

微机电系统微米间隙的预击穿和击穿特性研究

孟国栋¹, 成永红¹, 酉小广^{1,2}, 吴锴¹

(1. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 710049, 西安; 2. 中国卫星海上测控部, 214431, 江苏江阴)

摘要: 为了预测和评估微机电系统(MEMS)中微电极结构的绝缘性能,采用 MEMS 加工工艺,制备了电极间隙为 5~40 μm 的金属铝薄膜电极,研究了试样在直流电压下的预击穿过程中电流-电压关系曲线以及击穿电压随电极间隙的变化规律,并利用扫描电子显微镜(SEM)进行了微电极表面的微观分析. 研究表明:预击穿过程的电流-电压曲线说明,在击穿之前电流的变化主要包括自由带电粒子的定向迁移阶段、电流密度达到饱和阶段以及碰撞电离持续发展形成电子雪崩阶段;场致电子发射的 Fowler-Nordheim 曲线表明,当微电极的间隙大于 5 μm 时,其击穿特性仍然符合巴申曲线,与相关文献的研究结论一致;微电极击穿阈值均大于相同间隙的宏观金属电极的击穿阈值;微电极击穿后在阳极表面有坑洞产生,而在阴极表面存在溅射沉积现象.

关键词: 微机电系统; 击穿特性; 微米间隙; 巴申曲线

中图分类号: TM855 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)08-0106-05

Prebreakdown and Breakdown Characteristics of Micrometer Gap in Micro-Electro-Mechanical System Device

MENG Guodong¹, CHENG Yonghong¹, YOU Xiaoguang^{1,2}, WU Kai¹

(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. China Satellite Maritime Tracking & Controlling Department, Jiangyin, Jiangsu 214431, China)

Abstract: To carefully predict and evaluate the insulation characteristics for providing the guidelines of insulation design in micro-electro-mechanical system (MEMS) devices, the samples were prepared by etching insulation gaps measured from 5 μm to 40 μm . The pre-breakdown current-voltage curve and relationships between breakdown voltages and electrode gaps were measured on the test samples fabricated with aluminium film electrodes in standard MEMS processes. The electrode surface after breakdown was analyzed by scanning electron microscopy (SEM). The results show that the pre-breakdown current-voltage curve can be divided into three stages: free charged particles directionally migrate along electric field; the current density gets saturated; the impact ionization develops into electron avalanche continuously. Fowler-Nordheim plot verifies that for larger scale ($>5 \mu\text{m}$), the breakdown characters agree with Paschen curve and are consistent with the previous studies. However, the breakdown thresholds between micro-electrodes are greater than those between macroscopic metal electrodes. SEM analysis shows that anode surface becomes crater-like and the cathode surface is sputtered with metal.

Keywords: micro-electro-mechanical system; breakdown characteristics; micrometer gap; Paschen curve

微机电系统(MEMS)是可批量制作的,集微型机构、微型传感器、微型执行器以及信号处理和控制电路、直至接口、通信和电源等于一体的微型器件或系统. 这些 MEMS 器件包括微动开关、微镜、静电执行器、微米导线等距离很近的器件^[1]. 相对于传统的机械,它们的尺寸更小,最大的不超过 1 厘米,甚至仅仅为几微米,其厚度就更加微小. 当高压施加到该尺度的 MEMS 结构上时,会形成很高场强(10^8 V/m)^[2],极易导致器件结构的电气击穿失效. 因此, MEMS 器件中微尺度电极结构的放电击穿理论的研究对于微纳米器件的设计以及可靠运行都具有重要的意义.

