8mm 波段 Fabry-Perot 谐振腔及其在约瑟夫森结特性测量中的应用

岳宏卫[1,2],阎少林[1],王 争[1],游 峰[1],宋凤斌[1],季 鲁[1],何 明[1],赵新杰[1],方 兰[1]
(1.南开大学电子系,天津 300071; 2.桂林电科技大学信息与通信学院,广西桂林 541004)

摘 要: 通过三维电磁仿真技术设计并制作了 8mm 波段 Fabry-Perot 谐振腔,并建立起一套 Fabry-Perot 谐振腔高温超导约瑟夫森结特性测试系统.用它测量了 $Tl_2Ba_2CaCu_2O_8$(Tl-2212)高温超导薄膜双晶约瑟夫森结的毫米波辐照特性,得到高质量的夏皮罗台阶,并与在 U 形波导测试系统中测得的结果进行了比较,发现利用 Fabry-Perot 谐振腔测量技术可显著提高外加电磁场与约瑟夫森结的耦合效率,为进一步研究毫米/亚毫米波信号检测、THz 波信号源等研究打下坚实的基础.

关键词: 高温超导薄膜; Fabry-Perot 谐振腔; 约瑟夫森结; 夏皮罗台阶
中图分类号: TN12 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2010) 10-2405-05

An 8 mm Wave Fabry-Perot Resonator and Its Application in Josephson Junction Characteristic Measurements

YUE Hong-wei[1,2], YAN Shao-lin[1], WANG Zheng[1], YOU Feng[1], SONG Feng-bin[1], JI Lu[1],
HE Ming[1], ZHAO Xin-jie[1], FANG Lan[1]
(1. *Department of Electronics, Nankai University, Tianjin* 300071, *China*;
2. *College of Information and Communication, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi* 541004, *China*)

Abstract: An 8mm wave Fabry-Perot resonator was designed and fabricated by the technique of three-dimensional electromagnetic simulation. A measurement system for the characterization of high temperature superconductor Josephson junction was set up based on the Fabry-Perot resonator. The millimeter wave irradiation characteristic of $Tl_2Ba_2CaCu_2O_8$(Tl-2212) high temperature superconducting thin film bicrystal Josephson junction was measured using the system and high quality Shapiro steps were observed. Taking advantage of the Fabry-perot resonator technique, the efficiency of the coupling between applied electromagnetic wave and Josephson junction was enhanced markedly by compared with the measured results using U-type waveguide measurement system, which is greatly significant for the investigation of radiation and detection of millimeter/submillimeter wave and terahertz wave.

Key words: high temperature superconducting thin film; fabry-perot resonator; josephson junction; shapiro step

1 引言

Fabry-Perot(FP)谐振腔是一种开放式的谐振器,最早被广泛用于激光技术与光谱分析等领域.理想的 FP 谐振腔由两块无限大的平行金属板组成,但实际的 FP 谐振腔的平板尺寸不可能无限大,平板尺寸的有限性会带来绕射效应从而降低谐振腔的品质因数 Q.为了减少绕射损耗,要求两板的尺寸远大于波长,并且保证有很高的平滑性和平行性,这不容易做到,因此这种谐振器并不实用.为了克服这些问题,可用至少一个凹面镜来代替平面板反射镜,从而使谐振腔中的电磁场产生“聚焦”作用,形成准 TEM 模式的高斯波束.常用的 FP 谐振腔的模型如图 1 所示.其中,图 1(a)表示由两个凹面反射镜组成的 FP 谐振腔,用 r_1 和 r_2 分别表示两个凹面反射镜的曲率半径,L 表示两反射镜之间的间距,a_1 和 a_2 分别表示两个反射镜的半径,当谐振腔满足公式[1]

$$0 \leqslant (1 - L/r_1)(1 - L/r_2) \leqslant 1 \quad (1)$$

时,就可以在腔内形成稳定的准 TEM 高斯波束驻波场.而图 1(b)表示由一个平面镜和一个凹面镜组成的 FP 谐振腔,如用 R 表示凹面反射镜的曲率半径,a 表示平面反射镜的半径,L 表示两镜面之间的间距,则其稳定工作的条件为

$$L/R \leqslant 1 \quad (2)$$

FP 谐振腔可以通过改变两个相对的反射镜面的间距来改变谐振频率,可调范围极宽,在 THz 量级,仍有高达 2×10^5[1]的 Q 值.由于其结构简单、调谐方便,已经被广泛用于研究金属及非金属电子自旋谐振谱线探测[2]、物质介电常数测量[3]、高温超导薄膜毫米/亚毫米波的微波特性测量[4],特别在电压基准[5]、信号检测[6]、THz 信号源[7]等应用中有广阔的发展前景.

