

高品质金刚石膜微波等离子体 CVD 技术的发展现状

唐伟忠, 于盛旺, 范朋伟, 李义锋, 苏静杰, 刘艳青

(北京科技大学材料科学与工程学院, 北京 100083)



唐伟忠

摘要: 金刚石膜拥有许多优异的性能。在制备金刚石膜的各种方法之中, 高功率微波等离子体化学气相沉积(MPCVD)法因其产生的等离子体密度高, 同时金刚石膜沉积过程的可控性和洁净性好, 因而一直是制备高品质金刚石膜的首选方法。在世界范围内, 美、英、德、日、法等先进国家均已掌握了以高功率 MPCVD 法沉积高品质金刚石膜的技术。但在我国国内, 高功率 MPCVD 装备落后一直是困扰我国高品质金刚石膜制备技术发展的主要障碍。首先综述国际上高功率 MPCVD 装备和高品质金刚石膜制备技术的发展现状, 包括各种高功率 MPCVD 装置的特点。其后, 回顾了我国金刚石膜 MPCVD 技术的发展历史, 并介绍北京科技大学近年来在发展高功率 MPCVD 装备和高品质金刚石膜制备技术方面取得的新进展。

关键词: MPCVD 金刚石膜沉积技术; 高品质金刚石膜

中图分类号: TB79; TQ164 **文献标识码:** A **文献编号:** 1674 - 3962 - (2012)08 - 0033 - 07

Developments in Microwave Plasma Chemical Vapor Deposition Technology for Preparing High Quality Diamond Films

TANG Weizhong, YU Shengwang, FAN Pengwei, LI Yifeng, SU Jingjie, LIU Yanqing
(College of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Diamond films possess many remarkable properties. Among the various techniques to deposit diamond films, high power microwave plasma chemical vapor deposition (MPCVD) method has the advantages of high density plasma, good controllability and clean environment free from electrode material contamination. Therefore, MPCVD has remained the primary technique useful for depositing high quality diamond films. Western countries have developed abilities to deposit high quality diamond films by using high power MPCVD techniques. In contrast, slow development in high power MPCVD apparatus has remained a main obstacle for China to develop its ability to produce high quality diamond films material. In this article, we first review the evolution of high power MPCVD diamond films deposition techniques both abroad and at home. Then, we will present new results of our recent effort to develop high power MPCVD diamond films deposition techniques.

Key words: high power MPCVD technique; high quality diamond films

1 前言

由于金刚石膜同时拥有许多优异的性能, 如极高的硬度和弹性模量、极高的室温热导率、相对宽的禁带和电磁波透过范围、极佳的介电和绝缘性能、优异的半导

体性能、良好的化学稳定性、极高的抗辐射阈值等, 因而是众多传统及高技术领域中迫切需要的一种新材料^[1]。

在目前多种可用于制备金刚石膜的方法之中, 微波等离子体化学气相沉积(MPCVD)法由于其产生的等离子体密度高, 金刚石膜沉积过程的洁净性和可控性好, 因而一直是制备高品质金刚石膜的首选方法。在这里, 所谓高品质是相对于只强调金刚石膜要有高的机械性能的传统应用来讲的。笼统地讲, 高品质金刚石膜包括早期的所谓热沉级、光学级以及后来的所谓电子级或探测

收稿日期: 2011 - 10 - 12

基金项目: 国家自然科学基金(10675017); 国际科技合作项目(2010DFR50130)

第一作者: 唐伟忠, 男, 1955年生, 教授, 博士生导师

器级的金刚石膜，其共同特点是其结构完整性高、纯度高，因而其热学、光学、电学性能优异。从这一点上来讲，高品质金刚石膜是一些物性指标可与天然金刚石单晶相比，能使金刚石膜的多功能特性得到全面发挥，可被应用于像光学器件、高功率激光和微波以及宽禁带半导体器件制造，在高技术领域中有重要应用前景。

在使用传统的 MPCVD 装置进行金刚石膜沉积时，金刚石膜沉积速率低的问题一直是该技术发展的一大瓶颈，特别是在制备较大面积的高品质金刚石膜时，金刚石膜的沉积速率通常只有 $1 \mu\text{m/h}$ 左右。解决这一问题的途径其实也很简单，即提高 MPCVD 金刚石膜沉积装置的可输入功率和功率密度^[2]。从这一意义上讲，发展高功率 MPCVD 金刚石膜沉积装置是发展高品质金刚石膜沉积技术的关键。

