

## 量子微波制备方法与实验研究进展

苗强 李响 吴德伟 罗均文 魏天丽 朱浩男

### Preparation methods and progress of experiments of quantum microwave

Miao Qiang Li Xiang Wu De-Wei Luo Jun-Wen Wei Tian-Li Zhu Hao-Nan

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 68, 070302 (2019) DOI: 10.7498/aps.68.20191981

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191981>

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

纠缠微波信号的特性及表示方法

Characteristics and expressions of entangled microwave signals

物理学报. 2018, 67(24): 240301 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181595>

一种生成质量最优路径纠缠微波信号的压缩参量选择方法

An approach to selecting the optimal squeezed parameter for generating path entangled microwave signal

物理学报. 2017, 66(23): 230302 <https://doi.org/10.7498/aps.66.230302>

一种基于von Neumann熵的双路径纠缠量子微波信号生成质量评估方法

A method of evaluating the quality of dual-path entangled quantum microwave signal generated based on von Neumann entropy

物理学报. 2016, 65(11): 114204 <https://doi.org/10.7498/aps.65.114204>

基于纠缠见证的路径纠缠微波检测方法

Path-entanglement microwave signals detecting method based on entanglement witness

物理学报. 2018, 67(4): 040301 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172164>

微波连续变量极化纠缠

Continuous variable polarization entanglement in microwave domain

物理学报. 2019, 68(6): 064204 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181911>

## 量子微波制备方法与实验研究进展\*

苗强<sup>†</sup> 李响 吴德伟 罗均文 魏天丽 朱浩男

(空军工程大学信息与导航学院, 西安 710077)

(2018年11月7日收到; 2019年2月16日收到修改稿)

量子微波信号既保留了经典微波信号的空间远距离传播能力, 又具有非经典的量子特性, 为微波频段量子通信、量子导航及量子雷达等基于大尺度动态空间环境无线传输的量子信息技术提供了可资利用的重要信号源. 按照腔量子电动力学系统、超导电路量子电动力学系统和腔-光(电)-力学系统三大类型实验平台, 归纳、分析了微波单光子、纠缠微波光子以及压缩微波场和纠缠微波场的产生原理、方法和相关典型实验的进展, 并探讨了非经典微波场在量子导航等自由空间传输系统应用中需重点解决的若干关键问题.

**关键词:** 非经典微波, 微波单光子, 纠缠微波光子, 压缩微波场, 纠缠微波场

**PACS:** 03.67.-a, 84.40.-x, 42.50.Dv

**DOI:** 10.7498/aps.68.20191981

## 1 引言

量子信息科学建立在量子力学的叠加性、纠缠性、非局域性和不可克隆性等特性的基础上, 可以突破现代经典信息技术量测的物理极限, 开拓了与经典电磁应用方式具有本质区别的全新信息处理功能<sup>[1]</sup>. 目前正在研究利用的基于空间传播场的量子信息技术主要包括量子通信、量子定位、量子雷达等<sup>[2-4]</sup>. 由于高能单光子在光子探测等实际应用中具有优势, 使得光学波段量子信息技术的研究与应用在当前量子信息技术发展进程中占据主导地位. 然而, 光波的自由空间传输受天气条件及大气尘埃、粒子影响较大. 相对于可见光及其他频段电磁信号, 微波受大气环境影响较小, 云雾穿透能力较强, 而且在高功率信号产生以及接收探测等方面具有一定的优势, 现行很多基于自由空间传播场的信息传输系统工作于微波波段.

近年来, 科研工作者们已通过多种不同方式在实验中发现或制备了微波频段的非经典电磁场——

量子微波, 如微波单光子、微波纠缠光子对、压缩态微波场和纠缠态微波场等. 量子微波信号既保留了经典微波信号在空间中的远距离传播能力, 又具有非经典的量子特性, 在大尺度动态空间环境中具有重要的应用前景, 甚至会对传统的通信、导航、雷达等领域产生颠覆性影响. 量子微波的生成为微波频段量子信息处理、量子隐形传态、量子密集编码, 特别是微波量子通信、微波量子雷达以及量子超精密测量等基于空间传输的量子信息技术提供了可资利用的重要信号源. 作者及其研究团队近年来持续跟踪量子微波相关实验进展, 对目前产生非经典微波的原理、方法及其相关典型实验进行了归纳分析, 并探讨了非经典微波在量子导航等自由空间传输系统应用中需着重破解的若干关键问题.

## 2 腔量子电动力学系统、超导电路量子电动力学系统和腔-光(电)-力学系统

腔量子电动力学系统 (cavity quantum

\* 国家自然科学基金(批准号: 61603413, 61573372)、陕西省自然科学基金(批准号: 2017JM6017)和空军工程大学校长基金(批准号: XZJK2018019)资助的课题.

<sup>†</sup> 通信作者. E-mail: [mqmiaoqiang@126.com](mailto:mqmiaoqiang@126.com)

electrodynamics, C-QED) 与超导电路量子电动力学系统 (circuit quantum electrodynamics, c-QED) 是实现量子微波的两类最重要的实验平台. 此外, 近年来研究较多的腔-光(电)-力学系统也被用来产生非经典微波. 目前的量子微波制备主要基于以上三类系统实现各种不同类型的非经典、非线性量子效应, 如克尔效应 (Kerr effect)、卡西米尔效应 (Casimir effect)、三波混频 (three-wave mixing)、四波混频 (four-wave mixing) 等, 以产生不同性质的量子微波.

腔量子电动力学系统描述了在高品质的共振腔中某一物质 (一般为原子、分子系统) 与电磁场之间的相干耦合. 在强耦合情况下, 原子在从腔场泄露出来之前, 与单模腔场多次发生单光子交换. 而通过腔场与双能级原子 (或分子及其他系统) 的相互作用可以产生腔场的非经典态 [5-7].

超导电路量子电动力学系统是基于超导传输线和超导约瑟夫森结 (Josephson junction) 耦合构成的超导微电路, 它可以看成是原子腔量子电动力学原理在固态领域的实现. 基于超导约瑟夫森结的量子比特 (qubit) 对应人工原子, 与之耦合的超导传输线对应光学微腔 [8,9]. 根据约瑟夫森能 (energy of Josephson) 和充电能 (energy of charge) 的大小, 可以将量子比特分为电荷量子比特 (charge qubit)、磁通量子比特 (flux qubit)、相位量子比特 (phase qubit) 以及传输子量子比特 (transmon qubit) 等. 超导电路量子电动力学系统的典型工作频率范围在 1—10 GHz. 与腔量子电动力学系统相似, 超导电路量子电动力学系统也可以产生微波频段的非经典态, 而且微波光子可以在超导传输线中无损传输, 具备良好的量子相干性和可集成性, 是目前最受重视的固态量子信息处理系统之一 [10-13].

腔-光-力学系统 (cavity optomechanical system) 是光腔与机械振子相结合的系统, 其典型结构是光场被增强的光学共振腔 (或者微腔), 其一端带有可移动的反射镜或等效为腔镜的各种结构 (机械振子), 如图 1(a) 所示. 在腔-光-力学系统中, 光与机械谐振子的非线性相互作用导致了非经典的效应, 如类电磁诱导透明现象、腔场与机械振子之间的纠缠以及场的非线性, 因此使得这一体系成为重要的量子系统 [14,15].

腔-电-力学系统 (cavity electromechanics system) 是腔-光-力学原理在微波频段的实现, 结构很相似. 它由微波腔和机械振子结合, 如图 1(b)

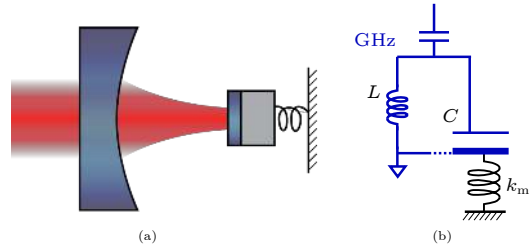


图 1 (a) 腔-光-力学系统结构示意图; (b) 腔-电-力学系统结构示意图

Fig. 1. (a) Schematics of the cavity optomechanical system; (b) schematics of the cavity electromechanics system.

所示. 微波腔由 LC 振荡电路构成, 电容器的一端固定, 另一端可移动, 当腔体受到微波场驱动作用时, LC 振荡电路中的电流发生变化, 使得电容器移动端的位置和体系电容发生改变的同时引起回路中的电流再次变化, 导致微波场与机械振子发生相互作用 [16].

### 3 量子微波制备方法与典型实验进展

在探讨量子微波源之前, 有必要区别一下“微波光子”一词的两个概念. 在常见的微波工程或光学工程论著里, 微波光子学是研究微波和光波相互作用规律及应用的一门新兴学科, 用光子学的方法来产生、分配、处理微波信号, 根本目标是提升现有的微波系统的性能, 使得系统在频率、带宽、动态范围、抗干扰等方面获得提升 [17], 而这并不是本文涉及的“微波光子”. 本文所研究的“微波光子”是微波频段的电磁场能量量子, 是微波场的基本能量单元, 是光频光子在微波频段的对应 [18].

