

基于圆柱谐振腔的高功率微波脉冲压缩系统*

方进勇^{1)2)†} 黄惠军²⁾ 张治强²⁾ 黄文华²⁾ 江伟华¹⁾

1) (清华大学电机工程与电子应用技术系, 北京 100084)

2) (西北核技术研究所, 西安 710024)

(2009年10月21日收到; 2010年6月29日收到修改稿)

提出了一种新型的基于圆柱谐振腔的高功率微波脉冲压缩系统, 介绍了该系统的结构形式, 给出了部分关键器件的数值模拟结果, 对系统的功率容量及品质因数进行了初步分析. 对于高功率微波 (HPM) 脉冲压缩系统来说, 系统的功率容量与最终获取的 HPM 功率大小密切相关, 谐振腔的固有品质因数与系统效率密不可分, 工程实践表明, 相对于基于矩形谐振腔的脉冲压缩系统, 本文设计的基于圆柱谐振腔的脉冲压缩系统功率容量可提高一个量级, 谐振腔的固有品质因数可提高 5 倍以上.

关键词: 高功率微波, 脉冲压缩, 谐振腔, 功率容量

PACS: 84.90.+a

1. 引言

高功率微波技术 (HPM) 是近年来得以快速发展的高新技术之一, 产生高功率微波的方法很多, 主要集中在相对论器件上, 例如相对论返波管、相对论速调管及虚阴极振荡器等^[1-7]. 脉冲压缩方法是当前采用非相对论器件产生 HPM 的主要方法之一, 其原理是将常规中大功率微波源产生的微秒级长脉冲压缩成纳秒级窄脉冲高功率微波, 由于常规中大功率微波源的能量利用效率可达 50% 左右, 而脉冲压缩系统的效率可达 40% 以上, 因此系统整体能量利用效率可以达到 15% 以上^[8-10]. 利用脉冲压缩方法获取 HPM 提出至今已有 20 余年的历史, 国内外多年的研究均集中在基于矩形谐振腔的脉冲压缩系统上, 但自从上世纪 90 年代中期报道获取了百 MW 的微波功率后, 近 10 年来, 国内外报道的获取的微波功率再难突破, 其原因是多方面的, 主要原因在于矩形谐振腔的功率容量有限, 另外, 矩形谐振腔的固有品质因数较低也制约了系统能量利用效率的进一步提高^[8-12], 国内外曾有人对基于 TE_{01} 模及 TE_{11} 模的圆柱谐振腔的脉冲压缩系统进行了探索^[13-15], 但均未见有较好的实验结果报道, 其主要原因是难以找到一种合适的结构形式将圆柱谐振腔的

高功率容量及高品质因数同时加以利用, 本文提出了一种新型的基于圆柱谐振腔的高功率微波脉冲压缩系统, 可以较好地将两者加以兼顾, 利用该系统, 有望获取 GW 量级或更高功率的微波脉冲.

2. 系统结构简介

脉冲压缩系统通常主要由四部分组成^[10-12], 即输入结构、谐振腔主体、输出结构及开关等. 外围装置包括初级微波源, 环形器, 传输波导及测量装置等. 近年来报道的两种典型的基于圆柱谐振腔的脉冲压缩系统如图 1 和图 2 所示^[13-15].

图 1, 图 2 所示的两套装置的储能腔主体均为圆柱腔, 图 1 系统的工作模式主体为 TE_{01} 模式, 图 2 系统的工作模式主体为 TE_{11} 模式, 相对于基于矩形谐振腔的脉冲压缩系统, 整个系统的品质因数均有较大提高, 但由于系统输出由矩形波导组成, 与单纯的圆柱腔相比, 系统固有品质因数仍有较大差距, 另外整个脉冲压缩系统的功率容量受矩形波导限制, 圆柱腔功率容量较大的优点并无法体现. 基于对以上系统的了解和认识, 本文提出了一种新型的基于圆柱谐振腔的脉冲压缩系统, 其结构如图 3 所示.

由图 3 可知, 该系统的输入结构为 TE_{10} 矩形波

* 国家高技术研究发展计划资助的课题.

