

文章编号: 1672-2892(2010)03-0324-04

## 用于 X 波段行波管实验的脉冲电源研制

谭志远, 甘孔银, 黎明, 孙碧英

(中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘 要:** 基于 X 波段行波管实验研究的需要, 研制了行波管脉冲电源系统。该脉冲电源系统主要由阳极控制电源、慢波线电源、收集极电源、辅助电源和控制系统组成, 其中关键在于阳极控制电源的研制。针对阳极控制电源的输出脉冲宽度变化大的特点, 采用串联固态开关控制阳极电压。实验结果表明, 该脉冲电源系统满足行波管实验研究的要求, 在 X 波段行波管上实现了阳极脉冲电压脉宽在  $4 \mu\text{s} \sim 3\,000 \mu\text{s}$  内连续可调。

**关键词:** 脉冲电源; 阳极控制; 真空电子管; 串联固态开关  
**中图分类号:** TN14; TL503 **文献标识码:** A

## Development of pulse power supply for X-band TWT experiment

TAN Zhi-yuan, GAN Kong-yin, LI Ming, SUN Bi-ying

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

**Abstract:** The pulse power supply for X-band Traveling-Wave Tube(TWT) experiment was developed. It consisted of anode control power supply, slow-wave line power supply, collector power supply, auxiliary power supply and control system. Since the output pulse width of the anode control power supply had varied greatly, the series-connected Insulated Gate Bipolar Transistors(IGBT) switch was applied to anode control power supply. The experiment results indicated that the power supply system could meet the requirements of the X-band TWT experiment, and the pulse voltage with continuously adjustable pulse width from  $4 \mu\text{s}$  to  $3\,000 \mu\text{s}$  had been obtained on the anode of the X-band TWT.

**Key words:** pulse power supply; anode control; vacuum tube; series-connected IGBT switch

为了开展 X 波段行波管的研究工作, 需要建立 1 台用于行波管实验研究的脉冲电源。该脉冲电源系统主要由阳极控制电源、慢波线电源、收集极电源、辅助电源和控制系统组成。由于行波管的输出微波脉冲宽度要求在  $4 \mu\text{s} \sim 3\,000 \mu\text{s}$  内可变, 且所研制的行波管是阳极控制的, 因此, 实现阴阳极之间脉冲电压的脉宽控制, 使阳极高压脉冲宽度在  $4 \mu\text{s} \sim 3\,000 \mu\text{s}$  内可变就能够实现不同脉冲宽度的微波输出。鉴于脉冲宽度变化幅度大, 在阴阳极之间只能采用刚性开关来实现阳极控制。

在行波管脉冲电源中, 可以采用真空电子管或者串联固态半导体开关这 2 种刚性开关来实现对阳极的控制。本文首先讨论行波管的总体方案, 而后根据 2 种刚性开关的优劣确定阳极控制方案, 最后给出实验结果。

### 1 行波管的脉冲电源总体设计

行波管研制中, 阳极控制电源、慢波线电源和收集极电源的性能直接影响行波管的微波输出性能。图 1 为行波管电源系统的示意图, 图中  $V_a$  为阳极电源, S 为阳极控制开关,  $V_H$  为慢波线电源,  $V_C$  为收集极电源。各电源的主要技术参数如表 1 所示。

根据上述技术参数, 采用对称倍压方案来研制阳极电源和慢波线电源。对称倍压方案的优点是纹波系数比一般倍压方式小<sup>[1]</sup>。收集极电源采用串并联谐振方式来实现。采用串

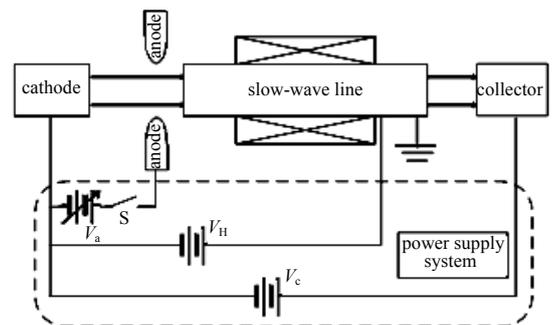


Fig.1 Schematic diagram of TWT power supply system  
图 1 行波管电源系统

并联谐振<sup>[2]</sup>的优点是兼顾了串联谐振的固有限流功能和并联谐振的电压调整范围宽的优点。上述技术方案比较成熟,本文中不予详细讨论。

表1 行波管脉冲电源参数  
Table 1 Parameters of TWT power supply

power supply	voltage/kV	maximum mean power/kW	floating voltage/kV	repetition frequency/Hz	pulse width/ $\mu$ s	stability	relative ripple
power supply	5-25	1	25	100	4-3 000	$\leq 0.1\%$	-
slow-wave line supply	5-24	4	0	-	DC	$\leq 0.1\%$	$\leq 0.1\%$
collector supply	5-18	30	-10	-	DC	$<1\%$	$\leq 1\%$

