

文章编号: 1001-4322(2007)06-0975-03

# 碳纤维阴极对输出脉宽及能量的影响<sup>\*</sup>

邓 潘<sup>1,2</sup>, 刘 列<sup>1</sup>, 文建春<sup>1</sup>

(1. 国防科学技术大学 光电科学与工程学院, 长沙 410073; 2. 解放军电子工程学院 光电对抗系, 合肥 230037)

**摘 要:** 在反射三极管实验平台上,通过浸渍碘化铯(CsI)碳纤维阴极与不锈钢阴极实验对比,研究了碳纤维阴极对虚阴极振荡器输出微波脉宽及能量的影响。实验得出碳纤维阴极虚阴极振荡器输出微波脉宽约 200 ns,较不锈钢阴极虚阴极振荡器增加了 30%;对输出微波脉宽面积近似积分,得出碳纤维阴极虚阴极振荡器与不锈钢阴极虚阴极振荡器的输出微波脉宽面积比值约为 2.273,表明碳纤维阴极虚阴极振荡器输出微波能量是不锈钢阴极虚阴极振荡器的 2 倍左右。分析认为碳纤维阴极的材料特性及其综合发射机制导致阴阳极间等离子体膨胀速度及温度降低,延缓了阴阳极间隙的闭合,从而增加了输出微波脉宽,提高了微波输出能量。

**关键词:** 高功率微波; 碳纤维阴极; 反射三极管; 虚阴极振荡器; 微波脉宽

**中图分类号:** O462 **文献标识码:** A

随着微波源技术的进步,人们已经研制出峰值功率达到 GW 级的高功率微波(HPM)器件,但要进一步提高峰值功率就比较困难。为了让 HPM 源高效率地输出高能量微波,可通过延长输出微波脉冲工作时间来实现<sup>[1]</sup>。研究发现随着脉冲功率的增加,其射频脉冲宽度相应缩短,输出能量常常最终趋于一常数<sup>[2-3]</sup>,大大限制了 HPM 源的效率以及能量输出。这就是脉冲缩短现象,即辐射微波脉冲宽度相对于电子束脉冲宽度变窄。研究脉冲缩短形成的原因及避免方法,可以采取相应的措施,以提高 HPM 源的输出效率和微波输出能量<sup>[4]</sup>。

早在 20 世纪 80 年代初期前苏联的文献中提出了脉冲缩短的概念<sup>[5]</sup>。1995 年第三届 SPIE 强微波脉冲会议后<sup>[6]</sup>,脉冲缩短得到进一步深入研究。人们进行了大量实验,研究了各种微波源中的脉冲缩短现象<sup>[4]</sup>,长脉冲源的作用机制是一个非常活跃的研究领域。本文在反射三极管实验平台上,通过对浸渍碘化铯(CsI)碳纤维阴极和不锈钢阴极的实验对比,研究浸渍 CsI 碳纤维阴极对虚阴极振荡器输出微波脉宽及能量的影响,探讨虚阴极振荡器内引起脉冲缩短的主要原因。

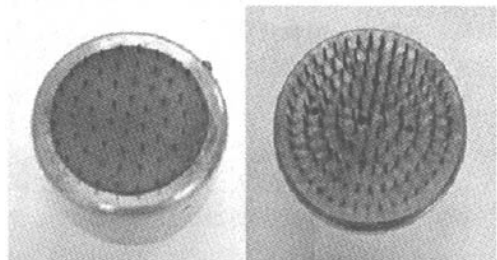
## 1 实验及结果

碳纤维阴极实物见图 1(a),其采用直径  $\phi 77$  mm、厚 10 mm 的石墨基座;浸渍 CsI 的平面阵列针式碳纤维束均布于基座上,针直径  $\phi 1.5$  mm,间距 9 mm,长 5 mm,共 61 根纤维束。

不锈钢阴极实物见图 1(b)。其采用直径  $\phi 119$  mm、厚 10 mm 的不锈钢基座;不锈钢针采用球面阵列针式,均布于基座上,最长针长 19 mm,最短针长 12 mm,共 121 根钢针;针直径  $\phi 1.5$  mm,间距 9 mm。

阳极网采用直径  $\phi 230$  mm 的不锈钢网,阴阳极间隙 1.9 cm。实验二极管电压 450~500 kV,电流 10~12 kA;用机械泵和分子泵抽取真空,主开关气压约  $2.7 \times 10^{-5}$  Pa。

选取微波主瓣方位(即  $0^\circ$  方向)12 m 处为测量基准,衰减 50 dB 后,测量微波主瓣方向功率。图 2 为一次实验得出的输出微波功率波形。由图 2 可见,不锈钢阴极虚阴极振荡器输出微波脉宽约 150 ns,浸渍 CsI 碳纤维阴极虚阴极振荡器输出微波脉宽约 200 ns,碳纤维阴极虚阴极振荡器的输出微波脉冲宽度较不锈钢阴极增加了 30%。同时从图 2 中看出碳纤维阴极虚阴极振荡器的输出微波峰值功率明显大于不锈钢阴极输出峰值功率。



(a) carbon fiber cathode (b) stainless steel cathode

Fig. 1 Needle-shaped array carbon fiber and stainless cathode

图 1 阵列多尖端碳纤维阴极和不锈钢阴极

<sup>\*</sup> 收稿日期:2007-01-09; 修订日期:2007-05-15  
基金项目:国家 863 计划项目资助课题  
作者简介:邓 潘(1981-),女,硕士,助教,研究方向为高功率微波技术;dengpan89@sina.com.

