

激光与光电子学进展

一种降低气体辉光放电驱动用恒流源功耗电路

王永清*, 刘欢**, 万真真, 沈懿璇

河北大学电子信息工程学院, 河北 保定 071002

摘要 为了便于气体放电等离子体的起燃, 驱动恒流源需要较高的开路电压, 同时因气体放电具有负阻效应, 起燃后维持放电所需的电压远小于起燃电压, 起燃后富余的电压会造成恒流源具有较大功耗。鉴于此, 提出一种降低气体辉光放电驱动用恒流源功耗电路方案, 给出电路原理图并详细分析其工作原理。本方案使用开路电压略高于气体放电维持电压的恒流源来降低功耗, 使用高压脉冲压电陶瓷来保证气体放电可靠起燃, 恒流源与高压脉冲电路由高压硅堆隔离后并联工作。实验结果表明, 当电路工作正常时, 可降低约为 50% 的功耗。在直流辉光放电实验平台上对镀锌板进行样品精密度的实验测试, 发现 Cu、Si 和 Mo 等元素含量(谱线强度)的相对标准偏差(RSD)均优于 2%。

关键词 表面光学; 高压脉冲压电陶瓷; 开路电压; 功耗; 负阻效应; 高压硅堆

中图分类号 TH744

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1924001

Low Power Consumption Circuit of Constant Current Source for Driving Gas Glow Discharge

Wang Yongqing*, Liu Huan**, Wan Zhenzhen, Shen Yixuan

College of Electronic Information Engineering, Hebei University, Baoding, Hebei 071002, China

Abstract In order to facilitate the ignition of the gas discharge plasma, a high open circuit voltage is required to drive the constant current source. At the same time, because of the negative resistance effect of gas discharge, the voltage required to maintain the discharge after ignition is far less than the ignition voltage, and the surplus voltage after ignition will result in a large power consumption of the constant-current source. In view of this, a circuit scheme to reduce power consumption of a constant current source for glow-discharge drive is proposed, and its working principle is analyzed in detail. In this scheme, a constant current source with an open circuit voltage slightly higher than the maintenance voltage of gas discharge is used to reduce power consumption, and a high-voltage pulse piezoelectric ceramic is used to ensure reliable ignition of gas discharge. The constant current source and the high-voltage pulse circuit work in parallel after being isolated by high-voltage silicon stack. Experimental results show that when the circuit works normally, the power consumption can be reduced by about 50%. The sample precision test of the galvanized sheet is carried out on the direct current glow discharge experimental platform, and it is found that the relative standard deviation (RSD) of the test results of Cu, Si, and Mo contents (spectral line intensity) are all greater than 2%.

Key words optics at surfaces; high voltage pulse stamping ceramics; open circuit voltage; power consumption; negative resistance effect; high voltage silicon stack

OCIS codes 240.6680; 300.6190; 300.6350

收稿日期: 2020-11-30; 修回日期: 2021-02-04; 录用日期: 2021-03-02

基金项目: 河北省专业学位研究生教学案例库项目(KCJSZ2018010)、钢铁研究总院与河北大学合作课题

通信作者: *125254397@qq.com; **1262030094@qq.com

1 引言

辉光放电等离子体激发光源具有基体效应小、分析灵敏度高和激发能力强等特点^[1-3],其突出优点是可对样品表面进行深度方向的逐层分析,为此在镀层、表面处理和产品质量控制等分析测试领域中得到越来越广泛的应用^[4-6]。

辉光放电激发源的种类有很多,按照供电电源类型的不同,可分为直流和射频两种供能方式。当采用直流恒流源供能时,若开路电压过低,则难以起辉,若开路电压过高,则功耗过大,这对元器件的选择造成困难^[7-11]。因此,对于直流辉光放电驱动电源的研究具有重要的意义。

本文阐述该恒流源电路的设计思路和电路原理,并对其工作原理进行详细分析。与传统直流辉光放电驱动电路所使用的恒流源相比,本文使用的高压脉冲压电陶瓷可以保证气体的可靠起燃,使用开路电压略高于气体正常工作电压的恒流源,可以降低功耗,二者辅以 2CL71A 型高压硅堆进行隔离,可降低恒流源约为 50% 的功耗。在直流辉光放电平台上对镀锌板样品进行精密度分析测试,测得样品中 Mo、Si 和 Cu 等元素的谱线强度的相对标准偏差(RSD)均优于 2%。

