

# 我国低温等离子体研究进展( II )\*

江南<sup>†</sup>

(中国科学院物理研究所 北京 100080)

(上接 2006 年第 2 期第 130 页)

## 5 低温等离子体应用

随着我国国民经济的发展,低温等离子体的应用获得了越来越多的重视,这从国内越来越多的等离子体实验室的成立,和一些小的实验室扩大成地方的重点实验室可以得到证明.事实上,大多数涉及到材料或物质的理工科实验室都会有一些与低温等离子体有关的装置或研究,无论该实验室是研究物理的、化学的、生物的或各类工程的,毕竟宇宙中 99% 以上的物质处于等离子体态<sup>[1]</sup>.下面就我国低温等离子体的应用方面分类举一些例子.

### 5.1 等离子体辅助薄膜沉积

在我国,低温等离子体应用最广泛的领域可能要属薄膜材料的制备.根据发表的论文,如果将他们按材料种类来分,则可以得到如图 2 所示的分布.由该图可以看到,在我国,与碳有关的论文最多,占了所有与等离子体辅助材料制备有关发表论文数的四成以上.这里所说的与碳有关的材料主要有:金刚石薄膜<sup>[113]</sup>、类金刚石薄膜<sup>[114]</sup>、CN 硬质薄膜<sup>[115]</sup>、碳纳米管薄膜等.这些材料主要是应用在刀具表面加硬<sup>[116-119]</sup>、材料表面耐摩擦<sup>[120-122]</sup>、显示器件中阴极材料场电子发射增强<sup>[123-125]</sup>等.吕反修<sup>[126,127]</sup>等采用电弧等离子体制备的厚度可达 2mm 的金刚石片则可以用于红外透射窗口材料.

硅和锗是传统的半导体材料<sup>[128-130]</sup>,发达国家在这方面的研究是最多的.相比而言,我国在这方面的研究比较薄弱,这可能与我国微电子产业基本依赖进口有关.

目前,固体光源有取代传统电灯泡和荧光灯管的趋势.固体光源中的一种重要材料是 GaN 薄膜<sup>[131]</sup>,它可以发射短波长的光.国内目前已有多家大学和中国科学院的研究所以及一些企业加入了商业开发 GaN 薄膜的潮流.批量生产的 GaN 薄膜大都

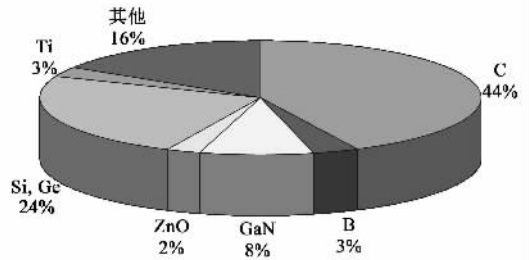


图 2 我国等离子体辅助薄膜沉积研究文献按材料种类的分布

采用金属有机化合物化学气相沉积(MOCVD)方法制备<sup>[132]</sup>.顾彪等<sup>[102,103]</sup>开发了一种采用 ECR 等离子体辅助的 MOCVD 方法,该方法的优点是在较低的基片温度下制备高质量的 GaN 薄膜,并且通过氢和氮等离子体处理蓝宝石基片,可以减小基片与 GaN 薄膜之间的晶格失配.

### 5.2 等离子体聚合

等离子体聚合实际上是一种统称,他至少包含了以下三方面的内容:

#### 5.2.1 等离子体诱导聚合

这是一种传统意义上的聚合,单体分子通过等离子体的激活发生链接反应,形成长链大分子.例如,图 3 是後晓淮等<sup>[133,134]</sup>采用的等离子体诱发体聚合装置示意图.将丙烯酰胺单体放入反应器中,抽真空后充入一定量氩气,采用射频放电对丙烯酰胺单体进行等离子体辐照,使其被激活,然后将去离子水放入反应器,使丙烯酰胺的晶体溶解,聚合反应随后自发进行.这种高分子的长链聚丙烯酰胺可用作絮凝剂和油田驱油剂.张正彪等<sup>[135]</sup>也研究了甲基丙烯酸正辛酯(AMOE)、甲基丙烯酸正十二酯(AMDE)、甲基丙烯酸正十四酯(AMTE)等的等离子体

\* 国家自然科学基金(批准号:10275089)资助项目

2005-04-11 收到初稿 2006-06-10 修回

<sup>†</sup> Email: jiangnan@aphy.iphys.ac.cn

诱导聚合反应,并探讨了这些聚合物分子结构、絮凝效果与等离子体工艺之间的关系。

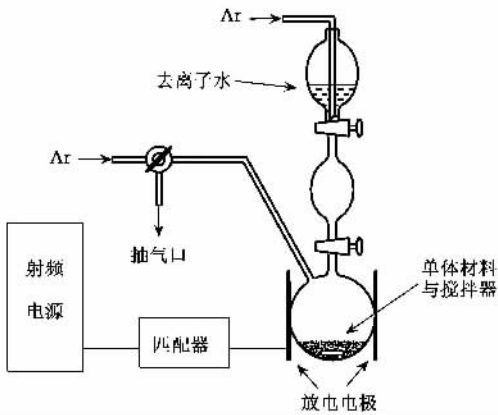


图3 後晓淮等采用的等离子体诱发聚合装置示意图

### 5.2.2 等离子体聚合

单体物质在等离子体中的高能粒子碰撞下会形成各种碎片或官能团,这些碎片或官能团在基片表面重新组合链接形成三维网状交联结构的新物质。由于这种物质是由很小的分子碎片甚至原子随机组成的,因此也有人将这种聚合反应称为“原子聚合”。由于通常形成三维交联网络结构,等离子体聚合产物通常非常稳定而坚固。根据在等离子体中产生的官能团的性质,可以获得各种特定的表面特性,这可能是等离子体聚合材料最让人感兴趣的地方。

南京大学的余学海等<sup>[136]</sup>用六甲基二硅氧烷(HMDSO)在射频等离子体条件下制备了等离子体聚合薄膜。他们研究了各种载气以及射频功率对分子碎片形成的影响,认为在等离子体中形成的分子碎片对聚合薄膜的形成作出贡献。他们用红外谱、XPS等对聚合物薄膜的分子结构进行了研究,并得出如下结论:在HMDSO等离子体中,C—H与Si—CH<sub>3</sub>键比Si—O键更容易断裂,如果以氧或氢作为载气,则这些元素会掺入到聚合过程中去。

