

微等离子体喷枪及其应用

韩传余¹, 吴瑜², 王守国¹

1. 中国科学院微电子研究所; 中国科学院微电子器件与集成技术重点实验室, 北京 100029
2. 武汉科技学院理学院, 武汉 430073

摘要 微等离子体喷枪是一类重要的微等离子体源, 已成为近年国际上低温等离子体研究的热点课题之一。与常规等离子体喷枪相比, 微等离子体喷枪具有低功耗、低温度、高密度等特性。由于电极间隙小, 适合于高压或大气压下运行, 因而微等离子体喷枪具有体积小、易于集成、便携等优势。目前研制的微等离子体喷枪主要有直流微空心阴极型、高频微 DBD 型、射频电容耦合型、射频电感耦合型、微波耦合型等放电形式。现阶段, 微等离子体喷枪已在半导体制造领域、生物医学领域、航天推进领域进入了实用化阶段。本课题组研究制作了高频微 DBD 和射频电容耦合型结构的喷枪, 将其应用于光刻胶去胶、材料表面改性及微生物灭菌领域, 并对喷枪的放电特性进行了研究。基于本研究组的实验研究, 本文综述了已有的各种微等离子体喷枪, 介绍了各种微等离子体喷枪的结构和工作原理, 以及在不同领域的研究和应用状况。

关键词 常压等离子体; 微等离子体喷枪; 微空心阴极放电; 微介质阻挡放电

中图分类号 O53

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)20-0091-06

Microplasma Jets and Applications

HAN Chuanyu¹, WU Yu², WANG Shouguo¹

1. *Key Laboratory Microelectronic Devices & Integration Technology, Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*
2. *College of Science, Wuhan University of Science and Engineering, Wuhan 430073, China*

Abstract Microplasma jets are an important kind of microplasma sources and involve a significant field of research with respect to low-temperature plasma, which is not fully understood so far. Compared with traditional plasma jets, they consume less energy, and have lower temperature and with higher density of plasma. Moreover, most of microplasma jets can be operated at atmospheric pressure, because the gap between the electrodes is very small. Therefore, they are compact, economic, and portable in actual applications. Microplasma jets have attracted a great interest from scientists in the field of atmospheric pressure plasmas with wide studies world over. Several kinds of microplasma jets were proposed: DC microhollow discharging, high frequency micro dielectric barrier discharging, RF inductively coupled discharging, RF capacitively coupled discharging, microwave coupled discharging, to name just a few. Currently the focus is on how to achieve high density of atmospheric pressure plasma by using microwave and RF. And many types of microplasma jets were designed and used in several fields. In the semiconductor industry they are used for thin film deposition, local etching and photoresist stripping. Several types of microplasma jets have been used to sterilize and separate the cells in biomedical industry. In space industry, it is intended to be used to propel the micro space flight and micro satellites. We designed some types of the microplasma jets and measured their characteristics in the laboratory. With them, good results were obtained with respect to photoresist stripping and sterilization. Based on our study of the microplasma jets, this paper reviews the existing microplasma jets, discusses their mechanism and various fields of research and applications.

Keywords atmospheric pressure plasma; microplasma jet; microhollow discharge; micro dielectric barrier discharges

收稿日期: 2010-02-05; 修回日期: 2010-09-28

作者简介: 韩传余, 硕士研究生, 研究方向为微电子设备, 电子信箱: hanchuanyu@ime.ac.cn

微等离子体^[1-2]是被限制在毫米到微米尺度范围内的一种低温等离子体,是近年国际上低温等离子体研究的热点课题之一。微等离子体喷枪是在微等离子体基础上制作的、一种可以向外喷射出微等离子体束流的微等离子体源^[3],它具有很高的电子密度(高达 10^{16}cm^{-3})和很低的气体温度(气体温度 T_g 可小至 300K)^[4],这是常规低压等离子体很难达到的。并且大部分喷枪可在常压下工作,具有较低功耗($\leq 1\text{W}$),这使它可集成于膜片上。由于微等离子体喷枪的这些特点和优势,近来受到广泛关注和研究,已设计制作了多种结构的微等离子体喷枪。本文综述微等离子体喷枪的类型、结构、放电特性和微等离子体喷枪的应用领域。

1 微等离子体喷枪结构

目前研制出的微等离子体喷枪主要有直流微空心阴极型、高频微 DBD(Dielectric Barrier Discharges)型、射频电容耦合型、射频电感耦合型、微波耦合型等放电形式。