## 2 采用真空电子管的阳极控制

在阳极控制电源中,控制开关可以采用真空电子管或固态开关。通常情况下,行波管脉冲电源的阳极控制都是采用真空电子管(四极管)。使用真空四极管的好处是技术成熟、可靠,抗打火能力强。

真空四极管的阴极电流  $I_k$  和控制栅、帘栅上的电压关系如下<sup>[3]</sup>:

$$I_k = k \left( E_{c1} + \frac{E_{c2}}{\mu_s} + \frac{E_b}{\mu_p} \right) \quad (1)$$

式中:  $k$  为导流系数;  $E_{c1}$  为控制栅上电压;  $E_{c2}$  为帘栅电压;  $E_b$  为板上电压;  $\mu_s$  为帘栅放大因子;  $\mu_p$  为板极放大因子。

从式(1)可以看到四极管阴极电流主要由控制栅和帘栅电压决定,通过阳极的电流只是阴极发射电流的一部分。当阳极电流比较小时,第二栅极电流比较大,这就需要调整第一栅极和第二栅极上的偏压以及加在第二栅极上的脉冲电压,否则在第二栅极上的电流会非常大,将损坏第二栅极。

X波段行波管阴极悬浮,慢波线接地,因此阳极是悬浮的。真空四极管作为阴阳极之间的控制开关也是悬浮的,所以真空四极管的灯丝加热电源、第一栅极和第二栅极的偏置电源和脉冲控制都是悬浮的。在悬浮电压比较高的情况下,采用真空四极管比较困难,在长脉冲情况下,控制真空四极管也很困难。除了上述原因外,真空四极管的损耗比较高,在长脉冲和高占空比情况下,往往要外加冷却装置来确保真空四极管的工作温度不致过高。因此,真空四极管不适合在长脉冲情况下使用,有的厂商额外提供一个真空开关,来实现电源的长脉冲连续输出。

基于上述分析,在该行波管脉冲电源中不宜采用真空四极管,可采用基于 IGBT(绝缘栅双极晶体管)或者 MOSFET(金属氧化物半导体场效应晶体管)串联的固态开关。

## 3 采用串联固态开关的阳极控制

IGBT 是压控器件<sup>[4]</sup>,通过控制栅极上的电压就可以实现对 IGBT 器件的控制。IGBT 一般工作电压比较低,需要串联以得到工作电压更高的开关。采用串联 IGBT 开关的优点是:开关损耗小,控制简单;缺点是抗打火能力比较差,造价和技术难度高。

串联 IGBT 开关需要解决单只开关上的静态和动态电压均衡、悬浮电源和悬浮同步驱动问题<sup>[5-7]</sup>。由于课题组在串联固态开关技术方面进行了长时间的研究,分别采用光纤和脉冲变压器控制方式研制成功了 10 kV/10 A 串联 IGBT 开关<sup>[8-10]</sup>,在串联 IGBT 开关研究方面有比较多的技术积累和研究经验,所以在阳极控制中采用串联 IGBT 开关,从技术上是完全可行的。

## 4 IGBT 串联固态开关的阳极控制实验

采用 30 只 FGL60N170D(60 A/1 700 V)IGBT,利用新设计的脉冲变压器驱动方案研制了工作电压为 30 kV、脉冲宽度 4  $\mu$ s~3 000  $\mu$ s 连续可调的串联 IGBT 开关。图 2 是各 IGBT 栅极上的驱动电压波形。从图中可以看到:被测的 4 只 IGBT 驱动信号波形基本一致。在驱动信号尾部(图 3),开关信号之间的时间差最大不超过 100 ns,可以认为 30 只 IGBT 驱动信号是基本一致的。此外,在 30 kV 串联 IGBT 开关中,设计的 IGBT 过压保护时间是 500 ns,因此,不用担心 IGBT 串联开关中的瞬态过压问题。

