

## $\pi$ -TM<sub>610</sub> 模同轴双间隙腔耦合同轴线输出电路

王宏义<sup>①</sup> 林福民<sup>②</sup>

<sup>①</sup>(汕头大学物理系 汕头市 515063)

<sup>②</sup>(广东工业大学物理与光电工程学院 广州 510006)

**摘要:** 该文提出一种适合于 X 波段多注速调管的  $\pi$ -TM<sub>610</sub> 模双间隙同轴腔的同轴线输出电路, 并详细分析了其带宽和输出功率容限等重要性能, 结果表明:  $\pi$ -TM<sub>610</sub> 模双间隙同轴腔耦合同轴线之后, 输出腔中各个电子注孔的特性阻抗仍然很均匀; 但由于输出腔外观品质因数太大而且无法使其降低, 导致输出频带较窄; 输出功率容限则为 1MW 左右。因此它比较适合作为高射频段的高功率窄带多注速调管的输出电路。

**关键词:** 多注速调管; 高次模谐振腔; 双间隙同轴腔;  $\pi$ -TM<sub>610</sub> 模; 特性阻抗; 外观品质因数

中图分类号: TN122

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)10-2518-05

## Output Circuit of $\pi$ -TM<sub>610</sub> Mode Double-Gap Coaxial Cavity Coupled with Coaxial Line

Wang Hong-yi<sup>①</sup> Lin Fu-min<sup>②</sup>

<sup>①</sup>(Department of Physics, Shantou University, Guangdong 515063, China)

<sup>②</sup>(School of Physics & Optoelectronic Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** A  $\pi$ -TM<sub>610</sub> mode double-gap coaxial cavity loaded by a coaxial line is proposed as the output circuit of X-band multi-beam klystron. Its main performances, such as bandwidth and power capacity, are studied. The results show that characteristics impedances along different beam hole are still almost equal after the output cavity coupled with a coaxial line. But the external quality factor of the output cavity is too large and difficult to diminish, so that the output bandwidth is small. The output power capacity reaches about 1MW. So it is suitable as a proper output circuit of high power narrowband multi-beam klystron of high radio-frequency.

**Key words:** Multi-beam klystron; High-order mode cavity; Double-gap coaxial cavity;  $\pi$ -TM<sub>610</sub> mode; Characteristic impedance; External quality factor

### 1 引言

在高射频段,  $\pi$  模双间隙高次谐振腔在速调管设计中有广阔的应用前景<sup>[1-4]</sup>。采用高次模使得腔体的横截面尺寸增大, 从而使电子注的导流系数降低, 能有效地提高速调管的功率和效率; 由于基模谐振腔的横截面尺寸较小, 当采用多层电子注时, 必须采用较大的漂移管头, 这使腔体的特性阻抗降低, 同时中心孔径和周围孔径的特性阻抗相差较大, 也使得电子注的相位离散加剧。若采用同轴双间隙高次模腔作为多注速调管的输出腔, 则电子注可以均匀分布于具有最大轴向电场的圆环上, 电子注离散程度相对较小<sup>[5-7]</sup>, 而且, 同轴腔中每个电子注可以采用较小的漂移管头, 有利于提高特性阻抗。因此, 研究高次模双间隙同轴腔具有重要的意义。

现已研制成功的多注速调管多采用基模双间隙腔作为输出腔<sup>[8,9]</sup>, 国内采用高次模同轴输出腔的多

注速调管还没研制成功, 其中最主要的障碍就是高次模同轴腔耦合矩形波导以后输出腔间隙处的轴向电场很不均匀, 所以电子注的速度离散很严重, 导致整管工作不稳定。本文重点在于研究采用  $\pi$ -TM<sub>610</sub> 模双间隙同轴腔加载同轴线输出的可行性。

