

红外增透膜研究与展望

董超, 路海, 沈克胜, 熊宗刚, 刘孝宇, 张现周

(河南师范大学 物理与材料科学学院, 光电子技术及先进制造河南省工程实验室, 河南 新乡 453007)

摘要: 主要就国内红外增透膜的研究与进展, 从多个角度综述了红外增透膜的发展、改进与拓展。根据已有研究从材料、仪器与方法等多个方面分析预测了红外增透膜的发展趋势。

关键词: 红外增透膜; 透过率; 保护膜; 红外光学器件

中图分类号: TN214

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2018)03-0209-05

Research and Prospects of Infrared Antireflection Coatings

DONG Chao, LU Hai, SHEN Kesheng, XIONG Zonggang, LIU Xiaoyu, ZHANG Xianzhou

(Engineering Laboratory for Optoelectronic Technology and Advanced Manufacturing, College of Physics and Materials Science, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China)

Abstract: This paper predominantly summarizes the developments, improvements, and prospects of infrared antireflection coatings. The author also suggests that improvements in materials selection, instruments, and new methods should be emphasized in future studies of infrared antireflection coatings.

Key words: infrared antireflection coatings, transmittance, protective films, infrared optical device

0 引言

红外技术最初主要用于军事领域, 后来随着科技的发展, 红外在大气探测、航天、甚至很多民用等领域也逐渐扮演重要角色^[1]。在红外光学系统中, 红外光能量的透过率决定了该系统性能的好坏。减少光学元件表面的反射, 从而增加光学系统在工作波段内的透过率对于生产实践有着重大意义^[2]。因而, 通过在红外光学元件表面镀制增透膜来降低其表面反射损失, 从而提高整个光学系统的性能已成为研究重点。随着现代光学的发展, 红外光学系统的应用日益增多, 越来越多地光学器件要求工作波段在红外区, 这就使得高性能红外增透膜的研制成为光学研究中的重要部分。

1 红外增透膜

目前, 红外增透膜在近红外和中红外波段应用较为广泛。一方面, 近红外光谱分析技术的兴起, 以及活体无探伤检测等优点使得近红外备受关注; 另一方面, 随着红外成像、红外探测、红外遥感以及航天航空等领域的应用与发展, 中红外的研究也有着重大意

义。

1.1 近红外 (0.78~2.5 μm) 波段增透膜

可见和近红外光谱分析具有信息量大、测试种类多、无损测试等优点, 因此镀制可见与近红外的增透膜在分析测试领域有着重要意义, 贺才美等^[3]以多光谱 ZnS (硫化锌) 为基底, 以 ZnS 和 YbF₃ (氟化镱) 为高低折射率材料所镀制的增透膜在 400~1000 nm 的平均透射率大于 91%, 实现了可见与近红外的增透效果; 杨道奇等^[4]分别以 TiO₂ (二氧化钛)、M1 (主要成分是 Pr:Al₂O₃) 和 SiO₂ (二氧化硅) 为高、中、低折射率材料镀制增透膜, 并在 620~1550 nm 的平均透射率达到 97%; 李帅等^[5]用 TiO₂ 和 SiO₂ 作为高低折射率材料, 在 K9 玻璃上镀制的增透膜在 0.55~0.78 μm 和 1.0~1.3 μm 波段的平均透过率达到了 97.04%。

为提高近红外光学系统性能, 孙亚军等^[6]分别以 TiO₂ 和 SiO₂ 为高低折射率材料, 以氟化钙 (CaF₂) 为基底, 所镀制的红外增透膜在 0.9~1.7 μm 的平均透过率达到了 99.42%, 最大透过率更是高达 99.98%。

1.2 红外 (2.5~25 μm) 波段增透膜

目前, 研究最多、应用最广的应属中红外波段增

收稿日期: 2017-05-27; 修订日期: 2017-10-26。

作者简介: 董超 (1989-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光学薄膜的设计与研究。

通信作者: 路海, 男, 副教授, 主要研究方向为光电微结构的研究。E-mail: luhai123@gmail.com。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (11404102), 河南省重点科技攻关计划项目 (152102210079), 河南省教育厅科学技术研究重点项目 (14A140002)。

