

文章编号 1004-924X(2018)04-0866-09

## 共面薄膜电极表面放电冷却技术

周织建<sup>1\*</sup>, 聂伟荣<sup>2</sup>, 洪肇斌<sup>1</sup>

- (1. 中国电子科技集团公司第三十八研究所, 安徽 合肥 230088;
2. 南京理工大学 机械工程学院, 江苏 南京 210094)

**摘要:**为研究一种可用于雷达领域的新型冷却技术,本文研究了高电压下共面薄膜电极之间的 DC 表面放电现象。设计制作了一系列具有不同参数且带有一个阳极针尖以及两个对称布置阴极的样机,通过改变基底表面粗糙度以及不同的结构参数(如凹槽深度、凹槽宽度以及阴极长度等)进行实验测试。结果表明:主要受到基底表面离子迁移率的影响,凹槽深度对于共面薄膜平面电极的表面放电现象影响最大;表面放电的电流稳定性随着深度的增加而增加;而放电起始电压则随着深度的增加而减小;离子与平面基底之间的流体阻力影响相对较小。共面薄膜电极表面放电的研究对于推动电冷却技术在雷达技术领域的应用具有重要意义。

**关键词:**表面放电;共面薄膜平面电极;电冷却;表面电流体;雷达技术

**中图分类号:** TB66 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20182604.0866

## Electrocooling technology based on surface discharge of thin coplanar flat electrodes

ZHOU Zhi-jian<sup>1\*</sup>, NIE Wei-rong<sup>2</sup>, HONG Zhao-bin<sup>1</sup>

- (1. 38th Research Institute of China Electronic Technology Group Corporation, Hefei 230088, China;
  2. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)
- \* Corresponding author, E-mail: zhouzhijian2011@163.com

**Abstract:** The DC surface high voltage discharge of thin coplanar flat electrodes was experimentally analyzed for the purpose of studying a cooling technology in radar field. A series of samples including two symmetrical cathodes and one anode with a sharp tip were built to evaluate the effects on surface discharge of the separation between two thin coplanar flat electrodes and the flow resistance between ions and a flat substrate. A series of tests have been done for the surface discharge characteristics by changing surface roughness and structural parameters such as cavity depth, gap width and cathode length. The main results show that the cavity depth is the most important structural parameter, since it has the greatest effect on the mobility of neutral molecules in the space between the thin coplanar flat electrodes. The space is a key role for collisions to generate the surface discharge, which is affected by ion mobility. The stability of surface discharge is in direct proportion to gap depth, but the firing voltage decreases with the increase of the depth. Besides, the flow resistance between ions and flat

收稿日期:2017-09-05;修订日期:2017-11-01.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51475245)

substrate has relatively less effect on the surface discharge. The research of the surface discharge of thin coplanar flat electrodes offers the promise of electrocooling application in radar field in the future.

**Key words:** surface discharge; thin coplanar flat electrode; electrocooling; surface electrohydrodynamic; radar technology

## 1 引言

雷达无线通信技术的不断发展使得大功率、高集成度、微型化电子设备的应用范围不断扩大,雷达系统的功能集成密度日益提高,使得电子元件的功率密度也急剧上升,器件的散热则成了雷达设计过程中又一技术难题。由于传统机械风扇式散热装置体积较大,且液冷式散热装置的应用范围受限,因此亟待引入一种新型散热方式以满足雷达设计需求。目前常规的雷达散热方式主要包括液冷、风冷、热管以及热沉散热。梅启元<sup>[1]</sup>提出了热管在雷达散热上应用的可行性研究,但是热管的可靠性和稳定性还需进一步分析研究;王从思等人<sup>[2-4]</sup>探索研究了液冷散热技术在雷达上的应用,但与之配套的冷却设备则限制了雷达的应用范围;张辉等人<sup>[5-6]</sup>将风冷技术应用于雷达领域,通过风机鼓风或抽风形式将废热带出机箱,但是配套的风冷设备不利于雷达的小型化设计;陈立恒等人<sup>[7-10]</sup>基于热管理技术,采用被动热控措施和进行热隔离和疏导,实现微观器件的散热设计;Kibler K G 等人<sup>[11-14]</sup>利用气体放电产生的“电子风”代替传统的机械风轮式风扇来降低器件的表面温度,但其三维立体式的布局设计无法进一步减小雷达的整体尺寸。

表面电流体(Surface electrohydrodynamic, EHD)属于非热等离子体且可加速器件表面气体的流速,改变边界层内气体的流速分布。Moreau E 等人<sup>[15-19]</sup>利用 EHD 产生的切向力来提高边界层内的流体速度;Ran H 等人<sup>[20-21]</sup>利用表面放电设计了多级 EHD 冷却装置以冷却器件;Boeuf J P 等人<sup>[22]</sup>基于电介质阻挡层放电(Dielectric Barrier Discharge, DBD)原理,设计了一种用于控制表面气流的执行器;Melcher J R 等人<sup>[23]</sup>基于表面放电提出了一种表面 EHD 谐振器;刘学忠等人<sup>[24]</sup>则对高速气流对绝缘子表面放电特征的影响进行了深入研究;易爱平等人<sup>[25]</sup>利用表面放电设计了多通道表面放电光泵浦源。尽管表面气体