### 2 $\pi$ -TM<sub>610</sub> 模双间隙同轴腔的设计

#### 2.1 理论分析

速调管输出腔一般采用 TM<sub>nm0</sub> 模作为工作模式, 以腔体中心为坐标原点, 根据同轴腔的边界条件,  $\pi$ -TM<sub>nm0</sub> 模的各个电场分量可近似表示为<sup>[10]</sup>

$$E_r = -\frac{E_{mnp}}{k_c} \frac{p\pi}{h} [N_n(k_c a) J'_n(k_c r) - J_n(k_c a) N'_n(k_c r)] \cdot \cos(m\phi) \cos\left[\frac{(p+1)\pi z}{h}\right]$$
$$E_\phi = -\frac{E_{mnp} m}{k_c^2 r} \frac{p\pi}{h} [N_n(k_c a) J_n(k_c r) - J_n(k_c a) N_n(k_c r)] \cdot \sin(m\phi) \cos\left[\frac{(p+1)\pi z}{h}\right]$$

$$E_z = E_{mnp} [N_n(k_c a) J_n(k_c r) - J_n(k_c a) N_n(k_c r)] \cdot \cos(m\phi) \sin\left[\frac{(p+1)\pi z}{h}\right]$$

以上各式中最后一个因子考虑了耦合槽附近磁场的变形,  $E_z$  在每腔相互作用间隙处轴向变化不大, 在中间耦合壁处  $E_z=0$ , 在双间隙腔的上下底面附近  $E_z$  最强。其中  $a$  为圆柱腔的外半径,  $b$  为同轴腔的内半径,  $h$  为腔高,  $k_c$  是以下本征方程的解。

$$J_n(k_c b) N_n(k_c a) - J_n(k_c a) N_n(k_c b) = 0$$

### 2.2 腔体设计

本文所设计的  $\pi$ -TM<sub>610</sub> 模双间隙同轴腔的结构如图 1 所示, 两个对称单腔的中间耦合壁上开有 6 个耦合槽, 每个耦合槽正中有一根圆柱金属杆, 漂移管头采用重入式结构, 相邻两个漂移管头中心相对于腔体中心的张角为  $60^\circ$ , 耦合槽  $\angle AOC = 40^\circ$ , 每根圆柱金属杆直径为 4.5 mm, 同轴腔外径  $\phi = 48$  mm, 内径  $\phi = 26.4$  mm, 电子注孔径  $\phi = 3$  mm, 漂移管头直径  $\phi = 8$  mm, 漂移管头伸入腔体 4.15 mm, 腔体高度为 20 mm, 耦合壁厚度为 4.5 mm, 每个相互作用间隙宽 3.6 mm, 两个相互作用间隙中心线相距 8.1 mm。模拟结果显示:  $\pi$ -TM<sub>610</sub> 模的频率为 10832.85 MHz,  $2\pi$ -TM<sub>610</sub> 模的频率为 8850.92 MHz。这表明, 在这个双间隙同轴腔中出现了文献[10]所描述的  $\pi_1$ -TM<sub>610</sub> 模消失现象, 只有

$\pi_2$ -TM<sub>610</sub> 模, 所以  $\pi$ -TM<sub>610</sub> 模频率比  $2\pi$ -TM<sub>610</sub> 模频率高。

图 2 为腔内  $\pi$ -TM<sub>610</sub> 模的电场分布, 图 2(a) 为相互作用间隙中央的轴向电场  $E_z$  分布。图 2(b) 为耦合槽中 ( $z=0$  处) 的电场分布, 图中显示该处轴向电场为 0, 属于  $\pi$  模。

表 1 为各个电子注孔的特性阻抗。由于同轴腔具有圆形对称, 各个电子注孔的特性阻抗应该精确相同, 表 1 数据表明模拟计算存在一些误差, 但是误差很小。

### 2.3 漂移管头的设计

在保持双间隙中央线的间距不变的情况下, 若腔体总高度增加, 漂移管头伸入腔内的长度也要随之增加。本文分别取腔体总高度为 16 mm, 18 mm, 20 mm, 22 mm, 计算  $\pi$ -TM<sub>610</sub> 模的谐振频率和特性阻抗。表 2 的数据显示, 随着漂移管头伸入腔内的长度增加, 腔体的谐振频率降低, 而且特性阻抗也明显变小。由此可见, 对于此类双间隙同轴腔而言, 漂移管头不能伸入腔内太大。

## 3 $\pi$ -TM<sub>610</sub> 模双间隙同轴腔同轴线输出电路的结构和性能

### 3.1 输出电路的结构和外观品质因数

图 3 是  $\pi$ -TM<sub>610</sub> 模双间隙同轴腔与同轴线的耦合结构图, 同轴线外径  $\phi=12$  mm, 内径  $\phi=4.5$  mm。