透膜。早在 20 世纪 80 年代李梦珂等^[7]根据当时卫星使用的红外地平仪的需要在锗 (Ge) 基底上镀制氟化钡 (BaF_2) /硒化锌 (ZnSe) 双层膜，并在 $14\sim16 \mu\text{m}$ 波段取得良好的增透效果。随后又有学者通过在单晶锗上分别镀制单层 ZnS、碲化镉 (CdTe) 和 ZnSe 实现了 $10.4\sim12.5 \mu\text{m}$ 波段的红外增透效果，并对这 3 种单层红外增透膜进行了比较研究^[8]。在中红外波段增透膜中，高透过率、宽光谱覆盖范围一直是研究的重点，其中宽带红外增透膜和双波段红外增透膜的应用更是研究的热点。

1.2.1 宽带红外增透膜

早在 20 世纪 80 年代，许步云^[9]就对 $8\sim14 \mu\text{m}$ 和 $2\sim14 \mu\text{m}$ 两个波长范围的宽带增透膜进行了研究。关于宽带增透膜镀制基底材料的选择是十分关键的，例如周团团等采用离子束辅助沉积技术，在钼酸铅晶体表面镀制了宽红外增透膜^[10]，该研究在光纤通信领域的发展中有着重要意义。除此之外，目前在中红外增透膜的研究中，以 Ge、Si 等高折射率材料作为基底的研究很多，比如 1998 年，黄伟等分别使用高、低折射率材料 ZnSe 和 BaF_2 在 Ge 基片上镀制的红外宽带增透膜在 $8\sim12 \mu\text{m}$ 波段的平均透过率达到 97%^[11]；之后，李大琪等将宽带增透膜的研究带宽增加到了 $6.4\sim15 \mu\text{m}$ ，这一成果在航天航空遥感信息领域具有重要意义^[12]；闫兰琴等在 Ge 基底上镀制的以 Ge、ZnS 和 YbF_3 为高、中、低折射率材料的红外增透膜平均透过率大于 98%，最大透过率更是高达 99.2%（但是其透过带宽 $7.5\sim11.5 \mu\text{m}$ 相对有所减小）^[13]。

事实上，宽带红外增透膜的研究不仅仅局限于高折射率材料作为基底，以 ZnS、ZnSe 等低折射率材料为基底的宽带增透膜也有不少报道。闫兰琴等采用低折射率材料 CVD 硒化锌作为基底，由 ZnSe、ZnS、 YbF_3 分别作为高、中、低折射率材料镀制的红外增透膜在 $7\sim14 \mu\text{m}$ 波段平均透过率也达到了 97%，具有明显的宽带增透效果^[14]；后来潘永强等同样以 ZnSe 为基底，并以 ZnSe 和 YF_3 为高低折射率材料设计并镀制了 $2\sim16 \mu\text{m}$ 的超宽带红外增透膜，但测试结果相对较低，其平均透过率仅有 93%^[15]。

1.2.2 双波段红外增透膜

除了宽带红外增透膜，关于双波段的研究也有很多。其中， $3\sim5 \mu\text{m}$ 和 $8\sim12 \mu\text{m}$ 是学者比较关注和应用范围较广的波段。通过在红外窗口或透镜上镀制 $3\sim5 \mu\text{m}$ 和 $8\sim12 \mu\text{m}$ 双波段兼容的红外增透膜，提高红外信号的透过率和红外光学系统的性能，在中红外波段的研究领域中具有重要意义。潘永强等对 Ge 基底 $3\sim5 \mu\text{m}$ 和 $8\sim12 \mu\text{m}$ 双波段红外增透进行了研究，

