

# SrTiO<sub>3</sub> 基片上 Tl-2212 双晶约瑟夫森结的动态特性 及噪声影响研究\*

王 争<sup>1)†</sup> 岳宏卫<sup>1)</sup> 周铁戈<sup>1)</sup> 赵新杰<sup>1)</sup> 何 明<sup>1)</sup> 谢清连<sup>1)2)</sup> 方 兰<sup>1)</sup> 阎少林<sup>1)</sup>

1) 南开大学信息技术科学学院电子系, 天津 300071)

2) 广西师范学院物理与电子信息科学系, 南宁 530001)

(2009 年 1 月 15 日收到, 2009 年 2 月 18 日收到修改稿)

在 SrTiO<sub>3</sub> (STO) 基片上制作了 Tl-2212 双晶约瑟夫森结, 并对其进行了微波辐照下的  $I-V$  特性测试, 观察到了夏皮罗台阶, 符合约瑟夫森电压-频率关系. 利用数值仿真对约瑟夫森结建立了 RCSJ 模型, 仿真结果与实验数据符合较好, 利用此模型深入研究了噪声对结动态特性的影响, 解释了噪声影响下结的微波感应台阶幅度减小和极小值展宽现象, 提出了有效噪声温度为工作温度和外部噪声的等效温度之和.

关键词: RCSJ 模型, 噪声, Tl-2212 双晶约瑟夫森结

PACC: 7450, 7270, 6120J

## 1. 引 言

约瑟夫森结, 特别是高温超导约瑟夫森结, 具有十分广泛的应用领域, 如超导量子干涉器件 (SQUID) 太赫兹 (THz) 信号产生和检测、电压标准以及超导数字电路等<sup>[1-4]</sup>. Tl-2212 超导薄膜具有临界转变温度高、抗潮湿能力强的优点, 不失为一种制作约瑟夫森结的优良材料. 但是, 长期以来, 高温超导约瑟夫森结的研究主要都是基于 RBCO (R 代表稀土元素, 如 Y, Nd 等) 超导薄膜<sup>[5]</sup>, Tl 系超导材料制作的约瑟夫森结研究得较少. 本文详细研究了在 SrTiO<sub>3</sub> (STO) 双晶基片上制作的 Tl-2212 约瑟夫森结的动态特性.

噪声对约瑟夫森结的动态特性有很大影响<sup>[6,7]</sup>, 例如用约瑟夫森结制作的 SQUID, 其灵敏度受噪声的影响十分明显. 同样, 约瑟夫森结在外加微波辐照下产生的夏皮罗台阶也会受到噪声的影响. Kautz 等<sup>[8]</sup>较早地探索了热噪声对夏皮罗台阶的影响, 指出噪声会使台阶高度减小, 但对实验中出现的台阶在一段外加微波强度范围内消失的现象 (即极小值

展宽) 并未明确指出并进行研究. 我们利用数值仿真的方法深入研究了噪声影响下约瑟夫森结的动态特性, 解释了微波感应台阶幅度减小甚至消失的现象, 分析了噪声的组成, 得出噪声为热噪声和外部电磁噪声之和, 而外部噪声是一独立于温度的参数, 它只由测试系统决定.

## 2. 实验与建模

### 2.1. 实验方法

实验用的约瑟夫森结是在 STO 双晶基片上生长 Tl-2212 超导薄膜制作而成的. STO 双晶基片为 [001] 位错, 晶界位错角 24°, 厚度为 0.5 mm.

外延的 Tl-2212 超导薄膜采用两步工艺法制备<sup>[9,10]</sup>. 首先使用离轴 (off-axis) 直流磁控溅射法制备非晶态 Tl-2212 先驱膜, 溅射靶材原子比为 Tl:Ba:Ca:Cu:O = 2:2:1:2. 然后将先驱膜与含适量 Tl<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的焙烧靶材一起密封于坩埚内, 把坩埚置于石英管中, 通过 1 atm (101.325 kPa) 的 Ar, 在 720—760 °C 退火 1—6 h, 使先驱膜转化为 Tl-2212 超导薄膜, 薄膜

\* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2006CB61006) 和国家高技术研究发展计划 (批准号: 2006AA03Z213) 和高等学校博士学科点专项科研基金 (批准号: 20050055028, 200800551009) 资助的课题.