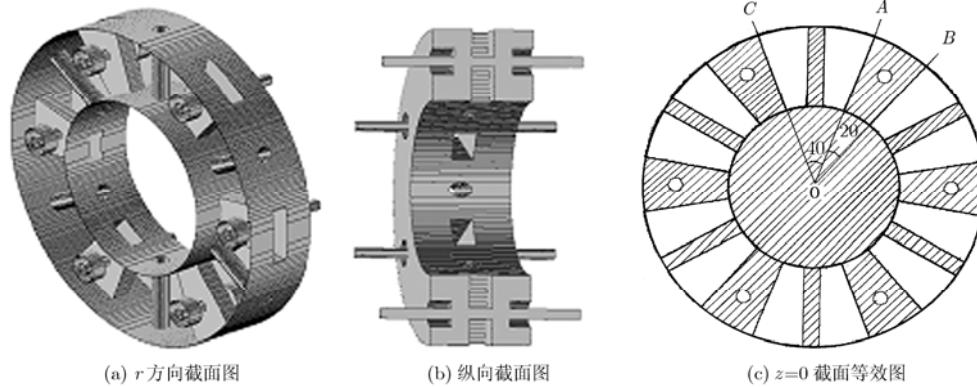


图 1 同轴双间隙谐振腔

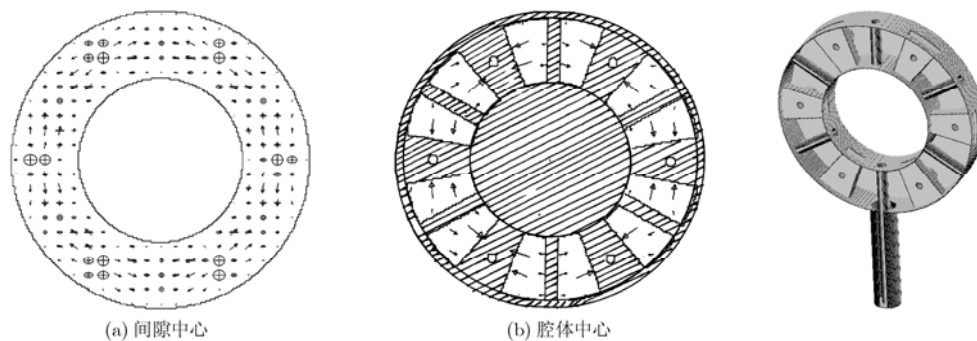


图 2 腔体间隙电场分布

图 3 加载同轴线的输出结构

表 1 同轴腔中各个孔的特性阻抗值( $\Omega$ )

|        | 孔 1   | 孔 2   | 孔 3   | 孔 4   | 孔 5   | 孔 6   | 平均值   |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $R/Q$  | 8.56  | 9.04  | 9.12  | 8.68  | 8.72  | 8.72  | 8.807 |
| 相对特性阻抗 | 1.000 | 1.056 | 1.065 | 1.014 | 1.019 | 1.019 | 1.029 |

表 2 不同长度的漂移管头对应的  $\pi$ -TM<sub>610</sub> 模谐振频率和特性阻抗

| 腔体高度  | 孔 1   | 孔 2   | 孔 3   | 孔 4   | 孔 5   | 孔 6   | 谐振频率(MHz) |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|
| 16 mm | 12.96 | 16.40 | 16.60 | 11.24 | 15.8  | 14.36 | 12338.52  |
| 18 mm | 11.32 | 11.96 | 12.32 | 11.20 | 12.08 | 12.28 | 11508.91  |
| 20 mm | 8.56  | 9.04  | 9.12  | 8.68  | 8.72  | 8.72  | 10832.85  |
| 22 mm | 5.76  | 5.76  | 6.44  | 5.84  | 5.64  | 6.24  | 10296.00  |

表 3 同轴腔中各个孔的特性阻抗值( $\Omega$ )

|        | 孔 1   | 孔 2   | 孔 3   | 孔 4   | 孔 5   | 孔 6   | 平均值   |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $R/Q$  | 8.48  | 8.80  | 8.84  | 8.52  | 8.96  | 9.00  | 8.767 |
| 相对特性阻抗 | 1.000 | 1.037 | 1.042 | 1.005 | 1.057 | 1.061 | 1.034 |