† E-mail: f jy90@sina.com; f jy90@yahoo.com.cn

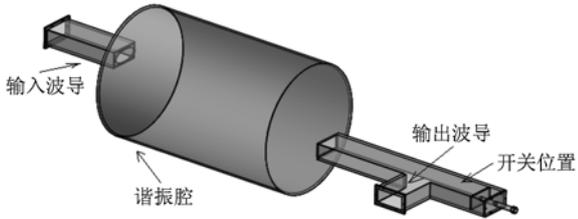


图1 一种工作于 TE_{01} 模式的基于圆柱谐振腔的 HPM 脉冲压缩装置示意图

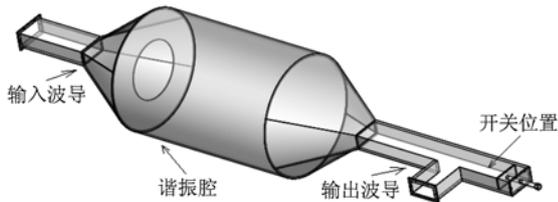


图2 一种工作于 TE_{11} 模式的基于圆柱谐振腔的 HPM 脉冲压缩装置示意图

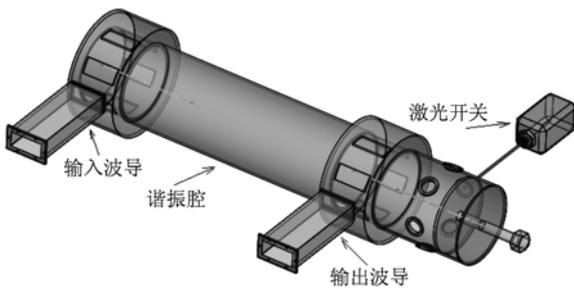


图3 一种完全基于圆柱谐振腔的 HPM 脉冲压缩装置示意图

导— TE_{01} 圆波导模式转换器, 储能装置为圆波导, 输出装置为 TE_{01} 圆波导— TE_{10} 矩形波导模式转换器, 开关为壁四周对称开六小孔的带可调短路活塞的

圆波导. 事实上输入结构与输出结构所使用的模式转换器结构是相同的, 只不过是前者将矩形波导中的 TE_{10} 模式转换成圆波导中的 TE_{01} 模式进行能量存储, 后者则为前者的逆应用, 其作用是将储能谐振腔存储在圆波导中的 TE_{01} 模式微波转换成矩形波导 TE_{10} 模式进行能量释放, 如果该模式转换器具有较高的转换效率, 则从理论上讲整个脉冲压缩系统将具有较高的输入效率及输出效率, 该模式转换器的基本结构如图 4 所示, 数值模拟表明, 该器件的转换效率可达 96% 以上, 图 5 是我们设计的 X 波段矩形波导 TE_{10} 模至圆波导 TE_{01} 模式转换器的转换效率随微波频率的变化曲线, 可见该器件在较宽频带范围内均保持着较高的转换效率.

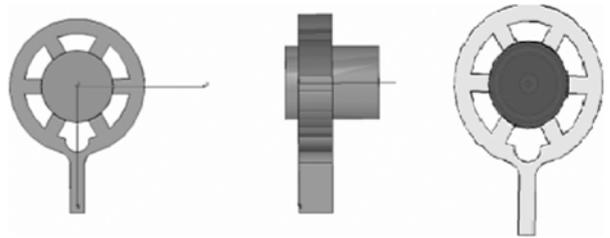


图4 矩形波导 TE_{10} 模至圆波导 TE_{01} 模式转换器结构及场分布示意图

如前所述, 整个脉冲压缩系统的四个主要部分均由圆波导构成, 因此系统的功率容量将仅由圆波导尺寸决定, 同时系统的固有品质因数也将会有一个较大提升.

