

专题: 华南师范大学建校暨物理学科建立 90 周年

超导-冷原子复合系统的研究进展*

吕庆先¹⁾²⁾ 李赛¹⁾ 涂海涛¹⁾ 廖开宇¹⁾梁振涛^{1)†} 颜辉¹⁾²⁾³⁾ 朱诗亮¹⁾²⁾³⁾

1) (华南师范大学物理学院, 原子亚原子结构与量子调控教育部重点实验室, 广州 510006)

2) (华南师范大学, 广东省量子调控工程与材料重点实验室, 广州 510006)

3) (华南师范大学, 粤港量子物质联合实验室, 物理前沿科学研究院, 广州 510006)

(2023 年 6 月 14 日收到; 2023 年 10 月 6 日收到修改稿)

超导-冷原子复合系统因能够实现快速门操控、长寿命存储和光纤中长距离传输等特点, 被认为是实现两台超导量子计算机光互联的最有潜力的复合体系之一. 本文综述了近年来基于超导-冷原子复合系统实现两台超导量子计算机光互联的研究进展, 包括超导芯片与冷原子相干耦合、微波光波相干转换和超导量子比特与量子转换器长程微波互联. 对该复合量子系统的研究将为超导量子计算机之间的实用化光纤互联奠定物理和技术基础, 有望在分布式超导量子计算机和杂化量子网络中获得广泛应用.

关键词: 超导-冷原子复合系统, 相干耦合, 微波光波转换, 长程微波互联**PACS:** 03.67.-a, 42.50.-p, 42.50.Pq, 03.67.Lx**DOI:** 10.7498/aps.72.20230985

1 引言

近年来, 超导量子计算机的研究取得了众多进展^[1-4], 但建造一台大规模低错误率的超导量子计算机仍然是一个巨大的挑战. 分布式量子计算被认为是解决这一挑战的很有前景的方法. 分布式量子计算是利用量子网络将多个低错误率的小规模量子计算机互联, 构成一台大规模低错误率的量子计算机^[5-9]. 其中的一种技术路线是将两台超导量子计算机通过微波电缆或波导互联^[10-12]. 近期, 实验已经成功实现了相隔 30 m 的超导量子比特的微波互联^[13], 但为了维持波导的低温环境, 每 15 m 就需要使用一台稀释制冷机, 这增加了微波长程互联实现的难度和成本. 另外, 还有一种技术路线是将

微波转化为光波, 然后通过光纤实现量子计算机之间的互联^[14,15]. 该方法有望实现两台超导量子计算机之间的长距离互联. 然而, 将两台超导量子计算机通过光纤实现互联面临两个关键科学与技术问题: 一是微波光波的总转换效率, 二是光诱导热激发微波噪声. 为了解决这些问题, 我们可以结合不同量子系统 (如超导量子电路、冷原子、金刚石、量子点、声子、磁振子、通信光子等) 各自的优势, 建立复合量子系统^[16]. 这种复合系统有望解决上述关键科学问题. 其中, 超导-冷原子复合系统成为最有潜力的复合系统之一. 它可以实现快速门操控、长寿命存储和光纤中长距离传输, 从而实现两台超导量子计算机之间的光互联.

近年来, 基于超导-冷原子复合系统实现超导量子计算机之间的光互联的研究取得了系列进展.

* 量子科技创新计划 (批准号: 2021ZD0301705)、国家自然科学基金 (批准号: 12104168, 12074132, 12225405, 12247123, 12304287, U20A2074, 12074180)、国家重点研发计划 (批准号: 2022YFA1405300, 2022YFA1405303, 2020YFA0309500)、中国博士后科学基金 (批准号: 2022M721222, 2023T160233)、广东省基础与应用基础研究基金 (批准号: 2021A1515110668, 2023A1515011550) 和广州市科技计划 (批准号: 202201010533) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: ztliangscnu@163.com

本文将综述这一领域的进展并重点介绍华南师范大学研究团队的成果. 我们团队搭建了 4 K 和 mK 两套超高真空稀释制冷机系统用于研究超导-冷原子复合系统. 在低温超导微波腔与冷原子相干耦合方面, 着重介绍超导原子芯片的实验实现和超导 LC 微波腔芯片性能. 在微波光波转换方面, 主要介绍六波混频的机制, 以及自由空间中基于里德伯冷原子六波混频实现微波光波相干转换的实验结果. 在超导量子比特与量子转换器长程互联方面, 主要介绍实验平台的搭建、实验装置的设计以及数值仿真的结果. 最后, 也综述了此领域的一些亟待解决的科学和技术问题.

2 超导-冷原子复合系统

2.1 性能优势

国际广泛研究的复合量子系统包括超导-金刚石、超导-冷原子、超导-量子点、量子比特-声子、量子比特-磁振子、腔光力等复合系统^[16]. 超导量子比特等体系的光互联要求量子转换效率高、带宽高、噪声低. 目前, 各种复合量子系统可以在个别指标上基本满足需求, 但综合来看, 还没有一种复合量子系统可以满足实用化光互联的全部技术需求^[14,15]. 超导-冷原子复合系统近年来取得了系列研究进展. 该系统有以下两种特性: 1) 能够有效地融合超导微波量子比特操控速度快、冷原子量子存储时间长和通信光子比特在光纤中可长距离传输的优势; 2) 能够实现微波光子-冷原子-光波光子的强耦合, 从而实现跨频段量子态转移, 并应用于量子计算及量子通信组网中的跨频段信息交互, 如传输节点、中继、跨频段单光子路由等.

2.2 冷原子系综与超导微波腔耦合机制

^{87}Rb 原子系综与超导谐振腔耦合机制可用 Tavis-Cummings 模型描述, 哈密顿量为

$$H_{\text{TC}} = \hbar\omega_a\pi^\dagger\pi + \hbar\omega_c\alpha_c^\dagger\alpha_c + \hbar g_{\text{eff}}(\alpha_c^\dagger\pi + \alpha_c\pi^\dagger), \quad (1)$$

其中, 第一项和第二项分别代表原子系综和谐振腔的自由哈密顿量, 第三项表示原子系综与谐振腔的相互作用哈密顿量, 而 π^\dagger 和 π 分别表示原子系综的单激发产生和湮灭算子: $\pi^\dagger = \frac{1}{g_{\text{eff}}} \sum_i g_i \cdot \sigma_i^\dagger$ 和 $\pi = \frac{1}{g_{\text{eff}}} \sum_i g_i \cdot \sigma_i$, 式中 $g_{\text{eff}} = \sqrt{\sum_i g_i^2}$ 表示整个系统

的有效耦合强度. 在冷原子系综和超导微波腔耦合系统中, 当原子团较小以至于可近似认为每个原子与超导微波腔的耦合强度都一样时, 冷原子系综与超导微波腔之间的有效耦合强度可表示为 $g_{\text{eff}} = g_0\sqrt{N} = \frac{|\mu_a| \cdot |B|}{\hbar}\sqrt{N}$, 其中 g_0 表示单个原子与超导微波腔的耦合强度, 由原子的跃迁磁矩 μ_a 和磁场 B 大小决定, N 为冷原子系综的原子数. 显然, 要增大有效耦合强度 g_{eff} 就必须增大单个原子的耦合强度 g_0 或增加原子数 N . 通常将冷原子装载到超导原子芯片微磁阱里, 通过提高原子密度进而增大 N . 另一方面, 在制备低阻抗超导 LC 谐振腔芯片时, 通过减小腔模体积 (提高场强) 并且减小原子团与超导微波腔的距离可以提高 g_0 .