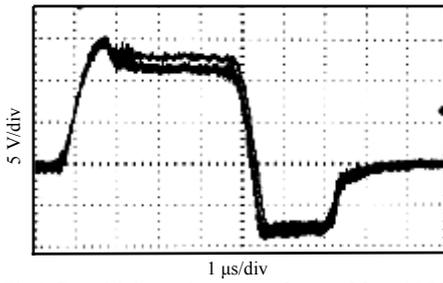


Fig.2 Gate driving voltage waveforms of four IGBTs  
图 2 4 只 IGBT 栅极上的驱动电压波形

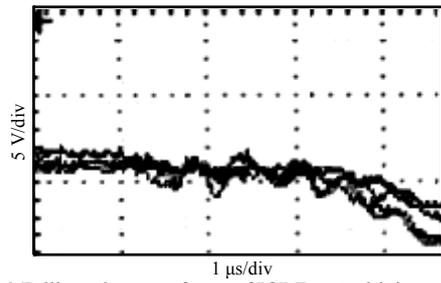
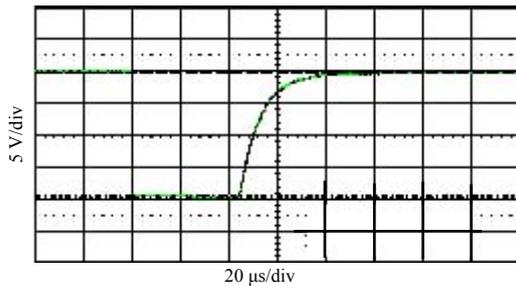


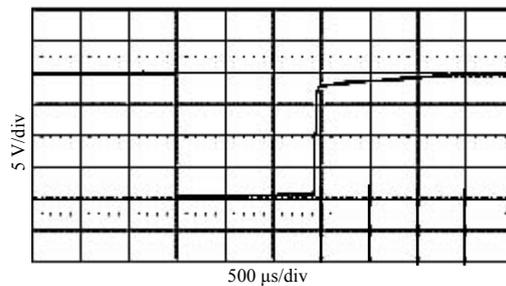
Fig.3 Falling edge waveforms of IGBTs gate driving voltage  
图 3 IGBT 栅极驱动波形的下降沿

图 4 是采用 1:10 000 的电压探头测量得到的阳极脉冲电压波形, 脉冲波形的上升时间小于 200 ns, 下降时间在 10 μs 左右。下降时间偏大的原因是阴阳极之间存在电容。根据测试, 在灯丝不加热情况下, 阴阳极之间的电容约为 2 pF~3 pF; 在加热情况下, 电容增加了近 10 倍, 达到约 20 pF(该数值是由 2.2 RC 得到的), 这样脉冲波形的下降沿就增加了。经过行波管的实验表明, 10 μs 的下降时间对行波管的性能影响不大, 因此, 在占空比不高的情况下, 阳极控制电源中不需要采用额外的开关, 但在占空比较高时, 需要采用另一组 IGBT 截尾开关。如果采用了该开关, 可以使阳极控制电源的输出脉冲的下降沿小于 1 μs。

图 5 是脉宽 30 μs 时行波管输出的微波信号。实验中在 X 波段行波管上实现了占空比 10%, 100 Hz 重复频率运行, 说明该脉冲源基本满足目前行波管的实验要求。



(a) pulse width 45 μs



(b) pulse width 1.5 ms

Fig.4 Voltage waveforms on anode  
图 4 阳极脉冲电压波形

## 5 结论

所研制的 X 波段行波管脉冲电源系统目前已经用于行波管的实验研究, 达到了实验要求。不足之处是该脉冲电源在高占空比时还不能满足要求, 原因是阳极控制电源中的下拉电阻在高占空比时阻值要选大, 否则阳极控制电源的输出功率会很大, 但过大的下拉电阻会增大阳极脉冲的下降沿, 这样就很难满足行波管在高占空比下的实验要求。因此, 需要在阳极控制上采用双串联 IGBT 开关。采用双串联 IGBT 开关的好处是可以获得更短的下降沿, 同时又不增加主开关损耗和阳极电源功率。从建立行波管实验平台的角度看, 尽管采用双串联 IGBT 开关增加了技术难度和研制成本, 但该种方式更有利于行波管研究, 因此, 下一步将在行波管阳极控制电源中采用双串联 IGBT 开关。

### 参考文献:

- [1] 陈佳洱. 加速器物理基础[M]. 北京: 原子能出版社, 1993.
- [2] 郑新, 李文辉, 潘厚忠. 雷达发射机技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.
- [3] Ewell, George W. Radar transmitters[M]. New York: The Kingsport Press, 1981.
- [4] Kuang Sheng, Williams Barry W, Finney Stephen J. A Review of IGBT Models[J]. IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, 2000, 15(6): 1250-1266.
- [5] Yalan Wang, Muhammad S Abu Khaizaran, Patrick R Palmer. Controlled Switching of High Voltage IGBTs in Series[C]// Electron

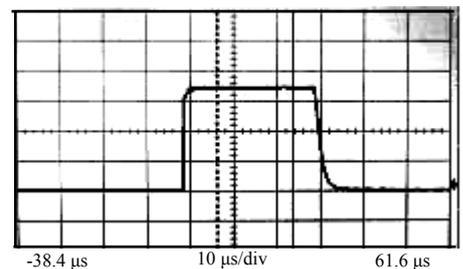


Fig.5 Output microwave signal of X-band TWT  
图 5 X 波段行波管输出的微波信号

Devices and Solid-State Circuits, IEEE Conference on 6-18 Dec. [S.l.], 2003:297-300.

