

金刚石膜表面微结构红外增透性能研究

张朝阳¹, 魏俊俊¹, 邢忠福^{1,2}, 彭志勇², 刘金龙¹, 陈良贤¹, 李成明¹

(1. 北京科技大学 新材料技术研究院, 北京 100083;
2. 天津津航技术物理研究所, 天津 300308)

摘要: CVD 金刚石是一种性能优异的红外光学窗口材料, 但其在红外波段的理论透过率仅能实现约 71%。通过表面亚波长结构设计可进一步增强 CVD 金刚石膜的光学透过性能。该研究首先通过理论模拟, 建立了金刚石微结构特征与光学增透之间的定量关系。基于此为指导, 探讨了在具有微结构硅片表面, 采用 MPCVD 方法复制生长出具有微结构的金刚石自支撑光学级薄膜, 用于提升金刚石膜在红外波段的透过率。采用扫描电镜 (SEM) 观察了原始硅片和金刚石表面及微结构形貌, 通过拉曼散射光谱评估了金刚石的生长质量及形核层影响, 采用红外光谱仪测试了金刚石红外透过率。结果显示, 单面构筑微结构后, 金刚石膜在 8~12 μm 波段的透过率可从 70% 提升至 76%, 说明表面微结构能显著提升金刚石膜的光学透过性能。非金刚石形核层以及表面微结构的完整性不足可能是导致实验结果与理论模拟结果具有一定偏差的主要原因。

关键词: 金刚石膜; 亚波长结构; 红外增透; 仿真模拟

中图分类号: TN213 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20200199

Study on infrared anti-reflection performance of diamond film with surface microstructure

Zhang Zhaoyang¹, Wei Junjun¹, Xing Zhongfu^{1,2}, Peng Zhiyong², Liu Jinlong¹, Chen Liangxian¹, Li Chengming¹

(1. Institute for Advanced Materials and Technology, University of Science and Technology, Beijing 100083, China;
2. Tianjin Jinhang Institute of Technical Physics, Tianjin 300308, China)

Abstract: CVD diamond is an excellent material for infrared optical window, but its theoretical transmittance in the infrared band can only achieve about 71%. The optical transmission performance of the CVD diamond film can be improved by the surface sub-wavelength structure design. In this study, the quantitative relationship between diamond microstructure characteristics and optical antireflection was established through theoretical simulation. According to the theory guidance, the CVD diamond film with surface microstructure was fabricated by replicating the Si substrate through MPCVD method to improve the transmittance of diamond in the infrared band. Scanning electron microscope (SEM) was used to observe the surface and microstructure of the original silicon wafer and diamond. The growth layer quality and the nucleation layer quality of diamond were both evaluated by Raman scattering spectrum. Infrared spectrometer was used to test the infrared transmittance of diamond film. The results show that after constructing the microstructure on one side, the transmittance of the diamond film in the 8-12 μm band can be increased from 70% to 76%, which means the surface microstructure can significantly improve the optical transmission performance of diamond film. The non-diamond nucleation layer and the insufficient integrity of surface microstructure may be the main reason for the gap between the

收稿日期: 2020-05-28; 修订日期: 2020-06-30

基金项目: 中央高校基本科研业务费 (2302019FRF-GF-19-030BZ)

experimental results and the theoretical simulation results.

Key words: diamond film; sub-wavelength structure; infrared antireflection; simulation

0 引言

金刚石的光学性能十分优异,从紫外($\sim 0.22\ \mu\text{m}$)直至远红外(毫米波段)都具有很好的透过性能。高质量光学级 CVD 金刚石膜在众多领域具有极佳的应用前景,如高速飞行器红外窗口、高功率激光窗口等^[1]。然而金刚石的高折射率($n=2.4$)同时引起高达 29% 的反射损耗,导致光学级金刚石的理论透过极限不高,实际应用中往往需要进一步增透来满足光学器件的应用要求。一种增加金刚石透过率的传统方法是在表面涂覆一层抗反射薄膜^[2]。但是,该技术有其局限性:除非采用复杂的多层涂层,否则能够实现增透的光谱范围有限;增透膜与金刚石的物性之间存在较大差异,涂层附着性能不佳,且涂层自身在恶劣环境中易出现热失效或机械破坏。另一种方法,是在金刚石表面构建阵列结构,消除(或最小化)材料-空气界面反射,实现抗反增透的效果,这样完全避免了异质增透膜存在的脱落、失效等问题,保留了金刚石独特的机械及热性能。当表面阵列结构的周期小于入射光的波长时,也叫做“亚波长结构”,这时光的传播只存在零级透射和反射衍射光,其他级次的衍射波均为倏逝波,表面的亚波长结构类似于一层等效介质(梯度折射率薄膜),具有与常规光学结构截然不同的反射、透射、偏振和光谱特性,对结构特征尺寸进行合理的设计,能够极大提升金刚石的光学性能,近年来随着表面微纳米加工技术的飞跃发展,金刚石表面亚波长结构有着巨大的应用前景。