东华大学的张菁等<sup>[137]</sup>用乙烯基乙酸单体在脉冲射频等离子体放电条件下产生等离子体聚合薄膜,用红外光谱、XPS、DSC等分析手段研究了所制备的等离子体聚合薄膜的化学结构。

北京理工大学的曾蓉等<sup>[138]</sup>用C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>及NH<sub>3</sub>等离子体在Nafion离子交换膜表面合成具有高度支联化的含氨基、酰氨基的超薄类聚乙烯薄膜,由于表面的NH<sub>2</sub>基团易于水解形成带正电荷的膜而具有阴离子选择性,增加了Nafion膜的离子选择性。

兰州物理研究所的齐尚奎等<sup>[139]</sup>用射频放电等

离子体聚合方法在聚酯薄膜基底上制备了聚硅氧烷薄膜,他们希望用这种薄膜对航天器材料表面起到防护作用,抵抗空间环境原子氧的侵蚀。

湖南大学的颜永红等<sup>[140]</sup>采用正丁胺单体形成的等离子体聚合物中含有大量氨基,正是利用这一点,吴朝阳等<sup>[141]</sup>在等离子体聚合正丁胺表面,接枝聚苯磺酸钠(PSS),形成可以固定免疫球蛋白IgG抗体的免疫传感器。

### 5.2.3 等离子体诱导表面接枝

等离子体诱导接枝是利用等离子体处理样品在其表面产生活性位,再引入功能基团固定其上。通常的等离子体聚合物,其分子结构有随机性,其结果往往不可预测,由大量的工艺实验和经验来寻找所希望的表面特性。等离子体诱导表面接枝是将选定的功能团接枝到表面,因此结果是预知的。例如黄健<sup>[142]</sup>等将丙基丙烯酰胺(NIPAAm)接枝在PE微滤膜上获得了温控滤水的特性。

前面提到吴朝阳等采用等离子体聚合和接枝制备免疫传感器。由于等离子体聚合膜具有良好的机械强度、化学稳定性及附着力,这种免疫传感器可重复使用。他们新近的工作<sup>[143]</sup>是将纳米金颗粒自组装到等离子体聚合正丁胺表面,制成可重复使用的免疫传感器。以纳米金作界面的免疫传感器,具有传感界面不需活化,固定抗体的活性高,检测时的非特异性吸附小,传感器能反复再生等优点。

## 5.3 材料表面改性

利用等离子体与材料表面相互作用可以改变材料表面的特性,如增加金属材料的表面硬度、耐腐蚀、耐摩擦、耐疲劳性能等,增加聚合物表面的硬度、亲水性、印刷性能、粘接性能等。人造器官的应用越来越普遍,实验表明,适当的等离子体处理可以改善人造器官表面与人体的亲合性。

### 5.3.1 等离子体浸没离子注入

前面已经提到等离子体浸没离子注入是一种非常有效的表面改性技术,常用于金属表面的处理,改善其表面硬度、摩擦学特性、耐腐蚀性等。

1991年,李家全等<sup>[144]</sup>将磁镜等离子体源用于离子注入。这也许是我国最早的有关研究。通常的等离子体浸没离子注入是脉冲式的。浸没于等离子体中的工件加负高压后,正离子向工件注入。由于这一过程非常迅速,等离子体中的离子不能得到及时的补充,当工件周围的等离子体鞘层扩张到真空室壁后,将不再有离子流注入。离子注入时间受鞘层扩张

到真空室壁所需时间的限制. 为了在两次注入之间使等离子体恢复到平衡态, 脉冲间隔时间一定要大于等离子体弛豫时间. 李家全等提出磁阱等离子体源单位管元的旋转供料法可以稳定地提供离子, 获得准直流的离子注入.

哈尔滨工业大学是我国从事等离子体离子注入研究最早的单位之一, 他们的许多研究工作是与香港城市大学合作的. 汤宝寅等<sup>[145]</sup>综述了他们 1999 年以前在等离子体离子注入过程鞘层动力学等方面的研究进展. 夏立芳<sup>[146]</sup>在 2001 年总结了哈尔滨工业大学近 10 年来在铝合金、钛合金、轴承钢表面进行的等离子体基离子注入研究, 并介绍了其在工业上的应用. 汤宝寅等最近研究了负偏压脉冲的宽度对保形全方位离子注入剂量均匀性的影响<sup>[147]</sup>.

大连理工大学在等离子体离子注入方面的研究更多是在理论和数值模拟方面<sup>[148—149]</sup>, 同时他们也开发了一些有创意的装置, 如双 ECR 源等离子体离子注入<sup>[150]</sup>. 中国科学院物理研究所在这方面的研究工作主要集中于管状材料内表面的处理<sup>[98—100]</sup>, 前面已经提及.

西南交通大学黄楠等与香港城市大学的朱剑豪等合作研究了离子注入材料在生物医学方面的应用<sup>[151—154]</sup>. 他们的实验表明, 用 Ti-O 处理的瓣膜支架具有生物相容性, 在植入狗的右心室 30 天后的检测结果表明, 没有血栓形成. 他们发现氮注入的 DLC 膜具有较好的生物相容性. 我们知道, DLC 膜优良的机械性能可以用于人工关节的接触面处理. 一些聚合物材料(如聚氨酯、涤纶等)经常用于人造器官, 如人造血管和人造心脏瓣膜. 但是不经处理的聚合物表面在人体内容易形成血栓. Wang<sup>[154]</sup>等采用乙炔等离子体浸没离子注入处理聚合物表面, 使形成一薄层非晶碳, 大大改善了材料的生物相容性和对细菌的拒斥性. Chu P K(朱剑豪)等写过一篇关于等离子体在生物材料表面改性方面应用的综述文章<sup>[155]</sup>.

近几年国内多个单位<sup>[156, 157]</sup>开发了将阴极弧离子镀与等离子体浸没离子注入结合的装置, 进一步开拓了等离子体浸没离子注入的应用领域, 由单纯气体离子的注入(主要是氮和氧)到可以注入金属离子, 以及沉积与注入混合处理<sup>[158]</sup>.

