

文章编号 : 1672-2892(2010)01-0053-05

## 高功率微波脉冲压缩的能量倍增器

张 鹏 , 和天慧 , 沈旭明

(中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘 要 :** 为了实现高功率微波初级波源的小型化, 获得更高功率的输出微波脉冲, 研制了用于高功率微波脉冲压缩的能量倍增器。利用了快速反转开关, 实现了功率的瞬时放大。实验结果表明在输入微波功率达到 5.3 MW 时, 输出脉冲功率可以达到 35 MW, 输出峰值功率增益达到 7 dB。在此基础上对 PM-AM 技术进行了研究, 并通过该技术获得了平顶的输出微波脉冲, 以满足不同实验对初级波源的需求。

**关键词 :** RF 脉冲压缩器 ; 能量倍增器 ; 功率增益 ; PM-AM 技术

**中图分类号 :** TN015

**文献标识码 :** A

## Energy doubler for high power microwave pulse compression

ZHANG Peng , HE Tian-hui , SHEN Xu-ming

(Institute of Applied Electronics , China Academy of Engineering Physics , Mianyang Sichuan 621900 , China)

**Abstract:** The Energy doubler for HPM pulse compression was developed to implement miniaturized source of high power microwave. Using the Phase Shift Keying(PSK) switch, output power, which was higher than input power, could be obtained. It could output 35 MW when the input of peak power was 5.3 MW. The power gain could reach 7dB. In order to obtain the straight top waveform, some researches were done on the technology of PM-AM. These results can satisfy the requirements of miniaturized sources of high power microwave in different experiments.

**Key words:** RF pulse compressor ; SLAC energy doubler ; power gain ; PM-AM

能量倍增器作为最早成功应用于加速器的 RF 脉冲压缩器, 是各种 RF 脉冲压缩技术的基础, 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。能量倍增器自问世以来, 即受到了广泛的关注<sup>[1]</sup>。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出来<sup>[2]</sup>。耦合系数固定是反射式 RF 脉冲压缩器的固有缺陷, 因此在开关触发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零。这为小型化高功率波源系统的建立打下了坚实的基础。

### 1 能量倍增器工作原理介绍

能量倍增器是 SLAC Energy Doubler(SLED)的简称。此项技术最早被 SLAC(Stanford Linear Accelerated Center)应用在其电子直线加速器上。而能量倍增器在高功率微波压缩系统中的位置如图 1 所示, 倍增器的 2 个腔是相同的, 并处于调谐状态。在此方法中, 利用速调管源提供给 2 个高 Q 腔微波能量, 通过速调管脉冲的相位倒向来触发释放储能腔的能量。在射频脉冲输入后, 2 个腔内的场开始建立并从耦合孔处向外辐射功率越来越大的脉冲。这 2 个辐射波在输出端口合成, 而在输入端口处则相互抵消。另外在射频输入结束前, 利用 PSK 开关使输入到能量倍增器的脉冲反相, 在相位反转的瞬间辐射波的相位还来不及变化, 直接入射波就跟合成波同相叠加。在射频输入关闭后, 直接入射波归零, 而辐射波也迅速以指数形式衰

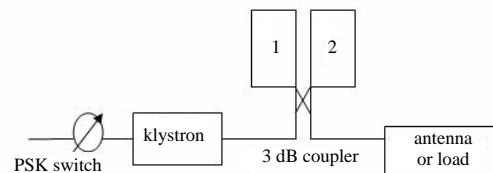


Fig.1 Schematic drawing of HPM pulse compression with SLED  
图 1 微波脉冲压缩系统框图

减为零。

能量倍增器由储能腔、微波网路及倒相开关组成，其结构如图 2 所示。

为了详细研究能量倍增器的工作原理，有必要研究单腔的波反射以及储能情况。根据能量守恒，可得到如下的功率平衡方程<sup>[3]</sup>：

$$P_{in} = P_{out} + P_c + \frac{dW_c}{dt} \quad (1)$$

式中： $P_{in}$  表示输入功率； $P_{out}$  表示输出功率； $P_c$  表示谐振腔腔壁所消耗的功率； $W_c$  为腔内储能。设  $k$  为外波导中场强度与功率之间的比例常数， $P_e$  表示腔体辐射功率，则有： $P_{in} = kE_{in}^2$ ， $P_{out} = k(E_c + RE_{in})^2$ ， $P_e = kE_e^2$ 。

$$\text{由 } \beta = \frac{Q_0}{Q_e} = \frac{P_c}{\frac{\omega W_c}{P_e}} = \frac{P_e}{P_c} \text{，可得：} P_c = \frac{P_e}{\beta} = \frac{kE_e^2}{\beta} \text{，而 } W_c = \frac{Q_0}{\omega} P_c = \frac{Q_0}{\omega} \frac{kE_e^2}{\beta} \text{，可得：} \frac{dW_c}{dt} = \frac{2kQ_0}{\omega\beta} E_e \frac{dE_e}{dt} \text{。} t=0 \text{ 时，即}$$

