

微等离子体及其应用*

张树宇^{1,2,†} 辛煜^{1,††} 宁兆元¹ 梁荣庆²

(1 苏州大学物理科学与技术学院 江苏省薄膜材料重点实验室 苏州 215006)

(2 复旦大学现代物理研究所 上海 200433)

摘要 微等离子体已成为近年来国际上低温等离子体研究的热点课题之一。微等离子体是被限制在一个有限的空间范围内(尺度为毫米量级甚至更低)的等离子体,它通常能够运行在大气压条件下,它的低功耗、高密度、高稳定等特性以及其小巧、经济、便携等优势,为在紫外光源的获得、微化学分析系统、生物医学、材料表面改性和加工、环境污染物的处理等领域提供了广泛的应用空间。文章对微等离子体及其应用进行了综述,介绍了各种微等离子体的产生方法,以及它们在不同领域的研究和应用情况。

关键词 低温等离子体物理学,微等离子体,综述,大气压,表面处理

Microplasma and its applications

ZHANG Shu-Yu^{1,2,†} XIN Yu^{1,††} NING Zhao-Yuan¹ LIANG Rong-Qing²

(1 Provincial Key Lab for Thin Films, Department of Physical Science and Technology, Soochow University, Soochow 215006, China)

(2 Institute of Modern Physics, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract Microplasma is now becoming an important field of research on non-thermal plasma. Spatial confinement to dimensions of 1mm or less and operation at atmospheric pressure gives microplasma many advantages like low power consumption, high density, high stability and convenient portability. All these advantages open the door to a wide range of new applications of microplasma in areas such as ultraviolet sources, analytical chemistry, biomedicine, surface treatment and environmental remediation. This paper reviews a variety of methods generating microplasma and its applications in different fields.

Keywords non-thermal plasma, microplasma, review, atmospheric, surface treatment

1 引言

随着科技的发展,“等离子体”开始越来越多地出现在我们的生活中,从贴近百姓生活的等离子体显示器、空调和冰箱中的空气清洁剂,到应用在军事上的等离子体隐身天线、航天上的火箭推进器,以及新闻中频繁报道的用于受控核聚变的国际托卡马克实验反应堆(ITER),等离子体正潜移默化地渗透到我们生活的方方面面。一般而言,等离子体是离子和电子密度大致相当的具有一定电离度的第四态物质,从热平衡的角度考虑,等离子体可分为离子和电子温度相近的热等离子体和电子温度远高于离子或原子温度的低温等离子体。本文中所提到的微等离

子体是一个典型的非热平衡低温等离子体。

微等离子体通常被限制在一个有限的空间范围内,兼具了常规等离子体的一些特性。尽管它是常规等离子体的一个缩影,但由于放电尺寸缩小到毫米量级甚至更低,使得微放电等离子体通常能够运行在大气压条件下,这与常规等离子体相比,出现了一些新的变化,如有更高的等离子体密度和更好的稳定性以及由此带来的其他新的特点和优势。

直流放电等离子体的放电条件遵循帕邢定律,也就是说,着火电压决定于气体压强和电极间隙的

* 国家自然科学基金(批准号:3035008)资助项目

2007-06-15 收到初稿 2007-07-06 收到修改稿

† 通讯联系人. Email: scott_1997cn@yahoo.com.cn

†† 通讯联系人. Email: xylzf_1999@suda.edu.cn

乘积,该乘积越小,着火电压就越低,等离子体放电就越稳定,放电效率就越高。微等离子体放电同样遵循帕邢放电条件,这就决定了运行在大气压条件下的微等离子体装置的小型性,从而使得该装置轻巧、便携。同时,微放电等离子体无需常规等离子体使用的真空系统,不仅节省了成本,也省去了大量的真空获得时间。从这个角度看,微等离子体又是方便、经济和快捷的。另外,高压环境中的微等离子体放电主要由三体碰撞机制主导,这不仅有利于辐射强度的增强,同时也有利于放电电流密度的提高,从而有利于提高等离子体密度。

微等离子体的这些特点和优势为其在紫外光源的获得^[1-4]、微化学分析系统^[5,6]、生物医学^[7-15]、材料表面改性和加工^[4,7,16-18]、环境污染物的处理^[19-22]等领域提供了广泛的应用空间。本文将综述几种微等离子体的产生方法及其应用领域。