1.1 直流微空心阴极结构

直流微等离子体源工作在反常辉光放电模式。在一般的结构中,由于电子、离子对电极的直接轰击,造成直流微等离子体源的寿命很短。即使工作在高气压下,使用较小的电流、较低溅射率的电极,直流微放电的寿命仍然很难提高。此外,离子不断轰击电极,也会造成放电污染。

目前,在直流放电模式下的等离子体喷枪通常选用微空心阴极结构^[5]。Schoenbach 等^[6]测量了在通入氩气、不同压强条件下,微空心阴极直径为 0.7mm 结构的电流-电压特性曲线^[6](图 1)。直流微空心阴极结构的喷枪在放电过程中,双极场势阱的束缚使得大部分电子被约束在放电腔中,喷枪寿命得以延长,利于增加背景气体的电离,提高等离子体密度。但是,由于高能离子的轰击,这种喷枪电极寿命也不是很长。这种结构的喷枪常压下能获得较高的电子密度($10^{14}\sim 10^{16}\text{cm}^{-3}$),但是由于尺寸缩小,散热性变得很差,阴极中气体的温度可

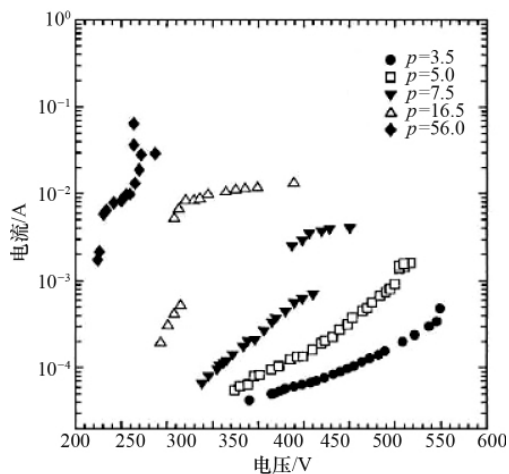


图 1 氩气的直流微空心阴极放电的电流-电压特性曲线
Fig. 1 Current-voltage characteristics of the microhollow cathode discharge in argon

高达几百摄氏度,这就会造成电极的热损伤问题。由于这些原因,空心阴极微等离子体喷枪源通常使用难溶的、低溅射率材料制作,例如钼。目前已有的直流空心阴极结构微等离子体喷枪如图 2 所示。

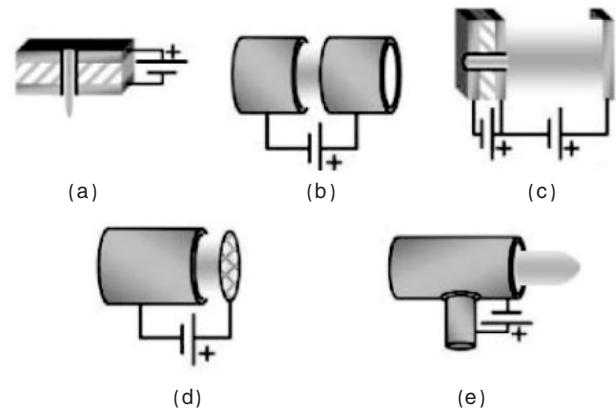


图 2 直流微空心阴极微等离子体喷枪结构原理示意图
Fig. 2 Schematic diagram of various DC microplasma jets
注: (a) 金属-介质阻挡层-金属微空心阴极喷枪; (b) 管状式微空心阴极喷枪; (c) 三端式微空心阴极喷枪; (d) 管状式带有栅型阳极微空心阴极喷枪; (e) 管状嵌入阳极式微空心阴极喷枪。

Notes: (a) metal-insulator-metal microhollow cathode microplasma jet; (b) microtube microplasma jet; (c) three-electrode microplasma jet; (d) microtube with grid anode microplasma jet; (e) microtube with inserted anode microplasma jet.