镀制红外增透膜后，该双波段范围内平均透过率达到 94%^[16]；付秀华等将 $3\sim5 \mu\text{m}$ 和 $8\sim12 \mu\text{m}$ 双波段红外增透膜镀制在 ZnS 导流罩上，即使在曲面基底上，此波段范围内的平均透过率依然在 90% 以上^[17]；张杏梅^[18]对 $3\sim5 \mu\text{m}$ 和 $8\sim12 \mu\text{m}$ 双波段红外光纤端面进行了研制，通过在光纤断面镀制红外增透膜，不仅在减少了反射损失，还起到了保护膜层的作用。除了 $3\sim5 \mu\text{m}$ 和 $8\sim12 \mu\text{m}$ 双波段红外增透膜，还有许多其它波段范围的双波段红外增透膜，比如王彤彤^[19]所研制的 ZnS 窗口针对于高速飞行器的 $0.8\sim1.7 \mu\text{m}$ 和 $3.7\sim4.8 \mu\text{m}$ 的双波段红外增透膜就满足了高速飞行器的窗口需求。

1.3 红外增透膜的拓展研究

红外增透膜的研究绝不仅仅是局限于波段范围的透过率的研究，随着应用范围的不断扩大，人们对红外增透膜的研究内容也不断增加。比如，将导电网膜应用在红外成像系统的窗口上，使其在红外窗口上也具有防霜、防雾以及衰减电磁波的功能。因此，为提高红外系统成像质量，同时使其具备电磁波衰减性能，车英等^[20]对这两项技术进行了综合研究（即在一定周期、一定线宽的网膜上加镀红外增透膜）。又比如鄢秋荣等^[21]设计的 ZnSe 基底 $3\sim12 \mu\text{m}$ 渐变折射率红外增透膜，在设计波段平均透射率达到 95%，且沿着膜层表面的法线方向折射率连续变化，而在垂直于法线的水平方向上折射率保持不变。甚至由于实际应用的需要，人们已经不仅仅满足于单纯某一波段的红外增透，更是希望在改变入射角时依然能具有较好的增透效果。然而入射角度的变化势必会产生偏振影响。据此，Baumeister 和 Costich 在早期就考虑过消偏振理论^[22-23]。但在实际光学薄膜实验中消偏振问题一直是一大难题，对于红外增透薄膜更是如此。国内红外消偏振红外增透膜的研究也一直在继续，比如高晓丹^[24]在 Al_2O_3 基底上设计出的 $3\sim5 \mu\text{m}$ 波段红外增透膜，在入射角 $0^\circ\sim60^\circ$ 范围内变化时依然具有较好透射光谱特性，大大改善了因入射角变化而导致的偏振分离。总而言之，随着红外技术的快速发展和广泛应用，人们对红外增透膜的需求及要求亦越来越高，从而迫使对红外增透膜的研究内容也越来越丰富。

2 红外增透保护膜

随着红外技术在各个领域的应用日益增多，尤其是军用方面红外技术的应用和发展，人们对红外窗口材料的光学和物理化学性能提出了更高的要求（其中包括透过率和各种耐环境性能）。常见的红外窗口材料机械性能普遍较差，难以承受光学器件使用环境中

高速飞行的粒子以及水滴的冲击，将会出现膜层的潮解吸湿甚至脱落，寻找既能起增透作用又能达到很好保护作用的红外增透膜显得十分必要，红外增透膜保护膜的研究很好地解决了这一问题。

2.1 常见保护膜

对于大多数红外光学材料来说，其耐摩擦、耐腐蚀等性能都普遍较差，所以在实际应用中为了对其进行保护，在其表面镀制特定的红外保护膜是一种简单而又有效的手段。常用的红外保护膜有金刚石薄膜、类金刚石（DLC）薄膜、碳化锗（ $\text{Ce}_x\text{C}_{1-x}$ ）薄膜和磷化物薄膜等^[25]。

金刚石保护膜：金刚石是自然界已知硬度最高的物质，其综合了也是唯一同时具备透光性、耐热冲击性性能的材料；而且金刚石对水和固体颗粒冲击以及化学腐蚀均具有高度耐久性^[26]。除此之外，金刚石在紫外、可见、红外波段均具有良好透过性，具有化学性质稳定、热导率高、热膨胀系数小、热冲击性好、耐摩擦性能好、化学性能稳定、抗酸碱腐蚀等优点，因而成为优异的窗口和头罩材料^[27-29]。但天然金刚石过于昂贵，不利于广泛使用，CVD（Chemical Vapor Deposition，化学气相沉积）金刚石是我们常用的一种人造金刚石，完全可以替代天然金刚石作为红外元件的基底，同时也可用作红外光学元件的保护膜和增透膜^[30-31]。

