

文章编号: 0258-7025(2009)Supplement 1-0330-07

光学级类金刚石膜的制备与应用

郭延龙 王淑云 王小兵 程勇 卢常勇 孙斌

(武汉军械士官学校光电技术研究所, 湖北 武汉 430075)

摘要 概括了光学级类金刚石(DLC)膜的优点与性能,对最常用的几种制备类金刚石膜的方法——脉冲激光沉积法、磁过滤电弧沉积法、射频辉光放电等离子体化学气相沉积法、磁控溅射法、射频溅射法和离子束沉积法的原理、特点、研究进展、所制备的类金刚石膜的性能以及类金刚石膜在各种光学材料和领域的应用状况进行了详细的总结。通过对国内外研究进展的分析,揭示出光学级类金刚石膜各种制备方法的优劣及其广阔的应用前景和巨大的实用价值。

关键词 薄膜; 类金刚石膜; 增透膜; 保护膜

中图分类号 O484.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL200936s1.0330

Production and Application of Optical Diamond-Like Carbon Films

Guo Yanlong Wang Shuyun Wang Xiaobing Cheng Yong Lu Changyong Sun Bin

(*Opto-Electronics Facility of Wuhan Ordnance Non-Commissioned Officers Academy, Wuhan, Hubei 430075, China*)

Abstract The merits and performance of optical diamond-like carbon (DLC) films are generalized. The most popular production methods for DLC films are pulsed laser deposition, filtered arc deposition, radio frequency plasma chemical vapor deposition, magnetron sputtering, radio frequency sputtering and ion beam deposition. The principle, character, research process of those methods and the performance and application on various optical materials and fields of the DLC films deposited by those methods are summarized. Through analyzation of domestic and overseas research progress, wide application prospect and huge practical value of optical DLC films are revealed.

Key words thin films; diamond-like carbon films; anti-reflection films; protective films

1 引言

类金刚石薄膜(DLC)是一种非晶碳膜,其中的碳原子部分处于金刚石相的 sp^3 杂化状态,部分处于石墨相的 sp^2 杂化状态,同时也有极少数的 sp^1 杂化态或碳氢键^[1]。由于 DLC 膜具有硬度高、弹性模量大、摩擦系数小、化学稳定性好、宽光谱透过率高、光学带隙宽、抗激光损伤等卓越优点,可作为优良的光学元件保护膜。由于 sp^3 键没有偶极矩,金刚石具有少见的宽光谱透过特性。与金刚石膜相比,DLC 膜还具有制备温度低、表面光滑、折射率在一定范围内可调(1.6~2.9),易于实现对硅、锗等材料红外增透等优点而备受青睐。无氢类金刚石膜(a-C)中缺少 C-H 骨架,因此不存在 C-H 键的伸缩振动在 3.4 μm 处所引起的吸收峰^[2],所以更适合应用于红外光学元件。光学级 DLC 膜对成膜的质量要求很高,尤其要具有高的透明度、大面积和均

匀性。因为 DLC 膜的折射率为 1.6~2.6,所以对于折射率越大的衬底,增透效果越好。例如,对于 ZnS, ZnSe, GaAs, Si, Ge, DLC 膜对它们的增透效果依次递增。

自 1971 年 Arserberg 等首次报道了用离子束沉积技术(IBD)制备出 DLC 膜以来,国际上就掀起了 DLC 膜研究的热潮。目前,国外 DLC 膜研制单位有美国的 Raython 公司, Norton 公司^[3], 英国的皇家信号和雷达研究所, 巴尔和斯特劳德公司, 英国的 DeBeers 公司^[4], 澳大利亚的监视技术研究所和德国 Fraunhofer 研究所等。国内的研制单位有昆明物理所、深圳雷地公司、华中光电技术研究所、西北工业大学、复旦大学、北京工业大学、中国科学院金属研究所、华北光电技术研究所、上海大学、南京理工大学、西北大学、西安工业大学、浙江大学、上海冶金研究所^[5]、哈尔滨工业大学、大连理工大学等。

作者简介: 郭延龙(1982-),男,硕士,讲师,主要从事类金刚石膜及固体激光器等方面的研究。

E-mail: catchtheday@163.com

DLC膜已成功地应用在很多光学材料表面,包括Si, Ge, ZnS, 玻璃, 石英玻璃, MgF_2 , $HgCdTe$, KCl等。国外已相继应用在太阳能硅电池、高功率 CO_2 激光窗口、潜望镜红外窗口、陆军用瞄准具红外窗口、飞机前视红外窗口、导弹头罩窗口、宇航探测器等^[4]。