量子信息科学根据所利用的量子系统的本征态具有分离谱或是连续谱结构, 将量子变量分为分离变量与连续变量两大类 [19,20]. 能够用有限维希尔伯特空间表征的量子变量为分离变量, 如光子或光场的偏振. 另一类量子变量, 如粒子的位置与动量、光场的正交振幅与正交位相分量等, 它们的每一个值对应不同的正交本征态, 其本征态构成无限维希尔伯特空间, 称为连续变量. 以下分别探讨微波频段的分离变量量子系统 (微波单光子和纠缠微波光子) 和连续变量量子系统 (压缩态微波场和纠缠态微波场) 的产生方法、原理和实验进展.

#### 3.1 微波单光子的制备

产生单光子是制备光子偏振态、光子数态

(Fock 态) 的基础. 在光学频段, 单光子的产生可以有多种途径<sup>[21]</sup>, 如激光衰减方法、腔量子电动力学方法(单个原子或分子、量子点单光子源)、自发参量下转换(spontaneous parametric down-conversion, SPDC)等. 可以类比光频单光子源研究产生微波单光子, 但由于频率相差几个数量级, 因此微波光子比光频光子能量微弱很多. 波长  $1.5 \mu\text{m}$  的红外光子等效温度为  $10000 \text{ K}$ , 而波长  $3 \text{ cm}$  的微波光子等效温度仅有  $0.5 \text{ K}$ , 因此常温环境下极难观测、验证微波场的量子效应<sup>[22]</sup>. 近年来在微波单光子源及探测器研究方面取得了较大进展. 按照实验途径, 目前研究较多的微波单光子制备方法可基本划分为腔量子电动力学和超导电路量子电动力学方案.

### 3.1.1 腔量子电动力学系统

单原子或者一些类原子系统在电学激发下能发射出单个光子. 处于激发态的电子通过自发辐射跃迁到基态后产生一个光子. 由于跃迁需要一定的时间, 处于激发态的原子在辐射光子并返回基态前不会吸收光子, 所以原子(或类原子)系统产生的光子是严格的单光子. 腔量子电动力学系统为实现这种产生方法提供了原子系统与场相互作用的平台——微波谐振腔, 即利用微波腔中的原子系统与电磁场的相互作用产生微波单光子辐射.

腔量子电动力学方法制备微波单光子的典型代表是微-微波激射器(micro-maser)或单原子微波激射器. 微波激射器是含有一个微波腔和一束入射到腔中的处于激发态原子流的物理系统, 原子流足够稀疏以至每次最多只有一个原子出现在微腔中. 微波激射器为观察原子与辐射场相互作用的量子特性提供了最简单的物理系统<sup>[23]</sup>. 利用微-微波激射器已可以实现多种量子效应, 如微波场的亚泊松分布、光子数态<sup>[24]</sup>和压缩态<sup>[25]</sup>的产生等.

张智明教授团队对微-微波激射器作为腔量子电动力学系统进行了广泛而深入的研究, 如图 2 所示. 设有一个两能级原子, 其基态为  $|g\rangle$ , 激发态为  $|e\rangle$ . 初始时, 原子由  $|e\rangle$  态进入真空态为  $|0\rangle$  的腔中, 腔模频率  $\omega$  等于  $|e\rangle \leftrightarrow |g\rangle$  跃迁频率  $\omega_{eg}$ , 初始的原子-腔态表示为  $|e\rangle|0\rangle$ . 当原子跃迁到基态  $|g\rangle$  时, 腔中产生一个光子, 此时原子-腔态表示为  $|g\rangle|1\rangle$ <sup>[26]</sup>. 通过控制进入微-微波激射器腔中的原子(或分子)数, 能够达到辐射单光子的目的. 为了观测到理论所预言的量子效应, 首先原子通量要足够小,

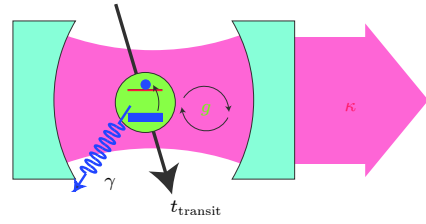


图 2 腔量子电动力学系统

Fig. 2. Cavity quantum electrodynamics system.

以保证在任何时刻, 腔中最多只有一个原子, 从而实现单个原子与电磁场的相互作用. 另外原子与腔场的相互作用需要足够强. 处于高里德堡(Rydberg)态的原子可以满足这一要求, 而且相邻里德伯态之间的跃迁频率正好处在微波区 ( $10\text{--}120 \text{ GHz}$ ). 实验所用处于里德伯态的铷原子, 其能级  $6^3\text{P}_{3/2}$  与  $6^1\text{D}_{3/2}$  之间的跃迁频率约为  $21.5 \text{ GHz}$ <sup>[27,28]</sup>. Jones 团队利用微-微波激射器对微波光子进行级联放大, 在微腔中激发态里德堡原子与腔场光子相互作用, 通过微腔出射原子的里德堡状态实现微波单光子的探测. 实验中的微-微波激射器使用处于里德堡态  $6^3\text{P}_{3/2}$  的激发态铷原子, 基态为  $6^1\text{D}_{5/2}$ , 跃迁频率  $21.456 \text{ GHz}$ <sup>[29]</sup>.

除单原子或分子外, 量子点方法在光频单光子制备和探测方面研究较多, 但尚未见到利用量子点产生微波单光子的相关实验. 但只要设计合适的材料制备半导体量子点使其二能级差处于微波频段, 理论上也可实现微波单光子辐射.

### 3.1.2 超导电路量子电动力学系统

由于超导量子比特包含很多原子, 其有效偶极矩(dipole matrix)比碱金属原子和里德伯原子大很多, 而且一维传输线模体积小, 因此即使固态环境的干扰作用较强, 超导电路与腔的强耦合仍然是可以实现的, 能够观察到单个人工原子和单个微波光子的相互作用<sup>[30,31]</sup>. 基于超导电路量子电动力学系统, 近年来的研究取得了一系列重要进展, 例如, 观察到了微波光子的类粒子特性, 实现了微波单光子态和光子数态的制备和检测<sup>[32-34]</sup>.

Bozyigit 等<sup>[35]</sup>和 Eichler 等<sup>[36]</sup>利用超导电路实现了微波频段单光子态产生与检测技术的新突破, 如图 3 所示. 他们用精确操控的超导量子比特与谐振腔的耦合电路实现了微波单光子源, 其多光子的发射概率基本可以忽略.

2016 年, Peng 等<sup>[37]</sup>利用片装可控超导人工原

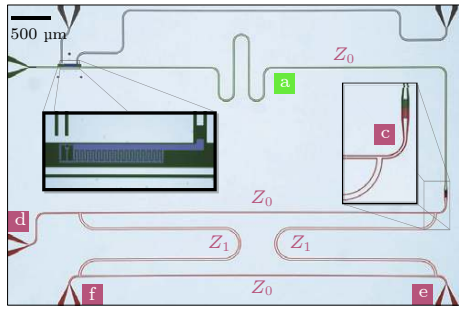


图 3 微波单光子产生设备<sup>[35]</sup>, 左侧内插图即为超导量子比特 a: 超导传输线谐振腔; c: 输出电容; d: 热噪声端口; e/f: 相干测量端口;  $Z_0$  和  $Z_1$  为匹配阻抗

Fig. 3. The experimental set-up of generating microwave single-photon, where the left inset denotes qubit. a: superconducting transmission line resonator; c: output capacitance; d: thermal noise port; e/f: coherent measurement port;  $Z_0$  and  $Z_1$  are matching impedance.

子(量子比特)与两端开路传输线(控制和辐射传输线)的非对称耦合电路实现了可控的微波单光子源,如图4所示.该单光子源中的人工原子与控制传输线弱耦合,而与辐射传输线强耦合,人工原子经微波 $\pi$ 脉冲激励后在传输线中辐射微波单光子,该实验在7.75—10.5 GHz的可调频域内得到近90%的单光子效率,光子频率的调整由外加磁通控制.在探测方面,Yin等<sup>[38]</sup>利用电流偏置的约瑟夫森结作为一个三能级系统实现了微波单光子的探测,探测效率达到70%.该约瑟夫森结可以从入射场中吸收微波单光子,并用于工作在4 GHz的HBT(Hanbury-Brown and Twiss)实验验证微波热态的光子群聚效应.日本Tokyo Medical and Dental University的Kunihiro等<sup>[39]</sup>和Inomata等<sup>[40]</sup>利用超导量子比特的缀饰态构成的人工 $\Lambda$ 系统实现微波单光子探测.微波单光子引起 $\Lambda$ 系统的拉

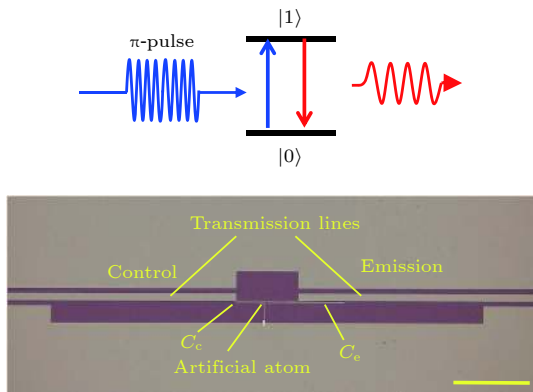


图 4 频率可调微波单光子源原理与结构<sup>[37]</sup>

Fig. 4. Principle and structure of frequency-adjustable microwave single-photon source.

曼跃迁(Raman transition)并激发量子比特,从而实现微波单光子探测,其单光子探测效率达到66%.