放电已经被广泛研究,但很少有人采用两个共面金属薄膜作为电极产生表面放电,对平面基底对表面放电的影响分析也相对较少,较难实现雷达冷却设备的小型化设计。

本文将通过改变基底凹槽深度、凹槽宽度、基底的表面粗糙度以及阴极长度来分析平面基底对共面薄膜电极之间产生的表面放电的影响。本文主要分析介绍了共面薄膜电极放电的机理、实验过程以及结构参数的改变对电流稳定性和放电起始电压的影响。共面薄膜电极表面放电冷却技术的研究对于雷达技术的发展具有重要意义。

## 2 理论分析

当高电压加在两个共面薄膜平面电极上时,空气中原始存在的电子被电场加速,并与附近的中性粒子发生碰撞并发生电离,直至发生击穿现象,此时两电极之间会形成稳定的等离子区域,并能探测到相应的离子电流。两电极间的空间大小对表面中性粒子迁移率以及离子与基底之间的流体阻力起到了决定性的作用,原理如图 1 所示。

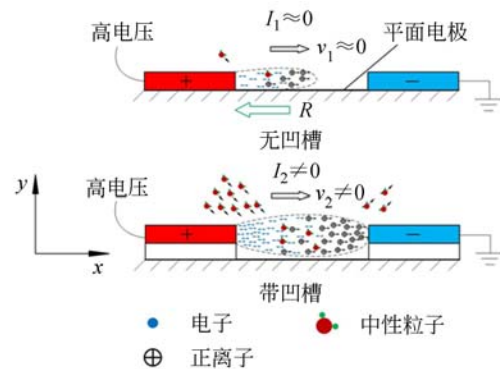


图 1 共面薄膜电极表面放电原理图

Fig. 1 Scheme diagram of surface discharge of thin coplanar flat electrodes

如图 1 所示,当两个薄膜电极之间不存在凹槽时,施加直流高电压直至发生火花放电,两端的电流  $I_1 \approx 0$ ,此时相对应的离子平均速度也接近于 0;当两个薄膜电极之间加工出凹槽时,施加适

当的直流高电压之后,两个电极之间会出现较为稳定的电流  $I_2$ 。

针对该现象,存在两种潜在解释:第一,如前所述,离子主要来自于电子和中性粒子的碰撞,当两个薄膜电极之间不存在凹槽时,表面不能形成良好的气体对流,导致没有足够的中性粒子进入正负电极之间以供电离,因此不能形成稳定电流。英国科学家汤逊从理论上解释了气体放电现象的本质,并获得了击穿电压  $U$  的公式<sup>[26]</sup>:

$$U = \frac{BPd}{\ln \left[ \frac{APd}{\ln(1+1/\gamma)} \right]}, \quad (1)$$

式中: $P$  为气体压力, $d$  为两个电极之间的距离, $B$  为与气体分子结构以及体积有关的常数, $\gamma$  为正离子撞击阴极表面所逸出的电子数目, $A$  为气体分子的体积比例系数。当气体的粒子迁移率较低时, $A$  较小,由式(1)可知相应的放电起始电压随着  $A$  的减小而增加。

第二,在边界层内,离子和平板基底之间的流体阻力也可能会阻碍离子的运动。就平面基底而言,流体阻力  $F$  与平面基底上位置之间的函数关系为<sup>[22]</sup>:

$$F(x) = W\rho \int_0^{\infty} v(U_0 - v)dy, \quad (2)$$

式中: $W$  是基底的长度, $\rho$  为气体的密度, $v$  为气体速度, $U_0$  为空气中的速度, $F(x)$  可理解为:在边界层内,离子动量的损失主要取决于剪切应力和移动距离,因此总的流体阻力主要为粘性摩擦和反作用力。

### 3 试样加工与实验

#### 3.1 试样加工

为验证上文提出的两种假设,选取带有 35  $\mu\text{m}$  厚铜薄膜,基底为绝缘玻纤织物的 PCB 板作为器件材料,并采用电路板刻图机(LPKF ProtoMat 95s/II)进行加工,所得样机如图 2 所示。

如图 2 所示,样机采用对称分布设计以稳定电流,且可对两个对称电极上的电流进行差分放大,以求得每个电极上的电流。此外,该设计还可以增加共模抑制比(Common Mode Rejection Ratio, CMRR)以减小噪声信号的引入所带来的误差,增加信噪比。样机主要包括 3 个电极:中间带针尖的电极作为阳极,两边对称的两个电极作