2 微等离子体的产生方法

产生微等离子体的方法有很多,常用的几种方法有:微波诱导放电,容性耦合放电,感应耦合放电,介质阻挡放电,微空心阴极放电以及毛细管放电等。

2.1 微波诱导微等离子体

微波诱导微电源^[23-28]是基于“微波带”技术在大气压环境下产生的一种微等离子体,它被广泛应用于气相色谱中原子发射光谱激发源。典型的“微波带”结构如图1所示,它由一块介质板,一根带状电极,一块接地平板电极,以及产生等离子体的放电间隙组成^[29-31]。放电间距一般为0.2—0.5 mm。2.45 GHz的微波通过一根同轴电缆由SMA接头(一种光纤接头)导入,以TEM模式沿着夹在带状电极与接地电极之间的介质板传播。微波带技术的使用不仅可以将微波精确指向间隙区,同时也减少了不必要的外空间辐射损失,有利于耦合效率的提高,从而获得高密度等离子体。每一个微波带结构都能作为一个独立的激发源,使用阵列方式可以得到大面积的非热平衡微波诱导微等离子体阵列^[31]。

2.2 容性耦合微等离子体

容性耦合等离子体放电(又称E模式放电)是通过匹配器和隔直电容,将射频功率施加到两块平行平板电极上产生的。Blades等人^[32]设计出一种能

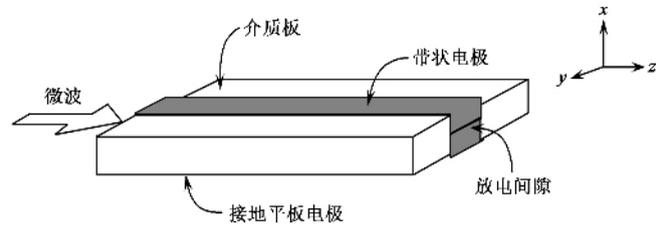


图1 “微波带”结构示意图^[31]

在石英板间产生容性耦合微等离子体的装置,如图2所示。石英板中宽度为200—500 μm的矩形沟槽是氦气或等离子体的运输通道,两条长度可调的铜电极分别加在上下两块石英板上,以决定等离子体的放电长度。整个装置由13.56 MHz的射频电源供电,放电功耗在5—25 W之间。类似于前述微波诱导微等离子体阵列,使用多条等离子体沟槽和电极也可实现容性耦合微等离子体阵列,以满足特定的需求。Yoshiki等人^[33]研究了该容性微放电结构中气体放电的发射光谱特性。

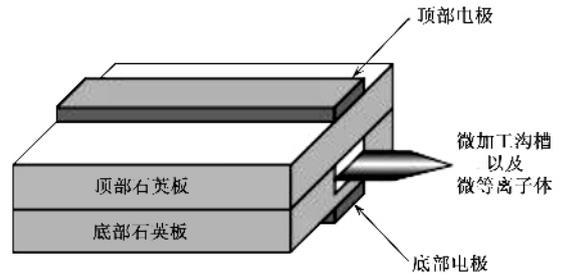


图2 容性耦合微等离子体的放电结构^[30]

2.3 感应耦合微等离子体

感应耦合等离子体放电(又称H模式放电)的原理主要是将射频电流经由匹配电路传输给感应线圈,线圈通过感应形成感应电场,从而激发并维持等离子体。Hopwood等人^[34-36]设计制作了一个小型的感应耦合等离子体源(图3),感应天线的直径约5 mm左右,匹配网络所需的电感和电容部件均印制在环氧树脂板上。该装置所需产生等离子体的功耗很低,而离子密度却非常高,在功耗1 W、400 mtorr(1 torr = 1.33 × 10² pa)的氦气环境下所获得的离子浓度可高达9 × 10¹⁰ cm⁻³。同时,作者还发现,适当地提高放电频率和使用高耦合系数结构能有助于提高功率耦合效率^[37]。但是,感应耦合微等离子体系统通常对工作气压要求比较高,需要运行在低于1 torr的环境下,因而限制了其应用,尽管作者设法使用了一个迷你抽气系统,以满足低气压的环境要求。