2 光学级类金刚石膜的制备与应用

到目前为止,沉积DLC膜的方法已有许多种,大致可分为两大类,即物理气相沉积法和化学气相沉积法。物理气相沉积法是用高能粒子轰击靶物质(石墨),与靶表面原子发生碰撞,结果把部分靶表面原子或原子团簇蒸发出来,沉积在衬底上形成DLC膜^[6]。例如直流溅射、磁控溅射、射频溅射、离子束溅射和脉冲激光沉积法等。化学气相沉积法(Chemical Vapor Deposition, CVD)是在高温条件下通过碳的氢化物、卤化物、氧化物等的分解、聚合、氧化、还原等化学反应过程形成DLC膜的方法。例如热丝CVD法、火焰燃烧合成法、等离子体CVD法(包括直流等离子体CVD法、射频等离子体CVD法、微波等离子体CVD法、直流电弧等离子体喷射CVD法等)。CVD法对衬底温度要求较高,至少在 $400\text{ }^\circ\text{C}$ 以上,一般在 $600\sim 1000\text{ }^\circ\text{C}$ 之间。下面对最常用的几种制备DLC膜的方法及其成果加以介绍。

2.1 脉冲激光沉积法

脉冲激光沉积法(Pulsed Laser Deposition, PLD)是采用激光烧蚀石墨靶或其他靶材,形成等离子体定向发射到靶对面的衬底上沉积出DLC膜的制膜方法。和其他制备方法相比,它可以在室温下进行,从而能在玻璃等易熔材料上沉积,极大地扩大了DLC膜的应用领域。同时,它还具有速度极快、工艺简单、操作性和可控性好、不引入杂质、便于掺杂等优点。

目前,已经成熟的传统脉冲激光沉积法主要使用单脉冲能量百毫焦量级,脉宽纳秒量级的激光器在真空下烧蚀石墨,常温沉积DLC膜。该方法仍有如下的许多问题亟待解决:膜表面存在很多微米量级的石墨颗粒;膜金刚石相含量较低;内应力较大等。各国研究者发现^[7],采用低压氢气或氧气中沉积、超快激光、加偏压、加磁场、设置最佳的沉积温度等措施可以较好地解决膜金刚石含量较低的问题;采用机械过滤器、金刚石、丙酮或PMMA(亚克力)靶材、减小单脉冲能量等措施可以解决膜表面石墨颗粒多的问题;采用间歇沉积、真空退火、超快激光

等措施可以减小膜内应力。

由于碳离子速度快,大的石墨颗粒速度慢,于是英国的F. Balona等采用了一个每分钟6000转的风扇型机械过滤器^[8],使膜上的大颗粒明显减少。意大利的G. Messina等^[9]用XeCl激光器,分别在 $25\text{ }^\circ\text{C}$, $50\text{ }^\circ\text{C}$, $100\text{ }^\circ\text{C}$, $300\text{ }^\circ\text{C}$, $450\text{ }^\circ\text{C}$ 下,在真空中及压强为266 Pa的氢气中沉积了许多DLC膜。他们发现,真空中 $50\text{ }^\circ\text{C}$ 时沉积的膜性能最好,氢气中 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 时沉积的膜最好。

1999年,美国的F. Qian等^[10]用飞秒激光在石英玻璃上制备出了 sp^3 键含量为60%的DLC膜,在 $600\sim 1000\text{ nm}$ 波段透过率超过80%。2001年,日本的Kenji Ebihara等^[11]发现:在106 Pa的氢气中用KrF激光可在 8 J/cm^2 的能量密度下得到带隙为2 eV的DLC膜。2008年,武汉军械士官学校郭延龙等采用飞秒激光在2 Pa的氧气氛下沉积的类金刚石膜使硅基底在 $4\text{ }\mu\text{m}$ 处的透过率由53%提高至65%,已应用于红外增透保护膜。

2.2 磁过滤电弧沉积

真空电弧沉积是通过在石墨阴极和阳极之间放电产生高纯碳等离子体沉积DLC膜的方法。碳离子在基体负电位的作用下加速冲向基体,从而获得与基体结合牢固的DLC膜。弧光放电可产生很高的等离子体流量,沉积速率可达 100 nm/min 。等离子体中含有不同价态的碳离子、中性粒子和大颗粒,导致薄膜中石墨颗粒的存在。若采用磁过滤弯管使到达衬底的几乎全部是一价碳离子,称为磁过滤电弧沉积(Filtering Arc Deposition, FAD)。它具有设备简单、操作方便、速率快、温度低、附着力好、易于过渡到工业化生长等优点^[6]。

上海冶金研究所于1995年建立了国内第一台真空磁过滤电弧沉积装置。该所的茅东升^[12]和赵建平^[13]在硅和石英上沉积出 sp^3 键含量大于90%,光学带隙宽度达到2.4 eV的DLC膜。1998年,西安工业学院朱昌等^[14]在NaCl和KBr晶体表面镀制了DLC膜,镀膜后红外透过率略有降低,但是具有优良的抗潮解性能。2002年,新加坡的D. Sheeja等^[15]在磁过滤电弧沉积中附以脉冲偏压制备出内应力很低的DLC膜,膜厚达到 $3.1\text{ }\mu\text{m}$,并将其用于微机械零件。