本文首先回顾国际上 MPCVD 金刚石膜沉积装置发展的历史，并对比世界各国高功率 MPCVD 金刚石膜沉积装置各自的特点。在此之后，简单回顾我国 MPCVD 金刚石膜沉积装置技术发展的历史，并介绍北京科技大学近年来在发展高功率 MPCVD 金刚石膜沉积装置技术方面作出的努力和取得的进展。

2 国外 MPCVD 金刚石膜沉积技术的发展

在常温常压条件下，金刚石处于亚稳态。因此，金刚石膜的各种沉积技术都要借助于氢等离子体。在 20 世纪 80 年代初发展起来的各种金刚石膜沉积技术中，用微波作为激发等离子体手段的 MPCVD 装置最早出现于 1983 年^[3]。图 1 是当时使用的石英管式 MPCVD 装置的示意图。该装置以波导中传输的微波直接激励石英管内的氢气以形成等离子体，其结构极为简单，但其可输入的微波功率受石英管的限制，只能达到几百瓦的水平，其金刚石膜的沉积面积太小，目前已较少使用。

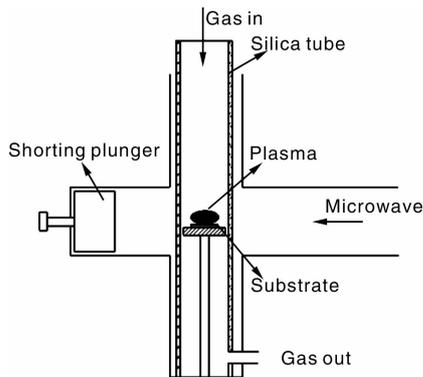


图 1 石英管式 MPCVD 装置的示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a quartz tube type MPCVD reactor

为提高 MPCVD 装置的功率和金刚石膜的沉积面积，

20 世纪 80 年代末出现了图 2 所示的石英钟罩式 MPCVD 装置^[4]。这一装置使用模式转换器和同轴天线作为激励手段将微波耦合进谐振腔后，在圆柱形谐振腔内的石英钟罩中产生等离子体。这一设计使 MPCVD 装置可输入的微波功率有了一定程度的提高，但由于石英钟罩的尺寸较小，这一装置可输入的微波功率也不能太高，因为在高功率条件下，氢等离子体会对石英钟罩造成刻蚀。石英钟罩式 MPCVD 装置的输入功率一般限于 $2 \sim 3 \text{ kW}$ 。

其后，在石英钟罩式 MPCVD 装置的基础上进行改进，出现了图 3 所示的圆柱金属谐振腔式 MPCVD 装置^[5]。对比图 2、图 3 之后可以发现，两种 MPCVD 装置间的差别仅在于圆柱谐振腔式装置使用平板状的石英窗口替代了石英钟罩式装置中的石英罩。由于圆柱金属谐振腔式装置主要由通过水冷的金属沉积室所构成，其平板状的石英窗与氢等离子体相距较远，而可望这一装置能够避免氢等离子体对石英窗造成刻蚀，即可在一定程度上提高可输入的微波功率。但人们很快发现，由于圆柱谐振腔式 MPCVD 装置的石英窗距离等离子体区域较远，因而会造成在石英窗与等离子体区域之间出现微波电场的次强区。在输入的微波功率较高时，次强区

