

介质阻挡放电忆阻特性分析

为了研究介质阻挡放电放电间隙的伏安特性,搭建同轴介质下介质阻挡放电的电路模型,研究其放电过程中的电压和电流关系从而得到其伏安特性曲线,对放电过程中的气体电压、放电电流和电荷变化进行分析。搭建忆阻器Matlab仿真模型,仿真得到忆阻器的伏安特性曲线,对忆阻器电气特性进行分析。通过分析比较发现介质阻挡放电过程中具有忆阻特性。

杨慧彬 孙岩洲 谢春玮 孙念念/河南理工大学电气工程与自动化学院

0 引言

介质阻挡放电(Dielectric Barrier Discharge, DBD)是将绝缘介质插入放电空间的一种高压交流气体放电形式,绝缘介质可以在电极上也可以在放电空间内。这样的放电结构只要在电极上施加一定的交流电压就可以工作,两个电极间(或极板)的气体就会被击穿而发生放电。因为DBD在放电时刻没有很大的放电声响,所以又称无声放电。DBD能在大气压下或高于大气压下产生大体积、高能量密度的低温等离子体,所以在工业有着广泛应用,如臭氧产生、废气处理、灭菌消毒以及照明显示等^[1-4]。

忆阻器全称记忆电阻,1971年华裔科学家蔡少棠教授最早提出忆阻器概念,当时任教于加州大学伯克利分校的蔡少棠教授在研究电荷、电流、电压和磁通量之间的关系时,推断在电阻、电容和电感器之外,还存在一种组件,用来表示电荷与磁通量之间的关系。这是

忆阻器最初的理论框架,后来经过不断的研究,人们把忆阻器定义为一种有记忆功能的非线性电阻,但当时并不存在忆阻器的实物。直到2008年惠普公司宣布研制出固态忆阻器,证明了蔡少棠教授的预测。近些年对于忆阻器的研究越来越热门,许多研究部门都加入了忆阻器的研究行列,其中主要有HP实验室的TiO₂薄膜器件,Intel与Numonyx B V等公司研制的相变存储器(PCM),Unity公司的复杂金属氧化物(CMO)存储器件,Ramtron和富士通公司推出的铁电存储器(FeRAM),还有密歇根大学研制的硅和银合金的薄膜存储器件^[5-9]。在国内方面,郑州大学杨丽徒教授在20世纪90年代提出了气体放电灯的伏安特性具有流控忆阻特性^[10]。

本文作者前期对DBD的伏安特性进行了研究,在此期间发现DBD在放电过程中气体电压与放电电流具有忆阻特性。本文对DBD过程中的电荷、电流和电压进行了进一步的分析并与忆阻器的伏安特性进行了详细的比较。

1 DBD的伏安特性

DBD的放电结构有很多种。DBD的放电形式由于放电电极结构的不同,可以分为平板结构和同轴结构。本文主要研究同轴介质下DBD的伏安特性。

同轴线管DBD中高压电极是固定在石英玻璃管中心,用金属薄片紧紧地缠绕在玻璃管外壁作为接地电极。实验装置采用50 Hz的交流电源,为了保证放电能够稳定产生,电源要求有足够高的输



杨慧彬/硕士研究生

关键词/Keywords

介质阻挡放电·
忆阻器·
伏安特性·
忆阻特性·

国家自然科学基金及河南人才培养联合基金“基于微电极结构的介质阻挡放电及等离子体三极管研究”(U1204506),第46批教育部留学回国人员科研基金。

出电压和足够大的功率^[11]。其装置原理及电气接线图如图1所示。

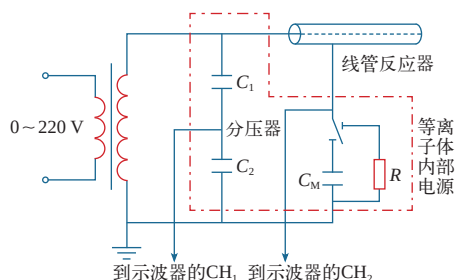


图1 电气连接图

由于DBD结构的独特性，在极板之间有绝缘介质的存在，所以可以在工频电源下实现稳定的放电。图1中，同轴线管的放电电路由高压电源、阻挡介质层和放电气隙三个部分组成。通过高压探头连接示波器的CH₁可以测量线管两极的外加电压，当CH₂通过电容连接示波器时，可以测量放电过程中传输的电荷量，当CH₂通过电阻连接示波器时，可以测量放电过程中产生的电流大小。