输入脉冲刚刚到达谐振腔耦合孔时， $W_c, E_e$  均为 0。其中， $\beta$  表示耦合系数； $E_e$  表示二次辐射的电场能量； $E_{in}$  表示输入的电场能量； $Q_0$  表示谐振腔的固有品质因数； $\omega$  表示角频率。

将以上各式代入功率平衡方程，可得  $|R|=1$ 。再次将以上各式代入式(1)，可得：

$$E_{in}^2 = (E_c - E_{in})^2 + \frac{E_e^2}{\beta} + \frac{2Q_0}{\omega\beta} E_e \frac{dE_e}{dt} \quad (2)$$

将式(2)化简后得到一阶非齐次微分方程：

$$T_c \frac{dE_e}{dt} + E_e = \alpha E_{in} \quad (3)$$

式中： $T_c = \frac{2Q_0}{(1+\beta)\omega}$ ； $\alpha = \frac{2\beta}{(1+\beta)}$ 。式(3)是 SLED 工作的基本微分方程。从式(3)可求得：

$$\frac{E_e}{E_{in}} = \begin{cases} \alpha(1 - e^{-t/T_c}) & t < t_1 \\ \alpha \left[ \left( 2 - e^{-t_1/T_c} \right) e^{-(t-t_1)/T_c} - 1 \right] & t_1 < t < t_2 \\ \alpha \left[ \left( 2 - e^{-t_1/T_c} \right) e^{-(t_2-t_1)/T_c} - 1 \right] e^{-(t-t_2)/T_c} & t > t_2 \end{cases} \quad (4)$$

而  $E_{out}$  就是  $E_c$  和  $-E_{in}$  的叠加，从而推得其波形也如图 3 中所示。从而推得能量倍增器的输出功率波形如图 4 所示，从中可以看出在  $t_1$  时刻  $E_{out}$  达到最大值：

$$E_{max} = E_{out}(t_1) = \left[ \alpha(1 - e^{-t_1/T_c}) + 1 \right] E_{in}$$

取  $\beta \gg 1$ ， $t_1 \gg T_c$ ，极限峰值场增益为 3 dB，峰值功率增益可达到 9 dB<sup>[4]</sup>。但在实际上，由于  $Q_0\beta$  以及  $t_1$  的有限值，可能得到的峰值功率增益在 6 dB~8 dB 之间。

## 2 能量倍增器参数选择

由式(4)可以推导出在理想状况下极限的场强增益为 3 dB。考虑到  $T_c(1+\beta) = 2Q_0/\omega$ ，在固有品质因数不会无

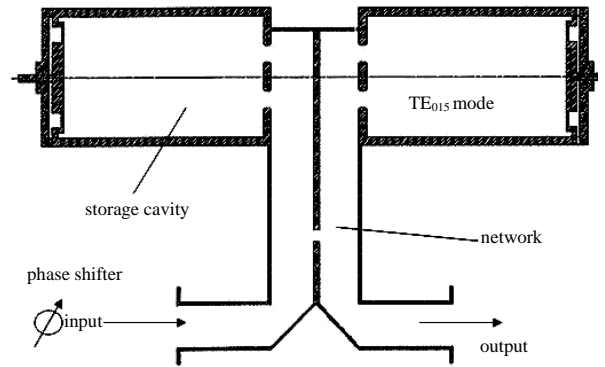


Fig.2 Schematic diagram of SLED  
图 2 能量倍增器结构框图

限大的情况下不可能得到一个很大的储能时间和很大的耦合系数。腔体的固有品质因数可以达到  $10^5$ ，而射频脉冲的宽度则受初级波源的限制，工作在  $5 \mu\text{s}$  完全是可行的。图 5 表示的是增益随输入耦合系数的变化关系。可以看出  $\beta$  在 4~5 之间时场强增益最大；图 6 表示的是在不同输入脉宽下场强增益随固有品质因数的变化规律；图 7 表示的是不同品质因数下场强增益随输入脉宽的变化情况，从图 7 中可以看出，输入脉冲越宽，品质因数越大，获得的场强增益就越大。