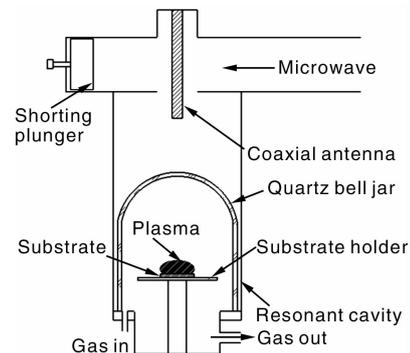


图 2 石英钟罩式 MPCVD 装置的示意图

Fig. 2 Schematic diagram of a quartz bell jar type MPCVD reactor

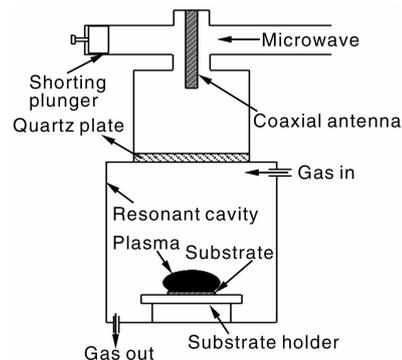


图 3 圆柱金属谐振腔式 MPCVD 装置的示意图

Fig. 3 Schematic diagram of a cylindrical cavity type MPCVD reactor

不可避免地会产生次生等离子体并造成石英窗的刻蚀。因此，圆柱金属谐振腔式 MPCVD 装置的实际输入微波功率一般不能超过 5 kW。

20 世纪 90 年代初，美国 Besen 等^[6]提出了一种多模非圆柱谐振腔式 MPCVD 装置的设计方案，其结构如图 4 所示。2002 年，德国 Pleuler 等^[7]也报道了一种类似的装置设计。上述两种 MPCVD 装置的共同特点是其微波的输入改由一环天线来完成，而环状的石英窗则被安置在了环形天线的下方。这样做的好处是，石英窗被藏在了沉积台的下方，避免了它易被氢等离子体刻蚀所造成的弊端。这一设计理念的采用，使 MPCVD 金刚石膜沉积装置的功率达到了 6~8 kW 的高水平。多模非圆柱谐振腔式 MPCVD 装置的外形很不规则，因而其设计难度较大，这造成 Pleuler 等的装置的设计并不成功。

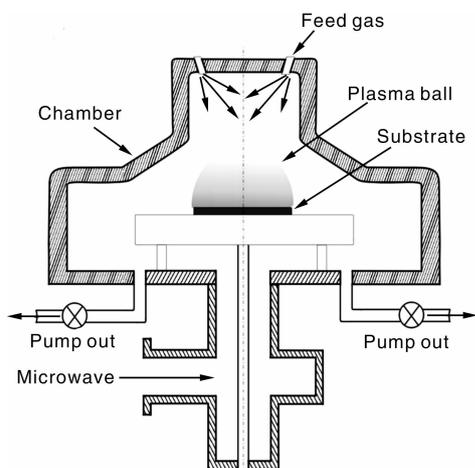


图 4 多模非圆柱谐振腔式 MPCVD 装置的示意图

Fig. 4 Schematic diagram of a multimode non-cylindrical cavity type MPCVD reactor

1997 年，德国 Fuener 等设计出了一种椭球谐振腔式 MPCVD 装置^[8]，其结构示意图如图 5 所示。由图可见，椭球谐振腔式 MPCVD 装置也是由金属谐振腔和石英钟罩组成，并也使用天线作为微波的激励手段。这一装置的主要特点是其巧妙地利用了椭球的上下焦点可使微波会聚的原理，让微波从处于椭球上焦点的天线发出，而让金刚石膜的沉积位置处于椭球的下焦点处。椭球谐振腔式 MPCVD 装置的谐振腔尺寸较大，因而它可以使用较大尺寸的石英钟罩，这使得在一般输入功率水平下，其产生的等离子体与石英钟罩之间有一定的距离，降低了因石英钟罩被刻蚀而造成金刚石膜被污染的危险。2.45 GHz 频率的椭球谐振腔式 MPCVD 装置的微波输入功率可达到 6 kW。