3 超导芯片微波腔与冷原子相干耦合

微波腔与冷原子强耦合是实现微波光波高总转换效率的关键. 理论方面, 2009 年, Verdú 等^[17] 提出实现 $\lambda/2$ 超导共面波导谐振腔与 ^{87}Rb 原子基态强磁耦合的方案. 该方案将原子囚禁在离超导共面波导谐振腔表面 $1\text{ }\mu\text{m}$ 处, 原子所处位置的磁场强度大于 $40\text{ }\mu\text{G}$ ($1\text{ G} = 10^{-4}\text{ T}$), 此时单微波光子与单原子的耦合强度可以达到 40 Hz . 进一步利用原子系综 (10^6 个原子) 的 \sqrt{N} 倍集体增强效应, 最终实现 40 kHz 的耦合强度 (大于共面波导谐振腔的线宽 $\kappa/(2\pi) = 7\text{ kHz}$). 为了提高原子与超导共面波导谐振腔的耦合强度, 2016 年, Beck 等^[18] 提出实现超导共面波导谐振腔与离其表面 $40\text{ }\mu\text{m}$ 处的单个 Cs 里德伯原子强电耦合的方案. 该工作的主要思想是在超导共面波导谐振腔电压波腹处加工一对 $50\text{ }\mu\text{m}$ 高的铜电极, 从而增强离超导共面波导谐振腔表面 $50\text{ }\mu\text{m}$ 处的真空涨落电场大小, 最终实现 3 MHz 的电耦合强度 (大于超导共面波导谐振腔的线宽 $\kappa/(2\pi) = 500\text{ kHz}$). 到目前为止, 实验上还未有关于超导平面微波谐振腔与原子体系实现强耦合的相关报道. 实验方面, 2013 年, Bernon 等^[19] 实验实现超导共面波导腔芯片表面的冷原子囚禁和相干性测量, 当原子团距离芯片表面为 $60, 25$ 与 $14\text{ }\mu\text{m}$ 时, 其相干时间分别为 $20.5, 7.8$ 与 3.9 s , 表明冷原子系综是一种良好的量子存储器. 接着, Hattermann 等^[20] 于 2017 年实验实现了超导共面波导腔与冷原子的相干耦合, 受限于原子基态超精细结构能级之间较弱的磁偶极矩

($\sim a_0 e/137$), 当原子团距离超导芯片表面 20 μm 时, 基于 $\lambda/2$ 超导共面波导谐振腔所实现的单原子与单微波光子的耦合强度为 $(2\pi \times 0.5)$ Hz. Kaiser 等^[21] 于 2021 年进一步实验实现 $\lambda/2$ 超导共面波导谐振腔与里德伯冷原子耦合, 得益于里德伯能级较大的电偶极矩 ($n^2 a_0 e$), 当原子团距离超导芯片表面 40 μm 时, 实现的耦合强度为 $(2\pi \times 40)$ kHz (选取的里德伯能级为 $39\text{D} \leftrightarrow 38\text{F}$), 但尚未实现强耦合. 为进一步提高耦合强度, 一方面需要使用腔模体积更小的 $\lambda/4$ 超导共面波导谐振腔或超导平面 LC 微波腔, 另一方面可以选取较大主量子数的里德伯态跃迁能级, 结合其大的电偶极矩可以实现 MHz 的耦合强度, 进而实现原子量子比特与微波光子的强耦合. 2020 年, Morgan 和 Hogan^[22] 实验实现 $\lambda/4$ 超导共面波导谐振腔与飞行氦里德伯原子相干耦合, 在离超导芯片表面 100 μm 处, 测得微波驱动拉比振荡为 $(2\pi \times 3)$ MHz. 该工作通过拉比振荡的时域测量, 研究了原子与谐振腔耦合的相干性. 超导芯片微波腔与冷原子相干耦合的相关实验研究进展的结果对比如表 1 所示.

为了实现超导芯片微波谐振腔与冷原子强耦合, 自 2018 年起笔者团队设计并搭建了超高真空超低振动超导芯片与冷原子复合量子系统实验平台. 在超导原子芯片冷原子囚禁方面, 采用 Z 型铌

膜超导原子芯片, 中心导线长 2 mm, 厚度为 500 nm, 宽度为 100 μm , 如图 1(a) 所示. 通过 Z 型超导导线产生的磁场与沿 Y 方向的均匀偏置磁场结合, 可以在 Z 型中心导线正上方/正下方产生用于囚禁原子的囚禁势. 在 Z 线电流为 $I_z=1.8$ A 与 Y 方向均匀偏置磁场为 $Y_{\text{bias}}=25$ G 时, 成功实现冷原子的相干囚禁, 原子数为 3.5×10^5 , 如图 1(b) 所示. 进一步测得微磁阱中原子的寿命 $\tau \approx 22$ s, 得益于低温下较低的电流热噪声, 其寿命远大于室温原子芯片寿命, 如图 1(c) 所示.

在超导 LC 谐振腔芯片制备方面, 我们设计、仿真、加工和测试了一种可用于与原子实现强磁耦合的具有高品质因数的超导平面 LC 谐振腔芯片, 如图 2(a) 所示. 通过降低 LC 谐振腔的阻抗, 增大其与原子的磁耦合强度, 以提高微波光波转换效率. 实验测得 LC 谐振腔芯片具有很高的品质因数 Q_i , 在 3.8 K 的温度下 Q_i 值达到 10146, 如图 2(b) 所示; 并且该芯片的特征频率随温度的升高而降低, 在 4.45 K 时其特征频率为 6.834 GHz, 与 ^{87}Rb 原子的基态超精细能级跃迁频率相同, 可用于与原子的共振磁耦合实验, 如图 2(c) 所示.

在超导 LC 谐振腔芯片与冷原子相干耦合方面, 我们实验上首先将图 3(a) 的超导 LC 谐振腔电感环与超导 Z 线的中心对准, 再通过清漆将其

表 1 超导芯片微波腔与冷原子相干耦合的实验研究进展

Table 1. Experimental research progress on coherent coupling of superconducting-chip microwave resonators and cold atoms.

研究组	图宾根大学 ^[20]	图宾根大学 ^[21]	伦敦大学 ^[22]	华南师大
原子编码态	基态	里德伯态	里德伯态	基态
超导腔形式	共面波导腔	共面波导腔	共面波导腔	LC谐振腔
耦合方式	磁耦合	电耦合	电耦合	磁耦合
耦合强度	$(2\pi \times 0.5)$ Hz	$(2\pi \times 40)$ kHz	—	待测

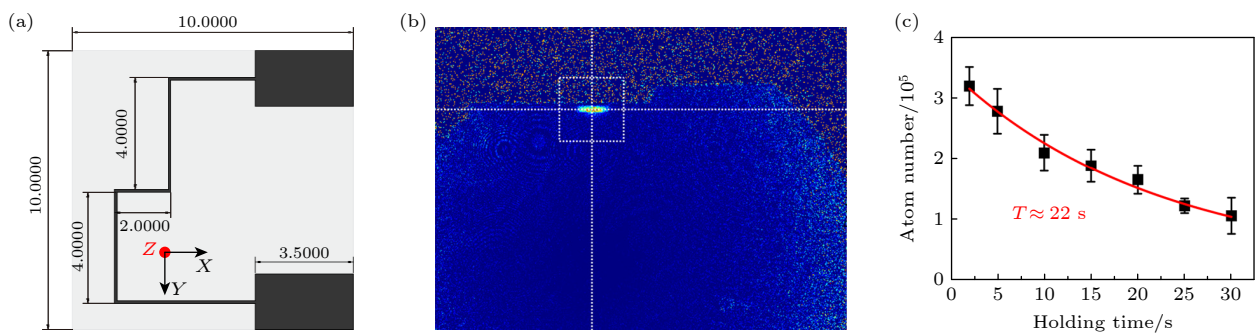


图 1 超导原子芯片 (a) Z 型超导导线 (单位为 mm); (b) 微磁阱中的冷原子囚禁; (c) 微磁阱中原子囚禁寿命

Fig. 1. Superconducting atom chip: (a) Z-type superconducting wire (in mm); (b) cold atoms confined in the superconducting microtrap; (c) the lifetime of atoms trapped in the microtrap.

