

# 吸收辐射复合金刚石膜的制备及光学研究\*

梁中翥<sup>1)†</sup> 梁静秋<sup>1)</sup> 郑娜<sup>2)</sup> 姜志刚<sup>3)</sup> 王维彪<sup>1)</sup> 方伟<sup>1)</sup>

1) 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 长春 130033)

2) 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130012)

3) 吉林大学超硬材料国家重点实验室, 长春 130012)

(2009 年 2 月 12 日收到, 2009 年 4 月 3 日收到修改稿)

采用微波等离子体化学气相沉积(MW-PCVD)和直流热阴极辉光放电等离子体化学气相沉积(DC-PCVD)两种方法相结合,制备出一种吸收辐射的复合金刚石膜,它对宽光谱范围的光辐射具有 99%—99.2% 的吸收率,同时具有较低的反射率和透过率.随着黑色吸收辐射金刚石层厚度的增加,复合金刚石膜的热导率将小幅度降低,但黑色金刚石膜层厚度小于 15  $\mu\text{m}$  时,复合金刚石膜的热导率都在  $16 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  以上,这满足吸收辐射复合金刚石膜的高导热需求.用热阴极 DC-PCVD 方法制备的黑色吸收辐射金刚石膜层在  $1500\text{—}1600 \text{ cm}^{-1}$  范围和  $1350 \text{ cm}^{-1}$  处出现了对应于非金刚石碳相的宽带拉曼峰.随着甲烷浓度的增加,金刚石膜中会出现更多的非金刚石碳相成分,即石墨等非金刚石碳相在金刚石膜中富集,复合金刚石膜的透光性也越来越差.黑色吸收辐射金刚石层直接沉积在高纯金刚石片上,具有较高热导率和吸收率,并且该复合膜背面具有绝缘性.

关键词:吸收辐射,光学材料,金刚石,热导率

PACC: 7865, 8115, 8160H, 9260W

## 1. 引言

太阳辐射对地球的气候变化及生态环境影响巨大,因此对辐射的探测十分重要<sup>[1]</sup>.为使辐射探测器的测量时间短和精度高,不仅需要高性能的辐射吸收膜材料,而且要求材料在低热容下具有极好的导热性和绝缘性.采用性能优异的宽光谱波段吸收材料可大大提高辐射探测器的响应速度、精度和敏感性.探测器微型化的必然趋势和在空间领域的广泛应用迫切地要求辐射吸收材料具有更高的吸收率和热导率<sup>[2—7]</sup>.

金刚石同时具有高热导率、高折射率、抗辐射、化学惰性、优异的电学性能和力学性能<sup>[8—10]</sup>,作为多功能材料在光学领域有着重要应用,可以作为优异的光学材料.特别适用于同时有多种功能要求的军用、空间应用及其他的恶劣环境<sup>[11—16]</sup>.常温下铜的热导率为  $4 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ,碳化硅的热导率约  $4.5 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ,而单晶金刚石的热导率为  $20 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ,并且铜和碳化硅的热膨胀系数分别是金刚石的 17 倍和 8 倍,所以金刚石可用作理想的大功率半导体激光器、微波器件和集成电路的散热衬底材料<sup>[8]</sup>.不含杂质的金刚石具有较高的宽光谱透过率,在紫外、可见光和红外区域都有良好的透过性,并且同时具有最高的热导率和较强的机械特性,抗化学腐蚀且耐磨损,是制作在恶劣环境下使用的理想的光学窗口材料<sup>[9—16]</sup>.不含杂质的金刚石又具有较高折射率,金刚石膜可镀在硅、锗等材料表面形成光学增透膜<sup>[9,12,17]</sup>.然而,当金刚石中存在杂质元素时,其大部分性质将会有所改变,尤其光学特性改变较大,比如,不含杂质的金刚石为无色,而含有氮或硼元素的金刚石显黄色、绿色、黑色或无色<sup>[9—18]</sup>,这些依赖于金刚石中杂质元素的种类、存在状态以及含量.化学气相沉积 CVD 金刚石是采用氢气和含碳的气体在热解或放电的条件下在合适温度的基片上沉积而成,金刚石膜在沉积过程中同时伴随石墨等非金刚石碳相的生长<sup>[8,11,16]</sup>,这些非金刚石碳相作为 CVD 金刚石中最普遍的杂质,直接决定着金刚石薄膜的