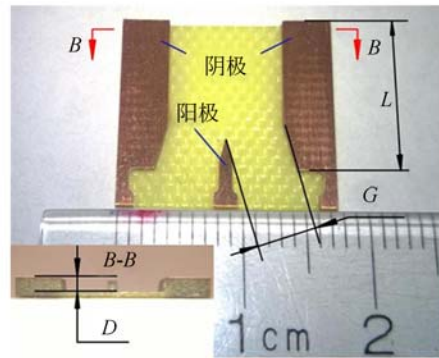


图 2 加工样机

Fig. 2 Prototype for experiment

为阴极。该样机主要包括 4 个参数:凹槽深度  $D$ , 凹槽宽度  $G$ , 基底表面粗糙度  $R_a$  以及阴极长度  $L$ 。各参数对表面共面薄膜电极放电的影响将在下一节中叙述。

#### 3.2 实验测试

根据两个电极施加高电压的大小不同,气体放电主要包括 3 种机制:汤森放电、辉光放电以及火花放电。汤森放电由于其产生的电流较小,电路中的器件以及工频噪声可能会覆盖微小电流信号,因此不适合作为电流信号进行采集;火花放电由于其电流波动较大,稳定性较差且在电弧出现之后,电流随之消失,因此也不适合作为信号源;相对于前述两种放电,辉光放电由于其具有适当的电流工作范围且电流的稳定性相对较好,因此将其作为电流信号源进行采集。此外,正电离放电由于具有相对较好的稳定性以及对材料敏感性较低<sup>[27]</sup>等优势而被采用,图 3 为对应的测试电路原理图。

如图 3 所示,本文采用正直流高电压源作为离子化激励源,将高压源的正极与加工样机的针尖连接,将样机的两边对称阴极与后续测试电路相连。由于气体放电的非线性特征且为了避免击穿空气导致电流过大引起后续处理电路的烧毁,选取 500 M $\Omega$  的限流电阻与高压电源串联进行限流。为防止限流电阻本身被击穿,采用 10 个 50 M $\Omega$  的电阻(每个电阻阈值电压为 1 600 V)进行串联。为了防止实验时调节电压出现突然击穿现象,导致整个测试系统被高压击毁,采用了两个二极管组成的模块(a)来进行过压保护。为防止通电初期出现大幅度变化造成电路故障,设计了模块(b)进行 RC 延时补偿。模块(c)作为一个有源

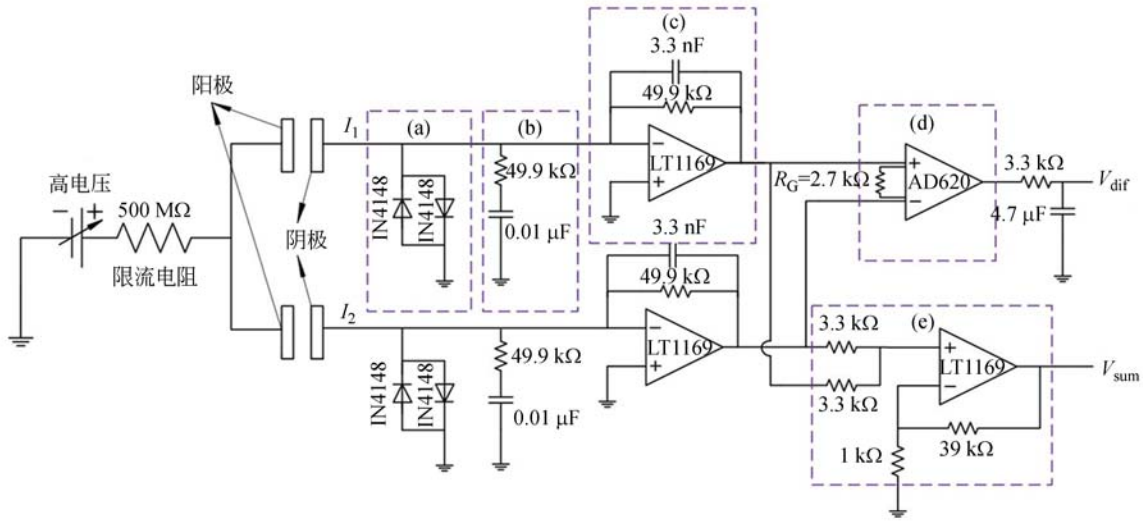


图 3 测试系统的电路原理图

Fig. 3 Circuit diagram of test system

滤波器,可将从气体放电源探测到的电流转化为电压。模块(d)和模块(e)则分别用于获取差分电流  $I_1 - I_2$  和电流之和  $I_1 + I_2$ 。

### 4 实验结果

#### 4.1 放电特性

如前所述,样机中不同的结构参数以及基底粗糙度可能会影响气体表面放电特性。根据多组不同结构参数的测试结果,选取以下结构参数值作为初始设计,如表 1 所示。

表 1 初始设计结构参数

Tab. 1 Structural parameters of prototype

参数	D/mm	G/mm	L/mm	$R_s/\mu\text{m}$
数值	1.17	5	12	15.7~16.4

所有测试均在标准环境中进行:气压  $P=100$  kPa,温度  $T=298$  K,相对湿度  $u\sim 30\%$ 。图 4 为初始样机在标准环境下典型表面放电特性。