经过大量的实验以及分析计算，对于能量倍增器的最优参数应为  $Q_0 = 10^5$ ， $t_2 = 5 \mu\text{s}$ ， $\beta$  约为 4.5。在此情况下，场强随时间的变化曲线如图 3 所示，明显可以看出脉冲压缩的效果。

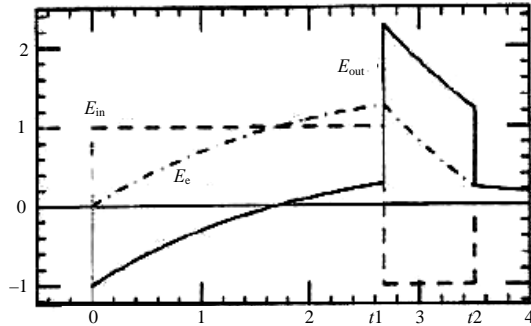


Fig.3 Input and output waveform of field  
图 3 能量倍增器场输入输出波形

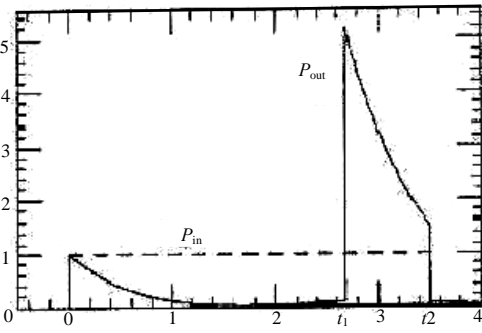


Fig.4 Output waveform of power for SLED  
图 4 能量倍增器输出功率波形

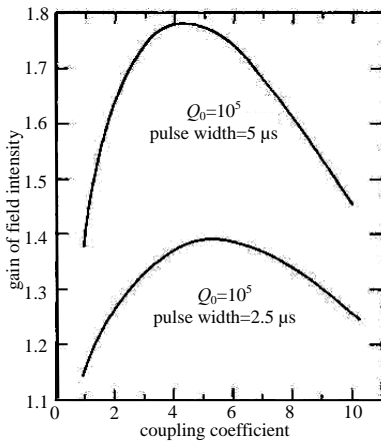


Fig.5 Energy multiplication factor as a function of cavity coupling coefficient  
图 5 场强增益与耦合系数的变化关系

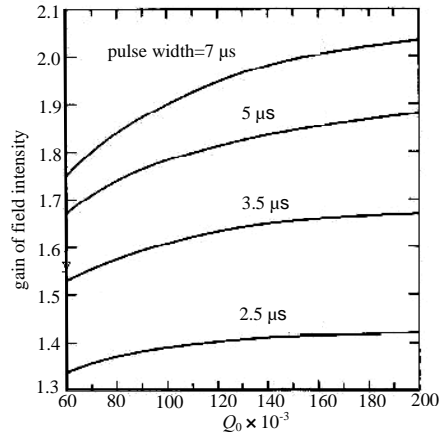


Fig.6 Energy multiplication factor as a function of unloaded  $Q$   
图 6 场强增益与品质因数的变化规律

### 3 能量倍增器腔体设计

能量倍增器储能腔采用工作于  $\text{TE}_{015}$  模的高导无氧铜腔，其  $Q_0$  值可达  $10^5$ ，较易加工制造，并且干扰模式少。而谐振腔的直径  $D$  与长度  $L$  之比是依据材料的工作效率来选择的。直径越小，越可以减少因为短路面调整时所造成的腔体变形。为减少频率分散性，选择  $D/L=0.611$ 。

探针拉出后能量倍增器恢复正常工作<sup>[5]</sup>。利用此解谐装置可控制能量倍增器的工作状态，腔与波导通过端板上的圆孔耦合，在实验中采用厚为 4.06 mm，直径为 2.77 cm 的耦合窗。

另在腔体的圆柱壁上开有小孔，使 1 个钨制解谐探针可探进腔体，从而使腔解谐十余兆赫，有利于测量和调试。工作于 S 波段的能量倍增器的主要参数如表 1 所示。

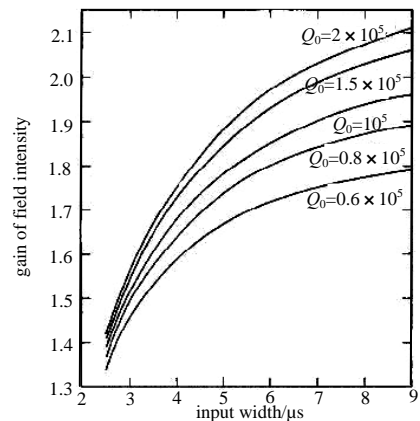


Fig.7 Energy multiplication factor as a function of pulse width  
图 7 场强增益与输入脉宽的关系