从 1980 年代开始,英国科学家在自然杂志上发表了通过两光束激光干涉光刻方法第一次人工制备了抗反射表面亚波长结构^[3],之后,对单晶硅^[4]、锗^[5]、石英石^[6]、ZnS^[7]等光学材料开展了很多研究,由于金刚石超硬的物理性能和 CVD 生长工艺的限制,关于金刚石表面微结构增透的研究报道较少。目前,在金刚石表面制备亚波长抗反射结构可以采用两种方式:一是自上而下的方法,如直接在金刚石表面镀一层金属或合金薄膜,然后进行干法刻蚀^[8-9]。二是自下而上的方法,首先在衬底(如硅片)上制备微结构,然后通过气相沉积生长金刚石,在形核面反向复制生

长^[10-11]。前者需要针对金刚石研发特殊的掩模版和刻蚀工艺,无法精确控制表面结构的尺寸和侧壁角度,且经过刻蚀后难以避免会留下较粗糙的表面;后者则是在成熟的硅片刻蚀技术基础上发展而来,能够较容易实现对金刚石微结构的控制。

目前,通过上述两种工艺均可实现金刚石表面微结构的制备。不过鉴于金刚石极难的加工性,对于金刚石表面亚波长结构设计及加工的系统研究非常有限。基于此,该研究首先通过模拟技术对金刚石表面的微结构尺寸进行设计,使其满足在特定的波段(典型长波红外波段 8~12 μm)达到增透效果。然后,在实验中采取自下而上的仿形生长方法,利用微波等离子体化学气相沉积(MPCVD)制备了光学级薄膜,并探讨了金刚石在微结构衬底表面形核生长的过程。最后,对制备的具有表面微结构的光学级金刚石膜进行本征质量及光学透过性能的检测,结合理论模拟及实验测试结果对增透性能进行了解释。

1 实验

当微结构特征尺寸与入射光波长相近或更小时,必须采用矢量衍射理论来分析不同电磁场分量在器件表面中的相互耦合作用,该研究利用 FDTD solution 软件对金刚石红外透过率进行定量计算,该软件基于时域有限差分法(FDTD),对空间电磁场进行时域分析。多晶 CVD 金刚石的复折射率来自 Refractive Index 数据库,基于这些数据建立金刚石材料模型,仿真区域在 x 、 y 方向使用周期性边界条件(Periodic), z 方向使用完美匹配层(Perfectly Matched Layer, PML),设置光源为平面波,沿 z 方向无角度入射。

金刚石微结构的制备过程可分为三个阶段:

(1) 制备硅衬底。利用设计好的掩模版,对硅片进行反应耦合等离子体刻蚀(ICP),采取 Bosch 工艺控制刻蚀侧壁角度和深度,刻蚀过程如表 1 所示,步骤 1 和步骤 2 交替循环。

(2) 生长金刚石。分别以微结构硅片和平面硅片为衬底生长金刚石,衬底尺寸均为 10 mm×10 mm,厚度为 0.5 mm。生长前依次用丙酮、酒精、去离子水对

表 1 刻蚀参数

Tab.1 Etching parameters

Steps	Gas flow of SF ₆ /sccm	Gas flow of C ₄ F ₈ /sccm	HF Power/W	ICP Power/W	Temperature/°C	Pressure/mTorr(1 Torr=133.32 Pa)	Time/s
1	0	100	10	700	20	40	6
2	100	0	25	700	20	30	7

衬底进行超声清洗。然后将衬底在 200 nm 金刚石粉-酒精混合液中超声处理,引入晶粒提高形核密度。MPCVD 工艺生长金刚石,衬底温度保持 770~780 °C,生长功率 1 650 W,腔压 11.5 kPa,氢气流流量 300 sccm,开始阶段甲烷流量 15 sccm 高温形核,然后 9 sccm 生长,生长时间 145 h。

(3) 后期处理。对样品生长面进行研磨、抛光,使表面粗糙度降至 20 nm 以下,然后用 3:1 的氢氟酸与硝酸混合液溶解硅,得到微结构金刚石薄膜。

通过扫描电子显微镜(美国,QUANTA FEG 250)观察表面微结构硅衬底和金刚石形貌,评价金刚石的复制生长效果,显微共焦激光拉曼光谱仪(英国 Renishaw, inVia-Reflex)检测薄膜的金刚石质量,傅里叶红外光谱仪(美国 varian, Excalibur 3 100)检测薄膜的红外光学透过率。

