

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2013.08.005

真空镀膜领域射频叠加直流偏压技术研究*

陈树君¹,王海亮¹,刘松¹,李振东²,王建新¹,徐晶晶¹

(1. 北京工业大学 机械工程与应用电子技术学院, 北京 100124;

2. 中国农业机械化科学研究院, 北京 100083)

摘要: 针对射频辉光放电过程中射频电源与直流偏压电源的叠加问题,通过分析阻抗匹配网络和高频屏蔽网络的工作原理,利用阻抗匹配网络将射频电源的高频能量最大效率的输出到真空室,利用高频屏蔽网络将射频电源的高频能量进行屏蔽的同时将直流偏压电源的低频能量最大效率的输出到真空室。对射频辉光放电过程中射频电源、直流偏压电源以及真空室模型进行了系统的电路仿真,实现了射频电源与直流偏压电源的叠加,利用自制的射频电源与直流偏压电源系统进行了真空镀膜实验,证实了双电源系统的可行性。研究表明,利用阻抗匹配网络和高频屏蔽网络能够很好地将射频电源与直流偏压电源进行叠加,由双电源系统产生的带有负偏压的高频能量能够对真空镀膜工艺产生影响,有助于探索新的镀膜工艺。

关键词: 射频电源; 直流偏压; 阻抗匹配; 真空镀膜

中图分类号: TN702; TQ153.7; TH140 **文献标志码:** A

文章编号: 1001-4551(2013)08-0919-06

Research of RF superimposed DC bias in field of vacuum coating

CHEN Shu-jun¹, WANG Hai-liang¹, LIU Song¹, LI Zhen-dong², WANG Jian-xin¹, XU Jing-jing¹

(1. College of Mechanical Engineering & Applied Electronics Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Aiming at the superposition of radio frequency(RF) power and DC bias power for the RF glow discharge process, by analyzing the operating principle of impedance matching network and high frequency shielding network, the impedance matching network can maximize the high frequency energy that transferred to the vacuum chamber, the high frequency shielding network can shield the high frequency energy and make the most of low frequency energy that transferred to the vacuum chamber. The RF power, DC bias power and vacuum chamber were simulated as a system in RF glow discharge process, the superposition of RF power and DC bias power was achieved, the vacuum coating experiment was carried out by self-made RF power and DC bias power system, the feasibility of the dual power system was confirmed. The results indicate that the impedance matching network and the high frequency shielding network make the superposition of RF power and DC bias power well, the high frequency energy with negative bias voltage produced by double power system can affect vacuum coating process and help to explore new coating process.

Key words: radio frequency(RF) power; DC bias; impedance matching; vacuum coating

0 引言

真空镀膜技术是一种新颖的材料合成与加工技术,系统由真空室、泵组、电源、控制系统等多个部件组成,涉及机械、电气、自动化、真空技术、薄膜技术等

多个领域,其中,电源部分是极其重要的组成部分,其性能直接影响镀膜工艺的流畅性和膜层质量^[1]。等离子体增强化学气相沉积法是真空镀膜的一种方法,该方法借助微波或射频等使含有薄膜组成原子的气体电离,在局部形成等离子体,而等离子体化学活性很

收稿日期: 2013-03-27

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)资助项目(6113112KY-2011-2)

作者简介: 陈树君(1971-),男,山东日照人,教授,博士生导师,主要从事电力电子技术与电磁兼容性和特种弧焊工艺及装备等方面的研究。

E-mail: sjchen@bjut.edu.cn

强,很容易发生反应,在基片上沉积出所期望的薄膜。

射频辉光放电会在真空室两端产生自偏压,该自偏压所产生的电场能够提高电子定向能量、电子温度和电子密度^[2],从而对真空镀膜效果产生影响,通过改变真空室两端的偏压大小可以改变真空镀膜效果,有助于优化镀膜工艺。现行的射频辉光放电镀膜设备主要采用射频电源,通过改变真空室内条件来调整真空室两端的偏压大小,受到了很大程度的制约。