类金刚石薄膜（diamond-like carbon, DLC）：随着对金刚石材料的深入研究和广泛应用，其工业需求亦越来越广泛。但工业化制备金刚石的工艺条件比较难以实现，因此科学工作者期望找到其它可以替代金刚石的功能材料。1971年 Aisenberg 等首次采用离子束沉积方法制备了一种坚硬的碳膜^[32]，其化学组成、硬度、光学透过率、折射率、抗腐蚀性以及抗摩擦性均与金刚石材料类似。因此，将这种材料称之为类金刚石薄膜^[33]。类金刚石薄膜具有优异的物理化学性能，具备耐腐蚀、耐盐雾、耐潮湿等性能，在对红外光学元件的保护作用方面起着举足轻重的作用。与金刚石相比，DLC 具有制备方法简单、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 Si、Ge 等材料红外增透等优点，从而成为红外光学增透和保护膜的首选材料之一。张万虎等^[34]在 8~12 μm 范围内，在 φ200 mm 的 Ge 基片上镀制的光学器件，其峰值透过率为 63.8%，平均透过率达 62%。廖显伯等^[35]在石英晶体上制备厚度为 230 nm 的 DLC 膜，结果显示在波长大于 480 nm 的可见光区和近红外区的透过率大于 83%。

碳化锗薄膜：与 DLC 膜相比，碳化锗具备薄膜内

应力小、吸收系数低等优点，而且其折射率也可根据成分的不同在 1.7~4.0 之间变化，从而使得多层膜系的设计更加容易实现。比如宋建全等^[36]利用 $\text{Ge}_x\text{C}_{1-x}$ 均匀膜系实现了特定波段内的高效增透保护，利用 $\text{Ge}_x\text{C}_{1-x}$ 非均匀膜系实现了宽波段增透保护。

磷化物薄膜：磷化物涂层抗蚀性能强，目前常用的磷化物涂层有磷化硼（BP）和磷化镓（GaP）。其中，BP 的硬度远高于 GaP，但其增透效果有限；GaP 吸收系数虽更低，但其保护性能比 BP 稍差。因而，在实际应用中，常把 BP 和 GaP 作为复合膜系一起使用，最终得到兼具 GaP 膜系的增透效果和 BP 膜系的保护效果^[37]。

2.2 其它保护膜

除上述常用红外增透保护膜外，根据实际需要，还有许多其它材料也是重要的红外增透保护膜。比如刘伟等^[38]在 ZnS 衬底上镀制氮氧化铪保护膜后薄膜硬度大大增强同时研究波段透过率并没有显著降低；氮化铝（AlN）可用作高温环境下的红外增透保护膜，闫锋等^[39]在 CVD 金刚石上镀制 AlN/Ge 膜系，高温下该保护膜对金刚石依然有很好的保护作用且并未显著影响其增透效果；另外，为提高金刚石膜的红外透过率和高温抗氧化性能，郭会斌等^[40]在光学级金刚石自制成膜表面制备了氧化钇（ Y_2O_3 ）薄膜，在高达 950℃ 的温度下暴露 30 s 后该薄膜表面并未造成明显损伤，且仍能保持良好增透效果。

3 未来发展与展望

随着光学器件的飞速发展，人们对红外增透膜的需求将会越来越大，要求也会越来越高，对红外增透膜的不断研究与改进亟待进一步开展。

从薄膜材料着手，一方面是新材料的开发与应用；另一方面是对现有材料的充分利用，比如美国 NSF 先进材料与智能结构中心的 Wei 等^[41]在 KrF 脉冲激光沉积 DLC 膜时掺入原子百分比低于 5% 的硅，发现膜内应力降低，而且耐磨性显著提高。

先进的仪器设备是制备高性能红外增透薄膜的前提与基础，电子束蒸发相比与电阻蒸发拥有更高的能量；离子束辅助沉积技术（简称 IBAD）的出现，使得所制备的薄膜更加致密、均匀，且薄膜的附着力大大提高^[42]；离子束溅射设备的应用，使得薄膜的致密性再次提高，而且可以制备出更加精密的薄膜^[43]。总之，不断更新更加先进精密的仪器设备也是提高薄膜质量的重要手段。