1.2 高频微 DBD 放电结构

DBD(Dielectric Barrier Discharges)放电^[7]又称介质阻挡放电或无声放电,是一种有绝缘介质插入放电空间的气体放电,介质可以覆盖在 1 个电极上,也可以在 2 个电极上都有,或者悬挂在放电空间中。微 DBD 放电结构中,介质阻挡层不仅保护了电极不受离子的直接轰击,延长电极的寿命,还起到了控制放电特性的作用。微 DBD 喷枪放电过程中,电荷在介质阻挡层表面上积累。在交流电源的一个周期内,介质阻挡层上的电荷在上半周期形成了一个与外加电场方向相同的电场,使得气体击穿电压下降。同时,下半周期内,这个电场又与外加电场相反,限制了电流的增加,阻止了放电类型由辉光放电向弧光放电的转变。在微等离子体喷枪器件中,气体由一个绝缘介质管子通入,外部的电极用来使气体击穿放电,产生等离子体。微 DBD 型结构喷枪使用交流电源,工作频率在 kHz 范围内。

本研究组设计制作了 4 种 DBD 高频放电微等离子体喷枪见图 3。目前,已有的 DBD 高频放电微等离子体喷枪结构可以归结为如图 4 所示的 2 种结构。Yong 等^[8]制作了一个图 4(b)结构的微 DBD 喷枪,其内电极直径 1.2mm ,介质阻挡层外径 3.2mm 、厚 0.2mm ,并且测量了在通入氩气、电源频率 20Hz 条件下的电流-电压特性曲线^[8](图 5)。

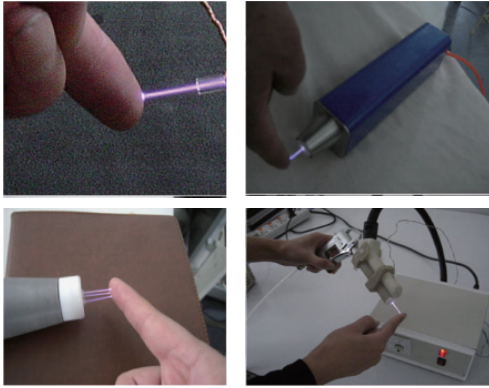
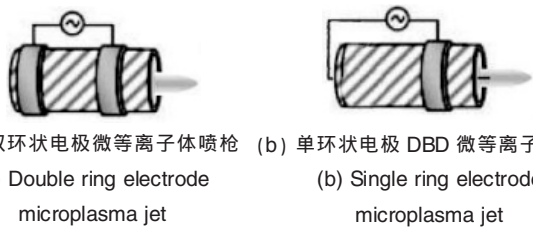


图3 4种DBD结构微等离子体喷枪
Fig. 3 Four types of micro-DBD plasma jets



(a) 双环状电极微等离子体喷枪 (b) 单环状电极 DBD 微等离子体喷枪
(a) Double ring electrode microplasma jet (b) Single ring electrode microplasma jet

图4 微DBD喷枪结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of two types of micro-DBD plasma jets

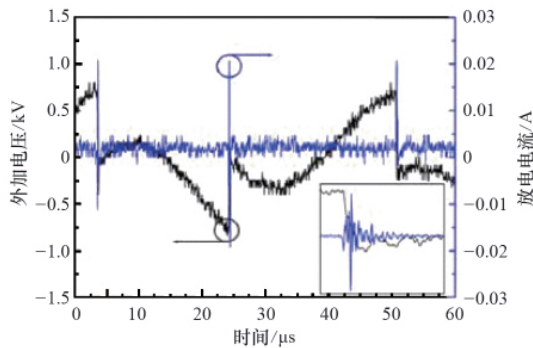


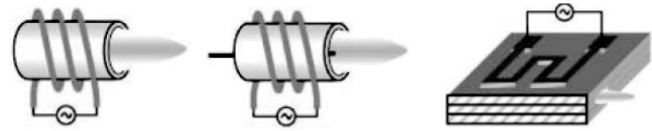
图5 微DBD结构放电电流-电压特性
Fig. 5 Current-voltage characteristics of the micro-DBD plasma jet

1.3 射频电感耦合结构

射频电感耦合微等离子体源^[9]的优点是耦合效率高、结构简单、离子束流可控性强。射频耦合微等离子体源感生电场平行于线圈壁,极大地减小了鞘层能量损失、离子对电极的刻蚀和电极刻蚀造成的污染。因此,射频耦合微等离子体源寿命长,可以无损伤地工作数年。但是很难获得小尺寸的微等离子体源^[10]。

