

文章编号: 1001-4322(2010)04-0849-04

能量倍增器法微波脉冲压缩*

沈旭明, 张 鹏, 和天慧

(中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 为了开展 S 波段能量倍增器脉冲压缩实验,对能量倍增器进行了冷测和热测工作,主要包括对能量倍增器的指标、参数的测量以及在高功率下对能量倍增器的输出功率、功率增益等参数的测量。实验中,完成了微波固态源系统的改造,研制了同步信号控制器,研究了输入输出脉冲宽度对输出峰值功率的影响,并对实验中可能的射频击穿问题进行了研究。在输入功率 5 MW 时,得到了功率增益 7.122,输出脉宽 260 ns,输出峰值功率 35.35 MW。

关键词: 射频脉冲压缩器; 能量倍增器; 功率增益; 高功率微波

中图分类号: TL506 **文献标志码:** A **doi:**10.3788/HPLPB20102204.0849

射频(RF)脉冲压缩器是将低功率长脉冲变换为高功率短脉冲的一种微波网络^[1-3]。其重要性在于:可以提供现有功率源技术不能得到的高幅度射频脉冲,同时降低初级波源系统的运行要求以及减少其维护工作。能量倍增器(SLED)作为最早成功应用于加速器的射频脉冲压缩器,是各种射频脉冲压缩技术的基础^[4]。但两方面的原因限制了它的内在效率:一是能量倍增器在充电时间内不能完全吸收功率源所传输来的功率,其中一部分被储能腔所反射;二是在反相以后的压缩脉冲内,储能腔的能量没有完全释放出来,在压缩脉冲以后仍有部分能量从腔内释放,这是由于其耦合系数是固定的,也是反射式射频脉冲压缩器的固有缺陷,因此在 t_1 相位翻转时刻后输出功率迅速衰减,两腔的辐射波也以指数形式衰减为 0。但使用能量倍增器作为初级波源的功率放大器,对于获得更高功率的微波脉冲也是一种很好的方法^[5-6]。本文在前一段实验的基础上,通过对实验数据的分析,总结实验,对实验装置以及实验的技术方案进行了相应改进,以有利于能量倍增器效力的发挥。

1 能量倍增器实验装置

能量倍增器的实验系统如图 1 所示,在微波信号源输出微波后,经过固态源的两级功率放大器,驱动速调管工作,微波脉冲输入到能量倍增器中,在脉冲信号源以及相位翻转(PSK)开关的作用下,实现能量倍增器储能泄放时刻输入脉冲的反相,得到 5 倍于输入功率的输出脉冲功率。

1.1 PSK 开关

实验基于如图 2 所示的双频混频方法,当脉冲作用点落在 2 856 MHz 调制脉冲以内时,应当可以看到相位翻转的波形。但在测试的过程中,PSK 开关出现了无法实现相位翻转的现象,翻转脉冲明显不在脉冲范围之内,且通过延时无法调节至合适的位置。而 PSK 开关的调节器的输入输出阻抗经测量均属正常,且它的激励电压也没有发生明显变化,经分析认为由于调制电压过大引起的调制信号与微波信号相串,因此无法实现脉冲范围内的相位翻转。更换模块后,恢复正常。

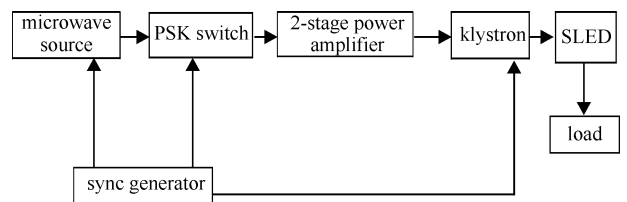


Fig. 1 Schematic of SLED experiment

图 1 能量倍增器实验系统图

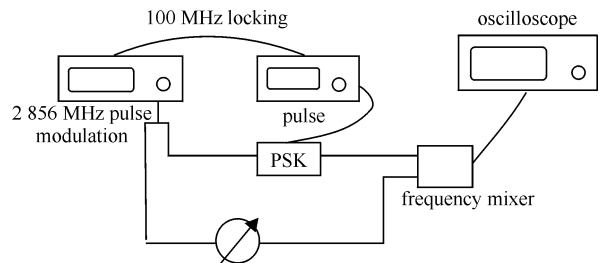


Fig. 2 Test Schematic of PSK's phase inverse

图 2 相位翻转测试框图

* 收稿日期:2009-11-06; 修订日期:2010-03-04

基金项目:国家高技术发展计划项目

作者简介:沈旭明(1972—),男,硕士,主要从事电真空器件、微波技术以及高功率微波脉冲压缩的研究工作;sunrise-shen@caep.ac.cn。

1.2 调制器的优化

以前微波源使用的调制器的脉冲宽(FWHM)为 $11\ \mu\text{s}$ (如图 3(a)所示),如此宽的脉冲限制了速调管的微波功率的输出,根据速调管的使用要求,通过减小调制器脉冲形成线(PFN)的节数,脉冲宽度减小到约 $7\ \mu\text{s}$ (如图 3(b)所示),提高了微波源的输出功率。