收稿日期:2009-07-03;修回日期:2009-09-25
基金项目:国家重点基础研究发展规划(973 计划)项目(No.2006CB601006);国家高技术研究发展计划(863 计划)课题(No.2006AA03Z213);博士点基金(No.200800551009)

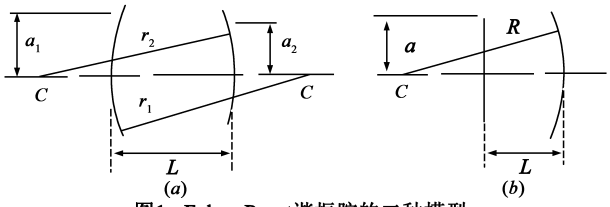


图1 Fabry-Perot谐振腔的二种模型

传统测量高温超导约瑟夫森结微波辐照特性的一个方法是把约瑟夫森结直接嵌入波导中进行测量.由于波导中电磁场分布不均匀,能量不够集中,至使微波电磁场与约瑟夫森结的耦合较差,很难得到高质量的夏皮罗台阶[8].通过理论分析[9]和三维电磁仿真研究知道:当 FP 谐振腔工作在准 TEM_{00q}基模模式时,谐振腔内的电磁场分布具有两个重要的特点:第一,电磁场呈稳定的高斯驻波分布,在束腰位置处,电磁场能量被充分聚集,产生强场;第二,腔内近轴区域的电磁场近似为横电磁波,类似于自由空间的平面波.这种结构的电磁场非常有利于观测约瑟夫森结的微波辐照特性.本文报道了 8mm 波段 Fabry-Perot 谐振腔的设计方法,并用它建立起一套测量高温超导约瑟夫森结特性的系统,并测量了 $Tl_2Ba_2CaCu_2O_8$(Tl-2212)高温超导薄膜双晶约瑟夫森结的毫米波辐照特性,得到较好的实验结果.

2 8mm 波段 Fabry-Perot 谐振腔的设计

考虑到凹面镜的加工难度大于平面镜以及是否便于放置待测样品,我们采用图 1(b)所示的模型,即由一个凹面镜和一个平面反射镜组成的 FP 谐振腔,称为半共焦腔.利用 CST Microwave Studio 2008 建立模型进行电磁场仿真研究.在实际应用中,由于高温超导约瑟夫森结的微波特性受电场的影响较大,我们重点仿真研究腔内电场的分布情况.另外,为了实现外加毫米波与谐振腔的耦合与激励,我们在凹面镜的中心位置开一个方形小孔,用来嵌入 8mm 波矩形波导.

要设计一个 8mm 波段的 FP 半共焦腔,主要是确定凹面镜的曲率半径 R、平面反射镜的半径 a 这两个参数,和两镜面间的距离 L.

根据理论计算[9,10]的结果,半共焦腔的谐振频率公式为

$$f_{mnq}=\frac{c}{4L}\left[2q+\frac{1}{2}(m+2n+1)\right] \tag{3}$$

式中,c 为真空中的光速;m、n、q 为整数,表示谐振模式;L 表示两镜面间的距离.当 $m=n=0$ 时,谐振腔工作于准 TEM_{00q}基模模式.如果谐振腔工作于准 TEM_{004}模式,则 $q=4$,取 $f_{004}=37.5$GHz(即其波长 $\lambda=8$mm)进行计算,则两镜面间的距离为 $L=17$mm.实验时,FP 谐振腔两镜面间的距离一般是取 17mm,但放入样品后,这个数值要适当微调.

实际上 FP 谐振腔的谐振频率还与凹面镜曲率半径有关.为了选择合适的凹面镜曲率半径,我们先固定两个镜面间的距离为 17mm,研究在准 TEM_{004}工作模式下谐振腔的谐振频率 f_{004}与凹面镜曲率半径 R 的关系,结果如图 2 所示.可知:随着凹面镜曲率半径 R 的增大,谐振腔的谐振频率逐渐变小,但 R 从 35mm 到 38mm 的范围内,谐振频率基本保持在 37GHz 不变,谐振器工作在较为稳定的状态.因此,从稳定性方面考虑,我们选取凹面镜的曲率半径为 R=36.4mm,可保证谐振腔的谐振频率不因加工工艺产生的微小误差而发生明显的改变.