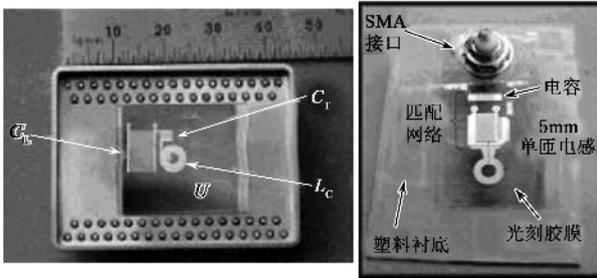


图3 分别在玻璃印模和塑料衬底上的感应耦合微等离子体装置^[34,37]

2.4 介质阻挡放电微等离子体

介质阻挡放电也被称为无声放电,是一种典型的非平衡的高压交流气体放电(图4)。它通常由两个平行电极组成,其中至少有一个电极表面覆盖有电介质,当两极间加上交流高压或脉冲时,两极间的气体被击穿发生介质阻挡放电^[22]。

介质阻挡放电是在外电场的作用下电子从电场中获得能量,通过与周围分子原子碰撞传递能量,使之激发电离,产生电子雪崩,但由于介质阻挡作用限制了放电电流的无限增长,只有形成快脉冲式电流细丝通道,即所谓的微放电。同时,电介质还能阻止放电向弧光放电的过渡,可以实现高压气体放电,因此正被日益广泛的应用于臭氧合成、大功率紫外、水处理和环境保护等领域^[20,21]。此外,介质阻挡放电还可以充当射流等离子体放电的预放电,为形成射流提供种子电子,产生不同于尖端电晕放电的、放电性质空间均匀的射流等离子体^[38,39]。

2.5 微空心阴极放电等离子体

采用细圆筒空心电极为阴极,可以增加电流密度,从而得到高密度的等离子体,对应的放电称为空心阴极放电。在微空心阴极可理解成空心阴极的孔径尺寸为亚毫米量级。微空心阴极放电过程中,双极场势阱的束缚使得大部分电子被约束在放电腔中,寿命得以延长,这有利于增加背景气体的电离,提高等离子体密度。微空心阴极放电一度被认为是负辉光放电模式,但随着研究的不断深入,微空心阴极放电也可以在正常辉光放电和反常辉光放电的工作模式下工作,因而有“微腔放电”或“微结构电极放电”之称^[30,40,41]。

微结构电极放电能在高压和低功耗的工作环境下实现表面处理、污染物的降低、紫外辐射和极远紫外辐射的产生等。微结构电极放电装置(图5)由两块金属薄片(铜、镍、铂金、钨等)和夹在金属薄片

之间的绝缘体(云母、陶瓷等)组成,一个直径从几十微米到几百微米不等的孔贯穿金属和绝缘体。当把直流或交流电流接入系统时,两金属薄片电极之间会产生等离子体,其放电情况与孔径大小、电极间距、气压以及电流大小有关。当工作在高压环境下且孔径很小时,只需较低的电压便可维持两电极之间产生稳定的放电,得到气体温度和电子密度都较高的等离子体。

2.6 毛细管放电微等离子体

毛细管放电是由 Kunhardt 和 Becker^[41]引入的新的电极设计,电介质毛细管覆盖在一个电极表面或同时覆盖在两个电极表面(图6)。毛细管放电初看起来与传统的介质阻挡放电十分类似,但毛细管放电中的“毛细管射流模式”是在介质阻挡放电中观察不到的。毛细管的直径从 0.01—1mm 不等,长度-直径比值从 10:1 到 1:1。在高压下放电时,毛细管末端产生高强度等离子体射流,形成等离子体电极。频率对毛细管放电有着很大的影响,当脉冲电压频率为几千赫兹时,所观察到的放电模式与介质阻挡放电的扩散辉光放电模式类似,而当频率达到某一特定值时(该频率值与长度-直径比值和工作气体有很大关联),会有很明亮的等离子体射流从毛细管末端射出。当毛细管彼此紧密排列时,等离子体射流会相互重叠,这时毛细管放电显示出很好的均匀性,增强了气相污染物的处理效率。

