

高温超导双晶约瑟夫森结阵列毫米波相干辐射*

岳宏卫 王 争 樊 彬 宋凤斌 游 峰 赵新杰 何 明 方 兰 阎少林[†]

(南开大学信息技术科学学院电子信息科学与技术系, 天津 300071)

(2009 年 11 月 23 日收到; 2009 年 12 月 15 日收到修改稿)

研究了嵌入 Fabry-Perot 谐振腔的高温超导双晶约瑟夫森结阵列毫米波相干辐射的实验结果. 相干辐射是通过约瑟夫森结阵列与基片(作为一个介质谐振器)和 Fabry-Perot (FP) 谐振器的共同作用实现的. 由 166 个高温超导双晶约瑟夫森结串联阵列在 77 K 温度下产生的相干辐射, 辐射峰的中心频率为 75.84 GHz, 功率大约为 10 pW.

关键词: 高温超导薄膜, Fabry-Perot 谐振腔, 约瑟夫森结, 毫米波辐射

PACC: 7450, 7430G, 7460J

1. 引 言

自从高温超导体发现以来, 高温超导约瑟夫森 (Josephson) 结辐射的问题一直是国际上的一个研究热点^[1,2]. 约瑟夫森结辐射的机理是基于著名的交流约瑟夫森效应. 当在约瑟夫森结两端加一个恒定电压 V 时, 结内就会产生一个频率为 f_J 的交变约瑟夫森电流, f_J 与 V 之间具有关系

$$f_J = \frac{V}{\Phi_0} \approx V \times 483.6 \text{ GHz} \cdot \text{mV}^{-1}, \quad (1)$$

称为约瑟夫森电压-频率关系, 其中 $\Phi_0 = h/2e$ 为磁通量子. 只要在结两端加上几毫伏的电压, 就可以得到毫米/亚毫米波乃至 THz 电磁波辐射. 由于在通信、航空航天、天文探测等领域中高性能毫米/亚毫米波波段固体频率源的缺乏, 使得约瑟夫森结成为一种十分诱人的高频波信号源. 但是由于单个约瑟夫森结的阻抗太小, 很难实现与外部微波电路的匹配, 因此其辐射功率很小, 离实用性还有较大的差距. 如何提高约瑟夫森结有效辐射的功率成为许多科研小组研究的重点. 有很多方法可以提高约瑟夫森结的辐射功率, 比如采用串联约瑟夫森结阵列^[3]、硅透镜准光耦合系统^[4]、集成特殊天线^[5]以及把结嵌入谐振器中^[6]等. 使用结参数一致的多个结串联起来组成结阵列, 可有效增大结电阻, 改善结与外部电路的阻抗匹配, 在所有结实现相位锁定

的情况下, 可显著提高辐射功率, 降低辐射峰的线宽^[7]. 采用约瑟夫森结阵列与基片(作为一个介质谐振器^[8])和 Fabry-Perot (FP) 谐振器共同作用的方法, 实现了串联双晶约瑟夫森结阵列的相干辐射. 其中由 166 个高温超导薄膜制备的串联双晶约瑟夫森结阵列在 77 K 液氮温度下产生的辐射峰中心频率为 75.84 GHz, 功率大约为 10 pW. 本文将报道我们的研究方法和结果.

2. 实验方法

2.1. 双晶约瑟夫森结阵列

实验使用的约瑟夫森结阵列是由生长在双晶钇稳定氧化锆 (YSZ) (001) 基片上的 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (YBCO) 高温超导薄膜制作的. 双晶 YSZ 基片的晶界错位角度为 24° . YBCO 超导薄膜厚度为 300 nm, 超导转变温度 T_c 为 89 K, 在 77 K 时其临界电流密度 J_c 大于 $2 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$.

采用半导体光刻工艺和 Ar^+ 离子刻蚀法, 沿晶界制作出一系列串联的微桥, 就可以得到双晶约瑟夫森结阵列. 图 1 给出本实验所设计的结阵列图案的一部分, 图中黑色微带表示超导薄膜, 虚线表示 YSZ 基片的晶界 (GB). 整个阵列由 166 个结串联组成, 每个结的宽度为 $7 \mu\text{m}$, 它上下两侧的超导微带

* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2006CB601006), 国家高技术研究发展计划 (批准号: 2006AA03Z213, 2009AA03Z208) 资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: slyan@nankai.edu.cn