#### 4 能量倍增器的高功率实验

在  $4 \mu\text{s}$  输入脉宽，输入功率  $5.5 \text{ MW}$  的情况下，得到了  $35 \text{ MW}$  的输出脉冲。

#### 5 PM-AM 技术方法研究

由于速调管输出的非线性，不能直接由功率源产生幅度调制脉冲，必须进行功率合成。PM-AM 技术是对大功率微波脉冲进行合成，取得相位稳定的调幅波形的一种有效手段<sup>[6]</sup>。为了得到更加理想的输出微波脉冲，对该技术进行如下的理论推导。

取  $3 \text{ dB}$  定向耦合器的 1,3 为隔离输入口，2,4 为隔离输出口，取 2 个输入幅度相等，分别为： $a = e^{i\theta_1}$ ， $b = e^{i\theta_2}$ 。表示输入的初始相位，由  $3 \text{ dB}$  定向耦合器的散射矩阵可得：

$$\sqrt{2} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} a \\ 0 \\ b \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ c \\ 0 \\ d \end{pmatrix} \quad (5)$$

可推得：

$$\sqrt{2}c = a + b = (\cos \theta_1 + \cos \theta_2) + j(\sin \theta_1 + \sin \theta_2) \quad (6)$$

$$\sqrt{2}d = a - b = (\cos \theta_1 - \cos \theta_2) + j(\sin \theta_1 - \sin \theta_2) \quad (7)$$

取  $t=0$  的初始条件为  $\theta_1 = \theta_2 = 0$ ，即初始时刻两输入波同相。则可得：

$$\sqrt{2}c = a + b, \quad \sqrt{2}d = a - b = 0 \quad (8)$$

现在对两输入波进行相位调制，取  $\theta_1(t) = -\theta_2(t)$ ，则在任一时刻，有：

$\sqrt{2}c = a + b = 2 \cos \theta_1$ ， $\sqrt{2}d = a - b = 2j \sin \theta_1$ ，即二口的输出永远为实，而四口的输出永远为虚。两输出口波幅度随角度调制而变化。当  $\theta_1 > 90^\circ$  后，二口的输出改变符号，即意味着其相位反转，改变了  $180^\circ$ 。四口接匹配负载，吸收调制过程中的部分功率。经输入波的相位调制得到了相位稳定、幅度调制的输出波。

当两路输入功率不完全对称时，设两输入波分别为  $a = (1 + \Delta)e^{i\theta(t)}$ ， $b = e^{-i\theta(t)}$ ，其相位调制方式没有误差，二口输出为：

$$\sqrt{2}c = a + b = (2 + \Delta) \cos \theta(t) + j\Delta \sin \theta(t) = Ae^{i\varphi(t)} \quad (9)$$

式中： $A = \sqrt{(2 + \Delta)^2 + \Delta^2}$ ； $\varphi(t) = \arctan \left[ \frac{\Delta}{2 + \Delta} \tan \theta(t) \right]$ 。

在  $\theta(t)$  从  $0^\circ$  调到  $180^\circ$  过程中，当输入功率无误差时，输出相位在  $\theta(t) = 90^\circ$  时相位跃变  $180^\circ$ ；当输入功率误差为  $10\%$  时，输出相位在  $\theta(t) = 90^\circ$  附近比较缓慢地从  $0^\circ$  变到  $180^\circ$ ，而这种相位的变化将导致能量倍增器谐振腔储能的降低和功率增益的下降。

在 2 个输入波相位相差一固定小值时，设其幅度保持相等， $a = e^{i(\theta(t) + \Delta)}$ ， $b = e^{-i\theta(t)}$ ，二口的输出为：

$$\sqrt{2}c = a + b = \cos[\Delta + \theta(t)] + \cos[\theta(t)] + j\{\sin[\theta(t) + \Delta] - \sin \theta(t)\} \quad (10)$$

表 1 S 波段能量倍增器主要参数

Table 1 Parameters of SLED in S band	
parameters	values
frequency	2 856 MHz
size of cavity	346.2 mm
inner diameter	205.03 mm
size of aperture	27.74 mm
thickness	4.0 mm
intrinsic quality factor	105
coupling coefficient	4.8
power gain	7 dB