$\text{K}^{-1}$ ,并且铜和碳化硅的热膨胀系数分别是金刚石的 17 倍和 8 倍,所以金刚石可用作理想的大功率半导体激光器、微波器件和集成电路的散热衬底材料<sup>[8]</sup>.不含杂质的金刚石具有较高的宽光谱透过率,在紫外、可见光和红外区域都有良好的透过性,并且同时具有最高的热导率和较强的机械特性,抗化学腐蚀且耐磨损,是制作在恶劣环境下使用的理想的光学窗口材料<sup>[9—16]</sup>.不含杂质的金刚石又具有较高折射率,金刚石膜可镀在硅、锗等材料表面形成光学增透膜<sup>[9,12,17]</sup>.然而,当金刚石中存在杂质元素时,其大部分性质将会有所改变,尤其光学特性改变较大,比如,不含杂质的金刚石为无色,而含有氮或硼元素的金刚石显黄色、绿色、黑色或无色<sup>[9—18]</sup>,这些依赖于金刚石中杂质元素的种类、存在状态以及含量.化学气相沉积 CVD 金刚石是采用氢气和含碳的气体在热解或放电的条件下在合适温度的基片上沉积而成,金刚石膜在沉积过程中同时伴随石墨等非金刚石碳相的生长<sup>[8,11,16]</sup>,这些非金刚石碳相作为 CVD 金刚石中最普遍的杂质,直接决定着金刚石薄膜的

\* 吉林省科技发展计划(批准号:20080122,20090351),国家自然科学基金(批准号:40803021),中国科学院知识创新工程领域前沿项目(批准号:J071Y32Q070)资助的课题.

† E-mail: liangzz@ciomp.ac.cn

光学性质和在工业、高科技技术中的不同用途。

众所周知,碳元素具有两种同素异形体:石墨和金刚石.石墨中的碳具有  $sp^2$  杂化键,而金刚石具有  $sp^3$  杂化键.从紫外到红外波长范围,石墨相碳的透光性和反射性非常差,常被用作黑色材料来吸收光<sup>[9,43]</sup>.至今美国国家标准与技术研究院用作黑色基准的物质仍是碳黑.而薄膜材料的性能主要取决于薄膜的成分及结构,因此,尽管不含杂质的金刚石具有较高的宽光谱透过率,但如果金刚石薄膜中  $sp^2$  杂化键含量越多,即非金刚石碳相含量增多,金刚石薄膜的透光性就可能越差<sup>[8,43]</sup>,吸收辐射的能力就可能越强.

由于金刚石集如此众多优异的性能于一身,特别适用于同时有多种功能要求的应用及其他恶劣环境的应用,因此,非常有必要研究石墨等非金刚石碳相与金刚石的光学特性之间的关系,并且探索制备出同时具有高吸收率和热导率的复合金刚石膜材料应用于辐射探测器.为此,本文采用微波等离子体化学气相沉积 MW-PCVD 和直流热阴极辉光放电等离子体化学气相沉积 DC-PCVD 两种制备方法相结合,以甲烷和氢气的混合气体为原料,制备出复合金刚石膜,研究了复合金刚石膜的生长特性、表面形貌、热导率和光学特性.该项工作对于将具有众多优异性能的金刚石用于广阔的光学辐射领域有着重要的意义.

## 2. 实验方法

吸收辐射复合金刚石膜是由作为热沉材料的纯金刚石片层和作为光辐射吸收材料的黑色含非金刚石碳相的金刚石膜层复合而成.热沉金刚石片是采用 MW-PCVD 系统制备的,它属于无极放电方法,在较低气压下可得到品质极高的高纯透明金刚石膜.在 MW-PCVD 设备中,以氢气和甲烷为原料气体(纯度 99.99%),通过质量流量计控制原料气体的流量,在表 1 第二列的工艺条件下沉积制备无色透明的高纯度金刚石片,即一次化学气相沉积制备作为热沉材料的纯金刚石片.基片先用金刚石研磨膏研磨 30 min,使基片表面产生均匀划痕,而且部分金刚石颗粒残留在样品表面,从而提高了金刚石膜的成核率.所制备的金刚石膜片的热导率为  $18 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ . 0.4mm 厚,为无色透明的自支持膜.