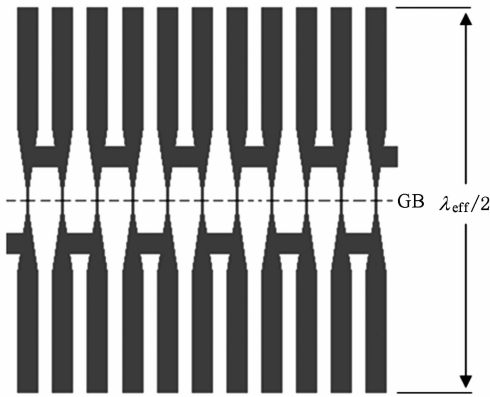


图1 双晶约瑟夫森结阵列结构示意图. 图中黑色的微带表示高温超导薄膜,虚线表示双晶基片的晶界 GB

线总长为 $\lambda_{\text{eff}}/2$, 其中 λ_{eff} 为电磁波在基片中的有效波长, 可由下式估算:

$$\lambda_{\text{eff}} = \lambda / \sqrt{(\varepsilon_r + 1)/2}. \quad (2)$$

式中 λ 为自由空间中电磁波的波长, 对于频率范围为 70—80 GHz 的电磁波来说 $\lambda \approx 4 \text{ mm}$, YSZ 基片的相对介电常数 $\varepsilon_r = 26$, 得到 $\lambda_{\text{eff}} \approx 1 \text{ mm}$, 因此取结两侧超导微带线的总长度为 $490 \mu\text{m}$, 宽度为 $18 \mu\text{m}$, 其作用相当于一对半波偶极谐振天线, 整个结阵列的微带线就形成了一个半波偶极天线阵. 此天线阵的最大特点在于它谐振时阵元的输入阻抗约等于约瑟夫森结的阻抗, 从而改善了约瑟夫森结与天线的阻抗匹配, 以提高辐射效率^[9].

2.2. Fabry-Perot 谐振腔和测试系统

FP 谐振腔是由一个半球面镜和一个平面镜组成的开放式腔体, 两个反射镜面的直径为 25 mm, 其中半球面镜的曲率半径为 25 mm. 通过精细调节 FP 谐振腔的腔长, 可以使其工作在 TEM_{00q} 基模状态下, 此时腔内电磁场分布为高斯分布, 在近轴区域的场分布近似于空间平面波. 双晶约瑟夫森结阵列嵌入 FP 谐振腔中, 使结阵列面对平面镜并与平面镜平行放置, 可以有效提高耦合效率和谐振腔内电磁场分布的均匀性^[10]. 实验采用混频检测技术来测量高温超导薄膜双晶约瑟夫森结阵列的毫米波辐射特性, 图 2 给出测试系统的结构图. 图中 FP 谐振腔用不锈钢圆筒密封后浸没在液氮中, 可使腔中的约瑟夫森结阵列大约工作在 77 K 的液氮温度下. 结阵列辐射的高频电磁信号通过隔离器进入混频器, 此处使用隔离器的目的主要是为了阻止本振信号通过混频器进入谐振腔中, 对检测结阵列的辐射造

成干扰. 本振信号由频率合成器 (HP83640 A) 产生, 经 4 倍频后可提供 72—80 GHz 的工作频率. 中频放大器的增益为 64.5 dB, 其中滤波器的中心频率为 1.25 GHz. 从平方律检测器输出的中频电压信号经 A/D 转换后用专门的软件进行记录、显示和保存, 并自动画出其对扫描电流或电压的变化曲线. 为了减少外界电磁杂波的干扰, 本实验的所有测试都在双层金属屏蔽室内进行.