† E-mail: zhengw@mail.nankai.edu.cn

厚度为 300 nm. 用非接触电感法测得超导转变温度  $T_c$  为 103—105 K. 四点法测得 77 K 0 T 时的临界电流密度  $j_c > 3 \times 10^6$  A/cm<sup>2</sup>. 采用半导体光刻工艺和稀盐酸湿刻法将薄膜刻蚀成微桥, 并使晶界穿过微桥, 从而得到双晶约瑟夫森结, 结宽 6—7  $\mu\text{m}$ .

约瑟夫森结样品被嵌入到半球面 Fabry-Perot (FP) 谐振腔内, 结构如图 1 所示, FP 谐振腔包括一个曲面镜和一个平面镜, 约瑟夫森结样品被放在两个反射镜之间, 且与平面镜平行. 两个反射镜的直径均为 40 mm, 曲面镜的曲率半径为 36.4 mm, 通过调节 FP 谐振腔, 可以使其工作在 TEM<sub>001</sub> 基模状态下, 此时腔内电磁波分布为高斯分布, 称为“高斯光束”, 其中间部分的场分布完全等同于空间平面波. 采用耿氏振荡器作为微波源, 设计输出中心频率为 37.2 GHz, 最大输出功率为 50 mW, 通过外接衰减器和功率计分别调节微波功率和测量其大小, 以测试约瑟夫森结在不同微波功率辐照下的  $I$ - $V$  特性. 全部试验均在电磁屏蔽室内进行.

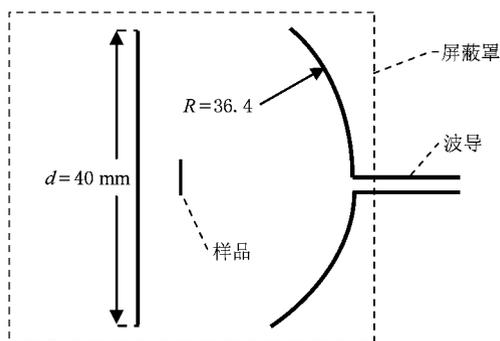


图 1 半球面 Fabry-Perot 谐振腔结构图 约瑟夫森结样品被置于两反射镜之间, 并与平面镜平行

## 2.2. 数值仿真模型

考虑到 STO 基片在 77 K 时极大的介电常数会产生一定的寄生电容, 我们将用 RCSJ 模型对 STO 上的 Tl-2212 双晶约瑟夫森结进行建模, 后面的讨论将进一步表明引入电容  $C$  是必要的. 描述 RCSJ 系统的方程如下:

$$\frac{\hbar}{2e} C \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} + \frac{\hbar}{2e R_N} \frac{\partial \varphi}{\partial t} + I_c \sin \varphi = I_0 + I_{rf} \sin \omega t + I(t), \quad (1)$$

式中,  $\varphi$  代表约瑟夫森结的超导电子相位差,  $\hbar$  是约化普朗克常量,  $C$ ,  $R_N$  和  $I_c$  分别表示约瑟夫森结的电容、常态电阻以及临界电流; 方程的右边,  $I_0$ ,  $I_{rf}$ ,