$\pi$ -TM<sub>610</sub> 模双间隙同轴腔与同轴线耦合之后, 相互作用间隙处的电场分布变化不大, 各电子注孔处的轴向电场仍保持很均匀, 各个电子注孔的特性阻抗见表 3。这说明采用同轴线输出确实可以有效克服矩形波导输出方式中各电子注孔特性阻抗很不均匀的困难。

采用单端口模拟方法可以求出输入端口的反射系数相位随频率的变化关系, 图 4 所示, 利用反射系数相位法<sup>[11,12]</sup>可以求出加载同轴线之后输出腔的中心频率为 10834.85 MHz, 外观品质因数为  $Q_{\text{ext}}=1503.66$ 。由此可见,  $\pi$ -TM<sub>610</sub> 模双间隙同轴腔与同轴线耦合较弱, 输出带宽较窄。

### 3.2 同轴线与输出腔的耦合孔尺寸对间隙阻抗和 $Q_{\text{ext}}$ 的影响

速调管输出回路中, 耦合口的大小和位置对输出回路性能有很大的影响。本文采用了不同外径的同轴线与输出腔进行耦合, 分别计算了输出腔间隙阻抗和外观品质因数, 分析耦合孔尺寸对输出回路性能的影响。保持同轴线内径不变, 当同轴线外径分别取 12 mm, 14 mm, 16 mm 时, 利用速调管输出回路模拟计算方法<sup>[13,14]</sup>得到输出腔间隙阻抗随频率的变化曲线如图 5 所示。经计算, 当同轴线直径  $\phi=12$  mm 时,  $Q_{\text{ext}}=1450$ , 这与前面采用反射系数相位法的计算结果( $Q_{\text{ext}}=1503.66$ )很接近; 当同轴线直径  $\phi=14$  mm 时,  $Q_{\text{ext}}=870$ ; 当同轴线直径  $\phi=16$  mm 时,  $Q_{\text{ext}}=920$ 。由此可见, 同轴线与输出腔的耦合孔尺寸对间隙阻抗和  $Q_{\text{ext}}$  的影响非常

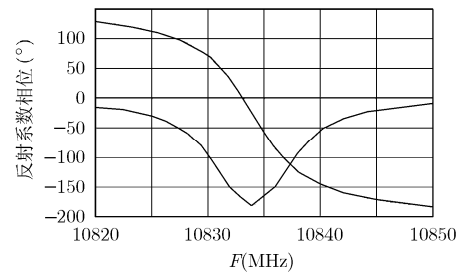
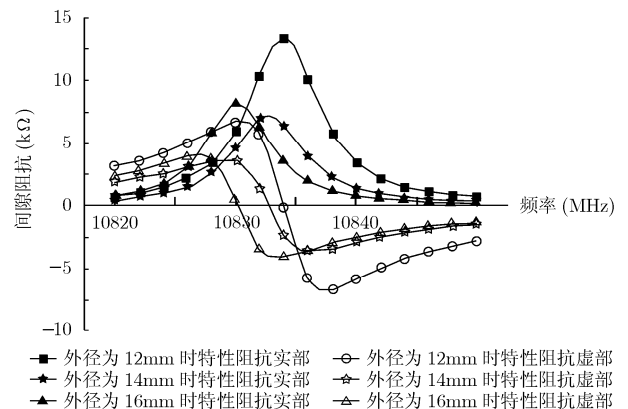


图 4 反射系数相位随频率的变化关系

图 5 输出同轴线外径对同轴  $\pi$ -TM<sub>610</sub> 双间隙腔的等效间隙阻抗的影响

大。

本文还分析了耦合孔径尺寸对输出腔中相互作用间隙处电磁场分布和各电子注孔特性阻抗均匀性的影响。保持同轴线内径不变, 当同轴线外径取 12 mm, 14 mm, 16 mm 时, 分别计算了输出腔中各