把用 MW-PCVD 制备的高纯度金刚石片采用表

面化学刻蚀和机械抛光研磨相结合的方法对金刚石膜双面抛光,使其表面粗糙度到一定范围.然后采用 YAG 激光切割机把金刚石膜切割成尺寸为  $2 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  的条状样品,再进行铬酸等表面预处理.

表 1 MW-PCVD 和 DC-PCVD 制备金刚石膜的主要参数

沉积方法	MWPCVD	DC-PCVD
基片材料	硅(100)	金刚石
灯丝温度/°C	1800—2000	
阴极温度/°C		1100—1500
微波功率/W	450—600	
气压/kPa	5—10	13—20
基片温度/°C	700—900	750—950
H <sub>2</sub> 流量/ml·min <sup>-1</sup>	200	170—200
CH <sub>4</sub> 流量/ml·min <sup>-1</sup>	1	8—10
沉积速率/ $\mu\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$	1—2	10—30
沉积厚度/ $\mu\text{m}$	400	1—20

直流热阴极辉光放电等离子体化学气相沉积 DC-PCVD 方法,是能够快速沉积金刚石膜的一种方法.在这种制备方法中,放电电流、系统压强、反应气体的比例与流量、阴极与基片的温度等因素对放电特性及制备的金刚石性质都有直接或间接的影响.图 1 为实验所用热阴极 DC-PCVD 装置的示意图.这里阴极用固定在铜座上的钽圆盘制做,而且和圆柱形铜水冷管连接.阳极用中心具有水冷管的圆形铜块制做,并且上面放置沉积基底材料.实验中阴极温度为 1100—1500 °C,而且正如图 1 所示那样阴极尺寸大于阳极尺寸.阴极温度由钽阴极和铜底座间的旋紧程度控制,基片温度由温度隔板的薄厚来控制.

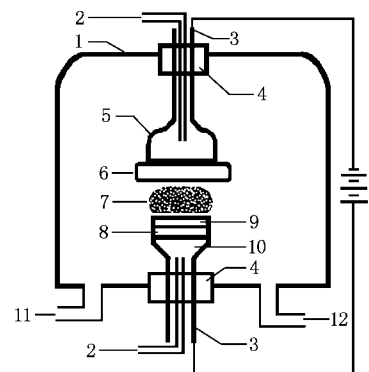


图 1 热阴极 DC-PCVD 装置示意图(1. 真空室;2. 冷却水;3. 电源;4. 绝缘密封环;5. 水冷阴极铜座;6. Ta 阴极;7. 等离子体球;8. 基片温度控制器;9. 钨基片;10. 水冷阳极铜座;11. 抽气口;12. 反应气体入口)

将 MW-PCVD 法制备好的并经表面处理后的金刚石片放置在 DC-PCVD 系统的试样台上,即在具有一定表面粗糙度的高纯金刚石面上进行二次化学气相沉积黑色吸收辐射金刚石膜层.沉积前对 DC-PCVD 系统中的钽电极进行表面打磨净化处理,并用氢气和丙酮加热预处理 30 min,使其表面去除氧化层杂质,并在电极表面形成一层碳化钽覆盖层,以抑制沉积过程中钽的挥发.以氢气和甲烷为原料气体,分别通过 7A-ZM 型质量流量计混合后进入真空室.实验前把真空室内的真空度抽至 1.0 Pa 左右.

本文制备黑色吸收辐射金刚石膜层时采用的工艺参数见表 1 第三列.在扫描电子显微镜(SEM)下观测黑色吸收辐射金刚石膜层的厚度和表面形貌;在光学显微镜下对复合金刚石膜进行了观察;用英国 Renishaw-inVia 型共聚焦激光拉曼(Raman)光谱仪测试金刚石膜层的拉曼光谱,衡量金刚石中非金刚石碳相的含量,判断金刚石的制备纯度和掺杂量.复合金刚石膜的热导率用 PTDS-2 型光热偏转热导率测量系统测量,评价黑色吸收辐射金刚石膜层对整个复合金刚石膜热导率的影响大小.检测光为 1—2 mW 的氦氖激光,抽运光束是 35 mW 的氦氖激光<sup>[16]</sup>.分别采用 Bruker Tensor37 型傅里叶变换红外光谱仪、U-3400 型紫外-可见-近红外光谱仪测试复合金刚石膜的紫外、可见、红外的透过率;采用 Perkin Elmer Lambda 9 紫外-可见-近红外光谱仪结合积分球测试复合金刚石膜的表面反射率.

