

# 单晶金刚石介电特性\*

李俊鹏 任泽阳<sup>†</sup> 张金凤<sup>‡</sup> 陈军飞 张涛 苏凯  
付裕 朱卫东 李静轩 张进成 郝跃

(西安电子科技大学, 芜湖研究院, 西安 710071)

(2025 年 10 月 22 日收到; 2025 年 12 月 24 日收到修改稿)

金刚石以其低介电损耗的优势在微波和深空观测窗口领域具有重要应用前景. 本文通过对不同物性的微波等离子体化学气相沉积设备制备的单晶金刚石开展介电特性测试, 结合双折射显微镜、拉曼、PL 和 XRD 等手段对单晶金刚石材料特性的表征结果, 系统研究了影响单晶金刚石介电损耗的关键因素. 测试得到单晶金刚石的介电损耗  $\tan\delta$  值最低达到  $4.94 \times 10^{-5}$ . 分析认为, 单晶金刚石介电损耗与金刚石内部缺陷分布、金刚石内部分层以及外电场作用下晶格振动引起的声子极化有关. 金刚石的缺陷密度是影响单晶金刚石介电损耗的主要因素, 随着测试频率提高, 缺陷极化损耗和界面极化损耗会进一步提高单晶金刚石的介电损耗. 金刚石内部的周期性缺陷可以一定程度上抑制声子极化损耗从而减小单晶金刚石介电损耗. 本研究能够为进一步提高金刚石的介电特性提供参考.

**关键词:** 金刚石, 介电特性, 拉曼光谱, X 射线衍射

**DOI:** 10.7498/aps.75.20251442

**CSTR:** 32037.14.aps.75.20251442

## 1 引言

金刚石因其高热导率<sup>[1]</sup>、高击穿场强<sup>[2]</sup>、强抗辐射能力<sup>[3]</sup>及低介电损耗<sup>[4]</sup>等优势, 在微电子器件<sup>[5,6]</sup>、辐射探测器<sup>[7]</sup>、量子计算<sup>[8]</sup>、微波和光学窗口<sup>[9]</sup>等领域均展现出独特的应用潜力. 在微波传输窗口应用中, 材料的介质损耗角正切值 ( $\tan\delta$ ) 是衡量其介电损耗水平的重要参数, 直接关系到器件的能量传输效率和信号完整性. 金刚石材料具有理想的电磁特性<sup>[10-12]</sup>, 尤其在毫米波及太赫兹频段, 天然金刚石及高品质化学气相沉积 (CVD) 金刚石理想的  $\tan\delta$  低至  $10^{-5}$ — $10^{-6}$  量级<sup>[13]</sup>, 相较于硅、砷化镓及氧化铝等传统材料具有显著优势. 此外, 金刚石因其出色的光学透明性和机械强度, 在大尺寸光学

级材料中也显示出巨大的应用前景, 特别是作为高功率激光系统和辐射防护中的光学窗口<sup>[14-16]</sup>. 低介电损耗不仅能够降低光学器件中能量传输过程的衰减, 还能有效减弱由热效应引起的光学畸变, 保证系统在高能量、高频率条件下的稳定性和精度. 因此, 研究和优化金刚石的介电损耗特性, 对于提升大尺寸光学级金刚石窗口的整体性能至关重要.

关于金刚石介电性能的应用已有很多报道. Liu 等<sup>[17]</sup>在 K 和 Ka 波段的 24 GHz 和 30 GHz 两个频率下, 采用分离谐振腔测量得到掺氮多晶金刚石薄膜的  $\tan\delta$  为  $10^{-4}$ — $10^{-5}$ , 最低可以达到  $3.0 \times 10^{-5}$ . Cuenca 等<sup>[18]</sup>使用分离谐振腔在 X 波段测量了多种不同形貌的多晶金刚石的介电损耗正切值. 与多晶金刚石相比, 无晶界的单晶金刚石在高频器件应用中具有更低的介电损耗. 近日, 上海征世科技股

\* 国家磁约束核聚变能发展研究专项基金 (批准号: 2019YFE03100200)、国家自然科学基金 (批准号: 62127812, 62374122, 62421005) 和安徽省重点研发项目 (批准号: 2023a05020006) 资助的课题.

<sup>†</sup> 通信作者. E-mail: zeyangren@xidian.edu.cn

<sup>‡</sup> 通信作者. E-mail: jfzhang@xidian.edu.cn

份有限公司实现了 2 in (1 in = 2.54 cm) 单晶的生长和批量产业化, 显著降低了英寸级大单晶的成本<sup>[19]</sup>. 随着大尺寸单晶金刚石生长技术和成本的不断突破, 单晶金刚石有望在微波窗口中得到更广泛的应用. Yamada 等<sup>[20]</sup> 利用“Tiled SCD 克隆”技术合成了尺寸大于 40 mm×40 mm 的 CVD 金刚石, 并利用 Fabry-Perot 谐振器首次表征了该 SCD 晶圆在 D 波段 (145 GHz) 的介电特性, 其  $\tan\delta$  最小可达  $2\times 10^{-5}$ . Jiang 等<sup>[21]</sup> 在 1 kHz—110 MHz 的频率范围内, 测量了单晶金刚石薄膜的介电性能, 并提出在频率低于 1 MHz 的主要介质损耗为电导率和空间电荷极化, 在 1—110 MHz 频率范围内主要介质损耗为电偶极子极化和电子弛豫极化.