利用超导电路量子电动力学实现单光子探测是目前研究最为广泛和深入的方法.除此之外,利用其他物理效应探测微波单光子的方法也不断被提出,如微波动态电感探测器(microwave kinetic inductance detector, MKID)、超导转变边界光子探测器(transition edge sensors, TESs)、超导隧道结(superconducting tunnel junctions, STJs)、超导纳米线(superconducting nanowire single photon detector, SNSPD)等<sup>[41]</sup>.

### 3.1.3 腔-光(电)-力学系统

利用腔-光(电)-力学系统实现微波单光子源的实验未见报道.目前只有通过电-光-力学系统(electro-opto-mechanical, EOM)实现微波光子和光频光子的路径纠缠来间接产生微波单光子的方案.即:若在一路探测到光频单光子,则在另一路必定获得微波单光子,相关内容在后续纠缠微波光子制备部分探讨.

## 3.2 纠缠微波光子的制备

纠缠微波光子对或多组分纠缠微波光子可用于微波频段量子通信或量子雷达,成为微波频段重要的量子信息源.光频量子纠缠源的制备研究较为深入,其产生纠缠光子的主要物理机理包括:基于二阶非线性效应的BBO, KDP等晶体或者PPLN, PPKTP等准相位匹配晶体的自发参量下转换;基于三阶非线性效应的色散位移光纤或者光子晶体光纤中的四波混频过程等.纠缠微波光子的产生方法可参照纠缠光子的制备原理,关键在于制备类似产生光频纠缠光子的BBO, PPKTP等晶体的非线性器件或系统.

目前已有多种制备纠缠微波光子的理论和实验研究方法,实现的物理机理也与光频纠缠光子制备相似,主要是利用腔量子电动力学系统、超导电路量子电动力学系统以及腔-光(电)-力学系统等几类系统实现类似纠缠光子生成过程的非线性效应.

### 3.2.1 腔量子电动力学系统

腔量子电动力学系统产生光频纠缠光子的基本原理是利用原子与高品质因数光腔的耦合作用,已有多种方案提出并进行了实验验证<sup>[42-44]</sup>.而

利用腔量子电动力学系统产生纠缠微波光子的关键问题在于能级差处于微波频段的材料. 腔量子电动力学系统中实现纠缠微波光子对的典型途径是超导纳米结构-量子点 (对应光频的原子). 量子点导带和价带的带间跃迁可以产生可见光频段光子, 而带内跃迁则可产生微波频段光子. Emary 和 Trauzettel<sup>[45]</sup> 利用一对量子点的带内跃迁产生了偏振纠缠的微波光子对, 如图 5 所示. 四个量子点置于圆柱形微波谐振腔中, 两个量子点 (L,R) 提供电子的初态和终态, 另外两个量子点 (A,B) 提供衰变路径. 电子从 L 中的高能级初态隧穿进入 (A,B) 的高能级的叠加态  $2^{-1/2}(|A^* \rangle + |B^* \rangle)$ , 然后通过辐射两个光子衰变到基态. 量子点 A(B) 中产生两个左旋 CP<sup>+</sup>(或右旋 CP<sup>-</sup>) 的圆偏振光子, 即量子点与微波光子系统的态为

$$2^{-1/2} (|A_G \rangle |++ \rangle + |B_G \rangle |-- \rangle).$$

通过量子点 (A,B) 与量子点 R 耦合, 使微波光子对与电子解纠缠, 得到纠缠微波光子对  $2^{-1/2} (|++ \rangle + |-- \rangle)$ . 这一过程类似于非线性晶体中的参量下转换产生光频纠缠光子对的物理机理.

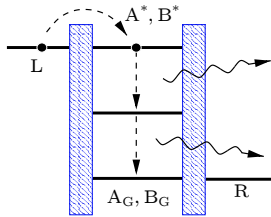


图 5 利用量子点产生纠缠微波光子对的原理<sup>[45]</sup>

Fig. 5. Principle of generating entangled microwave photon pair using quantum dots.

Shi 等<sup>[46]</sup> 提出了利用 HgTe 量子点产生偏振纠缠光子, 辐射光子在太赫兹范围 (MeV 量级), 并从理论上论证了该方案对量子点内无序性的鲁棒特性, 但目前尚未见到相关实验报道.

### 3.2.2 超导电路量子电动力学系统

超导电路量子电动力学系统是目前产生微波纠缠光子对的重要平台. 利用不同结构的超导电路量子电动力学系统已经研究了多种能够产生微波光子纠缠的非线性效应 (如动态卡西米尔效应、克尔效应等), 并通过实验进行了验证.

在量子理论中, 对电磁场进行量子化会发现真空零点能的存在. 而在非静态真空腔中, 一个腔壁的快速运动可以使量子真空涨落 (vacuum

fluctuation) 转变成真实的光子, 这一现象被称为动态卡西米尔效应. 动态卡西米尔效应本质上是一种通过外界扰动 (例如介电常数、电导率等边界材料的特性随时间变化) 改变量子场的模式结构, 进而从量子真空涨落中产生光子对的量子放大过程. 2011 年瑞典查尔姆斯工业大学 Wilson 等<sup>[47]</sup> 在《Nature》上发表了关于测量动态卡西米尔效应的实验, 他们利用基于可变边界条件的微结构共面波导的超导电路实现了动态卡西米尔效应. 实验中通过调谐超导量子干涉仪的磁通实现了对边界条件的快速调制, 结果显示测得了真空释放的微波频段的光子对, 并通过二阶相干函数证明了双光子的时空强相干特性<sup>[48,49]</sup>, 如图 6 所示. 在这一过程中, 实光子对的能量来自于磁通对边界条件的驱动 (频率为  $\Omega$ ), 而且微波光子对的频率 ( $\omega_1, \omega_2$ ) 之和等于边界条件变化的频率  $\Omega$ , 即  $\omega_1 + \omega_2 = \Omega$ .

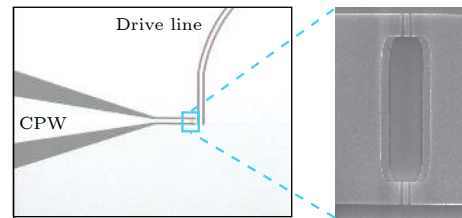


图 6 Wilson 小组实验装置及超导量子干涉仪电子扫描照片<sup>[48]</sup>

Fig. 6. The scanning-electron micrograph of the experimental device and SQUID of Wilson group<sup>[48]</sup>.

基于卡西米尔效应产生微波纠缠光子对只是超导电路量子电动力学方法产生微波纠缠光子的一种. 目前, 以超导约瑟夫森结为核心的超导电路量子电动力学系统已经成为产生非经典微波的重要平台, 即约瑟夫森-光子装置. 多个团队都对其产生微波纠缠光子进行了理论和实验研究<sup>[50-54]</sup>. 在这种实验系统里, 量子比特与两个或多个微波传输线谐振腔耦合. 约瑟夫森结在两个或多个耦合谐振腔 (谐振于相同或不同的频率) 里分别产生微波光子, 其等效电路如图 7 所示<sup>[51]</sup>.

通过偏置电压得到的约瑟夫森频率  $\omega_j = 2eV/\hbar$  与几个谐振腔的频率之和匹配, 即  $\omega_j = \sum_q \omega_q$ . 图 7 中显示的关系为  $\omega_j = \omega_a + \omega_b + \omega_c$ . 此时一个库珀对 (Cooper pair) 遂穿约瑟夫森结时将会同时在每个场模中产生一个微波光子, 这些光子通过耦合输出线进入到各个谐振腔里, 最终形成

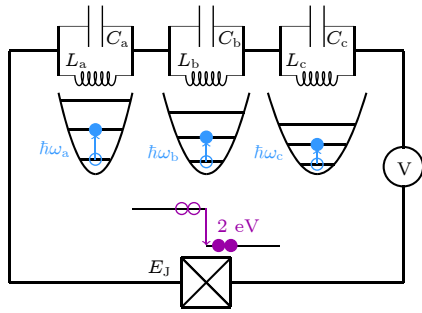


图 7 约瑟夫森-光子装置等效电路原理图<sup>[54]</sup>

Fig. 7. Sketch of an equivalent circuit principle of Josephson-photonics device.

了空间分离的微波光子纠缠. 这种纠缠产生装置结构简单, 通过适当设置约瑟夫森-光子装置的实验参数, 可以实现多种不同类型的纠缠态<sup>[52–55]</sup>.

### 3.2.3 腔-光(电)-力学系统

在腔-光(电)-力学系统中, 光或电与机械谐振子相互作用的非线性导致了非经典效应的产生, 使得这一体系成为重要的量子系统. 而电-光-力学系统由包含了机械谐振子的光腔和微波腔共同组成, 是腔-光-力学系统与腔-电-力学系统的集合<sup>[56]</sup>. 在该系统中, 机械谐振子既与光场耦合, 也与微波场耦合, 其结构如图 8 所示. 目前未见到利用该类系统产生微波光子离散变量纠缠的方案. 而文献<sup>[57–60]</sup>的研究表明, 将机械谐振子作为光频光子与微波光子的量子接口, 可以利用电-光-力学平台产生光场与微波场的纠缠.