研究方法的创新更是重中之重，红外增透设计不应仅仅局限于光学薄膜的制备，郑华等^[44]设计的类光

子晶体纳米柱阵列减反结构相对于减反膜在工作波段拥有更好的减反效果。赵耐丽^[45]也通过设计纳米凸起结构、纳米孔洞结构及纳米光栅结构3类5种仿生增透纳米光栅结构，实现了近红外及中红外波段的增透效果。

参考文献

- [1] 石澎, 付秀华, 孙岩, 等. 双波段激光防护红外减反膜的研制[J]. 中国激光, 2011, 38(4): 182-186.
SHI Peng, FU Xiuhua, SUN Yan, et al. Design and fabrication of double wavelength laser protective infrared antireflection coatings[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(4): 182-186.
- [2] 唐晋发, 顾培夫, 刘旭, 等. 现代光学薄膜技术[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2006.
TANG Jingfa, GU Peifu, LIU Xu, et al. *Modern Optical Thin Film Technology*[M]. Hangzhou: Zhejiang University press, 2006.
- [3] 贺才美, 付秀华, 张家斌, 等. 可见与红外双波段宽带增透膜的研制[J]. 光学学报, 2009, 29(10): 2929-2933.
HE Caimei, FU Xiuhua, ZHANG Jiabin, et al. Study and fabrication of visible and IR dual-band broadband antireflection coating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(10): 2929-2933.
- [4] 杨道奇, 付秀华, 耿似玉, 等. 0.6~1.55μm 可见/近红外超宽带增透膜的研制[J]. 中国光学, 2012, 5(3): 270-276.
YANG Daoqi, FU Xiuhua, GENG Siyu, et al. Design and fabrication of 0.6-1.55 μm visible/near infrared ultra-broad band antireflection coatings[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(3): 270-276.
- [5] 李帅, 孙亚军, 刘桂林, 等. 可见近红外双波段增透膜的设计及制备[J]. 人工晶体学报, 2014, 43(7): 1769-1773.
LI Shuai, SUN Yajun, LIU Guolin, et al. Design and fabrication of visible and infrared dual-band AR Coating[J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2014, 43(7): 1769-1773.
- [6] 孙亚军, 朱益清, 李帅, 等. CaF₂ 基底上近红外区宽带增透膜的研究[J]. 激光与红外, 2016, 46(1): 76-80.
SUN Yajun, ZHU Yiqing, LI Shuai, et al. Study on near infrared broadband anti-reflection film on CaF₂ substrate[J]. *Laser & Infrared*, 2016, 46(1): 76-80.
- [7] 李梦珂, 王成伟. 几种 15 μm 区域红外增透膜的特性比较[J]. 西北师范大学学报: 自然科学版, 1995, 31(4): 41-43.
LI Mengke, WANG Chengwei. Comparison of transmissive property of some IR anti-reflection coatings in 15μm area[J]. *Journal of Northwest Normal University: Natural Science*, 1995, 31(4): 41-43.
- [8] 李少梅, 罗宗泰, 熊玉卿, 等. 10.4~12.5 μm 单层红外增透膜的研究[J]. 真空与低温, 1997, 3(4): 213-219.
LI Shaomei, LUO Zongtai, XIONG Yuqing, et al. Study of IR antireflection single layer coating in 10.4-12.5 μm[J]. *Vacuum & Cryogenics*, 1997, 3(4): 213-219.
- [9] 许步云. 红外宽带增透膜系的设计与分析[J]. 红外研究, 1982, 1(1): 71-76.
XU Buyun. Design and analysis of infrared broad-band antireflection coatings[J]. *Chinese Journal of Infrared Research*, 1982, 1(1): 71-76.
- [10] 周团团, 胡焕林, 孙嵩泉. 离子束辅助沉积钼酸铅晶体表面红外增透膜[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2003, 26(2): 242-245.
ZHOU Tuantuan, HU Huanlin, SUN Songquan. Preparation of infrared antireflection coating on PbMoO₄ substrate by using ion-assisted deposition technology[J]. *Journal of Hefei University of Technology*, 2003, 26(2): 242-245.