- [6] Ohkami T, Souda M, Saito T, et al. Development of a 40 kV Series-connected IGBT Switch[C]// Proc. of Power Conversion Conference, Nagoya:[s.n.], 2007:1175-1180.
- [7] Palmer P R, Wing Ya, Finney S, et al. Design of the Active Voltage Controller for Series IGBTs[C]// 35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, Aachen:[s.n.], 2004:3248-3254.
- [8] 甘孔银,黎明,金晓,等. 用于10kV IGBT 固体开关的脉冲变压器设计[J]. 信息与电子工程, 2005,1(3):63-65.
- [9] 甘孔银,汤宝寅,王浪平,等. 10kV 绝缘栅双极型晶体管固体开关的研制[J]. 强激光与粒子束, 2003,15(10):1033-1036.
- [10] 甘孔银,汤宝寅,王小峰,等. 绝缘栅双极晶体管固体开关技术研究[J]. 强激光与粒子束, 2002,14(6):953-956.

#### 作者简介:



谭志远(1984-),男,陕西省宝鸡市人,在读硕士研究生,2007年毕业于清华大学工程物理系,主要从事脉冲电源研制. email:tanzzy03@126.com.

甘孔银(1967-),男,四川省威远县人,博士,副研究员,现从事开关技术、加速器应用技术研究.

黎明(1968-),男,湖北天门人,1992年毕业于清华大学物理系,研究员,现从事加速器物理与自由电子激光研究.

孙碧英(1943-),女,湖南省临武县人,1966年毕业于华南大学,高工,现从事快电子方面研究.

(上接第285页)

#### 参考文献:

- [1] Franceschetti G, Iodic A, Miglianecio M, et al. A novel across-track SAR interferometry simulator[J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 1998,36(3):950-962.
- [2] Mori A, De F Vita. A time-domain raw signal simulator for interferometric SAR[J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 2004,42(9):1811-1817.
- [3] Xu W, Cumming I. Simulator for repeat-pass satellite InSAR studies[C]// IEEE IGARSS'97, Singapore:[s.n.]. 1997:1704-1706.
- [4] Kun R, Prinnet V, Shi X, et al. Simulation of interferogram image for spaceborne SAR system[C]// IEEE IGARSS'03, Toulouse:[s.n.], 2003:3824-3826.
- [5] Franceschetti G, Miglianecio M, Riccio D, et al. SARAS: A synthetic aperture radar(SAR) raw signal simulator[J]. IEEE Trans. Geos. and Remote Sensing, 1992,30(1):110-123.
- [6] Currie N. Clutter characteristics and effects[M]// Eaves J L, Reedy E K. Principles of Modern Radar. New York: Van Nostrand Reinhold Co., 1987:281-340.
- [7] Ulaby F T, Dobson M C. Handbook of radar scattering statistics for terrain[M]. Norwood, MA: Artech House, 1989.
- [8] Chen W, Xiang Z, Liu X, et al. A Two-Level Image Pair Simulator for Interferometric Synthetic Aperture Radar[C]// Proceedings of the SPIE, Guangzhou:[s.n.], 2008,7145:71452P-71452P-10.
- [9] 骆明君. 合成孔径雷达图像斑点噪声抑制与滤波[J]. 信息与电子工程, 2009,7(1):9-12. (Luo M. Speckle Filtering and Smoothing of Synthetic Aperture Radar Image[J]. Information and Electronic Engineering, 2009,7(1):9-12.)
- [10] Gatelli F, Guarnieri A M, Parizzi F, et al. The wavenumber shift in SAR interferometry[J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 1994,32(4):855-865.
- [11] Hanssen R, Bamler R. Evaluation of interpolation kernels for SAR interferometry[J]. IEEE Trans. Geos. and Remote Sensing, 1999,37(1):318-321.

#### 作者简介:



向征(1982-),男,四川省眉山市人,博士,研究方向为干涉合成孔径雷达仿真与数据处理. email: xiangzheng@sjtu.edu.cn.

王桢霖(1987-),男,福建省泉州市人,在读硕士研究生,研究方向为合成孔径雷达数据仿真与可视化处理.

刘兴钊(1962-),男,武汉市人,博士,教授,研究方向为卫星遥感与雷达系统.