利用蓝、红失谐激光分别驱动微波场和光场, 此时的哈密顿量为

$$\hat{H} = g_{mm}(\hat{a}\hat{b} + \hat{a}^+\hat{b}^+) + g_{om}(\hat{c}\hat{b}^+ + \hat{c}^+\hat{b}), \quad (1)$$

其中  $g_{mm}$  为微波场与机械谐振子之间的耦合强度,  $g_{om}$  为光场与机械谐振子之间的耦合强度,  $\hat{a}, \hat{b}, \hat{c}$  分别为微波光子、机械振动声子以及光频光子的湮灭算符. (1) 式第一部分表示吸收(发射)蓝失谐激光光

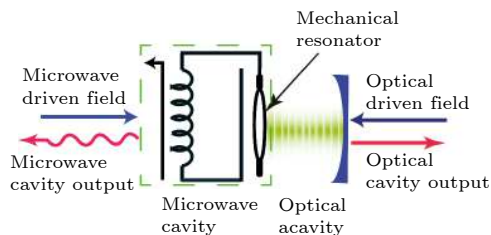


图 8 电-光-力学系统典型结构

Fig. 8. The typical structure of electro-opto-mechanical system.

子的同时产生(湮灭)微波光子和机械振动声子, 实现微波场和机械模的纠缠; 第二部分描述了系统吸收(发射)红失谐激光光子和机械振动声子的同时产生(湮灭)光频光子, 实现光场和机械振子间的量子态转换. 这两个过程同时发生可实现微波场和光场的高斯纠缠. 此时微波场和光场与机械振子可分别形成参量下转换和线性混合的相互作用, 从而在微波场和光场间实现双模压缩纠缠态. 若初始时刻光场、微波场都处于真空态, 系统在  $T$  时刻状态处于双模压缩真空态, 选取压缩因子  $r < 1$ , 得到系统状态为

$$|\psi(T)\rangle \approx |0_m, 0_o\rangle + r|1_m, 1_o\rangle. \quad (2)$$

可判断体系能够产生微波场和光场的光子数纠缠, 且在某一时刻若检测到光场为一个光子, 则微波场此时一定处于单光子态.

Barzanjeh 等<sup>[61,62]</sup>提出一种基于电-光-力学系统的微波量子照射雷达. 该量子雷达系统利用机械谐振子将微波腔与光腔耦合, 产生微波光子与光波光子的纠缠, 并将微波作为雷达信号照射目标, 光波信号作为休闲信号保留在本地, 然后对微波的回波变换成光波再与光波休闲信号进行符合测量, 如图 9 所示.

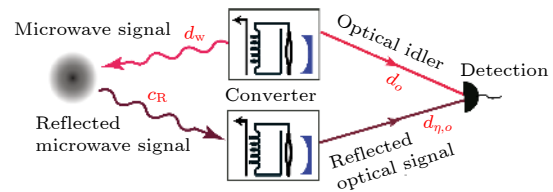


图 9 微波量子照射雷达示意图<sup>[61]</sup>

Fig. 9. Schematic of microwave quantum illumination.

### 3.3 压缩态及纠缠态微波场的制备

按照量子噪声特性可将连续变量量子微波场分为热态微波场、相干态微波场、压缩态微波场以及纠缠态微波场. 热态和相干态微波场的产生相对容易, 本文不再展开论述, 主要分析压缩态以及纠缠态微波场的产生原理与相关实验进展. 压缩态微波场可分为正交压缩、振幅压缩(光子数压缩)和强度差压缩微波场. 本文重点关注正交压缩微波场的制备原理和实验进展. 正交压缩微波场是将微波场某个正交分量的量子噪声压缩到经典散粒噪声极限以下的一种非经典微波场. 而压缩态微波场通过分束器与真空态或热态耦合, 可以产生连续变量

纠缠微波场. 连续变量纠缠微波场的纠缠特性体现为子系统正交分量之间的非定域量子关联<sup>[63]</sup>. 由于电磁场正交分量的纠缠与其耦合模的正交分量压缩相互联系, 故这种类型的纠缠又被称为压缩纠缠.

正交压缩光场具有突破量子噪声极限的特点, 被广泛应用于精密光学测量<sup>[64]</sup>和微弱引力波信号探测<sup>[65]</sup>等领域. 制备正交压缩态光场的方法途径很多, 目前已报道的不下数十种, 但按照产生原理基本可以分为参量过程、克尔效应和四波混频等非线性效应过程. 参量过程可以认为是二阶非线性效应的结果, 二阶非线性效应可以用于实现三波混频. 主要过程是将泵浦 $\omega_p$ 和信号 $\omega_s$ 输入至非线性器件, 产生差频信号 $\omega_i$ 即休闲信号, 结果使得 $\omega_s$ ,  $\omega_i$ 信号都得到放大, 如果 $\omega_s = \omega_i$ 则得到简并参量放大和单模压缩信号; 如果 $\omega_s \neq \omega_i$ , 则得到非简并参量放大, 但不会对任何一个模式产生压缩效应, 而是使双模之间产生关联特性, 得到双模压缩态. 三阶或更高阶非线性可以产生克尔效应, 实现光子之间的相互作用. 四波混频, 即一对泵浦光子产生信号光与休闲光的过程:  $2\omega_p = \omega_1 + \omega_2$ , 就是三阶非线性效应的结果. 压缩微波场的制备完全可参照压缩光场的制备原理和方法, 前提条件是能够制备实现以上非线性效应的材料、器件或电路.

### 3.3.1 腔量子电动力学系统

腔量子电动力学系统利用原子(原子系综、单原子或离子)和腔耦合(如囚禁在腔中二能级或多能级原子与腔模的相互作用)来制备压缩态和纠缠态光场, 是产生非经典光场的重要途径. 目前已有多种不同结构制备压缩/纠缠光场的腔量子电动力学系统被提出并得到实验验证.

而在微波频段, Pielawa等<sup>[66]</sup>提出了一种利用量子库(quantum reservoir)(用于囚禁离子)产生双模压缩纠缠态的方案, 如图10所示. 该方案中原子束起到原子库的作用. 利用原子束泵浦谐振腔, 且无需控制原子到达顺序, 但每次在谐振腔里只能有一个原子. 通过激光场和微波场的联合作用控制入射原子束处于里德堡态 $|g\rangle$ 和 $|e\rangle$ 的相干叠加态(能级差对应于偶极跃迁), 原子束与高品质因数微波谐振腔强耦合, 微波场饱和原子的偶极矩跃迁 $|g\rangle \rightarrow |e\rangle$ , 使微波腔谐振于两个非简并模式

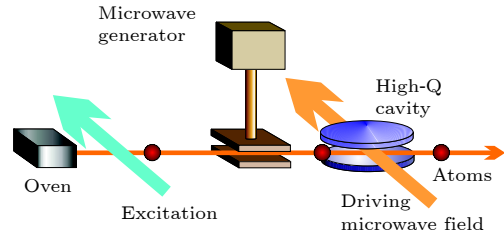


图10 利用量子库产生双模压缩态方案<sup>[66]</sup>

Fig. 10. Scheme of generating two-mode squeezed state using quantum reservoir.

( $\omega_1, \omega_2$ )上, 并逐渐演变并稳定于双模压缩态. 当原子从强驱动场吸收两个光子, 则会在两个场模边频上同时辐射两个强相干光子, 即四波混频的非线性过程, 这本质上对应于一个双光子过程. 两个场模谐振于原子偶极跃迁频率的两个拉比边带(Rabi sideband). 稳态时, 两个场模处于EPR(Einstein-Podolsky-Rosen)纠缠态, 且纠缠度可由驱动光场强及频率控制.

理论研究表明, 超冷原子与超导传输线腔之间的磁耦合强度可以达到强耦合区, 利用超冷原子与超导传输线腔的强耦合, 李蓬勃和李福利<sup>[67,68]</sup>提出了一种制备传输线腔场双模压缩态的新方法, 并证明了在特定条件下超冷原子自旋波与腔场耦合体系可以看作参数可控的三个耦合量子谐振子体系. 在该方案中, 包含原子数为 $N$ 的 $^{87}\text{Rb}$ 超冷原子系综囚禁于超导传输线谐振腔表面, 如图11所示. 通过对体系演化的相干控制, 在特定时刻超冷原子自旋波和腔场自由度分离, 而且此时腔场处于双模压缩态. 这一方案的优势在于可以通过调谐外部经典场的强度和失谐量方便地对压缩度进行调整, 并且具有较长的相干时间. 实际上该方案并不是一个典型的腔量子电动力学系统, 这里的谐振系统是超导传输线, 因此该方案是原子系综与超导电路量子电动力学系统的结合, 但结构及工作原理与腔量子电动力学系统更加相似.

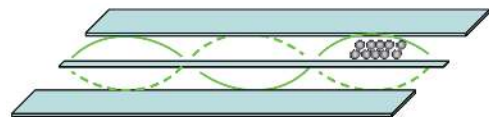


图11 基于超冷原子与超导传输线腔耦合产生双模压缩态方案<sup>[67]</sup>

Fig. 11. Scheme of generating two-mode squeezed state based on the coupling of ultracold atoms and superconducting transmission line resonator.