$\omega$  分别表示给结的直流偏置电流、射频电流以及频率.  $I(t)$  表示一高斯分布的随机变量, 用以代替噪声对结的影响, 满足  $\langle I(t + \tau) I(t) \rangle = 2\Gamma \delta(\tau)$ , 其中  $\Gamma = 2ek_B T/\hbar$  是噪声系数, 其大小表示了噪声的强弱<sup>[8]</sup>. 图 2 给出了方程 (1) 的等效电路,  $J$  为理想约瑟夫森结, 与电阻  $R_n$ 、电容  $C$  并联构成实际约瑟夫森结的 RCSJ 模型,  $I_0$ ,  $I_{rf}$  分别为直流电流源和射频电流源,  $I_n$  是一噪声电流源, 其分布符合高斯分布. 这样, 改变电路模型中的不同参数就可以研究不同约瑟夫森结的动态特性. 通常, 为了分析方便, 常把方程 (1) 中的变量简化为无量纲变量. 利用结的特征频率  $\omega_c = 2eI_c R_N/\hbar$  得到归一化的外加微波频率  $\Omega = \omega/\omega_c$  和电容值 (即 McCumber 参数)  $\beta_c = \omega_c R_N C$ . 利用临界电流  $I_c$  得到归一化的直流偏置电流  $i_0 = I_0/I_c$  和射频电流  $i_{rf} = I_{rf}/I_c$ , 以及归一化的噪声参量  $\Gamma_n = 2ek_B T/\hbar I_c$ .

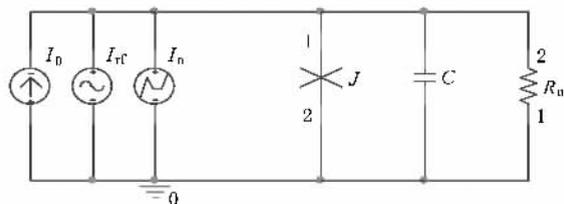


图 2 微波辐照及噪声影响下 RCSJ 模型的仿真电路图

## 3. 结果与讨论

### 3.1. 实验结果

一个典型的双晶约瑟夫森结 (BJJ)  $I$ - $V$  特性曲线如图 3 所示. 结宽 7  $\mu\text{m}$ , 测试温度为 77 K, 图 3 中曲线  $a$  显示了在无外加微波辐照时的  $I$ - $V$  曲线, 从中可以得到其临界电流  $I_c$  为 0.89 mA, 常态电阻  $R_n$  为 0.23  $\Omega$ ; 曲线  $b$  是在有外加微波辐照时的  $I$ - $V$  特性曲线, 微波频率为 37.2 GHz, 从图上可以看到清晰的微波感应台阶, 且符合约瑟夫森电压-频率关系. 图 4 给出了一个同样尺寸的双晶结临界电流  $I_c$  随温度的变化关系曲线. 可以看到在  $T_c$  附近,  $I_c(T)$  随温度的降低近似呈线性增长, 如图中虚线所示, 满足 Ambegaokar-Baratoff 关系<sup>[11]</sup>, 与 Seidel 等<sup>[12]</sup>在 STO 基片上用 NdBaCuO 超导薄膜制备的双晶约瑟夫森结具有类似的结果.

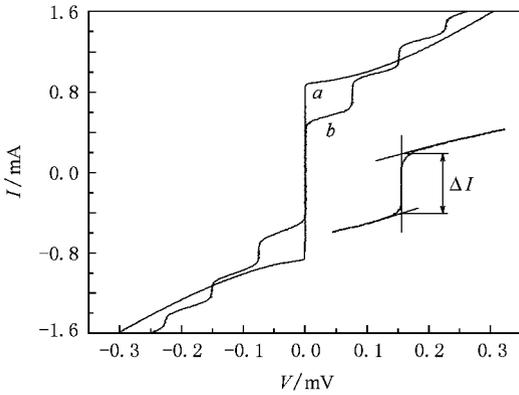


图3 一个双晶约瑟夫森结的  $I$ - $V$  特性曲线. 曲线  $a$  是无外加微波辐照, 曲线  $b$  是有外加微波辐照. 测试温度 77 K, 外加微波频率 37.2 GHz