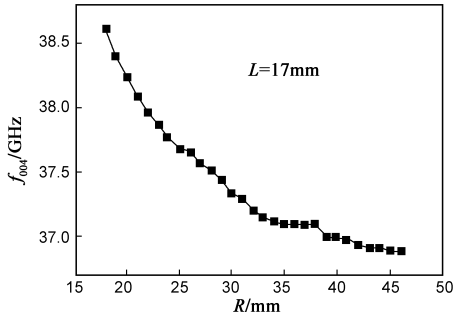


图2 两个镜面间的距离为17mm时,谐振腔的谐振频率f_{004}与凹面镜曲率半径R的关系

根据高斯光束理论[9],当 FP 谐振腔工作在准 TEM_{00q}基模模式时,腔内电磁场呈高斯波束的驻波分布,用 ω_0 表示高斯波束的束腰半径.ω_0 与凹面镜曲率半径 R 和两镜面间的距离 L 的关系为

$$\omega_0=\sqrt{\lambda/\pi}\cdot(L(R-L))^{1/4} \tag{4}$$

式中,λ 为电磁波的波长.根据实验需要,取 $\lambda=8$mm,$R=36.4$mm,得到 ω_0 与 L 的关系如图 3 所示.由图可知,当两镜面之间的距离 $L=17$mm 时,束腰半径达到最大值 $\omega_{0m}=6.8$mm.对半共焦腔而言,腔内电磁场的束腰部分分布在平面镜附近,平面镜的半径应该大于束腰半径的最大值,因此,我们选取平面反射镜的半径为 $a=20$mm,可满足实验要求.

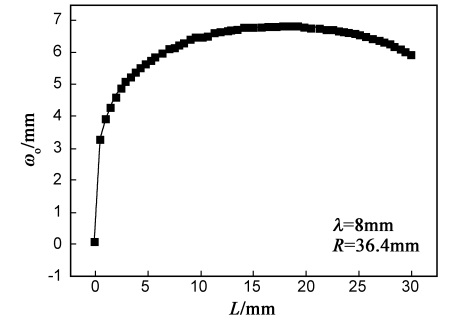
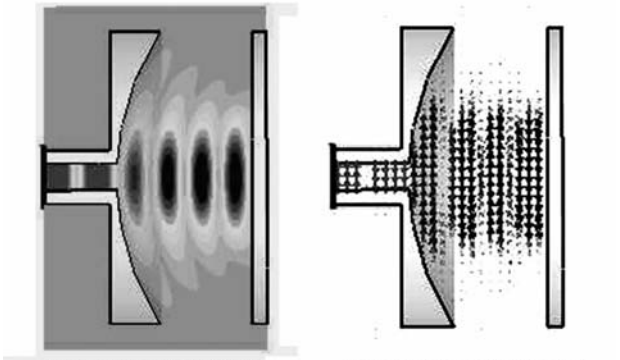


图3 在波长为8mm、凹面镜的曲率半径为36.4mm时,高斯波束束腰半径ω_0与两镜面间距L的关系

对实际应用来说,由于在束腰处电磁能量最集中,场最强,因此在实验时一般是把样品放置在此处.从 FP 谐振腔会聚能量这个角度来看,束腰越小,能量越集

中,场越强,对实验观测越有利,但也不是束腰越小越好,还要考虑辐照到样品上的能量均匀性问题,特别是在研究约瑟夫森结阵列的相位锁定以及结阵列的同步辐射等方面的内容时,尤其要注意这个问题.由于常用样品的尺寸是 $10\times10\times0.5\text{mm}^3$,若束腰半径过小,就会产生两个问题:一是样品的置入会改变腔体原有的谐振状态,破坏腔内电磁场的分布;二是使辐照到结阵列上的电场不均匀,不利于研究结阵列的相位锁定和结阵列的辐射等方面的内容.权衡这些因素的影响,我们一般要求束腰半径在 6mm 以上为好.

根据上面的研究结果,我们最后选取凹面镜的曲率半径 $R=36.4$mm,平面反射镜的半径 $a=20$mm,两镜面间的距离 $L=17$mm 进行腔内电场分布仿真,结果如图 4 所示.其中,(*a*)图表示电场强度绝对值的分布情况,颜色越深的地方表示电场强度越大;(*b*)图表示电场强度矢量的瞬态分布情况,箭头颜色越深表示电场越强,而箭头的方向表示电场的方向.可见,腔内共产生四个稳定的高斯波束形状的驻波场.