最初,巴申定律作为研究该类型器件击穿特性的理论基础,然而在实际应用中发现,巴申定律无法适用于 pd 值(大气压与电极间距的乘积)较小的状况,即电极间隙距离为 μm 甚至更小的尺度. 大量的研究表明,当 pd 值较小时,实际的击穿电压要小于巴申曲线计算得到的最小电压值,因此对于微纳米尺度的电极间隙,巴申定律需要进行修正. 目前,该领域的研究工作主要由国外的学者进行,其中 Carazzetti 等人在 MEMS 微电极的电气击穿特性方面开展了较多的研究工作,利用 MEMS 微电子制备工艺制备了电极间距为 $10\sim 500\ \mu\text{m}$ 的微尺度梳状电极,并且研究了该电极在不同气压($0.5\sim 80\ \text{kPa}$)、不同气体类型(氦气、氩气、氮气)的环境中的直流击穿特性,通过 $I-V$ 曲线证明了该类型电极的击穿并非场致电子发射过程,而是汤逊气体放电过程,当气体的平均自由程与电极间隙可比时,击穿电压要略高一些,同时电极结构本身的多种尺度效应使得试验结果与巴申曲线既存在重叠,也存在背离^[3-4]. Wallash 和 Levit 等人在 MEMS 微电极方面也开展了相关的研究工作,分别研究了 MEMS 电极在微尺度的空气、绝缘介质、复合介质结构中的击穿特性,结果表明 $5\ \mu\text{m}$ 的电极间隙为击穿特性的临界点,大于 $5\ \mu\text{m}$ 的间隙击穿符合巴申定律,小于 $5\ \mu\text{m}$ 的情况则不能用巴申定律解释,场致电子发射过程是该临界点产生的主要原因^[5]. Chen 等人也进行了类似的研究工作,并得到了 $5\ \mu\text{m}$ 电极间隙的临界点,同时也发现了金属电极与半导体 Si 电极的击穿特性间的区别^[6]. 目前,国内在该领域的研究工作开展较少,因此亟待进行相关的研究工作,以期探索 MEMS 执行器、开关等器件结构的电气失效规律和机理,为微纳米器件的设计制造提供技术参考.

本文主要研究了典型 MEMS 平面微电极在微

米间隙的电气击穿特性. 利用 MEMS 工艺设计和制备微米尺度的金属铝薄膜电极,通过实验室自建的电压-电流综合测试系统,研究了典型平面微电极在直流作用下的预击穿过程中电流-电压变化特性以及最小击穿电压与电极间距之间的变化规律. 与经典的巴申定律进行了比较分析,并结合场致电子发射方程和电极的微观形貌表征,分析了平面微尺度电极在微间隙的电气击穿发展过程,从而得到平面微电极在直流作用下的预击穿和击穿特性,为研究 MEMS 器件的电气击穿规律和机理提供技术参考.

1 电极制备

本文试验样品是溅射在 SiO_2 介质层上微米尺度的金属铝膜电极,电极结构的剖面示意图如图 1 所示. 其中,铝电极半圆柱形结构,电极厚度为 $400\ \text{nm}$,电极间距 d 分别为 5 、 10 、 20 、 $40\ \mu\text{m}$. 样品采用传统的薄膜淀积工艺制成. 首先在 N 型(100)高掺杂硅基底上热氧化生长 SiO_2 介质层,形成 $500\ \text{nm}$ 厚的 SiO_2 氧化膜作为绝缘隔离介质;然后通过薄膜淀积法沉积铝膜,经过光刻、溅射、剥离、划片等工艺形成测试所需要的图形,电极样品 SEM 图如图 2 所示.

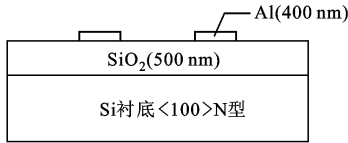


图 1 微电极的剖面示意图



图 2 微电极的 SEM 图

制备完成的 MEMS 平面电极依次在丙酮溶液、无水乙醇、蒸馏水中超声清洗 30 s,以除去样品表面的有机污染物,然后放置在烘箱中保持 $25\ ^\circ\text{C}$ 恒温干燥. 需要注意的是,长时间的超声振荡容易导致薄膜电极从衬底上脱落,而高温容易导致电极及衬底的变形损伤. 在试验之前,样品需要放置在干燥烘箱中,避免受到水分、灰尘等的污染.

2 试 验

直流作用下的预击穿和击穿特性试验系统主要由手动测试探针台、Keithley 6517B 直流源/高阻计以及脉冲电流传感器等部分组成,见图 3。其中,直流高压通过探针台的钨探针施加到样品的金属电极上,加压测试探针台放置在减振平台上,以避免外界振动对样品测试产生影响。