### 5.3.2 等离子体氮化和氢化

金属材料氮化处理可以增加表面硬度和耐磨性能, 常用于各种模具表面的处理. 为了增加氮化处理的深度, 通常要求被处理工件加热到几乎熔化的温

度. 这样高的温度有可能造成工件形变, 或金相结构改变. 等离子体氮化工艺将被处理工件置于氮等离子体中, 其工艺温度相对较低, 处理时间也较短, 因而氮化深度较大. 王亮<sup>[159]</sup>采用氩等离子体处理奥氏体不锈钢, 450℃ 4 小时获得约 10 $\mu$ m 厚的渗氮层, 样品的微硬度提高了 6—7 倍. Xu 等<sup>[160]</sup>采用 DBD 在大气压下对 38CrMoAl 钢样品进行等离子体氮化, 550℃ 4 小时氮化深度达 260 $\mu$ m.

除了在钢铁材料的表面处理上应用外, 电子材料的等离子体氮化也获得了广泛的应用. 如钟晓霞等<sup>[161]</sup>对硅表面进行低温氮化处理, 获得大面积的均匀氮化硅表层. 秦志新等<sup>[162]</sup>在 GaAs 表面进行低温氮化, 形成平整的薄层 c-GaN, 作为外延生长 GaN 的基片.

冯涛等<sup>[163]</sup>报道了用氩等离子体处理表面丝网印刷法制备的碳纳米管阳极, 改善了场发射性能. 阈值场强从 4V/ $\mu$ m 降到  $\sim$ 1V/ $\mu$ m, 在 4.5V/ $\mu$ m 时, 场发射电流密度达到了 2.53mA/ $\mu$ m<sup>2</sup>, 发射点密度从  $\sim$ 10<sup>3</sup>/cm<sup>2</sup> 增加到  $\sim$ 10<sup>5</sup>/cm<sup>2</sup>.

### 5.3.3 聚合物及生物医学材料表面改性

现代社会中, 聚合物的使用越来越多, 从日常生活用品、纺织纤维, 到机械零部件、各类包装材料以及人造器官. 但是在许多应用场合, 聚合物的表面特性不能令人满意, 特别是其表面硬度和亲水性以及作为人造器官的生物亲合性等. 等离子体表面改性技术在很大程度上解决了这些问题. 国内有许多相关研究的报道, 如张亮等<sup>[164]</sup>以及施来顺<sup>[165]</sup>研究了 CF<sub>4</sub>/CH<sub>4</sub> 等离子体对 PET 的表面改性; 施来顺等<sup>[166]</sup>还通过在聚乙烯表面等离子体接枝甲基丙烯酸提高材料的阻燃性能; 张丽惠等<sup>[167]</sup>考察了不同种类气体等离子体、各种处理条件对聚烯烃膜浸润性的影响; 方志等<sup>[168]</sup>采用大气压辉光放电 (APGD) 和介质阻挡放电 (DBD) 等离子体处理聚四氟乙烯表面, 改善表面的亲水性; 刘际伟等<sup>[169]</sup>采用氧等离子体对聚四氟乙烯表面进行增强粘接性处理; 姚文清等<sup>[170]</sup>研究了氢等离子体处理聚四氟乙烯表面引起的亲水性改善, 并讨论了表面化学结构的变化. 利用低温等离子体处理聚合物表面的例子还有很多, 梁红军和後晓淮<sup>[171]</sup>写过一篇综述. 北京印刷学院的葛袁静等将等离子体表面处理技术推广应用到我国的邮票印刷工艺中, 这是低温等离子体技术在我国工业界获得应用的成功案例之一.

我国是一个纺织品出口大国, 提高纺织品的品质对我国的国民经济意义重大. 低温等离子体处理

纺织品或纤维材料可以改善它们的浸润性、可印染性、柔软性、防缩水性、可编织性等性能. 林立中<sup>[172]</sup>介绍了一种他们发明的可以用于纤维材料处理的直流辉光放电等离子体装置. 苏宁等<sup>[173]</sup>采用 X 射线衍射和扫描电子显微镜, 研究了聚酯纤维在低温等离子体处理后晶格结构和表面形态方面发生的变化. 李敏<sup>[174]</sup>等用射频氧等离子体处理细旦涤纶, 提高了上染率, 可以减少印染工艺中污染物的排放, 有利于环境保护. 陈杰瑛等<sup>[175]</sup>报道了他们在各种织物等离子体处理方面的研究进展. 他们认为, 低温等离子体对纤维的处理可以起到大幅度节水、节能和环保的作用, 是 21 世纪最有可能开发的革新技术.

由于聚合物与生物体有非常接近的物理特性, 常被用作人造器官的结构材料. 但是在将它植入人体前, 这些聚合物的表面必须做生物亲合性处理. 冯祥芬等<sup>[176]</sup>发表了一篇有关综述文章, 这里不再赘述.

#### 5.3.4 催化剂表面改性

陈慕华等<sup>[177]</sup>用射频等离子体处理 Pd/A<sub>12</sub>O<sub>3</sub> 催化剂, 处理后的催化剂用于乙炔选择性加氢反应制乙烯, 大幅度提高了目标产物的收率, 在 50℃ 下进行反应时, 乙炔转化率可达 100%, 乙烯选择性可达 71.3%, 而且催化剂的活性可以保持长时间稳定, 在反应 20h 后, 仍保持有高活性.

#### 5.4 生物样品处理

利用等离子体对生物体辐照可造成基因变异. 与化学方法比较, 等离子体诱导基因转变具有较小的生物毒性, 对环境的影响较小. 这一技术目前在我国已被大量地应用于生物品种的改良和转基因技术中. 中国科学院等离子体研究所的余增亮先生是这一技术的先驱者, 他们在上世纪 80 年代开始用等离子体产生的离子注入水稻种子, 对水稻品种进行了改良. 其后, 国内多个研究小组进行了类似的研究, 并将这种方法应用于棉花、烟草、西红柿、甜菊、小麦、玉米、大豆、茶树、甘薯、谷子等各种农作物的品种改良. 这种利用离子辐照改良植物品种的研究还被扩展到了微生物和动物. 有兴趣的读者可以参阅袁成凌和余增亮等的综述文章<sup>[178-180]</sup>.

#### 5.5 纳米材料制备

纳米技术在近些年受到了极度的重视. 根据 2002 年的统计, 冠以“纳米材料”或“纳米技术”注册的公司已有 330 多家, 这里还不包括高等学校、研

究单位从事纳米材料和技术研究开发的队伍<sup>[181]</sup>. 国家在纳米科技方面的拨款, 仅 2001 年就有 1.7 亿元人民币<sup>[182]</sup>.