深入研究单晶金刚石材料特性与金刚石  $\tan\delta$  之间的联系, 是实现面向金刚石材料在微波和射频器件、深空观测窗口等领域应用, 有针对性优化单晶金刚石生长工艺的重要支撑. 本研究通过对基于微波等离子体化学气相沉积 (microwave plasma chemical vapor deposition, MPCVD) 方法生长的单晶金刚石样品, 采用分离谐振腔法对其材料特性和介电特性进行表征, 通过系统对比得到影响单晶金刚石介电损耗的关键因素, 为高介电特性大尺寸单晶金刚石生长及其在微波窗口的应用提供指导.

## 2 实验与测试

本研究基于对 MPCVD 生长工艺制备的金刚石进行系统性的表征, 分析影响单晶金刚石材料介电损耗的主要原因. 所研究金刚石材料源自于上海征世科技股份有限公司采用 MPCVD 设备生长制备的大尺寸单晶金刚石, 共计 4 片. 4 片单晶金刚石

样品厚度为  $(700\pm 20)$   $\mu\text{m}$ , 样品面积均为  $10\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ , 样品后续切磨抛光工艺一致, 样品编号为 S1, S2, S3, S4.

本研究使用西安电子科技大学芜湖研究院的分离式谐振腔设备对金刚石样品进行介电常数和  $\tan\delta$  测量. 谐振腔法是一种常用的测试材料介电常数和  $\tan\delta$  的方法, 特别适用于高频和微波频率范围内的测量. 谐振腔通常为具有特定形状和尺寸的金属腔体, 可以产生谐振频率. 空腔内部会产生驻波场, 其谐振频率由腔体材料和几何尺寸决定. 在空腔内部引入测试样品, 其介电常数会影响谐振频率变化. 通过记录样品放入前后谐振频率的变化可以推导出样品的介电常数和介电损耗角正切. 测试设备符合标准《IPC-TM-650 2.5.5.13》. 分离式谐振腔的测量方法与传统的谐振腔测量方法相比, 可以有效地、无损地测量样品的介电常数和  $\tan\delta$ <sup>[22]</sup>.

本实验使用德国 WITec 扫描近场光学显微镜 (scanning nearfield optical microscope, SNOM) 对样品进行拉曼光谱以及光致发光 (photoluminescence, PL) 光谱测试, 设备型号为 Alpha300Rs, 测试采用的激光波长为 532 nm, 测量采用的光栅为 1800 g/mm. X 射线衍射 (XRD) 测试使用荷兰 Malvern Panalytical B.V. 公司生产型号为 X'Pert3 MRD 的 X 射线衍射仪. 所有的测试均在室温下进行.

## 3 结果与分析

利用分离谐振腔测试了金刚石单晶在 29 GHz 和 42 GHz 频率下的介电常数和  $\tan\delta$  值, 结果如图 1 所示.

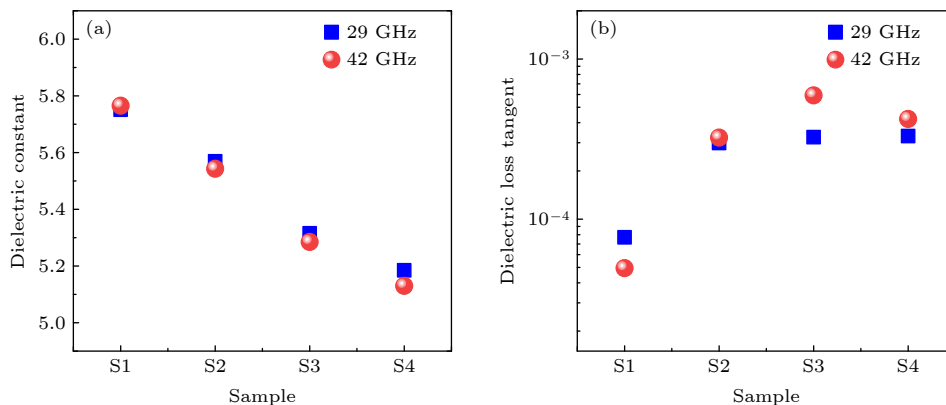


图 1 金刚石样品 (a) 介电常数; (b) 介质损耗角正切值

Fig. 1. Single-crystal diamond sample: (a) Dielectric constant; (b) tangent of the dielectric loss angle.

观察 4 块金刚石样品的介电常数表征结果, 可以发现, 不同频率下一块样品的介电常数变化不大, 但 4 个样品的介电常数之间存在较大差异. 样品 S1 与金刚石的理论介电常数 5.67<sup>[23,24]</sup> 最为接近, 并且样品 S1 介电损耗角正切值最小, 在 29 GHz 谐振频率测试环境下, 样品 S1  $\tan\delta$  为  $7.70 \times 10^{-5}$ , 在 42 GHz 频率测试环境下, 其测试值为  $4.94 \times 10^{-5}$ , 接近金刚石材料的理论介质损耗角正切值<sup>[13]</sup>. S2, S3 和 S4 三个样品  $\tan\delta$  均在  $10^{-4}$  量级, 其中样品 S3 在 42 GHz 谐振频率下的测试结果最大, 结果为  $5.93 \times 10^{-4}$ , 与样品 S1 相比存在明显的差距. 对比不同测试波段下样品  $\tan\delta$  的测试结果, 可以发现, 随测试频率提高, 只有样品 S1 的介电常数增大且  $\tan\delta$  减小, 其余样品介电常数均随频率的提高而减小, 同时  $\tan\delta$  值增大.