实际应用中,射频电感耦合微等离子体喷枪线圈的自感系数随线圈的减少比寄生电阻下降的更快,这限制了微等离子体喷枪的一些性能。此外,这种喷枪的性能非常依赖于工作频率。研究发现,耦合功率随着工作频率增加而增加。所以,射频耦合微等离子体喷枪通常都工作在特高频和超高频

(频率通常为数百 MHz)。射频耦合微等离子体喷枪的线圈通常做的不是很多,只有 5 圈左右,因为线圈的增加会使得交流阻抗限制工作频率。射频耦合微等离子体喷枪在较低工作气压下性能较好,通常的工作气压为 0.1~10Torr (1Torr=1.33322×10²Pa)^[11]。常压下,线圈中的电流需要非常大才行。并且常压下的射频耦合微等离子体喷枪,通常在中间放置一根金属细丝,这样的结构有利于常压下产生辉光放电。射频电感耦合的微等离子体喷枪结构如图 6 所示。Hopwood^[12]使用微机械制造工艺,在玻璃硅片上制作出了一个直径 5mm 的微等离子体源,其结构如图 6(c)所示,工作电源频率为 450MHz。在通入空气和氩气条件下起辉功率与压强的关系如图 7 所示^[12]。



(a) 线圈直接耦合式 (b) 线圈内加细丝电极式 (c) 表面线圈耦合式
(a) Coil (b) Coil plus filament (c) Planar spiral

图6 3种射频电感耦合微等离子体喷枪结构示意图

Fig. 6 Schematic diagram of three types of RF inductively coupled microplasma jet

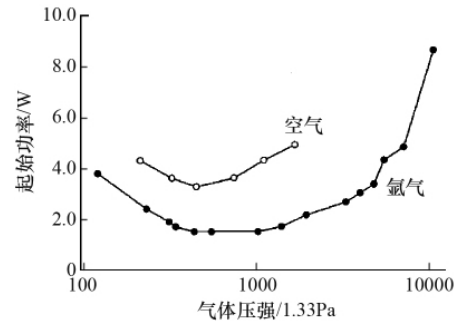


图7 氩气起辉功率与压强的关系曲线
Fig. 7 Relationship between initiation power and argon pressure

1.4 射频电容耦合结构

射频电容耦合等离子体喷枪源通常工作在 1~100MHz,电极使用溅射率低材料制成。射频电容耦合微等离子体喷枪和常规射频电容耦合具有很多的相似性。高压放电被限制在很小的空间内,很容易产生弧光放电。由于这种原因,通常在电极之间放置一层介质阻挡层来稳定放电。射频电容耦合微等离子体喷枪产生的等离子体密度要比直流微空心阴极、微DBD喷枪高得多。但是,由于电场是垂直于电极的,这种放电的离子浓度不会很高。因为当功率增加时,鞘层加速离子带来的损失也会增加,这使得离子浓度增加有限。当增加工作频率时,会减少鞘层的压降,这样功率就更容易传输给等离子体中的电子^[13]。但是,增加工作频率也不能保证就能增加等离子体浓度。某些情况下,高工作频率会使得电子温

度增加。这种喷枪通常选用常压作为工作气压,有着比较广泛的应用。

3种主要的射频电容耦合的微等离子体喷枪结构如图8所示。由于传统射频电源体积较大、质量重。本研究组设计制作的自激振动射频电容耦合微等离子体喷枪,工作频率为6.7MHz,使用自激振荡电路供电,省去了传统射频电源。喷枪放电如图9所示。测试通入氩气时的电流电压特性,结果如图10所示。



(a) 金属平板式 (b) 金属平板介质阻挡层式 (c) 同轴管状式
(a) Parallel plates (b) Parallel plate with bare electrodes dielectric-covered electrodes (c) Coaxial jet