2 结果与讨论

2.1 微结构设计和透过率模拟

表面亚波长结构由周期性规则排列的微米级结构单元组成,阵列周期 A 需满足: $A < \lambda/n$, 其中 λ 是自由空间波长, n 为材料折射率。将表面结构单元设计为长方体形状,如图 1(a) 所示,上半部介质为空气,下半部为金刚石,微结构单元在平面上具有周期性。图 1(b) 和图 1(c) 分别模拟了红外光波透过平面金刚石和微结构金刚石薄膜后 XY 平面内的电场分布图,微结构金刚石表面的电场分布同样具有周期性,图中显示的范围为一个周期,横纵坐标表示 x 、 y 两个方向上的长度,不同的颜色表示场量幅度的大小,可以发现微结构的存在使电场幅度明显增强,而光的强度与电场幅度具有正向关系,透过光的强度增加,反映出薄膜的透过率得到提升。

在仿真过程中,设置微结构深度为 2 μm 不变,通过改变周期和占空比(边长 a /周期 A),定量研究了微结构特征尺寸与透过率之间的关系。图 2(a)~(c) 分别是周期 2、3、4 μm 的亚波长结构在 8~12 μm 波段的

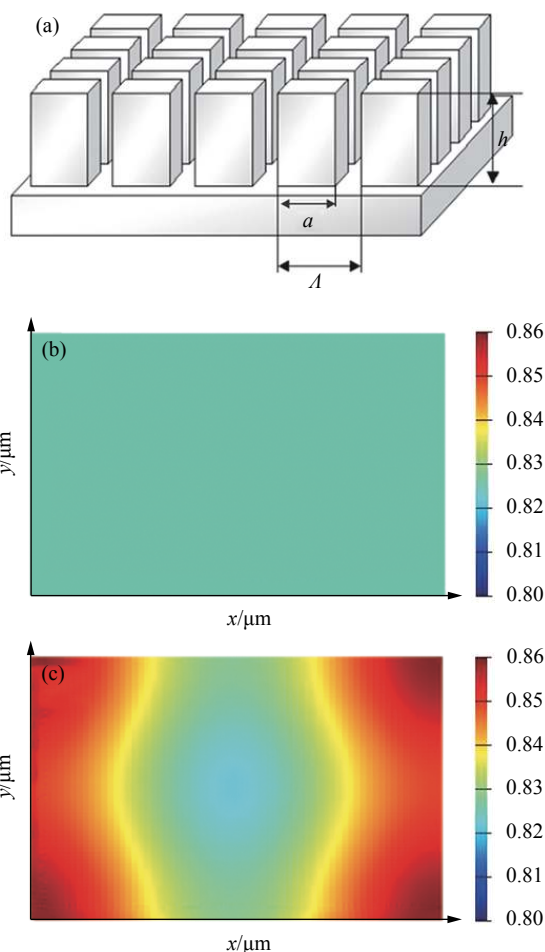


图 1 (a) 微结构形貌设计;光波透过平面金刚石 (b) 和微结构金刚石 (c) 的电场分布

Fig.1 (a) Design of microstructure morphology; Electric field distribution of light wave passing through flat diamond (b) and microstructure diamond (c)

透过率模拟图谱,图 2(d) 为不同结构在 8~12 μm 波段的平均透过率。通过模拟发现,周期 2 μm 和 3 μm 的结构在该波段实现了全增透,且随着占空比的增加,透率先增大后减小,当占空比为 0.6~0.7 时平均透过率达到了最大值 80%。周期为 4 μm 的结构只在部分波段实现了透过率的提升,因为不完全满足 $A < \lambda/n$ 的条件,使得对短波长光的零级衍射效率降低。随着占空比的增大,实现增透的波长阈值逐渐增大,

曲线略微向右偏移, 占空比为 0.6、0.7 的结构在 10~12 μm 波段仍然能够达到较高的透过率 83%。模拟结果表明, 理论情况下, 金刚石亚波长结构实现 8~12 μm 波段增透的最优特征参数是周期 2~3 μm , 占空比为

0.6~0.7。但是较短周期微结构的深宽比很大, 使得刻蚀过程和后续的生长变得困难, 考虑到工艺条件的可实施性, 选择了周期 4 μm , 占空比为 0.6 的尺寸来制备金刚石表面亚波长结构。