材料的导电性、极化机制、分子极性和热稳定性等材料性质是影响材料介电损耗的主要原因<sup>[25]</sup>. 由于单晶金刚石是超宽禁带半导体, 且晶体结构非常稳定, 所以导电性、分子极性和热稳定性对单晶金刚石介电损耗影响较小, 影响单晶金刚石介电损耗的主要原因是金刚石内部的极化机制. 在金刚石中, 碳原子之间具有强的共价键, 这意味着在金刚石内部电子极化、离子极化、电偶极子极化基本不会提高金刚石的介电损耗, 所以影响单晶金刚石介电损耗的主要因素是空间电荷极化损耗和声子极化损耗. 其中, 空间电荷极化损耗主要包括界面极化损耗和缺陷极化损耗<sup>[26]</sup>. 声子极化是指晶格中的原子在外电场作用下发生振动, 导致的极化现象<sup>[27]</sup>. 虽然金刚石的晶格结构非常紧密且坚固, 但声子极化仍然会影响其介电损耗, 从而对金刚石介电损耗产生一定的影响. 此外, 在不考虑金刚石极化机制产生介电损耗的情况下, 金刚石的介电损耗与测试频率之间的关系可以用如下公式表示<sup>[18]</sup>:

$$\tan\delta = \frac{\sigma}{2\varepsilon_r\varepsilon_0f},$$

式中,  $\sigma$  和  $\varepsilon_r$  为金刚石材料的电导率和相对介电常数,  $\varepsilon_0$  为真空介电常数.

为了进一步确定影响金刚石介电损耗的关键因素, 我们对 4 个金刚石样品进行光学双折射、PL 光谱、拉曼光谱和 XRD 测试表征. 图 2 为双折射测试结果. 当材料内部存在缺陷时, 折射率会沿着不同方向发生变化, 产生双折射效应, 在存在缺陷的区域, 材料的光学性质 (折射率) 会发生显著

的变化, 这些变化会增强光束的分裂程度, 从而导致更强的光学干涉, 最终表现为亮度增大. 从图 2 可以观察到, 样品 S1, S2 和 S3 的光学显微镜双折射形貌较为一致. 相较于样品 S1, S2 和 S3, 样品 S4 的双折射测试结果呈现出较多均匀分布的明亮区域, 明亮区域占比明显更高, 这说明样品 S4 的双折射效应最明显, 样品内部缺陷最多. 与此同时, 样品 S4 的介电常数也最小. 样品 S1 的暗色区域占比最高, 这意味着样品 S1 内部缺陷较少. 对比金刚石  $\tan\delta$  测试结果, 样品 S1 也有着最大的介电常数和最小的介电损耗. 从上述分析可以推断, 金刚石样品内部缺陷密度是影响金刚石介电常数和  $\tan\delta$  的原因之一.

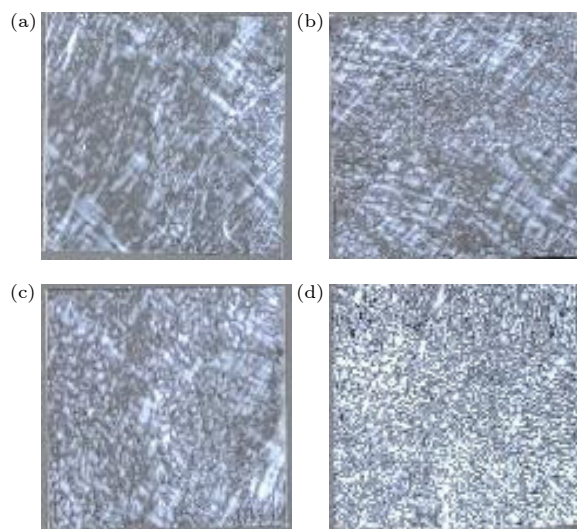


图 2 金刚石样品双折射测试结果 (a) S1; (b) S2; (c) S3; (d) S4  
Fig. 2. Results of birefringence test on diamond sample: (a) S1; (b) S2; (c) S3; (d) S4.

图 3 是样品的拉曼和 PL 测试结果. 由 4 个样品的拉曼测试结果可知, 4 块样品的拉曼特征峰半高宽值基本一致, 均在  $1.75 \text{ cm}^{-1}$  左右, 表明用来研究介电损耗的金刚石样品结晶质量良好. 对比 4 块样品的 PL 测试结果 (图 3(b), (c)), PL 光谱均只有金刚石特征峰, 且无显著的氮杂质相关的发光峰. 4 片金刚石样品都具有较低的杂质浓度. 从 PL 结果分析认为, 氮杂质并不是造成样品介电损耗差异的关键因素.

为了进一步研究缺陷对单晶金刚石介电损耗的影响, 对样品进行拉曼线扫描测试. 拉曼线扫描路径长 1 mm, 步长为  $2 \mu\text{m}$ , 测试点数量为 500 个. 观察 4 块样品的拉曼峰位置, 样品 S1 测试得到的

结果平均值小于  $1332\text{ cm}^{-1}$ , 呈拉应力状态. S2, S3 和 S4 三块样品测试平均值均大于  $1332\text{ cm}^{-1}$ , 呈压应力. 样品 S1 测试值与金刚石拉曼峰的理论值 ( $1332\text{ cm}^{-1}$ ) 最接近, 整体内应力最小, 这与双折射测试结果一致. 进一步计算样品拉曼峰值的方差 (图 4(e)), 样品 S1 的拉曼峰位置的方差最小, 说明样品 S1 的应力均匀性最好. 因为金刚石样品内部

杂质浓度较低, 所以我们认为在金刚石内应力主要源于金刚石内部缺陷. 通过上述分析可以得到, 样品介电特性与内部缺陷引起的应力的均匀性有关. 在  $29\text{ GHz}$  测试频率下, 样品的介电常数随着应力不均匀性的增大而降低, 样品的  $\tan\delta$  也随着应力不均匀性的增大而增大. 提高样品的应力均匀性是降低金刚石介电损耗的重要方法之一.