为了探索新的镀膜工艺,需要设计射频与直流电源双系统,通过调节直流电源的输出来改变真空室两端的负偏压大小。因此,笔者将对双电源系统开展深入研究。

1 射频与直流双电源系统

1.1 系统组成

双电源系统由射频电源、直流电源、阻抗匹配网络和高频屏蔽网络组成,双电源系统输出带有负偏压的高频电信号,为真空镀膜提供电能。系统的组成如图1所示^[3]。

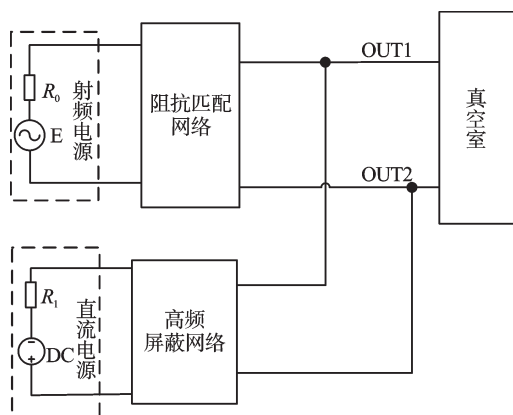


图1 射频与直流双电源系统组成

1.2 阻抗匹配网络电路原理及参数计算

阻抗匹配网络完成两个功能:①将射频电源的阻抗进行变换,使之与负载的阻抗相等,从而使功率最大限度的传输到负载^[4];②将射频电源与真空室进行隔离,使射频能量传输到真空室的同时又不妨碍真空室产生负自偏压,促进真空镀膜过程的进行。根据其功能可采用的阻抗网络如图2所示。

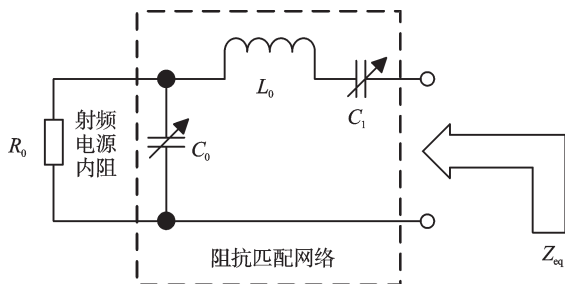


图2 射频电源输出端的阻抗匹配网络

射频电源的内阻为 R_0 ,射频电源的频率 f ,令 $Y_0 = 1/2\pi f \cdot C_0$, $Y_1 = 1/2\pi f \cdot C_1$, $X_0 = 2\pi f \cdot L_0$ 。

本研究根据以上条件以及电路原理图,从电源的输出端着手,电源输出的等效阻抗可以计算如下:

$$Z_{eq} = \frac{R_0 \times (-jY_0)}{R_0 - jY_0} + jX_0 - jY_1 = (X_0 - Y_1 - \frac{R_0^2 Y_0}{R_0^2 + Y_0^2})j + \frac{R_0 Y_0^2}{R_0^2 + Y_0^2} \quad (1)$$

电容 C_0 、 C_1 选择可调电容,由公式(1)可知,电容 C_0 可以调节等效阻抗实部大小,电容 C_0 确定后,电容 C_1 可以调节等效阻抗虚部大小^[5]。

在真空镀膜过程中,通过调节电容 C_1 ,使得整个输出网络中阻抗的虚部为零,可假设阻抗匹配网络满足等式:

$$X_0 - Y_1 - \frac{R_0^2 Y_0}{R_0^2 + Y_0^2} = 0 \quad (2)$$

即调节电容 C_1 ,使得 $Y_1 = [X_0 - R_0^2 Y_0 / (R_0^2 + Y_0^2)]$,此时,射频电源经过阻抗匹配网络后,等效的输出阻抗进行如下变换:

$$Z_{eq} = \frac{R_0 Y_0^2}{R_0^2 + Y_0^2} \quad (3)$$

进一步化简可得:

$$Z_{eq} = R_0 / \left[\left(R_0 / Y_0 \right)^2 + 1 \right]$$

所以,通过调节电容 C_0 的大小即可改变射频电源等效输出阻抗的实部。当电源输出阻抗与负载的阻抗相等时射频电源的输出功率达到最大,从而使电源的利用效率达到最高。

射频能量经过阻抗匹配网络输出到真空室后,在射频的作用下,由于离子与电子之间质量的悬殊差别而引起迁移率的差别,一端电极上势必积累电子,从而自动处于负偏置状态^[6],这就是真空室自偏压产生的原因。要产生这种负偏置状态除了真空室内的自身条件外还需要外界电路提供不阻碍其偏压状态产生的条件。图2中电容 C_1 就可以完成这个功能,电容具有隔断直流电压的能力,负偏压无法通过电容 C_1 ,从而屏蔽了射频电源内阻对负偏压造成的影响,使真空室内顺利产生自偏压。

1.3 高频屏蔽网络电路原理及参数计算

高频屏蔽网络主要有两个功能:①将射频电源的功率屏蔽掉,以避免射频的高能量损坏直流电源;②将直流电源的偏压输送到真空室,使真空室内的负偏置状态增强,提高碳离子在工件上的附着能力,有利于碳离子沉积形成类金刚石膜。其相当于一个低通网络,有时根据需要可采用两级甚至多级屏蔽网络^[7]。

其工作原理要从直流等效电路与射频等效电路

两个模型进行分析。

根据电容具有通高频隔低频,电感具有通低频隔高频的特性,直流电源供电的条件下,直流电源与高频屏蔽网络电路(如图3所示)可等效为直流等效电路(如图4所示)。

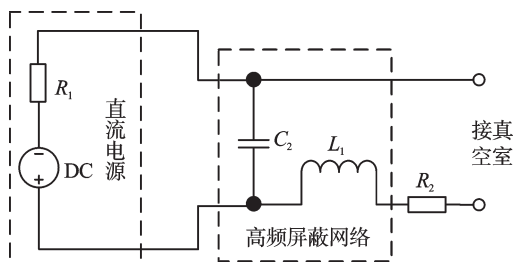


图3 直流电源与高频屏蔽网络电路

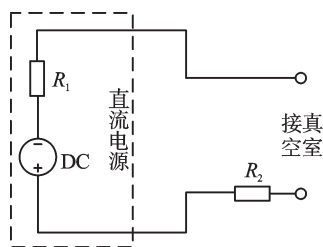


图4 高频屏蔽网络的直流等效电路

由图4可知,直流电源连接到高频屏蔽网络后仍等效为直流电源,等效后的输出电压与原直流电源电压相等,电源总内阻变为 $R_1 + R_2$ 。其中 R_2 为限流电阻。若假设真空室为恒定的负载电阻 R_{eq} ,真空室的偏压大小可近似为:

$$V_{DCoff} = \frac{R_{eq}}{R_1 + R_2 + R_{eq}} \times V_{DC} \quad (4)$$

高频屏蔽网络射频等效电路如图5所示,该电路中,RF_IN代表射频能量输入端,RF_OUT代表直流侧电源入口同时也是射频能量的输出口。射频屏蔽网络主要作用是将射频输入的能量尽可能地屏蔽掉,使RF_OUT端几乎无射频能量。

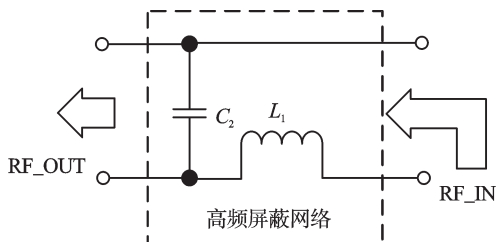


图5 高频屏蔽网络射频等效

射频能量通过高频屏蔽网络后,其输出端电压的有效值计算如下。

射频输入端,射频电压有效值为 V_1 ,射频电源频率为 f ;射频输出端射频电压有效值为 V_2 ,频率仍为 f 。令 $Y_2 = 1/2\pi f \cdot C_2$, $X_1 = 2\pi f \cdot L_1$ 。

根据图5可得方程:

$$\frac{V_2}{V_1} = \left| \frac{-j \cdot Y_2}{jX_1 + (-j \cdot Y_2)} \right| \quad (5)$$