### 3.3.2 超导电路量子电动力学系统

以约瑟夫森结为核心器件的超导电路是超导电路量子电动力学系统的主要研究对象. 其优越的超导特性实现了超低的能量耗散, 其谐振电路具有较高的品质因数. 更重要的一点是, 可等效为电感的超导约瑟夫森结在电路中表现出极强的非线性特征. 因此可以在宏观尺度上实现这样一种量子比特或人工原子. 而由于其比普通原子要大得多, 所以人工原子具有超大偶极矩 (电或磁), 也因此耦合电路的帮助下人工原子可以实现与电磁场较强的非线性相互作用. 而由于单微波光子能量低, 实现单微波光子的探测与应用较为困难, 目前基于正交位相、正交振幅等信息的连续变量量子微波场的研究较多, 在压缩态微波场、连续变量纠缠微波场的生成与探测等方面取得了较大进展.

以超导约瑟夫森结为基础构建的约瑟夫森参量放大器 (Josephson parametric amplifier, JPA) 是制备压缩态微波场实验中应用较多的器件. 约瑟夫森参量放大器是包含超导共面波导谐振器和超导量子干涉仪 (superconducting quantum interference device, SQUID) 的电路, 如图 12(a) 所示. 它既可以实现微波信号的参量放大 [69], 又能够产生非经典的微波态 [70], 还可以单点读取超导磁通量子位 [53]. 作为一种相敏放大器 (phase sensitive amplifier), 它可以压缩微波场的一个正交分量 (具体是正交振幅分量还是正交位相分量取决于泵浦场信号与输入信号的相位关系) 的起伏, 而放大另一个正交分量上的起伏, 实现正交压缩微波场. 而在这一过程中, 伴随着泵浦光子分裂成信号光子和休闲光子的双光子过程. Menzel 等 [71] 利用该放大器首先实现了单模微波压缩场, 然后与真空态在微波混合环分束器中混合, 实现了空间分离的频率简并连续变量微波纠缠. 这里的超导 180°混合环 (hybrid ring, HR) 分束器工作原理类似于光学分束器 [72], 它将真空态与约瑟夫森参量放大器产生的压缩态混合, 分束的两路信号表现出纠缠特性, 如图 12(b) 所示.

Eichler 等 [73] 利用类似的约瑟夫森参量放大器产生压缩态微波场, 明显不同的地方在于, 该约瑟夫森参量放大器应用了三个超导量子干涉仪阵列作为非线性器件, 另外该参量放大器工作于非简并模式, 实现四波混频的作用  $2\omega_p = \omega_1 + \omega_2$ , 即两个泵浦光子生成一个信号光子和一个休闲光子, 产生

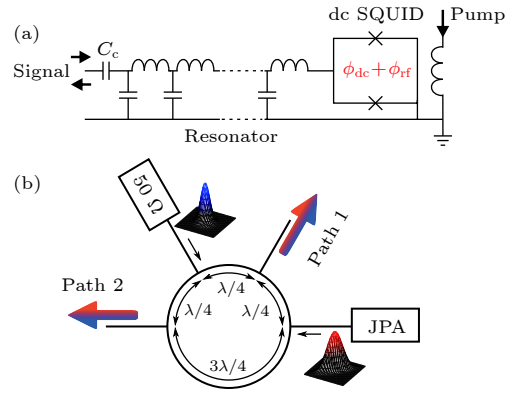


图 12 (a) 约瑟夫森参量放大器 [71]; (b) 180°混合环微波分束器 [72]

Fig. 12. (a) Josephson parametric amplifier; (b) 180° hybrid ring microwave beam splitter.

双模压缩微波场. 空间上耦合在一起的双模压缩微波场经过高电子迁移率场效应晶体管 (high electron mobility transistor, HEMT) 放大器放大后分成两路, 各与一个本地振荡信号进行差拍检测, 获取双路信号共四个正交分量的全部信息, 进而验证了其双模压缩特性, 如图 13 所示.

Ku 等 [74] 将压缩场与真空场输入微波分束器, 在输出端进行正交相关检测, 验证了两个输出模之间的纠缠特性, 如图 14 所示.

约瑟夫森环形调制器 (Josephson ring modulator, JRM) 是另一种可以作为频率转换器或者相位保持参量放大器应用的非线性电路. 它包含四个约瑟夫森结, 为典型的惠斯顿电桥结构, 完全对称, 且具有无损耗、无噪声以及强非线性特性. 其应用非常广泛, 如固态量子位的读取、频率变换以及纠缠微波光子对的产生等 [75,76]. Roch 等 [77] 在约瑟夫森环形调制器的基础上, 增加了四个交叉相连的线

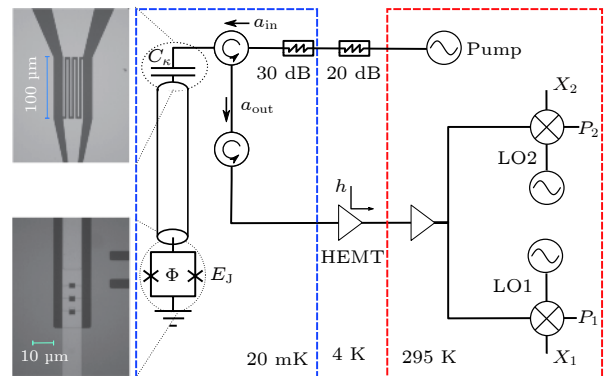


图 13 四波混频产生压缩微波场 [73]

Fig. 13. Schematic of generating squeezed microwave field using four-wave mixing.

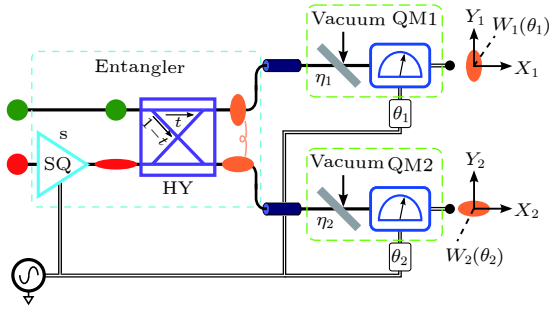


图 14 压缩场与真空场耦合产生纠缠微波场<sup>[74]</sup>

Fig. 14. Schematic of generating entangled microwave field using the squeezed field and vacuum field.

性电感, 设计了宽调谐的三波混频设备. Flurin 等<sup>[78]</sup>通过在这种电路上外加传输线和电容组成的谐振回路, 产生了空间分离的一对不同频率的双模压缩微波场, 即连续变量微波纠缠信号, 这种设备称之为约瑟夫森混频器 (Josephson mixer, JM), 如图 15 所示.

以上用于产生压缩态或纠缠态微波场的超导电路量子电动力学系统, 具体电路结构可能有所差异, 但基本工作原理都是基于超导电路量子电动力学系统的核心器件——约瑟夫森结的非线性电感以及由此产生的其他非线性效应, 如二阶非线性效应、克尔效应等, 而参量过程可以认为是二阶非线性效应的结果, 四波混频是三阶非线性效应的结果.

### 3.3.3 腔-光(电)-力学系统

腔-光(电)-力学系统是近年来产生压缩态、纠缠态微波场的重要研究平台<sup>[79,80]</sup>. Caspar 等<sup>[81]</sup>搭建了类似约瑟夫森参量放大器结构的腔-电-力学参量放大装置, 产生了噪声起伏比真空噪声低 8 dB

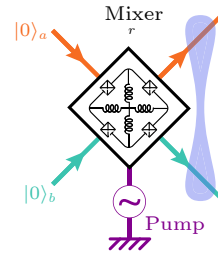


图 15 约瑟夫森混频器产生双模压缩微波场<sup>[78]</sup>

Fig. 15. Schematic of generating two-mode squeezed microwave field using Josephson mixer.

的压缩态微波场. 该装置包含一个超导微波谐振腔(谐振频率  $\omega_c/2\pi = 6.9148$  GHz, 线宽为 6.44 MHz), 与一个直径 15  $\mu\text{m}$  的振动薄膜耦合(振动频率  $\omega_m/2\pi = 10.319$  MHz, 线宽为 107 Hz), 谐振腔由包含两个频率 ( $\omega_d^\pm = \omega_c \pm (\omega_m + \delta)$ ) 的电压信号驱动,  $\delta$  表示相对共振频点的失谐. 两个系统通过微波辐射压耦合, 在过耦合状态, 机械振子不会吸收任何能量而将微波场完全反射, 如图 16 所示. 该实验系统可以看作约瑟夫森参量放大器产生单模压缩态微波场的实验方案在腔-电-力学系统中的对应.

Li 等<sup>[82]</sup>利用腔-电-力学平台制备了双模压缩纠缠态微波场, 其结构是利用纳米结构机械振子将两个超导共面波导谐振腔耦合, 如图 17 所示. 该结构与超导电路量子电动力学系统中的约瑟夫森-光子装置非常相似, 只是中间的非线性耦合器件由人工原子变成了机械振子. 机械振子的机械移动改变了电路电容, 使两个谐振腔与机械振子产生了参量耦合效应, 结果使得两个谐振腔之间产生了相互作用. 可以通过调整该实验装置电容上的驱动电压

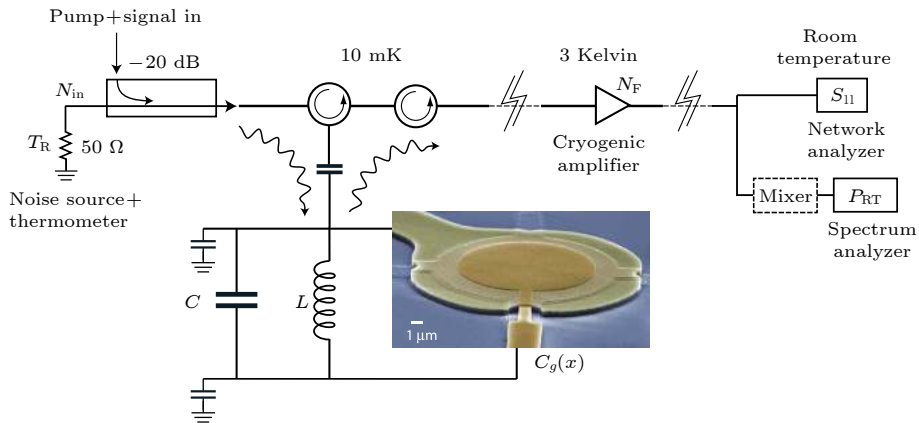


图 16 基于腔-电-力学系统的微波参量放大装置<sup>[81]</sup>

Fig. 16. The microwave parametric amplifier device based on cavity electromechanics system.