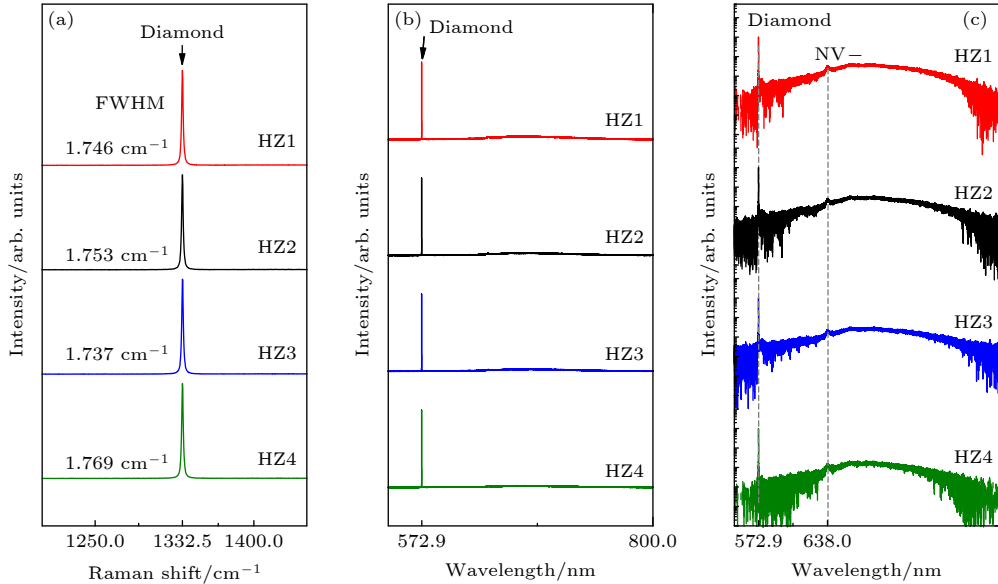


图 3 (a) 拉曼光谱测试结果; PL 光谱测试结果的 (b) 线性坐标和 (c) 对数坐标

Fig. 3. (a) Raman spectroscopy test results; (b) linear scale and (c) logarithmic scale of PL spectral test results.

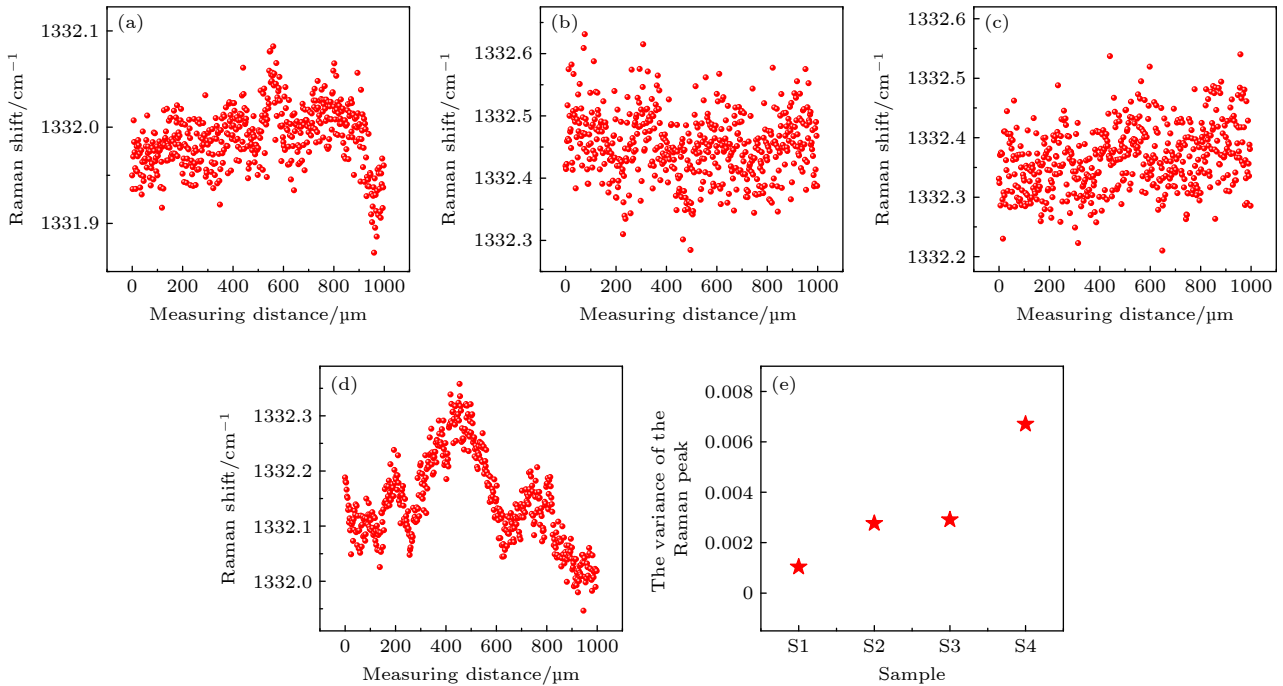


图 4 金刚石样品的拉曼线扫描测试-拉曼峰位测试结果 (a) S1; (b) S2; (c) S3; (d) S4; (e) 样品拉曼峰位置方差

Fig. 4. Raman line scanning test of diamond samples - Raman peak position test results: (a) S1; (b) S2; (c) S3; (d) S4; (e) variance of sample Raman peak position values.