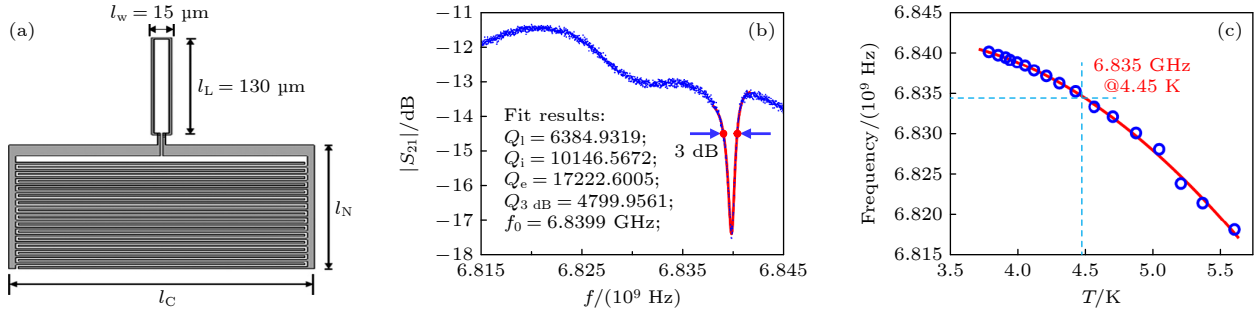


图 2 超导 LC 谐振腔芯片设计与测试 (a) 超导 LC 谐振腔 COMSOL 模型; (b) 在 3.8 K 温度下腔频为 6.84 GHz 的超导 LC 谐振腔芯片的 $|S_{21}|$ 曲线及其 Q 值; (c) 超导 LC 谐振腔频率随温度变化, 当温度为 4.45 K 时, 可以实现 LC 谐振腔与冷原子的共振耦合

Fig. 2. Design and test results of superconducting LC resonator: (a) Model of superconducting LC resonator by COMSOL software; (b) microwave transmission $|S_{21}|$ at 3.8 K of superconducting LC resonator with center frequency of 6.84 GHz and its corresponding Q factor; (c) the frequencies of superconducting LC resonator varies with temperature. When the temperature is 4.45 K, the resonant coupling between LC resonator and cold atoms can be realized.

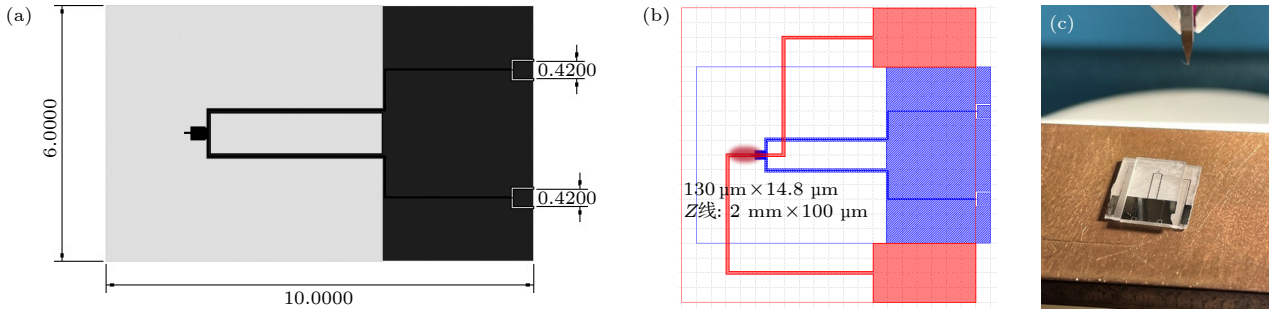


图 3 超导 LC 谐振腔芯片与冷原子相干耦合 (a) 超导 LC 谐振腔芯片尺寸 (单位为 mm); (b), (c) Z 型超导原子芯片与超导 LC 谐振腔定位原理图与实物图

Fig. 3. Coherent coupling between superconducting LC resonator and cold atoms: (a) Size of superconducting LC resonator (in mm); (b), (c) positioning schematic diagram and physical diagram of Z-type superconducting atom chip and superconducting LC resonator

粘合固定于超导 Z 线正上方, 如图 3(b), (c) 所示. 具体实验步骤: 首先利用超导 Z 型微磁阱在超导 LC 谐振腔电感环的正上方实现冷原子的囚禁, 然后通过控制 Z 线电流 I_z 与 Y 方向均匀偏置磁场 Y_{bias} 使冷原子系综距离超导 LC 芯片表面几十微米, 最后实现超导 LC 谐振腔与冷原子系综的相干耦合.

4 微波光波相干转换

高效宽带低噪微波光波相干转换是通过光纤将超导量子计算机互联的关键技术. 目前人们已在很多量子体系开展了微波光波相干转换的研究 [14,15], 如光力电转换器 [23–25]、电光转换器 [26,27]、原子系综转换器 [28–31]、稀土掺杂晶体转换器 [32]、铁磁系统转换器 [33] 等. 2018 年, Higginbotham 等 [24] 制备的光力电转换器的总转换效率为 47%, 带宽 0.012 MHz, 另外, 由于光力电转换器的声

子模式的频率 (1.47 MHz) 较低, 在低温 (40 mK) 下存在热激发噪声. 2022 年, Sahu 等 [26] 制备的电光转换器的总效率为 8.7% (15%), 带宽为 18 MHz, 微波热噪声为 0.16 (0.41). 2023 年, Kumar 等 [28] 制备的原子系综转换器的总效率为 2.5%, 带宽为 0.36 MHz, 热激发毫米波噪声光子数为 0.6. 我国在微波光波相干转换的研究也取得了重要成果. 2022 年, Shen 等 [34] 制备的磁光力转换器的总效率为 1.1×10^{-5} , 调谐范围高达 3 GHz. 本节主要详细介绍基于中性原子微波光波相干转换的实验研究进展, 其结果对比如表 2 所示.

为了提高微波/毫米波与原子系综耦合强度从而提高基于中性原子的微波/毫米波与光波的转换效率, 2016 年 Kiffner 等 [35] 提出在自由空间基于里德伯原子六波混频实现毫米波光子与光波光子相干转换的实验方案, 如图 4(c) 所示. 该方案通过相干布居数囚禁的方式制备长寿命基态 $|1\rangle$ 和长寿命里德伯态 $|3\rangle$ 的缀饰态, 使原子系综同时与

表 2 基于中性原子微波光波相干转换的实验研究进展

Table 2. Experimental research progress of microwave-to-optics conversion based on neutral atoms.