### 3. 结果与讨论

由热阴极 DC-PCVD 制备的金刚石膜多为 110 取向,图 2 是由热阴极 DC-PCVD 二次化学气相沉积的黑色吸收辐射金刚石膜层的表面形貌.从图中可以看出,沉积的金刚石膜所显露的晶面绝大多数为 (111) 面,但这些晶面显得缺陷很多,同时有很多孪晶存在,出现了较多堆砌的微晶.采用热阴极 DC-PCVD 制备金刚石膜时,晶粒一般是柱状生长,但在沉积过程中如果非金刚石碳相杂质和二次成核较多时,将出现微晶堆砌形成微小结构<sup>[19]</sup>.具有大量凹凸不平的无规则的微小结构对于光辐射具有光局域化和俘获作用<sup>[6,7]</sup>,这对于吸收光辐射是十分有利的.

在光学显微镜下观察,复合金刚石膜由沉积之前的透明高纯金刚石膜变为黑色,并且表面略为粗

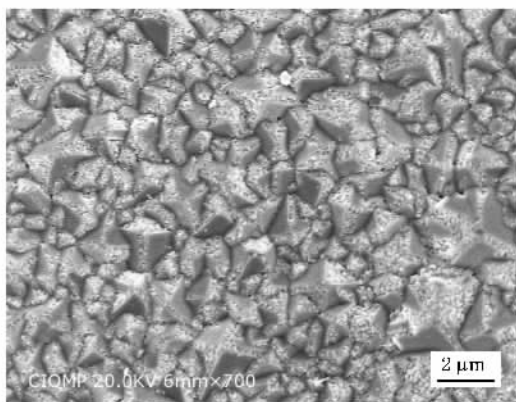


图 2 黑色吸收辐射金刚石膜的扫描电镜图片

糙.在光学显微镜的透射模式下复合金刚石膜不能透过可见光,并且在光学显微镜的反射模式下膜的表面几乎不能聚焦,这是由于金刚石膜中存在着大量非金刚石碳相和大量的晶粒缺陷,对可见光有强烈的吸收作用,从而使金刚石膜的光学透过性和反射性显著下降.金刚石膜的光学带隙与薄膜的石墨化程度密切相关,金刚石膜中  $sp^2$  键含量的增加会导致光学带隙的下降<sup>[8-13]</sup>.这表明,大的甲烷氢气气流比将导致薄膜生成石墨等非金刚石稳定相的概率提高, $sp^2$  杂化键的含量升高,薄膜的光学带隙减小.

CVD 金刚石膜在沉积过程中同时伴随石墨等非金刚石碳相的生长,常用激光拉曼光谱仪测试金刚石膜的拉曼光谱来衡量金刚石中非金刚石碳相的含量,从而判断金刚石的制备品质和纯度<sup>[10-14,20]</sup>.对于 CVD 金刚石膜,在  $1500-1600\text{ cm}^{-1}$  范围内和  $1350\text{ cm}^{-1}$  处往往出现宽带的拉曼峰,这些宽峰是由石墨、无定形碳等非金刚石碳相引起的.它与金刚石的一级拉曼峰  $1332\text{ cm}^{-1}$  的强度比值定性的反映了非金刚石碳相与金刚石相的相对值.金刚石拉曼峰的强度受散射因子和吸收系数的影响,金刚石和石墨的拉曼散射因子比大约为 1/50,金刚石对于可见光区几乎是完全透过的,而石墨却是一种高度吸收的材料.因此,金刚石膜中石墨等非金刚石碳相晶粒的大小和聚集程度将会对复合金刚石膜的光吸收率产生非常重要的影响<sup>[17,20,21]</sup>.