3 微等离子体的应用

人们采用不同的电极结构和不同的放电方法以实现微等离子体的产生,并在不同的领域和环境得以广泛应用。下面按以下几个应用领域来进行介绍。

3.1 微腔放电等离子体器件

微腔放电的一个典型应用是等离子体平板显示(plasma display panel, PDP)。等离子体显示器,是继 CRT(阴极射线管)、LCD(液晶显示器)后的最新一代显示器,其特点是厚度薄,分辨率高。显示屏上排列有上千个密封的小低压气体室,气体室中一般充的是氙气和氖气的混合工作气体,在交流电场的作用下产生微放电。混合气体的采用实际上是利用潘宁效应来提高电离效率,降低放电电压。Xe 激发态原子由于自发辐射产生很强的紫外共振

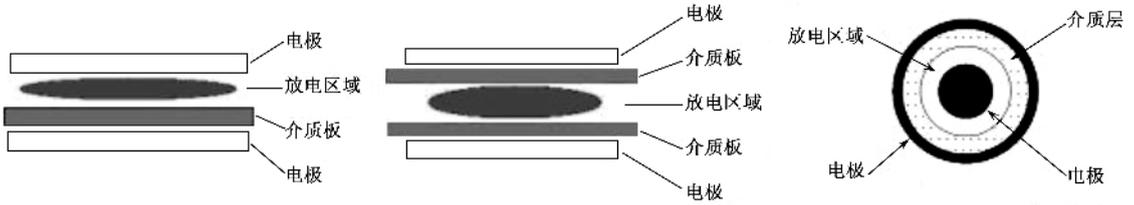


图4 平板型和圆柱型的介质阻挡放电示意图

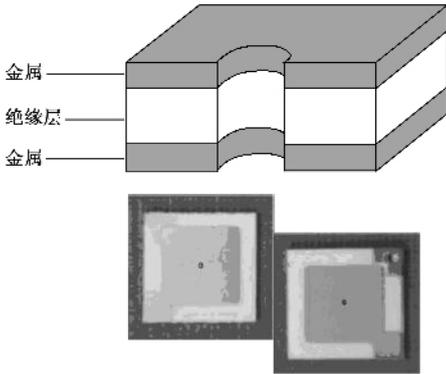


图5 微结构电极放电装置示意图^[40]

毒性或危险样品的使用 ;小型化微化学分析系统的功率消耗少 ,便携性好。

微化学分析系统的一个关键是需要产生一个微等离子体作为一个发射源 ,同时还必须满足几个要求 :能运行在大气压环境下 ;有稳定的物理化学特性 ,以免微结构被污染 ;低功耗 ,便于携带等。满足条件的微等离子体发射源可以嵌入到微化学分析系统中 ,实现现场分析与检测。作为例子 ,Kunze 等人^[56,47]显示了介质阻挡放电微等离子体在激光二极管原子吸收光谱仪中的应用。

3.3 微等离子体在生物领域的应用

生物领域需要的微等离子体源不仅要能够在大气压下工作 ,而且要尽量避免热和电场对生物材料造成的损伤 ,同时必须要有好的定位精度 ,实现对单个细胞的操作。Stoffels 等人^[8,9,12-14,48]研制了基于容性耦合放电原理的所谓的“等离子体针”的新型等离子体源 ,并研究了等离子体针对仓鼠卵巢的上皮细胞 CHO K1 和人体上皮细胞 NSCLC MR65 的影响。研究表明 ,在微等离子体作用下 ,细胞之间的弱相互作用消失 ,细胞彼此间发生分离 ;但分离的细胞仍保持着一定的活性 ,这取决于微等离子体与细胞的作用时间 ,活性细胞经过一段时间后重新粘结。等离子体针的精细操作及分离细胞的能力 ,使它在分离癌细胞、清洁牙腔^[14]等精细外科领域中具有很大的应用空间。

3.4 微等离子体在表面处理中的应用

微电子工业中的薄膜沉积、基片刻蚀和等离子体表面处理离不开真空环境 ,而最近发展起来的微等离子体则避免了昂贵的真空获得系统和漫长的抽气时间 ,可以在大气压环境条件下进行等离子体表面处理。