来改变谐振腔与机械振子的机电耦合强度, 进而调整产生的双模压缩纠缠态的纠缠度. 其中驱动电压  $V(t) = V_1 \cos(\omega_d^1 t) + V_2 \cos(\omega_d^2 t + \phi)$ ,  $\omega_d^1 = \omega_1 - \omega_m$ ,  $\omega_d^2 = \omega_2 + \omega_m$ ,  $\omega_2 > \omega_1$ ,  $\omega_1, \omega_2, \omega_m$  分别为两个微波谐振腔和机械振子的谐振频率.

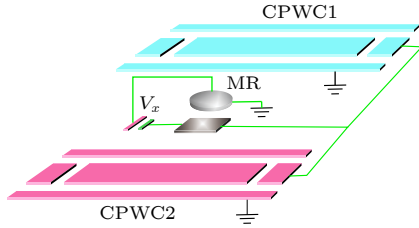


图 17 基于腔-电-力学系统的双模压缩微波场产生装置<sup>[82]</sup>  
Fig. 17. Device of generating two-mode squeezed microwave field based on cavity electromechanics system.

Sete 和 Eleuch<sup>[83]</sup> 利用超导电路量子电动力学与腔-电-力学的联合系统研究了微波压缩场的产生以及微波场与机械振子的纠缠, 系统结构如图 18 所示. 超导量子比特与传输线谐振腔 TLR1 以及微机械振子耦合, 机械振子再与另一个传输线谐振腔 TLR2 耦合. 在高损耗极限下, 超导量子比特与 TLR1 以及微机械振子的耦合会使传输线谐振腔与机械振子产生非线性耦合作用, 此外 TLR2 也会与机械振子产生非线性作用. 实验表明, 即使存在热噪声, 两种非线性作用的联合效应也能够实现微波场的强压缩, 且压缩度可通过调整泵浦微波场的功率来控制.

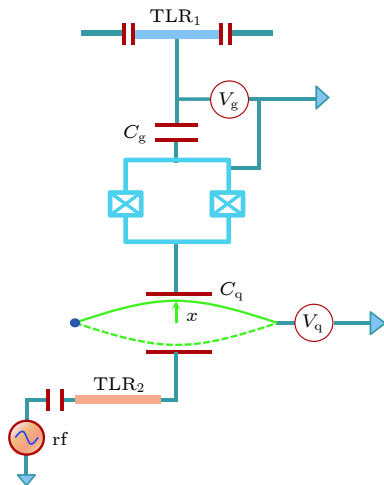


图 18 超导电路量子电动力学与腔-电-力学的联合系统制备压缩微波场<sup>[83]</sup>  
Fig. 18. The jointed system of circuit quantum electrodynamics and cavity electromechanics system that generating squeezed microwave field.

此外, 集合了腔-光-力学系统与腔-电-力学系统的电-光-力学系统也可以制备非经典微波场. 在电-光-力学系统中, 机械振子既与光场耦合, 也与微波场耦合. 若使微波场和光场都受红失谐激光驱动, 此时微波场和光场与机械振子均形成线性混合的相互作用, 使得二者均与机械振子形成量子态的交换, 因而机械振子可以成为光场与微波场的量子接口, 实现二者量子态的转移或者传递<sup>[84,85]</sup>. 因此, 利用电-光-力学系统, 选择红失谐激光驱动微波腔和光腔, 在光腔中输入压缩态光场, 利用微波场和光场之间的量子态转换, 在体系耗散系数很小时, 微波腔中可制备出高保真度的压缩态微波场, 即利用量子态的转移实现微波非经典态. Palomaki<sup>[86]</sup>, Tian<sup>[60]</sup> 以及 Wang 和 Clerk<sup>[87]</sup> 分别研究了在高斯态、猫态、单模压缩态和光子数态下, 不同热环境从光场到微波场间量子态的转移保真度及其演化.

利用机械振子作为光场与微波场的量子接口, Abdi 等<sup>[88]</sup> 设计了直接产生连续变量纠缠微波场的电-光-力学方案, 如图 19 所示.

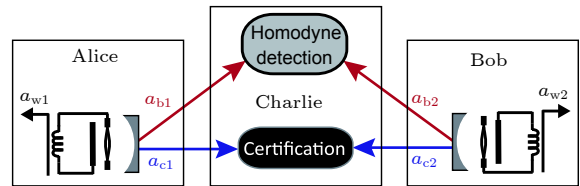


图 19 连续变量纠缠微波场的电-光-力学产生方案<sup>[88]</sup>  
Fig. 19. Scheme of electro-opto-mechanical system to generate continuous variable entangled microwave field.

该方案包含两个相隔一定距离的电-光-力学系统 Alice 和 Bob. 同样在每一个电-光-力学系统中利用蓝、红失谐激光分别驱动微波场和光场, 实现微波场和光场的纠缠. 相比微波场, 光场受退相干影响较小. Alice 和 Bob 将光学模送至二者中间的 Charlie, 对两个光学模进行贝尔态测量, 通过连续变量纠缠交换使空间相隔一定距离的两个微波场纠缠起来.

#### 4 量子微波场在微波量子导航中的问题探讨

量子微波场的生成为微波频段量子信息处理、量子密集编码, 特别是微波量子通信、微波量子雷达以及量子超精密测量等基于空间传输的量子信息技术提供了可资利用的重要信号源. 而且由于微

波场相对于光频信号具有更强的云雾穿透能力, 抗大气衰减能力强, 因此其在空间中的远距离传播能力更有利于量子微波信号大尺度动态空间环境中的量子信息传输应用, 甚至会对传统的通信、导航、雷达等领域产生颠覆性影响. 作者与研究团队近年来持续跟踪量子微波场的研究进展, 并在连续变量纠缠微波信号在无线电导航中的应用问题做了一些研究工作<sup>[89-91]</sup>. 利用量子纠缠微波信号实现在粒子性层面运用电磁场的无线电导航, 依靠纠缠粒子强关联、隐形传态等特性, 建立起新型无线电导航系统体制, 能够大幅提升无线电导航参数量测精度、弱信号检测能力、保密抗干扰等性能水平, 占据信息化战争条件下获取安全可靠导航信息的优势地位. 然而, 从实验室制备产生量子纠缠微波信号到实现在具体系统中的现实应用, 还有一系列理论和工程技术问题亟待解决.

#### 4.1 量子纠缠微波信号生成能力问题

目前, 已有研究团队成功制备了连续变量量子纠缠微波信号, 特别是 Menzel 团队利用约瑟夫森参量放大器以及 Flurin 团队利用约瑟夫森混频器产生了空间分离的纠缠微波信号, 为利用其纠缠特性奠定了技术基础. 然而, 目前纠缠微波信号的生成能力是有限的, 实验中制备的信号功率水平较低. 将纠缠微波信号应用于实际的无线电导航系统, 首先要解决的问题就是这种基于约瑟夫森结的量子纠缠微波信号生成能力的问题, 即如何提高所产生的压缩态、纠缠态微波场的辐射源功率、压缩度、纠缠度等性能指标, 以及降低对实验环境、实验条件要求的问题.

#### 4.2 量子纠缠微波信号传输信道退相干问题

量子纠缠微波导航信号的无线传播环境是一个量子系统与自由空间环境相互作用的开放系统. 纠缠信号在信道传输过程中, 因量子系统与周围环境的相互作用将环境的各种参数引入而使问题变得过于复杂, 自由空间传输衰减、湍流和非线性效应会引起纠缠度的下降, 导致应用系统的工作基础——纠缠微波相干性能的破坏. 总的来说, 纠缠微波信号在自由空间的传播问题主要有三个方面: 一是能量损耗问题; 二是与大气中物质作用引起的退相干问题; 三是空间形状散射导致的能量扩散和

部分检测问题. 目前, 纠缠微波信号的传播与量测都是在波导及微带传输线中进行的, 基本不存在这些问题. 但若向空间辐射纠缠微波信号, 上述问题不可避免.

#### 4.3 量子纠缠微波信号接收检测问题

量子纠缠微波信号经过自由空间传输的衰减, 到达接收方天线时能量已经非常弱, 甚至远低于于电路噪声. 因此, 需要在接收端解决信噪比的提高(如采用压缩真空注入及相敏放大等量子增强技术)以及纠缠微波信号的最优量子接收和检测问题. 此外, 如何有效利用量子纠缠微波信号的非经典特性, 在现有零拍检测及双路径接收检测方法的基础上, 探寻最适宜的接收检测方法, 将其非定域关联特性与无线电导航技术有效结合, 也是下一步工作中需要解决的重点问题.