2 工作原理与结构分析

辉光放电现象是一种在低气压下气体放电的现象,在该过程中形成的等离子体处于非热力学平衡的低温冷等离子体。当传统的直流辉光放电光源工作时,需要 500~1500 V 的高电压以及 0~100 mA 连续可调的电流,光源所处的放电室抽真空至 10 Pa 左右,充入氩气后的压强范围为 100~1500 Pa^[12-13];放电室内的氩气被击穿后可以形成稳定的氩气等离子体,受到电场加速的氩离子轰击样品阴极,可以使样品表面的原子被溅射激发并产生特征光谱,对光谱信号进行检测,可对样品元素进行定性和定量分析^[14-15],结构框图如图 1 所示^[16]。

辉光放电室作为恒流源的负载,其中氩气气压的不同会呈现出不同的等效阻抗。放电过程中,放电气体的阻值会出现负阻特性等复杂变化^[16],即 $R = dV/dI < 0$,其中 R 为放电气体所形成的等离子体电阻, V 为放电室中电极的电压, I 为放电等离子体的电流。气体放电的负阻特性曲线如图 2 所示^[17-19]。

从图 2 可以看到,在电压达到起辉电压 V_{ignition} 后,电压随着电流的增加而下降并趋于稳定,此时

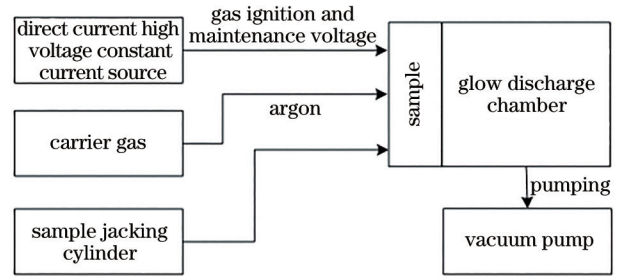


图 1 传统辉光直流放电的结构框图

Fig. 1 Block diagram of traditional glow direct current discharge

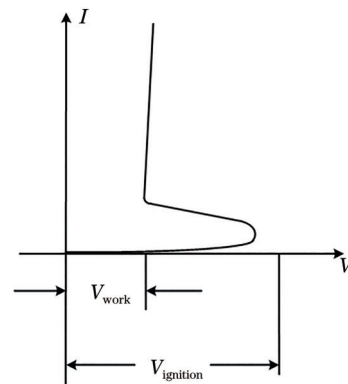


图 2 气体放电的负阻特性曲线^[17-19]

Fig. 2 Negative resistance characteristic curve of gas discharge^[17-19]

气体进入正常的放电状态,电压稳定在气体正常的工作电压 V_{work} ,而 $V_{\text{work}} < V_{\text{ignition}}$ 。根据气体在放电过程中呈负阻特性的这一特点,对驱动电源电路进行改进,并应用在直流辉光放电的结构框架中,改进的直流辉光放电结构框图如图 3 所示。

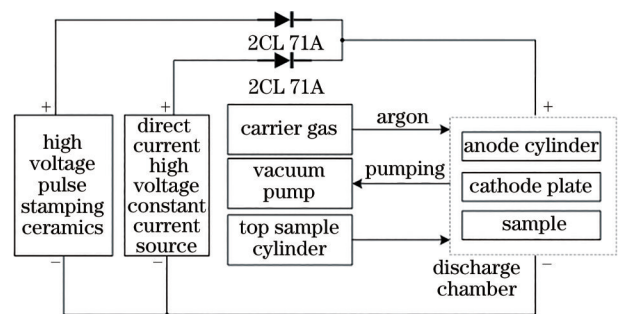


图 3 改进的直流辉光放电结构

Fig. 3 Improved direct current glow discharge structure

从图 3 可以看到,在小型化的直流辉光放电实验平台上,使用高压脉冲压电陶瓷作为激发源的点火装置,通过两片陶瓷的猛烈撞击来产生几千伏的高压,从而保证气体放电的可靠起燃。随后由开路电压略高于 V_{work} 的恒流源来维持气体稳定放电,二者辅以 2CL71A 型高压硅堆进行隔离。2CL71A 型高压硅堆的具体参数如表 1 所示。