Ichiki 等人^[16]设计了一种小型的甚高频率 (100MHz)驱动的感应耦合等离子体射流源 ,可以在很小的空间范围内产生高温高密度等离子体 ,实现

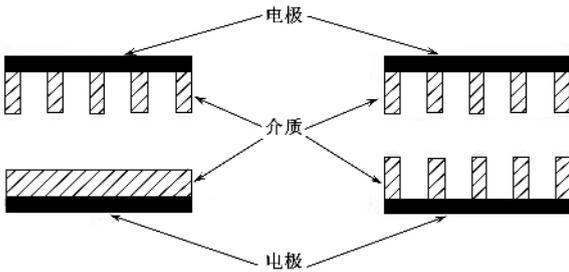


图6 毛细管放电结构^[41]

线^[12,41-44] ,这种紫外光照射到荧光体 ,发出三原色光 ,并透过前面的玻璃板传到外界。

尽管 PDP 已经进入实用当中 ,但研究者们仍在设法改善微腔放电的工作参数。例如 ,使用纳米多孔氧化铝作为介质层^[45] ,提高微腔放电器件的稳定性与可靠性 ;在放电腔内壁涂覆纳米碳管^[46] ,改善场发射性能 ,降低微腔放电的着火电压。

3.2 微化学分析系统

微加工和微放电技术的成熟推动了芯片实验室 (lab on a chip ,LOC)^[29]的不断进展。作为芯片实验室的一个重要分支 ,小型化的微化学分析系统不仅拥有甚至超过大型分析仪器所具备的一些功能 ,而且由于其体积很小 ,体现出独特的优势 ,如 ,工作时所需的材料和费用大大减少 ,尤其减少了具有辐射、

硅晶片极高速率的直径仅为 $400\mu\text{m}$ 的定向刻蚀。Foest 等人^[4]设计出了一种直径小于 0.5mm 的射频毛细管等离子体射流,这种等离子体射流能够对聚合物衬底的微腔进行表面定点处理,也可对管状衬底的内壁进行处理。Yoshiki 等人^[18]也成功地使用 13.56MHz 容性耦合微等离子体对聚对苯二甲酸乙二酯毛细管内壁进行改性。Shirai 等人^[17]利用大气压环境下射频微等离子体在覆盖有 20nm 厚铁膜的 C-Si 表面成功合成了硅纳米锥。

微等离子体在表面清洁或消毒方面中也展示出了它应有的效用。例如,Baravian 等人^[49]设计了一种能够去除铁表面油污的方法,即使用脉冲低频源为介质阻挡放电装置供电,通入氧气形成氧微放电等离子体,并将微等离子体作用到油污表面,以达到清除油污的目的。

3.5 微等离子体在医用材料表面改性中的应用

为防止与血液相接触的生物医用聚乙烯管(PE管)内壁产生血栓或栓塞,人们往往在内表面通过单体等离子体接枝聚合改性,并涂覆一层与白蛋白结构相似的表面活性剂,以降低血小板和纤维蛋白原在内壁上的凝结。但由于常规等离子体改性会导致内表面改性的不均匀和活性剂固化的不彻底,尽管可以通过移动放电电极或 PE 管来改善,但这种不均匀性仍然存在,尤其是在 PE 管两端的气压降较大时。为了有效解决这个问题,Lauer 等人^[7]基于空心阴极放电原理设计了一个微等离子体放电装置,与常规的等离子体表面改性技术相比,该装置具备价格低廉、PE 管内的等离子体均匀和长的等离子体长度等特点。作者使用该微空心阴极等离子体采用两步法在 PE 管内壁固化了表面活性剂,结果表明,该微等离子体的固化技术可以有效地降低血小板在内壁的凝结数目,同时其均匀性也得到了进一步的改善。

4 结束语

与传统等离子体相比,微等离子体源具有低功耗、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,因而赋予了微等离子体源以小巧、经济、便携等优势。目前微等离子体已经在微化学分析系统、材料合成、表面改性、祛污和消毒等方面进入了实用化,相信随着微等离子体源的进一步发展,更多新的应用必将不断涌出,可以预见,

