

文章编号: 1006-4710(2013)02-0216-05

# 基于 FPGA 的新型非对称 双极脉冲磁控溅射电源的研究

陈桂涛, 孙天乐, 孙强, 钟彦儒

(西安理工大学 自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 研究了基于 FPGA 的非对称双极脉冲电源, 解决了磁控溅射工艺中遇到的共性问题, 同时获得了优异的膜层性能和更宽的工艺范围。可以根据磁控溅射电源工艺需求对双向脉冲参数包括脉冲幅值、频率、占空比, 以及正负向个数和正向脉冲与负向脉冲之间的换向时间等自由调节。最后设计了一个 6 kW/100 kHz 样机, 前级采用两个独立的 DC/DC 变换器作为直流源, 后级为一个非对称脉冲发生器。采用 Altera 公司的 FPGA (EP3C25Q240C8) 作为数字处理器实现了电源的数字控制, 同时对后级脉冲变换环节实现高自由度控制, 通过实验结果分析进一步验证了设计的可行性。

**关键词:** 脉冲电源; 非对称; 磁控溅射; 高自由度

**中图分类号:** TP313      **文献标志码:** A

## Research on Novel Pulsed Power Based on FPGA for Magnetron Sputtering

CHEN Guitao, SUN Tianle, SUN Qiang, ZHONG Yanru

(Faculty of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** In this paper, research on asymmetric bipolar pulsed power supply based on FPGA has been made to resolve some common problems encountered in Magnetron sputtering process and to realize excellent film performance and a wider range of technology. Pulse parameters of the magnetron sputtering power can be adjusted freely according to the demands including pulse amplitude, frequency, duty cycle, and even the number and the positive and the negative pulses of transition time between pulse. Then, a 6 kW/100 kHz prototype is designed which adopts two-stage structure, the first section utilizing two independent DC/DC converter as a DC source, the subsequent stage as a non-symmetrical pulse generator. FPGA (EP3C25Q240C8) of Altera is used as a digital processor to implement the digital control of current source, as well as to achieve a high degree of freedom control on the pulse converter. Finally, the analysis of experimental results has further tested the feasibility of the design.

**Key words:** pulse power; asymmetric; magnetron sputtering; high degree of freedom

磁控溅射法是一种物理气相沉积的方法, 广泛应用于薄膜技术。在过去的几年里, 人们对使用脉冲电源改善磁控溅射效果给予了极大的关注。基于交流电源在磁控溅射领域的应用<sup>[1]</sup>, 非对称脉冲电源在磁控溅射领域的应用得到了越来越广泛的关注<sup>[2-4]</sup>。脉冲磁控溅射工艺利用高压脉冲轰击气体, 电离出离子撞击靶材, 产生原子, 原子沉积在基片表面, 形成薄膜。

非对称脉冲是指脉冲波形是独立的, 即正向脉冲和负向脉冲参数是单独可控的。换言之, 是指在每半个周期内可以调节供给目标能量的多少。这不仅能够为磁控溅射工艺研究提供良好的平台, 还解决了磁控溅射中遇到的共性问题, 即: ①可以补偿如因阴极大小不同而造成的差异, 或均衡两种不同合金材料之间的差异; ②通过施加反向电场可有效地解决电弧灭弧问题; ③与其他电源相比, 在同等条件

收稿日期: 2012-06-09

基金项目: 陕西省科技厅工业公关计划资助项目(2011K09-05)。

作者简介: 陈桂涛, 男, 讲师, 研究方向为大功率特种电源及其控制技术。E-mail: cgtao@xaut.edu.cn。

下非对称双极脉冲电源可以得到更好的膜层质量。因此,电源性能的好坏是决定工艺效果的一个重要因素。

本研究设计了一种基于FPGA的6 kW非对称双极脉冲电源方案。可以根据磁控溅射电源需求实现脉冲参数(脉冲幅值、频率、占空比、正负向个数、正向脉冲与负向脉冲之间的换向时间等)的自由调节,有效改善膜层的均匀性和工艺质量。

## 1 非对称双极脉冲电源电路

图1是脉冲电源电路系统框图。两个单独的高频脉冲DC-DC变换器提供两个独立的直流源。FPGA控制两个直流源作为电流源。脉冲电源能够在短时间内提供高能量,高开关频率( $\geq 50$  kHz)的DC-DC变换能够在脉冲周期内迅速提供需求的能量。