3. 系统功率容量及固有品质因数简析

这里不对本文提出的基于圆柱谐振腔的脉冲

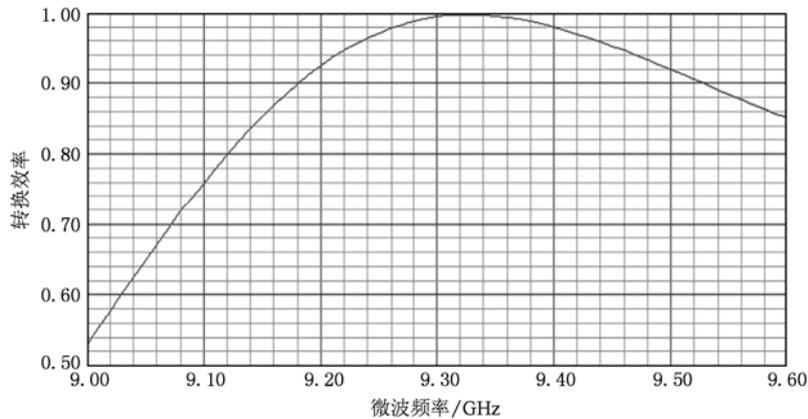


图5 X 波段矩形波导 TE_{10} 模至圆波导 TE_{01} 模式转换器的转换效率随微波频率变化曲线

压缩系统的具体功率容量及损耗进行量化分析,与基于矩形谐振腔的脉冲压缩系统相比,系统的功率容量及固有品质因数将有一个较大提高,提高的幅度由具体系统的结构形式而定,可以举例进行相对较为粗略的分析. 例如条件为微波频率工作于 2.860 GHz, 希望得到输出脉冲宽度为 10 ns 的 HPM 脉冲, 如果以基于矩形波导的脉冲压缩系统来实现, 则通常选用 BJ32 的标准波导, 谐振腔的长约为 1.0 m, 宽为 74.14 mm, 高为 34.04 mm; 如果选择基于圆柱谐振腔为主体的脉冲压缩装置, 则首先要确定谐振腔的半径, 其半径要和矩形波导 TE₁₀ 模至圆波导 TE₀₁ 模式转换器的半径相当, 当微波频率确定后则模式转换器在保持较高效率时圆波导的半径选择范围也将确定, 对于微波工作频率 2.860 GHz, 选择圆波导的半径 r 约为 80 mm 可使模式转换器的

效率达到 96% 以上, 圆波导半径确定后, 谐振腔的导波波长也将确定, 根据输出脉冲宽度的要求可进一步确定谐振腔的长度, 通过计算可知如果输出脉冲宽度为 10 ns, 则谐振腔的长度约为 0.9 m. 对于矩形谐振腔, 其工作模式为 TE₁₀ 模式, 最大场强处于宽边的中间位置, 最大距离 d_1 为 34.04 mm; 对于圆柱谐振腔, 其工作模式为 TE₀₁ 模式, 最大场强处于半径的 0.48 倍处, 最大距离 $d_2 = \pi \times 2 \times 0.48r$, 约为 241.1 mm; 工作模式为 TE₁₀ 模式的矩形谐振腔及工作模式为 TE₀₁ 模式的圆柱谐振腔横向切面电场分布如图 6 所示, 由图可知, 后者场强的最大容许距离为前者的 8 倍, 如果谐振腔内气体成份相同且气压相同, 则气体的击穿阈值相同, 因此后者的功率容量理论上应该为前者的 64 倍, 即功率容量提高了一个量级以上.

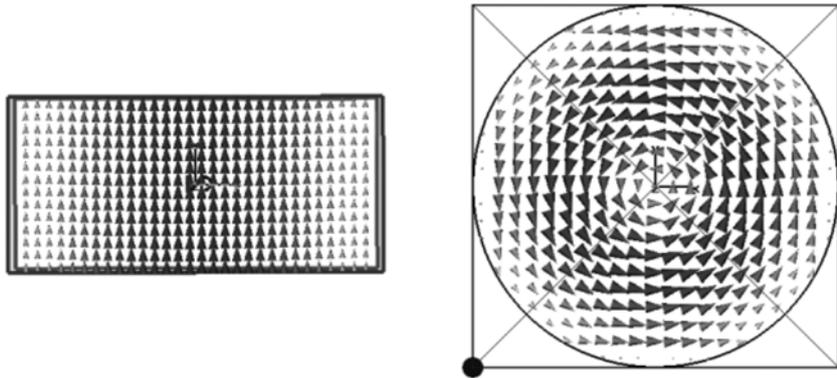


图 6 工作模式为 TE₁₀ 模式的矩形谐振腔及工作模式为 TE₀₁ 模式的圆柱谐振腔横向切面电场分布图

下面对两类谐振腔的固有品质因数进行一个粗略比对. 对于微波波导谐振腔, 如果腔体内填充介质是近似无耗的, 则其固有品质因数可以由下式求取^[16]:

$$Q_c = 2\pi f_0 \frac{W}{P_c}, \quad (1)$$

式中 f_0 为谐振腔工作频率; W 为谐振腔平均存储能量, 其大小与谐振腔的腔体体积 V 成正比; P_c 为谐振腔单位时间内损耗的能量, 即损耗功率, 其主要由于腔体壁电阻引起的损耗, 其大小与谐振腔的内表面积 S 成反比. 由此可知, Q_c 正比于 V/S .

还是以以上两个谐振腔为例, 它们的工作频率相同. 对于基于矩形谐振腔的脉冲压缩装置, 其腔体体积与内表面积之比约为 11.5; 对于基于圆柱谐振腔的脉冲压缩装置, 其腔体体积与内表面积之比

约为 40; 可以看到, 后者约为前者的 3.5 倍, 如果谐振腔壁损耗效率一致, 则后者的固有品质因数相对于前者应提高 3 倍左右, 另外谐振腔的工作模式对固有品质因数有较大的影响, 我们选择的圆柱谐振腔的工作模式为 TE₀₁ 模, 其在腔体内壁上没有轴向电流, 内壁损耗相对于工作于主模 TE₁₀ 模的矩形谐振腔为小, 因此理论上讲后者的固有品质因数还应当更高. 精确的数据还应以实际测量为准.

4. 初步实验结果

根据设计原则及结构要求, 我们设计加工了两套基于圆柱谐振腔的脉冲压缩装置, 分别工作于 X 波段及 S 波段, 如图 7 所示.

X 波段谐振腔的固有品质因数约为 2 万, S 波

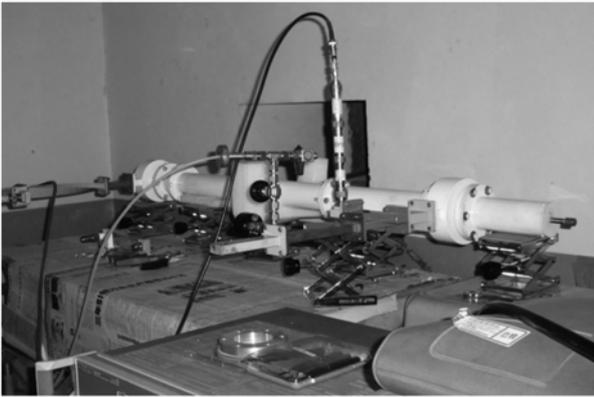


图7 基于圆柱型谐振腔的脉冲压缩装置

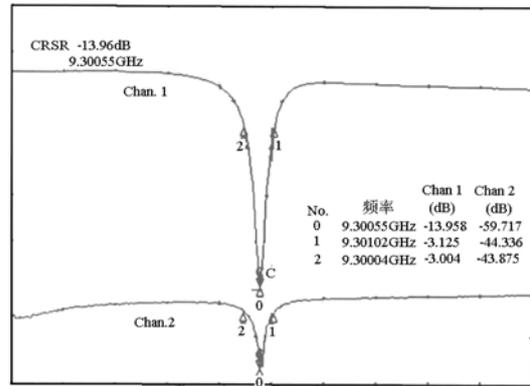
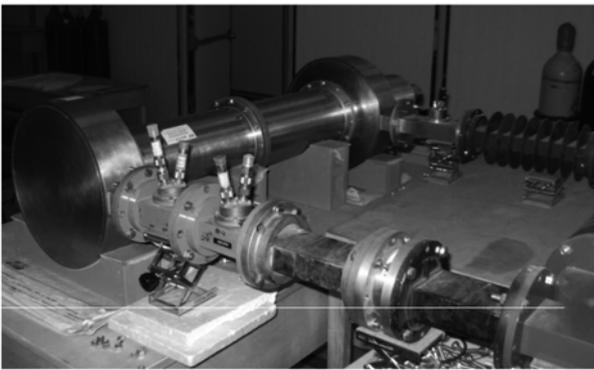