### 5 小结与展望

尽管微波频段量子信息技术的研究和应用要比光学频段发展缓慢, 但由于微波受大气环境影响较小, 云雾穿透能力和远距离传播能力较强, 量子微波场的生成为微波频段量子信息处理、量子密集编码, 特别是微波量子通信、微波量子雷达以及量子超精密测量等基于空间传输的量子信息技术提供了可资利用的重要信号源. 对于未来量子微波的研究方向与发展路线, 我们主要有以下三个方面的设想: 一是在内部冷冻机中进行实验, 完成连续变量量子微波隐形传态、微波量子照明等实验的原理性论证, 伴随着需要开发和制造足够高效率的微波光电探测器. 二是在内部冷冻机之间进行实验, 将一束微波留在冷冻机中, 而另一束通过高噪声的波导或微带传输线传输, 在与低反射率的目标对象相互作用后, 通过探测反射信号来确定目标对象存在与否. 这一实验和技术的进步需要得益于设计热光子滤波器以及基于约瑟夫森材料的小型延迟线. 三是利用天线辐射和接收量子微波信号, 在开放空间中进行上述实验的验证. 适用天线理论模型的发展和材料的选择、形状的设计等都将是其中最关键的工作.

本文主要综述了近年来对量子微波场制备与探测理论与相关的实验研究进展, 具体以量子纠缠微波导航为例指出了量子微波信号在自由空

间量子信息传输系统应用中的若干需要关注的问题, 并简要展望了未来量子微波技术的发展方向. 希望为正在从事或有兴趣从事量子微波技术相关研究的学者提供有益的参考.

## 参考文献

- [1] Zhou Z W, Chen W, Sun F W, Xiang G Y, Li C F 2012 *Chin. Sci. Bull.* **57** 1498 (in Chinese) [周正威, 陈巍, 孙方稳, 项国勇, 李传锋 2012 科学通报 **57** 1498]
- [2] Wu H, Wang X B, Pan J W 2014 *Scientia Sinica Informationis* **44** 296 (in Chinese) [吴华, 王向斌, 潘建伟 2014 中国科学: 信息科学 **44** 296]
- [3] Thomas B 2008 *USA Patent* 7359064
- [4] Lanzagorta M 2011 *Quantum Radar 1st edition* (London: Morgan & Claypool Publishers) pp1-139
- [5] Walther H, Varcoe B T H, Englert B G, Becker T 2006 *Rep. Prog. Phys.* **69** 1325
- [6] Yang R C 2012 *Ph. D. Dissertation* (Taiyuan: Shanxi University) (in Chinese) [杨榕灿 2012 博士学位论文 (太原: 山西大学)]
- [7] Joshi A, Min X 2017 *Opt. Commun.* **393** 284
- [8] Bishop L S 2010 *Ph. D. Dissertation* (New Haven: Yale University)
- [9] Hu J, Ke Q 2016 *Optik* (Munich, Ger.) **127** 3950
- [10] Ghosh J, Sanders B C 2016 *New J. Phys.* **18** 033015
- [11] Mi X, Cady J V, Zajac D M 2017 *Appl. Phys. Lett.* **110** 3502
- [12] Zhang Y N 2014 *Ph. D. Dissertation* (Hefei: University of Science and Technology of China) (in Chinese) [张玉娜 2014 博士学位论文 (合肥: 中国科学技术大学)]
- [13] Liu Y H 2014 *Ph. D. Dissertation* (Nanjing: Nanjing University) (in Chinese) [刘宇浩 2014 博士学位论文 (南京: 南京大学)]
- [14] Chen X, Liu X W, Zhang K Y, Yuan C H, Zhang W P 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 164211 (in Chinese) [陈雪, 刘晓威, 张可焯, 袁春华, 张卫平 2015 物理学报 **64** 164211]
- [15] Zheng Q, Xu J W, Yao Y, Yong L 2016 *Phys. Rev. A* **94** 052314
- [16] LaHaye M D, Rouxinol F, Hao Y, Shim S B, Irish E K *Quantum Information and Computation XIII*, the United States April 20, 2015 p1
- [17] Pu T, Wen C H, Xiang P 2015 *Principles and Application of Microwave Photonics* (Beijing: Electronic Industry Press) pp1-5 (in Chinese) [蒲涛, 闻传花, 项鹏 2015 微波光子学原理与应用 (北京: 电子工业出版社) 第1—5页]
- [18] Duan Y S *Quantum Field Theory* (Beijing: High Education Press) pp88-90 (in Chinese) [段一士 2015 量子场论 (北京: 高等教育出版社) 第88—90页]
- [19] Guo G C, Zhang H, Wang Q 2017 *J. Nanjing Univ. Posts Tele.* (Natural Sci. Ed.) **37** 1
- [20] Su X L, Jia X J, Peng K C 2016 *Prog. Phys.* **36** 101 (in Chinese) [苏晓龙, 贾晓军, 彭堃堃 2016 物理学进展 **36** 101]
- [21] Zhang G 2015 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: Beijing Jiaotong University) (in Chinese) [张革 2015 博士学位论文 (北京: 北京交通大学)]
- [22] Yamamoto N Y 2013 *IEEE Photonics J.* **5** 0701406
- [23] Meschede D, Walther H, Muller G 1985 *Phys. Rev. Lett.* **54** 551
- [24] Lounis B, Orrit M 2005 *Rep. Prog. Phys.* **68** 1129
- [25] Koroli V I, Ciorba V G 2006 *Moldavian J. Phys. Sci.* **5** 214
- [26] Kuhn A, Ljunggren D 2010 *Contemp. Phys.* **51** 289
- [27] Zhang Z M 2004 *Chin. J. Quantum Electron.* **21** 224 (in Chinese) [张智明 2004 量子电子学报 **21** 224]
- [28] Zhang Z M 2006 *Acta Sin. Quantum Opt.* **12** 194
- [29] Jones M L, Wilkes G J, Varcoe B T H 2009 *J. Phys. B* **42** 5501
- [30] Pechal M 2016 *Ph. D. Dissertation* (Zurich: Swiss Federal Institute of Technology Zurich)
- [31] Gu X, Kockum A F, Miranowicz A, Liu X Y, Nori F 2017 *Phys. Rep.* **718** 1
- [32] Wang X, Miranowicz A, Li H R 2016 *Phys. Rev. A* **94** 053858
- [33] Manninen A J, Kemppinen A, Enrico E 2014 *29th Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2014)* Rio de Janeiro Brazil, August 24, 2014 p324
- [34] Sathyamoorthy S R, Thomas M S, Goran J 2016 *C. R. Phys.* **17** 756
- [35] Bozyigit D, Lang C, Steffen L, Fink J M, Eichler C, Baur M, Bianchetti R, Leek P J, Filipp S, Silva M P, Blais A, Wallraff A 2011 *Nat. Phys.* **7** 154
- [36] Eichler C, Bozyigit D, Lang C, Steffen L, Fink J, Wallraff A 2011 *Phys. Rev. Lett.* **106** 220503
- [37] Peng Z H, Graaf S E, Tsai J S, Astafiev O V 2016 *Nat. Commun.* **7** 12588
- [38] Yin Y, Chen Y, Sank D, O'Malley P J J, White T C, Barends R, Kelly J, Lucero E, Mariantoni M, Megrant A, Neill C, Vainsencher A, Wenner J, Korotkov A N, Cleland A N, Martinis J M 2013 *Phys. Rev. Lett.* **110** 107001
- [39] Koshino K, Inomata K, Lin Z, Nakamura Y, Yamamoto T 2015 *Phys. Rev. A* **91** 043805
- [40] Inomata K, Lin Z R, Koshino K, Oliver W D 2016 *Nat. Commun.* **7** 12303
- [41] Guo W J 2016 *Ph. D. Dissertation* (Chengdu: Southwest Jiaotong University) (in Chinese) [郭伟杰 2016 博士学位论文 (成都: 西南交通大学)]
- [42] Stace T M, Milburn G J, Barnes C H W 2001 *Phys. Rev. B* **67** 085317
- [43] John R, Gippius N A 2009 *Phys. Rev. B: Condens. Matter Mater. Phys.* **79** 155317
- [44] Predojevic A, Huber T, Jezek M, Jayakumar H 2013 *Conference on Lasers and Electro-Optics Europe and International Quantum Electronics Conference* Munich, May 16, 2013 p6801613
- [45] Emary C, Trauzettel B 2005 *Phys. Rev. Lett.* **95** 127401
- [46] Shi L K, Chang K, Sun C P 2016 *APS March Meeting 2016* Baltimore, Maryland, March 14-18, pG1.00283
- [47] Wilson C M, Johansson G, Pourkabirian A, Simoen M, Johansson R, Duty T L, Nori F, Delsing P 2011 *Nature* **479** 376
- [48] Johansson J R, Johansson G, Wilson C M 2010 *Phys. Rev. A* **82** 052509
- [49] Johansson J R, Johansson G, Wilson C M, Delsing P, Nori F 2010 *Phys. Rev. A* **87** 043804
- [50] Lang C, Eichler C, Steffen L, Fink J M, Woolley M J, Blais A, Wallraff A 2013 *Nat. Phys.* **9** 345
- [51] Dambach S, Kubala B, Ankerhold J 2017 *New J. Phys.* **19** 023027
- [52] Yang C P, Su Q P, Zheng S B, Han S Y 2013 *Phys. Rev. A* **87** 022320
- [53] Eichler C, Lang C, Fink J M, Govenius J, Filipp S, Wallraff A 2014 *Phys. Rev. Lett.* **109** 240501
- [54] Flurin E, Roch N, Pillet J D, Mallet F, Huard B 2014 *Phys. Rev. Lett.* **114** 090503
- [55] Zhang H, Liu Q, Xu X S, Xiong J, Alsaedi A, Hayat T, Deng