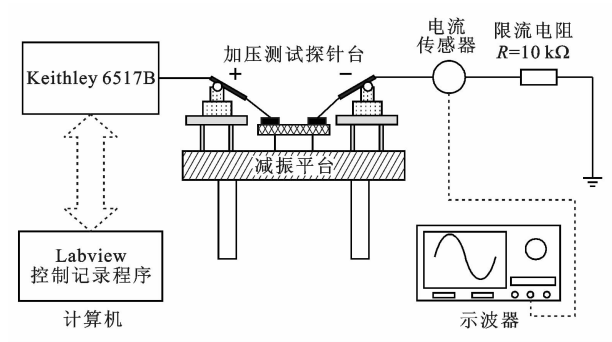


图 3 测量系统框图

击穿特性试验主要包括 MEMS 平面微电极的直流预击穿过程中电流-电压特性测试和击穿电压测量。Keithley 6517B 输出的直流高压通过探针台施加到样品电极两端,电压输出通过 Labview 程序自动控制,从 0 V 开始,按照 1 V/s 的速度升高电压,同时 Keithley 6517B 也按照 1 次/s 的频率测量击穿前的电流值序列,直至电流传感器中测量到超过设定触发阈值 (20 mA) 的电流突变(如图 4 所示),表示击穿发生,此刻的电压即为击穿电压。

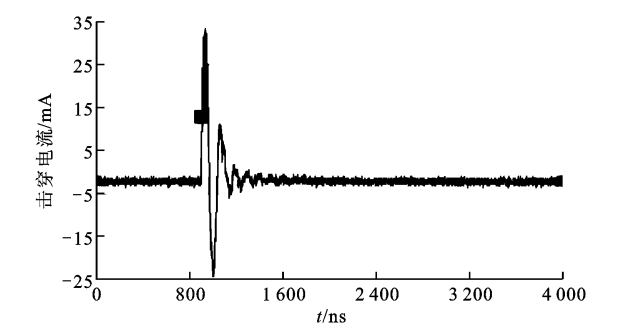


图 4 击穿时刻电流波形

3 结果与讨论

3.1 预击穿电流-电压曲线

标准大气压 (1.01×10^5 Pa) 下,平面微电极在不同电极间隙下的电流-电压关系如图 5 所示,显示范围为样品两端施加电压从 50 V 到击穿电压 V_{bd} 之间的部分。由图可知,当平面电极间距在 5~40

μm 时,直流作用下的预击穿电流均在 $10^{-10} \sim 10^{-7}$ A 范围内变化,当电极间发生电气击穿时,电流会发生突变达到 mA 量级(由于纵坐标的刻度原因未将击穿时刻的电流值表示在图中)。