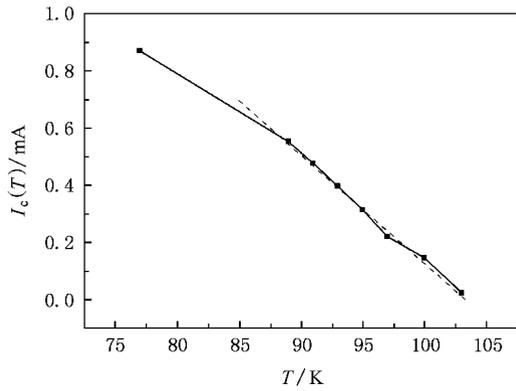


图4 双晶约瑟夫森结的临界电流随温度的变化关系曲线

### 3.2. 数值计算与分析

从实验结果我们得到 Tl-2212 双晶约瑟夫森结的临界电流  $I_c$  为 0.89 mA, 常态电阻  $R_n$  为  $0.23 \Omega$ , 进而得到归一化外加微波频率  $\Omega = 0.376$ . 考虑到实验中并没有发现回滞现象,  $\beta_c$  初选为 0.5, 经过多次微调, 最终确定为 0.157. 图 5 显示了实验曲线与仿真结果, 此时  $\Gamma_n = 0.0690$ . 为了进行比较, RSJ 模型的仿真结果也一并给出, 其中 RCSJ 模型的仿真曲线沿纵轴移动了 0.1 mA. 从图中可以看到, RCSJ 模型的仿真曲线与实验数据符合得很好.

图 6 给出了同一约瑟夫森结在 77 K 外加微波辐照时, 第 0, 1, 2 次台阶高度随外加微波强度变化的实验数据 (●) 和 RCSJ 模型仿真曲线 (□), 考虑到噪声引起台阶处的圆拱化, 台阶高度采用了图 3 中所示的方法定义, 且对无微波辐照时的  $I_c$  进行归一化. 可以看到 RCSJ 模型再一次很好地拟合了实验

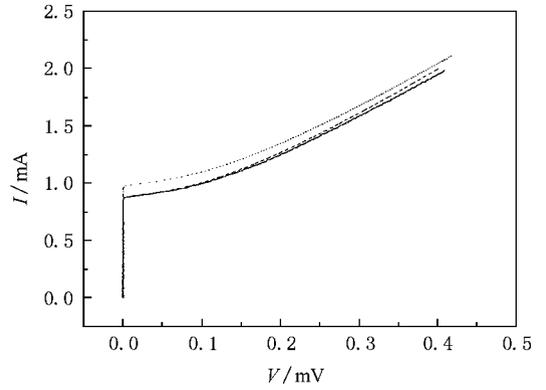


图5 77 K 时一个约瑟夫森结在无微波辐照时的  $I$ - $V$  曲线. 实线、点线、虚线分别表示实验数据、RCSJ 模型和 RSJ 模型的仿真曲线. RCSJ 模型的仿真曲线沿纵轴移动了 0.1 mA

数据.

为了研究噪声对结微波感应台阶的影响, 我们进行了相关的数值模拟. 图 6 中同时给出了  $\Gamma_n = 0$  时 RCSJ 模型的仿真结果 (△). 仔细观察图中的两条曲线, 可以看到噪声的引入使得约瑟夫森结的微波感应台阶幅度明显减小并出现了极小值展宽现象. 如图 6 所示, 在任何外加微波强度下, 加入噪声的台阶高度均小于未加噪声的, 且各次台阶均会在某一微波强度范围内消失, 即极小值展宽现象. 实验数据也正好验证了我们的判断. 这与 Kautz 等<sup>[8]</sup> 所得到