如图 4 所示,放电起始电压大约为 4.4 kV,且放电之后,斜率逐渐平稳增加。根据图 4 可知,发生辉光放电之后,电流稳定于负载曲线和气体放电曲线的交点 A 处。随着电压的不断增大,输出电流逐渐稳定增加,且 BC 段的输出电流相对稳定,可作为设计器件的工作区。从图 4 中可知,输出电流大约处于  $1\sim 3 \mu\text{A}$  之间,这样的电流强

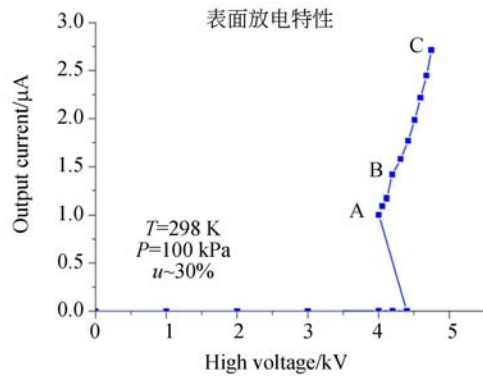


图 4 共面薄膜电极表面放电特性

Fig. 4 Surface discharge of thin coplanar flat electrodes

度足以作为电流信号进行探测。为了验证不同的结构参数对平面放电特性的影响,采用单一变量法进行分析,测试结果如下。

#### 4.2 结构参数对放电特性的影响

##### 4.2.1 凹槽深度的影响

凹槽深度  $D$  作为表面放电的一个重要参数,决定了放电电流在发生火花放电之前是否能被探测到。本文设计和测试了几组具有不同凹槽深度  $D(0.12\sim 1.17$  mm)的样机,且进行了相应的测试不确定性分析(测试数据的标准差),下同。图 5 为不同凹槽深度样机的表面放电特性。

如图 5 所示,输出电流处于  $1\sim 3 \mu\text{A}$  的范围之内(当电流不再稳定时,即停止测试,下同)。当  $D=0.75$  mm 和 1.17 mm 时,两个样机放电特性的重复性较好且放电起始电压都约为 4 kV,说明

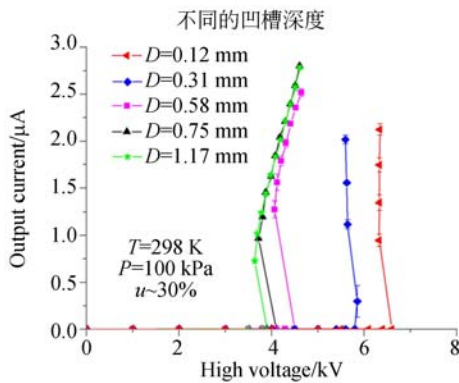


图 5 不同凹槽深度的表面放电特性

Fig. 5 Surface discharge of different groove depth

当  $D > 0.75$  mm 时,基底对于表面放电的影响随着深度的增加而逐渐减小。此外,放电电流随着电压的增大而平缓地增大,且测试时电流相对较为稳定,这两种情况下的测量误差较小,数据准确度较高。当  $D = 0.58$  mm 时,放电起始电压增加至 4.7 kV,且放电电流会随着深度的减小而有所减小。如前所述,存在两种潜在解释:第一,较小的深度使得正负电极之间的空间较小,降低了气体分子的迁移率,导致进入电离区的中性粒子减少,不能形成良好的气体对流,所以在电流减小的同时,放电起始电压也随之增加;第二,类似于边界层理论,离子在克服表面流体阻力时损失了部分能量,导致到达对面电极的带电离子数减小,电流减小且放电起始电压增加。基于相同原因,当  $D = 0.31$  mm,放电起始电压增加至 6 kV,且相同电压下测得的电流进一步减小。如图 5 所示,当  $D < 0.58$  mm 时,放电特性曲线的斜率为负,稳定性较差。此外,在测试时伴随着滋滋声,此时表面放电处于从辉光放电向火花放电过渡阶段。当深度减小至 0.12 mm 时,放电起始电压  $\sim 7$  kV,电流不稳定,且极易产生电火花导致电流中断。因此,可推断当  $D < 0.04$  mm 时,在发生火花放电之前将很难探测到稳定电流信号。

#### 4.2.2 凹槽宽度的影响

为分析凹槽宽度对表面放电的影响,本文设计和测试了一组宽度从 2 mm 至 5 mm,增量为 1 mm 的样机。图 6 为不同凹槽宽度的测试结果。

如图 6 所示 4 种情况下的输出电流均随着电压的增大而增大,但由于不同凹槽宽度、加工误差以及测试电路等其他外界误差的影响,导致对应每一组数据的斜率在合理范围内波动。如图 6 所