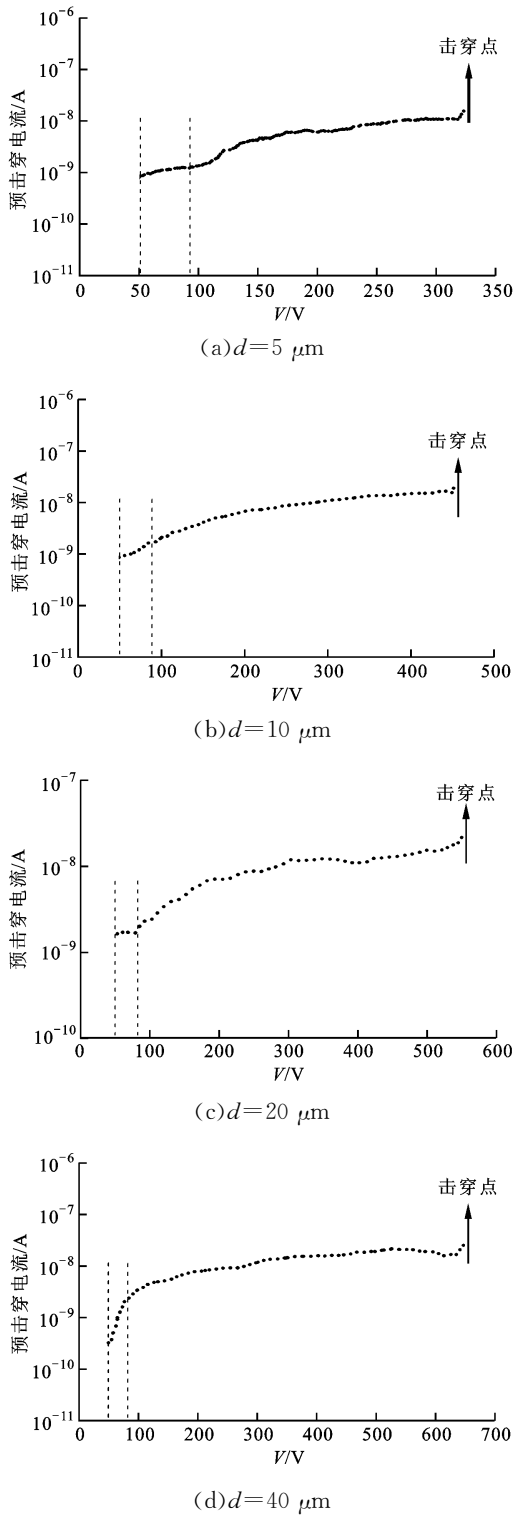


图 5 标准大气压下不同电极间隙的电流-电压关系

由于空气中总会存在一定密度的自由电子、正负离子等带电粒子,因此当电极两端电压从 0 V 开

始升高时,电极间隙中的自由电子在电场作用下开始向阳极运动.此时,电极间的电流在 10^{-14} A 范围内,电流形式为无规则脉冲式(电压小于 50 V).

当电极间的电场强度较低时,自由电子自身的动量有限,无法使气体分子发生电离,因此它的一部分由于与气体碰撞,受到后向散射又返回到阴极,其余部分则到达阳极.在某一电压 V_i 下,电极间的电流处于饱和状态,此时电流达到 10^{-9} A,电压阈值 V_i 在 50~80 V 之间.

当电压进一步增大时,通道内的电场强度越来越大,电子的动量足够与气体分子、原子发生碰撞电离从而产生电子雪崩.连续不断的电子雪崩过程使得通道内的电子密度迅速增加,导致入射到阳极的电子数目骤增,预击穿电流也随之增大,在击穿时刻之前达到 10^{-7} A 量级.当达到某一阈值 V_{bd} 时,电极间形成导电性通道,导致击穿发生,击穿时刻电流突增到 mA 量级.

3.2 场发射 F-N 曲线

在高场强的作用下,固体材料发射电子的现象称为场致电子发射.场致电子发射是由于外加强电场使固体的表面势垒高度降低,宽度变窄,致使固体内部的电子不需要另外增加能量,即不需要激发,就可以穿透势垒逸出.Fowler 和 Nordheim 用量子力学观点解释了场致电子发射现象,认为当场强 $E=10^6$ V/cm 时,金属材料就有较强的电子发射现象^[7].因此,可以用 Fowler-Nordheim 理论来分析场发射特性,它是判断电子的发射是否属于场致电子发射的主要判据.Fowler-Nordheim 方程为

$$J = \frac{AE^2}{\varphi t^2(y)} \exp[-B\varphi^{3/2} E^{-1} \theta(y)] \quad (1)$$

式中: E 为电场强度; φ 为金属电极的功函数; A 和 B 为常数参量.因此,场发射电流可以表示为

$$I = AE^2 \exp(-B\varphi^{3/2}/E) \quad (2)$$

式中: $E=\beta E_0$, E_0 是阴极和阳极间的平均电场, β 是场增强因子.由此可推导出: $\ln(I/V^2) \propto Bd\varphi^{3/2}/\beta(1/V)$, 其中 V 为电极两端所加的电压, d 是阴极与阳极之间的距离.因此,通常场致电子发射的 $\ln(I/V^2)$ 与 $(1/V)$ 之间呈线性关系,即 F-N 曲线的线性负斜率表示电极材料的电子发射为场致电子发射形式^[8].不同电极间隙的场发射 F-N 曲线如图 6 所示.

图 6 所示的 F-N 曲线在击穿时刻附近的趋势为非线性的正斜率形式,表明 MEMS 平面电极在 $d > 5 \mu\text{m}$ 时并不是场致发射过程占主导,而应该是通

常的汤逊放电过程占主导,即击穿过程是以电子碰撞电离形成导电性通道为主的汤逊放电^[9].