表1 2CL71A型高压硅堆的参数
Table 1 Parameters of type 2CL71A high pressure silicon reactor

Parameter	Value	Unit
Repeat voltage	8	kV
Average forward current	5	mA
Non-repetitive forward surge current	0.5	A
Forward voltage drop	25	V
High temperature reverse current	5	μA
Reverse recovery time	100	ns

3 供能源分析

3.1 开路电压

采用本课题组前期自行研制的直流高压恒流源作为辉光放电驱动电源,当氩气压强为 210 Pa,恒流源的开路电压 U_{o1} 的取值范围为 1210~1215 V 和电流 I_0 为 39 mA 时,对镀锌板样品进行溅射激发测试,样品中 Mo、Si 和 Cu 等元素的相对标准偏差 (RSD) 均优于 2%^[20]。

本文利用高压脉冲压电陶瓷所产生的瞬间高压来保证气体的可靠起燃,使用恒流源来维持气体持续放电。氩气压强为 210 Pa,恒流源的开路电压 U_{o2} 的取值范围为 595~600 V,电流 I_0 为 39 mA,对镀锌板样品进行溅射激发测试,样品中 Mo、Si 和 Cu 等元素的相对标准偏差 (RSD) 均优于 2%。

与传统的直流辉光放电驱动电源相比,采用本文所设计的供能源电路,恒流源的开路电压 U_0 可降低约为 600 V,这改善了直流辉光放电起辉不易与供能源开路电压较高的不足。

3.2 功率损耗

当使用直流高压恒流源供能时,起燃后的工作电压约在 500~1500 V 之间,但起燃过程中需要更

高的电压,甚至需要恒流源开路电压 U_0 达到 1500 V 方可保证激发源的可靠起燃。因此,当对样品进行激发溅射时,供能源的输出功率 P_0 较大,表达式为

$$P_0 = U_0 I_0 \quad (1)$$

本文的设计始终选用氩气作为工作气体,当气体放电起燃后进入正常工作状态时,富余的电压使恒流源具有较大的功率损耗 P_{loss} ,表达式为

$$P_{loss} = P_0 - P_{work} \quad (2)$$

式中: P_{work} 为恒流源调整管的耗散功率。当采用本课题组自行研制的直流高压恒流源供能时,恒流源的开路电压 U_{o1} 在 1210~1215 V 之间,电流 I_0 为 39 mA, $P_0 \approx 47.3 \text{ W}$, P_{work} 值未知^[20]。高压脉冲压电陶瓷的引入,直流恒流源只需提供电压 V_{work} ,此时直流恒流源 U_{o2} 在 595~600 V 之间, $I_0 = 39 \text{ mA}$, $P_{work} \approx 23.3 \text{ W}$ 。因此, $P_{loss} = P_0 - P_{work} = 47.3 \text{ W} - 23.3 \text{ W} = 24.0 \text{ W}$ 。由此可知,对直流辉光放电所用的驱动电源改进后,功耗降低显著,可降低约为 50% 的功耗。

4 实测结果分析

将改进型驱动电源电路应用在小型化的直流辉光放电实验平台上,对镀锌板样品进行 7 组测试。同时采用阶跃型光纤对光谱信号进行传导,采用 AvaSpec-ULS2048 型的便携式 CCD (Charge Coupled Device) 光谱检测仪对元素光谱信号进行采集,提取元素光谱强度并计算 RSD 差值。

实验设定的工作参数:直流恒流源的电压约为 600 V,氩气压强为 210 Pa,样品溅射时间为 5 min,阴极盘的材料选用聚四氟乙烯,使用高压脉冲压电陶瓷作为点火装置,由直流恒流源提供放电电压 V_{work} ,对镀锌板样品共进行 7 次溅射激发,选取其中一组数据进行分析,样品中 Cu、Si 和 Mo 等元素光谱如图 4 所示。