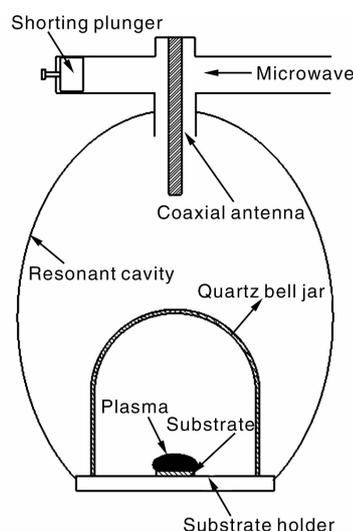


图 5 椭球谐振腔式 MPCVD 装置和示意图

Fig. 5 Schematic diagram of an ellipsoidal cavity type MPCVD reactor

综上所述，在金刚石膜沉积技术高速发展的 20 年间，在世界范围内出现了多种 MPCVD 金刚石膜沉积装置，其发展经历了从早期的石英管式、石英钟罩式、圆柱金属谐振腔式到后期的多模非圆柱谐振腔和椭球谐振腔式的发展过程。与此同时，MPCVD 金刚石膜沉积装置的功率水平也从早期的几百瓦提高到了目前大多数装置的数千瓦的水平。目前，石英管式装置由于其功率较低，已较少采用；石英钟罩式和圆柱金属谐振腔式装置的功率水平适中，在相当范围内还在使用；多模非圆柱谐振腔式与椭球谐振腔式装置可输入的微波功率较高，可被粗略地归类为高功率 MPCVD 装置，其特点是其微波输入功率一般超过 5 kW。同时需要指出的是，上述对 MPCVD 装置功率的描述都是针对较为常用的频率为 2.45 GHz 的装置而言的，而对频率较低的 915 MHz 的 MPCVD 装置来说，由于其波长较长和可激励产生的等离子体的尺寸较大，因而其 MPCVD 装置的功率相应会更高。

目前，美、英、德、日、法、俄等国均发展了自己的 MPCVD 金刚石膜沉积装置。表 1 列举了作者收集的国际上有代表性的 MPCVD 金刚石膜沉积装置的基本情况。从表 1 中的数据可以看出，目前国际上流行的 MPCVD 金刚石膜沉积装置包括石英钟罩式、圆柱金属谐振腔式、多模非圆柱谐振腔式以及椭球谐振腔式 4 种，多数频率为 2.45 GHz 的 MPCVD 装置的功率处于 5~6 kW 的范围。值得注意的是，英国 Element 6 公司作为世界钻石业巨头的子公司，其 MPCVD 金刚石膜沉积技术的细节从未对外公布。

表 1 国外典型 MPCVD 装置的主要技术数据

Table 1 Specifications of MPCVD reactors manufactured abroad

Country	US	UK	Germany	Japan	France	Russia
Research institute and/or Manufacturer	Michigan State University, Lambda Co.	Element 6 Co.	Fraunhofer Institute, AIXTRON Co.	SEKI Co. (Previous ASTeX Co.)	Universite Paris 13, Plassys Co.	General Physics Institute RAS, Optosystems Co.
Typical MPCVD reactor	Bell jar type	N/A	Ellipsoidal cavity type	Cylindrical and noncylindrical multimode cavity type	Bell jar type	noncylindrical multimode cavity type
Microwave frequency and power	2.45 GHz/6 kW 915 MHz/30 kW	N/A N/A	2.45 GHz/6 kW 915 MHz/60kW	2.45 GHz/5-6 kW 915 MHz/75 kW	2.45 GHz/6 kW -	4.45 GHz/5 kW -

3 不同 MPCVD 金刚石膜沉积装置中微波电场的分布模式

在对比各种不同的 MPCVD 装置时,需要谈及其微波电场的分布模式。图 6 对比了各种主要的 MPCVD 装置中微波电场的分布模式。在石英钟罩式以及圆柱金属谐振腔式装置中,微波电场的分布模式都是简单的圆波导中微波传输的 TM_{01} 模式;在多模非圆柱金属谐振腔式以及椭球谐振腔式装置中,微波电场的分布模式较为复杂。根据 Silva 等人^[9]的分析,在后两种装置中,微波电场的主要分布模式分别属于 TM_{01}/TM_{02} 混合模式以及由 TM_{036} 模式演化而来的复杂模式。

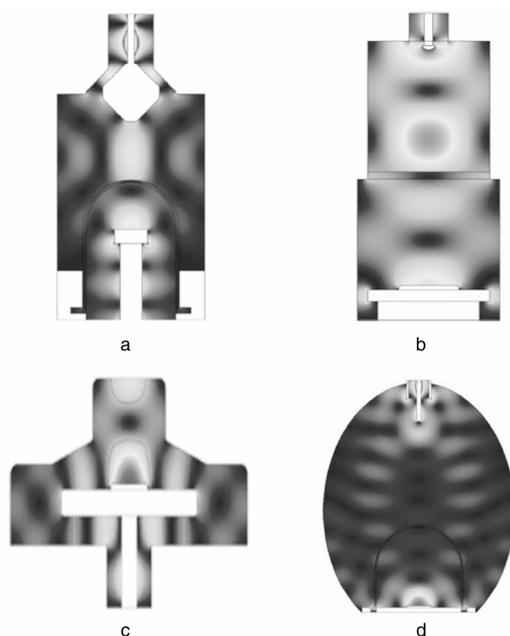


图 6 不同 MPCVD 装置中微波电场的分布模式: (a) 石英钟罩式, (b) 圆柱金属谐振腔式, (c) 多模非圆柱谐振腔式以及 (d) 椭球谐振腔式装置

Fig. 6 Microwave electric field distribution in (a) quartz bell jar, (b) cylindrical cavity, (c) multimode non-cylindrical cavity, and (d) ellipsoidal cavity type MPCVD reactors