它在各个应用领域将发挥着更大的作用。

参 考 文 献

- [1] El-Habachi A, Schoenbach K H. *Appl. Phys. Lett.*, 1998, 73 : 885
- [2] Moselhy M, Stark R H, Schoenbach K H *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 2001, 78 : 880
- [3] Lee T I, Park K W, Baik H K *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 2005, 87 : 261502
- [4] Foest R, Kindel E, Lauge H *et al.* *Contrib. Plasma Phys.*, 2007, 47 : 119
- [5] Miclea M, Kunze K, Musa G. *Spectrochim. Acta Part B*, 2001, 56 : 37
- [6] Kunze K, Miclea M, Franzke J *et al.* *Spectrochim. Acta Part B*, 2003, 58 : 1435
- [7] Lauer J L, Shohet J L, Albrecht R M *et al.* *Journal of Appl. Phys.*, 2004, 96 : 8
- [8] Kieft I E. *Plasma needle : exploring biomedical applications of non-thermal plasmas.* Dissertation Eindhoven University of Technogy 2005
- [9] Stoffels E, Flikweert A J, Stoffels W W *et al.* *Plasma Sources Sci. Technol.*, 2002, 11 : 383
- [10] Laroussi M, Lu X. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, 87 : 113902
- [11] Deng X T, Shi J J, Shama G *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 2005, 87 : 153901
- [12] Stoffels E, Kieft I E, Sladek R E J *et al.* *AIP Conference Proceedings*, 2004, 740 : 309
- [13] Kieft I E, Dvinskikh N A, Broers J L V *et al.* *Atomic and Molecular Pulsed Lasers V, Proceedings of SPIE*, 2004, 5483 : 247
- [14] Sladek R E J, Stoffels E, Walraven R *et al.* *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2004, 32 : 1540
- [15] Uhm H S, Lim J P, Li S Z, *Appl. Phys. Lett.*, 2007, 90 : 261501
- [16] Ichiki T, Taura R, Horiike Y. *Journal of Appl. Phys.*, 2004, 95 : 1
- [17] Shirai H, Kobayashi T, Hasegawa Y. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, 87 : 143112
- [18] Yoshiki H, Oki A, Ogawa H. *Thin Solid Film*, 2002, 407 : 156
- [19] Koutsospyros A, Yin S-M, Christodoulatos C *et al.* *Int. J. Mass Spectrom.*, 2004, 233 : 305
- [20] Eliasson B, Kogelschatz U. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 1991, 19 : 309
- [21] Falkenstein Z, Coogan J J. *J Phys D : Appl Phys*, 1997, 30 : 817
- [22] Xu X J. *Thin Solid Films*, 2001, 390 : 237
- [23] Bilgic A M, Engel U, Voges E *et al.* *Plasma Source Sci. Technol.*, 2000, 9 : 1
- [24] Engel U, Bilgic A M, Haase O *et al.* *Anal. Chem.*, 2000, 72 : 193
- [25] Bilgic A M, Voges E, Engel U *et al.* *J. Anal. At. Spectrom.*, 2000, 15 : 579
- [26] Broekaert J A C. *Anal. Bional. Chem.*, 2002, 374 : 182
- [27] Schermer S, Bings N H, Bilgic A M *et al.* *Spectrochim. Acta Part B*, 2003, 58 : 1585
- [28] Iza F, Hopwood J A. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2003, 31 : 782
- [29] Pittman D J. A brief review of microplasmas. Department of Chemistry, University of Vermont, Burlington, Vermont, 05405 2003