金刚石膜的拉曼光谱如图 3 所示,测量结果表明,所有金刚石膜样品位于  $1332\text{ cm}^{-1}$  附近都有尖锐的金刚石特征峰.高纯金刚石的拉曼光谱如图 3(a) 所示,在 MW-PCVD 制备的高纯金刚石样品中此峰强度更高,而在  $1560\text{ cm}^{-1}$  附近和  $1350\text{ cm}^{-1}$  处没有明显的非金刚石碳相的宽带峰,这表明在 MW-PCVD

制备的金刚石样品中极少含非金刚石碳相,为高纯金刚石膜,且具有较好的透光性.甲烷流量分别为  $8 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}$ ,  $10 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}$  时的拉曼光谱如图 3(b)(c) 所示,这些用热阴极 DC-PCVD 制备的黑色吸收辐射金刚石膜层除了在  $1332 \text{ cm}^{-1}$  附近有尖锐的金刚石特征峰外,在  $1500\text{--}1600 \text{ cm}^{-1}$  范围内和  $1350 \text{ cm}^{-1}$  处还出现了对应于非金刚石碳相的宽带拉曼峰.

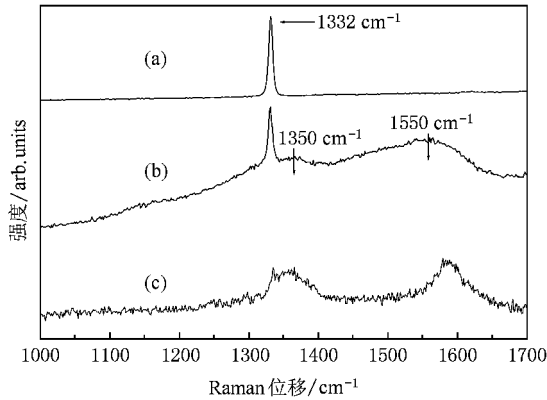


图3 金刚石膜拉曼光谱 (a) MW-PCVD 法制备的纯金刚石膜 (b) 采用 DC-PCVD 法  $8 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}$   $\text{CH}_4$  制备的黑色金刚石膜; (c) 采用 DC-PCVD 法  $10 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}$   $\text{CH}_4$  制备的黑色金刚石膜

当甲烷流量为  $8 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}$  时,在  $1550 \text{ cm}^{-1}$  附近出现较宽的非金刚石碳相的特征峰,表明金刚石膜中非金刚石碳相含量的增加;当甲烷流量继续增加到  $10 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}$  时,非金刚石碳相的宽峰更加明显,强度更高,几乎看不到金刚石的特征峰,这表明随着甲烷浓度的增加,金刚石膜中出现了更多的非金刚石碳相成分,即石墨等非金刚石碳相在金刚石膜中富集,所沉积的金刚石膜的透光性也越来越差,这与光学显微镜所观测结果相一致.

常温下金刚石是以声子传导热能的,对于多晶的金刚石膜来说,影响热传导的主要因素则为晶界、晶粒内部的缺陷和杂质对声子的散射程度.杂质含量少、晶粒较大、晶界密度小的金刚石膜具有较高的热导率<sup>[22]</sup>.

图 4 为复合金刚石膜的热导率随黑色吸收辐射金刚石层厚度变化的关系曲线.从图中可以看出,随着黑色金刚石膜层厚度的增加,复合金刚石膜的热导率逐渐降低,但降低的幅度不大,当黑色金刚石膜层厚度小于  $15 \mu\text{m}$  时,复合金刚石的热导率都在  $16 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  以上.由图可知,在合适的条件下可以得到具有不同厚度的黑色吸收辐射层的高导热金刚石膜,热导率达到  $16\text{--}18 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ .由于吸收

辐射金刚石层是在高纯金刚石膜上进行同质外延生长的,两种金刚石间存在大量原子键,所以层间应力小,并且膨胀系数相当,具有强附着力和高可靠性.