2004年,哈尔滨工业大学朱嘉琦等^[16]在硅片表面制备出硬度高达51 GPa的DLC膜。同年,日本丰桥技术大学的Hirofumi Takikawa等^[17]在橡胶上沉积DLC膜时发现:环境气体为碳氢气体时沉积

速率比真空或氢气中要快。环境气氛为 C_2H_2 时比 CH_4 或 C_2H_4 时沉积速度快。这是物理气相沉积法和化学气相沉积法的一个很好的结合。

2.3 射频辉光放电等离子体化学气相沉积法

射频辉光放电等离子体化学气相沉积法(Radio frequency plasma chemical vapor deposition, RF-PCVD)是通过射频辉光放电分解碳氢气体,从而形成等离子体,再沉积到基体上形成薄膜的方法。它具有温度低、膜层质量好等优点,是目前最常用的 DLC 膜沉积方法之一。和直流辉光放电等离子体化学气相沉积法相比,它克服了沉积绝缘薄膜时的表面电荷积累效应,提高了沉积速率。

1994年,西北工业大学张贵峰^[18]用该方法在 ZnS 上沉积了 DLC 膜,在 $5\ \mu\text{m}$ 处单面镀膜的 ZnS 透过率为 80%,双面镀膜的 ZnS 透过率则达到 90%。他们还发现 DLC 膜可以作为 MgF_2 的红外增透和保护膜^[19]。他们发现 DLC 膜的折射率随电压的增加而线性增加,由此可通过改变电压制备出折射率随膜厚变化的梯度 DLC 膜^[20]。从图 1 和图 2 可见,梯度 DLC 膜可以实现宽带红外增透,实用价值巨大。

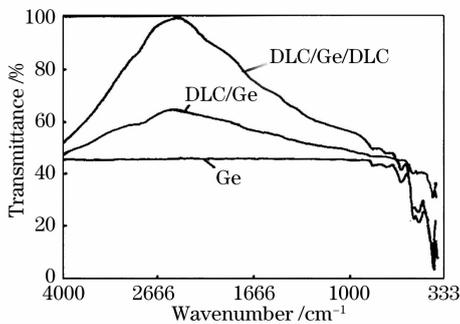


图 1 锗片镀膜前、单面镀 DLC 膜后及双面镀 DLC 膜后的透过谱

Fig. 1 Transmittance of a germanium slice before and after coating one and two surfaces with DLC films

1996年,昆明物理研究所姜杰^[21]采用该方法在锗上制备出附着力极强的 DLC 膜。姜杰还发现 DLC 膜可有效防止(Ge/SiO)膜堆组成的红外滤光片吸潮和氧化^[22]。多层红外高效增透膜最外层通常为低折射率的氟化物如 CaF_2 , MgF_2 , BaF_2 , SrF_2 等,它们存在一些共同的缺点:机械强度低、抗湿、抗蚀及抗氧化能力差,在它们上面单面沉积 100 nm 厚的 DLC 膜后可防止高温氧化并耐极恶劣环境,但在 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 波段平均透过率降低 1.5%,其原因主要是 DLC 膜折射率低于氟化物折射率。他们的 DLC 膜已应用到热像仪、测温仪、热释电探测器、热

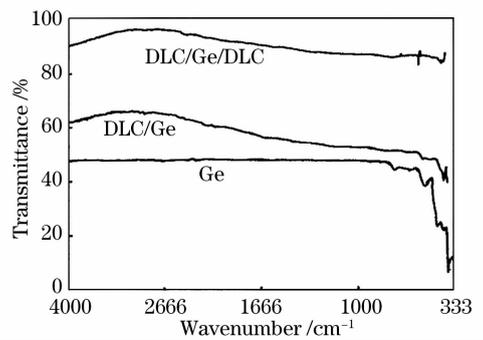


图 2 锗片镀膜前、单面镀梯度 DLC 膜后及双面镀梯度 DLC 膜后的透过谱

Fig. 2 Transmittance of a germanium slice before and after coating one and two surfaces with nonuniform DLC films