上式化简后可得:

$$V_2 = V_1 \cdot \left| \frac{1}{1 - (X_1/Y_2)} \right| \quad (6)$$

令比例系数:

$$K = \left| \frac{1}{1 - (X_1/Y_2)} \right| \quad (7)$$

K 的取值可分为如下两种情况:

(1) 当 $K \geq 1$ 时, $V_2 \geq V_1$,此时高频屏蔽网络不起任何屏蔽作用。

(2) 当 $0 < K < 1$ 时, $V_2 < V_1$,这种情况下输出射频电压小于输入射频电压,但是由于屏蔽网络目的是将射频屏蔽掉,还应尽量使 K 接近零,这样才能使 V_2 接近零,从而将射频能量屏蔽掉。

由上可知,只有满足 $(X_1/Y_2) > 2$ 时,高频屏蔽网络才开始发挥屏蔽作用,但是要使得屏蔽效果足够好应该满足: $(X_1/Y_2) \gg 2$ 。即所选器件参数要满足条件:

$$(2\pi f)^2 L_1 C_2 \gg 2 \quad (8)$$

2 系统的建模仿真

2.1 系统搭建

整个系统的仿真电路如图6所示,射频电源通过阻抗匹配网络连接至真空室,阻抗匹配网络使射频电源阻抗与负载阻抗匹配,从而使得射频电源的功率输出达到最大;直流偏压电源通过高频屏蔽网络连接至真空室,高频屏蔽网络一方面将直流偏压能量输送到真空室,另一方面将射频能量屏蔽掉,防止高频能量损坏直流偏压电源,同时避免射频能量的浪费^[8]。

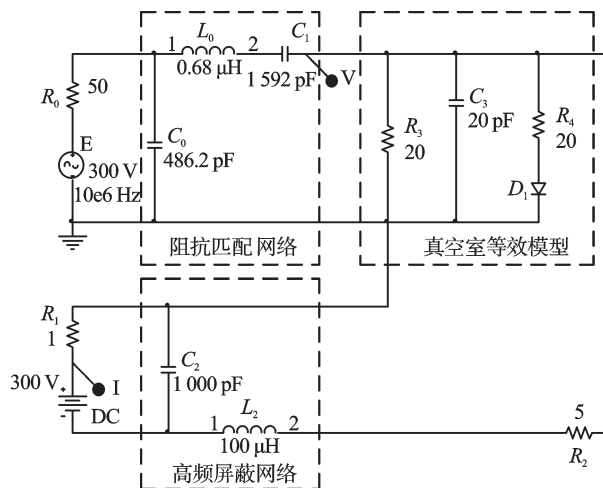


图6 射频与直流双电源仿真电路图

2.2 系统性能分析

2.2.1 阻抗匹配网络仿真分析

由于真空室的等效模型中有半导体器件,真空室的等效电阻不再是单个电阻,真空室两极板间等效电容较小,可忽略不计。在射频电压的正半周,二极管 D_1 导通,真空室等效阻抗为 $10\ \Omega$;在射频电源负半周,二极管 D_1 截止,真空室等效阻抗为 $20\ \Omega$ 。一个周期内,真空室的有效阻抗为 $R_{eq} = 1/2 \times 10 + 1/2 \times 20 = 15\ \Omega$,由公式(3)计算可得 C_0 为 $486.2\ \text{pF}$ 。隔直电容 C_1 阻抗要尽量小,此处选择 $10\ \Omega$,又 $Y_1 = 1/2\pi f \cdot C_1$,可计算出电容 C_1 为 $1\ 592\ \text{pF}$ 。根据公式(2)计算可得 L_0 为 $0.68\ \mu\text{H}$ 。本研究对无、有阻抗匹配网络分别进行仿真,其输出电压如图7、图8所示。