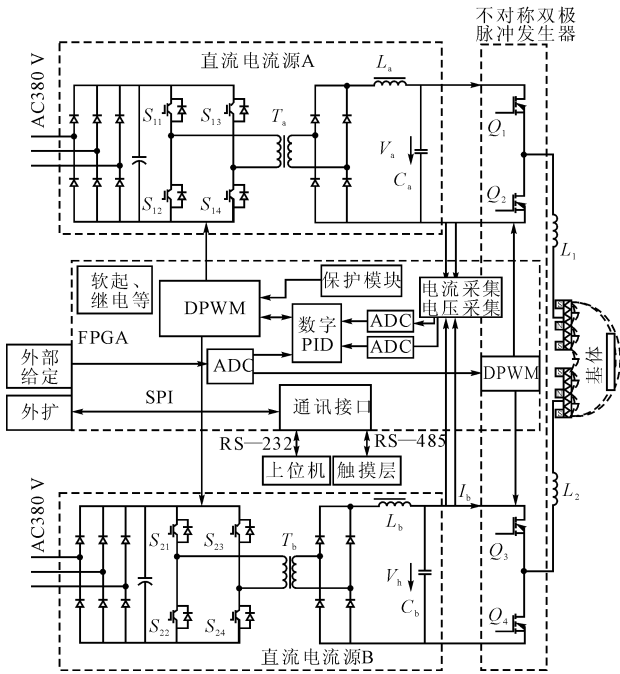


图1 非对称脉冲电源原理框图

Fig. 1 The block diagram of the asymmetric pulse power

图1所示系统框图包括主电路和控制电路两个部分,即:

1) 图1中,两个直流源后面连接的是脉冲变换环节。在FPGA的控制下可以产生特殊的脉冲,用以控制 $Q_1 \sim Q_4$ ,前级为后级斩波电路(图1中非对称双极脉冲发生器)提供稳定可靠的直流输出。后级斩波电路根据不同镀膜工艺和溅射靶材的生产需求,实现不同的磁控溅射模式,且脉冲模式下的幅值、频率、正负脉冲数目均可大范围连续调节。

2) 数字控制器选用Altera公司生产的Cyclone

III FPGA(EP3C25Q240C8)作为主控芯片,其原理框图见图2。

该控制器主要实现的功能为:开关量输入、开关量输出(任意配置);采用SPI协议通信实现电路AD采样,外部给定AD采样,DA输出(按需求配置多路SPI口);采用SCI协议与上位机和触摸屏通信等。图3是利用FPGA实现高自由度DPWM及保护策略的状态机。

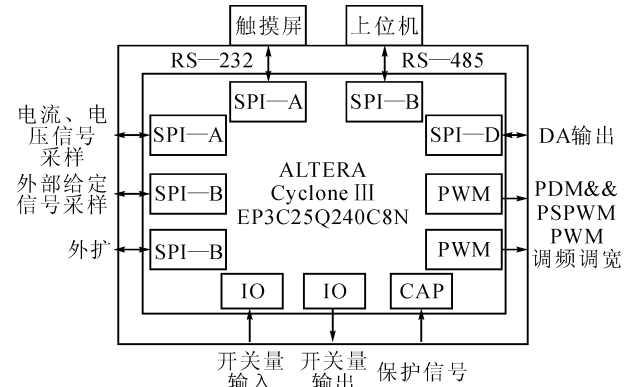


图2 数字控制器原理框图

Fig. 2 The block diagram of the digital controller

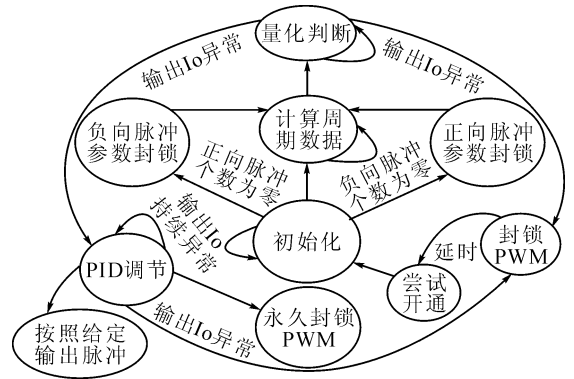


图3 DPWM及保护策略状态机

Fig. 3 State-machine of DPWM and protection strategy

## 2 基于FPGA实现的非对称脉冲

### 2.1 设计需求和控制方法

如上所述,非对称脉冲磁控溅射电源有诸多优点,且不同的脉冲参数会产生不同的效果,另外高自由度非对称脉冲对磁控溅射技术改进提供了良好的平台。

根据溅射工艺需求,为满足不同阴极和阳极配置模式的需求,电源设计要求能够输出非对称脉冲波形,如图4所示。为研究脉冲参数对磁控溅射的影响,脉冲参数需可调节。在图4中, $f_p$ 和 $f_n$ 分别是正向和负向脉冲频率, $N_p$ 和 $N_n$ 分别是正向和负向脉冲个数, $T_p$ 和 $T_n$ 分别是正向和负向脉冲的换向时