本次实验中选用的工作条件为放电空间0.6 cm、介质层厚度0.1 cm和线电极半径0.1 cm，并且在大气压下，外加电压的工作频率为5 kHz^[12]。本次实验主要研究在放电过程中的伏安特性，所以预放电过程中的伏安特性不用考虑。放电过程的伏安特性曲线如图2所示。

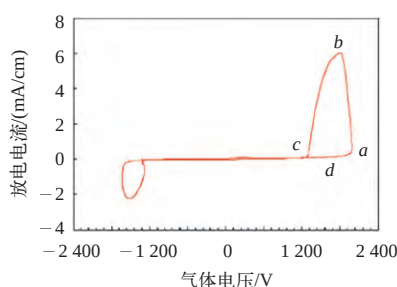


图2 DBD的伏安特性

在电压刚开始加在线管两端时，随着外加电压的增加气体电压也会增加。当外加电压幅值增加到1 800 V时，气体被击穿，气体电压会急剧下降，此过程一直到放电结束。然后，气体电压又会随着外加电压增加而增加，当外加电压达到正向峰值之后，气体电压又会随着外加电压的降低而降低，直到下半周期出现电流脉冲后，气体电

压会迅速上升，放电结束后，气体电压仍会与外加电压一起降低，当外加电压达到负向峰值时，气体电压与外加电压又都开始增加。在一个放电周期内会出现两次较大的电流脉冲，正半周期和负半周期各一个，并且两次的电流脉冲不对称。之所以两次电流脉冲不对称是因为在正半周时当外加电压不断升高，气体电压也随着增加，当到气体的击穿电压时，发生气体击穿，开始放电，大量的离子流向阴极并且积累到介质板上，这样形成了一个反向电场，使气体电压下降，放电终止。而在后半周期，外加电压的方向改变，前半周期积累的电荷产生的电场与外加电场方向一致，外加电压小于气体的击穿电压即可使气体击穿。这样使负半周期的气体电压和放电电流最大值的绝对值均小于正半周期，所以出现不对称现象。

2 忆阻器的伏安特性

蔡少棠教授从对称性的角度出发，预言除电阻、电感和电容外，电子电路中还应存在第四种基本元件——忆阻器^[13]，蔡少棠教授指出电压 v 、电流 i 、电荷 q 和磁通量 Φ 是电路中四个基本变量，它们之间存在六种数学关系：电流为电荷关于时间的变化率 $i = dq/dt$ ；电压为磁通量关于时间的变化率 $v = d\Phi/dt$ ；电阻为电压随着电流的变化率 $R = dv/di$ ；电容为电荷随着电压的变化率 $C = dq/dv$ ；电感为磁通量随着电流的变化率 $L = d\Phi/di$ ；还有一种能够将电荷 q 与磁通量 Φ 联系在一起的电路元件，就是忆阻器。电路中四种基本元件关系如图3所示。

惠普实验室根据蔡少棠教授的忆阻器原理制

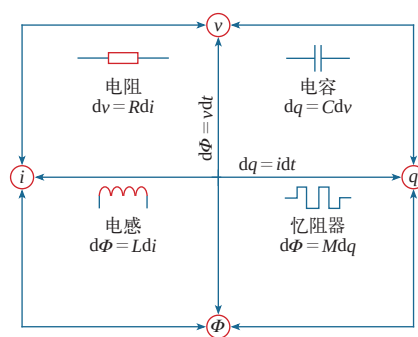


图3 四个基本电路元件关系图

造出了一种忆阻器物理模型,在两个铂片内放置两层纳米级的 TiO_2 薄膜。一层掺杂有氧空位,相当于半导体;另一层没有掺杂有氧空位,相当于绝缘体^[15]。根据这个物理模型可以建立忆阻器的数学模型,通过Matlab对忆阻器进行仿真,通过仿真得到忆阻器的伏安特性和其他特性的图形,方便很进一步地研究忆阻器的各种特性。