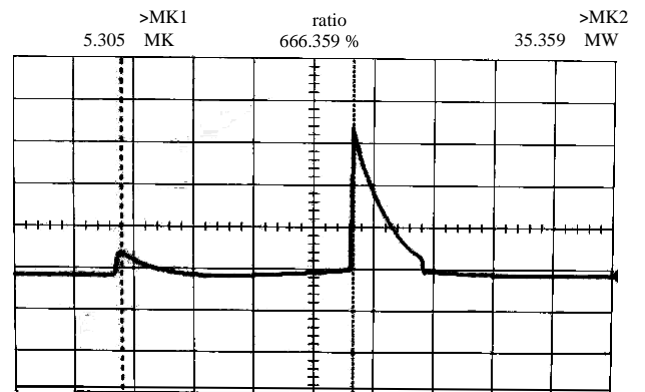


Fig.8 Output waveform of 35 MW

图 8 35 MW 输出脉冲波形

$\theta(t)$  从  $0^\circ$  调到  $180^\circ$  过程中, 输出微波的幅度和相位变化情况如图 9 所示。曲线 1 为  $\Delta = 10^\circ$  的结果; 曲线 2 为无误差时的结果。

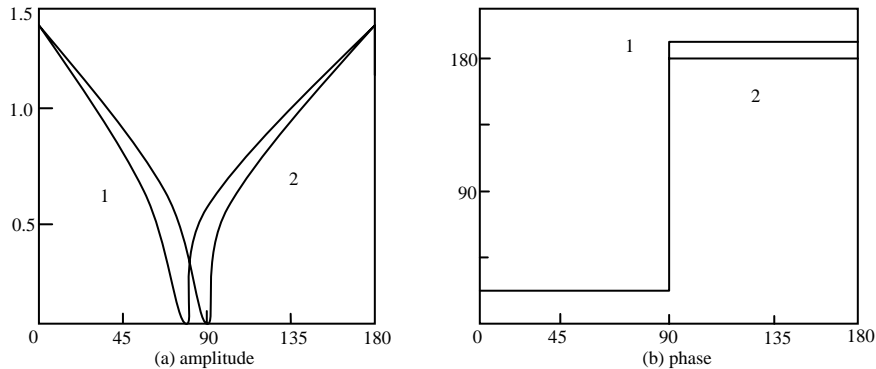


Fig.9 Effect of error on the output amplitude and phase  
图 9 相应误差对输出幅度和相位的影响

由于相位的误差, 幅度和相位都产生了明显偏离。相位在  $\theta(t) = 90^\circ$  附近也发生了  $180^\circ$  相位跃变, 跃变前只在  $\theta(t)$  很小的范围内相位有些变化, 明显好于输入功率不对称的情况。

采用 PM-AM 技术, 输入适当的波形, 能量倍增器可以产生如图 10 所示的平顶波形, 其功率增益为 1.5 dB。

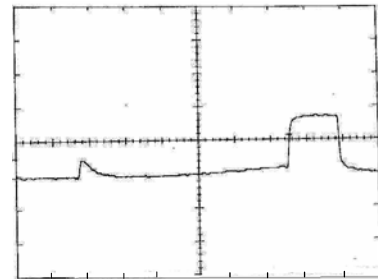


Fig.10 Straight top output waveform of modulated input wave  
图 10 输入波调制情况下的平顶输出脉冲

## 6 结论

RF 脉冲压缩器涉及加速器技术、高功率微波技术、快速电子学、控制理论等多个学科。应用能量倍增器法进行高功率微波脉冲压缩的研究获得了 5 倍于输入功率的输出功率, 它为小型化高功率微波波源的建立提供了更好的实现方法。另外对 PM-AM 技术进行了比较深入的研究, 为能量倍增器开拓了其它的应用空间。

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. Stanford, California, 1974: SLAC-PUB-1453.
- [2] 李广林, 颜斌山, 任文彬. 电子直线加速器的能量倍增器[J]. 原子能科学技术, 1985(6): 690-695.
- [3] 任文彬, 李广林. 能量倍增器[J]. 高能物理与核物理, 1985(5): 313-317.
- [4] 张鹏, 和天慧. 微波脉冲压缩研究[J]. 信息与电子工程, 2008, 6(2): 156-159.
- [5] 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(11): 1227-1230.
- [6] 顾鹏达, 裴国玺. RF 脉冲压缩技术进展[C]// 第二届全国加速器技术学术交流会论文集. 宁波, 1998.

作者简介:



张 鹏(1981-), 男, 山东省青岛市人, 研究实习员, 主要从事脉冲压缩以及微波技术工作. email: youwilllikeme@hotmail.com.

和天慧(1980-), 男, 河南省驻马店市人, 工程师, 主要从事微波脉冲压缩工作。

沈旭明(1972-), 男, 四川大竹人, 副研究员, 主要从事总体设计工作。