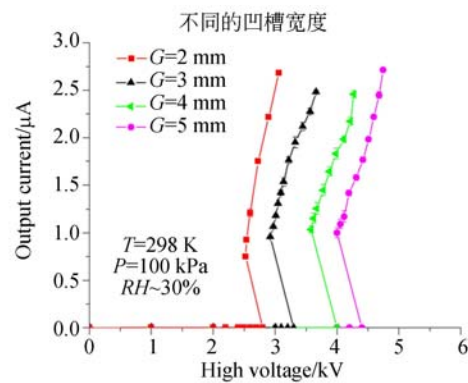


图 6 不同凹槽宽度的表面放电特性

Fig. 6 Surface discharge of different groove width

示,当刚探测到放电电流时,由于电场较小且表面中性粒子的迁移率较低等因素,形成的等离子体区域不够稳定,电流不够稳定。逐渐增加电压后,随着电场的增加,粒子单位距离内获得的能量相应提高,更多中性粒子发生电离,电流趋于稳定。当继续增加电压,表面放电则会从稳定的辉光放电进入不稳定的火花放电,电压开始在一定范围内波动,测量精度会有一定下降。相同的电压下,宽度越小,电场梯度越大。随着凹槽宽度地增加,相同电压下的电场随之降低,因此放电起始电压也会相应地增加。图 6 表明凹槽宽度还会影响表面放电特性的斜率。在相同的电压变化时,窄凹槽内的电场增加比宽凹槽内的电场增加相对较快,因此电极之间的电子和中性粒子的碰撞相对较多,所以斜率随着凹槽宽度的增加而减小。此外,随着凹槽宽度的增加,电场变得更加均匀,因此产生的电流也更加稳定。

#### 4.2.3 基底粗糙度的影响

为分析基底表面粗糙度对表面放电特性的影响,采用不同的研磨工具对电极之间的基底进行处理,获得并测试了这一系列具有不同粗糙度 ( $R_a = 0.16 \sim 0.2$ ,  $1.48 \sim 1.59$  以及  $15.7 \sim 16.4$ ) 的样机。图 7 所示为不同粗糙度对表面放电特性的影响。

如图 7 所示,假设离子与平面基底之间产生的流体阻力可能会阻碍边界层内离子的移动,进而使得放电起始电压随着粗糙度的增大而略有增大(当  $R_a = 15.7 \sim 16.4$  时,放电起始电压应该最大),而相对光滑表面 ( $R_a = 0.16 \sim 0.2$ ) 样机的放电起始电压最小。但是在表面放电开始之后,3 种不同基底表面粗糙度的器件表面放电特性却近

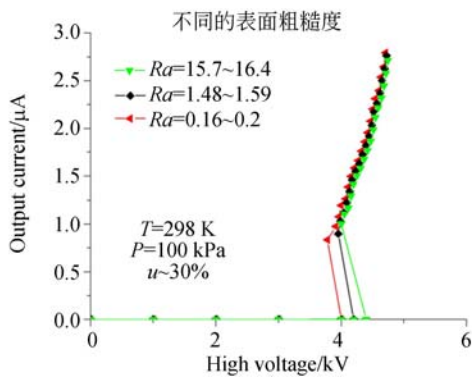


图 7 不同基底粗糙度的表面放电特性

Fig. 7 Surface discharge of different substrate roughness

乎相同,由此可推断离子与平面基底间的流体阻力对表面放电电流的影响可忽略不计。综上所述可知,正负电极之间离子和中性粒子的迁移率对表面放电特性起到了关键作用。在基于共面薄膜电极表面放电的器件设计中,需重点考虑表面粒子迁移率的影响。

4.2.4 阴极长度的影响

为分析不同阴极长度对表面放电特性的影响,设计并测试了 3 个不同阴极长度(8 mm, 10 mm, 12 mm)且其他参数不变的样机。图 8 所示为不同阴极长度对表面放电特性的影响。

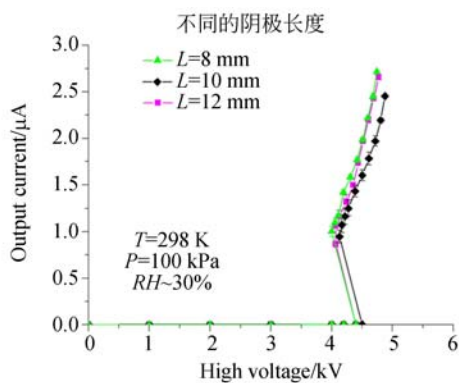


图 8 不同阴极长度的表面放电特性

Fig. 8 Surface discharge of different cathode length

如图 8 所示,阴极长度对表面放电特性的影响相对较小,3 种情况下的表面放电特性近乎相同。针对这一现象,存在如下解释:阳极针尖附近的电场属于球形空间分布,且离子或者电子主要集中在针尖附近,因此当阴极的长度超过一定值时,增加多余的长度对表面放电特性的影响可忽