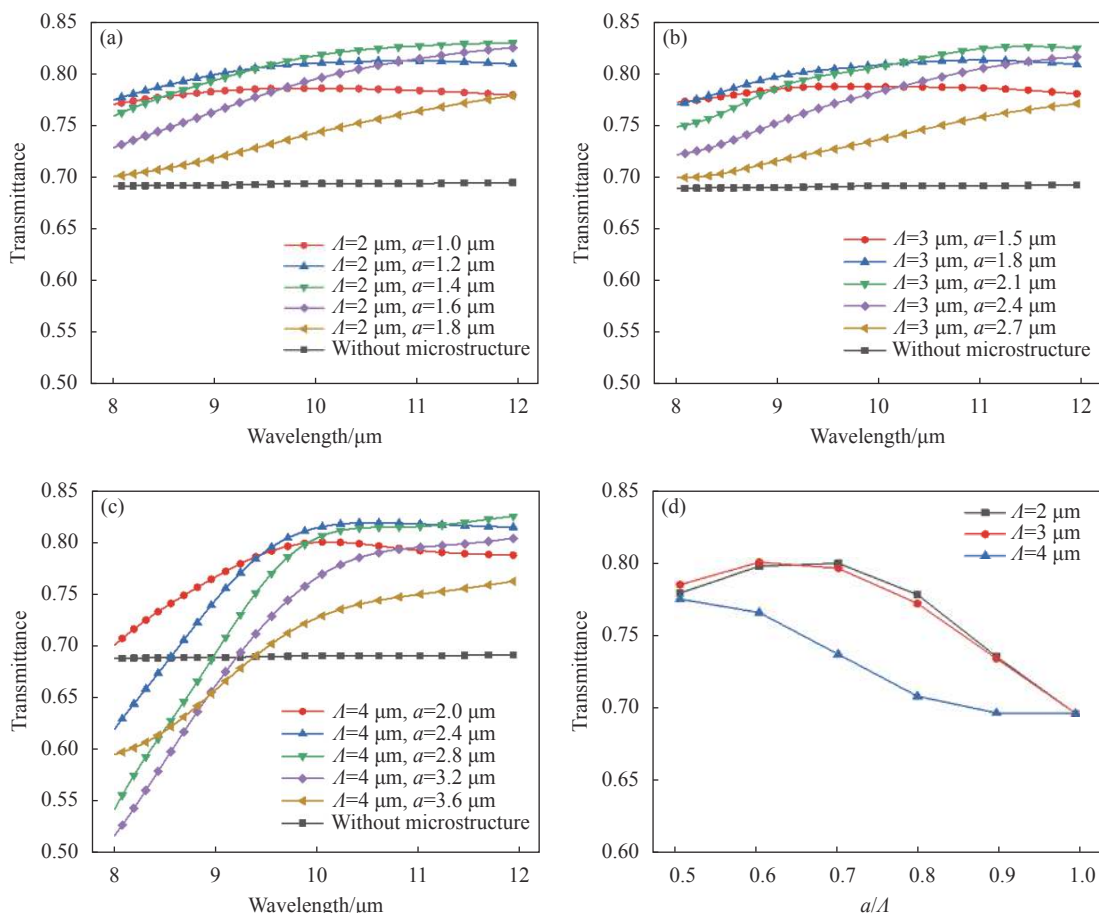


图 2 金刚石不同尺寸亚波长结构的透过率模拟。(a) 周期=2 μm ; (b) 周期=3 μm ; (c) 周期=4 μm ; (d) 平均透过率

Fig.2 Transmittance simulation of sub-wavelength structures with different sizes of diamond. (a) Period=2 μm ; (b) Period=3 μm ; (c) Period=4 μm ; (d) Average transmittance

2.2 微结构的制备及生长分析

基于上述设计, 首先制备掩模版, 利用计算机制图, 激光曝光描绘出精确的图案。然后通过光刻、ICP 刻蚀工艺处理硅片制备微结构衬底, ICP 刻蚀采取 Bosch 工艺, 交替转换刻蚀气体与钝化气体实现刻蚀与侧壁钝化, 其中刻蚀气体为 SF_6 , 钝化气体为 C_4F_8 , 通过这种周期性“刻蚀-钝化-刻蚀”, 使刻蚀只沿着深度方向进行, 最终得到长方体孔状微结构硅衬底, SEM 照片如图 3(a) 所示, 测量结构边长为 2.7 μm , 阵列周期为 4 μm , 刻蚀深度约为 1.7 μm 。在刻蚀过程中发生了横向钻刻, 导致微结构边长与设计相比略微

扩大, 微槽直角出现略微的弧度弯曲, 这是由于反应离子对微槽边缘的非均匀性刻蚀造成的。在该衬底微结构表面上生长金刚石, 同时以抛光处理的光滑硅片衬底作为对照。

生长前将两种衬底在金刚石粉-酒精混合液中超声处理, 引入晶粒提高形核密度, 高核化密度生长会抑制形核层 SiC 的形成。然后 MPCVD 工艺生长金刚石。该研究中, 具有亚波长结构的表面来自金刚石形核面, 因此为了提高形核面的光学质量, 需要在工艺上进行调整。一般而言, 温度是决定薄膜质量的重要因素, 影响着衬底表面反应的微观过程, 如原子