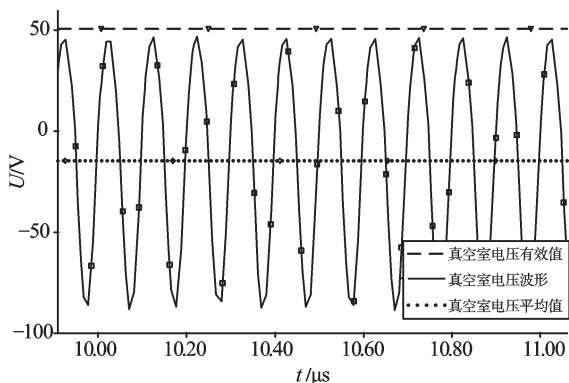


图7 无阻抗匹配时真空室电压波形

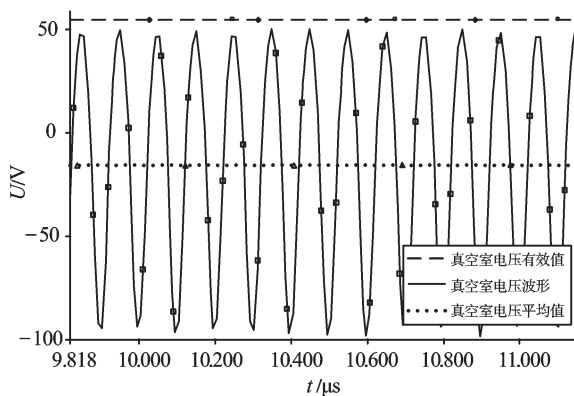


图8 阻抗匹配后真空室电压波形

在图7、图8中,类正弦波为真空室两端电压波形,50 V上侧的直流电压是真空室电压的有效值,0 V下侧为真空室电压的平均值。由图7、图8对比可知,两种情况下电压频率均为10 MHz,但是经过阻抗匹配器进行阻抗匹配后,真空室两端电压最大值、最小值、有效值、平均值的绝对值均有所增大。若将真空室看作 $15\ \Omega$ 的纯电阻负载,增加阻抗匹配器后射频输出功率增大了 $55^2 \div 15 - 50^2 \div 15 = 35\ \text{W}$,可见阻抗匹配器在其中发挥了关键作用。

2.2.2 高频屏蔽网络性能仿真分析

射频电源频率为 f 为10 MHz,电感 L_1 为 $100\ \mu\text{H}$,电

容 C_2 为 $1\ 000\ \text{pF}$,代入公式(8)得: $(2\pi f)^2 L_1 C_2 = 394.8$,满足远大于2的条件。

高频屏蔽网络性能可通过有、无高频屏蔽网络两种情况对真空室及偏压电源相关参数进行对比分析。

无、有高频屏蔽网络两种情况下真空室电压及流过直流偏压电源的电流波形图如图9、图10所示,其中0 V上侧的脉动电压为流过直流偏压电源的电流,位于-200 V位置的类正弦波为真空室两端的电压。通过对比不难得出,增加高频屏蔽网络后,真空室两端的射频能量增幅较大,输出到真空室的电压峰峰值(射频含量)增大了 $176.3\ \text{V} - 62.9\ \text{V} = 113.4\ \text{V}$,功率增大了 $238.8^2 \div 15 - 231.8^2 \div 15 = 219.6\ \text{W}$,所以高频屏蔽网络的引入大大增加了载有偏压的情况下真空镀膜的效率。而流过偏压电源的射频电流能量(如图10中0 V上侧波形所示)几乎减小到零,只剩下直流电流,说明高频屏蔽网络的屏蔽效果很好。