(*a*) 电场强度绝对值分布图　　(*b*) 电场强度矢量分布图,箭头颜色表示电场幅值,箭头方向表示电场方向

图4　在准TEM004基模模式时,Fabry-Perot谐振腔内电场的分布情况

由图 4 我们得到以下两个重要的结论:当 FP 谐振腔工作于准 TEM_{00q} 基模模式时,腔内电磁场能量主要集中在近轴区域,电磁场呈稳定的高斯驻波分布.腔内近轴区域的电磁场近似于横场,类似于自由空间的平面波,且电场方向与矩形传输波导管的短边平行.FP 谐振腔这种特点的场分布,由于其电场分布均匀,能量集中,方向易于控制,因而非常适合于用来研究高温超导约瑟夫森结的微波辐照特性,特别是在研究双晶约瑟夫森结阵列的相位锁定,电压基准,信号检测,THz 信号源等方面很有发展前景.

3　Tl-2212 高温超导薄膜双晶约瑟夫森结特性测量

3.1　实验方法

我们设计的 FP 谐振腔毫米波辐照特性测试系统由毫米波源、隔离器、衰减器、定向耦合器、微瓦功率计、FP 谐振腔以及 *I-V* 特性测试系统组成,图 5 是其结构示意图.实验所用的毫米波由耿氏振荡器产生,频率范围是 30 ~ 40GHz,本实验的频率是 36.5GHz,可输出约 50 mW 的功率.它通过隔离器、衰减器、定向耦合器、波导等微波器件耦合到 FP 谐振腔,辐照功率的大小可通过定向耦合器的耦合度和微瓦功率计的读数算出.实验中由于 FP 腔体内加入了 0.5mm 厚的介质基片及其面上的 300nm 厚的超导薄膜器件,会导致腔内电磁场分布有所改变.为了保证约瑟夫森结能处于腔内电场最强处,两镜面之间的距离必须作适当微调.我们设计并制作的 FP 谐振腔的两镜面间的距离可通过螺旋测微器在常温下进行精细微调,调节范围从 10mm 到 30mm,可使谐振腔工作于 TEM_{004}、TEM_{005} 等不同的谐振模式,可根据实验需要选用其中一种.在调节两镜面间的距离 L 时,一定要注意 L 的大小不能超过 36.4mm,否则将不满足式(2)的要求,导致谐振腔不能起振或者工作不稳定.

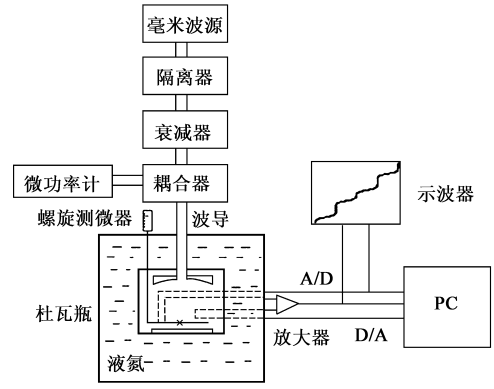


图5　Fabry-Perot谐振腔高温超导约瑟夫森结毫米波辐照特性测试系统,图中"×"表示约瑟夫森结

约瑟夫森结的 *I-V* 特性曲线采用四引线法进行测量.*I-V* 特性测试系统由约瑟夫森结器件、样品台、放大器、计算机、示波器和检测电路组成,用来实现对约瑟夫森结特性的检测、记录和保存.约瑟夫森结采用电流源偏置,由计算机中采集卡输出的电流信号通过 D/A 转换后提供.电流、电压数据通过 A/D 转换后用计算机记录和保存,并利用软件自动生成 *I-V* 特性曲线.通过转换开关的控制,*I-V* 特性曲线也可以在示波器上即时显示出来,实时观察,便于对系统的调试和实验.样品台上安装有测温元件 Pt100 和温控元件,通过数字万用表测量和显示样品的工作温度.另外,为了尽量消除外界电磁干扰,所有测试都在双层金属电磁屏蔽室内进行.

作为比较,我们设计了一个一端带短路活塞的 U 形波导,活塞的位置通过螺旋测微器在常温下可调,用它代替 FP 谐振腔,得到另一套测量毫米波辐照特性的

系统,我们称之为 U 形波导测试系统.