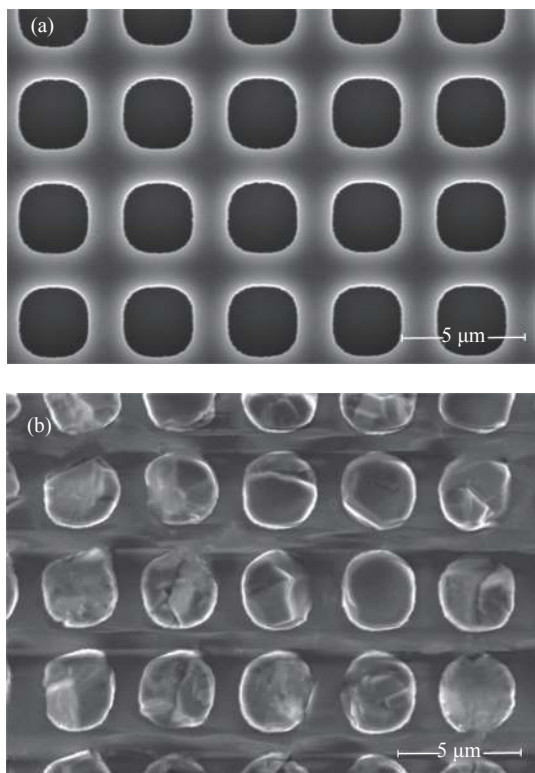


图 3 硅衬底 (a) 和金刚石 (b) 微结构 SEM 图像

Fig.3 SEM image of silicon substrate (a) and diamond (b) microstructure

迁移、成核的临界尺寸、基团的反应速率等参数变化^[12], 由于微结构衬底非光滑平面, 当温度较高时, 金刚石膜中容易含有更多的石墨和非晶碳等非金刚石成分, 为获得高质量的光学级薄膜, 采用低温低甲烷的生长条件, 避免粗大晶粒的形成和缺陷处的优先生长, 较低的甲烷浓度也减少了形核面以及晶界处的石墨和非晶碳的生成^[13]. 去除硅衬底后, 得到自支撑的金刚石薄膜, 膜厚约为 120 μm, 生长速率为 0.83 μm/h. 观察到其形核面反向复制出了衬底表面的结构形貌, 如图 3(b) 所示. 由于硅衬底表面微结构内部的等离子体场分布不均匀, 以及反应基团难以均匀扩散至方槽的边角和底部, 导致金刚石在衬底微孔内的生长速率不均匀, 没有完全填充, 结构非理想的长方体轮廓. 但是, 与衬底相比, 微结构的周期和占空比变化不大. 对两个试样的生长面都进行相同工艺的研磨、抛光工艺处理, 以降低表面粗糙度, 提高光学透过性. 两片样品膜厚减薄至 100 μm, 表面轮廓仪测量生长面粗糙度为 20 nm 以下, 形核面未进行抛光处理.

用扫描电镜观察了硅-金刚石结合层的横截断

面, 对金刚石在微孔内的生长情况进行更细致的研究. 图 4(a) 为衬底的横截面 SEM 图, 可看到刻蚀过程发生了“长草效应”^[14], 即在衬底侧壁出现类似于一团杂草的细而长的 Si 针表面形貌, “长草效应”是钝化层对侧壁过多的保护所带来的负面影响, 使衬底表面的粗糙度和缺陷增加, 不利于光学级薄膜的制备. 生长过程中, 金刚石会出现无法完全填充衬底微孔的情况, 如图 4(b) 中红色区域所示, 由于微孔的存在, 微波等离子气体在扩散时流场均匀性发生改变, 气体在微孔顶部产生回流效应^[15], 导致活性基团在微腔内分布不均匀, 金刚石在侧壁上半部分优先形核, 且生长速率较快, 微孔下半部分生长速率缓慢. 非均匀生长导致壁面膜厚具有明显的差异, 生长一段时间后, 微槽上半部分完全填充, 封闭住槽口, 但衬底底部还未生长完整, 使微结构产生了凹的缺陷. 结构非规则的形状会对光产生一定的散射, 减弱薄膜的增透效果. 图 4(c) 显示了生长情况较好的部分结构, 金刚石结构比较完整, 个别有裂纹存在. 控制微孔区域内金刚石的生长速率至关重要, 提高形核密度, 避免粗大晶粒的形成, 增加等离子气体平均自由程, 有利于完整微结构的生长. 最终生长的微结构衬底深宽比约为 0.63 (1.7 : 2.7), 较小的深宽比更有利于微孔内部金刚石的填充, 但仍然存在缺陷和裂纹的问题.