表 4 输出腔中各电子注孔的特性阻抗随同轴线外径的变化关系

|       | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 最大/最小 | 谐振频率 (MHz) |
|-------|------|------|------|------|------|------|-------|------------|
| 12 mm | 8.48 | 8.80 | 8.84 | 8.52 | 8.96 | 9.00 | 1.061 | 10832.8    |
| 14 mm | 8.52 | 8.92 | 8.92 | 8.52 | 8.80 | 8.88 | 1.047 | 10832.0    |
| 16 mm | 8.56 | 9.08 | 9.04 | 8.52 | 8.64 | 8.72 | 1.066 | 10830.0    |

表 5 不同耦合槽的模式间隔(MHz)

| $\angle AOC$ | $\pi$ 模  | $2\pi$ 模 | $\pi$ 模最邻近模式                  | $\pi$ 模和 $2\pi$ 模 $\Delta f$ | $\pi$ 模和最邻近模式的频率间隔 $\Delta f$ |
|--------------|----------|----------|-------------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| 耦合槽 44°      | 11058.22 | 8805.12  | 11151.89 (场形混乱)               | 2253.10                      | 94.37                         |
| 耦合槽 40°      | 10832.85 | 8850.92  | 10539.25 (TM <sub>510</sub> ) | 1981.93                      | 293.25                        |
| 耦合槽 38°      | 10704.38 | 8877.22  | 10414.67 (TM <sub>510</sub> ) | 1827.16                      | 289.71                        |
| 耦合槽 35°      | 10477.53 | 8863.24  | 10225.80 (TM <sub>510</sub> ) | 1614.29                      | 251.73                        |

表 6 采用不同耦合槽尺寸时各电子注孔的特性阻抗和外观品质因数

|         | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 最大/最小 | $Q_{ext}$ |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|
| 耦合槽 44° | 6.52  | 6.72  | 6.68  | 6.56  | 7.28  | 7.24  | 1.117 | 947.3     |
| 耦合槽 40° | 8.48  | 8.80  | 8.84  | 8.52  | 8.96  | 9.00  | 1.061 | 1503.7    |
| 耦合槽 38° | 9.28  | 9.40  | 9.48  | 9.24  | 10.00 | 10.04 | 1.086 | 1833.6    |
| 耦合槽 35° | 10.28 | 10.24 | 10.16 | 10.28 | 11.24 | 11.08 | 1.106 | 1968.3    |

个电子注孔的特性阻抗。表 4 中数据显示, 与输出腔耦合的同轴线外径对输出腔中各个电子注孔的特性阻抗几乎没什么影响, 也不会改变相互作用间隙处的电磁场分布。

### 3.3 耦合槽尺寸的影响

本文对双间隙同轴腔中的耦合槽(图 1 中  $\angle AOC$ )尺寸做了调整, 模拟结果列于表 5 中, 表 5 中数据表明: 当耦合槽增大时, 上下两个腔体之间的耦合加强, 耦合槽对应的等效电感增大<sup>[15]</sup>, 从而使  $\pi$ -TM<sub>610</sub> 模与  $2\pi$ -TM<sub>610</sub> 模的频率间隔随之增大, 但  $\pi$ -TM<sub>610</sub> 模与其它邻近模式的频率也逐渐接近。因此, 耦合槽相对于腔体中心的张角  $\angle AOC = 40^\circ$  是最佳选择。

表 6 为  $\pi$ -TM<sub>610</sub> 模双间隙同轴腔的特性阻抗和加载同轴线之后输出腔的外观品质因数  $Q_{ext}$  随耦合槽尺寸的变化关系。表 6 中数据表明, 随着耦合槽增大, 输出腔的特性阻抗和  $Q_{ext}$  都将下降, 这与中央开耦合槽的矩形双间隙腔<sup>[10]</sup>的情形非常类似。缩小耦合槽虽然有利于提高输出腔的特性阻抗, 但是  $Q_{ext}$  增大会使输出带宽变窄, 同时, 根据前面表 5 的数据, 最邻近模式的频率间隔也随之变小。

综上所述,  $\pi$ -双间隙高次模腔中耦合槽的尺寸必须适中, 对于  $\pi$ -TM<sub>610</sub> 模双间隙同轴腔而言, 耦合槽相对于腔体中心的张角  $\angle AOC$  取  $40^\circ$  是最佳选