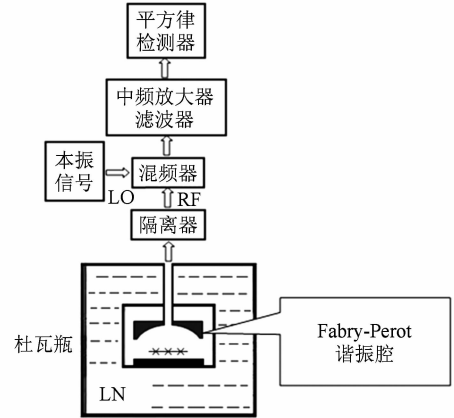


图2 高温超导约瑟夫森结阵列毫米波辐射测试系统结构图. 图中“x”表示约瑟夫森结

3. 实验结果与讨论

高温超导样品所用的基片可以看作一个介质谐振器. 约瑟夫森结阵列辐射的电磁波首先耦合进入基片, 并在基片内发生谐振. 通过介质谐振器与 FP 谐振腔之间大的耦合, 基片内的电磁场进入 FP 谐振腔, 在 FP 谐振腔中发生谐振, 形成驻波, 再通过波导管将辐射电磁波导出. 当电磁场在介质谐振器和 FP 谐振腔中同时谐振时, 可实现约瑟夫森结阵列相干辐射. 我们使用 CST 三维电磁仿真软件进行了电磁仿真, 瞬时电场分布如图 3 所示. 图 3(a) 表示由约瑟夫森结阵列辐射的电磁波在 YSZ 基片中激发起本征谐振模式 TE_{198} , 而图 3(b) 表示在 FP 谐振腔中激发的谐振模式 TEM_{004} . 图中颜色的深浅表示电场强度的大小. 可见, 通过优化设计模型的结构参数和调整 FP 谐振腔的腔长及样品到平面镜之间的距离, 可以使基片和 FP 谐振腔同时谐振在合适的模式下. 当结阵列都处在电场最大的波腹位置时, 可增强结阵列与谐振器之间的电磁场耦合, 达到电压自锁定和相位互锁定的目的^[9], 使约瑟夫森结阵列产生相干辐射.

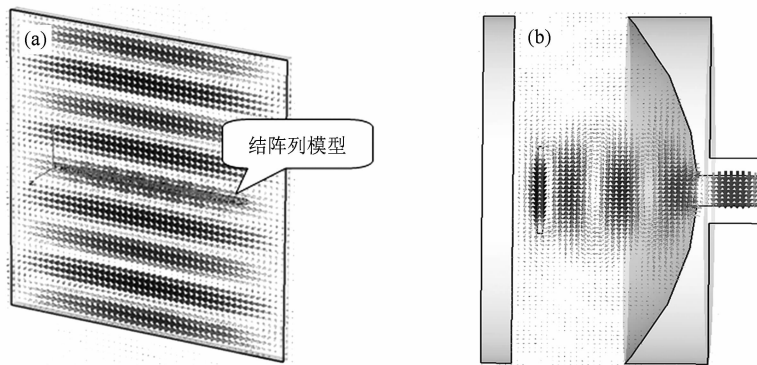


图3 由双晶约瑟夫结阵列模型激发的谐振模式分别在(a)双晶钇稳定氧化锆(YSZ)基片中中和(b)FP谐振腔中的瞬时电场强度分布情况((a)中基片中间的线条表示结阵列的模型.箭头颜色的深浅表示电场强度的大小)

在实验时,为了能检测到结阵列的高频电磁辐射,首先需要解决以下几个重要的问题:一是判断结阵列的质量,要求结参数(特别是结的正常态电阻 R_n)的一致性要好.结阵列质量的好坏直接影响辐射效果,它可以通过测量结阵列的电流-电压(I - V)特性曲线来判断.二是要保证结阵列与外部微波电路处于最佳耦合状态,发生相位锁定,使结阵列产生相干辐射.显然,只有在结阵列产生相干辐射的情况下,才能增强辐射功率.这个问题可以通过测量结阵列的微波辐照特性来解决.根据交流约瑟夫森效应,约瑟夫森结阵列在外加毫米波辐照下临界电流将被压制,同时产生微波感应台阶,也称为夏皮罗台阶^[11].在固定外加微波辐照功率和频率 f_i 条件下,通过精细调节 FP 谐振腔两镜面间的距离,样品到平面镜之间的距离,谐振腔中电场的方向与双晶基片晶界的夹角可使临界电流被压制到最小,同时第一级夏皮罗台阶达到最大,此时就认为结阵列与谐振腔达到最佳耦合状态^[12].当保持系统处于最佳耦合状态不变,固定本振频率,缓慢扫描通过结阵列的电流,就可以测量结阵列的毫米波辐射特性.图4给出了由166个结组成的串联双晶约瑟夫森结阵列在77 K温度下的一些实验结果.图中曲线 a 是没有外加辐照时的 I - V 特性曲线.可见此结阵列的临界电流为 $I_c = 0.56$ mA,整个结阵列的正常态电阻为 $R_n = 37.50 \Omega$,较大地改善了与外部微波电路的阻抗匹配.从这条曲线可以看出结参数的一致性较好,符合约瑟夫森结的RSJ模型.曲线 b 给出在最佳耦合情况下,双晶约瑟夫森结阵列在频率为 $f_i = 75.82$ GHz的外加毫米波辐照下的 I - V 特性曲线,此时临界电流被压制到最小,第一级夏皮罗台阶的高度达到最大.曲线 c 给出的是检测电磁波辐射时得

到的中频输出电压曲线.从这条曲线上可以观察到两个明显的对称的辐射峰,在偏置电压 26.03 mV 下电磁波辐射功率达到最大值,约 10 pW,频率计显示辐射频率为 75.84 GHz,此结果满足交流约瑟夫森效应关系.辐射曲线的宽度主要是由 FP 谐振腔的 Q 值和中频滤波器的带宽决定.