忆阻器的Matlab仿真模型如图4所示,在模型中忆阻器的记忆功能是通过一个带反馈的积分器来实现,通过窗函数 $f(x) = 1 - (2x - 1)^{20}$ 来实现忆阻器非线性特性。在模型中输入模块是正弦电压源,幅值为1 V,频率是1 Hz,忆阻器的等效电阻为 $R = 1\,000\ \Omega$ ^[14-18]。

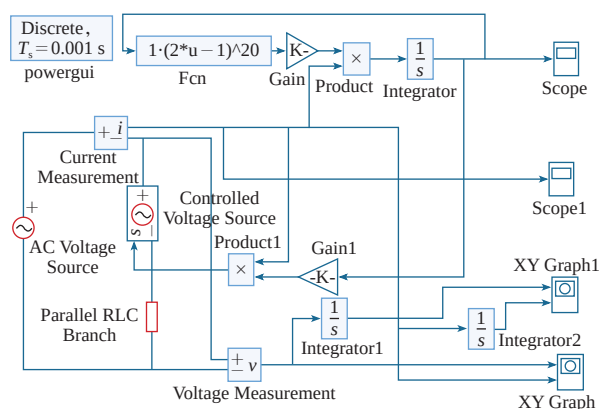


图4 忆阻器的Matlab仿真模型

现在的研究大多数是对忆阻器进行建模仿真,随着对忆阻器的研究不断深入,研究人员通过仿真的结果分析其各种特性,本文主要研究忆阻器的伏安特性,如图5所示。

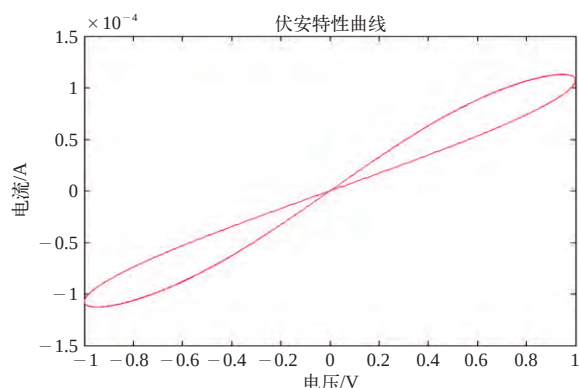


图5 荷控忆阻器的伏安特性曲线

由图5可以看出忆阻器的伏安特性曲线为光

滑的“8”字曲线,称之为斜体“8”字形紧磁滞回线。忆阻器是一个电子阻变的元件,即忆阻器阻值变化与电荷的变化有关。忆阻器的内容涵盖范围很广,阻变机理也有所不同,目前许多机理还没有研究清楚甚至还存在一定的争议。对忆阻器阻变机理可归纳为离子效应、电子效应和热效应。这三种效应并不是孤立存在的,有时它们会共同起作用。在忆阻器两端加上电压会产生两种主要的效应:电场和焦耳热,电场作用下离子、电子将发生转移,同时焦耳热也会对转移过程产生一定影响。本文主要说明的阻变机理是电子效应,电子效应是基于电子运动的一种物理现象,一般通过电荷注入和电荷转移对能带结构和势垒等造成改变从而改变其电阻。当界面为欧姆接触时,电荷注入会引起空间电荷,也可使器件出现滞回特性。电荷转移发生在电子给体和受体之间,在电场作用下发生电荷转移而引起阻变^[19]。这样就出现了忆阻器“8”字形磁滞回线,说明忆阻器具有非线性特性,其伏安特性成非线性变化,说明其电阻值在不断变化。

3 DBD过程中的忆阻特性

由图2可以看出来最开始时气体电压为零,随着外加电压的增加气体电压也不断增加,虽然气体电压在不断地增加,但是放电电流的幅度基本不变,在此过程中气体电流的幅值基本在零点左右。当气体电压升高到 a 点时,发生击穿现象,放电电流急剧增加,迅速地到达放电电流的最大值 b 点。但是由从 a 点到 b 点的这段时间内,气体电压会不断地降低,即在这段时间内,气体电压降低,放电电流增加。 b 点过后,放电电流会逐渐减小,气体电压也在一直降低,从 b 点到 c 点这段时间内,气体电压和放电电流都在不断地减小。