释电摄像机等^[22]。

碲镉汞($HgCdTe$)材料是红外探测器的主要材料,但其化学性能不稳定,必须进行表面钝化保护。1998年,上海大学的居建华等^[23]发现 DLC 膜对 $HgCdTe$ 具有明显的增透效果,最高增透率为 26%,且当膜厚达到 25 nm 就能抑制碲镉汞的分解和 Hg 与 Te 的外扩散。2000年,南京理工大学汪贵华等^[24]利用该方法分解甲烷,发现双面镀 DLC 膜的锗片在 $1740\sim 2044\ \text{cm}^{-1}$ 波段峰值透过率高达 99%。2000年,以色列的 Lev Klivanov 等用该方法分解甲烷在 GaAs 上沉积了 DLC 膜^[25],在 $2\sim 12\ \mu\text{m}$ 波段镀膜前透过率不到 60%,单面镀膜后峰值透过率可达 70%,双面镀膜后则高达 95%。2002年,西北大学姚合宝等^[26]在 KCl 上制备了硬度达 30 GPa 的 DLC 膜,透过率在 93%~94%,比镀膜前的 89%~94%有了明显提高,且膜的覆盖能有效防止水气侵蚀。2006年,四川大学何子博用该方法在聚碳酸酯(PC)镜片上沉积了 DLC 膜^[27]。膜中 sp^3 键含量大于 80%。镀膜后镜片表面硬度提高 20%~30%,耐磨性提高 50%左右,透过率基本不变。但是在 PC 基体上沉积 DLC 薄膜的结合力仅为 4 N,与钛合金片基体上的 35 N 的结合力相比,仍有很大的差距。深圳雷地公司和华南理工大学陈灵^[28]在玻璃上沉积 DLC 膜后可见光透过率竟然略有上升。它们可制备成面积极大的 DLC 膜,其抗磨损性能高于蓝宝石玻璃,但是硬度仅为 13 GPa。

波兰的 M. Smietana 等^[29]研究了环境气氛对该方法制备 DLC 膜的影响,他们发现用 CH_4 和 Ar 的混合气体比单纯用 CH_4 气制备出的膜红外波段的光学吸收系数更小,但硬度也更小。他们还在长周期光栅光纤传感器外层制备了 DLC 膜^[30]。镀膜

后传感器的灵敏度提高 15 倍之多,可用于测量溶液的折射率变化从而测量溶液的浓度。

2.4 磁控溅射

磁控溅射(Magnetron sputtering, MS)是在直流溅射基础上开发的一种技术。直流溅射是在阴极上放置靶材,在阳极上放置衬底,在装置内的介质气体在阴阳极间的直流电场作用下产生辉光放电,放电产生的正离子被阴极附近的电压加速,不断轰击阴极靶材,使其表面原子飞溅出来,在阳极衬底上沉积成膜。若是在靶材背面配置磁铁,见图 3(a),形

成与电场正交的闭合磁场,使溅射产生的二次电子沿螺旋轨迹运动来增加与介质气体的碰撞几率,提高气体离子化率,并减弱电子对膜的轰击,靶材表面附近可形成高密度等离子体,从而提高溅射速率和膜质量,此即为磁控溅射^[7]。磁控溅射法的改进型——非平衡磁控溅射法最近已有不少应用,见图 3(b)。该方法是在内侧和外侧改变靶材背面的磁场强度,形成非平衡磁场,使磁力线到达衬底,并使等离子体扩散到衬底附近使飞行到衬底的 Ar^+ 离子有所增加,可改善薄膜特性,提高其附着性^[31]。

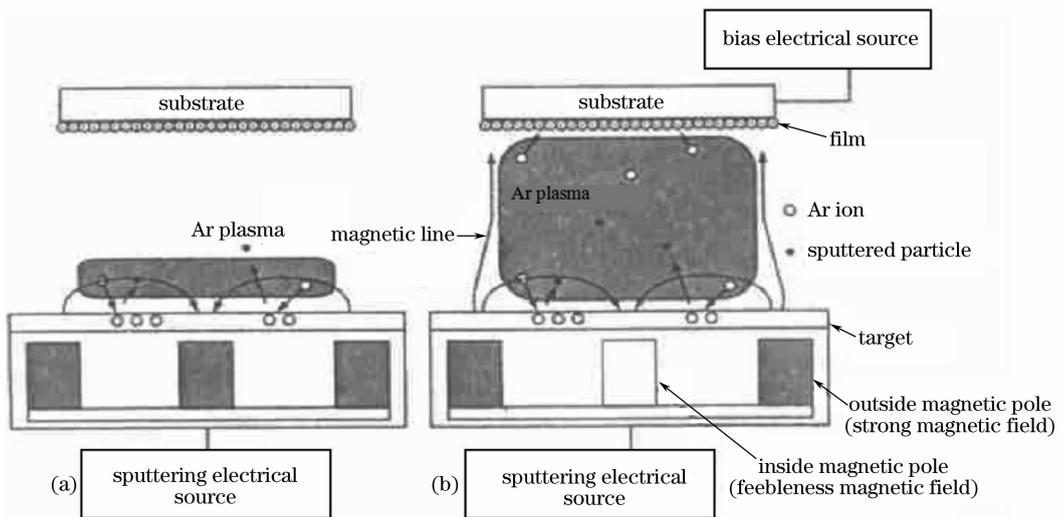


图 3 (a) 磁控溅射法; (b) 非平衡磁控溅射法^[31]

Fig. 3 (a) Magnetron sputtering; (b) unbalanced magnetron sputtering^[31]