略不计。当  $L=10\text{ mm}$  时,在相同电压下,输出电流略小于其他两种情况,可能是由于加工、测试以及外部环境引入的误差所致。

4.3 结构参数对电流稳定性和放电起始电压的影响

4.3.1 凹槽深度的影响

为了分析凹槽深度对表面放电的影响,需要了解电流的稳定性(测量数据的标准差)以及放电起始电压与凹槽深度的关系,如图 9 所示(彩图见期刊电子版)。

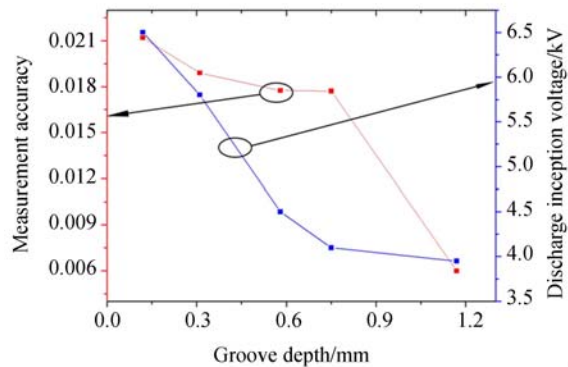


图 9 凹槽深度对测量精度和放电起始电压的影响

Fig. 9 Effects on measurement accuracy and discharge inception voltage of groove depth

如图 9 所示,测量精度即电流的稳定性随着凹槽深度的增加而增加。同时,放电起始电压随着凹槽深度的增加而不断减小。当凹槽较浅时,表面粒子的迁移率较小,根据汤逊理论可知,进入正负电极空间待电离的中性粒子较少,需要施加较大的电压以形成较大的电场,增加粒子的运动速度,进而增加粒子的运动范围,才能增加粒子之间的碰撞的概率,因此电流的稳定性较低,且放电起始电压较大。当凹槽深度较大时,表面粒子的迁移率较大,单位体积内的可电离中性粒子数目较多,较小的电压即可电离空气,可形成稳定的等离子体区域,相应的电流较为稳定。

4.3.2 凹槽宽度的影响

电流的稳定性 and 放电起始电压与凹槽宽度的关系如图 10 所示,放电起始电压随着凹槽宽度的增加近乎线性增加,而测量精度却随着凹槽宽度的变化在较小的范围内(0.016~0.020)波动,没有明显的变化规律。当凹槽深度相同时,不同凹槽宽度表面粒子的迁移率相近,形成的等离子体区域较为稳定,测试精度在一定范围内波动。因

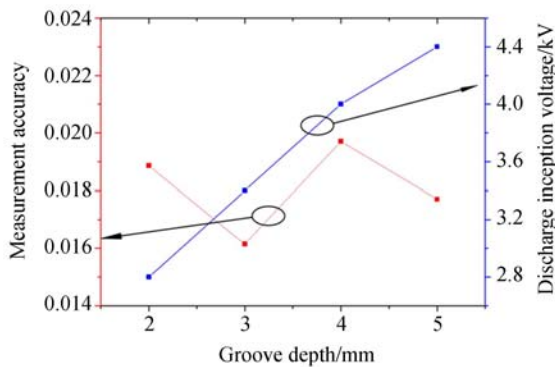


图 10 凹槽宽度对测量精度和放电起始电压的影响  
Fig. 10 Effects on measurement accuracy and discharge inception voltage of groove width

此, 电流的稳定性主要决定于前述的凹槽深度。由于气体分子的电离与否取决于电极之间的电场大小, 因此随着凹槽宽度的增加, 放电起始电压近乎线性增加。

#### 4.3.3 表面粗糙度的影响

基底表面粗糙度对电流稳定性以及放电起始电压的影响如图 11 所示。

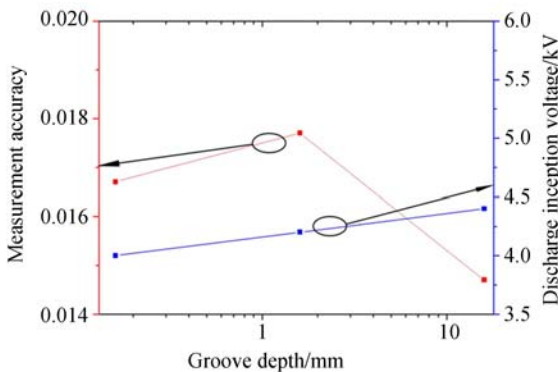


图 11 基底粗糙度对测量精度和放电起始电压的影响  
Fig. 11 Effects on measurement accuracy and discharge inception voltage of substrate roughness

分析可知, 基底表面粗糙度对电流测量精度的影响不大, 均处于 0.014~0.018 的范围内。同时, 放电电压随着粗糙度的增加而略有增加, 可能是由于测量系统, 器件加工以及人为因素的影响所致, 对整体表面放电特性的影响甚微。因此, 也进一步证实表面粒子迁移率是影响表面放电现象的主要因素。