图8 X波段谐振腔固有品质因数测试图

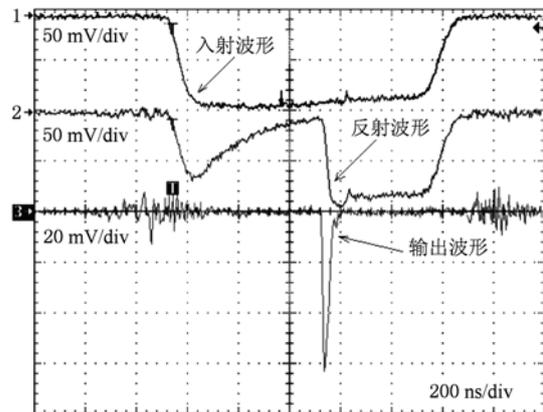


图9 X波段基于圆柱谐振腔脉冲压缩系统获取的典型实验波形

段谐振腔的固有品质因数约为5万,与能够提供相同输出脉冲宽度的矩形谐振腔相比提高了约5—7倍^[8—12],X波段谐振腔固有品质因数测试如图8所示,通道1数据为谐振腔输入反射功率 P_r 与入射功率 P_i 之比,通道2数据为谐振腔输出口泄漏功率 P_l 与输入功率 P_i 之比,实际上是通过测量谐振腔的工作带宽的方法来确定谐振腔的固有品质因数.在X波段的验证性实验中,微波频率9.3 GHz,系统输入功率450 kW,脉冲宽度1 μ s,获得的输出脉冲功率5—7 mW,脉冲宽度10 ns,功率增益10—16倍,能量效率大于10%,实验结果部分优于国际报道的最好结果^[13—15].实验波形如图9所示.

图9中示波器1通道为入射波形,2通道为反射波形,3通道为获取的窄脉冲,从图中可以看到,对应于入射波形,输出波形在输入脉冲宽度为0.5 μ s左右出现,说明开关击穿在此时发生,因此,如果能够进一步提高谐振腔的功率容量,使开关击穿尽量靠后,即达到谐振腔储能最大值,则系统能量利用效率还有较大的提升空间.S波段利用基于圆柱谐振腔的脉冲压缩系统获取HPM的实验正在进行

中,初步得到了400 mW的微波功率输出,我们的目标是利用该类装置在S波段获取1GW以上的HPM输出.

5. 结 论

本文提出了一种新型的基于圆柱谐振腔的脉冲压缩系统,建立系统的目的是将脉冲压缩系统的功率容量在S及S以下频段由百mW量级提高到GW量级,并进一步减小系统损耗,进而提高系统效率获取更高功率的HPM脉冲.初步实验表明,该系统在实践上是可行的,当前实验采用的开关为自击穿开关,下一步的工作是将激光触发开关引入应用,如果能够较好地解决开关问题,则利用该系统有可能获取GW级以上功率的微波脉冲,使HPM脉冲压缩技术成为未来获取HPM的一种有效技术途径.