随着测试频率增高至 42 GHz, 缺陷引起的介电损耗进一步提高, 但是内部缺陷最多的样品 S4 的  $\tan\delta$  没有明显提高, 反而样品 S3 的  $\tan\delta$  最高, 同时样品 S1 的  $\tan\delta$  进一步降低. 这意味着除金刚石内部缺陷外, 还有其他影响金刚石材料介电损耗的因素.

进一步分析样品拉曼线扫描测试的拉曼峰面积测试结果 (图 5). 可以观察到样品 S1 和 S4 的测试结果有一定的周期性规律, 沿着线扫描方向, 拉曼峰面积周期性的增大减小. 对样品 S1 和样品 S4 测试结果进行正弦拟合, 可以发现样品 S1 周期为 126.1  $\mu\text{m}$ , 样品 S4 周期为 84.8  $\mu\text{m}$ . 拉曼峰强度和半高宽是影响拉曼峰面积的主要因素, 由于所有样品的半高宽基本一致, 所以拉曼峰面积周期性变化主要是由金刚石拉曼峰强度变化导致.

根据上述 PL 测试结果以及本实验所有样品表面均是通过相同工艺进行抛光加工, 分析认为, 导致样品拉曼信号强度呈周期性变化的主要原因是由于金刚石内部存在周期性排列的缺陷, 因此导致在金刚石内部存在周期性分布的应力. 此外, 由于

我们样品测试的频率是 29 GHz 和 42 GHz, 经换算, 对应电磁波长分别约为 10344.8  $\mu\text{m}$  和 7142.9  $\mu\text{m}$ . 样品 S1 和 S4 的缺陷周期分别为 126.1  $\mu\text{m}$  和 84.8  $\mu\text{m}$ . 这说明金刚石内部的周期性缺陷与电磁波长的差距不能忽视. 周期性缺陷改变了金刚石的晶格结构, 可构建规则的“声子散射网格”并产生散射中心, 这会导致声子的局域化<sup>[28]</sup>. 局域化的声子不能有效地传播能量, 因此减小了材料内部的声子振动的传播损耗, 从而降低了声子极化损耗. 样品 S1: 29 GHz 对应的  $\lambda = 10344.8 \mu\text{m}$ ,  $d = 126.1 \mu\text{m}$ ,  $d/\lambda \approx 1/82$ ; 42 GHz 对应的  $\lambda = 7142.9 \mu\text{m}$ ,  $d = 126.1 \mu\text{m}$ ,  $d/\lambda \approx 1/56$ , 样品 S1 的声子极化损耗被抑制, 且 42 GHz 下效果更显著, 整体损耗降低. 样品 S4: 29 GHz 对应的  $\lambda = 10344.8 \mu\text{m}$ ,  $d = 84.8 \mu\text{m}$ ,  $d/\lambda \approx 1/122$ ; 42 GHz 对应的  $\lambda = 7142.9 \mu\text{m}$ ,  $d = 84.8 \mu\text{m}$ ,  $d/\lambda \approx 1/84$ , 在 29 GHz 测试环境下降低声子极化损耗, 无法降低样品 S4 的整体损耗. 随测试频率提高, 样品 S4 缺陷周期越接近电磁波波长, 周期缺陷对声子极化损耗抑制可以优化整体损耗, 即便样品 S4 具有很高的缺陷密度, 导致

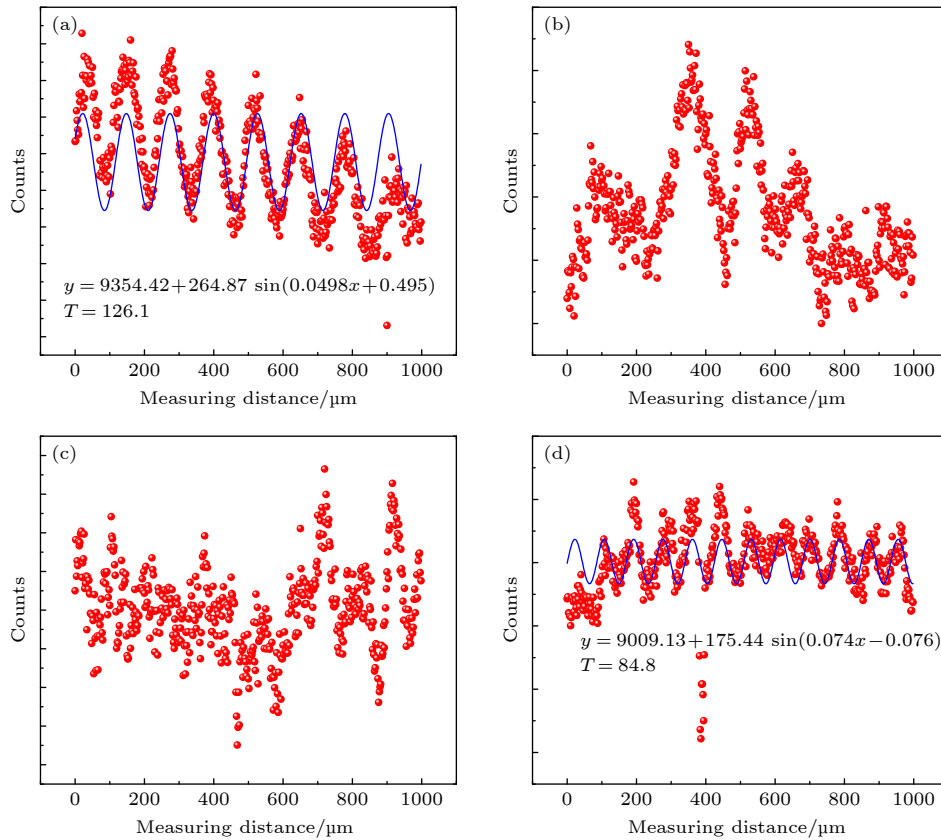


图 5 金刚石样品的拉曼线扫描测试-拉曼峰面积测试结果 (a) S1; (b) S2; (c) S3; (d) S4

Fig. 5. Raman line scanning test of diamond sample - Raman peak area test results: (a) S1; (b) S2; (c) S3; (d) S4.