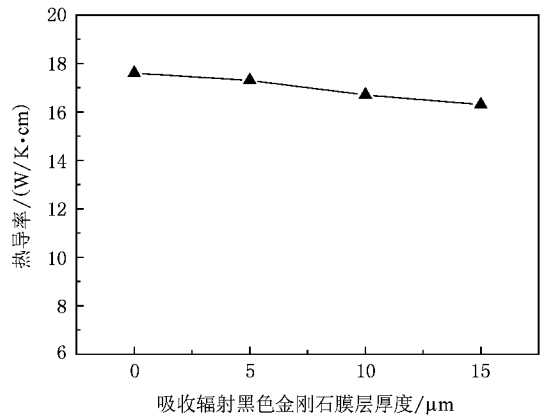


图4 复合金刚石膜热导率与黑色金刚石膜层厚度变化的关系

在宽光谱范围进行了复合金刚石膜的光学吸收测试分析.从能量的角度考虑,照射在任何膜上的辐射能将被分为透射部分  $T$ 、反射部分  $R$  和吸收部分  $A$ ,它们三者之和应该等于全部辐射能.因此,复合金刚石膜的光学吸收应为全部辐射能减去透射部分辐射能量  $T$  和反射部分辐射能量  $R$ :  $A = 1 - T - R$ .理想的吸收辐射材料应该满足透射率和反射率近似都为零,而吸收率约等于 1<sup>[6]</sup>.为研究吸收辐射黑色复合金刚石膜的吸收率,我们分别对复合金刚石膜进行了透射谱测试和反射谱测试.

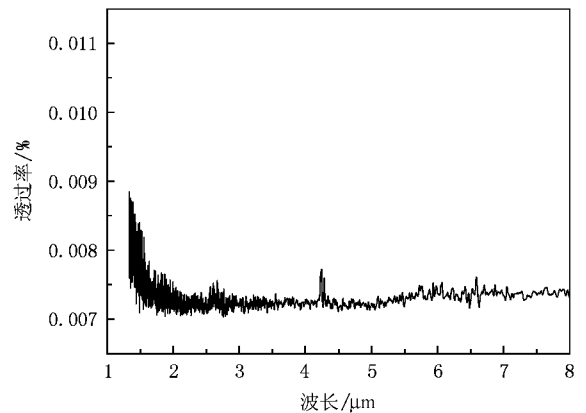


图5 复合金刚石膜的红外透射谱

复合金刚石膜的红外透射谱如图 5 所示,其黑色金刚石膜层厚度为  $10 \mu\text{m}$ ,从图中可以看出,复合金刚石膜在  $1.3\text{--}8 \mu\text{m}$  范围透过率都在  $0.009\%$  以下,几乎与红外光谱探测器的探测极限相当.图 6 是

该复合金刚石膜的紫外—可见—近红外透射谱,在 200—900 nm 的光谱范围内测得的透过率在 0.01% 以下,介于紫外—可见—近红外透射谱探测器的信号噪声范围.实验结果表明,当黑色吸收辐射金刚石膜层具有 10  $\mu\text{m}$  的厚度时,复合金刚石膜的热导率仍在  $16 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  以上,这满足吸收辐射复合金刚石膜的高导热需求,同时也满足其高吸收率的要求.

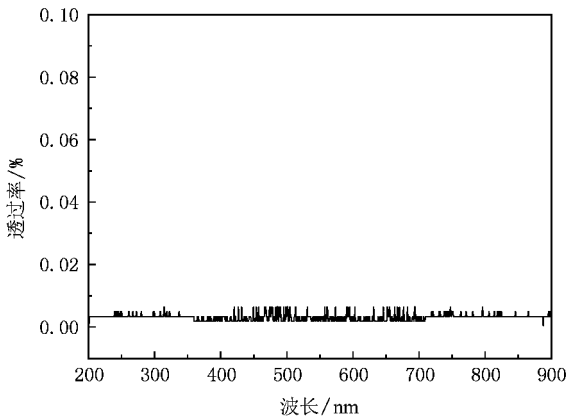


图 6 复合金刚石膜的紫外—可见—近红外透射谱

吸收辐射黑色复合金刚石膜的反射谱如图 7 所示,其黑色金刚石膜层厚度为 10  $\mu\text{m}$ ,由测试结果可以看出复合金刚石膜的垂直反射率在 190—2000 nm 范围低于 0.8%.复合金刚石表面具有凹凸不平的无规则的微小结构,这些结构对于光辐射具有光局域化和俘获作用,相当于在局部区域形成了许多个微小的黑体,因此,该吸收辐射黑色复合金刚石膜具有较低的反射率和透射率.由上面的 SEM 照片可以看出,本文制备的复合金刚石膜表面晶体粒度较大而导致表面反射率仍较高.复合金刚石膜的光学吸收在宽光谱范围进行的分析表明,采用本文二次化学气相沉积法制备的复合金刚石膜具有 99% 以上的光辐射能的吸收率.