不同 MPCVD 装置中微波电场分布模式的不同,不仅决定了装置中微波能量的传输模式,而且决定着装置能够被施加的功率水平。在石英钟罩式、圆柱金属谐振腔式装置中,微波电场的分布模式相对简单,它决定了装置中石英钟罩、圆柱金属谐振腔的直径都比较小。这一特点造成的直接后果是,对石英钟罩式装置来说,其可施加的功率不能过高,否则石英钟罩会过热和被刻蚀;对圆柱金属谐振腔式装置来说,其可施加的功率也不能过高,否则石英窗下微波电场的次强区就会产生次生等离子体,而这也会造成石英窗过热和被刻蚀。

对于多模非圆柱金属谐振腔式以及椭球谐振腔式的装置来说,其微波电场的分布模式较为复杂,同时,其谐振腔的尺寸也较大。因此,对仍使用石英钟罩的椭球谐振腔式装置来说,其可施加的功率因其石英钟罩的尺寸较大而有所提高;对使用环状石英窗的多模非圆柱金属谐振腔式装置来说,由于其石英窗远离了等离子体,因而其可施加的功率可相对更高。

以上的分析表明,随着 MPCVD 技术的进步, MPCVD 装置中微波电场的分布模式也在逐渐发生演化,从最初相对简单的模式向着相对复杂的模式转变。伴随着这一过程, MPCVD 装置的功率水平也获得了相应的提高。

4 我国 MPCVD 金刚石膜沉积装置技术的发展历史

相对于我国发展得较为成熟、已经实现产业化的热丝 CVD 和直流电弧等离子体喷射 CVD 金刚石膜沉积技术而言,我国 MPCVD 金刚石膜沉积技术的发展较为落后。这一情况在一定程度上制约了我国高品质金刚石膜沉积技术的发展。

1993 年,我国自行研制的石英钟罩式 MPCVD 装置,其输入功率为 800 W^[10]。1997 年,我国研制了圆柱金属谐振腔式 MPCVD 装置,其配备的微波电源的功率为 5 kW^[11]。目前,国内的多个实验室装备了石英钟

罩式以及圆柱金属谐振腔式 MPCVD 金刚石膜沉积装置，其普遍存在的问题是功率水平低、金刚石膜的沉积面积小、沉积速率低。

除了自行研制 MPCVD 金刚石膜沉积装置外，国内的一些研究单位也从国外购置了 MPCVD 装置。吉林大学使用日本 SEKI 公司产的 ASTEX5250 型 5 kW 圆柱谐振腔式 MPCVD 装置，研究了光学级金刚石膜的沉积工艺和单晶金刚石膜的同质外延^[12]；天津理工大学利用日本 SEKI 公司的 AX6350 型 6 kW 多模非圆柱谐振腔式 MPCVD 装置，开展了金刚石膜声表面波器件的研究^[13]；中电集团 12 所利用 Lambda 公司的 DiamoTek700 型石英钟罩式 MPCVD 装置，开展了微波器件用高品质金刚石膜的制备技术研究^[14]。上述 MPCVD 装置的引进，在一定程度上缓解了我国 MPCVD 装备技术落后的局面，促进了我国金刚石膜沉积技术水平的提高。

5 北京科技大学发展 MPCVD 金刚石膜沉积装置技术的努力

在高品质金刚石膜 MPCVD 沉积技术的发展中，MPCVD 装置技术的发展一直占据着重要的地位。在国际上 MPCVD 装置发展到了多模非圆柱谐振腔、椭球谐振腔式装置的同时，我国的科技界一直停留在使用石英钟罩式以及圆柱金属谐振腔式 MPCVD 装置的阶段。

为了提升我国 MPCVD 装置技术和高品质金刚石膜沉积技术的水平，北京科技大学近年来开展了 MPCVD 金刚石膜沉积装置的研究工作。目前，该研究已经开始取得一些重要的进展，其中包括：