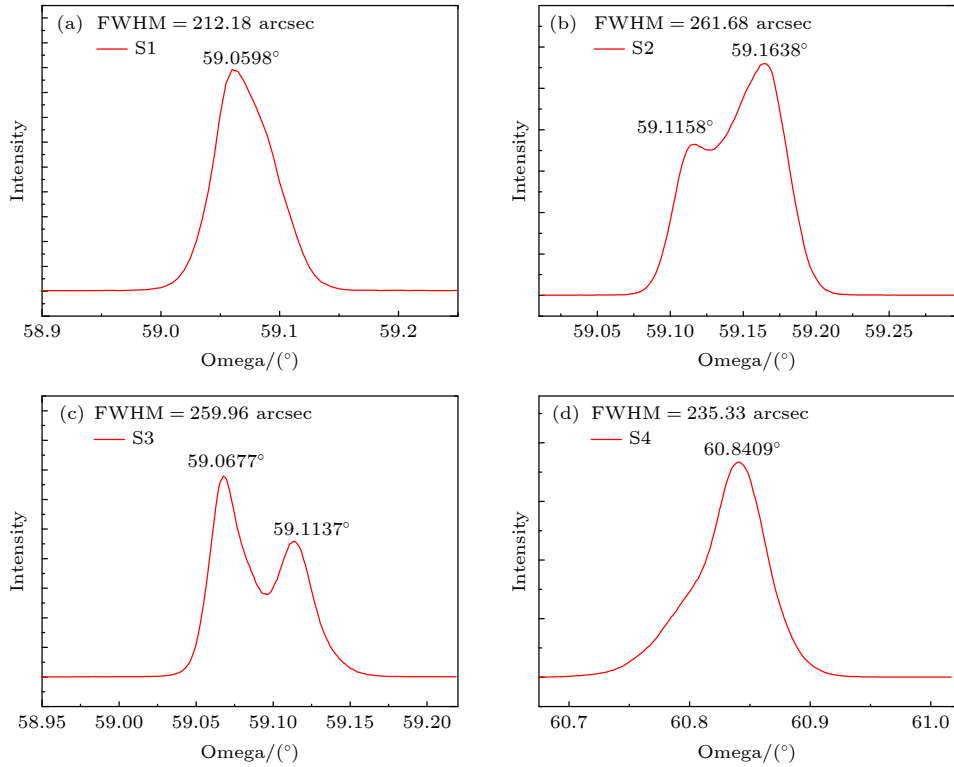


图 6 金刚石样品的 XRD (004) 摇摆曲线测试结果 (a) S1; (b) S2; (c) S3; (d) S4

Fig. 6. XRD test results of the diamond (004) crystal direction: (a) S1; (b) S2; (c) S3; (d) S4.

$\tan\delta$  有所上升, 但是上升幅度较小. 所以, 在能构建有效“声子散射网格”的前提下, 缺陷周期越接近电磁波波长越接近, 声子极化损耗越小. 测试结果证明, 具有较小的缺陷极化损耗和声子极化损耗的样品 S1 的  $\tan\delta$  随测试频率提高而降低, 这与 (1) 式相吻合. 然而, 具有较大缺陷极化损耗但是较小声子极化损耗的样品 S4 的  $\tan\delta$  有提高但是幅度较小. 未来我们也将进一步研究通过人为引入与测试频率电磁波长相近的周期性缺陷, 来实现针对特定频率的具有低介电损耗的单晶金刚石.

图 6 是 4 块样品 XRD (004) 晶向摇摆曲线的测试结果. 金刚石材料中可能存在的应变梯度或位错密度分布不均匀, 会引起晶体不同区域的晶格常数发生变化, 从而在 XRD 测试结果中就会出现双峰. 可以观察到样品 S2 和样品 S3 测试结果具有双峰结构, 说明样品内部有界面分层, 这会对样品的电磁特性有一定影响. 样品 S1 和样品 S4 测试结果呈现出单峰, 但是样品 S1 的峰对称性更好, 半高全宽更小, 这说明样品 S1 的结晶质量更高, 材料均匀性更好. 材料内部有界面分层的样品, 在测试时, 会在材料界面出现界面极化, 产生界面极化损耗, 从而提高金刚石的介电损耗, 其中最明显

的就是样品 S3. 这也可以解释样品 S3 随着测试频率提高, 金刚石介电损耗明显增大的现象. 由于样品 S2 内部也有分层的出现, 但是观察测试结果, 样品 S2 分峰现象比起样品 S3 要弱, 这也是随着频率提高, 样品 S2 介电损耗有提高但是提高不明显的原因. 样品 S3 和样品 S4 在 42 GHz 测试频率下的  $\tan\delta$  与样品峰位方差数据规律存在差异, 是由于样品 S3 存在分层现象, 存在界面极化损耗, 导致  $\tan\delta$  值随频率提高大幅升高, 同时样品 S4 存在周期性缺陷, 降低了声子极化损耗,  $\tan\delta$  值没有随测试频率提高而大幅提高.