1991 年,北京科技大学吕反修等^[32]用磁控溅射法在石英玻璃上和 KCl 上沉积出光学带隙宽度为 2 eV 的 DLC 膜。1999 年,同济大学张月衡等^[33]用磁控溅射法制备出光学带隙宽度达 2.1 eV 的 DLC 膜。2005 年,石油大学杨武保等^[34]用非平衡磁控溅射法在玻璃上沉积了 362 nm 厚的 DLC 膜,镀膜后最高透过率为 89.4%。同年,西安工业学院徐均琪等^[35]用非平衡磁控溅射法在锗上制备了 290 nm 厚的 DLC 膜,在 2000~5500 cm^{-1} 波段最高透过率由 45% 上升到 61%,并进入工程实用化阶段。

2.5 射频溅射

直流溅射绝缘靶材时,由于正离子在阴极靶表面的聚积,使靶的表面带正电位,从而使阳极与靶之间的电位差消失,不能继续维持溅射放电。若采用射频(高频)电源代替直流电源,使离子和电子交替轰击绝缘的靶表面,可消除靶表面的正电位。特别是和直流放电相比,放电空间的电子在高频电场作用下在电极之间振荡,能更有效地发生电子的碰撞电离。

2003 年,兰州化学物理所李红轩等^[36]在硅片上沉积出 sp^3 键含量为 43% 的 DLC 膜。西班牙的 M. Rubio-Roy 等^[37]将射频溅射(RFS)与磁控溅射相结合,获得磨损率极低的 DLC 膜。溅射一般是在氩气中进行,而日本的 T. Mikami 等^[38]则创新地在射频磁控溅射中引入氢气。氢气和氩气的总气压为 4 Pa,氩气流量为 40 cm^3/min 不变,他们发现当氢气含量的百分比由 0% 到 1% 之间变化,含量为 0.7% 时所得到的膜最佳。

2.6 离子束沉积

离子束沉积(Ion beam, IB)是把碳离子输送到衬底表面进行沉积的制膜方法。碳离子束可由含碳气体离子化产生,也可通过惰性气体或反应气体溅射碳靶产生。带质量分离的离子束沉积技术为研究最佳离子能量及成膜机理提供了极为有力的手段,因为它不仅可以按质量数分离离子,排除电子及中性离子等,并且很容易控制离子的能量和剂量,从而克服了一般离子束沉积技术粒子种类复杂,能量有分布的缺点。

2000年,中国科学院半导体研究所的廖梅勇等^[39]用质量分离的离子束沉积技术在600℃下得到了镶嵌着纳米金刚石颗粒的DLC膜,碳离子由Freeman源产生,源气体为CO,能量为100 eV,与CVD中偏压处理碳离子能量相当。日本的Z. Tang等^[40]分别选择不同能量的 C^+ , CH_2^+ , CH_3^+ 或 CH_4^+ 离子沉积DLC膜进行了比较,发现无论哪种离子,都是离子能量为100 eV时得到的膜最好。用 C^+ 离

子沉积的膜拉曼光谱没有D峰,带隙宽度为2.53 eV,而用碳氢离子沉积的膜带隙宽度仅为2.2 eV膜。图4是日本的K. Yamamoto等^[41]试制的低能离子束沉积装置。该装置的特点是可获得大离子电流、排气能力强。他利用该装置以 CO_2 为源气体在硅片上成功制备出硬度约80 GPa的DLC膜^[31]。他他发现,离子能量在75~100 eV之间时膜的 sp^3 键含量最高,达到84%。