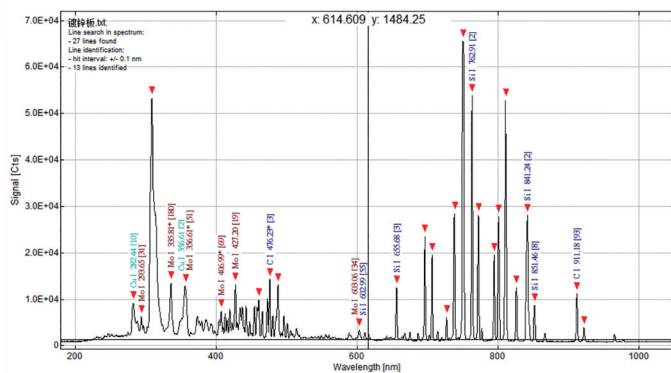


图4 镀锌板样品中 Cu、Si 和 Mo 等元素的光谱图
Fig. 4 Spectrograms of Cu, Si, and Mo in galvanized sheet samples

从图 4 可以看到,镀锌铁板中的元素含量较多,在对元素光谱进行分析的过程中,只标记样品中

Cu、Si 和 Mo 等元素。镀锌板样品中各元素的光谱强度及 RSD 值如表 2 所示。

表 2 镀锌板中元素的光谱强度及 RSD 值

Table 2 Spectral intensities and RSD values of elements in galvanized sheet

Number of groups	Spectral intensity of Cu /Counts	Spectral intensity of Si /Counts	Spectral intensity of Mo /Counts
1	6485.2	21065.6	25602.3
2	6420.6	20456.5	24505.2
3	6402.4	21218.8	24698.7
4	6367.8	20337.6	24990.6
5	6301.5	20151.2	24810.5
6	6251.1	20564.2	24958.4
7	6187.5	20962.8	25791.3
RSD /%	1.6366	1.9535	1.8893

从表 2 可以看到,对镀锌板进行 7 次溅射激发测试分析,镀锌板中 Cu、Si 和 Mo 等元素的谱线强度的相对标准偏差(RSD)均优于 2%。

5 结 论

本文设计一种降低恒流源功耗的电路并应用于直流辉光放电激发源。驱动电源使用高压脉冲压电陶瓷来保证气体放电的可靠起燃,起辉后使用开路电压略高于气体放电维持电压的恒流源来维持气体的持续放电,恒流源与高压脉冲电路由 2CL71A 型高压硅堆隔离后并联工作,经实测验证该电路的可行性。

对所设计的恒流源电路的开路电压与功耗进行分析。结果表明,与传统的直流高压恒流源相比,该恒流源可以改善以往直流辉光放电起辉不易与供能源开路电压较高的缺点,开路电压由 1200 V 左右降至 600 V 左右,在提高点火成功率的同时降低功耗,可降低约为 50% 的功耗。

将该恒流源应用在小型化的直流辉光放电实验平台上,对镀锌板样品进行激发测试分析,Cu、Si 和 Mo 等元素含量(谱线强度)的相对标准偏差(RSD)均优于 2%。

参 考 文 献

- [1] Yu X, Luo J Q, Chen Y Y, et al. Development of a glow discharge optical emission spectrometer[J]. Analytical Instrumentation, 2011(6): 9-16.
余兴, 罗剑秋, 陈永彦, 等. 国内辉光放电光谱仪的研制[J]. 分析仪器, 2011(6): 9-16.
- [2] Xin X W. Glow discharge optical emission spectrometer and its application in research of steel sheet surface

[J]. Metallurgical Standardization & Quality, 2006, 44(4): 20-22.

辛学武. GDA750 辉光光谱仪及其在钢板表面等分析中的应用[J]. 冶金标准化与质量, 2006, 44(4): 20-22.

- [3] Qiu H O, Bao Y Q, Kong B B. Recent advances and applications of atomic spectrometry analysis[J]. Chinese Journal of Analysis Laboratory, 2018, 37(1): 108-124.

邱海鸣, 包娅琪, 孔贝贝. 原子光谱分析的研究进展及应用现状[J]. 分析实验室, 2018, 37(1): 108-124.

- [4] Huang M S, Xu Y W, Cheng M. Atmospheric pressure and large volume non-equilibrium plasma discharge technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(5): 0500007.

黄民双, 许友文, 程苗. 大气压大体积非平衡等离子体放电技术[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(5): 0500007.