## 4 结 论

本文研究了 MPCVD 法生长制备的厚度为  $(700\pm 20)$   $\mu\text{m}$ 、面积为  $10\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ 、具有良好电磁特性的单晶金刚石, 电磁特性最优的样品的  $\tan\delta$  最低可以达到  $4.94\times 10^{-5}$ . 本研究通过双折射、拉曼光谱、PL 光谱、XRD 表征 4 块单晶金刚石样品, 总结影响金刚石的介电损耗的原因. 由样品测试结果分析可知, 缺陷引起的缺陷极化损耗、金刚石内部分层引起的界面极化损耗以及外电场

作用下晶格振动引起的声子极化损耗是影响金刚石介电损耗的主要原因。在低频测试环境下,单晶金刚石的介电损耗与缺陷密度引起的内应力的均匀性成反比。随着测试频率提高,缺陷极化损耗和界面极化损耗会进一步提高单晶金刚石的介电损耗。与测试频率电磁波长相匹配的周期性缺陷,可以抑制单晶金刚石材料的声子极化损耗从而降低单晶金刚石介电损耗。未来已计划开展进一步的研究,通过在单晶金刚石内人为引入周期性缺陷以提高特定频率下单晶金刚石的介电特性,降低材料的介电损耗。

### 参考文献

- [1] Hu X F, Li M, Wang Y N, Peng Y, Tang G B, Wang X W, Li B, Yang Y Q, Xu M S, Xu X G, Han J S, Cheong K Y 2023 *Vacuum* **211** 111895
- [2] Kania D R, Landstrass M I, Plano M A, Pan L S, Han S 1993 *Diamond Relat. Mater.* **2** 1012
- [3] Boer W D, Bol J, Furgeri A, Müller S, Sander C, Berdermann E, Pomorski M, Huhtinen M 2007 *Phys. Stat. Sol. (a)* **204** 3004
- [4] Lu G, Bigelow L K 1992 *Diamond Relat. Mater.* **1** 134
- [5] Loto O, Florentin M, Masante C, Donato N, Hicks M L, Pakpour-Tabrizi A C, Jackman R B, Zuerbig V, Godignon P, Eon D, Pernot J, Udrea F, Gheeraert E 2018 *IEEE Trans. Electron. Dev.* **65** 3361
- [6] Ren Z Y, Chen W J, Zhang J F, Zhang J C, Zhang C F, Yuan G S, Su K, Lin Z Y, Hao Y 2019 *J. Electron Devices Soc.* **7** 82
- [7] Su K, Ren Z Y, Zhang J F, Liu L Y, Zhang J C, Zhang Y C, He Q, Zhang C F, Ouyang X P, Hao Y 2020 *Appl. Phys. Lett.* **116** 092104
- [8] Bradac C, Gao W, Forneris J, Trusheim M E, Aharonovich I 2019 *Nat. Commun.* **10** 5625
- [9] Le Sage D, Arai K, Glenn D R, DeVience S J, Pham L M, Rahn-Lee L, Lukin M D, Yacoby A, Komeili A, Walsworth R L 2013 *Nature* **496** 486
- [10] Garin B M, Parshin V V, Myasnikova S E, Ralchenko V G 2003 *Diamond Relat. Mater.* **12** 1755
- [11] Osipov A S, Klimczyk P, Rutkowski P, Melniychuk Y A, Romanko L O, Podsiadlo M, Petrusha I A, Jaworska L 2021 *Mater. Sci. Eng. B* **269** 115171
- [12] Rusevich L L, Kotomin E A, Popov A I, Aiello G, Scherer T A, Lushchik A 2024 *Opt. Mater.* **150** 115222
- [13] Scherer T A, Strauss D, Meier A, Mathis Y L, Judin V, Müller-Sebert W, Smirnov W, Nebel C 2011 *Materials Research Society Symposium Proceedings* (Warrendale, PA: Materials Research Society) p177
- [14] Schreck S, Aiello G, Meier A, Strauss D, Gagliardi M, Saibene G, Scherer T 2016 *Fusion Eng. Des.* **109–111** 1232
- [15] Ding M Q, Li L, Du Y H, Wu X P, Cai J, Feng J J 2017 *Diamond Relat. Mater.* **79** 173
- [16] Wang L, Zhou J H, Li S T, Lu C Y, Li Y F, Li H X, Yang J G, He Y M 2024 *J. Fusion Energy* **43** 1
- [17] Liu Y Q, Ding M H, Su J J, Ren H, Lu X R, Tang W Z 2016 *Diamond Relat. Mater.* **73** 114
- [18] Cuenca J A, Mandal S, Stritt J, Zheng X, Pomeroy J, Kuball M, Porch A, Williams O A 2024 *Carbon* **221** 118860
- [19] Zhu C Z, Du H B 2025 *J. Synth. Cryst.* **54** 531 (in Chinese) [朱长征, 杜洪兵 2025 *人工晶体学报* **54** 531]
- [20] Yamada H, Meier A, Mazzocchi F, Schreck S, Scherer T 2015 *Diamond Relat. Mater.* **58** 1
- [21] Jiang H, Wang J X, Gou L 2024 *Diamond Relat. Mater.* **149** 111642
- [22] Courtney W E 1970 *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **18** 476
- [23] Sussmann R S, Brandon J R, Scarsbrook G A, Sweeney C G, Valentine T J, Whitehead A J, Wort C J H 1994 *Diamond Relat. Mater.* **3** 303
- [24] Heidinger R, Dammertz G, Meier A, Thumm M K 2002 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **30** 800
- [25] Chen J D, Liu Z Y 1982 *Physics of Dielectrics* (Beijing: Mechanical Industry Press) (in Chinese) [陈季丹, 刘子玉 1982 *电介质物理学* (北京: 机械工业出版社)]
- [26] Scherer T A, Strauss D, Meier A, Mathis Y L, Judin V, Müller-Sebert W, Smirnov W, Nebel C 2011 *Materials Research Society Symposium Proceedings* (Warrendale, PA: Materials Research Society)
- [27] Guo W J, Ma Z Y, Chen Y G, Lu Y T, Yue Z X 2022 *J. Eur. Ceram. Soc.* **42** 4953
- [28] Elliott R J, Krumhansl J A, Leath P L 1974 *Rev. Mod. Phys.* **46** 465