3.2 实验结果和讨论

3.2.1 直流 *I-V* 特性

图 6 给出了双晶约瑟夫森结在不存在微波辐照时的 *I-V* 特性曲线,可以看出它与理想电阻分路结(RSJ)模型符合得很好.由图可以得到这个结的一些参数为:临界电流 $I_c = 0.55\text{mA}$,正常态电阻 $R_n = 0.38\Omega$,特征电压 $I_cR_n = 0.21\text{mV}$,特征频率 $f_c = 101.6\text{GHz}$.

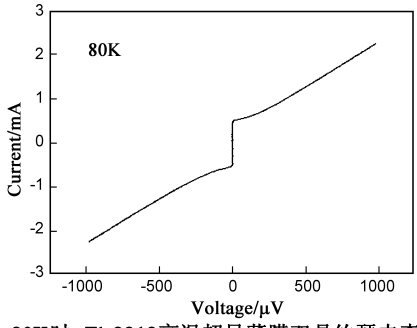


图6 80K时,*T*1-2212高温超导薄膜双晶约瑟夫森结在无外加辐照时的*I-V*特性曲线

3.2.2 Tl-2212 高温超导薄膜双晶约瑟夫森结毫米波辐照特性

把制作好的双晶约瑟夫森结嵌入到 FP 谐振腔中,并使结平面与平面反射镜平行.样品在腔内的位置可以通过螺旋测微器在常温下微调,使约瑟夫森结处在腔内电场最强的地方.在频率为 36.5GHz,功率为 20mW 的外加毫米波辐照下,通过精细调节 FP 谐振腔两镜面间的距离、样品在腔中的位置以及腔中电场相对于晶界的方向,得到较强烈的交流约瑟夫森效应,产生多达 5 级的较陡直的夏皮罗台阶,台阶位置满足约瑟夫森电压-频率关系,如图 7(*a*)所示.作为比较,我们把同一个样品嵌入 U 形波导测试系统中,通过精细调节短路活塞的位置,在同样的辐照条件下测量双晶约瑟夫森结的毫米波辐照特性,结果如图 7(*b*)所示.图中曲线(*c*)是无外加辐照时的 *I-V* 特性曲线.

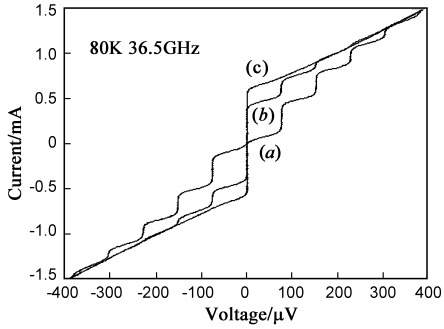


图7 在80K温度下,7μm宽双晶约瑟夫森结在频率为36.5GHz、功率为20mW外加毫米波辐照下的*I-V*特性曲线:(*a*)是用Fabry-Perot谐振腔测试系统测量得到的结果;(*b*)是用U形波导测试系统测量得到的结果;(*c*)是无外加辐照时的*I-V*特性曲线

比较(*a*)、(*b*)这两条特性曲线,可以看出:在 FP 谐振腔测试系统中,在准 TEM_{00q} 基模模式下,由于谐振腔具有较高的 Q 值,电磁场能量主要集中在近轴区域,电场分布类似于自由空间平面波,且电场方向可随意调节等特点,使得外加毫米波与约瑟夫森结之间的耦合非常强烈,用 20mW 的功率就把临界电流压制到零,产生多达 5 级的较陡直的夏皮罗台阶.相比之下,在 U 形波导中,在同样的功率辐照下,被压制的临界电流较小,产生的夏皮罗台阶的级数也较少,说明外加毫米波与约瑟夫森结的耦合较差.根据电阻分路结(RSJ)模型,可以通过一个简单的公式[11]来计算约瑟夫森结耦合吸收的功率

$$P_0 = \frac{1}{2}\Delta I_{\text{sup}} I_c \left(\frac{f}{f_c}\right)^2 R_n \tag{5}$$

式中,ΔI_{sup}是在外加电磁波辐照的情况下临界电流被压制而减小的值,也叫做抑制电流;I_c 代表临界电流;f 是外加电磁波频率;f_c 是特征频率;R_n 是结的正常态电阻;P_0 代表通过抑制电流 ΔI_{sup}计算出来的约瑟夫森结吸收的功率.通过计算得到:在 FP 谐振腔中约瑟夫森结吸收的功率为 $P_{0a} = 7.4\text{nW}$ 而在波导腔中约瑟夫森结吸收的功率为 $P_{0b} = 2.2\text{nW}$,即在 FP 谐振腔内约瑟夫森结从外加电磁场能量中吸收的能量是波导腔中吸收能量的 3.5 倍,可见利用 FP 谐振腔测量技术可显著提高外加电磁场与约瑟夫森结的耦合效率.