- [11] 黄伟, 张云洞. 离子束辅助沉积低温微光学元件红外宽带增透膜[J]. 光学技术, 1998, 4(3): 94-96.
HUANG Wei, ZHANG Yundong. Ion beam assisted deposition of infrared wideband antireflection coating on micro-optical components used in low temperature[J]. *Optical Technology*, 1998, 4(3): 94-96.
- [12] 李大琪, 刘定权, 张凤山. 6.4~15 μm 宽带增透膜的设计与制作[J]. 红外与毫米波学报, 2006, 25(2): 135-137.
LI Daqi, LIU Dingquan, ZHANG Fengshan. Design and fabrication of 6.4-15μm broadband antireflection coatings[J]. *J. Infrared Millim Waves*, 2006, 25(2): 135-137.
- [13] 闫兰琴, 张树玉, 刘伟, 等. Ge 基底 7.5~11.5 μm 波段高性能红外增透膜的研制[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(5): 871-874.
YAN Lanqin, ZHANG Shuyu, LIU Wei, et al. High performance infrared wide-band (7.5-11.5 μm) anti-reflective film on germanium substrate[J]. *Infrared and laser Engineering*, 2010, 39(5): 871-874.
- [14] 闫兰琴, 张树玉, 黎建明, 等. ZnSe 基底 7~14 μm 波段宽带增透膜[J]. 激光与红外, 2009, 39(2): 210-212.
YAN Lanqin, ZHANG Shuyu, LI Jianming, et al. Study on high performance infrared wideband (7-14 μm) anti-reflective film on ZnSe substrate[J]. *Laser & Infrared*, 2009, 39(2): 210-212.
- [15] 潘永强, 杭凌侠, 梁海峰, 等. 硒化锌基底 2~16 μm 超宽带硬质红外增透膜的研制[J]. 光学学报, 2010, 30(4): 1201-1204.
PAN Yongqiang, HANG Linxia, LIANG Haifeng, et al. Ultrabroad band and hard infrared antireflection coatings on ZnSe for 2-16 μm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(4): 1201-1204.
- [16] 潘永强, 朱昌, 杭凌侠, 等. 锗基底 3~5 μm 和 8~12 μm 双波段红外增透膜研究[J]. 激光与红外, 2004, 34(5): 372-374.
PAN Yongqiang, ZHU Chang, HANG Linxia, et al. Double waveband (3-5 μm and 8-12 μm) high performance infrared anti-reflection coatings on germanium substrate[J]. *Laser & Infrared*, 2004, 34(5): 372-374.
- [17] 付秀华, 姜会林, 付新华, 等. 多波段红外增透与保护膜技术的研究[J]. 兵工学报, 2007, 28(10): 1183-1185.
FU Xiuhan, JIANG Hulin, FU Xinhua, et al. Study on multi-waveband infrared antireflection and protection film[J]. *Acta Armamentarii*, 2007, 28(10): 1183-1185.
- [18] 张杏梅. 双波段红外光纤增透膜的研究[J]. 激光与红外, 2000, 30(2): 121-122.
ZHANG Xingmei. Research on the double waveband infrared antireflection coating for optical fiber[J]. *Laser & Infrared*, 2000, 30(2): 121-122.
- [19] 王彤彤. 基于氧化物的 0.8~1.7 μm 和 3.7~4.8 μm 硬质宽带红外增透膜研制[J]. 中国光学, 2014, 7(5): 816-822.
WANG Tongtong. Fabrication of hard infrared anti-reflection coating with broadband in the wavelength of 0.8-1.7 μm and 3.7-4.8 μm based on oxide material[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(5): 816-822.
- [20] 车英, 董连和, 王也. 红外增透膜与红外低通滤波器[J]. 兵工学报, 2003, 24(1): 62-64.
CHE Ying, DONG Lianhe, WANG Ye. Transparent infrared coatings and far infrared low-pass filter[J]. *Acta Armamentarii*, 2003, 24(1): 62-64.
- [21] 鄢秋荣, 黄伟, 张云洞. 硒化锌基底 3~12 μm 渐变折射率红外增透膜的设计[J]. 激光与红外, 2008, 38(2): 177-180.