# Dielectric properties of single-crystal diamond\*

LI Junpeng   REN Zeyang<sup>†</sup>   ZHANG Jinfeng<sup>‡</sup>   CHEN Junfei  
ZHANG Tao   SU Kai   FU Yu   ZHU Weidong   LI Jingxuan  
ZHANG Jincheng   HAO Yue

(Wuhu Research Institute, Xidian University, Xi'an 710071, China)

(Received 22 October 2025; revised manuscript received 24 December 2025)

## Abstract

Diamond holds significant application potential in microwave and deep-space observation windows due to its exceptionally low dielectric loss. This study aims to systematically investigate the key factors influencing the dielectric loss tangent ( $\tan\delta$ ) of single-crystal diamond (SCD) and to establish a relationship between its dielectric properties and material characteristics. To this end, dielectric properties of SCD samples synthesized using microwave plasma chemical vapor deposition (MPCVD) systems under different growth conditions are measured. A comprehensive material characterization is carried out using birefringence microscopy, Raman spectroscopy, photoluminescence, and X-ray diffraction to analyze crystal quality, defect distribution, and strain. The experimental results show that the measured  $\tan\delta$  values of the SCD samples all reach a minimum value of  $4.94 \times 10^{-5}$ . Detailed analysis reveals that the dielectric loss in SCD is attributed to a combination of factors: the density and distribution of internal defects (e.g., vacancies and impurities), the presence of internal growth sectors and boundaries, and phonon polarization losses induced by lattice vibrations under an external electric field. It is conclusively identified that defect density is the predominant factor governing dielectric loss. Furthermore, this study demonstrates that as the test frequency increases, contributions from defect polarization and interfacial polarization at sector boundaries become more pronounced, resulting in higher overall loss. Interestingly, it is found that some periodic defect structures can partially suppress the phonon-polarization related loss mechanism, thus helping to reduce the  $\tan\delta$  values in some samples. In summary, this work elucidates the multi-faceted origins of dielectric losses in SCD and provides valuable insights and methodological frameworks for guiding the synthesis and processing of diamond crystals with further enhanced dielectric properties, suitable for advanced microwave and terahertz applications.

**Keywords:** diamond, dielectric properties, Raman spectroscopy, X-ray diffraction

**DOI:** [10.7498/aps.75.20251442](https://doi.org/10.7498/aps.75.20251442)

**CSTR:** [32037.14.aps.75.20251442](https://cstr.cn/32037.14.aps.75.20251442)

---

\* Project supported by the National Special Fund for Magnetic Confinement Nuclear Fusion Energy R&D Program (Grant No. 2019YFE03100200), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 62127812, 62374122, 62421005), and the Anhui Provincial Key Research and Development Program, China (Grant No. 2023a05020006).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [zeyangren@xidian.edu.cn](mailto:zeyangren@xidian.edu.cn)

<sup>‡</sup> Corresponding author. E-mail: [jfzhang@xidian.edu.cn](mailto:jfzhang@xidian.edu.cn)



## 单晶金刚石介电特性

李俊鹏 任泽阳 张金凤 陈军飞 张涛 苏凯 付裕 朱卫东 李静轩 张进成 郝跃

### Dielectric properties of single-crystal diamond

LI Junpeng REN Zeyang ZHANG Jinfeng CHEN Junfei ZHANG Tao SU Kai FU Yu ZHU Weidong LI Jingxuan ZHANG Jincheng HAO Yue

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 060812 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20251442

CSTR: 32037.14.aps.75.20251442

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251442>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 多晶金刚石薄膜硅空位色心形成机理及调控

Formation mechanism and regulation of silicon vacancy centers in polycrystalline diamond films

物理学报. 2023, 72(3): 038102 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20221437>

#### 氢终端单晶金刚石反相器特性

Characteristics of hydrogen terminated single crystalline diamond logic inverter

物理学报. 2022, 71(8): 088102 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211447>

#### B<sub>2</sub>S<sub>3</sub>对[111]晶向高压合成金刚石的影响

Influence of B<sub>2</sub>S<sub>3</sub> additive on [111]-oriented diamond crystal synthesized under high pressure condition

物理学报. 2025, 74(8): 080701 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250028>

#### 碳离子注入金刚石制备氮空位色心的机理

Generation of shallow nitrogen-vacancy centers in diamond with carbon ion implantation

物理学报. 2022, 71(18): 188102 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220794>

#### 金刚石/碳纳米管异质界面热导及声子热输运特性

Interface thermal conductance and phonon thermal transport characteristics of diamond/carbon nanotube interface

物理学报. 2024, 73(13): 138102 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240323>

#### 掺杂B, Cr, Mo, Ti, W, Zr后金刚石中正电子湮灭寿命计算

Calculation of positron annihilation lifetime in diamond doped with B, Cr, Mo, Ti, W, Zr

物理学报. 2024, 73(1): 017802 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231269>