4 结论

我们设计并制作的 8mm 波段 FP 谐振腔是由一个凹面镜和一个平面反射镜组成的开放式腔体,凹面镜的曲率半径为 36.4mm,平面反射镜的半径为 20mm.用它建立起一套 FP 谐振腔高温超导约瑟夫森结特性测量系统.这套测量系统具有许多重要的特点,比如 FP 谐振腔两镜面之间的距离以及样品在腔内的位置可通过螺旋测微器在常温下进行精细微调,调节非常方便和精确;可随意调节腔内电场方向与晶界的相对夹角,使外加毫米波与双晶约瑟夫森结的耦合达到最强烈;*I-V*特性曲线既可以在计算机中进行记录和保存,又可以通过转换开关的作用在示波器上即时显示出来,实时观察,便于对系统的调试和实验.这些重要的特点,使它非常适合于用来测量高温超导约瑟夫森结的特性,具有很高的实用价值.

使用我们设计的 FP 谐振腔测试系统测量了 Tl-2212 高温超导薄膜双晶约瑟夫森结的毫米波辐照特性,得到高质量的夏皮罗台阶,并与在 U 形波导系统中的测量结果进行了比较,发现利用 FP 谐振腔测量技术可显著提高外加电磁场与约瑟夫森结的耦合效率,为进一步研究毫米/亚毫米波信号检测、THz 波信号源等

研究打下坚实的基础.

参考文献:

[1] Clarke R N, Rosenberg C B. Fabry-Perot and open resonators at microwave and millimetre wave frequencies, 2 – 300GHz[J]. J Phys E Sci Instrum, 1982, 15(1): 9 – 24.

[2] Rohrer M, Krzystek J, Williams V, Brunel L C. Fabry-Pérot resonator for high-field multi-frequency ESR at millimetre and submillimetre wavelengths[J]. Meas Sci Technol, 1999, 10(4): 275 – 284.

[3] Myler J K, Sambles J R, Cousins J E. A Fabry-Perot resonator for conduction electron spin resonance studies at 34GHz[J]. J Phys E Sci Instrum, 1980, 13(3): 289 – 291.

[4] Komiyama B, Shimakage H, Miura S, Tsuge H. Millimeter wave surface resistance measurements of high-Tc superconductive thin films using a NB open resonator[J]. European Microwave Conference, 1994, 2: 986 – 991.

[5] Klushin A M, Druzhnov D M, Klein N. Bicrystal Josephson junctions and arrays in a Fabry-Perot resonator[J]. J Phys Conf Ser, 2006, 43: 1155 – 1158.

[6] Klushin A M, He M, Yan S L, Klein N. Arrays of high-TcJosephson junction in open millimeter wave resonators[J]. Appl Phys Lett, 2006, 89(23): 232505-1-232505-3.

[7] Ozyuzer L, et al. Emission of Coherent THz Radiation from Superconductors[J]. Science, 2007, 318(5854): 1291 – 1293.

[8] 刘飞连,周铁戈,等.约瑟夫森结参数对 Shapiro 台阶的影响研究[J].电子学报,2009,37(5):957 – 960.
Liu Feilian, Zhou Tiege, et al. Influence of Josephson junction parameters on Shapiro steps[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(5): 957 – 960. (in Chinese)

[9] Kogelnik H, Li T. Laser beams and resonators[J]. IEEE Proc 1966, 54(10): 1312 – 1329.

[10] 范安辅,徐天华.激光物理[M].成都:四川大学出版社 1992. 38 – 40, 69 – 80.

[11] Kunkel G, Ono R H, Klushin A M, Millimetre-wave radiation from arrays of high-Tc Josephson junctions[J]. Supercond Sci Technol, 1996, 9(4A): A_1 – A_4.

作者简介:



岳宏卫　男,1967 年 11 月出生于广西.现为南开大学在读博士生,研究方向为超导电子技术、约瑟夫森结(阵列)的微波特性及其应用等.
E-mail: yuehongwei@mail.nankai.edu.cn