研究组	新加坡国立大学 ^[31]	华南师大 ^[30]	芝加哥大学 ^[28]	阿尔伯塔大学 ^[29]
原子团温度	冷原子	冷原子	冷原子	热原子
混频形式	六波混频	六波混频	四波混频	三波混频
内转换效率/%	5	82	58	—
总转换效率/%			2.5	3×10^{-9}
带宽/MHz	15	1	0.36	1.00

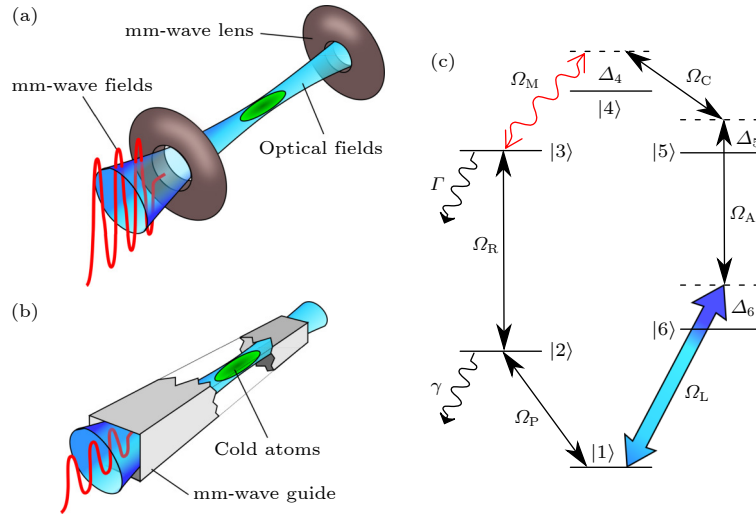


图 4 基于冷 ^{87}Rb 原子系综六波混频的毫米波-光波转换方案 (a) 毫米波透镜聚焦毫米波的毫米波-光波转换方案; (b) 波导约束毫米波的毫米波-光波转换方案; (c) 毫米波-光波转换方案原子能级图^[35]

Fig. 4. Millimeter-wave-to-optics conversion via six-wave mixing based on cold ^{87}Rb atomic ensembles: (a) Millimeter-wave-to-optics conversion with mm-wave fields focused by dielectric lenses; (b) millimeter-wave-to-optics conversion with mm-wave fields confined by waveguide; (c) six-level system of millimeter-wave-to-optics conversion^[35].

待转换毫米波场和转换光场实现集体电耦合, 从而提高毫米波光波转换效率. 为了提高总转换效率, 该方案提出通过毫米波透镜或波导使毫米波能量更集中的方案, 如图 4(a), (b) 所示. 在实际仿真参数下, 总转换效率原则上超过 90%, 转换带宽至少为 80 kHz.

参考上述研究方案, 2019 年, Vogt 等^[31] 基于自由空间冷里德伯原子六波混频实现转换效率为 5% 的微波光波相干转换. 该方案效率不高的原因^[30] 为: 原子暗态布局数随光学厚度的增大而增大, 导致微波光子的吸收截面减小. 据此分析, 2022 年 Tu 等^[30] 提出了利用非共振六波混频来消除原子暗态布局, 从而增大微波光子的吸收截面的理论方案, 具体方案如图 5 所示.

进一步, Tu 等^[30] 在自由空间大光学厚度的铷 87 冷原子系综中实现了该方案, 具体实验构架如图 6 所示. 采用长条状的冷原子团, 此构型在实现大光学厚度的同时还保持了相对较低的原子

密度. 我们采用稳定的偏置磁场来消除塞曼简并等方式延长了里德伯原子的相干时间. 最终在光学厚度 60 的条件下实现了效率超过 82% 和带宽约 1 MHz 的微波光波相干转换. 此外, 光外差检测还证明此转换过程的相位信息具有超过 98% 的保真度.

为了减少室温微波背景辐射, 实现量子转换 (平均热光子数 $\ll 1$), 2023 年, Kumar 等^[28] 通过光晶格将在 35 K 温区制备的冷 ^{85}Rb 原子转移到安装在 5 K 温区的三维超导毫米波谐振腔和振动抑制光腔内, 腔内原子数约为 600. 为了使原子系综同时与待转换毫米波场和转换光场实现集体电耦合, 该方案通过 297 nm 强激光制备长寿命基态 $|g\rangle$ 和长寿命里德伯态 $|f\rangle$ 的缀饰态, 使缀饰态冷原子系综同时与三维超导毫米波谐振腔中毫米波场 (3 mm) 和光腔中光场 (780 nm) 实现电偶极耦合, 如图 7(a) 所示.

在辅助光场 (481 nm) 的作用下, 基于腔内四

波混频该团队实现了毫米波光子与光波光子相干转换, 毫米波光子向光学光子的总 (内) 转换效率为 2.5%(58%), 转换带宽为 0.36 MHz, 均与该团队先前理论预测一致, 并且光学光子向毫米波光子的反向转换也与预测相一致. 由于毫米波频率为 100 GHz, 在 5 K 温区的三维超导毫米波谐振腔内

的平均热激发毫米波噪声光子数为 0.6, 接近量子水平. 该团队通过在没有毫米波光子输入的情况下监测转换后的光子来证实这一低水平的噪声. 为了进一步提高总 (内) 转换效率, 还需要提高毫米波光子与原子系统的集体耦合强度, 如增大原子数, 以及增大辅助光场的功率.

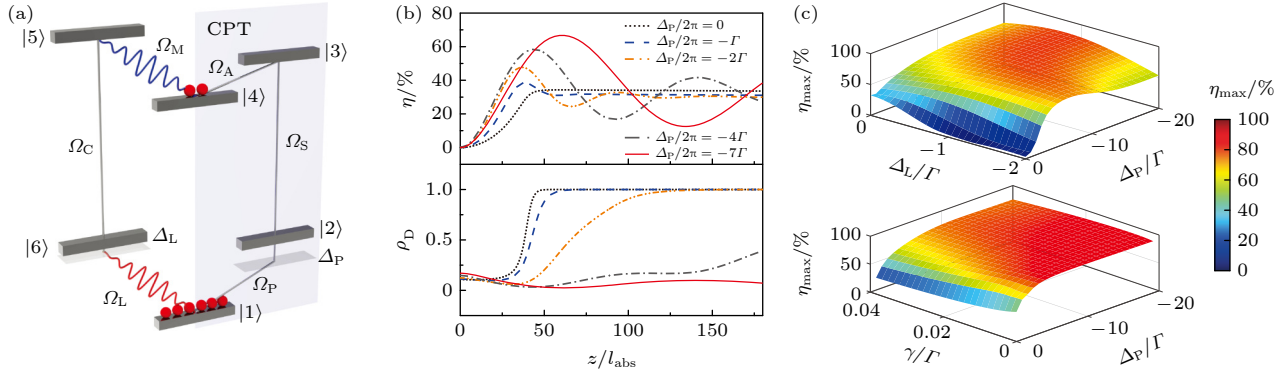


图 5 基于非共振散射的微波-光波转换 (a) 六能级系统; (b) 转换效率和原子暗态布局数随光学厚度的变化; (c) 最大转换效率与激光失谐、里德伯退相率的依赖关系^[30]

Fig. 5. Microwave-to-optics conversion via off-resonant scattering: (a) Six-level system; (b) conversion efficiency and dark-state probability versus optical density; (c) maximum conversion efficiency versus detunings of probe laser and dephasing rates of Rydberg state^[30].