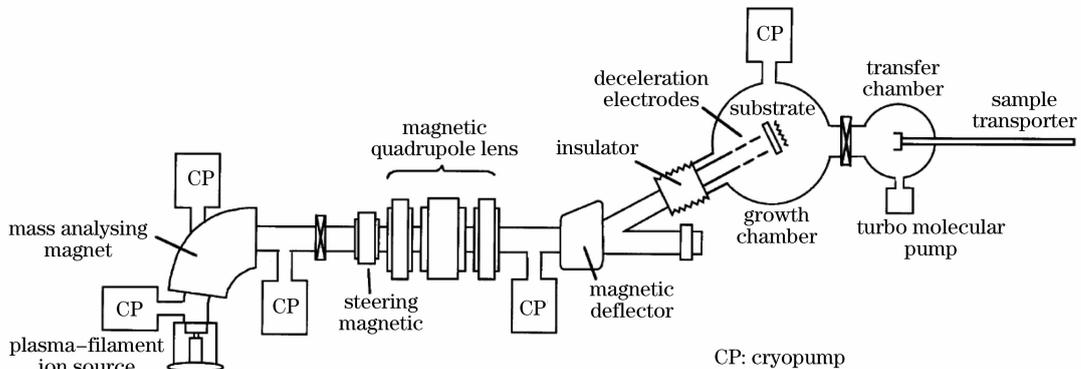


图4 低能离子束沉积装置

Fig. 4 Low energy ion beam deposition equipment

3 结 论

从以上研究成果可见,类金刚石膜对红外和白光材料具有优异的保护功能,对红外材料还普遍具有良好的增透功能,可以大大延长光学窗口的寿命,不仅能抗磨损、抗腐蚀,还能抗潮解、抗氧化等,具有广阔的应用前景和实用价值。与金刚石膜相比,由于类金刚石膜的折射率在一定范围内可调,可以更好地实现与衬底的折射率匹配以达到更高的透过率,更可以在沉积过程中不断改变折射率形成梯度类金刚石膜达到宽带增透效果。对于极恶劣环境和重摩擦场合,金刚石膜和类金刚石膜几乎是唯一的选择。随着研究的深入,困扰DLC膜工业化应用的应力大, sp^3 键含量较低,均匀性差等技术问题已逐步得到解决,成本也日趋下降。国外早已进入工业化应用,国内也已在特殊工程领域半工业化应用。

类金刚石膜未来发展的一个关键问题在于和现有的增透膜结合,组成耐恶劣环境的多层高效宽带增透膜系。另一个关键问题是如何降低反应温度,从而实现在易融材料如玻璃等衬底上镀膜,扩大其应用范围。综上所述,随着类金刚石膜工程化应用技术的进一步成熟,它必将在更多领域发挥越来越大的作用。

参 考 文 献

- 1 Guo Yanlong, Wang Shuyun, Wang Xiaobing *et al.*. Pulsed laser deposition of diamond-like carbon films [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, **45**(3): 32~37
郭延龙, 王淑云, 王小兵等. 脉冲激光沉积类金刚石膜技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2008, **45**(3): 32~37
- 2 Ren Ni, Ma Zhanji, Gao Xin *et al.*. Latest development of hydrogen-free diamond-like carbon film[J]. *Vacuum Science and Technology*, 2003, **23**(3): 176~181
任妮, 马占吉, 高欣等. 无氢类金刚石碳膜的研究进展[J]. *真空科学与技术*, 2003, **23**(3): 176~181
- 3 Han Rongyao. Simulation on the temperature and pressure field of CVD diamond blunt aircraft under flight [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007. 1~10
韩荣耀. CVD金刚石膜钝头体飞行温度与压力的仿真研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007. 1~10
- 4 Sun Yining, Guo Wantu, Li Jingqi *et al.*. New progress of diamond films in aerospace application[J]. *Chinese Space Science and Technology*, 1997, **3**: 27~31
孙亦宁, 郭晚土, 李敬起等. 金刚石膜在宇航应用中的新进展[J]. *中国空间科学技术*, 1997, **3**: 27~31
- 5 Wei Zhongshan, Zuo Dunwen. The production and application of diamond-like carbon films [J]. *Aerial Precise Production Technology*, 2004, **40**(1): 20~23
卫中山, 左敦稳. 类金刚石膜的制备与应用[J]. *航空精密制造技术*, 2004, **40**(1): 20~23
- 6 Peng Hongyan, Zhao Lixin. The Production, Performance and Application of Diamond-Like Carbon Films[M]. Beijing: Science Press, 2004. 2~5
彭鸿雁, 赵立新. 类金刚石膜的制备、性能与应用[M]. 第一版, 北京: 科学出版社, 2004. 2~5