(1) 针对高功率 MPCVD 装置都属于具有复杂微波电场分布模式的特点，大力开展了 MPCVD 装置模拟技术的研究^[15]；

(2) 在模拟技术的帮助下，研制了一台椭球谐振腔式 MPCVD 装置，其最高微波输入功率可达 8 kW^[16]；

(3) 研制了一种全新的具有圆柱形外型、但却是多模谐振腔式的 MPCVD 装置，其最高微波输入功率已达

8 kW^[17]；

(4) 利用上述两种高功率 MPCVD 装置，分别实现了较高品质金刚石膜的沉积^[18-19]。目前，高品质金刚石膜的性能已达到：室温热导率 $\kappa > 19 \text{ W/cm} \cdot \text{K}$ ，35 GHz 波长处的微波介电损耗角正切 $\text{tg}\delta < 10^{-4}$ 。

图 7 是所研制的椭球谐振腔式 MPCVD 装置的图片。而由图 6 可知，在该装置中，微波电场的分布模式是由 TM_{036} 模式演化而来的，而其可输入的微波功率受到其所使用的石英钟罩的限制。实验表明，其最高微波输入功率约为 8 kW。



图 7 椭球谐振腔式 MPCVD 装置

Fig. 7 The ellipsoidal cavity type MPCVD reactor

图 8 是新型圆柱多模谐振腔式 MPCVD 装置的照片、其结构示意图以及其内部微波电场的模拟结果。由图 8b 可见，新装置具有较为简单的圆柱式外形，同时它采用了环状石英窗的设计方案，因此，该装置结合了圆柱谐振腔式以及多模非圆柱谐振腔式 MPCVD 装置两者的优点，一方面其结构较为简单，具可调节性，另一方面其石英窗不易受到等离子体的刻蚀，因而可被用于较高的微波功率。由图 8c 显示的装置中微波电场的分布可以看出，其微波电场的分布主要表现为 TM_{022} 模式的分布特征。

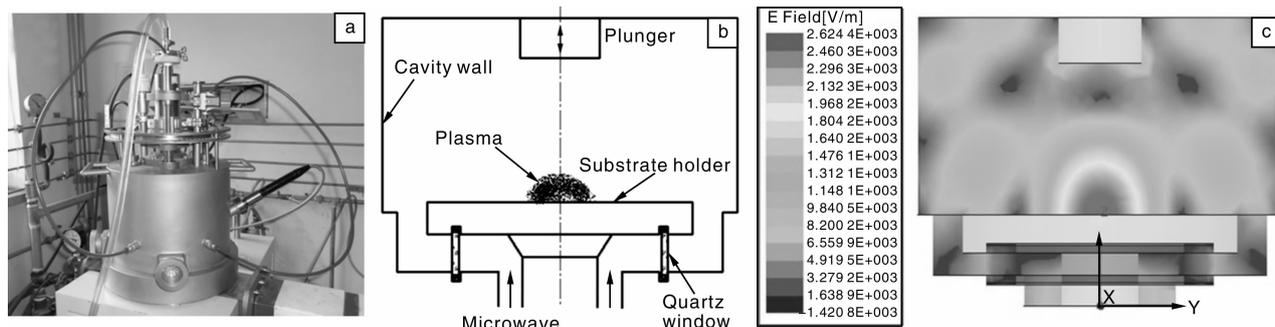


图 8 圆柱多模谐振腔式 MPCVD 装置(a)，其示意图(b)和其中的电场分布(c)

Fig. 8 A photo (a), a schematic diagram (b), and microwave electric field distribution (c) in the new cylindrical cavity type MPCVD reactor

图 9 是使用上述两种 MPCVD 装置沉积的直径分别为 63 mm 和 30 mm 的较高品质金刚石自支撑膜的照片。使用椭球谐振腔式 MPCVD 装置,在微波输入功率为 8 kW、沉积直径为 63 mm 时,较高品质金刚石膜的沉积速率可大于 $3 \mu\text{m}/\text{h}$;使用新型圆柱多模谐振腔式 MPCVD 装置,在微波输入功率为 6 kW、沉积直径为 30 mm 的情况下进行较高品质金刚石膜的沉积时,沉积速率可大于 $8 \mu\text{m}/\text{h}$ 。