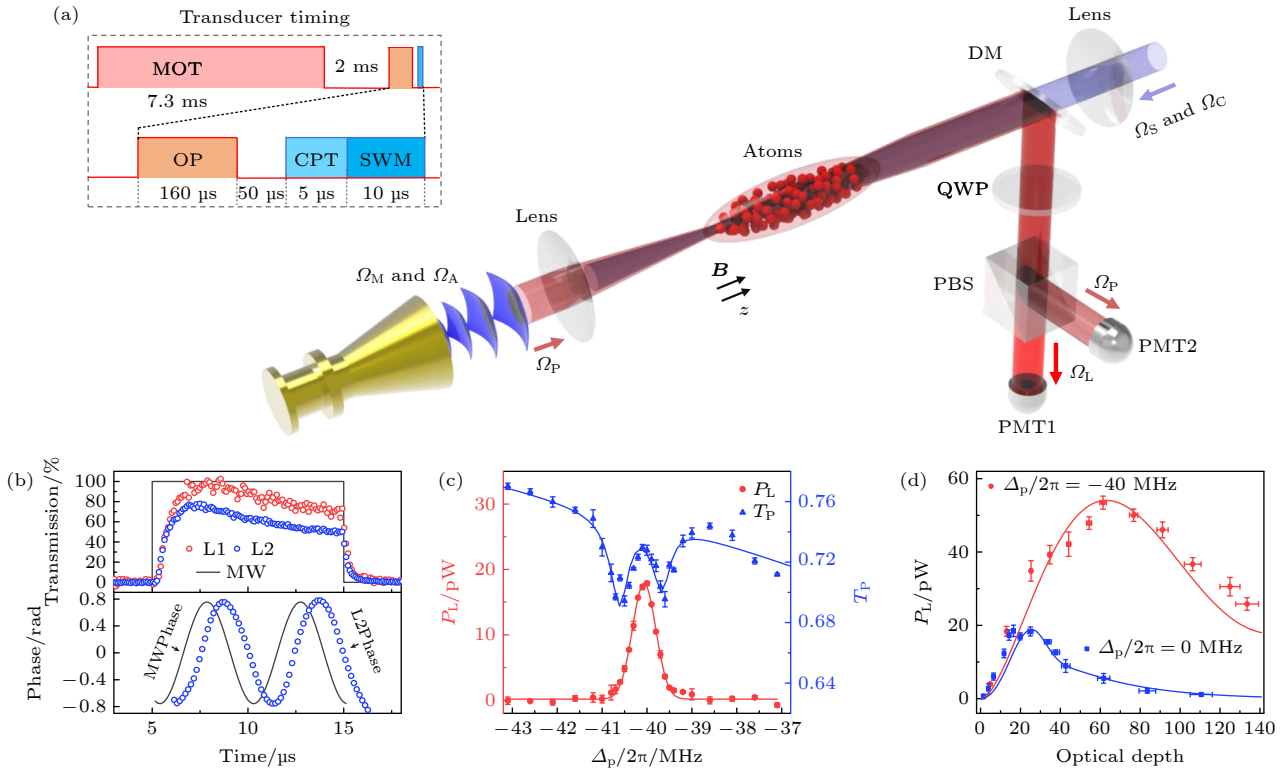


图 6 微波光波相干转换实验结果 (a) 实验构架与时序; (b) 微波光波的波形以及光外差检测结果; (c) 探测光与产生光的谱线; (d) 全共振及非共振的微波频率上转换随光学厚度的变化^[30]

Fig. 6. Experimental results of microwave-to-optics conversion: (a) Experimental setup and time sequence; (b) temporal waveforms of the input microwave pulse and output optical pulses, and the relative phase of a heterodyne signal for the phase-modulated microwave; (c) spectra of transmission and generated optical power; (d) power P_L of output optical pulses versus optical depth for off-resonant and near-resonant scatterings^[30].

为了提高量子通信容量, 2023 年, Smith 等^[29] 基于热 ^{87}Rb 原子系综三波混频实验实现了频分多

路复用的微波光子与光波光子的相干转换, 如图 8 所示. 图 8(c) 是实验所用的原子能级, 其中圆柱

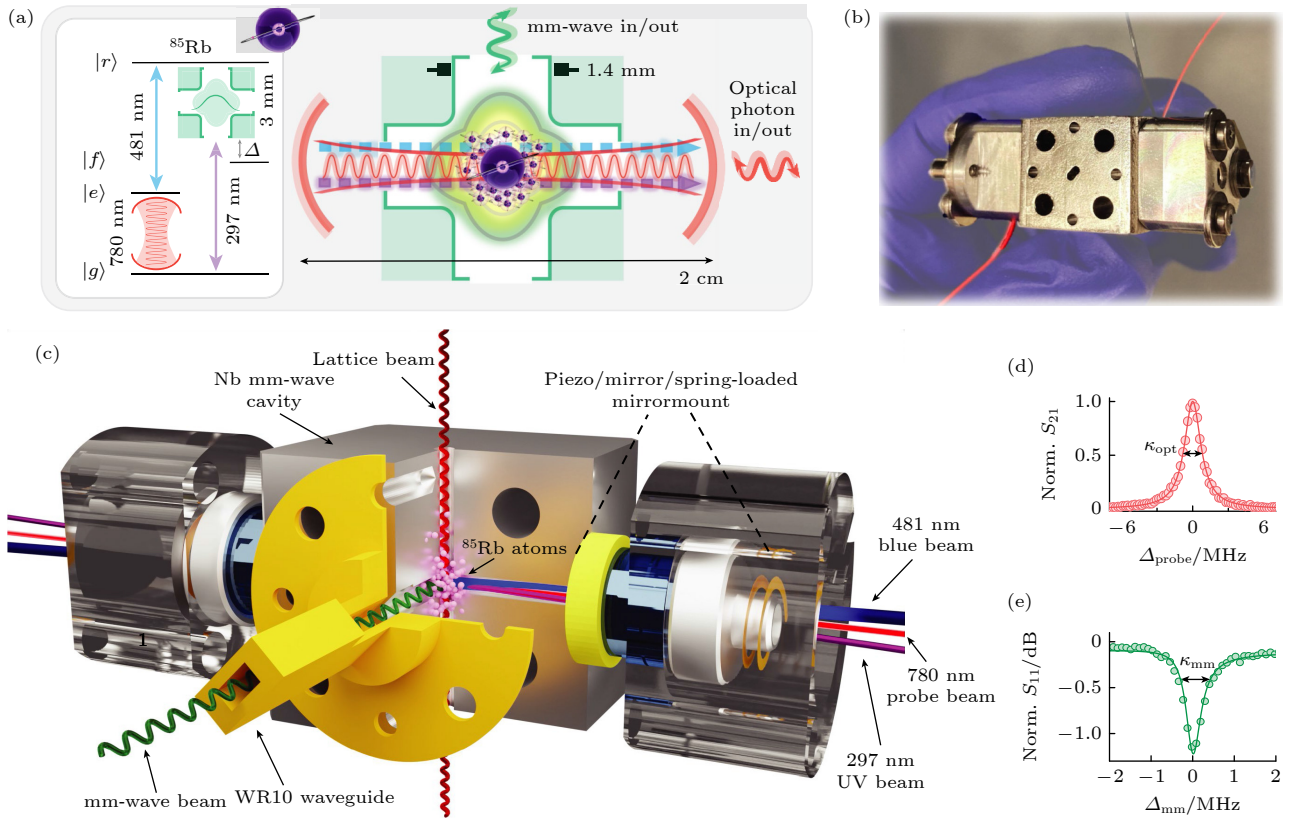


图 7 基于四波混频的光学光子与毫米波光子相干转换 (a) 实验方案, 左图为转换所需的原子能级和波长, 右图为毫米波光波转换接口的内部结构; (b) 实物图; (c) 超导腔和光腔的横截面图; (d) 空光腔的传输特性曲线, 半高全宽 $\kappa_{\text{opt}} = 2\pi \times 1.7$ MHz; (e) 在 5 K 温区的超导毫米波谐振腔的反射谱, 半高全宽 $\kappa_{\text{mm}} = 2\pi \times 800$ kHz^[28]

Fig. 7. Millimeter-wave-to-optics conversion via four-wave mixing: (a) Schematic of the system, atomic energy levels and wavelengths of light involved in transduction (left), internal structure of the optical and mmwave interface (right); (b) image of the physical hybrid cavity; (c) expanded view of the main assembly; (d) bare optical cavity transmission with full-width half-maximum (FWHM) linewidth $\kappa_{\text{opt}} = 2\pi \times 1.7$ MHz; (e) reflection spectrum of the superconducting mm wave cavity at 5 K with FWHM linewidth $\kappa_{\text{mm}} = 2\pi \times 800$ kHz^[28].