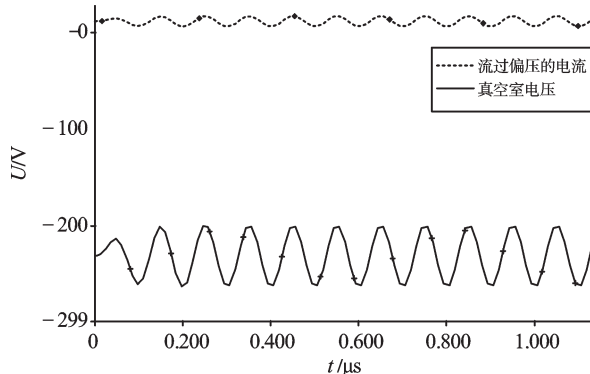


图9 无高频屏蔽时流过偏压电源的电流(上)和真空室电压(下)波形

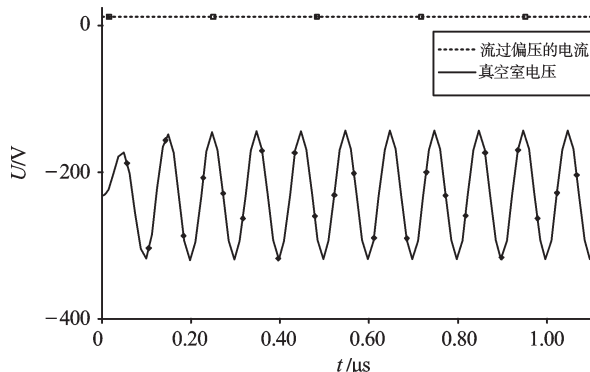


图10 加高频屏蔽时流过偏压电源的电流(上)和真空室电压(下)波形

高频功率串入直流偏压电源很可能会损坏其中的电子元器件,导致直流电源无法正常工作。而加入高频屏蔽网络后不但能有效地保护直流偏压电源,还能使高频功率的损耗减小,增大射频能量的利用率。

虽然直流偏压电源能够在一定范围内改变真空室两端的负偏压,但是由于射频辉光放电过程中真空室阻抗的非线性及复杂性,负偏压不可能无限制调

节,偏压调节仅是一定范围的调整。

3 真空镀膜实验

前文所述的阻抗匹配网络和高频屏蔽网络提供了射频电源与直流偏压电源叠加技术的实现方案,本研究利用两个阻抗网络搭建双电源系统并进行了如下的真空镀膜实验以验证双电源系统的性能。

镀膜前首先对合金刀片进行抛光和超声波清洗(丙酮+酒精清洗 10 min)。

实验条件及实验方法:①真空辉光清洗时间 10 min(通氩气 18 SCCM);②射频电源入射功率为 150 W;③真空室气压 20 Pa;④真空镀膜时间 10 min;⑤镀膜期间气体流量,氩气 18 SCCM,甲烷 6 SCCM。

在未加偏压电源前,真空镀膜过程中真空室两端会产生约 120 V 的自偏压。实验中调节自制的偏压电源,使真空室工作在不同偏压状态,偏压电源最高设计为 1 kV,对 6 个相同型号的合金刀片进行真空镀膜实验过程中,射频电源与直流偏压电源叠加后的输出波形如图 11 所示。