之所以会出现这种变化规律,归根到底是因为放电间隙内的电荷发生了变化。在气体被击穿后,放电间隙内出现电子雪崩现象,大量的离子在电场力的作用下会快速地向介质层漂移,这会导致放电电流急剧变大。与此同时,大量电荷会积累在介质表面从而产生了一个与外加电场方向

相反的电场,导致气体电压不断降低。所以,a到b阶段气体电压降低,放电电流增加。放电电流到达最大点b时,已经有足够多的电荷积累在介质表面,正是由于这些积累的电荷会形成一个场强足够大的电场,这个电场会削弱外加电场从而使放电间隙的总电场的场强降低,这样会抑制电子雪崩,此时大量的电子集聚在介质层表面,这样气体间隙的自由电荷将会消耗殆尽,直至放电结束。因此,b到c阶段气体电压和放电电流都在不断地减小。这也说明气体电压的变化与介质表面积累的电荷有着直接的关系,正是积累电荷的制约,避免再次发生气体的击穿。

对于忆阻器来说,随着流经其电荷的增多,其忆阻值也会不断增加。忆阻器的阻抗值是其两端电压与流过电流的比值,在伏安特性曲线上通过曲线的斜率表现出来。流经忆阻器的电荷不断,体现为忆阻值不断变化即曲线的斜率不断变化,因此忆阻器的伏安特性曲线为滞回曲线。

通过图2与图5比较,可以直观地看出气体放电的伏安特性与忆阻器的伏安特性都有非线性的特征。如果只考虑正负周期的气体放电过程中的伏安特性即从气体被击穿时刻算起,会发现放电过程中的伏安特性曲线也是“8”字曲线,这与忆阻器的伏安特性一样。这说明在放电过程中放电间隙的阻值的变化趋势与忆阻器阻值的变化趋势相同。通过前文分析,DBD之所以在放电过程中放电间隙阻值不断变化是因为其内部电荷的偏移和积累引起的,而忆阻器阻值变化原因是流经其内部电荷的变化,所以说介质阻挡放电过程中和忆阻器阻值的变化都是由其内部电荷的变化引起的。

4 结束语

在研究DBD的电气特性过程中发现其放电过程中伏安特性具有非线性的特点,进一步实验得到DBD的伏安特性。通过仿真得到忆阻器的伏安特性。通过深入分析两者的特点,可以得到以下结论:首先忆阻器与DBD过程中的阻值变化归根到底是内部电荷变化的结果。其次忆阻器与DBD

过程中的阻值有着相同的变化规律。最后两者的伏安特性曲线都是“8”字曲线即滞回曲线,说明两者具有相同的伏安特性,都具有非线性。这揭示了DBD过程中具有忆阻特性。

参考文献

- [1] 武占成,张希军,胡有志. 气体放电 [M]. 北京:国防工业出版社,2012:147-153.
- [2] Kogelschat U. Dielectric-barrier discharge: their history, discharge physics, and industrial application [J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2003, 23 (1): 1-46.
- [3] 王新新. 介质阻挡放电及其应用 [J]. 高电压技术, 2009, 35 (1): 1-11.
- [4] 穆海宝,高唯,喻琳,等. 介质阻挡电晕放电用于聚丙烯薄膜的表面改性 [J]. 高电压技术, 2014, 40 (7): 2217-2223.
- [5] Strukov D B, Snider G S, Stewart D R, et al. The missing memristor found [J]. Nature, 2008, 453 (7191): 80-83.
- [6] Yang J J, Picket M D, Li X M, et al. Memristive switching mechanism for metal/oxide/metal nanodevices [J]. Nat Nanotechnol, 2008, 3 (7): 429-33.
- [7] Zhang Y. An integrated phase change memory cell with Ge nanowire diode for cross-point memory [J]. Proc. IEEE Symp. VLSI Technol., 2007 (6): 98-99.
- [8] Li L, Lu K, Kwong K C, et al. Comparison of PN diodes and FETs as phase change memory (PCM) driving devices [C]. 9th Int. Conf. Solid-state and Integrated-Circuit Technology, Chicago, USA, 2008.
- [9] 丛秋波. 最新MRAM存储能力提升到16 Mb [J]. 电子设计技术, 2010, 17 (7): 12.
- [10] 杨丽徙,王连才,秦克敬. 气体放电灯的电压电流函数 [J]. 郑州工学院学报, 1995, 16 (1): 79-82.
- [11] 孙岩洲,巩银苗,孙念念. 线管结构电极介质阻