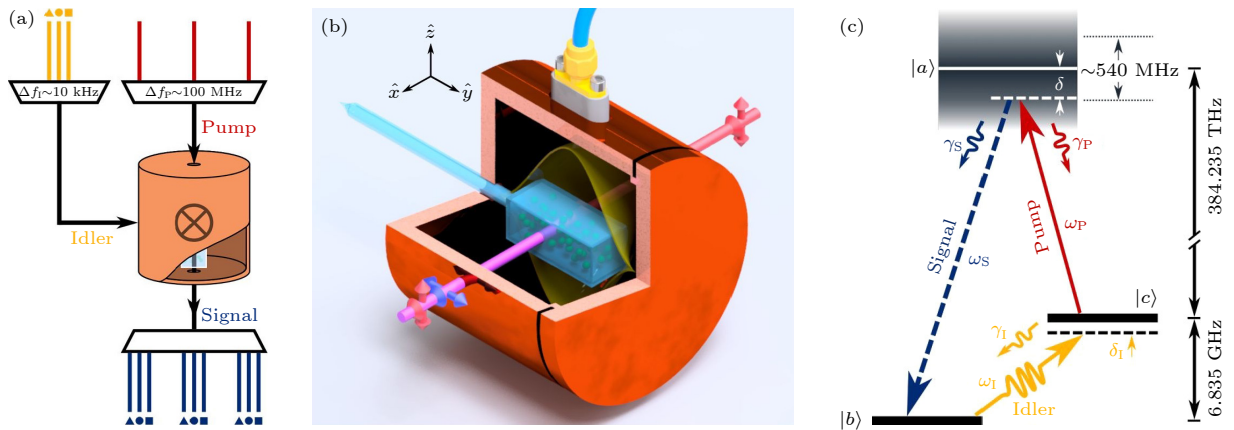


图 8 基于热 ^{87}Rb 原子系综三波混频的微波-光波转换 (a) 频分多路复用原子转换器方案; (b) 微波腔-铷泡复合系统示意图; (c) 微波-光波转换能级图^[29]

Fig. 8. Microwave-to-optics conversion via three-wave mixing based on thermal ^{87}Rb atomic ensembles: (a) Schematic of the atomic frequency-division multiplexing scheme; (b) the microwave cavity-vapor cell hybrid system; (c) three-level system of microwave-to-optics conversion^[29].

铜微波腔的 TE011 模用于囚禁待转换微波信号 (Idler), 使其与原子基态跃迁 $|b\rangle \equiv |5S_{1/2}, F=1\rangle$ 和 $|c\rangle \equiv |5S_{1/2}, F=2\rangle$ 磁耦合. 泵浦光 (pump) 与原子光学跃迁 $|c\rangle$ 和 $|a\rangle \equiv |5P_{3/2}, F'=1, 2\rangle$ 电耦合. 泵浦光和待转换微波信号 (idler) 基于原子系综实现 $\chi^{(2)}$ 相互作用, 并在原子光学跃迁 $|a\rangle$ 和 $|b\rangle$ 之间产生和频信号, 即转换光波信号 (signal). 由于微波与原子基态的磁耦合强度较小, 总效率仅为 3×10^{-9} . 转换带宽受限于微波腔线宽, 约为 1 MHz. 该方案具有能级结构简单的优势, 但需要进一步减小微波谐振腔的有效腔模体积和提高原子密度, 从而提高微波与原子基态的集体磁耦合强度和转换效率.

5 超导量子比特与量子转换器长程互联

光诱导热激发噪声是限制通过光纤互联超导量子计算机的关键因素. 2020 年, Mirhosseini 等^[36]的实验结果表明光诱导热激发微波噪声不仅限制了微波光波转换器工作时所需要的驱动光场的功率 (从而限制了微波光波转换效率 ($\sim 0.1\%$)), 还限制了脉冲重复频率 ($R = 100$ Hz). 解决该问题的技术路线有, 一是将超导量子比特和量子转换器在空间上分离并通过电缆或波导连接. 如 2022 年 Delaney 等^[37]通过微波电缆连接了超导量子比特与光力电转换器, 但光诱导热激发微波噪声有 23. 二是将超导量子比特和量子转换器分别安装在不同的温区, 然后通过物理方法降低热激发微波噪声对超导量子比特和量子转换器之间量子态传输的影响. 如 2020 年, Han 等^[38]提出将电光转换器热沉在稀释制冷机的 1 K 冷台, 通过辐射冷却技术^[39]

降低热激发微波噪声对量子态传输的影响, 但尚未实验验证.

为研究光诱导热激发噪声对量子态传输影响的解决方案, 自 2020 年起, 我们设计并搭建了超高真空、超低振动的稀释制冷机复合系统实验平台. 一方面, 该稀释制冷机的基础温度约为 10 mK, 满足超导量子比特的工作条件; 另一方面, 该稀释制冷机具有超高的真空度 (约为 1×10^{-8} Pa), 满足超导量子比特与里德伯冷原子互联的硬件需求. 基于此稀释制冷机实验平台, 目前已实验实现了超导量子比特高保真度的单比特门操控, 通过对微波控制线路的优化以及微波驱动的波形修正, 单比特门平均保真度约为 0.9996. 更进一步, 已实验实现两比特的纠缠操控, 正在优化和提升两比特门操控的门保真度. 我们在超导量子比特高保真度操控所取得的研究进展将为探索光诱导热激发噪声对量子态传输不利影响的解决方案提供实验技术支持.

2022 年, Liang 等^[40]提出了基于 1 K 热耦合腔实现 15 mK 超导量子比特与 1 K 冷台附近里德伯冷原子远程纠缠的实验方案. 实验装置如示意图 9 所示. 相较于冷却后操作方案, 该方案不需要高开关比和快速开关的辅助冷却系统, 从而减小了退相干通道和额外串扰的引入, 降低实验参数校正的难度.

该方案建议利用非传统几何量子门^[41,42]对耦合腔中热激发和耦合参数不敏感的特性^[43–46], 实现超导量子比特与里德伯冷原子高保真度和高并发度的确实性纠缠. 数值仿真结果表明在现有实验条件下纠缠产生的保真度和并发度分别为 0.991 和 0.982, 如图 10 所示.

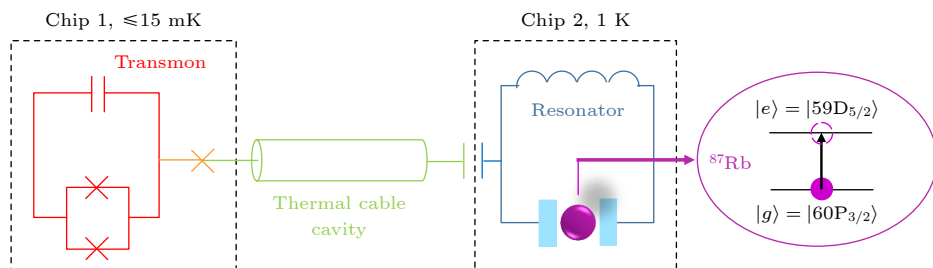


图 9 15 mK 超导量子比特与 1 K 冷台附近里德伯冷原子基于 1 K 热耦合腔长程互联的实验装置示意图^[40]

Fig. 9. Schematic of the hybrid system. A superconducting transmon qubit (red) on chip 1 anchored to a 15 mK plate resonantly couples with a standing mode of a superconducting coaxial-cable cavity (green) via a tunable coupler (orange cross). A superconducting LC resonator (blue) on chip 2 anchored to a 1 K plate resonantly couples with the same coaxial-cable cavity and a Rydberg-atom qubit (purple)^[40].