间,  $D_p$  和  $D_n$  分别是正向和负向脉冲的占空比。

为了得到图 4 的波形, 采用 ALTER 公司的 EP3C25Q240C8 作为主控芯片的 FPGA 数字控制系统, 采用 Altera 公司的 FPGA(EP3C25Q240C8) 作为数字控制系统的主控芯片。可以产生正负向频率、占空比、级数和换向时间可调的 PWM 脉冲信号, 用以控制驱动得到目标输出波形。

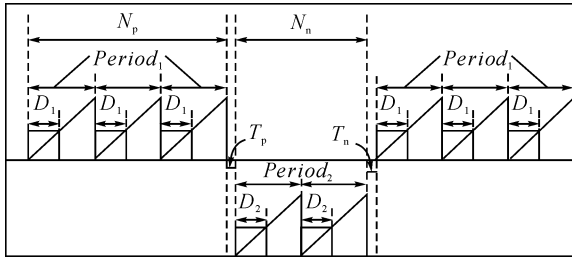


图 4 非对称双极脉冲波形

Fig. 4 Waveforms of asymmetric bipolar pulse

该脉冲信号的实现分为三种情况, 即负向脉冲个数为零, 正向脉冲个数为零, 正负向脉冲个数均不为零, 如图 5 所示。

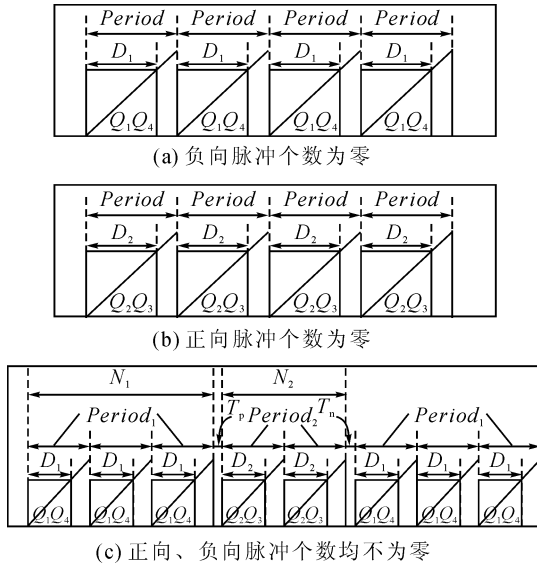


图 5 非对称脉冲形式

Fig. 5 The waveforms of the asymmetric pulse

对图 5 可以具体分析为:

① 负向脉冲个数  $N_n$  为零

$Q_1$  和  $Q_4$  的驱动波形一致, 控制正向脉冲输出,  $Q_2$  和  $Q_3$  驱动波形一致, 且为低电平。可调参数为正向频率和占空比。

$$Period = 1/f_p \quad D_1 = D_p \quad (1)$$

② 正向脉冲个数  $N_p$  为零

$Q_1$  和  $Q_4$  的驱动波形一致, 且为低电平,  $Q_2$  和

$Q_3$  驱动波形一致, 控制负向脉冲输出, 可调参数为负向频率和占空比。

$$Period = 1/f_n \quad D_2 = D_n \quad (2)$$

③ 正向、负向脉冲个数均不为零

$Q_1$  和  $Q_4$  的驱动波形一致, 控制正向脉冲输出,  $Q_2$  和  $Q_3$  驱动波形一致, 控制负向脉冲输出。可调脉冲参数包括正负向脉冲频率、占空比、级数及正负向脉冲之间的换向时间, 即:

$$Period = N_p \times 1/f_p + N_n \times 1/f_n + T_p + T_n \quad (3)$$

$$D_1 = D_p \quad (4)$$

$$D_2 = D_n \quad (5)$$

其中,  $T_p$ 、 $T_n$  分别为正负向脉冲换向时间。

所采用的非对称双极脉冲电源的 DPWM 调制方法的优势在于, 它是主动脉冲管理策略, 即在正向脉冲结束之后, 反向施加频率脉宽可调的负向电压。所施加的反向电压能够将电子倾注到阴极以消除靶材上聚集的电荷, 实现电荷清除功能, 抑制电荷能量的聚集, 从根源上抑制电弧的生成或熄灭已经发生的电弧。