- F G 2017 arXiv:1709.00120v2 [quant-ph]
- [56] Regal C A, Lehnert K W, 2011 *J. Phys.: Conf. Ser.* **264** 012025
- [57] Liu Y 2016 *M. S. Dissertation* (Wuhan: Central China Normal University) (in Chinese) [刘艳 2016 硕士学位论文 (武汉: 华中师范大学)]
- [58] Gu W J 2014 *Ph. D. Dissertation* (Wuhan: Central China Normal University) (in Chinese) [谷文举 2014 博士学位论文 (武汉: 华中师范大学)]
- [59] Palomaki T A, Teufel J D, Simmonds R W, Lehnert K W 2013 *Science* **342** 710
- [60] Tian L 2015 *Ann. Phys.* **527** 1
- [61] Barzanjeh S, Guha S, Weedbrook C, Vitali D, Shapiro J H, Pirandola S 2015 *Phys. Rev. Lett.* **114** 080503
- [62] Barzanjeh S, de Oliveira M C, Pirandola S 2014 arXiv:1410.4024v1 [quant-ph]
- [63] Li X, Wu D W, Miao Q, Zhu H N, Wei T L 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 240301 (in Chinese) [李响, 吴德伟, 苗强, 朱浩男, 魏天丽 2018 物理学报 **67** 240301]
- [64] Wolfgramm F, Cere A, Beduini F A, Predojević A, Koschorreck M, Mitchell M W 2010 *Phys. Rev. Lett.* **105** 053601
- [65] Tang B, Zhang B C, Zhou L, Wang J, Zhan M S 2015 *Res. Astron. Astrophys.* **15** 333
- [66] Pielawa S, Morigi G, Vitali D, Davidovich L 2007 *Phys. Rev. Lett.* **98** 240401
- [67] Li P B, Li F L 2010 *Phys. Rev. A* **81** 035802
- [68] Li P B, Li F L 2010 *The 14<sup>th</sup> National Conference on Quantum Optics* Qufu, Shandong, August 5–8, 2010 p36 (in Chinese) [李蓬勃, 李福利 2010 第十四届全国量子光学学术会议 山东曲阜, 2010年8月5—8日, 第36页]
- [69] Yamamoto T, Inomata K, Watanabe M, Matsuba K, Miyazaki T, Oliver W D, Nakamura Y, Tsai J S 2008 *Appl. Phys. Lett.* **93** 042510
- [70] Zhong L, Menzel E P, Candia R D, Eder P, Ihmig M, Baust A, Haerberlein M, Hoffmann E, Inomata K, Yamamoto T, Nakamura Y, Solano E, Deppe F, Marx A, Gross R 2013 *New J. Phys.* **15** 125013
- [71] Menzel E P, Candia R D, Deppe F, Zhong L, Ihmig M, Haerberlein M, Baust A, Hoffmann E, Ballester D, Inomata K, Yamamoto T, Nakamura Y, Solano E, Marx A, Gross R 2012 *Phys. Rev. Lett.* **109** 250502
- [72] Hoffmann E, Deppe F, Niemczyk T, Wirth T, Menzel E P, Wild G, Huebl H, Mariani M, Weiß T, Lukashenko A, Zhuravel A P, Ustinov A V, Marx A, Gross R 2010 *Appl. Phys. Lett.* **97** 222508
- [73] Eichler C, Bozyigit D, Lang C, Baur M, Steffen L, Fink J M, Filipp S, Wallraff A 2011 *Phys. Rev. Lett.* **107** 113601
- [74] Ku H S, Kindel W F, Mallet F, Glancy S, Irwin K D, Hilton G C, Vale L R, Lehnert K W 2015 *Phys. Rev. A* **91** 042305
- [75] Bergeal N, Vijay R, Manucharyan V E, Siddiqi I, Schoelkopf R J, Girvin S M, Devoret M H 2010 *Nat. Phys.* **6** 296
- [76] Bergeal N, Schackert F, Metcalfe M, Vijay R, Manucharyan V E, Frunzio L, Prober D E, Schoelkopf R J, Girvin S M, Devoret M H 2010 *Nature* **465** 64
- [77] Roch N, Flurin E, Nguyen F, Morfin P, Campagne-Ibarcq P, Devoret M H, Huard B 2012 *Phys. Rev. Lett.* **108** 147701
- [78] Flurin E, Roch N, Mallet F, Devoret M H, Huard B 2012 *Phys. Rev. Lett.* **109** 183901
- [79] Alessandro F, Francesco C, Rosario F 2014 *Phys. Rev. A* **89** 022335
- [80] Yousif T, Zhou W J, Zhou L 2016 *Int. J. Theor. Phys.* **55** 901
- [81] Caspar O K, Erno D, Juha-Matti P, Tero H, Francesco M, Mika S 2017 *Phys. Rev. Lett.* **118** 103601
- [82] Li P B, Gao S Y, Li F L 2013 *Phys. Rev. A* **88** 043802
- [83] Sete E A, Eleuch H 2014 *Phys. Rev. A* **89** 013841
- [84] Aggarwal N, Debnath K, Mahajan S, Bhattacharjee A B, Mohan M 2014 *Int. J. Quantum Inf.* **12** 1450024
- [85] Pan G X, Xiao R J, Zhou L 2016 *Int. J. Theor. Phys.* **55** 329
- [86] Palomaki T A, Harlow J W, Teufel J D, Simmonds R W, Lehnert K W 2013 *Nature* **495** 210
- [87] Wang Y D, Clerk A A 2013 *Phys. Rev. Lett.* **110** 253601
- [88] Abdi M, Tombesi P, Vitali D 2015 *Ann. Phys.* **527** 139
- [89] Li X, Wu D W, Miao Q, Zhu H N, Wei T L 2018 *IEEE Photonics J.* **10** 6101107
- [90] Li X, Wu D W, Wei T L, Miao Q, Zhu H N, Yang C Y 2018 *AIP Adv.* **8** 065217
- [91] Li X, Wu D W, Zhu H N, Miao Q, Wei T L 2018 *Results Phys.* **11** 920

# Preparation methods and progress of experiments of quantum microwave<sup>\*</sup>

Miao Qiang<sup>†</sup> Li Xiang Wu De-Wei Luo Jun-Wen Wei Tian-Li Zhu Hao-Nan

(*Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China*)

( Received 7 November 2018; revised manuscript received 16 February 2019 )

## Abstract

Based on the characteristics of superposition, entanglement, non-locality and non-clonality of quantum mechanics, quantum information science can break through the physical limits of classical information and open up a new information processing function different from classical electromagnetic application methods. Due to the advantages of high-energy single photon in practical applications, the research and application of optical quantum information technology dominates the development of current quantum information technology. However, the free-space transmission of light waves is greatly affected by weather conditions and atmospheric particles. Comparing with other wave bands, classical microwave signal shows good penetration ability when transmitting in free space. By introducing quantum mechanics, microwave signal also exhibits non-classical merits. As quantum microwave signal inherits both classical transmission performance and quantum non-classical features, it can be utilized as a significant signal source for diverse applications in microwave domain, such as quantum communication, quantum navigation and quantum radar, which are based on quantum technologies in large scale and dynamic free space transmission. There are three main experimental platforms on which quantum microwave is studied and produced. They are cavity quantum electrodynamics(C-QED) system, circuit quantum electrodynamics(c-QED) system, and cavity electro-opto-mechanical(EOM) system, involving with several nonlinear effects such as Kerr effect, Casimir effect, three-wave mixing, etc. In this paper, the setups of these platforms and the preparation principles are introduced. Meanwhile, the preparation principles and methods of microwave single photon, entangled microwave photons, squeezed microwave fields and entangled microwave fields are summarized and analyzed in detail from three aspects. The present status of experimental progress in the relevant fields are summarized and listed as well. Besides, key problems in the application of quantum navigation in free space utilizing quantum microwave are probed. Among them, the most pressing ones are preparation ability, decoherence in transmission and detection of entangled quantum microwave signals, which are also discussed and analyzed in this paper. Finally, we look forward to the future development of quantum microwave technology. It mainly consists of manufacturing microwave detectors with high efficiency, designing thermal photon filters, and developing suitable antennas. We hope that this study can provide useful reference for scholars who are engaged in or interested in research related to quantum microwave technologies.

**Keywords:** nonclassical microwave, single microwave photon, entangled microwave photons, squeezed microwave field, entangled microwave field

**PACS:** 03.67.-a, 84.40.-x, 42.50.Dv

**DOI:** [10.7498/aps.68.20191981](https://doi.org/10.7498/aps.68.20191981)

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61603413, 61573372), the Natural Science Foundation of Shaanxi Province, China (Grant No. 2017JM6017), and the Principal Foundation of Air Force Engineering University, China (Grant No. XZJK2018019).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [mqmiaoqiang@126.com](mailto:mqmiaoqiang@126.com)