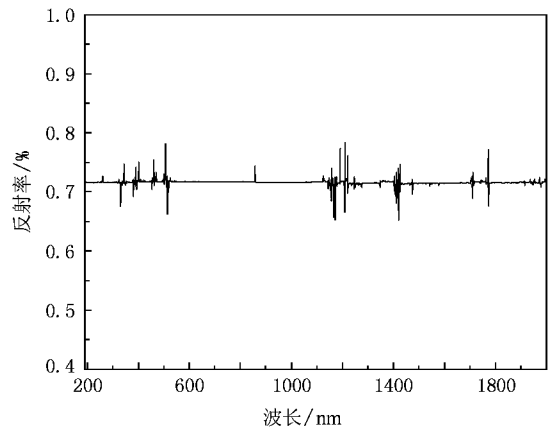


图 7 吸收辐射黑色复合金刚石膜的反射谱

## 4. 结 论

本文采用 MW-PCVD 和 DC-PCVD 两种沉积相结合的方法,制备出一种吸收辐射的复合金刚石膜,它对宽光谱范围的光辐射具有 99%—99.2% 的吸收率,同时具有较低的反射率和透射率.随着黑色吸收辐射金刚石膜层厚度的增加,复合金刚石膜的热导率将小幅度降低,但黑色金刚石膜层厚度小于 15  $\mu\text{m}$  时,复合金刚石膜的热导率都在  $16 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  以上,这满足吸收辐射复合金刚石膜的高导热需求.

用热阴极 DC-PCVD 制备的黑色吸收辐射金刚石膜层在  $1500\text{—}1600 \text{ cm}^{-1}$  范围和  $1350 \text{ cm}^{-1}$  处出现了对应于非金刚石碳相的一个宽带拉曼峰.随着甲烷浓度的增加,金刚石膜中出现更多的非金刚石碳相成分,即石墨等非金刚石碳相在金刚石膜中富集,复合金刚石膜的透光性也越来越差.黑色吸收辐射金刚石层直接沉积在高纯金刚石片上,具有较高热导率和吸收率,并且该复合膜背面具有绝缘性.因此,该复合金刚石膜将提高辐射探测器在苛刻工作条件下的适应性及性能.

[1] Willson R C, Hudson H S 1991 *Nature* **351** 42  
 [2] Yu B X, Fang W, Yao H S, An Y, Gong C H, Li Z, Jin X F, Li D R 2004 *Chinese J. Space Science* **24** 119 (in Chinese) [禹秉熙、方伟、姚海顺、安玉、弓成虎、李哲、金锡峰、吕达仁 2004 *空间科学学报* **24** 119]  
 [3] Theocharous E, Deshpande R, Dillon A C, Lehman 2006 *J. Appl. Opt.* **45** 1093

[4] Lehman J H, Deshpande R, Rice P, To B, Dillon A C 2006 *Infrared Phys. Technol.* **46** 246  
 [5] Fang W, Jin X F 1992 *Acta Energiaris Solaris Sinica* **13** 406 (in Chinese) [方伟、金锡峰 1992 *太阳能学报* **13** 406]  
 [6] Yang Z P, Ci L, Bur J A, Lin S Y, Ajayan P M 2008 *Nano Lett.* **8** 446  
 [7] Vorobyev A Y, Guo C 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 041914