- [1] Fan Z K, Luo X M, Fan B, Zhang Y J 2008 *Chin. Phys. B* **17** 975
- [2] Xiao R Z, Liu G Z, Chen C H 2008 *Chin. Phys. B* **17** 3807
- [3] Huang H, Gan Y Q, Lei L R, Jin X, Ju B Q, Xiang F, Feng D C, Liu Z 2008, *Acta Phys. Sin.* **57** 1765 (in Chinese) [黄华、甘延青、雷禄容、金晓、鞠炳权、向飞、冯弟超、刘忠 2008 物理学报 **57** 1765]
- [4] Li Z H, Chang A B, Ju B Q, Xiang F, Zhao D L, Gan Y Q, Liu Z, Su C, Huang H 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 2603 (in Chinese) [李正红、常安碧、鞠炳权、向飞、赵殿林、甘延青、刘忠、苏昶、黄华 2007 物理学报 **56** 2603]
- [5] Luo X, Liao C, Meng F B, Zhang Y J 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5774 (in Chinese) [罗雄、廖成、孟凡宝、张运俭 2006 物理学报 **55** 5774]
- [6] Shao H, Liu G Z 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 2387 (in Chinese) [邵浩、刘国治 2001 物理学报 **50** 2387]
- [7] Chao A W, Tigner M 1998 *Handbook of accelerator physics and engineering* (World Scientific Publishing Co. Ltd., Singapore) pp374—378
- [8] Alvarez R A, Byrne D P, Johoson R M 1986 *Rev. Sci. Instrum.* **57** 2475
- [9] Alvarez R A 1986 *Rev. Sci. Instrum.* **57** 2481
- [10] Ning H, Fang J Y, Li P, Liu J Y, Liu G Z, Xiao L L, Tong D C, Lin Y Z 2001 *High Power Laser and Particle Beams* **13** 471 (in Chinese) [宁辉、方进勇、李平、刘静月、刘国治、肖利苓、童德春、林郁正 2001 强激光与粒子束 **13** 471]
- [11] Fang J Y 1997 (Northwest Institute of nuclear Technology (Xi'an)) p10 (in Chinese) [方进勇 1997 (西北核技术研究所(西安))第10页]
- [12] Zhang Z Q, Fang J Y, Hao W X, Qiu S, Nin H 2006 *High Power Laser and Particle Beams* **18** 330 (in Chinese) [张治强、方进勇、郝文析、秋实、宁辉 2006 强激光与粒子束 **18** 330]
- [13] Xie S L 2005 (CEPA(Mianyang)) p5 (in Chinese) [谢苏隆 2005 (中国工程物理研究院)(绵阳)第5页]
- [14] Vikharev A L, Gorbachev A M, Ivanov O A 1998 *Technical Physics Letters* **24** 791
- [15] Vikharev A L, Ivanov O A, Gorbachev A M, Isaev V A, Kuzikov S V, Gold S H, Kinkead A K, Nezhevenko O A, Hirshfield J L *Proceedings of the 2003 particle accelerator conference* pp1147—1149
- [16] David M P 2006 *Microwave Engineering, Third Edition.* (Beijing: Publishing House of Electronic Industry) [Pozar 著、张肇仪等译 2006 微波工程(第三版)(北京:电子工业出版社)第229—245页]

High power microwave pulse compression system based on cylindrical resonant cavity*

Fang Jin-Yong^{1)2)†} Huang Hui-Jun²⁾ Zang Zhi-Qiang²⁾ Huang Wen-Hua²⁾ Jiang Wei-Hua¹⁾

1) (*Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

2) (*Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China*)

(Received 21 October 2009; revised manuscript received 29 June 2010)

Abstract

High power microwave (HPM) pulse compression is a main method to obtain high power microwave with non-relativistic devices. The mature HPM pulse compression systems are nearly all based on rectangular resonant cavity, and the pulse compression systems based on cylindrical resonant cavity are in progress. A new type pulse compression system based on cylindrical resonant cavity is proposed in this paper, and the structure of the system is different from those of all other HPM pulse compression systems ever reported. The structure and the numerical simulation results of the key parts are presented, and a preliminary analysis of the power capability of the system and the quality factor of the resonant cavity is also given. For a pulse compression system, the power capacity is a key factor for the output microwave pulse power, and the quality factor of the resonant cavity has a close relationship with the system energy efficiency. According to the experimental results, the pulse capacity of the pulse compression system based on cylindrical resonant cavity can be 10 times higher than that of the systems based on the rectangular resonant cavity, and the quality factor of the resonant cavity can be improved by a factor of 5.

Keywords: HPM, pulse compression, resonant cavity, power capacity

PACS: 84.90.+a

* Project supported by the National High Technology Development Program of China.

† E-mail: f jy90@sina.com