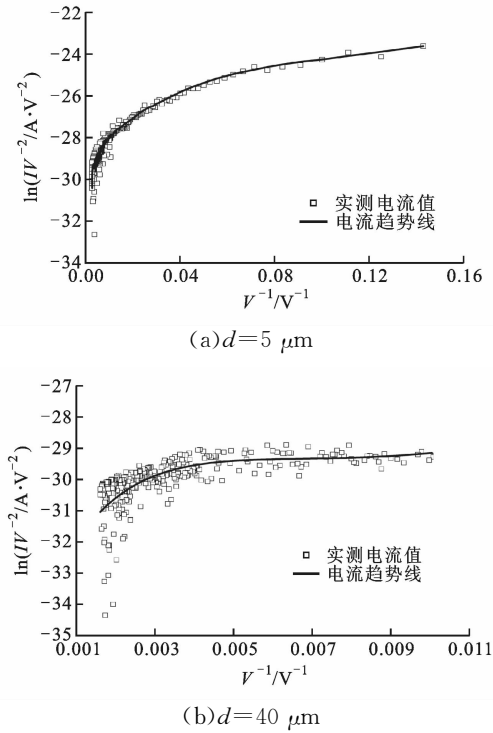


图 6 标准大气压下不同电极间隙的 F-N 曲线

3.3 电极间距的影响

试验中微电极两端施加直流电压,电压从 0 V 开始,按照 1 V/s 的速率升高至电极间绝缘破坏发生击穿为止,从而得到最小击穿电压.图 7 为击穿电压 V_{bd} 随电极间距 d 的变化曲线.

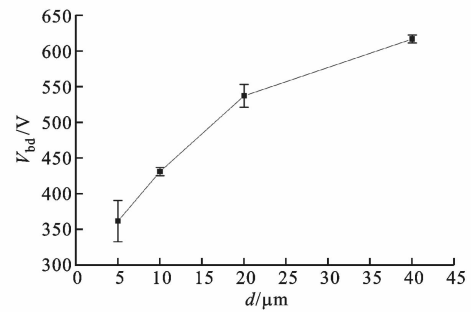


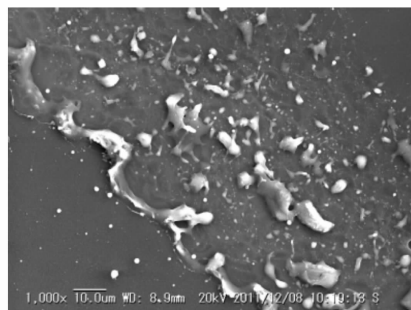
图 7 击穿电压随电极间距的变化

由图 7 可知,当电极间距为 $5 \mu\text{m}$ 时,最小击穿电压为 330 V;当电极间距为 $40 \mu\text{m}$ 时,最小击穿电压为 635 V.文献^[5]得到的在微米尺度平面电极间隙的击穿电压与本文平面电极间的最小击穿电压基本一致.文献^[10]的大尺度金属电极间隙击穿特性研究得到的结果为,当 $d = 5 \mu\text{m}$ 时,金属铝电极的击穿电压 $V_{bd} \approx 350$ V,当 $d = 10 \mu\text{m}$ 时, $V_{bd} \approx 370$ V,当 $d = 20 \mu\text{m}$ 时, $V_{bd} \approx 440$ V,这与本文得到的最

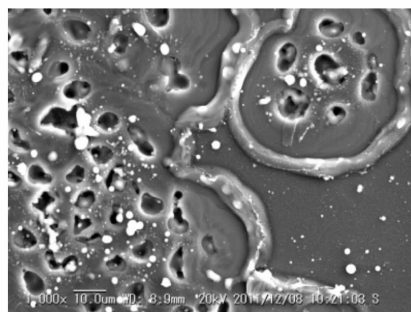
小击穿电压具有显著差异. 这说明微电极自身的尺度效应对于击穿电压有较大影响, 在宏观金属电极微尺度间隙的击穿过程中, 电极表面不可避免的微凸起结构往往导致局部电场的增强, 达到金属材料电子发射的阈值(10^8 V/m), 从而导致间隙中电子密度增大, 使得间隙在相对较低的电压下便发生击穿. 利用 MEMS 工艺制备的微尺度电极结构由于采用精确的金属溅射工艺可以实现纳米尺度的电极表面加工, 有效地降低了电极表面微凸起结构, 从而避免了局部电场畸变, 得到更高的击穿电压阈值.

3.4 电极表面微观分析

击穿前后 MEMS 电极结构表面形貌的微观变化对于分析微电极的击穿特性具有重要意义. 本文利用扫描电子显微镜(SEM)对击穿后的电极表面进行微观分析, 得到如图 8 所示的击穿后的电极样品表面形貌 SEM 图(微电极的间距 d 为 $40\text{ }\mu\text{m}$). 如图所示, 阴极表面有溅射沉积物产生, 阳极表面有“坑洞”产生, 直径在 $1\sim 8\text{ }\mu\text{m}$ 之间.



