, G. Giedke, L. M. K. Vandersypen, M. D. Lukin, J. I. Cirac, *Phys. Rev. X*, **5** (2015), 031031.
- [11] Y. Chu, P. Kharel, W. H. Renninger, L. D. Burkhardt, L.

- Frunzio, P. T. Rakich, R. J. Schoelkopf, *Science*, **358** (2017), 199.
- [12] C. Rigetti, J. M. Gambetta, S. Poletto, B. L. T. Plourde, J. M. Chow, A. D. Córcoles, J. A. Smolin, S. T. Merkel, J. R. Rozen, G. A. Keefe, M. B. Rothwell, M. B. Ketchen, M. Steffen, *Phys. Rev. B*, **86**(2012), 100506.
- [13] J. Z. Pan, Z. M. Cao, Y. Y. Fan, Y. Zhou, D. Lan, Y. H. Liu, Z. P. Chen, Y. C. Li, C. H. Cao, W. W. Xu, L. Kang, J. Chen, H. F. Yu, Y. Yu, G. Z. Sun, P. H. Wu, *Chinese Phys. B*, **24**(2015), 110301.
- [14] Sergey Novikov, 2015, Ph. D. Dissertation (Maryland: University of Maryland) (in USA).
- [15] Sharapov V, Sotula Z, Kunickaya L, 2014, Piezo-Electric Electro-Acoustic Transducers (California: Berkley) pp13-40.
- [16] Reed M D, Dicarlo L, Johnson B R, *Phys. Rev. Lett*, **105** (2010), 173601.
- [17] Riste, D, Bultink C C, Tiggelman M J, *Nature Communications*, **4**(2013), 1913.
- [18] Simmonds R W, Lang K M, Hite D A, *Phys. Rev. Lett*, **93** (2004), 077003.
- [19] Lupaşcu, Bertet P, Driessen E F C, *Phys. Rev. B*, **80** (2009), 172506.
- [20] Plourde B L T, Robertson T L, Reichardt P A, *Phys. Rev. B*, **72**(2012), 506.