#### 4.3.4 阴极长度的影响

阴极长度对电流稳定性以及放电起始电压的

影响如图 12 所示。

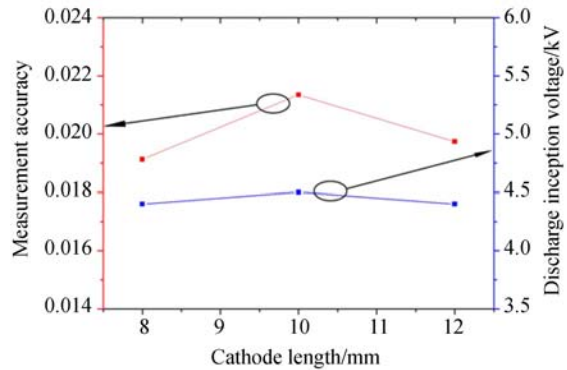


图 12 阴极长度对测量精度和放电起始电压的影响  
Fig. 12 Effects on measurement accuracy and discharge inception voltage of cathode length

如图 12 所示, 阴极长度对测量精度的影响较小。在不同阴极长度情况下, 测量精度在 0.019~0.021 之间波动, 没有明显的变化规律, 其中的误差可能来自加工误差、测试系统噪声的引入以及外界环境的影响。此外, 由于凹槽宽度和深度均已确定, 且电场属于空间球形分布, 主要集中在阳极附近, 3 种情况下的电场分布相差无几, 放电起始电压基本保持不变。因此, 阴极长度对测量精度和放电起始电压的影响较小。

综上所述可知, 凹槽深度是影响表面放电电流稳定性和放电起始电压的主要结构参数, 凹槽宽度的影响相对较小, 只对放电起始电压有一定的影响, 而其余两个因素对表面放电的影响甚微。

## 5 结 论

本文提出了在两个共面薄膜平面电极之间施加高电压以产生表面放电, 并且通过设计具有不同的结构参数以及基底表面粗糙度的样机以分析影响表面放电的因素。设计了带有两个对称阴极, 一个针尖阳极的样机来验证两个影响电流稳定性和放电起始电压的潜在因子: 电极之间离子与中性粒子的迁移率及离子与基底表面的流体阻力。得到结论如下:

(1) 凹槽深度作为最重要的结构参数决定了离子和中性粒子在电极之间的迁移率, 决定是否有足够的中性粒子与离子发生碰撞而电离, 进而产生稳定的电流。当凹槽深度  $D > 0.58$  mm 时, 两个共面薄膜平面电极之间能产生稳定的表面放电;

(2)离子和平面基底的流体阻力对表面放电特性的影响相对较小;

(3)表面放电的稳定性随着凹槽深度的增加

而增加;

(4)共面薄膜电极表面放电冷却机理的研究对于雷达技术的发展具有重要意义。

#### 参考文献:

- [1] 梅启元. 热管在雷达散热上应用的可行性研究[J]. 电子机械工程, 2007, 23(1): 17-19.  
MEI Q Y. Study on the feasibility of application of heat pipe in radar system[J]. *Electro-Mechanical Engineering*, 2007, 23(1):17-19. (in Chinese)
- [2] 王从思, 宋正梅, 康明魁, 等. 微通道冷板在有源相控阵天线上的应用[J]. 电子机械工程, 2013, 29(1): 1-4, 13.  
WANG C S, SONG ZH M, KANG M K, *et al.*. Application of micro-channel cold plate to active phased array antenna[J]. *Electro-Mechanical Engineering*, 2013, 29(1): 1-4, 13. (in Chinese)
- [3] 孔祥举. 真空管雷达发射机热控技术研究[J]. 电子机械工程, 2007, 23(5): 17-20.  
KONG X J. Thermal control technology of vacuum tube radar transmitter[J]. *Electro-Mechanical Engineering*, 2007, 23(5): 17-20. (in Chinese)
- [4] 陈德生, 魏延涛, 常越, 等. 新一代天气雷达系统热设计与技术分析[J]. 电子科技, 2012, 25(7): 121-124.  
CHEN D SH, WEI Y T, CHANG Y, *et al.*. Thermal design and analysis technique for the new generation weather radar system [J]. *Electronic Science and Technology*, 2012, 25(7): 121-124. (in Chinese)
- [5] 张辉. 某机载雷达风冷机箱设计研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2013.  
ZHANG H. *Study on air-cooled enclosure of an aero radar*[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2013. (in Chinese)
- [6] 陈奎, 帅立国, 钟剑锋, 等. 基于现代设计方法的雷达风冷系统设计[J]. 电子机械工程, 2016, 32(1): 20-23.  
CHEN K, SHUAI L G, ZHONG J F, *et al.*. Design of radar air-cooling system based on modern design method[J]. *Electro-Mechanical Engineering*, 2016, 32(1): 20-23. (in Chinese)
- [7] 陈立恒, 吴清文, 罗志涛, 等. 空间相机电子设备热控系统设计[J]. 光学精密工程, 2009, 17(9): 2145-2152.  
CHEN L H, WU Q W, LUO ZH T, *et al.*. Design for thermal control system of electronic equipment in space camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(9): 2145-2152. (in Chinese)
- [8] 张旭升, 郭亮, 贾卓杭, 等. 微米行程微膨胀型热开关热特性的仿真与试验[J]. 光学精密工程, 2016, 24(10): 2442-2448.  
ZHANG X SH, GUO L, JIA ZH H, *et al.*. Simulation and experiment of thermal properties for micro-expansion type heat switch with micron stroke [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(10): 2442-2448. (in Chinese)
- [9] 郭亮, 吴清文, 黄勇, 等. 热管理技术在紫外成像光谱仪热控制中的应用[J]. 光学精密工程, 2014, 22(7): 1877-1885.  
GUO L, WU Q W, HUANG Y, *et al.*. Application of thermal management technique to thermal control for ultraviolet imaging spectrometers [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(7): 1877-1885. (in Chinese)
- [10] 罗志涛, 徐抒岩, 陈立恒. 大功率焦平面器件的热控制[J]. 光学精密工程, 2008, 16(11): 2187-2192.  
LUO ZH T, XU SH Y, CHEN L H. Thermal control of high-power focal plane apparatus [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(11): 2187-2192. (in Chinese)
- [11] KIBLER K G, CARTER JR H G. Electrocooling in gases[J]. *Journal of Applied Physics*, 1974, 45(10): 4436-4440.
- [12] MOREAU E, LEGER L, TOUCHARD G. Effect of a DC surface-corona discharge on a flat plate boundary layer for air flow velocity up to 25 m/s [J]. *Journal of Electrostatics*, 2006, 64(3-4): 215-225.
- [13] MALCZYNSKI G W, SCHROEDER T. An ion-drag air mass-flow sensor for automotive applications[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1992, 28(2): 304-309.
- [14] DARABI J, OHADI M M, DEVOE D. An electrohydrodynamic polarization micropump for electronic cooling[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2001, 10(1): 98-106.
- [15] MOREAU E. Airflow control by non-thermal plasma actuators[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*