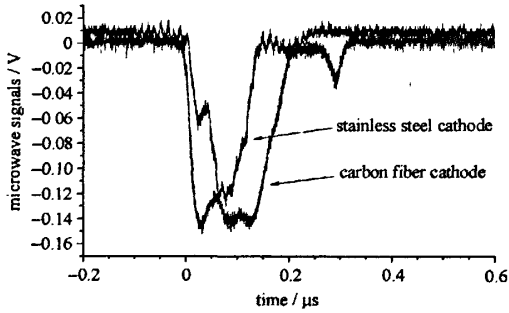


Fig. 2 Output power of carbon fiber and stainless steel cathode vibrator

图2 碳纤维和不锈钢阴极虚阴极振荡器输出微波波形

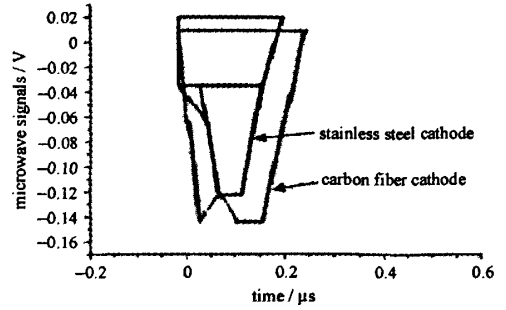


Fig. 3 Area approximation of output power of carbon fiber and stainless steel cathode vibrator

图3 碳纤维和不锈钢阴极虚阴极振荡器输出微波脉宽面积近似图

## 2 实验结果分析与讨论

从实验结果看出,反射三极管使用碳纤维阴极,输出微波脉宽和输出功率明显增加。根据微波能量公式

$$E = Pr \quad (1)$$

式中: $P$ 为微波输出功率; $\tau$ 为脉冲宽度。对输出微波脉宽波形所围面积进行近似积分,积分结果反映了输出微波能量的大小及其变化趋势。

首先对图2所示的碳纤维阴极和不锈钢阴极虚阴极振荡器输出微波波形所围面积进行近似,面积近似如图3所示。然后对图3中两近似面积进行积分,得出两输出微波波形所围面积比约为2.273,即碳纤维阴极虚阴极振荡器与传统不锈钢阴极虚阴极振荡器的输出微波能量比值。可见使用碳纤维阴极显著提高了虚阴极振荡器的微波输出能量,约是传统不锈钢阴极虚阴极振荡器的2倍。

分析认为,二极管中阴阳极间等离子体的形成和运动是影响微波脉冲宽度的主要因素,等离子体的形成和运动导致二极管间隙闭合,使得输出微波脉冲缩短,影响微波能量变化。

我们在前期实验<sup>[7]</sup>中得出浸渍CsI碳纤维阴极较其它阴极而言,其发射的等离子体膨胀速度较低。实验测得浸渍CsI碳纤维阴极等离子体膨胀速度约为1.0 cm/ $\mu$ s,不锈钢阴极等离子体膨胀速度在2.2 cm/ $\mu$ s左右。国外学者Benford与Dehope测得具有CsI碳纤维阴极的二极管间隙闭合速度为(0.59 $\pm$ 0.16) cm/ $\mu$ s,金属阴极二极管间隙闭合速度为2~6 cm/ $\mu$ s<sup>[8]</sup>。与我们实验结果相吻合,有效证明了碳纤维阴极二极管间隙的闭合速度较低这一结论。

用闭合速度和质量-速度关系式来定量表达等离子体膨胀速度<sup>[8]</sup>,即

$$v_p = \sqrt{k_B T/m} \quad (2)$$

式中: $k_B$ 为玻尔兹曼常数; $T$ 为等离子体的温度; $m$ 为最轻正离子的质量,即移动最快的离子质量,其决定了等离子体膨胀速度 $v_p$ 。由此可得出微波输出脉宽 $\tau$ 、等离子体闭合速度 $v_p$ 及 $m$ 之间的关系式

$$\tau \propto v_p^{-1} \propto \sqrt{m} \quad (3)$$

金属不锈钢阴极等离子体发射时,整个二极管中最轻的粒子为氢;而浸渍CsI碳纤维阴极等离子体发射时,由于碘离子的存在,氢离子和碘离子极易结合成碘化氢,剩下最轻的粒子为碳,从而有效减缓了等离子体膨胀速度。