低温等离子体用于纳米材料的制备主要有两方面: 纳米颗粒和纳米管或线.

纳米颗粒由于其极大的比表面积特别适合做催化剂或气敏材料. 利用等离子体制备纳米颗粒主要有两种途径: 一是利用电弧等离子体的高温使块状材料分解成纳米颗粒; 另一种方法是利用低温等离子体的高活性将气相材料合成为纳米颗粒. 例如, 魏智强等<sup>[183]</sup>用电弧方法制备高纯 Ni 纳米粉末; 李志杰等<sup>[184]</sup>则用氢等离子体电弧反应法生成 Al, Fe, Cu 和 Pb 的纳米粉; 王俊文等<sup>[185]</sup>采用射频等离子体增强化学反应法, 以 TiCl<sub>4</sub> + O<sub>2</sub> 为反应体系, 制备出纳米级的 TiO<sub>2</sub> 粉体.

碳纳米管(CNT)是纳米材料的典型代表, 最早是 1991 年 IJIMA<sup>[186]</sup>在碳棒电弧的灰烬中发现的. 自那以后, 国际上发表的有关碳纳米管的论文数呈爆炸式发展, 仅去年一年 SCI 检索到 3138 篇有关论文. 用低温等离子体方法制备碳纳米管<sup>[187]</sup>不仅可以降低工艺温度, 而且由于等离子体鞘层电场的作用, 可以使碳纳米管垂直于基片生长, Toe 等<sup>[188]</sup>甚至做到在整个基片表面均匀、独立、垂直生长的碳纳米管矩阵, 这样的碳纳米管阵列有可能应用于电子场发射平板显示器件.

国内方面, 马旭村等<sup>[189]</sup>在 2000 年报道了在多孔二氧化硅加铁催化剂基片上(基片温度 500℃), 以氮气和甲烷作为反应气体, 采用低气压微波等离子体制备了含碳、氮的纳米管, 并发现所制备的纳米管内部呈竹节结构. 陈新等<sup>[190]</sup>采用三氧化二铝孔性模板加镍催化剂作为基片(基片温度估计低于 520℃), 以甲烷为碳源, 在常压微波等离子体条件下制备了定向碳纳米管. 王必本等<sup>[191]</sup>用 CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub> 和 NH<sub>3</sub> 作为反应气体, 利用等离子体增强热丝化学气相沉积法, 并通过在基片上加偏压, 对纳米管的生长产生影响, 制备出准直碳纳米管.

#### 5.6 等离子体化学

低温等离子体是一种非常活性的物质, 因此特别适用于各种化学反应. 这里我们特别着重介绍等离子体催化和电弧等离子体热解煤制乙炔.

所谓等离子体催化是指单独利用等离子体或等离子体与催化剂共同作用下的催化反应, 等离子体起到增强催化反应的作用. 与单纯化学催化反应相

比,等离子体催化在大大降低工艺温度的同时,提高了反应效率。例如徐春蕾等<sup>[192]</sup>研究了在过渡金属 Fe-Ni 催化剂与微波等离子体协同作用下甲烷偶联制乙炔的反应,在体系压力为 4053 Pa、微波辐照时间为 5 s 和催化剂的  $m(\text{Fe})/m(\text{Ni})=5.67$  时,获得甲烷转化率为 97.3% 和乙炔收率为 73.5%。利用等离子体催化进行甲烷偶联反应研究的文献还有许多<sup>[193-195]</sup>,王达望等写过一篇有关综述<sup>[196]</sup>。

等离子体催化反应具有环境友好的特性,因此被广泛应用于对环境有害气体的处理,以及消毒等方面。如 1994 年依成武等<sup>[197]</sup>进行过高压脉冲等离子体分解含  $\text{SO}_2$  烟气的实验,据称每千瓦小时耗能可分解 1.61—1.97 kg  $\text{SO}_2$  气体,并且分解率达 80% 以上。赵君科等<sup>[198]</sup>报道了一种脉冲电晕等离子体烟气脱硫工业中试装置,该装置运行结果表明,在优化的条件下,  $\text{SO}_2$  的脱除率达到 85% 以上。最近,杨学昌等<sup>[199]</sup>采用纳米二氧化钛等离子体催化空气净化技术进行了降解甲醛和杀灭芽孢杆菌的试验,取得了满意的结果。

考虑到石油资源的不足而我国又有丰富的煤炭资源,再加上人们越来越重视的环境问题,煤的等离子体热解制乙炔技术发展前景被广泛看好。陈宏刚等<sup>[200]</sup>介绍了煤热解制乙炔技术的发展背景。祝媛等<sup>[201]</sup>评论了世界各国的等离子体煤-乙炔转化装置及各自的优缺点,最后还总结了我国在山西建立的实验装置存在的问题,并对解决这些问题提出了建议。最近我国又一大型煤等离子体热解制乙炔装置在中国科学院等离子体研究所建成,即将开始实验研究<sup>[202]</sup>。

## 5.7 电子束、离子束和激光束的产生

等离子体中高密度的电子、离子和光子可以用来产生高强度的电子束、离子束和激光束。高功率的气体激光器,如二氧化碳激光器,就是通过气体放电等离子体产生激发态粒子而形成的。

谢文楷<sup>[203]</sup>报道了他们设计的一种采用空心阴极等离子体作为阴极的电子枪,他们希望将这种电子枪用于高平均功率的微波器件。

Zhao 等<sup>[204]</sup>和 Zhang 等<sup>[205]</sup>介绍了中国科学院近代物理研究所(兰州)建造的利用 ECR 等离子体产生的强束流高价离子源,该离子源用于重离子加速器实验研究。

## 6 论文统计

我们从 VIP 网站统计了我国学者自 1991 年以来在国内核心期刊发表的有关等离子体的论文,又从 ISI 网站统计了我国学者用英文发表的被 SCI 收录的有关等离子体的论文。图 4 中白棒表示我国学者 1991 年以来每年用英文在国际上发表的被 SCI 收录的有关等离子体的论文数,图 4 中灰棒表示我国学者自 1991 年以来每年在国内核心期刊上发表的有关等离子体的论文数。图中可以看到,在 1996—1997 年间,图形有一个扰动,这可能意味着在这期间国家对科技论文政策的调整。而且在 1997 年后,用英文发表的论文逐年增长的速率比 1997 年之前提高。这说明我们的研究成果更快地迈向世界。这与我国政府推动我国经济进入世界大家庭的努力是一致的。2004 年国内论文数的减少是由于中文网站 2004 年的数据采集工作到目前为止还没有完成。相比之下,国际网站上数据的更新要快许多。