(a) 阴极表面



(b) 阳极表面

图 8 击穿后的电极表面形貌 SEM 图

根据汤逊放电机理^[11], 击穿时刻大量电子崩从阴极向阳极迁移, 在高场强的作用下轰击阳极材料表面, 导致表面破坏. 由于直流下的击穿, 击穿电流会持续一段时间, 高密度和高速(2×10^7 cm/s)运动的电子崩使阳极表面局部温度迅速升高, 造成阳极表面金属材料以及 SiO_2 基底材料的烧蚀, 形成图

8b 所示的大小不一的“坑洞”. 在放电过程中, 阴极材料表面同样承受大量正离子的轰击, 由于正离子的速度(2×10^5 cm/s)相对较小, 与阴极的碰撞仅仅造成阴极表面金属材料的蒸发, 对衬底的介质层无明显破坏. 在受热蒸发出的金属原子当中, 多数由于逆扩散又返回到原来的表面上, 只有一少部分放出, 从而形成了图 8a 所示的阴极表面溅射沉积.

4 结 论

本文研究了典型平面微电极结构在间隙距离为 $5\sim 40\text{ }\mu\text{m}$ 范围内的预击穿和击穿特性, 主要得到如下结论.

(1) 预击穿电流-电压曲线表明, 在击穿发生之前, 电流的变化主要有自由带电粒子的定向迁移阶段、电流密度达到饱和阶段、碰撞电离发展阶段. 预击穿电流会随着不同的发展阶段从 10^{-14} A 迅速增大, 直至在击穿时刻达到 mA 量级.

(2) 预击穿过程中的场发射 F-N 曲线表明, 在 $5\sim 40\text{ }\mu\text{m}$ 范围内的微电极间的电气击穿基本符合经典巴申曲线的规律, 即以碰撞电离形成大量电子崩的汤逊放电为主.

(3) 在相同间距下的 MEMS 结构中, 平面微电极的击穿电压大于宏观金属电极间的击穿电压, 主要是由于微电极的制备工艺避免了局部场强的畸变.

(4) 由于放电过程中大量电子崩和正离子的轰击, 阳极表面有“坑洞”产生, 而阴极表面存在溅射沉积现象.

参考文献:

- [1] DE GROOT W A, WEBSTER J R, FELNHOFER D, et al. Review of device and reliability physics of dielectrics in electrostatically driven MEMS devices [J]. IEEE Transactions on Device and Materials Reliability, 2009, 9(2):190-202.
- [2] ONO T, SIM D Y, ESASH M. Micro-discharge and electric breakdown in a micro-gap[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2000, 10(3):445-451.
- [3] CARAZZETTI P, SHEA H R. Electrical breakdown at low pressure for planar microelectromechanical systems with $10\text{ }\mu\text{m}$ to $500\text{ }\mu\text{m}$ gaps[J]. Journal of Micro-Nanolithography MEMS and MOEMS, 2009, 8(3): 031305.
- [4] CARAZZETTI P, RENAUD P, SHEA H R. Experi-

mental study of electrical breakdown in MEMS devices with micrometer scale gaps[J]. Proceedings of SPIN, 2008, 6884:688404.

[5] WALLASH A, LEVIT L. Electrical breakdown and ESD phenomena for devices with nanometer-to-micron gaps[J]. Proceedings of SPIN, 2003, 4980: 87-96.

[6] CHEN Ching-Heng, YEH J A, WANG Pei-Jen. Electrical breakdown phenomena for devices with micron separations[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2006,16(7):1366-1373.

[7] 薛增泉,吴全德. 电子发射与电子能谱[M]. 北京:北京大学出版社, 1993:60-75.

[8] 张兰,马会中,姚宁,等. 碳氮纳米管薄膜及其场致电子发射特性[J]. 光电子·激光, 2003, 14(8): 779-782.

ZHANG Lan, MA Huizhong, YAO Ning, et al. Carbon nitride nanotube thin film and its field emission properties [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2003,14(8):779-782.

[9] STRONG F, SKINNER J L, TIEN N C. Electrical discharge across micrometer-scale gaps for planar MEMS structures in air at atmospheric pressure[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2008,18(7):1-11.

[10] TORRES J W, DHARIWAL R S. Electric field breakdown at micrometre separations[J]. Nanotechnology, 1999, 10(1): 102-107.

[11] 徐学基,诸定昌. 气体放电物理[M]. 上海:复旦大学出版社, 1996:87-90.

(编辑 杜秀杰)