- 7 Guo Yanlong, Wang Xiaobing, Wan Qiang *et al.*. The development of ultra-fast pulse laser deposition of diamond-like carbon films [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2005, **42**(7): 22~25
郭延龙, 王小兵, 万强等. 超快脉冲激光沉积类金刚石膜的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2005, **42**(7): 22~25
- 8 F. Balona, V. Stolojana, S. R. P. Silvae *et al.*. Diamond-like carbon thin films for high-temperature applications prepared by filtered pulsed laser deposition[J]. *Vacuum*, 2005, **80**: 163~167
- 9 G. Messina, A. Paoletti, S. Santangelo *et al.*. Raman characterisation and hardness properties of diamond-like carbon films grown by pulsed laser deposition technique[J]. *Microsyst. Technol.*, 1999, **6**: 30~36
- 10 F. Qian, V. Craciun, R. K. Singh *et al.*. High intensity femtosecond laser deposition of diamond-like carbon thin films [J]. *J. Appl. Phys.*, 1999, **86**(4): 2281~2290
- 11 Kenji Ebihara, Toshiyuki Nakamiya, Tamiko Ohshima *et al.*. Influence of ambient gas on diamond-like carbon films prepared by KrF pulsed laser deposition [J]. *Diamond & Relat. Mater.*, 2001, **10**: 900~904
- 12 Mao Dongsheng. Production of hydrogen-free amorphous diamond films and its electron field emission performance [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Metallurgy, 2000. 45~46
茅东升. 无氢非晶金刚石薄膜的制备及其电子场发射性能研究 [D]. 上海: 上海冶金研究所, 2000. 45~46
- 13 Zhao Jianping, Wang Xi, Chen Zhiying *et al.*. Preparation of amorphous diamond films and study on their properties [J]. *J. Functional Materials and Devices*, 1997, **3**(1): 67~71
赵建平, 王曦, 陈智颖等. 非晶金刚石薄膜的制备及其性能研究 [J]. *功能材料与器件学报*, 1997, **3**(1): 67~71
- 14 Zhu Chang, Yan Yixin, Hang Lingxia. Application of diamond-like carbon films to infrared optical material [J]. *J. Xi'an Institute of Technology*, 1998, **18**(1): 24~26
朱昌, 严一心, 杭凌侠. 类金刚石薄膜在红外光学材料中的应用 [J]. *西安工业学院学报*, 1998, **18**(1): 24~26
- 15 D. Sheeja, B. K. Tay, L. Yu *et al.*. Low stress thick diamond-like carbon films prepared by filtered arc deposition for tribological applications [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2002, **154**: 289~293
- 16 Zhu Jiaqi, Wang Jinghe, Meng Songhe *et al.*. The microstructure and properties of tetrahedral amorphous carbon films deposited by filtered arc with accelerating at different energetic grades [J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(4): 1150~1156
朱嘉琦, 王景贺, 孟松鹤等. 不同能级加速过滤电弧沉积四面体非晶碳膜的结构和性能 [J]. *物理学报*, 2004, **53**(4): 1150~1156
- 17 Hirofumi Takikawa, Nobuhide Miyakawa, Shinji Minamisawa *et al.*. Fabrication of diamond-like carbon film on rubber by T-shape filtered arc-deposition under the influence of various ambient gases [J]. *Thin Solid Films*, 2004, **457**: 143~150
- 18 Zhang Guifeng, Guo L. J., Liu Zhengtang *et al.*. Application of diamond-like carbon film as protection and antireflection coatings of ZnS elements [J]. *Opt. Eng.*, 1994, **33**(4): 1330~1333
- 19 Zhang Guifeng, Liu Zhengtang, Zheng Xiulin. Study of diamond-like carbon films as antireflection and protection coatings of MgF₂ substrates [J]. *Optoelectronic Technology*, 1996, **16**(2): 113~118
张贵峰, 刘正堂, 郑修麟. 类金刚石薄膜作为 MgF₂ 红外增透和保护膜的研究 [J]. *光电子技术*, 1996, **16**(2): 113~118
- 20 Zhang G. F., Guo L. J., Liu Z. T. *et al.*. Studies on diamondlike carbon films for antireflection coatings of infrared optical materials [J]. *J. Appl. Phys.*, 1994, **76**(2): 705~707
- 21 Jiang Jie, Li Zhongqi. Performance of diamond-like carbon films on infrared high efficient antireflection films [J]. *Acta Optica Sinica*, 1990, **10**(11): 1028~1032
姜杰, 李忠奇. 红外高效增透镀膜类金刚石膜的特性研究 [J]. *光学学报*, 1990, **10**(11): 1028~1032
- 22 Jiang Jie. High quality IR material diamond-like carbon film [J]. *Infrared Technology*, 1996, **18**(4): 15~20
姜杰. 高性能的类金刚石红外光学薄膜 [J]. *红外技术*, 1996, **18**(4): 15~20
- 23 Ju Jianhua, Xia Yiben, Wang Linjun *et al.*. Diamond-like carbon films as a passivation coating of Hg_{1-x}Cd_xTe infrared devices [J]. *J. Synthetic Crystals*, 2000, **29**(3): 253~256
居建华, 夏义本, 王林军等. 类金刚石薄膜碲镉汞红外器件钝化膜的研究 [J]. *人工晶体学报*, 2000, **29**(3): 253~256
- 24 Wang Guihua, Yang Weiyi, Chang Benkang. Infrared absorption characterization of diamond-like carbon films [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(5): 638~641
汪贵华, 杨伟毅, 常本康. 高增透的类金刚石碳膜的红外吸收特性研究 [J]. *光学学报*, 2000, **20**(5): 638~641
- 25 Lev Klibanov, Nathan Croitoru, Ady Seidman. Diamond-like carbon thin films as antireflective and protective coatings of GaAs elements and devices [J]. *Opt. Eng.*, 2000, **39**(4): 989~992
- 26 Yao Hebao, He Qingli, Xu Ron *et al.*. Infrared transmission characterization of diamond-like carbon films on KCl lens [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(9): 1132~1134
姚合宝, 贺庆丽, 徐蓉等. KCl 透镜上的类金刚石碳膜红外透射特性研究 [J]. *光子学报*, 2002, **31**(9): 1132~1134
- 27 He Zibo. Wear resistance and adhesion of diamond-like carbon films on the polycarbonate lens [D]. Sichuan: Sichuan University, 2006. 47~54
何子博. PC 树脂镜片沉积 DLC 薄膜耐磨性及附着性的研究 [D]. 四川: 四川大学, 2006. 47~54
- 28 Chen Ling. Compare study of structure and performance of diamond-like carbon films on various substrates [D]. Guangzhou: Huanan Science University, 2002. 37~60
陈灵. 多种基材表面沉积类金刚石膜的结构与性能的比较研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2002. 37~60
- 29 M. Smietana, J. Szmjdt, M. L. Korwin-Pawlowski *et al.*. Influence of RF PACVD process parameters of diamond-like carbon films on optical properties and nano-hardness of the films [J]. *Diamond & Relat. Mater.*, 2008, **17**: 1655~1659
- 30 M. Smietana, J. Szmjdt, M. L. Korwin-Pawlowski *et al.*. Application of diamond-like carbon films in optical fibre sensors based on long-period gratings [J]. *Diamond & Relat. Mater.*, 2007, **16**: 1374~1377
- 31 Tianzhong Zhanghao. The newest production technology and diversified characteristic of diamond-like carbon films and diamond films [J]. *Jewelry Science and Technology*, 2004, **16**(58): 23~28
田中章浩. 类金刚石薄膜和金刚石薄膜的最新制备技术与各种特性 [J]. *珠宝科技*, 2004, **16**(58): 23~28
- 32 Lü Fanxiu, Yang Jinqi, Liu Xiaoying. Optical character of diamond-like carbon films deposited by magnetron sputtering in visible and near IR region [J]. *Science and Technology of Thin Films*, 1991, **4**(4): 19~25
吕反修, 杨金旗, 刘小英. 磁控溅射类金刚石碳膜在可见光及近红外光区域的光学性质 [J]. *薄膜科学与技术*, 1991, **4**(4): 19~25
- 33 Zhang Yueheng, Xu Zheng, Huang Zhiqiang *et al.*. Optical characterization of α -C film via magnetron sputtering [J]. *J. Tongji University*, 1999, **27**(6): 681~684
张月衡, 徐政, 黄志强等. 磁控溅射法制备非晶碳膜及其光学特性 [J]. *同济大学学报*, 1999, **27**(6): 681~684
- 34 Yang Wubao, Fan Songhua, Zhang Guling *et al.*. Investigation of diamond-like carbon films prepared by unbalanced magnetron sputtering [J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, **54**(10): 4944~4948
杨武保, 范松华, 张谷令等. 非平衡磁控溅射法类金刚石薄膜的制备及分析 [J]. *物理学报*, 2005, **54**(10): 4944~4948