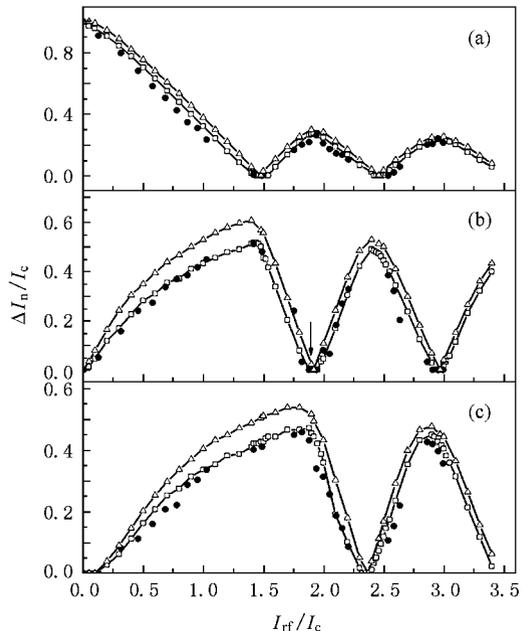


图6 归一化微波感应台阶高度随微波强度的变化关系. ● 为实验数据, □, △ 分别为  $\Gamma_n = 0.0690$  和  $\Gamma_n = 0$  时的数值仿真数据. (a)  $n=0$  (b)  $n=1$  (c)  $n=2$

的实验结果一致.

为了找到这种现象的原因,我们进行了更深入的仿真研究.图 7 给出了直流偏置  $i_0$  分别为 0.3764 和 0.3876,噪声系数  $\Gamma_n$  分别为 0 和 0.0690 时,RCSJ 模型两端电压的时序波形图,外加微波的参数设为图 6 箭头所指处对应的情况,即  $i_{rf} = 1.9, \Omega =$

0.376. 图中的水平直线表示相应的平均电压,可以看到当直流偏置  $i_0$  由 0.3764 变到 0.3876 时,在无噪声的情况下,平均电压基本保持不变,从而形成了微波感应台阶,而有噪声时平均电压从  $75.75 \mu\text{V}$  增加到了  $80.22 \mu\text{V}$ ,这就说明了在相同的微波辐照强度下,噪声会造成台阶的幅度减小甚至消失.