- ics, 2007, 40(3): 605-636.
- [16] LÉGER L, MOREAU E, ARTANA G, *et al.*. Influence of a DC corona discharge on the airflow along an inclined flat plate[J]. *Journal of Electrostatics*, 2001, 51-52: 300-306.
- [17] LEGER L, MOREAU E, TOUCHARD G. Electrohydrodynamic airflow control along a flat plate by a DC surface corona discharge-velocity profile and wall pressure measurements[C]. *Proceedings of the 1st Flow Control Conference St, AIAA*, 2002: 2002.
- [18] MAGNIER P, HONG D P, LEROY-CHESENEAU A, *et al.*. A DC corona discharge on a flat plate to induce air movement[J]. *Journal of Electrostatics*, 2007, 65(10-11): 655-659.
- [19] ROTH J R, SHERMAN D M, WILKINSON S P. Electrohydrodynamic flow control with a glow-discharge surface plasma[J]. *AIAA Journal*, 2000, 38(7): 1166-1172.
- [20] RAN H Y, ZHANG Y, HONER K. Multi-stage electrohydrodynamic fluid accelerator apparatus: US, 20090321056[P]. 2009-12-31.
- [21] FOROUGHI P, ZHAO Y, LAWLER J, *et al.*. Development of electrohydrodynamic (EHD) micropumps for cryogenic applications[C]. *Proceedings of Space Technology and Applications International Forum, American Institute of Physics*, 2005: 46-54.
- [22] BOEUF J P, PITCHFORD L C. Electrohydrodynamic force and aerodynamic flow acceleration in surface dielectric barrier discharge[J]. *Journal of Applied Physics*, 2005, 97(10): 103307.
- [23] MELCHER J R. Electrohydrodynamic and magnetohydrodynamic nonlinear surface waves [J]. *Physics of Fluids*, 1962, 5(9):1037-1043.
- [24] 刘学忠, 高超, 邓显波, 等. 高速气流对绝缘子表面放电特征的影响[J]. *电工技术学报*, 2010, 25(12): 16-21.
- LIU X ZH, GAO CH, DENG X B, *et al.*. Influence of high-speed airflow on surface discharge characteristics of insulator [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2010, 25(12): 16-21. (in Chinese)
- [25] 易爱平, 刘晶儒, 于力, 等. 多通道表面放电光泵浦源触发特性研究[J]. *强激光与粒子束*, 2006, 18(7): 1076-1080.
- YI A P, LIU J R, YU L, *et al.*. Trigger characteristic study on optical pumping source with multichannel surface discharge[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, 18(7): 1076-1080. (in Chinese)
- [26] SCHLICHTING H. *Boundary Layer Theory* [M]. 6th ed. New York: McGraw-Hill, 1968.
- [27] GALLO C F. Corona-a brief status report[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1977, IA-13(6): 550-557.

#### 作者简介:



周织建(1970—),男,安徽黄山人,博士,工程师,2016年于南京理工大学获得博士学位,目前主要从事高集成度小型化雷达的热设计和环控技术研究。E-mail: zhouzhijian2011@163.com

#### 导师简介:



聂伟荣(1969—),女,山西原平人,博士,教授,2002于南京理工大学获得博士学位,主要从事引信 MEMS 安全系统技术、微观流体力学以及智能探测与控制技术研究。E-mail: njnwr@hotmail.com