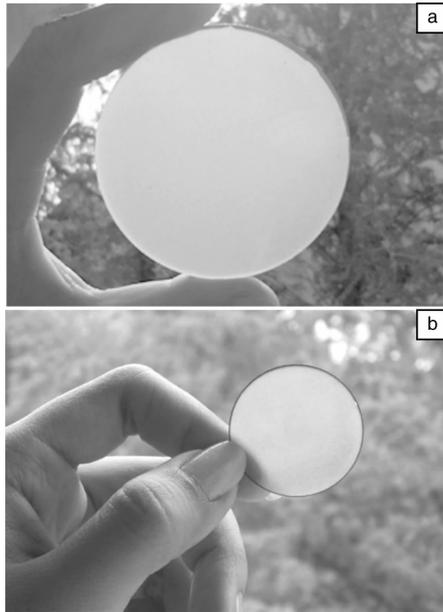


图 9 利用椭球谐振腔式、圆柱多模谐振腔式 MPCVD 装置沉积的较高品质的金刚石自支撑膜:(a) 椭球谐振腔式装置,直径 63 mm,(b) 圆柱多模谐振腔式装置,直径 30 mm

Fig. 9 Free standing diamond films prepared with the ellipsoidal cavity type MPCVD reactor (a) and the new cylindrical cavity type MPCVD reactor (b)

6 结 语

我国 MPCVD 金刚石膜沉积装置和高品质金刚石膜沉积技术的发展相对落后。造成这一局面的原因除了我国企业、研究单位的基础较为薄弱这一客观因素之外,我国的金刚石膜沉积技术在热丝 CVD、直流电弧等离子体喷射 CVD 两种相关技术方面发展较快这一现实,也在一定程度上抑制 MPCVD 技术的发展。

高功率 MPCVD 装置技术作为制备高品质金刚石膜的基础条件近年来重新受到了我国科技界的重视。我们有理由相信,在结合了企业、科研单位两方面的优势之后,我国高功率 MPCVD 装置技术的发展会逐渐赶上国际先进水平。在此基础上,我国高品质金刚石膜的制备

技术也会像目前我国的热丝 CVD、直流电弧等离子体喷射 CVD 两种技术一样,逐渐成熟起来并最终实现产业化。

参考文献 References

- [1] Warlimont H, Weber E. *Low-Pressure Synthetic Diamond* [M]. Berlin: Springer Verlag, 1998.
- [2] Hemawan K W, Grotjohn T A, Reinhard D K, et al. Improved Microwave Plasma Cavity Reactor for Diamond Synthesis at High-Pressure and High Power Density[J]. *Diamond and Related Materials*, 2010, 19 (12): 1 446 - 1 452.
- [3] Kamo M, Sato Y, Matsumoto S, et al. Diamond Synthesis from Gas Phase in Microwave Plasma[J]. *J Cryst Growth*, 1983, 62 (3): 642 - 644.
- [4] Bachmann P K, Messier A R. Emerging Technology of Diamond Thin Films[J]. *Chem Eng News*, 1989, 67 (20): 24 - 39.
- [5] Bachmann P K, Leers D, Wiechert D U. Diamond Chemical Vapor Deposition[J]. *J de Physique IV*, 1991, 1 (C2): 907 - 913.
- [6] Besen M M, Sevilano E, Smith D K. *Microwave Plasma Reactor: USP 5556475* [P]. 1993 - 06 - 04.
- [7] Pleuler E, Wild C, Fünér M, et al. The CAP-Reactor, a Novel Microwave CVD System for Diamond Deposition[J]. *Diamond and Related Materials*, 2002, 11(3/6): 467 - 471.
- [8] Fünér M, Wild C, Koidl P. Novel Microwave Plasma Reactor for Diamond Synthesis[J]. *Applied Physics Letters*, 1998, 72 (10): 1 149 - 1 151.
- [9] Silva F, Hassouni K, Bonnin X, et al. Microwave Engineering of Plasma-Assisted CVD Reactors for Diamond Deposition [J]. *J Phys: Condens Matter*, 2009, 21 (36): 364 202.
- [10] Wang Jianjun(王建军), Lü Fanxiu(吕反修), Wu Qinzhong(邬钦崇), et al. 用发射天线式微波等离子体 CVD 装置沉积大面积金刚石薄膜[J]. *High Technology Letters(高技术通讯)*, 1994, 4 (11): 14 - 16.
- [11] Lü Qingao(吕庆敖), Wu Qinzhong(邬钦崇), Sui Yifeng(隋毅峰), et al. 新型微波等离子体化学气相沉积金刚石薄膜装置[J]. *Vacuum and Cryogenics(真空与低温)*, 1998, 4 (1): 35 - 37.
- [12] Li Bo(李博), Han Bo(韩柏), Lü Xianyi(吕宪义), et al. 微波 PCVD 法大尺寸透明自支撑金刚石膜的制备及红外透过率[J]. *New Carbon Materials(新型碳材料)*, 2008, 23 (3): 245 - 249.
- [13] Wu Xiaoguo(吴小国), Xiong Ying(熊瑛), Yang Baohe(杨保和), et al. 金刚石/硅复合膜的导热特性研究[J]. *Journal of Optoelectronics Lasers(光电子激光)*, 2007, 18 (8): 963 - 965.
- [14] Ding M Q, Li L L, Bai G D, et al. A Study of Free Standing Diamond Films for mm TWTs [C]//Editorial Committee of This Conference. *Vacuum Electronics Conference*. Bangalore, India: 2011 IEEE International, 2011, 387 - 388.