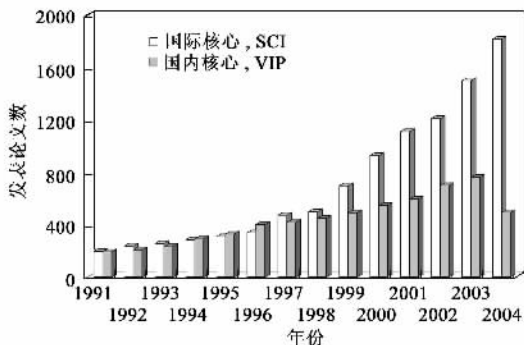


图 4 中国学者在中国核心期刊和国际核心期刊上逐年发表的与等离子体有关的论文数。国际上的数据来自 ISI 网,国内数据来自 VIP 网

## 7 后记

低温等离子体是一种本征参数分布非常宽的物质,就人工产生的低温等离子体而言,日光灯中的辉光放电等离子体,密度约为  $10^8 \text{ cm}^{-3}$ ,电子温度约几 eV,而在磁约束核聚变实验中的等离子体密度可达  $10^{13} \text{ cm}^{-3}$  以上,电子温度可达 1 keV;在某些局域热平衡的热等离子体中,等离子体密度可达  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 。如果再考虑各种等离子体中化学成分以及物理状态的分布,则可能的物理状态有无穷的变化。如此众多的参数变化使得低温等离子体获得了极其广泛的应用,从微电子工艺中的刻蚀、薄膜材料沉积到太空中航天器的推进,从生物兼容性处理到垃圾的无害化处理,从用于平板显示的纳米碳管阴极电子发射材

料的制备,到用于微波器件的等离子体阴极电子束管的兆安级的强流电子发射,无不体现了低温等离子体独特而不可替代的特性。也正是因为如此,我国有关低温等离子体的实验室如雨后春笋般地发展起来。这里有早在20世纪70—80年代成立的中国科学技术大学近代物理系的等离子体物理专业和大连理工大学三束国家重点实验室,也有近期成立的各地方政府支持下的重点实验室,如近期成立的北京印刷学院的等离子体物理及材料研究室,始建于1996年,2001年获得批准的湖北省等离子体化学与新材料重点实验室,等等。有些学校虽然没有冠以等离子体名的实验室,但其有关等离子体技术的研究已有相当的规模,例如:苏州大学物理科学与技术学院的江苏省薄膜材料重点实验室,采用等离子体方法制备薄膜材料和进行等离子体刻蚀研究;东华大学理学院,采用等离子体处理纺织品和生物材料;南京大学化学系,进行等离子体聚合以及纳米材料制备研究;哈尔滨工业大学和西北工业大学,进行等离子体推进器研究;清华大学多个系有与低温等离子体相关的研究室或组,等等。这样的例子不胜枚举。我国从事高温等离子体研究的两个最大的研究单位:西南核物理研究院和中国科学院合肥等离子体研究所,看到了低温等离子体巨大的工业应用前景,也积极加入低温等离子体的应用研究,实际上他们为我国的低温等离子体研究培养了大量的研究人员,以及开发了大量的仪器装备。在全国范围内,低温等离子体的应用设备可以说几乎在所有理工类的研究所和各实验室存在。

也正因为等离子体参数分布的广泛性和状态的复杂性,使得对其本身的研究产生了众多的困难。对于大多数等离子体使用者而言,低温等离子体是一个“黑匣子”,其内部发生的过程一般很难了解,因此就只考虑对于“黑匣子”的输入—输出之间的关系,如果凑巧能得到所希望的输出或接近所希望的结果也就满足了。但是,由于缺乏对“黑匣子”中过程的了解,有些工艺始终难以完善,缺乏可靠性和可重复性。有时甚至会导致大规模投资的失败。这也是为什么低温等离子体研究成果非常多,而真正获得工业应用的成果并不多。

我们这篇介绍我国低温等离子体研究现状的文章希望能使读者对低温等离子体巨大的应用前景有所了解,并看到人们对低温等离子体物理和化学的了解还是非常肤浅的。在低温等离子体的理论和实验研究方面还有许多事可做,可是事实上我们还