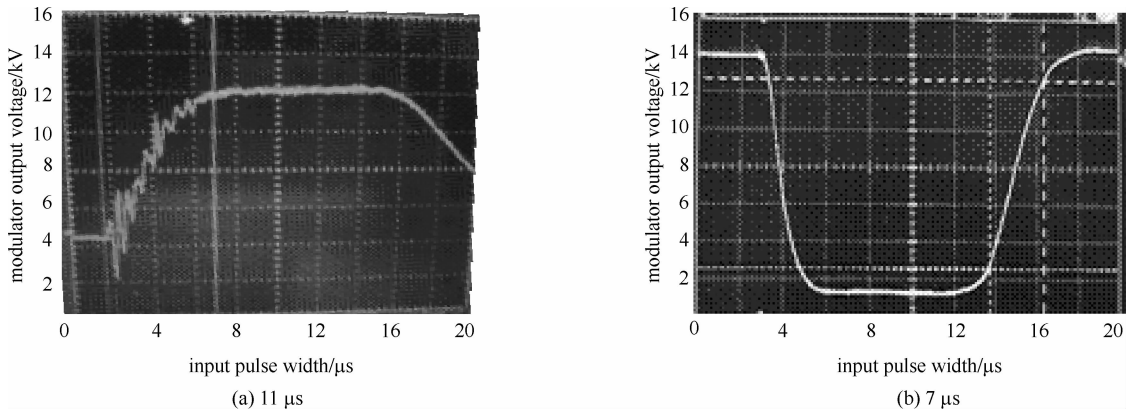


Fig. 3 Wave of output power at different input pulse width

图 3 不同宽度的脉冲输出波形

采用三路触发器抗干扰能力差,采用同轴电缆输入到微波放大器和调制器的触发信号相对抖动比较大,输出的微波功率不稳定。我们研制了新路同步触发器。在触发器的设计中,采用标准硬件描述语言(VHDL)来设计、并利用现场可编程门阵列(FPGA)实现。我们对 FPGA 输出信号进行了光纤隔离传输和放大处理,光纤隔离的好处是能够抗空间电磁干扰。采用新触发器后,微波放大器和调制器的输入触发信号相对抖动控制到 $100\ \text{ns}$ 以下,提高了输出微波功率的稳定性,如图 4 所示。

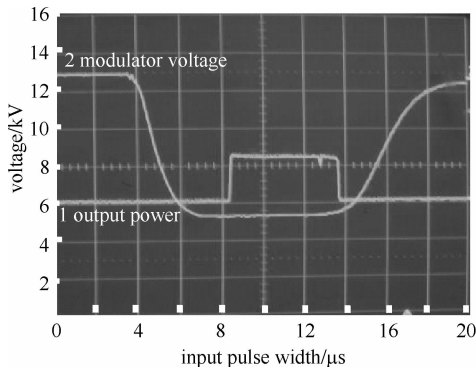


Fig. 4 Output wave of new trigger

图 4 采用新的触发器后的输出波形

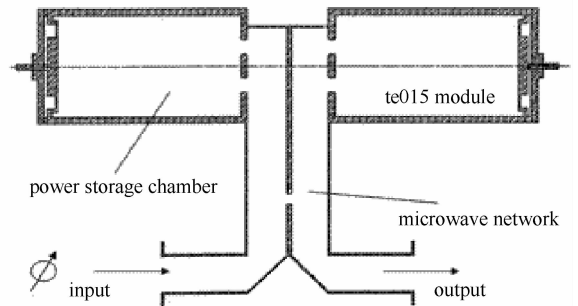


Fig. 5 Schematic of SLED

图 5 能量倍增器结构框图

2 能量倍增器法关键技术研究

2.1 能量倍增器工作原理

能量倍增器工作原理简述如下:两谐振腔参数完全相同,速调管的入射波平均地分配到两个腔,两腔内的场开始建立起来并从耦合孔处向外辐射功率越来越大的脉冲。这两个辐射波在输出端口合成,而在输入端口处则互相抵消。当速调管工作脉冲剩下一个填充时间时,利用移相器使输入脉冲反相,入射波与合成波同相叠加,可以得到远高于输入脉冲幅度的高功率微波脉冲,这时输出脉冲的宽度变窄而功率增加,如图 5 所示。

经理论计算得到的场强输出波形以及功率输出波形如图 6 和图 7 所示。图中, E_{in} 为输入电场强度, E_{out} 为输出电场强度, E_c 为地电位, P_{out} 为输出功率, P_{in} 为输入功率。