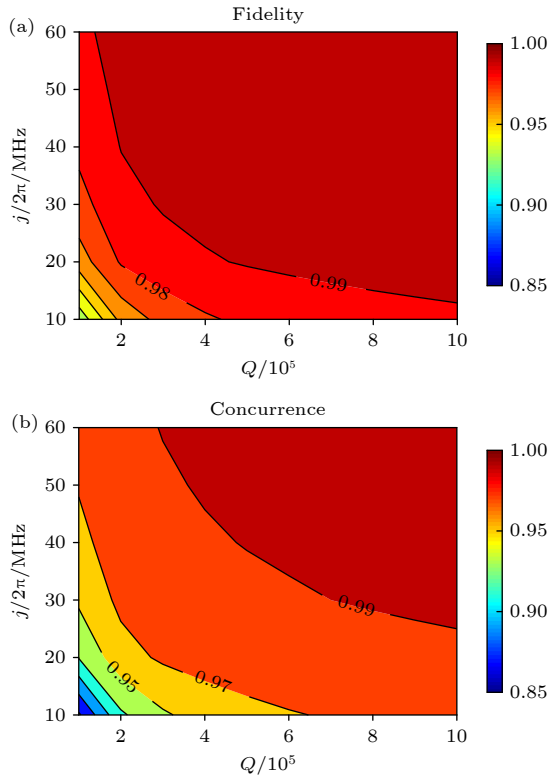


图 10 数值仿真结果 (a) 保真度与腔腔耦合强度 J 和腔 Q 值的依赖关系; (b) 并发度与腔腔耦合强度 J 和腔 Q 值的依赖关系^[40]

Fig. 10. Simulation results: (a) Fidelity versus the cavity-resonator coupling strength J and the internal Q factor; (b) concurrence versus the cavity-resonator coupling strength J and the internal Q factor^[40].

6 总结与展望

本文综述了基于复合量子系统实现超导量子计算机之间光互联的研究进展. 到目前为止, 通过使用不同的复合量子系统和不同的实验方案已经取得了种种优异性能, 如何将这些指标结合到同一套复合量子系统, 从而实现超导量子比特之间的光互联仍然面临巨大挑战. 尤其是如何实现不同量子体系间的强耦合、微波光波高总效率转换以及如何处理光诱导热激发噪声等科学问题仍急待解决. 目前提升超导-冷原子复合系统性能的研究聚焦以下三方面. 1) 实现超导微波谐振腔-冷原子强耦合. 在强磁耦合研究方面, 通过加工低阻抗微波谐振腔^[47]、增加电感环圈数^[48]、减小冷原子与超导芯片的相互作用距离^[17]来增大单原子与单光子的磁耦合强度; 通过压缩磁阱和射频蒸发冷却提高冷原子密度, 从而提高集体耦合强度^[17]. 在强电耦合研究

方面, 加工高阻抗微波谐振腔^[49]和提高里德伯原子密度均可提高耦合强度. 2) 在微波光波转换方面, 除了通过广义阻抗匹配理论优化微波光波转换参数^[50]外, 相较于通过微波喇叭向自由空间发射微波, 通过微波腔或微波波导集中微波能量可提高微波光波总转换效率^[28,35]. 3) 在光诱导热激发噪声处理方面, 需要实验验证相关理论^[40,51,52]和提出更优的解决方案. 解决了这些挑战性问题, 将为超导量子计算机之间的实用化光纤互联奠定物理和技术基础, 有望在分布式超导量子计算机和杂化量子网络中获得广泛应用.

参考文献

- [1] Arute F, Arya K, Babbush R, et al. 2019 *Nature* **574** 505
- [2] Zhu Q L, Cao S R, Chen F S, et al. 2022 *Sci. Bull.* **67** 240
- [3] Ye Y, Cao S, Wu Y, et al. 2021 *Chin. Phys. Lett.* **38** 100301
- [4] Xu S, Sun Z Z, Wang K, et al. 2023 *Chin. Phys. Lett.* **40** 060301
- [5] Monroe C, Raussendorf R, Ruthven A, Brown K R, Maunz P, Duan L M, Kim J 2014 *Phys. Rev. A* **89** 022317
- [6] Nickerson N H, Fitzsimons J F, Benjamin S C 2014 *Phys. Rev. X* **4** 041041
- [7] Wehner S, Elkouss D, Hanson R 2018 *Science* **362** 303
- [8] Li Y, Sun C P 2019 *Physics* **48** 477 (in Chinese) [李颖, 孙昌璞 2019 物理 **48** 477]
- [9] Awschalom D, Berggren K K, Bernien H, Bhav S, Carr L, Davids P, Economou S, Englund D, Faraon A, Fejer M 2021 *PRX Quantum* **2** 017002
- [10] Zhong Y P, Chang H S, Bienfait A, Dumur É, Chou M H, Conner C R, Grebel J, Povey R G, Yan H X, Schuster D I, Cleland A N 2021 *Nature* **590** 571
- [11] Niu J J, Zhang L B, Liu Y, et al. 2023 *Nat. Electron.* **6** 235
- [12] Magnard P, Storz S, Kurpiers P, et al. 2020 *Phys. Rev. Lett.* **125** 260502
- [13] Storz S, Schär J, Kulikov A, et al. 2023 *Nature* **617** 265
- [14] Lambert N J, Rueda A, Sedlmeir F, Schwefel H G 2020 *Adv. Quantum Technol.* **3** 1900077
- [15] Lauk N, Sinclair N, Barzanjeh S, Covey J P, Saman M, Spiropulu M, Simon C 2020 *Quantum Sci. Technol.* **5** 020501
- [16] Kurizki G, Bertet P, Kubo Y, Mølmer K, Petrosyan D, Rabl P, Schmiedmayer J 2015 *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **112** 3866
- [17] Verdú J, Zoubi H, Koller C, Majer J, Ritsch H, Schmiedmayer J 2009 *Phys. Rev. Lett.* **103** 043603
- [18] Beck M A, Isaacs J A, Booth D, Pritchard J D, Saffman M, McDermott R 2016 *Appl. Phys. Lett.* **109** 092602
- [19] Bernon S, Hattermann H, Bothner D, Knufinke M, Weiss P, Jessen F, Cano D, Kemmler M, Kleiner R, Koelle D, Fortágh J 2013 *Nat. Commun.* **4** 2380
- [20] Hattermann H, Bothner D, Ley L Y, Ferdinand B, Wiedmaier D, Sárkány L, Kleiner R, Koelle D, Fortágh J 2017 *Nat. Commun.* **8** 2254
- [21] Kaiser M, Glaser C, Li Y L, Grimm J, Hattermann H, Bothner D, Koelle D, Kleiner R, Petrosyan D, Günther A, Fortágh J 2022 *Phys. Rev. Res.* **4** 013207
- [22] Morgan A, Hogan S 2020 *Phys. Rev. Lett.* **124** 193604