- 35 Xu Junqi, Hang Lingxia, Hui Yingxue. Properties of diamond like carbon films prepared by unbalanced magnetron sputtering[J]. *J. Vacuum Science and Technology*, 2005, **25**(2): 134~137
徐均琪, 杭凌侠, 惠迎雪. 非平衡磁控溅射类金刚石薄膜的特性[J]. *真空科学与技术学报*, 2005, **25**(2): 134~137
- 36 Li Hongxuan, Xu Tao, Chen Jianmin *et al.*. Structure and tribological properties of DLC films deposited by DC-RF-PECVD[J]. *Tribology*, 2004, **24**(1): 1~5
李红轩, 徐 洮, 陈建敏等. 直流射频等离子体增强化学气相沉积类金刚石碳薄膜的结构及摩擦学性能研究[J]. *摩擦学学报*, 2004, **24**(1): 1~5
- 37 M. Rubio-Roy, C. Corbella, J. Garcia-Céspedes *et al.*. Diamond like carbon films deposited from graphite target by asymmetric bipolar pulsed-DC magnetron sputtering[J]. *Diamond & Relat. Mater.*, 2007, **16**: 1286~1290
- 38 T. Mikami, H. Nakazawa, M. Kudo *et al.*. Effects of hydrogen on film properties of diamond-like carbon films prepared by reactive radio-frequency magnetron sputtering using hydrogen gas[J]. *Thin Solid Films*, 2005, **488**: 87~92
- 39 Liao Meiyong, Zhang Jianhui, Qin Fuguang *et al.*. Carbon films deposited by mass-selected low energy ion beam technique and ion bombardment effect[J]. *Acta Physica Sinica*, 2000, **49**(11): 2186~2190
廖梅勇, 张键辉, 秦复光等. 质量分离低能离子束沉积碳膜及离子轰击效应[J]. *物理学报*, 2000, **49**(11): 2186~2190
- 40 Z. Tang, Z. J. Zhang, K. Narumi *et al.*. Effect of mass-selected ion species on structure and properties of diamond-like carbon films[J]. *J. Appl. Phys.*, 2001, **89**(3): 1959~1964
- 41 Kazuhiro Yamamoto, Toshiya Watanabe, Koichiro Wazumi *et al.*. The sp^3 bond fraction in carbon films prepared by mass-separated ion beam deposition[J]. *Diamond and Relat. Mater.*, 2001, **10**: 895~899