### 2.2 系统特殊保护方案

为解决磁控溅射工艺中可能出现因频繁起弧而引起的假保护状态, 本研究提出了“打嗝保护”方案(如图 6 所示), 即当检测到保护信号后封锁 PWM, 但不永久封锁, 封锁后再次尝试开通 PWM, 直至正常工作, 或累计检测到保护信号大于一定次数后, 永久封锁 PWM, 等待处理。

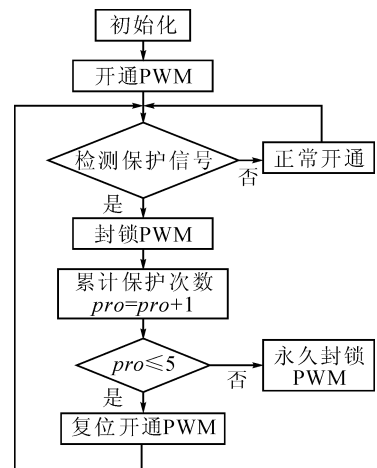


图 6 保护方案原理框图

Fig. 6 The block diagram of the protection scheme

### 3 非对称双极脉冲电源样机研制及测试

为验证系统设计, 搭建了 6 kW/100 kHz 非对称双极脉冲磁控溅射电源样机。

主要脉冲参数如表 1 所示。

表 1 非对称脉冲电源参数

Tab. 1 The parameter of the asymmetric pulse power

参数	正向	负向
频率/kHz	10 ~ 100	10 ~ 100
占空比 /%	10 ~ 90	10 ~ 90
级数	0 ~ 50	0 ~ 50
电压/V	200 ~ 1 000	200 ~ 1 000
平均电流/A	0.5 ~ 3	0.5 ~ 3

实验结果如图 7 和图 8 所示。图 7 是电源单极电压输出波形,是典型的用于磁控溅射的直流脉冲输出波形。图 7 和图 8 是非对称双极脉冲波形,显然,频率和占空比可调。比较图 8(a)和 8(b),负向

脉冲插入到正向脉冲之后,在图 8(b)中可以明显看到换向时间已经改变。图 8(c)和 8(d)的波形用于双极性磁控溅射,由于双极性脉冲溅射工艺中负载呈容性,所以脉冲电压下降沿存在拖尾。

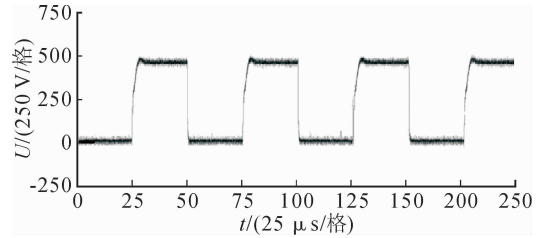
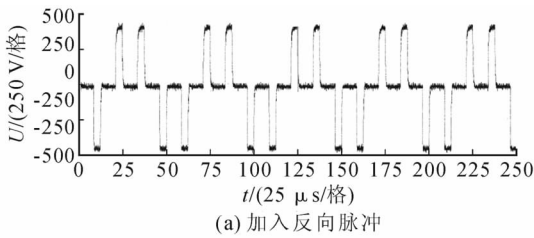
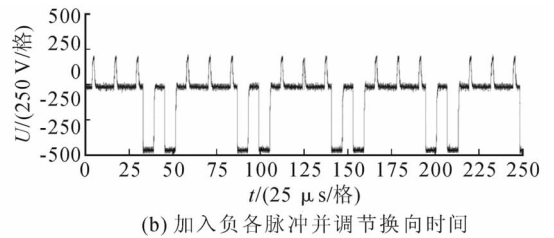


图 7 单极脉冲电压波形

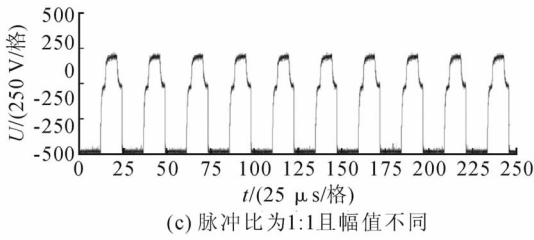
Fig. 7 The voltage waveforms of unipolar pulse



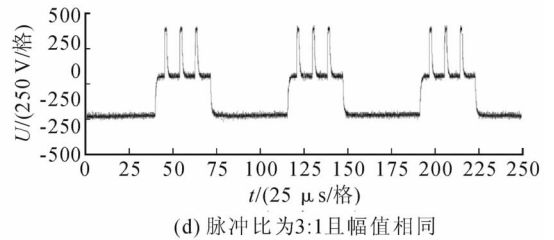
(a) 加入反向脉冲



(b) 加入负各脉冲并调节换向时间



(c) 脉冲比为1:1且幅值不同



(d) 脉冲比为3:1且幅值相同

图 8 非对称双极脉冲电源电压输出波形

Fig. 8 Output voltage waveforms of the asymmetric bipolar power

在其他外部条件(流量、气压、功率、靶距、工艺参数等)相同的条件下,分别通过直流、单极脉冲、非对称双极脉冲溅射沉积 Ag 电极薄膜,以验证该电源的抑弧性能,绘制对比曲线如图 9 所示。