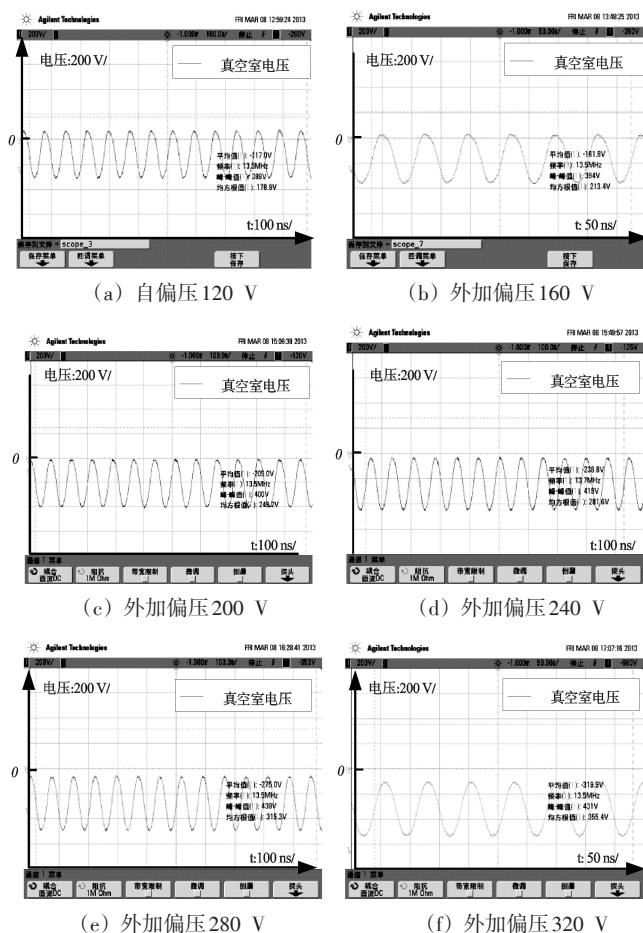


图 11 不同偏压时真空室两端电压

在图 11(a~f)实测波形中,电压的频率为 13.56 MHz,电压平均值依次为: -117.0 V(自偏压)、-161.8 V、

-205.0 V、-238.8 V、-275 V、-319.5 V 与设定偏压: -120 V、-160 V、-200 V、-240 V、-280 V、-320 V 稍有差别,主要是因为偏压电源的输出滤波电容较小,导致输出电压波动稍大。

在上述偏压条件及实验环境下,完成镀膜实验后的合金刀片如图 12 所示(刀片 1~6)。

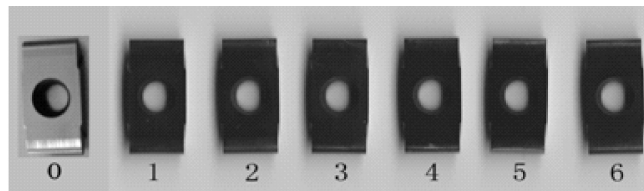


图 12 合金刀片镀膜前后

图 12 中,刀片 0 为镀膜前的合金刀片,通过与其他刀片的对比可以看出,合金刀片经过真空镀膜后,表面颜色由银白色变成深蓝色。由刀片 1~刀片 6 还可知不同负偏压条件下,镀膜效果差别较大^[9],图 12 中,自偏压情况下(刀片 1)真空镀膜后合金刀片呈色略深且较为粗糙,而通过外加偏压电源增大真空室负偏压后合金刀片呈色略浅且表面较为光滑^[10-11]。不同偏压下的耐磨性和薄膜厚度也不一致,相关理论研究也表明,直流偏压对膜的结构、力学性能、耐磨性、粗糙度以及机械性能等都有很大的影响^[12]。通过实验及输出波形证明射频与直流偏压电源系统能够很好地完成真空镀膜功能,并且能够进一步探索不同外加负偏压情况下对镀膜质量的影响。

4 结束语

(1) 笔者通过分析论证阻抗匹配网络的工作原理,给出了阻抗匹配网络的计算公式,通过设计合理参数对阻抗匹配网络进行电路仿真,说明了其实现阻抗匹配的具体原理。

(2) 本研究推导了高频屏蔽网络的工作原理,给出了实现高频屏蔽时的约束条件以及直流偏压的计算公式。设计参数对高频屏蔽网络进行电路仿真,说明了其实现高频屏蔽的具体方法。

(3) 本研究将阻抗匹配网络和高频屏蔽网络应用于射频电源与直流电源系统,对射频辉光放电过程中射频电源、直流偏压电源以及真空室模型进行了系统的分析建模,对仿真结果进行了分析,验证了理论的正确性和可行性。

(4) 本研究实际搭建了射频电源与直流电源的叠加网络并成功运用于真空镀膜实验,介绍了双电源系统对真空镀膜结果的影响。系统的搭建有助于进一步优化真空镀膜效果,以及探索新的镀膜工艺。

(下转第 955 页)

图4 测量结果界面

试验分析检定结果表明:置换法气体流量标准装置的扩展不确定度为 $U=0.09\%$ ($k=2$), 达到该设计 $U=0.15\%$ ($k=2$) 的要求^[10]。

3 结束语

本研究根据流体力学基本原理,采用液体置换法设计检测气体流量的标准方法。

研究表明,置换法气体流量装置具有操作方便、稳定性高、重复性好等优点,用置换方法标准气体校准流量计,符合国家量传系统中流量计的溯源。置换法气体流量装置校准 1 L/min 以下小流量气体流量计采用的是高液位负压法,由于流量计前为大气,液体流出时有小口径短管控制,无需加泵仅靠液体自