[15] Wang Fengying (王凤英), Guo Huibin (郭会斌), Tang Weizhong(唐伟忠), et al. 圆柱形和椭球形谐振腔式 MPCVD 装置中微波等离子体分布特征的数值模拟与比较 [J]. *Journal of Synthetic Crystals*(人工晶体学报), 2008, 37 (4): 895 – 907.

[16] Yu Shengwang(于盛旺), Fan Pengwei(范朋伟), Li Yifeng (李义锋), et al. 椭球谐振腔 MPCVD 装置高功率沉积大面积金刚石膜研究[J]. *Journal of Synthetic Crystals*(人工晶体学报), 2011, 40 (5): 1 145 – 1 149.

[17] Li X J, Tang W Z, Yu S W, et al. Design of Novel Plasma Reactor for Diamond Film Deposition [J]. *Diamond and Related Materials*, 2011, 20 (4): 480 – 484.

[18] Yu Shengwang(于盛旺), Li Xiaojing(李晓静), Zhang Sikai (张思凯), et al. 新型 MPCVD 装置在高功率密度下高速沉积金刚石膜[J]. *Journal of Functional Materials*(功能材料), 2011, 42 (9): 1 722 – 1 726.

[19] Yu Shengwang(于盛旺), Hei Hongjun(黑鸿君), Liu Yanqing(刘艳青), et al. 高功率 MPCVD 金刚石膜红外光学材料制备研究[J]. *Infrared and Laser Engineering*(激光与红外工程), Received.

自主新型 SiSbTe 相变材料与全功能 PCRAM 实验芯片

中科院上海微系统与信息技术研究所经过多年努力，发现了自主 SiSbTe 体系相变材料，验证了 SiSbTe 具有低于传统 Ge₂Sb₂Te₅ 的功耗、更高的数据保持力和更快的相变速度。因为其与 GeSbTe 不同的可逆相变机理，发现了 Si 与 SbTe 的纳米尺度复合，SbTe 相变材料在非晶 Si 的纳米结构下进行可逆相变，有效地减少了可逆相变的体积，同时非晶 Si 的自加热效应增强了相变材料的加热效率，是导致存储性能提高的主要原因，经工程化反复验证，确定了 Si₃Sb₂Te₃ 体系，当 x 在 3 ~ 3.5 区间内，PCRAM 单元在数据保持能力、黏附能力、体积变化、疲劳使用寿命、操作可靠性、操作功耗等方面均优于 Ge₂Sb₂Te₅，并已经在 12 寸工艺平台上进行了验证。SiSbTe 材料体系的发现对于打破国际技术垄断，推动我国开发自主的 PCRAM 芯片具有重要的学术价值和商业价值。

采用晶体管作为选通器件，实现了其与相变电阻的集成，研制出了中国首款 8 Mb PCRAM 实验芯片，芯片存储单元的成品率达到 99% 以上，Reset 和 Set 阈值电流分别为 3.4 mA 和 1.2 mA，疲劳寿命可达 7 × 10⁷ 次以上，数据保持力可达 105 °C/10 年。该实验存储芯片的研制成功，标志着我国在 PCRAM 领域掌握了材料、工艺、结构、设计、测试的核心技术，为后续在 40 nm 技术节点上实现具有市场竞争力的 PCRAM 产品奠定了坚实的基础。