2.2 抗射频击穿能力

在输出高功率微波的情况下,射频击穿问题曾限制了微波脉冲压缩技术的发展。可以采用将腔的内表面做特殊处理,将腔内的气体净化,或者对压缩系统的电路进行特殊设计等方法来提高腔体的抗击穿能力。一般的腔体储能密度在电场 $100\ \text{kV}/\text{cm}$ 时约为 $1\ \text{kJ}/\text{m}^3$ 。在输出功率达到 $1\ \text{GW}$ 时,标准波导内相应的电场强度将达到 $300\sim 1\ 000\ \text{kV}/\text{m}$ 。为了提高能量倍增器实验装置的抗击穿能力,在能量倍增器两端加陶瓷窗隔离,对

其抽高真空。经过一段时间的微波功率烘烤以及排气后,真空度从实验初期的 10^{-5} Pa 提升到 10^{-6} Pa。

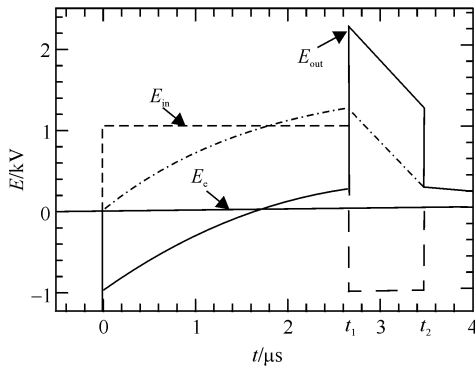


Fig. 6 Wave of SLED's electric field

图 6 SLED 场强波形

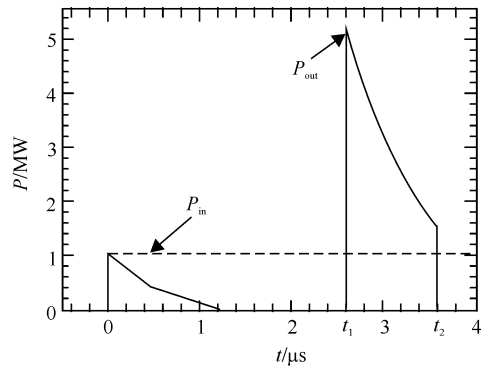


Fig. 7 Wave of SLED's output power

图 7 SLED 输出功率波形

3 能量倍增器法实验

3.1 输入脉冲宽度变化的影响

不同的输入脉冲宽度和输出脉冲宽度对压缩的输出微波功率峰值有较大的影响,为了得到最佳的输出,在实验过程中,不断改变输入、输出脉冲宽度,得到的输出峰值功率值如表 1 所示。

表 1 不同输入脉宽以及功率下的输出脉宽及功率表

Table 1 The output power at different input and output pulse width

output pulse width/ns	output power/MW				input power/kW			
	6 μ s	5 μ s	4 μ s	3 μ s	6 μ s	5 μ s	4 μ s	3.5 μ s
150	2.182	2.643	2.578	—	411.6	427.2	423.8	—
250	2.376	2.516	2.446	—	416.6	422.2	413.4	—
300	—	2.481	2.284	2.206	—	423.6	412.4	434.7
400	—	2.598	2.224	—	—	425.0	416.2	—

从表 1 中可以看出,在相同的输入脉宽下,PSK 开关相位翻转时刻的不同引起了输出脉宽的不同,而输出脉宽越窄,输出脉冲的峰值功率越高。通过大量的实验数据可知,能量倍增器的最优输入脉冲宽度应选在 4 μ s。