择。

## 4 结束语

本文对  $\pi$ -TM<sub>610</sub> 模双间隙同轴腔加载同轴线输出电路的可行性进行了比较详尽的研究和讨论。研究表明, 该类输出电路可以保证输出腔中各个电子注孔处的轴向电场的均匀性, 但是输出腔外观品质因数  $Q_{ext}$  较大, 输出带宽较窄。在谐振频率点, 输出腔间隙阻抗实部较大, 间隙阻抗虚部线性好。该输出电路采用均匀同轴线与输出腔直接耦合, 不加任何销钉, 如图 3 所示, 如此, 其输出功率容限完全决定于同轴线的传输功率容限。当同轴线中为空气时, 最大击穿电场强度  $E_m$  为  $2.9 \times 10^4$  V/cm, 同轴线外径  $\phi = 12$  mm, 内径  $\phi = 4.5$  mm 时, 根据  $P = (E_m^2 b^2 / 480\Omega) \ln(b/a) / (b/a)^2$ , 可以计算出传输的平均功率为 348 kW, 在高真空度情况下, 电场击穿阈值至少提高 2 倍, 最大传输功率则可提高 4 倍, 从而可以实现 MW 级输出功率。因此, 此类输出电路非常适合于作为高射频段的高功率窄带多注速调管的输出电路, 具有非常诱人的应用前景。

## 参考文献

- [1] Abrams R H, leoush B, mondelli A A, and Parker R R. Vacuum electronics for the 21 century. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Technology*, 2001, 87(5): 65-66.

- [2] 张益林, 王定中等. 5 cm 波段高次模多注速调管. 中国电子学会真空电子学分会第十三届学术年会[C]. 贵阳, 2001: 139-142.
- [3] 陈新桥, 朱允淑, 丁耀根. 高次模多注速调管的矩形双间隙输出腔的研究. 电子与信息学报, 2003, 25(8): 1126-1129.
- [4] Yuan W J, Lin F M, and Wang H Y. Research on  $\pi$ -mode double gaps rectangle  $TM_{310}$  cavity. 5th Int. Conf. Micromave Millimeter Wave Technol. Proceedings, 2007 Guilin, China: 538-541.
- [5] 董玉和, 丁耀根, 肖刘. 同轴谐振腔高阶横磁模式参数的研究. 物理学报, 2005, 54(12): 5629-5436.
- [6] 张瑞, 王勇.  $TM_{610}$  高次模圆柱谐振腔的模拟研究. 强激光与粒子束, 2006, 18(7): 1129-1133.
- [7] 丁耀根, 朱允淑. 多注速调管高次模谐振腔的研究. 中国电子学会真空电子学分会第十届年会, 北京, 1995: 77-80.
- [8] 丁耀根, 彭钧. 多注速调管——一种新型大功率微波放大器. 电子科学学刊, 1996, 18(1): 64-71.
- [9] Gelvich E A and Zhery E V. A new generation of power klystrons on the base of multiple-beam design. IEEE MTT-S Digist, 1991: 1319-1320.
- [10] 王宏义, 林福民, 袁文蛟. 中央开耦合槽的矩形双间隙谐振腔中  $\pi$ -TM 高次模研究. 强激光与粒子束, 2008, 20(10): 1694-1698.
- [11] 林福民, 王志勇, 黄焕辉. 反射系数相位法计算谐振腔外观品质因数的局限性. 强激光与粒子束, 2005, 17(9): 1399-1404.
- [12] Lin Fu-min. Research on simulation computation of  $Q_{ext}$  of cavities, 2005 Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings, December, Suzhou, 2005: 189-192.
- [13] 林福民, 丁耀根, 刘铁山, 等. 宽带速调管滤波器加载输出腔间隙阻抗的频率特性的模拟计算方法. 电子与信息学报, 2003, 25(12): 1798-1804.
- [14] 林福民, 丁耀根, 张志强, 等. 速调管双间隙腔的间隙阻抗矩阵频率特性的模拟计算方法. 电子与信息学报, 2004, 26(9): 1480-1486.
- [15] 林福民, 丁耀根, 沈斌. 强耦合双间隙微波谐振腔的特性分析. 电子与信息学报, 2003, 25(7): 982-989.
- 王宏义: 男, 1982 年生, 硕士, 从事大功率微波器件研究.  
林福民: 男, 1964 年生, 博士, 教授, 从事大功率微波器件研究.