(下转第73页)

- 绝缘料及电缆结构设计 [J]. 电力系统自动化, 2013, 37 (15): 117-124.
- [4] 叶远波, 孙月琴, 黄太贵, 等. 继电保护相关二次回路的在线状态检测技术 [J]. 电力系统自动化, 2014, 38 (23): 108-113.
- [5] 季仲致, 曹军, 姜滨. GPRS技术在木材干燥窑数据传输系统中的应用 [J]. 自动化仪表, 2014, 35 (3): 42-45.
- [6] 陈涛, 黄艳玲. 基于GSM网络变压器远程数据终端的设计 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2009 (2): 78-81.
- [7] 阳林, 郝艳捧, 黎卫国, 等. 输电线路覆冰与导线温度和气象参数关联分析 [J]. 高电压技术, 2010, 36 (3): 775-776.
- [8] 黄新波, 王霄宽, 方寿贤, 等. 智能变电站断路器状态监测IED设计 [J]. 电力系统自动化, 2012, 36 (22): 95-99.
- [9] 黄炜宏, 谢章洪, 陈祥伟, 等. 基于Zigbee技术的成套式开关设备温度监测系统的设计与应用 [J]. 高压电器, 2013, 49 (2): 125-130.
- [10] 黄新波, 赵隆, 舒佳, 等. 输电线路导线微风振动在线监测技术 [J]. 高电压技术, 2012, 38 (8): 1863-1865.
- [11] 郑争兵, 赵峰. 基于GSM的远程心率监控系统设计 [J]. 计算机应用, 2012, 32 (7): 2082-2084.
- [12] 董静薇, 李会乐, 郭艳雯, 等. 基于Zigbee的粮仓温湿度监测系统的设计 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2014 (4): 120-124.
- [13] 王凯, 李智, 李名兆. 无线通信自动校准系统设计 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2013 (2): 101-104.
- [14] 贺伟. 基于分布式光纤的电缆温度监测系统及其数据处理研究 [D]. 长沙: 长沙理工大学, 2011.
- [15] 朱若茜, 张礼勇. 无线传感器网络监测环境中的煤矿安全度评价 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2013 (3): 32-35.
- (收稿日期: 2016-04-15) EA

(上接第66页)

- 挡放电的数值仿真 [J]. 绝缘材料, 2015, 48 (7): 29-33.
- [12] 孙岩洲, 崔志永, 卫林林. 同轴线管介质阻挡放电的数值模拟 [J]. 河南理工大学学报: 自然科学版, 2012, 31 (2): 207-211.
- [13] Chua L O. Memristor the-missing circuit element [J]. IEEE Transactions on Circuit Theory, 1971, 18 (5): 507-519.
- [14] 田小波. 忆阻器电路特性与应用研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2009.
- [15] 宋卫平, 丁山传, 宁爱平. 基于 Simulink的忆阻器模型 [J]. 太原科技大学学报, 2014, 35 (1): 23-27.
- [16] Karel Zaplatilek. Memristor modeling in Matlab [C]. Proceedings of the European Computing Conference, 2011: 62-67.
- [17] Zdeněk Biolek. SPICE model of memristor with nonlinear dopant drift [J]. Radio Engineering, 2009, 18 (2): 210-214.
- [18] Zhang Yu, Zhang Xuliang, Yu Juebang. Approximated SPICE model for memristor [C]. ICCAS (2009), IEEE, 2009: 928-931.
- [19] 刘东青, 程海峰, 朱玄, 等. 忆阻器及其阻变机理研究进展 [J]. 物理学报, 2014, 63 (18): 23-27.
- (收稿日期: 2015-10-26) EA