由公式(2)可得出微波输出脉宽 $\tau$ 、等离子体闭合速度 $v_p$ 及等离子体温度 $T$ 之间关系

$$\tau \propto v_p^{-1} \propto T^{-1} \quad (4)$$

碳纤维阴极电子发射为综合发射机制,包括纤维束尖端的场发射和纤维束侧面的表面闪络及随纹。这就有效增大了发射面积,降低了局部电流密度,减小了欧姆加热,使等离子体温度 $T$ 维持在较低水平上,从而延缓等离子体膨胀速度。同时浸渍的CsI发射的大量紫外线引起了更多的光发射,也增大了发射面积。

此外,碳纤维阴极虚阴极振荡器中较高的真空度也可能导致脉宽的增加。碳纤维微观结构主要为片层状及孔洞疏松结构,具有较强的气体吸附性,不易解吸气体,属于低放气速度材料,保证了系统元件的高清洁度,为实验提供了一个较好的真空条件,减少了其他等离子的产生。实验<sup>[9]</sup>证明碳纤维阴极发射过程中本底气体

很小。

综上所述,碳纤维阴极虚阴极振荡器的阴极材料特性及其综合发射机制,决定等离子体具有较低的膨胀速度及温度,从而延缓了二极管间隙的闭合,增加了微波输出脉宽,提高了输出能量。

### 3 结 论

在反射三极管实验平台上,采用浸渍 CsI 碳纤维阴极与不锈钢阴极进行了对比实验,结果发现使用碳纤维阴极后,虚阴极振荡器输出微波脉宽较不锈钢阴极增加了 30%,其输出微波能量增加了 1 倍左右,碳纤维阴极有效地提高了虚阴极振荡器的输出微波脉宽和能量。分析认为阴阳极间等离子体的形成和运动是限制虚阴极振荡器微波辐射脉宽的主要因素。碳纤维阴极的阴极材料特性及其综合发射机制导致阴阳极间等离子体膨胀速度和温度降低,从而延缓了阴阳极闭合,增加了输出微波脉宽,提高了微波输出能量。同时,碳纤维的强气体吸附性能为虚阴极振荡器提供了较高的真空度,这也可能导致脉宽增加,输出能量提高。

#### 参考文献:

- [1] Barker R J, Schamiloglu E. High-power microwave sources and technologies[M]. New York: IEEE Press, 2001.
- [2] Goebel D M. Pulse shortening causes in high power BWO and TWT microwave sources[J]. *IEEE Trans Plasma Sci*, 1998, 26(3), 263.
- [3] Benford J, Benford G. Survey of pulse shortening in high-power microwave sources[J]. *IEEE Trans Plasma Sci*, 1997, 25(2), 311.
- [4] Agee F J. Evolution of pulse shortening research in narrow band, high power microwave sources[J]. *IEEE Trans Plasma Sci*, 1998, 26(3), 235.
- [5] Huttlin G A, Bushell M S, Conrad D B, et al. The reflex-diode source on aurora[J]. *IEEE Trans Plasma Sci*, 1990, 18(3), 618.
- [6] Barker R J, Agee F J. National university consortium on microwave research(NUCOMR)[C]//Proc of SPIE. 1995, 2557, 300.
- [7] 邓潘. 碳纤维阴极发射机制及对输出微波脉宽的影响[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2005. (Deng P. The emission mechanism of carbon-fiber cathode and the effect to the output pulse width. Changsha: National University of Defense Technology, 2005)
- [8] Benford J, Price D, Dehope W. Extension of HPM pulse duration by cesium iodide cathode in crossed field devices[R]. AFRL-DE-PS-TR, 1998, 1019.
- [9] Eusebio G, McWilliams R D, Voss D E, et al. Novel cathode for field-emission application[J]. *Rev Sci Instrum*, 1995, 66(3), 2528-2532.

## Effect of carbon-fiber cathode on output pulse width and energy

DENG Pan<sup>1,2</sup>, LIU Lie<sup>1</sup>, WEN Jian-chun<sup>1</sup>

(1. College of Optoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Electronic Engineering Institute of the People's Liberation Army, Hefei 230037, China)

**Abstract:** The carbon-fiber cathode with CsI was substituted for the stainless steel cathode in the reflex triode virtual cathode oscillator experimental device. The carbon-fiber cathode vircator output microwaves with pulse width over 200 ns, which was about 30% longer than that of stainless steel cathode, and the ratio of the pulse areas was about 2.273, which meant the energy of single pulse of the former was double the latter's. It was analysed that the complex emission mechanism, characteristic and configuration of the carbon fiber cathode slows the plasma expansion velocities and lowers the temperature, thus extends the output pulse width and enhances the output energy.

**Key words:** High power microwave; Carbon fiber cathode; Reflex triode virtual cathode oscillator; Vircator; Pulse width