图8 射频电容耦合的微等离子体喷枪结构示意图

Fig. 8 Schematic diagram of RF capacitively coupled microplasma jets

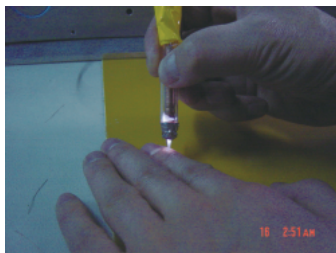


图9 自激振动射频电容耦合微等离子体喷枪

Fig. 9 Image of self-excited vibration RF capacitively coupled microplasma jets

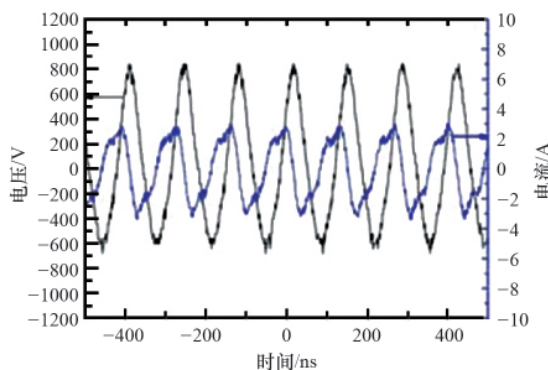


图10 自激振动射频电容耦合微等离子体喷枪电流-电压特性曲线

Fig. 10 Current-voltage characteristics of the self-excited vibration RF capacitively coupled microplasma jets

1.5 微波耦合结构

常规的微波耦合等离子体源^[13](例如螺旋波、电子回旋、表面波放电)具有较高的效率,但是这些放电方式的尺寸与激发场的波长有关。因此,缩小这些放电器件的尺寸是很困难的。

一个微波等离子体源的尺寸若是缩小到 mm 量级,工作频率就需要达到 10~100GHz, 这是不现实的。但是工作在 GHz 范围内的微等离子体喷枪源已有报道^[14]。这些器件是使用微波导^[15-16](微波传输带、同轴波带、带波导)取代集总元件,将功率传输给等离子体的。在大多数设计中,等离子体的尺寸比激发波的波长小得多,这时可将这种放电简单地看作 GHz 时的电容耦合等离子体。微波传输带和带波导也被用来产生等离子体,其尺寸和射频激发的波长几乎相同。

微波带结构的微等离子体喷枪源由于具有简单的结构和稳定的特性,很受人们的关注。使用波导,辐射损失和干涉极大地减少了,这种结构具有更多的变种型结构工作在超高频或使用纳米脉冲。尽管有些微波微等离子体源可以看作是电容耦合的等离子体源,但是使用高频激发放电的器件性能比射频耦合等离子体好很多。因为鞘层电压降 $V_s \approx \omega_i^2$,使得传递到鞘层离子的能量减小很多,因此微波激发的微等离子体喷枪源具有较高的效率和较长的寿命。微波等离子体喷枪的结构如图11所示。Choi等^[17]设计了一种基于同轴传输线谐振腔的微波耦合等离子体喷枪,这种喷枪空隙宽为 200 μ m,长度为 65mm。并且测量了不同气体所需最低点起辉率与压强的关系^[17](图12)。



(a) 线性微波带式 (b) 基于微波带的表面波式 (c) 同轴管状波耦合式
(a) Microstrip (b) Microstrip linear resonator with engineered end (c) Coaxial jet linear resonator

图11 3种微波耦合微等离子体喷枪结构示意图

Fig. 11 Schematic diagram of three types of microwave microplasma jets

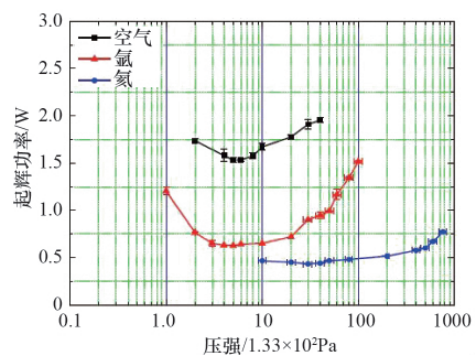


图12 微波耦合微等离子体喷枪最低点起辉率与压强的关系

Fig. 12 Relationships between ignition power and pressure in air, argon and helium

2 微等离子体喷枪的应用

2.1 微等离子体喷枪在半导体制造领域中的应用

在半导体制造领域中,等离子体加工技术由于刻蚀精度

高、加工能力强等优点,得到广泛的应用,如各种微纳米薄膜的刻蚀、淀积、生长等。目前半导体行业中用到的等离子体加工都需要真空系统。而微等离子体喷枪的出现,可以改变半导体设备对真空系统的依赖,并且可实现无掩膜刻蚀^[18-19]。