- [ 8 ] Kobashi K 2005 *Diamond Films* ( Holand : Elsevier ) p265
- [ 9 ] Davies G 1977 *Chemistry and Physics of Carbon* ( New York : Marcel Dekker ) p255
- [ 10 ] Clark C D , Collins A T , Woods G S 1992 *The Properties of Natural and Synthetic Diamond* ( London : Academic ) p35
- [ 11 ] Xiao J R , Xu H , Guo A M , Wang H Y 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 1810( in Chinese ) [ 肖剑荣、徐 慧、郭爱敏、王焕友 2007 物理学报 **56** 1810 ]
- [ 12 ] Qiu D J , Shi C R , Wu H Z 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 1870( in Chinese ) [ 邱东江、石成儒、吴惠桢 2002 物理学报 **51** 1870 ]
- [ 13 ] Su Q F , Liu J M , Wang L J , Shi W M , Xia Y B 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5145( in Chinese ) [ 苏青峰、刘健敏、王林军、史伟民、夏义本 2006 物理学报 **55** 5145 ]
- [ 14 ] Davies G 1977 *Phys. Chem. Carbon* **13** 1
- [ 15 ] Kalish R 1999 *Carbon* **37** 781
- [ 16 ] Chen G H , Zhang Y 2002 *Fabrication and application of diamond film* ( Beijing : Chemical Industry Press ) p87 ( in Chinese ) [ 陈光华、张 阳 2002 金刚石薄膜的制备与应用( 北京 : 化学工业出版社 第 87 页 ]
- [ 17 ] Miller A J , Reece D M 1997 *Diamond Rel. Mater.* **6** 386
- [ 18 ] Ekimov E A , Sidorov V A , Bauer , Melnik N N , Curro N J , Thompson J D , Stishov S M 2004 *Nature* **428** 542
- [ 19 ] Meng L , Zhang J , Zhu X D , Wen X H , Ding F 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 2334( in Chinese ) [ 孟 亮、张 杰、朱晓东、温晓辉、丁 芳 2008 物理学报 **57** 2334 ]
- [ 20 ] Mccord M A 1997 *J. Vac. Sci. Technol.* **15** 2125
- [ 21 ] Mei Y F , Siu G G 2004 *Phys. Lett.* **324** 479
- [ 22 ] Gu C Z , Jin Z S , Lu X Y 1997 *Thin Solid Films* **39** 124

## Study on the compound film of diamond for absorbing radiation \*

Liang Zhong-Zhu<sup>1)†</sup> Liang Jing-Qiu<sup>1)</sup> Zheng Na<sup>2)</sup> Jiang Zhi-Gang<sup>3)</sup> Wang Wei-Biao<sup>1)</sup> Fang Wei<sup>1)</sup>

1) *State Key Laboratory of Applied Optics , Changchun Institute of Optics , Fine Mechanics and Physics , Chinese Academy of Sciences , Changchun 130033 , China )*

2) *Northeast Institute of Geography and Agricultural Ecology , Chinese Academy of Sciences , Changchun 130012 , China )*

3) *State Key Lab of Superhard Materials , Jilin University , Changchun 130012 , China )*

( Received 12 February 2009 ; revised manuscript received 3 April 2009 )

### Abstract

The solar radiation has significant impact on the earth climate and environment , so it 's important to detect it . High thermal conductivity and high absorptivity material for absorbing radiation is highly needed to improve the performance of the radiation detector . The compound diamond films were deposited using microwave plasma chemical vapor deposition ( MW-PCVD ) and hot cathode direct current plasma chemical vapor deposition ( DC-PCVD ) methods . The absorptivity of the compound diamond film is 99%—99.2% . With the increase of the thickness of black diamond layer , the thermal conductivity of the compound diamond film decreases a little , but the thermal conductivity is always larger than 16 W/K·cm when the thickness of black diamond layer is less than 15  $\mu\text{m}$  and so it is still a high thermal conductivity material . The black diamond layer deposited on high purity diamond film by hot cathode DC-PCVD method has apparent wide Raman peaks at 1500—1600  $\text{cm}^{-1}$  and 1350  $\text{cm}^{-1}$  which correspond to non-diamond carbon phase . With the increase of methane , this non-diamond carbon phase also increases . As the non-diamond carbon phase , like graphite , increases , the transmissivity of the compound diamond films decreases . The black diamond layer deposited on the high purity diamond acts as the heat sink and has high surface adhesion property , and high thermal conductivity .

**Keywords :** absorbing radiation , optical materials , diamond , thermal conductivity

**PACC :** 7865 , 8115 , 8160H , 9260W

\* Project supported by the Development Program of Science and Technology of Jilin Province ( Grant Nos. 20080122 , 20090351 ) , the National Natural Science Foundation of China ( Grant No. 40803021 ) and the Funds of the Chinese Academy of Sciences for Key Topics in Innovation Engineering ( Grant No. 071Y32Q070 ) .

† E-mail : liangzz@ciomp.ac.cn