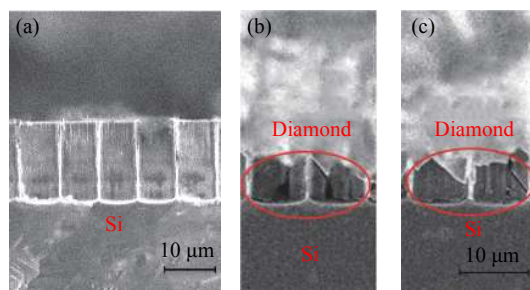


图 4 横截面 SEM 照片. (a) 硅衬底断面图; (b)、(c) 金刚石-硅结合层断面图

Fig.4 Cross-sectional SEM photograph. (a) Silicon substrate fracture diagram; (b), (c) Diamond-silicon bonding layer fracture diagram

采用 Raman 表征技术, 对相同的生长条件下平面衬底与微结构衬底生长的 CVD 金刚石质量进行表征, 并对光学质量受形核层的影响进行分析. 两个样品形核层的拉曼图谱如图 5(a) 所示, 平面衬底生长的金刚石在波数为 $1\ 332.8\ \text{cm}^{-1}$ 处存在金刚石特征峰, 半

峰全宽 (FWHM) 值为 6.90 cm^{-1} 。金刚石形核层的品质较高, 缺陷与杂质也较少。微结构衬底生长的金刚石拉曼光谱特征峰位移至 $1\ 334.5\text{ cm}^{-1}$ 处, 并且峰强明显小于光滑金刚石强度, 对应的 FWHM 值为 9.02 cm^{-1} , 峰位的偏离说明微结构金刚石形核面的杂质、畸变较多, 晶体存在很多缺陷。硅衬底经过微纳刻蚀后形貌发生改变, 与光滑平面衬底相比, 表面粗糙度、应力应变区和缺陷的增加^[6], 使 CVD 沉积早期的形核生长容易引入错位和晶界的二次形核, 形核层晶粒质量较差, 易生成非晶碳, 影响薄膜的透过性能。样品生长面的拉曼图谱如图 5(b) 所示, 在波数为 $1\ 332.8\text{ cm}^{-1}$ 处均存在尖锐的金刚石特征峰, 生长面的光学质量相差不大, 一般情况下, 对于光学级 CVD 金刚石膜, 需要采用研磨抛光工艺将形核层去除以提高薄膜的光学透过率。但是, 在具有微结构的形核面进行抛光处

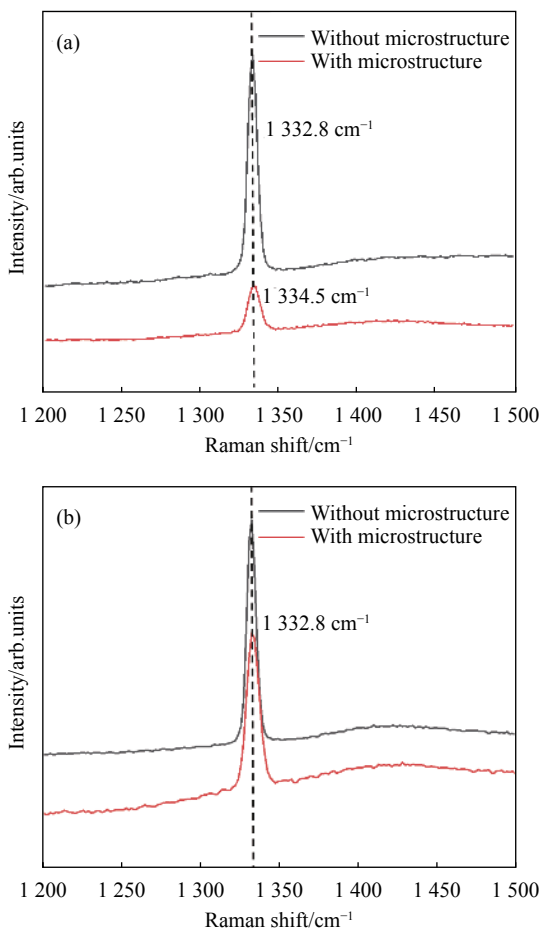


图 5 拉曼光谱图。(a) 金刚石样品形核面; (b) 金刚石样品生长面
Fig.5 Raman spectrum. (a) Nucleation surface of diamond sample;
(b) Growth surface of diamond sample

理显然无法实现。因此, 后续的研究需要探讨如何提高微结构形核层的质量, 或者对其进行非破坏性的抛光处理工艺, 以进一步提高其光学透过性能。

2.3 红外透过性能测试及分析

用傅里叶红外光谱仪对金刚石薄膜进行红外透过率的测量, 结果如图 6 所示。平面金刚石薄膜透过率接近天然金刚石, 在 $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 波段平均透过率达到 70% 左右。微结构样品的形核面微结构特征以及形核层质量虽然不够理想, 但是在 $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 波段仍实现了透过率的提升, 最高透过可达 76%, 并且在波长较远的宽波段范围均实现了一定程度的增透效果。说明采用该微结构设计方案, 能够实现一定程度的光学增透。