- YAN Qiurong, HUANG Wei, ZHANG Yundong. The gradient index thin film design of infrared films on ZnSe substrate for 3-12 μm [J]. *Laser & Infrared*, 2008, **38**(2): 177-180.
- [22] Baumeister P. The transmission and degree of polarization of quarter-wave stacks at non-normal incidence[J]. *Optical Acta*, 1961, **8**(2): 105-119.
- [23] Costich V R. Reduction of polarization effects in interference coatings[J]. *Applied Optics*, 1970, **9**(4): 866-870.
- [24] 高晓丹. 变角度3~5 μm 红外消偏振增透膜的设计[J]. 激光与光电子学进展, 2013, **50**(3): 187-190.
- GAO Xiaodan. Design of infrared non-polarizing anti-reflective film of 3-5 μm at variable incidence angle[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, **50**(3): 187-190.
- [25] Hasan W. Durability testing of hard carbon coatings for Ge and ZnS substrates[J]. *Proceedings of SPIE-The international society for optical engineering*, 1994, **2286**: 354-363.
- [26] 郭延龙, 王淑云, 袁孝, 等. 金刚石膜及类金刚石膜的光学应用研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2008, **45**(7): 44-51.
- GUO Yanlong, WANG Shuyun, YUAN Xiao, et al. Research progress of optical application of diamond carbon film and diamond-like carbon films[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, **45**(7): 44-51.
- [27] 李敬起, 郭晚土, 孙亦宁. 金刚石红外增透保护膜[J]. 真空与低温, 1996, **9**(3): 131-133.
- LI Jingqi, GUO Wantu, SUN Yining. Diamond infrared reflection reducing protective films[J]. *Vacuum & Cryogenics*, 1996, **9**(3): 131-133.
- [28] Kutsay O M, Gontar A G, Novikov N V, et al. Diamond-like carbon films in multilayered interference coatings for IR optical elements[J]. *Diamond and Related Materials*, 2001, **10**: 1846-1849.
- [29] Mcgeoch S P, Placido F, Gou Z, et al. Coatings for the protection of diamond in high-temperature environments[J]. *Diamond and Related Materials*, 1999(8): 916-919.
- [30] 李云, 徐建刚. 镀制工艺对金刚石薄膜透射率的影响[J]. 科学技术与工程, 2012, **12**(33): 8984-8986.
- LI Yun, XU Jiangang. The influence of technologic conditions to transmittance of diamond film[J]. *Science Technology and Engineering*, 2012, **12**(33): 8984-8986.
- [31] 王鸿翔, 左敦稳, 卢文壮, 等. 硅衬底上高增透金刚石膜的制备研究[J]. 功能材料, 2009, **40**(12): 2008-2010.
- WANG Hongxiang, ZUO Dunwen, LU Wenzhuang, et al. Preparation of anti-reflective diamond film on Si substrate[J]. *Functional Materials*, 2009, **40**(12): 2008-2010.
- [32] Aisenberg S, Chabor S. Thin film of diamond like carbon[J]. *Applied Physics*, 1971, **42**(7): 2953.
- [33] 杨玉卫, 杨坚, 古宏伟, 等. 类金刚石膜的性能、制备及其应用[J]. 硅酸盐通报, 2008, **27**(1): 119-126.
- YANG Yuwei, YANG Jian, GU Hongwei, et al. Properties processing and application of diamond-like carbon film[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2008, **27**(1): 119-126.
- [34] 张万虎, 谭宇, 师建涛, 等. 射频等离子体法制备类金刚石薄膜[J]. 应用光学, 2003, **24**(6): 32-34.
- ZHANG Wanhu, TAN Yu, SHI Jiantao, et al. Preparation of diamond-like carbon films with RF Plasma method[J]. *Journal of Applied Optics*, 2003, **24**(6): 32-34.
- [35] 廖显伯, 邓勋明. 用 PECVD 在低温衬底上制备类金刚石碳膜[J]. 人工晶体学报, 2000, **29**(3): 220-223.