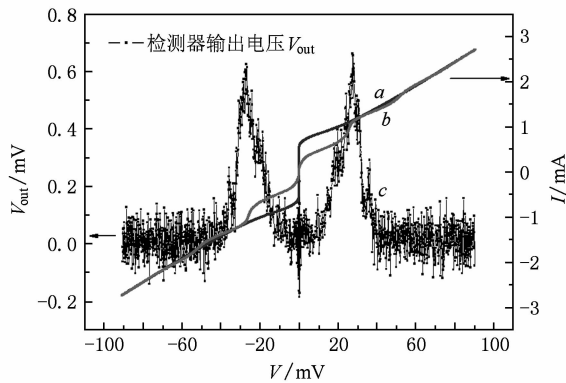


图4 双晶约瑟夫森结阵列的特性曲线 a 为无外加辐照时的 I - V 特性曲线; b 为在 75.82 GHz 微波辐照下的 I - V 曲线; c 为低噪声平方律检测器输出的中频信号电压曲线

4. 结 论

通过约瑟夫森结阵列与介质谐振器以及 FP 谐振器共同作用的方法,实现了串联双晶约瑟夫森结阵列的相干辐射.采用混频检测技术,在 77 K 液氮温度下测量了由 166 个结串联组成的双晶约瑟夫森结阵列的毫米波辐射特性,辐射峰的中心频率为 75.84 GHz,功率大约为 10 pW,为进一步深入研究高温超导约瑟夫森结阵列的 THz 电磁波辐射打下基础.

- [1] Liu B, Wengler M J 1991 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **1** 150
- [2] Booi P A, Benz S P 1996 *Appl. Phys. Lett.* **68** 3799
- [3] Kunkel G, Hechtischer G, Frommberger M, Veit K, Kleiner R, Müller P 1997 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **7** 3339
- [4] Batov I E, Jin X Y, Shitov S V, Koval Y, Müller P, Ustinov A V 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 262504
- [5] Song I, Kim B M, Park G 1999 *Physica C* **324** 83
- [6] Zhou T G, Hu Y T, Zhu S N, Yan S L 2008 *Proceedings of the 3rd IEEE int. conf. on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems* 1208
- [7] Jain A K, Likharev K K, Lukens J E, Sauvageau J E 1984 *Phys. Rep.* 109 309
- [8] Giannakopoulou T, Niarchos D, Trapalis C 2009 *Appl. Phys. Lett.* **94** 242506
- [9] Wang Z, Zhao X J, He M, Zhou T G, Yue H W, Yan S L 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 7216 (in Chinese) [王 争、赵新杰、何明、周铁戈、岳宏卫、阎少林 2009 物理学报 **58** 7216]
- [10] He M, Klushin A M, Klein N 2007 *Supercond. Sci. Technol.* **20** S413
- [11] Shapiro S 1963 *Phys. Rev. Lett.* **11** 80
- [12] Yue H W, Yan S L, Zhou T G, Xie Q L, You F, Wang Z, He M, Zhao X J, Fang L, Yang Y, Wang F Y, Tao W W 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1289 (in Chinese) [岳宏卫、阎少林、周铁戈、谢清连、游 峰、王 争、何 明、赵新杰、方 兰、杨 扬、王福音、陶薇薇 2009 物理学报 **58** 1289]

Millimeter wavelength coherent emission from high temperature superconducting bicrystal Josephson junction array^{*}

Yue Hong-Wei Wang Zheng Fan Bin Song Feng-Bin You Feng Zhao Xin-Jie
He Ming Fang Lan Yan Shao-Lin[†]

(Department of Electronics Information Science and Technology, College of Information Technical Science, Nankai University, Tianjin 300071, China)

(Received 23 November 2009; revised manuscript received 15 December 2009)

Abstract

The experimental results of mm-wave coherent emission from a high temperature superconducting bicrystal Josephson junction array embedded in a Fabry-Perot resonator are reported in this paper. The mm-wave coherent emission from the series junction array results from the interaction of the junctions with the substrate serving as the dielectric resonator as well as the Fabry-Perot resonator. The central frequency of emission of a Josephson junction array containing 166 bicrystal junctions was 75.84 GHz, and the detected emission power was about 10 pW at 77 K.

Keywords: high temperature superconducting thin film, Fabry-Perot resonator, Josephson junction, millimeter wavelength radiation

PACC: 7450, 7430G, 7460J

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2006CB601006), the National High Technology Research and Development Program of China (Grant Nos. 2006AA03Z213, 2009AA03Z208).

† Corresponding author. E-mail: slyan@nankai.edu.cn