是十分清楚如何让它做得更好。

## 参 考 文 献

- [ 113 ] 吕反修. 物理, 2003, 32( 6 ): 383 [ Lü F X. Wuli( Physics ), 2003, 32( 6 ): 383 ( in Chinese ) ]
- [ 114 ] 卫中山, 左敦稳. 航空精密制造技术, 2004, 40( 1 ): 20 [ Wei Z S, Zuo D W. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2004, 40( 1 ): 20 ( in Chinese ) ]
- [ 115 ] 李建, 刘艳红, 俞世吉等. 真空, 2004, 41( 2 ): 8 [ Li J, Liu Y H, Yu S J *et al.* Vacuum, 2004, 41( 2 ): 8 ( in Chinese ) ]
- [ 116 ] 吕反修, 唐伟忠, 宋建华等. 机械工人: 热加工, 2004( 5 ): 62 [ Lü F X, Tang W Z, Song J H *et al.* Mechanist: Heat Treatment, 2004( 5 ): 62 ( in Chinese ) ]
- [ 117 ] 吕反修, 唐伟忠, 宋建华等. 机械工人: 热加工, 2004( 6 ): 18 [ Lü F X, Tang W Z, Song J H *et al.* Mechanist: Heat Treatment, 2004( 6 ): 18 ( in Chinese ) ]
- [ 118 ] 王传新, 汪建华, 满卫东等. 工具技术, 2004, 38( 1 ): 35 [ Wang C X, Wang J H, Man W D *et al.* Tool Engineering, 2004, 38( 1 ): 35 ( in Chinese ) ]
- [ 119 ] 孙方宏, 陈明, 张志明等. 机械工程学报, 2003, 39( 7 ): 101 [ Sun F H, Chen M, Zhang Z M *et al.* Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39( 7 ): 101 ( in Chinese ) ]
- [ 120 ] 李红轩, 徐兆, 陈建敏等. 摩擦学学报, 2004, 24( 1 ): 1 [ Li H X, Xu T, Chen J M *et al.* Tribology, 2004, 24( 1 ): 1 ( in Chinese ) ]
- [ 121 ] 郭军霞, 蔡珣, 陈秋龙. 材料保护, 2003, 36( 9 ): 15 [ Guo J X, Cai X, Chen Q L. Materials Protection, 2003, 36( 9 ): 15 ( in Chinese ) ]
- [ 122 ] 黄立业, 徐可为等. 摩擦学学报, 2001, 21( 4 ): 241 [ Huang L Y, Xu K W *et al.* Tribology, 2001, 21( 4 ): 241 ( in Chinese ) ]
- [ 123 ] Xu J, Huang X H, Li W *et al.* J. Appl. Phys., 2002, 91( 8 ): 5434
- [ 124 ] 王升高, 王传新等. 无机化学学报, 2003, 19( 3 ): 329 [ Wang S G, Wang C X *et al.* Chinese Journal of Inorganic Chemistry, 2003, 19( 3 ): 329 ( in Chinese ) ]
- [ 125 ] 李海钧, 顾长志, 龚艳等. 物理学报, 2004, 53( 7 ): 2258 [ Li H J, Gu C Z, Dou Y *et al.* Acta Physica Sinica, 2004, 53( 7 ): 2258 ( in Chinese ) ]
- [ 126 ] Lu F X, Tang W Z, Huang T B *et al.* Diamond and Related Materials, 2001, 10( 9, 10 ): 1551
- [ 127 ] 吕反修, 唐伟忠, 李成明等. 红外技术, 2003, 25( 4 ): 1 [ Lu F X, Tang W Z, Li C M *et al.* Infrared Technology, 2003, 25( 4 ): 1 ( in Chinese ) ]
- [ 128 ] 余云鹏, 林璇英, 林舜辉等. 汕头大学学报( 自然科学版 ), 2004, 19( 2 ): 13 [ Yu Y P, Lin X Y, Lin S H *et al.* Journal of Shantou University ( Natural Science ), 2004, 19( 2 ): 13 ( in Chinese ) ]
- [ 129 ] 殷生毅, 陈光华, 吴越颖等. 半导体学报, 2004, 25( 5 ): 530 [ Yin S Y, Chen G H, Wu Y Y *et al.* Chinese Journal of Semiconductors, 2004, 25( 5 ): 530 ( in Chinese ) ]