2.1.1 淀积薄膜

薄膜制备是硅片加工中的一个主要工艺步骤。目前,微等离子体喷枪可以用来制备多种材料薄膜。例如,Benedikit等^[20]设计了一个射频电容耦合微等离子体喷枪,用于常压下淀积各向同性的氢化多晶碳薄膜,淀积速率可达几个 nm/s。并且使用同样结构的微等离子体喷枪,在硅片衬底上淀积了高质量的无碳 SiO₂ 薄膜^[9]。Yi 等^[21]设计了常压下电感耦合等离子体喷枪,成功地淀积了低 K 材料 SiOC。多种材料薄膜的成功制备使微等离子体喷枪应用在半导体制造工艺流程中成为可能。

2.1.2 刻蚀

传统等离子体刻蚀中所应用的是宏观等离子体,即等离子体作用在整个样品表面,若要进行选择性刻蚀,必须采用掩膜实现。利用微等离子体喷枪可以直接进行无掩膜刻蚀加工,因此这种刻蚀方法可提高效率,简化工艺。所以,成为目前广泛关注的热点。

Ichiki 等^[22]设计了一个常压下高射频电感耦合微等离子体喷枪,获得了电子密度达 $10^{14}\sim 10^{15}\text{cm}^{-3}$ 的等离子体,用来对硅及硅玻璃进行刻蚀,刻蚀速率分别可达 4000 和 $14\mu\text{m}/\text{min}$ 。Tan 等^[23]设计研制出了一个可在具有 3 个自由度的扫描微等离子体喷枪系统,在硅片表面刻蚀出了不同深度的沟槽。Yoshiki^[24]设计了一个常压下的射频电容耦合微等离子体喷枪,使用氧气和氩气的混合气体成功地实现了对绝缘薄膜 PAI 材料的刻蚀。

2.1.3 清洗和去胶

使用微等离子体喷枪可以进行局部的去胶和清洗,并且避免了昂贵的抽真空系统和缓慢的抽真空时间。

本研究组将射频电容耦合微等离子体喷枪用于光刻胶的清洗,采用常压下的洁净空气作为工作气体,可获得很好的局部清洗效果。图 13 为本研究组设计制作的微 DBD 微等离子体喷枪及其清洗光刻胶的效果图。

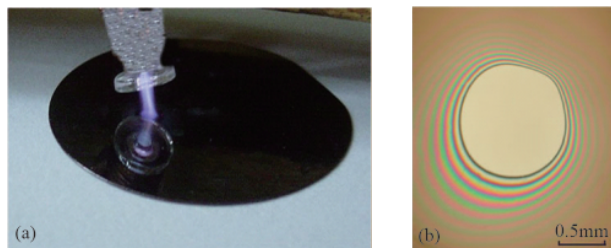


图 13 微等离子体喷枪清洗光刻胶(a)和清洗效果(b)示意图

Fig. 13 Microplasma jet stripping photoresist (a) and the effect (b)

2.2 微等离子体喷枪在生物医学领域的应用

生物医学领域需要的微等离子体源必须有良好的定位精度,不仅需要能在大气压下工作,而且需要尽量避免热和电场对生物材料造成的损伤。

2.2.1 灭菌

吴旭琴等^[25]探讨了常压射频微等离子体喷枪对微生物的影响机制,用常压射频喷枪和 DBD 喷枪 2 种不同类型等离子体对不同代表微生物金黄色葡萄球菌、大肠杆菌、枯草杆菌黑色变种进行处理,分析比较不同微生物对不同等离子体的存活曲线;进而利用扫描电镜观察微生物细胞壁、膜等外部结构的变化。结果显示,2 种等离子体对不同微生物的杀灭作用均为先快后慢,APPJ 的作用效果远优于 DBD。同时,在 APPJ 的作用下,大肠杆菌细胞壁、膜有明显破裂发生(图 14)。这证明,常压射频等离子体喷枪可快速有效地杀灭微生物体,其灭菌机制可能与微生物细胞壁、膜的破裂有关。

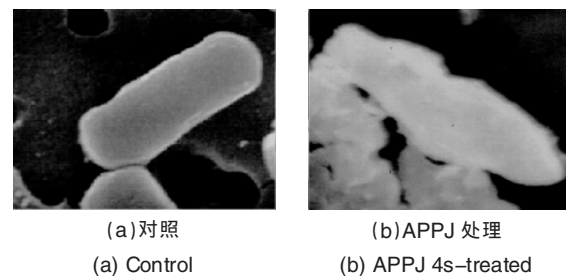


图 14 扫描电镜下经常压射频等离子体喷枪处理的大肠杆菌细胞破损情况

Fig. 14 Gross morphological damage of *E. coli* cells under SEM after APPJ treatment (8100 \times)