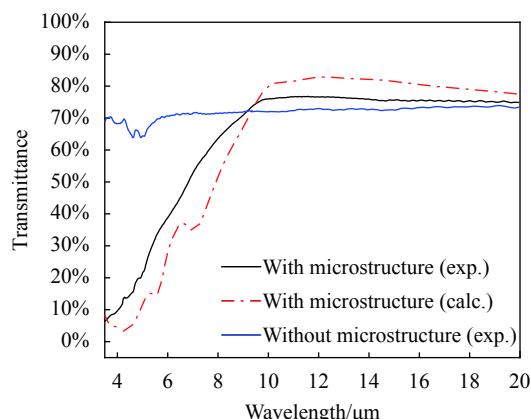


图 6 透过率图谱: 平面金刚石实测值 (蓝色曲线); 微结构金刚石实测值 (灰色曲线) 和模拟值 (蓝红曲线)
Fig.6 Transmittance spectrum: measured value of flat diamond (blue curve); measured value of microstructure diamond (gray curve) and simulated value (blue-red curve)

图 6 中红色虚线显示了该尺寸微结构 (周期 $4\ \mu\text{m}$, 边长 $2.7\ \mu\text{m}$) 透过率的理论计算值, 在 $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 波段理想透过率最高可达 83%。而制备的样品实际透过率约为 76%, 低于理论设计值。但是从线性来看, 实际测试曲线与理论预测曲线还是具有较好的相似度, 说明理论模拟的结果具有较高的准确性。实际测试曲线相比理论预测曲线向左偏移, 考虑到金刚石的亚波长结构类似于非规则圆柱体, 结构的占空比与理论设计相比略微缩小, 其峰型出现左移的规律正好符合根据上述 FDTD 的计算结果。

分析实际增透效果与模拟值相比的差距主要是因为: (1) 制备的微结构形貌非完美的长方体轮廓, 由

于金刚石生长存在无法完全填充衬底孔隙的问题,使微结构形状具有一定的凹陷和裂纹,导致表面对光谱散射和吸收增强,表面的不平整和裂纹的存在使光在传播时产生多次反射和吸收,从而造成透过性能的降低;(2)金刚石形核面未经任何抛光处理,微结构表面具有一定粗糙度。形核面粗糙度与初始衬底表面密切相关,经过微纳刻蚀加工后的硅衬底与抛光平面相比粗糙度增大,也增大了复制生长的金刚石微结构表面光滑度,粗糙的表面使薄膜透过性能下降;(3)微结构形核层质量差,晶粒组织存在很多杂质和缺陷。通过拉曼分析可知,微结构衬底生长的形核面与平面生长相比,薄膜表面光学质量较差,杂质和缺陷的存在破坏了金刚石晶格的完整性,产生更多晶格散射,同时对红外光产生吸收,导致透过性能下降。对于在抛光平面衬底上生长,上述不利影响很小,采用适合光学级薄膜生长的 MPCVD 生长工艺,能够制备接近理论模拟值 71% 透过率的样品。

3 结 论

运用时域有限差分法对微结构金刚石透过率进行了模拟,研究了微结构周期和占空比对透过率的影响。同时对金刚石表面的微结构尺寸进行设计,使其满足在特定的波段(典型长波红外波段 8~12 μm)达到增透效果。采用自下而上的方法,以表面具有微结构的硅片为衬底, MPCVD 生长制备单面微结构金刚石。在 8~12 μm 波段,单面微结构金刚石的红外透过率可从 70% 提升至 76%,说明表面亚波长微结构能够实现明显的光学增透。实际测试结果与模拟计算的理论值略有差异,其原因在于实际获得的金刚石膜表面微结构形貌与理论设计略有差异,微结构表面粗糙且形状不规则,形核层的金刚石质量不高,导致光的散射和反射以及晶粒缺陷对红外光的吸收,造成了实际增透效果与理论的差别。

参考文献:

- [1] Van Silfhout Roelof, Pothin Daniel, Martin Thierry. White beam diagnostics using X-ray back-scattering from a CVD diamond vacuum window [J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2020, 27(1): 37-43.
- [2] Liu Wenting, Yan Feng, Liu Zhengtang. The preparation and properties of Y2O3/AlN anti-reflection films on chemical vapor deposition diamond [J]. *Thin Solid Films*, 2011, 520(2): 734-738.
- [3] Clapham P B, Hutley M C. Reduction of lens reflexion by the "moth eye" principle [J]. *Nature*, 1973, 244: 281-282.
- [4] Han Weina, Li Furong. Femtosecond laser induced concentric semi-circular periodic surface structures on silicon based on the quasi-plasmonic annular nanostructure [J]. *Nanotechnology*, 2018, 29(30): 305301.
- [5] Xu Qiyuan, Liu Zhengtang, Li Yangping, et al. Studies of infrared antireflection subwavelength structure on Ge substrate [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(6): 1745-1748. (in Chinese)
徐启远, 刘正堂, 李阳平, 等. 锗衬底红外抗反射亚波长结构的研究[J]. *光学学报*, 2010, 30(6): 1745-1748.
- [6] Shao Ting, Tang Feng, Sun Laixi, et al. Fabrication of antireflective nanostructures on a transmission grating surface using a one-step self-masking method [J]. *Nanomaterials*, 2019, 9(2): 180.
- [7] Chan L, Decuir E A, Fu R, et al. Biomimetic nanostructures in ZnS and ZnSe provide broadband anti-reflectivity [J]. *Journal of Optics*, 2017, 19(11): 114007.
- [8] Forsberg Pontus, Karlsson Mikael. Inclined surfaces in diamond: broadband antireflective structures and coupling light through waveguides [J]. *Optics Express*, 2013, 21(3): 2693.
- [9] Zhao Qingliang, Guo Bing, Wu Mingtao. Laser machining micro-structures on diamond surface with a sub-nanosecond pulsed laser [J]. *Applied Physics*, 2018, 124(2): 1-9.
- [10] Leonid Butvina, Alexander Khomich, Luigi Schirone, et al. CVD diamond optics with moth-eye antireflective surface structures produced by molding technique [J]. *New Diamond and Frontier Carbon Technology*, 2000, 10(2): 109-119.
- [11] Iizuka K, Yamanoi T, Takezawa N. Fabrication of a diamond-based imprint mold by applying diamond CVD on silicon master molds for a glass microlens array [J]. *Diamond and Related Materials*, 2011, 20(7): 866-870.
- [12] Li J G, Liu S, Li Y Y, et al. Hot-filament-chemical-vapor-deposition diamond film and its influence factors [J]. *Diamond & Abrasives Engineering*, 2004, 1: 41-44.
- [13] Tang C J, Fernandes A J S, Jiang X F, et al. Effect of methane concentration in hydrogen plasma on hydrogen impurity incorporation in thick large-grained polycrystalline diamond films [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2015, 426: 221-227.
- [14] Zhou Jiahui, Chang Hudong, Zhang Xufang, et al. Dry etching

of GaAs backside via with inductively coupled plasma [J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2015, 35(3): 306-310. (in Chinese)

周佳辉, 常虎东, 张旭芳, 等. ICP干法刻蚀GaAs背孔工艺研究[J]. *真空科学与技术学报*, 2015, 35(3): 306-310.

[15] Yuan Jiajing. Studies on fabrication process and mechanism of CVD diamond micro devices[D]. Nanjing: Nanjing University of

Aeronautics and Astronautics, 2010. (in Chinese)

袁佳晶. CVD金刚石微器件的制备工艺及机理研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.

[16] Wang G, Yang B, Wang J, et al. Silicon macroporous arrays with high aspect ratio prepared by ICP etching[C]//SPIE, 2018, 10697: 106970Y.



第一作者简介: 张朝阳 (1995-), 男, 工学硕士。本科毕业于西南大学材料物理专业, 2018 年进入北京科技大学新材料技术研究院攻读硕士, 担任直流电弧等离子体喷射金刚石膜沉积设备学生负责人。运用微纳加工刻蚀技术和微波等离子体化学气相沉积设备, 在金刚石表面制备亚波长结构, 进行红外透过性能研究。运用 FDTD solution 光学模拟软件, 对薄膜进行微结构设计和光学仿真模拟。发表学术论文 2 篇。Email: 13146003899@163.com



导师简介: 魏俊俊 (1981-), 男, 副研究员, 博士。2011 年起工作于北京科技大学新材料技术研究院。主要致力于 CVD 金刚石相关材料的基础科学及应用研究。涉及 CVD 金刚石单晶制备及加工、高品质 CVD 金刚石膜制备及光学应用、金刚石微纳加工技术和应用、高功率电子器件热管理材料及器件、(纳米) 金刚石表面功能化修饰及其应用等方向。发表学术论文 80 余篇, 获得授权专利 30 余项。作为项目负责人先后承担国家自然科学基金、国防重大专项 (子课题) 以及装发预研课题等多个国家级课题。获得教育部技术发明一等奖 1 项, 北京市科技进步三等奖 1 项。Email: weijj@ustb.edu.cn