- [5] Molchan I S, Thompson G E, Skeldon P, et al. Analysis of molecular monolayers adsorbed on metal surfaces by glow discharge optical emission spectrometry [J]. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 2013, 28(1): 121-126.

- [6] Wagatsuma K. Emission characteristics of mixed gas plasmas in low-pressure glow discharges[J]. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 2001, 56(5): 465-486.

- [7] Cheng M, Yu J C, Zhang J L, et al. Design of novel glow discharge device and research on key parameters [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2017, 36(9): 22-24.

程明, 俞建成, 张俊良, 等. 新型辉光放电装置设计与关键参数研究[J]. 传感器与微系统, 2017, 36(9): 22-24.

- [8] Wan Z Z. Design of drive and controll circuit for glow discharge plasma excitation source[D]. Baoding: Hebei University, 2006.
万真真. 辉光放电等离子体激发源驱动控制电路设计[D]. 保定: 河北大学, 2006.
- [9] Luo J Q. Study on excitation source of RF glow discharge coupled with ICP[D]. Baoding: Hebei University, 2007.
罗剑秋. 射频辉光放电与 ICP 联用光谱激发源研究[D]. 保定: 河北大学, 2007.
- [10] Qian Y, Feng Y Q, Huang M S, et al. Numerical simulation of laser assisted pulsed discharge in water to generate plasma[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(07): 0735001.
钱杨, 冯音琦, 黄民双, 等. 激光辅助水中脉冲放电生成等离子体的数值模拟[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(07): 0735001.
- [11] Bondarenko G G, Kristya V I, Supelnyak M I. Calculation of the electrode surface temperature in the normal glow discharge[J]. Vacuum, 2012, 86(7): 854-856.
- [12] Wan Z Z, Wang Y Q, Shi N, et al. Radio frequency power supply automatic control system for glow discharge optical emission source[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(6): 1942-1948.
万真真, 王永清, 施宁, 等. 辉光放电光谱激发源的射频功率驱动及自动控制系统[J]. 高电压技术, 2016, 42(6): 1942-1948.
- [13] Wan Z Z, Wang Y Q, Li X J, et al. Automatic adjustment control system for DC glow discharge plasma source[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011, 31(3): 839-843.
万真真, 王永清, 李小佳, 等. 直流辉光放电等离子体激发光源自动调节控制系统[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(3): 839-843.
- [14] Zhang C. Improvement of a compact glow discharge system and its application in galvanized sheet analysis [D]. Baoding: Hebei University, 2019.
张闯. 小型辉光放电系统改进及在镀锌板分析中的应用[D]. 保定: 河北大学, 2019.
- [15] Yu X, Wang H Z, Li X J. Improvements and prospect of glow discharge source for analytical applications[J]. Analytical Instrumentation, 2006(4): 9-14.
余兴, 王海舟, 李小佳. 辉光放电光源在分析应用上的改进及展望[J]. 分析仪器, 2006(4): 9-14.
- [16] Wang Y Q. The study on radio frequency glow discharge plasma excitation source and the enhancement [D]. Beijing: Central Iron & Steel Research Institute, 2010.
王永清. 射频辉光放电等离子体光谱激发源及其增加效应研究[D]. 北京: 钢铁研究总院, 2010.
- [17] Kan X L. Plasma electronic engineering[M]. Zhang H B, Zhang D, Transl. Beijing: Science Press, 2002.
菅井秀郎. 等离子体电子工程学[M]. 张海波, 张丹, 译. 北京: 科学出版社, 2002.
- [18] Lu Q S. The development and application of ballast (1)[J]. The World of Power Supply, 2005(9): 32-37.
路秋生. 高频交流电子镇流技术的发展与应用(一)[J]. 电源世界, 2005(9): 32-37.
- [19] Muhl S, Pérez A. The use of hollow cathodes in deposition processes: a critical review[J]. Thin Solid Films, 2015, 579: 174-198.
- [20] Wang J. DC high voltage constant current source for glow discharge spectrometer excitation source[D]. Baoding: Hebei University, 2020.
王晶. 辉光放电光谱仪激发源用直流高压恒流源[D]. 保定: 河北大学, 2020.