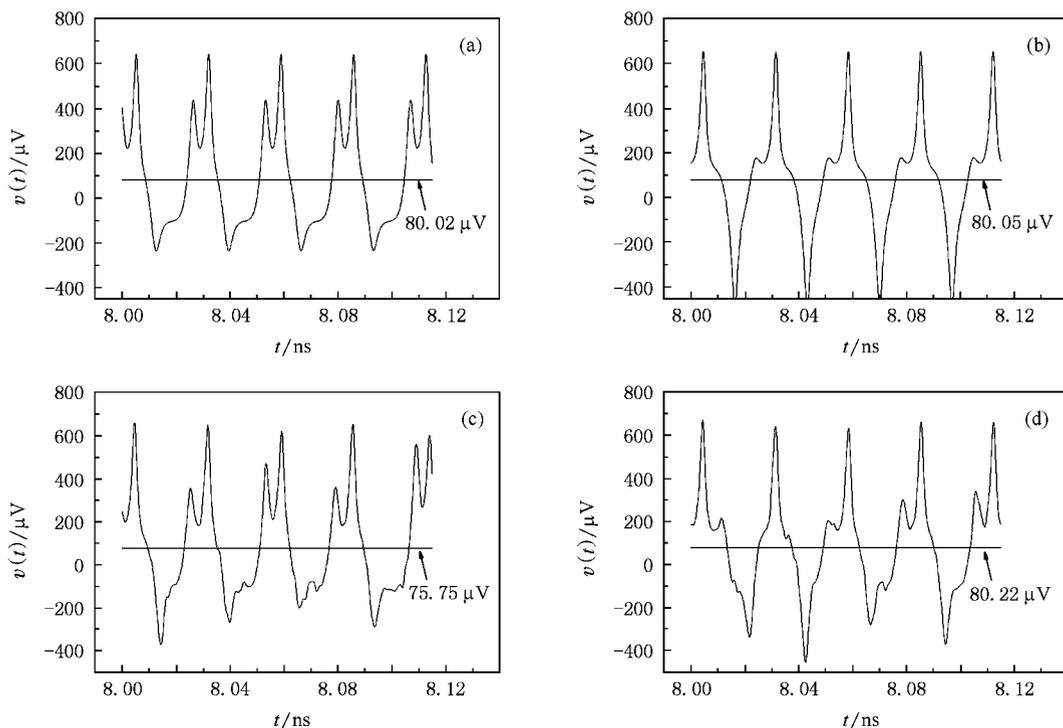


图 7 RCSJ 模型两端的电压时序波形图  $i_{rf} = 1.9, \Omega = 0.376$ . (a)  $\Gamma_n = 0, i_0 = 0.3764$  (b)  $\Gamma_n = 0, i_0 = 0.3876$  (c)  $\Gamma_n = 0.0690, i_0 = 0.3764$  (d)  $\Gamma_n = 0.0690, i_0 = 0.3876$ .

同时,我们计算了  $\Gamma_n = 0.0690$  时对应的噪声温度  $T_n \approx 1432.4 \text{ K}$ ,这个温度远远高于结的工作温度  $77 \text{ K}$ .因此,仅仅考虑热噪声并不足以引起实验中所观察到的现象,必须考虑其他因素引起的噪声,如引线引入的噪声、未被完全屏蔽掉的外部电源噪声和地磁噪声等.如果定义由噪声系数  $\Gamma_n$  计算出的温度为等效噪声温度  $T_{en}$ ,那么有  $T_{en} = T_{op} + T_{add}$ ,式中  $T_{op}$  表示工作温度, $T_{add}$  表示外部噪声的等效温度.为了进一步了解外部噪声的变化情况,我们对不同工作温度  $T_{op}$  下测得的直流  $I-V$  曲线进行了拟合,提取了噪声系数  $\Gamma_n$ ,计算了相应的等效噪声温度  $T_{en}$ .如图 8 所示,可以看到  $T_{en}$  随着  $T_{op}$  的增加呈线性增加,只是在接近临界温度时,陡然上升,推测是由于在接近临界温度时,临界电流极小,结的抗噪声能力急剧

减小所致.从图 8 可以推断出外部噪声是一独立于温度和样品本身的参数,它只由测试系统决定,本实验所用测试系统的等效噪声温度大约为  $1355 \text{ K}$ .

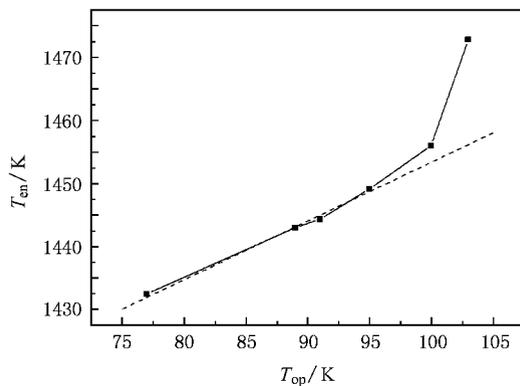


图 8 不同工作温度  $T_{op}$  对应的等效噪声温度  $T_{en}$

## 4. 结 论

在 STO 基片上制作了 Tl-2212 双晶约瑟夫森结,进行了微波辐照实验,观察到了微波感应台阶,符合约瑟夫森电压-频率关系.通过数值仿真,得到约瑟夫森结符合 RCSJ 模型.利用此模型得到的数值计算

结果很好地与实验数据相符合.同时,详细研究了噪声对结动态特性的影响,解释了微波感应台阶幅度减小和极小值展宽现象.提出了等效噪声温度为工作温度和外部噪声等效温度之和,而外部噪声是一独立于温度的参量,它只与测试系统相关.所得结果对于应用 Tl-2212 超导薄膜的约瑟夫森结(如:太赫兹信号产生与检测、电压标准)具有重要意义.