- [ 130 ] 娄丽芳, 盛钟延, 姚奎鸿等. 光学学报, 2004, 24( 1 ): 24 [ Lou L F, Sheng Z Y, Yao K H et al. Acta Optica Sinica, 2004, 24( 1 ): 24 ( in Chinese ) ]
- [ 131 ] 孙殿照. 物理, 2001, 30( 7 ): 413 [ Sun D Z. Wuli( Physics ), 2001, 30( 7 ): 413 ( in Chinese ) ]
- [ 132 ] 程立森, 杨志坚. 物理, 2000, 29( 1 ): 19 [ Cheng L S, Yang Z J. Wuli( Physics ), 2000, 29( 1 ): 19 ( in Chinese ) ]
- [ 133 ] Zhang W H, Hou X H. Polymers for Advanced Technologies, 1999, 10( 7 ): 465
- [ 134 ] 张卫华, 侯晓淮. 高分子学报, 2000( 5 ): 777 [ Zhang W H, Hou X H. Acta Polymerica Sinica, 2000( 5 ): 777 ( in Chinese ) ]
- [ 135 ] 张正彪, 程振平, 朱健等. 油田化学, 2003, 20( 3 ): 273 [ Zhang Z B, Cheng Z P, Zhu J et al. Oilfield Chemistry, 2003, 20( 3 ): 273 ( in Chinese ) ]
- [ 136 ] Fang J L, Chen H, Yu X H. J. Appl. Polym. Sci., 2001, 80( 9 ): 1434
- [ 137 ] 张菁, 冯祥芬, 谢涵坤等. 物理学报, 2003, 52( 7 ): 1707 [ Zhang J, Feng X F, Xie H K et al. Acta Physica Sinica, 2003, 52( 7 ): 1707 ( in Chinese ) ]
- [ 138 ] 曾蓉, 庞志成, 戈峰等. 高等学校化学学报, 2001, 22( 4 ), 687 [ Zeng R, Pang Z C, Ge F et al. Chemical Journal of Chinese Universities, 2001, 22( 4 ), 687 ( in Chinese ) ]
- [ 139 ] 齐尚奎, 吕晋军, 张平余等. 化学物理学报, 2001, 14( 4 ): 459 [ Qi S K, Lu J J, Zhang P Y et al. Chinese Journal of Chemical Physics, 2001, 14( 4 ): 459 ( in Chinese ) ]
- [ 140 ] 颜永红, 曾云, 彭景翠等. 微细加工技术, 1996( 3 ): 66 [ Yan Y H, Zeng Y, Peng J C et al. Microfabrication Technology, 1996( 3 ): 66 ( in Chinese ) ]
- [ 141 ] 吴朝阳, 颜永红, 沈国励等. 高等学校化学学报, 1999, 20( 12 ): 1871 [ Wu C Y, Yan Y H, Shen G L et al. Chemical Journal of Chinese Universities, 1999, 20( 12 ): 1871 ( in Chinese ) ]
- [ 142 ] Huang J, Wang X L, Chen X Z et al. J. Appl. Polym. Sci., 2003, 89( 12 ): 3180
- [ 143 ] 王存嫦, 王桦, 吴朝阳等. 化学学报, 2003, 61( 4 ): 608 [ Wang C C, Wang H, Wu C Y et al. Acta Chimica Sinica, 2003, 61( 4 ): 608 ( in Chinese ) ]
- [ 144 ] 李家全, 程仕清, 关维恕等. 核聚变与等离子体物理, 1991, 11( 2 ): 106 [ Li J Q, Cheng S Q, Guan W S et al. Nuclear fusion and plasma physics, 1991, 11( 2 ): 106 ( in Chinese ) ]
- [ 145 ] 汤宝寅, 王松雁, 刘爱国等. 材料科学与工艺, 1999( 7 ): 181 [ Tang B Y, Wang S Y, Liu A G et al. Materials Science and Technology, 1999( 7 ): 181 ( in Chinese ) ]
- [ 146 ] 夏立芳. 材料热处理学报, 2001, 22( 1 ): 42 [ Xia L F. Transactions of Metal Heat Treatment, 2001, 22( 1 ): 42 ( in Chinese ) ]
- [ 147 ] 汤宝寅, 王浪平, 曾照明等. 中国表面工程, 2004, 17( 1 ): 10 [ Tang B Y, Wang L P, Zeng Z M et al. China Surface Engineering, 2004, 17( 1 ): 10 ( in Chinese ) ]
- [ 148 ] Wang DZ. J. Appl. Phys., 1999, 85( 8 ): 3949
- [ 149 ] 于炯, 宫野, 王德真. 核聚变与等离子体物理, 1995, 15( 4 ): 8 [ Yu J, Gong Y, Wang D Z. Nuclear fusion and plasma physics, 1995, 15( 4 ): 8 ( in Chinese ) ]
- [ 150 ] Lei M K, Zhang Z L. J Vac Sci Technol., 1995, 13A : 2986
- [ 151 ] 黎红, 黄楠, 周仲荣. 中国表面工程, 2000, 13( 1 ): 6 [ Li H, Huang N, Zhou Z R. China Surface Engineering, 2000, 13( 1 ): 6 ( in Chinese ) ]
- [ 152 ] Huang N, Yang P, Leng Y X et al. Surface & Coatings Technology, 2004, 186( 1 2 ): 218
- [ 153 ] Yao Z Q, Yang P, Huang N et al. Applied Surface Science, 2004, 230( 1—4 ): 172.
- [ 154 ] Wang J, Huang N, Yang P et al. Biomaterials, 2004, 25( 16 ): 3163
- [ 155 ] Chu P K, Chen J Y, Wang L P et al. Materials Science & Engineering R Reports, 2002, 36( 5 6 ): 143
- [ 156 ] 童洪辉, 陈庆川等. 核技术, 2002, 25( 9 ): 684 [ Tong H H, Chen Q C et al. Nuclear Techniques, 2002, 25( 9 ): 684 ( in Chinese ) ]
- [ 157 ] 汤宝寅, 朱剑豪等. 核技术, 2002, 25( 9 ): 690 [ Tang B Y, Zhu J H et al. Nuclear Techniques, 2002, 25( 9 ): 690 ( in Chinese ) ]
- [ 158 ] 冷永祥, 孙鸿, 徐禄祥等. 真空科学与技术, 2003, 23( 4 ): 295 [ Leng Y X, Sun H, Xu L X et al. J. Vac. Sci. & Techn. ( China ), 2003, 23( 4 ): 295 ( in Chinese ) ]
- [ 159 ] Wang L. Applied Surface Science, 2003, 211 : 308
- [ 160 ] Xu X L, Wang L, Yu Z W et al. Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science, 2000, 31( 4 ): 1193
- [ 161 ] 钟晓霞, 来冰. 真空科学与技术, 2000, 20( 2 ): 99 [ Zhong X X, Lai B. J. Vac. Sci. & Techn. ( China ), 2000, 20( 2 ): 99 ( in Chinese ) ]
- [ 162 ] Qin Z X, Chen Z Z. Chinese Journal of Luminescence, 2002, 23( 2 ): 114
- [ 163 ] 冯涛, 李琼, 张继华等. 半导体学报, 2003, 24( B5 ): 161 [ Feng T, Li Q, Zhang J H et al. Chinese Journal of Semiconductors, 2003, 24( B5 ): 161 ( in Chinese ) ]
- [ 164 ] 张亮, 樊孝平, 王建祺. 高等学校化学学报, 1998, 19( 11 ): 1853 [ Zhang L, Fan X P, Wang J Q. Chemical Journal of Chinese Universities, 1998, 19( 11 ): 1853 ( in Chinese ) ]
- [ 165 ] 施来顺. 山东工业大学学报, 1999, 29( 1 ): 40 [ Shi L S. Journal of Shandong University( Engineering Science ), 1999, 29( 1 ): 40 ( in Chinese ) ]
- [ 166 ] 施来顺, 王建祺. 高等学校化学学报, 2001, 22( 3 ): 489 [ Shi L X, Wang J Q. Chemical Journal of Chinese Universities, 2001, 22( 3 ): 489 ( in Chinese ) ]
- [ 167 ] 张丽惠, 陈亚芍, 刘鹏. 塑料工业, 2003, 31( 6 ): 17 [ Zhang L H, Chen Y S, Liu P. China Plastics Industry, 2003, 31( 6 ): 17 ( in Chinese ) ]
- [ 168 ] 方志, 罗毅, 邱毓昌等. 真空科学与技术, 2003, 23( 6 ): 408 [ Fang Z, Luo Y, Qiu Y C et al. J. Vac. Sci. & Techn. ( China ), 2003, 23( 6 ): 408 ( in Chinese ) ]