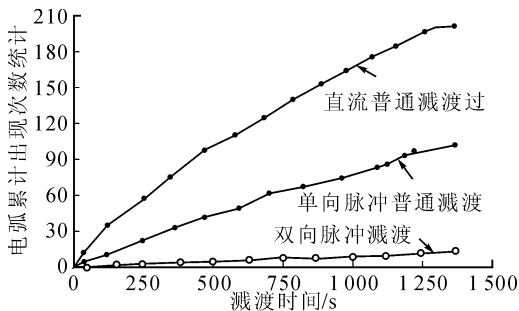


图 9 三种溅射模式下电弧发生次数对比曲线

Fig. 9 Correlation curves of arcing times with three kinds of sputtering mode

非对称双极脉冲溅射过程中的电弧出现次数远小于直流和单极脉冲溅射,在灭弧性能上优于直流

和单极脉冲电源。

根据理论分析和实验结果,非对称双极脉冲电源设计方案有效可行,输出电压脉冲实现了高自由度。

总体而言,本设计实现了非对称双极脉冲输出要求,满足设计指标。

## 4 结论

1) 针对磁控溅射应用技术,提出了一种非对称双极脉冲电源,通过 FPGA 控制,实现了高自由度脉冲管理。能够对脉冲参数包括脉冲个数、频率、占空比、正向脉冲和负向脉冲换向时间等进行自由调节;

2) 搭建了 6 kW/100 kHz 的样机以验证结果的有效性。非对称双极脉冲电源极大的灵活性和自由度,对提高磁控溅射技术以及解决磁控溅射领域的共性问题提供了良好的技术平台。

## 参考文献:

- [1] 丁宇,蒋百灵,田亚萍,等. 氧气流量对磁控溅射 AZO 薄膜光电性能的影响[J]. 西安理工大学学报, 2011, 27(3):306-310.  
Ding Yu, Jiang Bailing, Tian Yaping, et al. Influence of oxygen flux on optoelectronic properties of AZO films deposited by magnetron sputtering method[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2011, 27(3):306-310.
- [2] 白力静,李玉庆,肖继明,等. 闭合场非平衡磁控溅射离子镀技术在切削刀具上的应用[J]. 西安理工大学学报, 2006, 22(1):20-23.  
Bai Lijing, Li Yuqing, Xiao Jiming, et al. Closed field unbalanced magnetron sputter iron plating technique and its application to cutting tools[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2006, 22(1):20-23.
- [3] 赵志明, 蒋百灵, 郭伟. 基于磁控溅射技术沉积光伏电池用硅基薄膜材料的研究[J], 西安理工大学学报, 2009, 25(1):18-22.  
Zhao Zhiming, Jiang Bailing, Guo Wei. The study of Si-based thin films deposited by magnetron sputtering for photovoltaic cell[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2009, 25(1):18-22.
- [4] Zhong Ming, Ye Paresh, Sen C. A full-bridge resonant inverter with modified phase-shift modulation for high-frequency AC power distribution systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(5):1827-1835.
- [5] Rubio M, Corbella C, Garcia J, et al. Diamond like carbon films deposited from graphite target by asymmetric bipolar pulsed-DC magnetron sputtering[J]. Diamond & Related Materials, 2007, 16:1286-1290.
- [6] Céspedes J, Rubio M, Polo M C. Carbon nanotubes grown by asymmetric bipolar pulsed-DC PECVD[J]. Diamond & Related Materials. 2007, 16:1131-1135.
- [7] 邵桂荣, 畅福善. 基于 DSP 的磁控溅射电源设计与实现. 电力电子技术[J], 2011, 45(5):90-92.  
Shao Guirong, Chang Fushan. The design and implementation of magnetron sputtering power based on DSP[J]. Power Electronics, 2011, 45(5):90-92.
- [8] 刘福鑫, 阮洁, 阮新波, 等. 采用交变脉冲电源单元的隔离型多输入直流变换器[J], 电工技术学报, 2012, 7:174-183.  
Liu Fuxin, Ruan Jie, Ruan Xinbo, et al. Isolated multiple input DC-DC converter using alternative pulsating source as building cells[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 7:174-183.

(责任编辑 李虹燕)