Kim 等^[26]设计了 2 种不同单针尖电极微等离子体喷枪。分别使用高频和射频电压作为工作电压,加上一个接地圆环时,放电电流、反应活性基团发光强、灭菌速率都得到了明显地提高。Kim 等^[26]对大肠杆菌进行了处理,通过对比实验发现,对大肠杆菌起主要作用的是反应活性基团,热、UV 光子、带电离子、电子所起的作用很小。

2.2.2 细胞分离

微等离子体喷枪的精细操作及分离细胞的能力,使它在分离癌细胞、清洁口腔等精细外科领域中具有很大的应用空间。Lee 等^[27]设计制作了一个射频电容耦合微等离子体喷枪,对人的肿瘤细胞进行了处理。在常压下通入氩气和少量氧气的条件下,处理 15s 发现 G361 肿瘤细胞的粘合力明显的下降,并且肿瘤细胞的形状由纺锤型变成了圆形。

2.3 航天推进领域中的应用

微型卫星的发展和成功应用迫切需要新型微推力器的研制。微等离子体推进不断引起了研究人员的注意。

Takao 等^[28-29]设计了一个微波耦合的微等离子体喷枪推进器。通过数值计算发现,这种微等离子体喷枪推进器在功率小于 10W 的情况下,可以提供 mN 级的推力,这个推力对微型空间器来说已经足够了。Xia 等^[30]设计了一种微空心阴极

放电等离子体推进器。这种结构是建立在 2 个几百微米厚度的金属平面电极上,材料可以是钼、铝等,由电介质(云母或氧化铝)隔开。“三明治”的布局结构上从一个电极到另一个电极钻有直径为几十微米到几百微米的孔,气体压强可以很高,甚至可超过大气压。微空心阴极放电等离子体推进器在微放电等离子体中加热了工质气体,随后通过微喷管喷产生推力,产生的推力可达几百 mN。与传统的冷气微推力器相比,这大大提高了推力器的比冲和推力。

3 结论

与常规等离子体喷枪相比,微等离子喷枪具有低功耗、高密度、高稳定等特性,由于电极间隙小,适合于高压或大气压下运行,因而赋予了这种微等离子体喷枪以小巧、经济、便携等优势。目前微等离子体喷枪已经在半导体制造领域、生物医学领域、航天推进领域进入了实用化阶段,相信随着微等离子体喷枪的进一步发展,更多新的应用将不断涌现。

参考文献 (References)