- [ 1 ] Silver A H , Zimmerman J E 1967 *Phys. Rev.* **157** 317
- [ 2 ] Siegel P H 2002 *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **50** 910
- [ 3 ] Levinsen M T , Chiao R Y , Feldman M J , Tucker B A 1977 *Appl. Phys. Lett.* **31** 776
- [ 4 ] Mukhanov O A , Semenov V K , Likharev K K 1987 *IEEE Trans. Magn.* **MAG-23** 759
- [ 5 ] Gross R 2005 *Physica C* **432** 105
- [ 6 ] Shang C , Xu W W , Yang J , Chen J , Wu P H 2008 *Cry. & Supercond.* **36** 45 ( in Chinese ) [ 商 诚、许伟伟、杨 健、陈 健、吴培亨 2008 低温与超导 **36** 45 ]
- [ 7 ] Wang Y , Xu W W , Sun G Z , Chen J , Cao J Y , Cong S H , Wu P H 2007 *Cry. & Supercond.* **35** 53 ( in Chinese ) [ 王 颖、许伟伟、孙国柱、陈 健、曹俊宇、丛山桦、吴培亨 2007 低温与超导 **35** 53 ]
- [ 8 ] Kautz R L , Ono R H , Reintsema C D 1992 *Appl. Phys. Lett.* **61** 342
- [ 9 ] Yan S L , Fang L , Song Q X , Yan J , Zhu Y P , Chen J H , Zhang S B 1993 *Appl. Phys. Lett.* **63** 1845
- [ 10 ] Yan S L , Fang L , Si M S , Cao H L , Song Q X , Yan J , Zhou X D , Hao J M 1994 *Supercond. Sci. Tech.* **7** 681
- [ 11 ] Ambegaokar V , Baratoff A 1963 *Phys. Rev. Lett.* **10** 486
- [ 12 ] Seidel P , Waldauf A , Barholz K U , Schmidl F 2000 *Physica C* **341—348** 2331

# Dynamic characteristics of Tl-2212 bicrystal Josephson junctions on SrTiO<sub>3</sub> substrates and the effect of noise on it<sup>\*</sup>

Wang Zheng<sup>1)†</sup> Yue Hong-Wei<sup>1)</sup> Zhou Tie-Ge<sup>1)</sup> Zhao Xin-Jie<sup>1)</sup> He Ming<sup>1)</sup>

Xie Qing-Lian<sup>1)‡</sup> Fang Lan<sup>1)</sup> Yan Shao-Lin<sup>1)</sup>

<sup>1</sup> *Department of Electronics, College of Information Technical Science, Nankai University, Tianjin 300071, China*

<sup>2</sup> *Department of Physics and Electronic Information Science, Guangxi Teachers Education University, Nanning 530001, China*

( Received 15 January 2009 ; revised manuscript received 18 February 2009 )

## Abstract

Tl-2212 bicrystal Josephson junctions on SrTiO<sub>3</sub> substrates have been fabricated. The  $I$ - $V$  characteristic of a Josephson junction under microwave radiation were measured, and microwave induced steps were observed in accordance with the Josephson frequency-voltage relationship. The RCSJ model including noise of bicrystal Josephson junction was constructed through numerical simulation, and the results of simulation were in good agreement with the experimental data. Using the RCSJ model, we investigated the effect of noise on the dynamic characteristics of Josephson junction through simulation, and explained the phenomenon of reduced height and increased breadth of the minima of microwave induced steps. We proposed that the effective noise temperature should be the sum of operational temperature and equivalent temperature of the external noise.

**Keywords** : RCSJ model, noise, Tl-2212 bicrystal Josephson junction

**PACC** : 7450, 7270, 6120J

<sup>\*</sup> Project supported by the National Basic Research Program of China ( Grant No. 2006CB601006 ), the National High Technology Research and Development Program of China ( Grant No. 2006AA03Z213 ), and the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China ( Grant Nos. 20050055028, 200800551009 ).

<sup>†</sup> E-mail : zhengw@mail.nankai.edu.cn