实验中,在输入脉宽为 4 μ s 下,输入功率 5.305 MW,输出脉冲 250 ns 时,我们得到了 35.35 MW 的输出脉冲,如图 8 所示。

3.2 谐振腔的失谐以及调谐情况

研究谐振腔的失谐情况对实际应用中能量倍增器谐振腔的调谐有着重要的意义。如图 9 所示,当频率偏离 10 kHz 时,输出波形幅度变低,波形发生畸变。

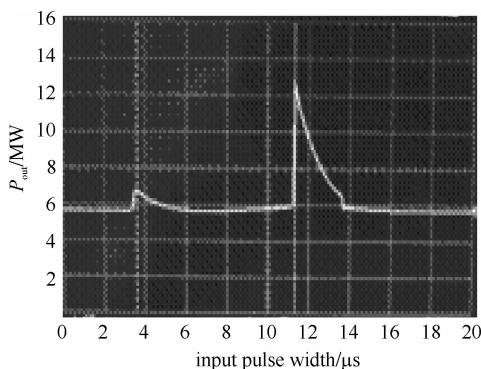


Fig. 8 Output pulse waveform at 35.35 MW

图 8 35.35 MW 输出脉冲波形

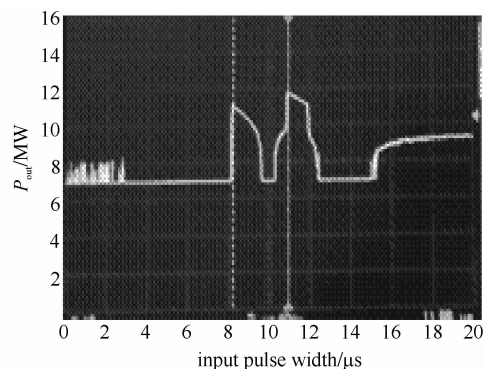


Fig. 9 Output waveform at disarrangement of two resonant cavities

图 9 两谐振腔偏离微波频率时的输出波形

对能量倍增器的谐振腔进行调谐,使两腔工作在同一频率上。向能量倍增器中输入一定宽度的微波脉冲,对其输出检波后,在示波器上观察其波形,在两个腔处于同一谐振频率时,两个波峰之间的波谷应能下降到基线位置。如果两个谐振腔谐振频率相差较大,则两个谐振腔将输入微波全部反射,在示波器上观察到的是一个

方波。根据这一原则,对两个谐振腔进行仔细调谐,得到谐振时的波形如图 10 所示。

4 结 论

能量倍增器自问世以来,即受到了广泛的关注。但两方面的原因限制了 SLED 的内在效率,使用能量倍增器作为初级波源的功率放大器,对于获得更高功率的微波脉冲也是一种很好的方法。它为小型化高功率波源系统的建立打下了坚实的基础。通过研究测量能量倍增器在高功率下的输出功率、功率增益等参数,得到本能量倍增器最佳输入脉冲宽度为 $4 \mu\text{s}$ 下,在输入功率 5.305 MW , 输出脉冲宽度为 250 ns 时,我们得到了 35.35 MW 峰值功率。

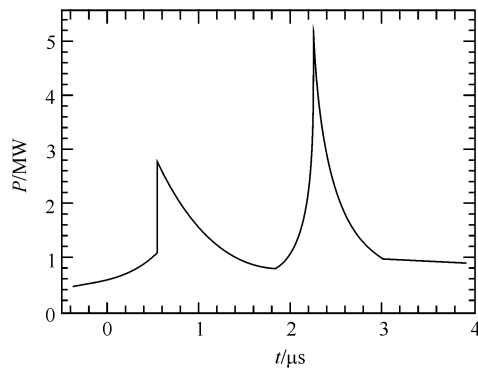


Fig. 10 Wave of two resonant cavities

图 10 两腔谐振时的波形

参考文献:

- [1] Farkas Z D, Hogg H A. SLED: A method of doubling SLAC's energy[C]//The 9th International Conference on High Energy Accelerators, 1974;SLAC-PUB-1453.
- [2] 李广林,颜斌山. 电子直线加速器的能量倍增器[J]. 原子能科学技术,1985,26(6):690-695. (Li Guanglin, Yan Binshan. SLED on electronic linac accelerator. *Atomic Energy Science and Technology*,1985,26(6):690-695)
- [3] 赵凤利,赵延坪,刘晋通. 一种新型的能量倍增器解调谐系统[J]. 高能物理与核物理,2004,28(11):1227-1230. (Zhao Fengli, Zhao Yanping, Liu Jintong. A new SLED demodulating system. *High Power Physics and Nuclear Physics*,2004,28(11):1227-1230)
- [4] 任文彬,李广林. 能量倍增器[J]. 高能物理与核物理,1985,9(5):313-317. (Ren Wenbin, Li Guanglin. Energy multiplier. *High Power Physics and Nuclear Physics*,1985,9(5):313-317)
- [5] Benford J. 高功率微波[M]. 成都:电子科技大学出版社,1996. (Benford J. High power microwave. Chengdu: Electronic Science and Technology University Press,1996)
- [6] 顾鹏达. 新型 RF 脉冲压缩器研究[D]. 北京:中国科学院,1999. (Gu Pengda. Research on a new style RF pulse compressor. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 1999)

High power microwave pulse compression of energy doublers

Shen Xuming, Zhang Peng, He Tianhui

(Institute of Applied Electronics CAEP, P. O. Box 919-1014, Mianyang 621900, China)

Abstract: In the S-band Stanford linear accelerator center energy doublers(SLED) compression experiment, the SLED was measured in low power and high power, including its parameters, output power and power amplification. In the experiment, the microwave source system was modified and a synchronizing signal generator was developed. The influence of the input power width upon the output power and the RF breakdown in the experiment were also studied. When the input power was 5 MW , a power amplification of 7.122 at 260 ns and a peak power of 35.35 MW were acquired.

Key words: RF pulse compression; energy doublers; power amplification; high power microwave