流就可达到恒压,计算和操作相对简单。置换法流量标准装置校准较大流量时采用泵产生恒定流量,从而达到恒压,使流量点的调节易于控制。置换法流量标准装置在流量量传体系中将起到重要作用,特别是在高准确度、小流量测量方面具有优势。

参考文献(References):

- [1] 周伟华. 浅谈流量计量的意义[J]. 计量与测试技术, 2008,35(8):85-86.
- [2] 徐英华. 浅谈气体流量标准装置的发展状况[J]. 现代测量与实验室管理, 2004(2):7-8.
- [3] 王自合. 气体流量标准装置[M]. 北京:中国计量出版社, 2005.
- [4] 王福军. 计算流体动力学分析[M]. 北京:清华大学出版社, 2004.
- [5] 刘建军. 流体力学[M]. 北京:北京大学出版社, 2006.
- [6] 段慧明. 液体流量标准装置和标准表法流量标准装置[M]. 北京:中国计量科学出版社, 2004.
- [7] 北京市计量科学研究所. JJG 257-1994 中华人民共和国国家计量检定规程:转子流量计[S]. 北京:中国计量出版社, 1994.
- [8] 王 池. 流量测量不确定度分析[M]. 北京:中国计量出版社, 2002.
- [9] 李慎安. JJG1059-1999 测量不确定度的评定与表示[M]. 北京:中国计量出版社, 1999.
- [10] 莫伟平. 液体置换法气体流量标准装置的研究[D]. 昆明:昆明理工大学信息工程与自动化学院, 2010.

[编辑:张 翔]

(上接第 923 页)

参考文献(References):

- [1] 周 强. 真空镀膜电源技术的创新与发展[C]//真空学会学术年会会议. 东莞:[出版者不详], 2007:113-115.
- [2] 庞 华, 葛袁静, 张跃飞, 等. 射频等离子体自偏压及其对聚合成膜的影响[J]. 北京印刷学院学报, 2003, 11(4):19-23.
- [3] HAO Jun-ying, XU Tao, LIU Wei-min. Effect of deposition pressure on microstructure and properties of hydrogenated carbon nitride films prepared by DC-RF-PECVD[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2005, 351 (49-51): 3671-3676.
- [4] 王翠珍, 吴凌燕, 陈世夏. 电路阻抗匹配网络的设计[J]. 机械与电子, 2009(33):109-110.
- [5] 王 亮. 射频电源与阻抗自动匹配技术研究[D]. 哈尔滨:黑龙江大学电气工程学院, 2010.
- [6] 楚信谱, 苟 伟, 李国卿, 等. 射频辉光放电自偏压对类金刚石碳膜结构和性能的影响[J]. 真空科学与技术学报, 2006, 26(z1):143-145.
- [7] MIKAMI Y, YAMADA K, OHNARI A, et al. Effect of DC bi-

as voltage on the deposition rate for Ni thin films by RF-DC coupled unbalanced-magnetron sputtering[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2000, 133-134(1):295-300.

- [8] XU Nian-kan, YIN Da-chuan, LIU Zheng-tang, et al. The effects of applied bias voltage on structure and hydrogen content of a-C:H films[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 1997, 30(5):763-768.
- [9] 吉 利, 李红轩, 赵 飞, 等. 电感耦合射频等离子体增强化学气相沉积类金刚石薄膜偏压的影响[C]//第七届全国表面工程学术会议. 武汉:[出版者不详], 2008:353-356.
- [10] 张嘉波, 张 宪. 多焊接电源控制技术[J]. 轻工机械, 2011, 29(4):63-67.
- [11] 常海波, 徐 洮. 直流负偏压对类金刚石薄膜结构的影响[J]. 化学研究, 2005, 16(1):35-38.
- [12] LI H X, XU T, CHEN J M, et al. The effect of applied dc bias voltage on the properties of a-C:H films prepared in a dual dc-rf plasma system[J]. *Applied Surface Science*, 2004, 227(1):364-372.

[编辑:张 翔]