[30] Karanassios V. Spectrochimica Acta PartB ,2004 ,59 :909
 [31] Kim J ,Terashima K. Appl. Phys. Lett. ,2005 ,86 :191504
 [32] Bass A ,Chevalier C ,Blades M W. J. Anal. At. Spectrom. , 2001 ,16 :919
 [33] Yoshiki H ,Horiike Y. Jpn. J. Appl. Phys. ,2001 ,40 :L360
 [34] Hopwood J. J. Micro-electromechanical Systems ,2000 ,9 :309
 [35] Yin Y ,Messier J ,Hopwood J. IEEE Trans. Plasma Sci. , 1999 ,27 :1516
 [36] Hopwood J ,Minayeva O ,Yin Y. J. Vac. Sci. Technol. B 2000 ,18 :2446
 [37] Iza F ,Hopwood J. Plasma Sources Sci. Technol. ,2002 ,11 :229
 [38] 孙姣 张家良 王德真等. 物理学报 ,2006 ,55 :344 [Sun J ,Zhang J L ,Wang D Z *et al.* Acta Physica Sinica. ,2006 , 55 :344(in Chinese)]
 [39] Zhang J L ,Sun J ,Wang D Z *et al.* Thin Solid Films ,2006 , 506 :404
 [40] Miclea M ,Kunze K ,Franzke J *et al.* Decomposition of Halogenated Molecules in a Micro-structured Electrode Glow Discharge at Atmospheric Pressure. In : Proc. 8th Hakone. Estonia , 2002. P. 206
 [41] Foest R ,Schmidt M ,Becker K. Int1 Journal of Mass Spectrometry ,2006 ,248 :87
 [42] von Allmen P ,Sadler D J ,Jensen C *et al.* Appl. Phys. Lett. , 2003 ,82 :25
 [43] El - Habachi A ,Schoenbach K H. Appl. Phys. Lett. ,1998 , 72 :22
 [44] Moselhy M ,Shi W ,Stark R. H *et al.* Appl. Phys. Lett. , 2001 ,79 :1240
 [45] Park S-J ,Kim K S ,Eden J G. Appl. Phys. Lett. ,2005 ,86 : 221501
 [46] Park S -J ,Eden J G ,Park K-H. Appl. Phys. Lett. ,2004 , 84 :22
 [47] Kunze K ,Zybin A ,Koch J *et al.* Spectrochim. Acta Part A , 2004 ,60 :3393
 [48] Brok W J M ,Bowden M D ,van Diji J *et al.* Journal of Appl. Phys. ,2005 ,98 :013302
 [49] Baravian B ,Chaleix D ,Choquet P *et al.* Surf. Coat. Technol. ,1999 ,115 :66



· 书评和书讯 ·

科学出版社物理类新书推荐

书名	作(译)者	定价	出版日期
现代物理学前沿选讲	黄祖洽	36.00	2007年9月
碳纳米管的原子模拟和连续体描述	韩强 姚小虎	42.00	2007年9月
半导体的检测与分析(第二版)	许振嘉	98.00	2007年8月
薄膜结构 X 射线表征	麦振洪等	40.00	2007年7月
电磁波述论	盛新庆	38.00	2007年7月
大气声学	杨训仁 陈宇	52.00	2007年6月
d 波超导体	向涛	48.00	2007年5月
场论中的路径积分导引(影印)	U. Mosel	45.00	2007年4月
表面物理原理(影印)	F. Bechstedt	58.00	2007年4月
半导体光学(第三版)(影印)	C. F. Klingshirn	118.00	2007年4月
自组织纳米材料(影印)	Motonari Adachi ,D. J. Lockwood	56.00	2007年4月
远程通信中的非线性光学(影印)	T. Schneider	68.00	2007年4月
物理学中的拓扑和几何(影印)	E. Bick ,F. D. Steffen	65.00	2007年4月
量子光学——降噪 囚禁离子,量子路径和退相干(影印)	M. Orszag	58.00	2007年4月
光学与激光——光纤与光波导(第五版)(影印)	M. Young	79.00	2007年4月
飞秒激光脉冲——原理及实验(第二版)(影印)	C. Rulliere	68.00	2007年4月
薄膜材料 - 应力、缺陷的形成和表面演化	卢磊	86.00	2007年1月
亚稳金属材料	胡壮麒	160.00	2006年12月
高等原子分子物理学(第二版)	徐克尊	54.00	2006年9月
半导体异质结物理(第二版)	虞丽生	52.00	2006年5月
实验物理中的概率和统计(第二版)	朱永生	72.00	2006年3月

凡购书者免邮费,请按以下方式联系我们:

电 话 010 - 64017957 64033515

电子信箱 : mlhukai@ yahoo. com. cn yandeping@ cspg. net

通讯地址 北京东黄城根北街16号 科学出版社 100717

联 系 人 : 胡凯 鄢德平

主页 <http://www.sciencep.com>