- LIAO Xianbo, DENG Xunming. PECVD amorphous diamond-like carbon films deposited at low substrate temperature[J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2000, **29**(3): 220-223.
- [36] 宋建全, 刘正堂, 于忠奇, 等. $\text{Ge}_x\text{C}_{1-x}$ 薄膜在红外增透保护膜系设计和制备中的应用 [J]. 红外与毫米波学报, 2000, **19**(4): 266-268.
- SONG Jianquan, LIU Zhengtang, YU Zhongqi, et al. Application of $\text{Ge}_x\text{C}_{1-x}$ films to design and deposition of infrared antireflection and protection films[J]. *J. Infrared Millim Waves*, 2000, **19**(4): 266-268.
- [37] 王毕艺, 李建峰, 刘鑫, 等. 红外光学薄膜技术[J]. 光电技术应用, 2011, **26**(1): 40-43.
- WANG Biyi, LI Jianfeng, LIU Xin, et al. Infrared optical thin film technology[J]. *Electro-optic Technology Application*, 2011, **26**(1): 40-43.
- [38] 刘伟, 张树玉, 闫蓝琴, 等. ZnS 上HfON保护膜及增透膜系的制备和性能研究[J]. 激光与红外, 2009, **39**(5): 531-533.
- LIU Wei, ZHANG Shuyu, YAN Lanqin, et al. Preparation and properties of hafnium oxynitride protective films and anti-reflection films on ZnS substrates[J]. *Laser & Infrared*, 2009, **39**(5): 531-533.
- [39] 闫锋, 刘正堂, 巨志高. CVD 金刚石衬底上抗氧化、增透膜的制备与性能[J]. 硅酸盐学报, 2010, **38**(10): 1891-1895.
- YAN Feng, LIU Zhengtang, JU Zhigao. Preparation and properties of antioxidative and antireflective films on CVD diamond[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2010, **38**(10): 1891-1895.
- [40] 郭会斌, 吕反修, 李成明, 等. 光学级金刚石自支撑膜及其镀制 Y_2O_3 增透膜后的高温抗氧化性[J]. 材料热处理学报, 2009, **30**(3): 1-5.
- GUO Huibin, LV Fanxiu, LI Chengming, et al. Oxidation properties of optical grade CVD free-standing diamond film and $\text{Y}_2\text{O}_3/\text{diamond}/\text{Y}_2\text{O}_3$ films[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2009, **30**(3): 1-5.
- [41] WEI Q, Sankar J, Narayan J, et al. Structure and properties of novel functional diamond-like carbon coating produced by laser ablation[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2001, **146-147**: 250-257.
- [42] 傅晶晶, 付秀华, 邢政. 离子束辅助沉积红外增透薄膜工艺[J]. 长春理工大学学报:自然科学版, 2008, **31**(2): 43-45.
- FU Jingjing, FU Xiuhua, XING Zheng. IAD process for infrared antireflection coating application[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology: Natural Science Edition*, 2008, **31**(2): 43-45.
- [43] 李定, 熊胜明. 离子束溅射氧化物薄膜的中红外特性[J]. 中国激光, 2015, **42**(1): 219-223.
- LI Ding, XIONG Shengming. Mid-infrared properties of oxide coatings prepared by ion beam sputtering deposition[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, **42**(1): 219-223.
- [44] 郑华, 樊华, 王子仪, 等. 硒镉汞红外探测器增透结构设计[J]. 实验室研究与探索, 2017, **36**(1): 46-48.
- ZHENG Hua, FAN Hua, WANG Ziyi, et al. Design of antireflective structure on HgCdTe substrate at very long wavelength infrared[J]. *Research and Exploration in Laboratory*, 2017, **36**(1): 46-48.
- [45] 赵耐丽. 纳米结构对蓝宝石红外增透性能的影响研究[J]. 表面技术, 2016, **45**(9): 194-200.
- ZHAO Naili. Influence of Nanostructure on the antireflective performance of sapphire[J]. *Surface Technology*, 2016, **45**(9): 194-200.