- [1] Kunihide Tachibana. Current status of microplasma research [J]. *IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 2006, 1 (2): 145–155.
- [2] 约翰·J·博林杰, 戴维·J·瓦因兰, 陈彦婷, 等. 微等离子体 [J]. *科技导报*, 1990(4): 40–45.
John J Bollinger, David J Valanice, Chen Yanting, *et al. Science & Technology Review*, 1990(4): 40–45.
- [3] Lazzaroni C, Aubert X, Marinov D, *et al.* Microplasmas and micro-jets[J]. *Publ Astron Obs Belgrade*, 2008, 84: 248–249.
- [4] Benedikt J, Raballand V, Yanguas-Gil A, *et al.* Thin film deposition by means of atmospheric pressure microplasma jet[J]. *Plasma Physics Control Fusion*, 2007, 49(12): 419–427.
- [5] Miclea M, Heitmann K, Flore U, *et al.* Diagnostics and application of the microhollow cathode discharge as an analytical plasma [J]. *J Phys D: Appl Phys*, 2005, 38(11): 1709–1715.
- [6] Schoenbach K H, Verhappen R, Tessnow T, *et al.* Microhollow cathode discharges[J]. *Applied Physics Letters*, 1996, 68(13): 13–15.
- [7] Hippler R, Kersten H, Schmidt M, *et al.* Low temperature plasmas: Fundamentals, technologies, and techniques[M]. Weinheim: Wiley-VCH, 2007.
- [8] Yong Cheo Hong, Han Sup Uhm, Won Ju Y. Atmospheric pressure nitrogen plasma jet: Observation of striated multilayer discharge patterns [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 93(5): 12–15.
- [9] Iza F, Kim G J, Lee S M, *et al.* Microplasmas: Sources, particle kinetics, and biomedical applications[J]. *Plasma Processes and Polymers*, 2008(5): 322–344.
- [10] Iza F, Hopwood J. Influence of operating frequency and coupling coefficient on the efficiency of microfabricated inductively coupled plasma sources[J]. *Plasma Sources Sci Tech*, 2002(11): 229–235.
- [11] Hopwood J, Iza F, Anal J. Ultrahigh frequency microplasmas from 1 pascal to 1 atmosphere[J]. *At Spectrom*, 2004, 19: 1145–1150.
- [12] Hopwood J. A microfabricated inductively coupled plasma generator[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2000, 9(3): 309–313.
- [13] Lieberman M A, Lichtenberg A J. Principles of plasma discharges[M]. New York City: John Wiley & Sons Inc, 2005.
- [14] Gregório J, Leroy O, Leprince P, *et al.* Design of a microwave microplasma source at atmospheric pressure [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2009, 37(6): 797–808.
- [15] Hopwood J, Iza F, Coy S, *et al.* A microfabricated atmospheric-pressure microplasma source operating in air [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2005, 38(11):309–313.
- [16] Mariusz J, Lukasz K. Atmospheric pressure microwave microplasma sources[J]. *Chem Listy*, 2008 (102): 1322–1326.
- [17] Choi J, Iza F, Do H J, *et al.* Microwave-excited atmospheric-pressure microplasmas based on a coaxial transmission line resonator [J]. *Plasma Sources Sci Tech*, 2009, 18(2): 1–8.
- [18] Yoshiki Shimizu, Takeshi Sasaki. Development of wire spraying for direct micro-patterning via an atmospheric-pressure UHF inductively coupled microplasma jet [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2006, 200 (14–15): 4251–4256.
- [19] Masahiro Yoshimura, Ruwan Gallage. Direct patterning of nanostructured ceramics from solution—Differences from conventional printing and lithographic methods[J]. *J Solid State Electrochem*, 2008, 12(7–8): 775–782.
- [20] Benedikt J, Focke K, Yanguas Gil A. Atmospheric pressure microplasma jet as a depositing tool [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 89 (25): 16–18.
- [21] Ding Yi, He Deyan, Shirai Hajime. Deposition of low dielectric constant SiOC films by using an atmospheric pressure microplasma jet[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2009, 42(12): 9–11.
- [22] Ichiki Takanori, Taura Ryo, Horiike Yasuhiro. Localized and ultrahigh-rate etching of silicon wafers using atmospheric-pressure microplasma jets[J]. *Journal of Applied Physics*, 2004, 95(1): 35–39.
- [23] Tan Helen, Indeno Takuya, Inchiki Takanori. 3 Dimensional silicon micromachining using a scanning microplasma jet source [J]. *Journal of Photopolymer Science and Technology*, 2005, 18(2): 237–241.
- [24] Yoshiki Hiroyuki. Localized etching of an insulator film coated on a copper wire using an atmospheric-pressure microplasma jet [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2007, 78(4): 42–45.
- [25] 吴旭琴, 王守国, 韩黎, 等. 常压低温等离子体对微生物的杀灭研究 [J]. *微生物学报*, 2005, 45(2): 312–314.
Wu Xuqin, Wang Shouguo, Han Li, *et al. Acta Microbiologica Sinica*, 2005, 45(2): 312–314.
- [26] Kim Sun Ja, Chung T H, Base S H, *et al.* Bacterial inactivation using atmospheric pressure single pin electrode microplasma jet with a ground ring[J]. *Applied Physics Letters*, 2009 (94): 7–9.
- [27] Lee H J, Shon C H, Kim Y S, *et al.* Degradation of adhesion molecules of G361 melanoma cells by a non-thermal atmospheric pressure microplasma[J]. *New Journal of Physics*, 2009, 11(11): 26–38.
- [28] Takao Yoshinori, Onot Kouichi, Takahashi Kazuo, *et al.* Development of a microwave-excited microplasma thruster[C]. 29th International Electric Propulsion Conference, 2005, 10: 15–35.
- [29] Takao Yoshinori, Onot Kouichi. A miniature electrothermal thruster using microwave-excited plasmas: A numerical design consideration[J]. *Plasma Sources Sci Tech*, 2006, 15(2): 211–227.
- [30] Xia Guangqing, Mao Genwang, Nader Sadeghi. A novel microplasma thruster using microhollow cathode discharge[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2008, 31(6): 565–568.

(责任编辑 陈广仁)