- [23] Andrews R W, Peterson R W, Purdy T P, Cicak K, Simmonds R W, Regal C A, Lehnert K W 2014 *Nat. Phys.* **10** 321
- [24] Higginbotham A P, Burns P S, Urney M D, Peterson R W, Kampel N S, Brubaker B M, Smith G, Lehnert K W, Regal C A 2018 *Nat. Phys.* **14** 1038
- [25] Forsch M et al. 2020 *Nat. Phys.* **16** 69
- [26] Sahu R, Hease W, Rueda A, Arnold G, Qiu L, Fink J M 2022 *Nat. Commun.* **13** 1276
- [27] Fan L, Zou C L, Cheng R, Guo X, Han X, Gong Z, Tang H X 2018 *Sci. Adv.* **4** eaar4994
- [28] Kumar A, Suleymanzade A, Stone M, Taneja L, Anferov A, Schuster D I, Simon J 2023 *Nature* **615** 614
- [29] Smith B D, Babaei B, Narayanan A, LeBlanc L J 2023 *arXiv*: 2305.19221v1
- [30] Tu H T, Liao K Y, Zhang Z X, Liu X H, Zheng S Y, Yang S Z, Zhang X D, Yan H, Zhu S L 2022 *Nat. Photonics* **16** 291
- [31] Vogt T, Gross C, Han J, Pal S B, Lam M, Kiffner M, Li W 2019 *Phys. Rev. A* **99** 023832
- [32] Fernandez-Gonzalvo X, Horvath S P, Chen Y H, Longdell J J 2019 *Phys. Rev. A* **10** 033807
- [33] Hisatomi R, Osada A, Tabuchi Y, Ishikawa T, Noguchi A, Usami K, Yamazaki R, Nakamura Y 2016 *Phys. Rev. B* **93** 174427
- [34] Shen Z, Xu G T, Zhang M, Zhang Y L, Wang Y, Chai C Z, Zou C L, Guo G C, Dong C H 2022 *Phys. Rev. Lett.* **129** 243601
- [35] Kiffner M, Feizpour A, Kaczmarek K T, Jaksch D, Nunn J 2016 *New J. Phys.* **18** 093030
- [36] Mirhosseini M, Sipahigil A, Kalaei M, Painter O 2020 *Nature* **588** 599
- [37] Delaney R D, Urney M D, Mittal S, Brubaker B M, Kindem J M, Burns P S, Regal C A, Lehnert K W 2022 *Nature* **606** 489
- [38] Han X, Fu W, Zhong C C, Zou C L, Xu Y T, Sayem A A, Xu M R, Wang S H, Cheng R S, Jiang L, Tang H X 2020 *Nat. Commun.* **11** 3237
- [39] Xu M R, Han X, Zou C L, Fu W, Xu Y T, Zhong C C, Jiang L, Tang H X 2020 *Phys. Rev. Lett.* **124** 033602
- [40] Liang Z T, Zhang G Q, Yuan J H, Ye Q Z, Liao K Y, Xue Z Y, Yan H, Zhu S L 2022 *Sci. China-Phys. Mech. Astron.* **65** 240362
- [41] Zhu S L, Wang Z D, Zanardi P 2005 *Phys. Rev. Lett.* **94** 100502
- [42] Zhu S L, Wang Z D 2003 *Phys. Rev. Lett.* **91** 187902
- [43] Liang Y, Shen P, Ji L N, Xue Z Y 2023 *Phys. Rev. Appl.* **19** 024051
- [44] Ji L N, Liang Y, Shen P, Xue Z Y 2022 *Phys. Rev. Appl.* **18** 044034
- [45] Chen T, Xue Z Y, Wang Z D 2022 *Phys. Rev. Appl.* **18** 014062
- [46] Liang M J, Xue Z Y 2022 *Phys. Rev. A* **106** 012603
- [47] McKenzie-Sell L, Xie J, Lee C M, Robinson J W, Ciccarelli C, Haigh J A 2019 *Phys. Rev. B* **99** 140414
- [48] Sarabi B, Huang P, Zimmerman N M 2019 *Phys. Rev. Appl.* **11** 014001
- [49] Stockklauser A, et al. 2017 *Phys. Rev. X* **7** 011030
- [50] Wang C H, Zhang M, Jiang L 2022 *Phys. Rev. Res.* **4** L042023
- [51] Xiang Z L, Zhang M, Jiang L, Rabl P 2017 *Phys. Rev. X* **7** 011035
- [52] Vermersch B, Guimond P O, Pichler H, Zoller P 2017 *Phys. Rev. Lett.* **118** 133601

SPECIAL TOPIC — The 90th Anniversary of South China Normal University and Physics Discipline

Research progress of superconductor and cold atoms hybrid quantum system^{*}

Lv Qing-Xian¹⁾²⁾ Li Sai¹⁾ Tu Hai-Tao¹⁾ Liao Kai-Yu¹⁾
Liang Zhen-Tao^{1)†} Yan Hui¹⁾²⁾³⁾ Zhu Shi-Liang¹⁾²⁾³⁾

1) (*Key Laboratory of Atomic and Subatomic Structure and Quantum Control (Ministry of Education),
School of Physics, South China Normal University, Guangzhou 510006, China*)

2) (*Guangdong Provincial Key Laboratory of Quantum Engineering and Quantum Materials,
South China Normal University, Guangzhou 510006, China*)

3) (*Frontier Research Institute for Physics, Guangdong-Hong Kong Joint Laboratory of Quantum Matter,
South China Normal University, Guangzhou 510006, China*)

(Received 14 June 2023; revised manuscript received 6 October 2023)

Abstract

The hybrid quantum system composed of superconductor and cold atoms is expected to achieve fast quantum gates, long-life quantum storage and long-distance transmission through optical fibers, making it one of the most promising hybrid quantum systems to realize optical interconnection between two superconducting quantum computers. In this paper, we comprehensively review the recent research advancements in the optical interconnection of two superconducting quantum computers, based on the superconductor and cold atoms hybrid quantum system, specifically the review covers the coherent coupling between superconducting chips and cold atoms, the coherent microwave-to-optics conversion, and the long-range microwave interconnection between superconducting qubits and quantum converters. The system is expected to provide a physical and technical foundation for practical optical-fiber interconnection of two superconducting quantum computers, and have broad applications in distributed superconducting quantum computation and hybrid quantum networks.

Keywords: superconductor and cold atoms hybrid quantum system, coherent coupling, microwave-to-optics conversion, long-distance microwave interconnection

PACS: 03.67.-a, 42.50.-p, 42.50.Pq, 03.67.Lx

DOI: [10.7498/aps.72.20230985](https://doi.org/10.7498/aps.72.20230985)

^{*} Project supported by the Innovation Program for Quantum Science and Technology, China (Grant No. 2021ZD0301705), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 12104168, 12074132, 12225405, 12247123, 12304287, U20A2074, 12074180), the National Key Research and Development Program of China (Grant Nos. 2022YFA1405300, 2022YFA1405303, 2020YFA0309500), the China Postdoctoral Science Foundation (Grant Nos. 2022M721222, 2023T160233), the Basic and Applied Basic Research Foundation of Guangdong Province, China (Grant Nos. 2021A1515110668, 2023A1515011550), and the Science and Technology Program of Guangzhou, China (Grant No. 202201010533).

[†] Corresponding author. E-mail: ztliangscnu@163.com



超导-冷原子复合系统的研究进展

吕庆先 李赛 涂海涛 廖开宇 梁振涛 颜辉 朱诗亮

Research progress of superconductor and cold atoms hybrid quantum system

Lv Qing-Xian Li Sai Tu Hai-Tao Liao Kai-Yu Liang Zhen-Tao Yan Hui Zhu Shi-Liang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 200306 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20230985

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230985>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

微波驱动下超导量子比特与磁振子的相干耦合

Coherent coupling in a driven qubit-magnon hybrid quantum system

物理学报. 2022, 71(15): 150302 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220260>

腔光力系统制备微波非经典态研究进展

Research progress in non-classical microwave states preparation based on cavity optomechanical system

物理学报. 2020, 69(5): 054203 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191735>

用于冷原子的高精度磁场锁定系统

High-precision magnetic field locking system for cold atoms

物理学报. 2022, 71(14): 145205 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220399>

铁基超导中拓扑量子态研究进展

Research progress of topological quantum states in iron-based superconductor

物理学报. 2018, 67(20): 207101 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181455>

腔自旋波混合系统的研究进展

Research progress of hybrid cavity-magnon systems

物理学报. 2019, 68(23): 230305 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191608>

111型铁基超导材料研究进展

Research progress about 111-typed iron based superconductor

物理学报. 2018, 67(20): 207414 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181586>