- [ 169 ] 刘际伟,高晓敏,冯敏. 表面技术,2004,33(1):65 [ Liu J W, Gao X M, Feng M. Surface Technology, 2004, 33(1): 65 ( in Chinese ) ]
- [ 170 ] 姚文清,朱永法,曹立礼等. 材料工程,1997(12):26 [ Yao W Q, Zhu Y F, Cao L L *et al.* Journal of Materials Engineering, 1997(12):26 ( in Chinese ) ]
- [ 171 ] 梁红军,後晓淮. 化学通报,1999(6):1 [ Liang H J, Hou X H. Chemistry, 1999(6):1 ( in Chinese ) ]
- [ 172 ] 林立中. 物理,1999,28(7):417 [ Lin L Z. Wuli( Physics ), 1999, 28(7):417 ( in Chinese ) ]
- [ 173 ] 孙宁,刘倩,戚绍祺等. 高分子材料科学与工程,1994(2):34 [ Sun N, Liu Q, Qi S Q *et al.* Polymer Materials Science & Engineering, 1994(2):34 ( in Chinese ) ]
- [ 174 ] 李敏,张勤俭,韦鹤平. 环境与开发,2000,15(4):22 [ Li M, Zhang Q J, Wei H P. Environment and Exploitation, 2000, 15(4):22 ( in Chinese ) ]
- [ 175 ] 陈杰瑢,王雪燕,李尊朝等. 纺织高校基础科学学报,1996,9(4):307 [ Chen J R, Wang X Y, Li Z C *et al.* Basic Sciences Journal of Textile Universities, 1996, 9(4):307 ( in Chinese ) ]
- [ 176 ] 冯祥芬,谢涵坤,张菁. 物理,2002,31(1):27 [ Feng X F, Xie H K, Zhang J. Wuli( Physics ), 2002, 31(1):27 ( in Chinese ) ]
- [ 177 ] 陈慕华,储伟,张雄伟. 催化学报,2003,24(10):775 [ Chen M H, Chu W, Zhang X W. Chinese Journal of Catalysis, 2003, 24(10):775 ( in Chinese ) ]
- [ 178 ] 袁成凌,余增亮. 辐射研究与辐射工艺学报,2004,22(1):1 [ Yuan C L, Yu Z L. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2004, 22(1):1 ( in Chinese ) ]
- [ 179 ] 余增亮. 物理,1997,26(6):333 [ Yu Z L. Wuli( Physics ), 1997, 26(6):333 ( in Chinese ) ]
- [ 180 ] 余增亮,王学栋,吴跃进等. 安徽农业科学,1989,29(1):12 [ Yu Z L, Wang X D, Wu Y J *et al.* Journal of Anhui Agricultural Sciences, 1989, 29(1):12 ( in Chinese ) ]
- [ 181 ] 董小雷. 中国化工报 2002. 7. 11 ( [http://www.ntem.com.cn/kjxx2/0725\\_kf\\_2.htm](http://www.ntem.com.cn/kjxx2/0725_kf_2.htm) )
- [ 182 ] 解思深. 纳米科技发展调研报告汇编,2002
- [ 183 ] 魏智强,温贤伦等. 稀有金属材料与工程,2004,33(3):305 [ Wei Z Q, Wen X L *et al.* Rare Metal Materials and Engineering, 2004, 33(3):305 ( in Chinese ) ]
- [ 184 ] 李志杰,曲家惠,左良等. 东北大学学报:自然科学版,2004,25(3):243 [ Li Z J, Qu J H, Zuo L *et al.* Journal of Northeastern University ( Natural Science ), 2004, 25(3):243 ( in Chinese ) ]
- [ 185 ] 王俊文,孙彦平,梁镇海等. 稀有金属材料与工程,2004,33(5):478 [ Wang J W, Sun Y P, Liang Z H *et al.* Rare Metal Materials and Engineering, 2004, 33(5):478 ( in Chinese ) ]
- [ 186 ] Iijima S. Nature, 1991, 354:56
- [ 187 ] Meyyappan M, Delzeit L, Cassell A *et al.* Plasma Sources Sci. Technol., 2003, 12:205
- [ 188 ] Teo KBK, Lee SB, Chhowalla M *et al.* Nanotechnology, 2003, 14(2):204
- [ 189 ] 马旭村,徐贵昌,王恩哥. 中国科学 E 辑,2000,30(2):117 [ Ma X C, Xu G C, Wang E G. Science in China E, 2000, 30(2):117 ( in Chinese ) ]
- [ 190 ] 陈新,胡征,王喜章等. 高等学校化学学报,2001,22(5):731 [ Chen X, Hu Z, Wang X Z *et al.* Chemical Journal of Chinese Universities, 2001, 22(5):731 ( in Chinese ) ]
- [ 191 ] 王必本,张兵,郑坤. 物理学报,2004,53(4):1255 [ Wang B B, Zhang B, Zheng K *et al.* Acta Physica Sinica, 2004, 53(4):1255 ( in Chinese ) ]
- [ 192 ] 徐春蕾,董家驷,杨鸿生等. 东南大学学报(自然科学版),2004,34(2):210 [ Xu C L, Dong J L, Yang H S *et al.* Journal of Southeast University ( Natural Science ), 2004, 34(2):210 ( in Chinese ) ]
- [ 193 ] 崔锦华,许根慧,刘昌俊. 物理化学学报,2004,20(5):557 [ Cui J H, Xu G H, Liu C J. Acta Physico-Chimica Sinica, 2004, 20(5):557 ( in Chinese ) ]
- [ 194 ] 代斌,陆文琪等. 中国科学(B辑),2001,31(2):174 [ Dai B, Lu W Q *et al.* Science in China B, 2001, 31(2):174 ( in Chinese ) ]
- [ 195 ] 朱爱民,宫为民. 中国科学(B辑),2000,30(2):167 [ Zhu A M, Gong W M. Science in China B, 2000, 30(2):167 ( in Chinese ) ]
- [ 196 ] 王达望,马腾才,崔锦华. 化工学报,2003,54(9):1193 [ Wang D W, Ma T C, Cui J H. Journal of Chemical Industry and Engineering( China ), 2003, 54(9):1193 ( in Chinese ) ]
- [ 197 ] 依成武,刘恒权,白希尧等. 环境科学,1994,15(3):68 [ Yi C W, Liu H Q, Bai X R *et al.* Chinese Journal of Environmental Science, 1994, 15(3):68 ( in Chinese ) ]
- [ 198 ] 赵君科,王保健,任先文等. 中国工程科学,2002,4(2):74 [ Zhao J K, Wang B J, Ren X W *et al.* Engineering Science, 2002, 4(2):74 ( in Chinese ) ]
- [ 199 ] 杨学昌,柯锐,夏天等. 高压电器,2004,40(1):3 [ Yang X C, Ke R, Xia T *et al.* High Voltage Apparatus, 2004, 40(1):3 ( in Chinese ) ]
- [ 200 ] 陈宏刚,张旭斌,张永发等. 煤炭转化,1996,19(2):19 [ Chen H G, Zhang X B, Zhang Y F *et al.* Coal Conversion, 1996, 19(2):19 ( in Chinese ) ]
- [ 201 ] 祝媛,张济宇,谢克昌. 化学工业与工程技术,2004,25(1):30 [ Zhu Y, Zhang J Y, Xie K C. Journal of Chemical Industry & Engineering, 2004, 25(1):30 ( in Chinese ) ]
- [ 202 ] 科技日报(2005.01.07): [http://news.xinhuanet.com/st/2005-01/06/content\\_2423024.htm](http://news.xinhuanet.com/st/2005-01/06/content_2423024.htm)
- [ 203 ] 谢文楷. 电子科技大学学报,1996,25(7):17 [ Xie W K. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 1996, 25(7):17 ( in Chinese ) ]
- [ 204 ] Zhao H W, Zhang X Z, Zhang Z M *et al.* Review of Scientific Instruments, 2002, 73(2):Part 2, 525
- [ 205 ] Zhang Z M, Zhao H W, Zhang X Z *et al.* Review of Scientific Instruments, 2002, 73(2):Part 2, 580