

微型X射线管金刚石光学窗口性能的模拟研究

邢义强^{1,2} 赵剑锟^{1,2} 李蔚成² 刘义保² 刘 薇² 姜 爽²

1(东华理工大学 放射性地质与勘探技术国防重点学科实验室 南昌 330013)

2(东华理工大学 核科学与工程学院 南昌 330013)

摘要 以侧窗式微型X射线管为例,采用蒙特卡罗(Monte Carlo)方法,对金刚石光学窗口的最优厚度进行了模拟研究。以管压为50 kV、管电流为1.0 mA的X射线管工况为例的模拟结果表明:增加金刚石窗口厚度,可使银靶的 K_{α} 特征X射线有效透射比和峰总比不断提高;在最优厚度为2.0 mm的条件下,高能X射线有效透射比为154.5%,K系特征X射线的透射比为74.5%,峰总比为27.9%。与铍光学窗口相比,在保证特征X射线透射比 T 相等的前提下,金刚石光学窗口有更高的有效透射比和峰总比,可以替代传统铍作为微型X射线管的光学窗口。

关键词 X射线管, 蒙特卡罗方法, 金刚石, 光学窗口

中图分类号 TL99

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.040201

Simulation study on the performance of micro X-ray tube with diamond optical window

XING Yiqiang^{1,2} ZHAO Jiankun^{1,2} LI Weicheng² LIU Yibao² LIU Wei² JIANG Shuang²

1(Fundamental Science on Radioactive Geology and Exploration Technology Laboratory, East China Institute of Technology, Nanchang 330013, China)

2(School of Nuclear Science and Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, China)

Abstract [Background] As a hot material, diamond has been widely used in various civil and military equipment with high hardness (Mohs hardness is 10), compressive strength (greater than 1.2 GPa), excellent thermal (thermal conductivity at room temperature is $20\sim 22\text{ W}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, thermal expansion coefficient at room temperature is only $(1.1\sim 1.3)\times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$), optical (higher transparency to X-rays) and electrical properties. Traditional optical window material beryllium is harmful to the human body and industrial hazards, its hardness, thermal conductivity and the thermal expansion coefficient are much lower than that of diamond. [Purpose] This study aims to explore the performance of micro X-ray tube with diamond optical window by simulation, obtain the best thickness of diamond for X-ray tube optical window and its shielding effect against low, medium and high energy X-ray. [Methods] The Monte Carlo method was used to calculate the effective transmission ratio, peak back ratio and transmission ratio of characteristic X rays with diamond optical window in high energy region. The X-ray tube with 50 kV tube voltage and 1.0 mA tube current was taken as an example to determine the optimal thickness of diamond. [Results] Simulation results show that the K_{α} characteristic X-ray effective transmittance and peak to total X-ray ratio of the silver target increase continuously with the increase of the diamond window thickness, and the optimum diamond

放射性地质与勘探技术国防重点学科实验室开放基金(No.RGET1912)、国家重大仪器专项(No.2017YFF0106503)、国家自然科学基金(No.11805032、No.41804114)、教育部产学研合作协同育人项目(No.202002088002)资助资助

第一作者: 邢义强, 男, 1997年出生, 2019年毕业于烟台大学, 现为硕士研究生, 主要从事核辐射探测仿真研究

通信作者: 赵剑锟, E-mail: martin1945@ecut.edu.cn

收稿日期: 2021-01-02, 修回日期: 2021-02-05

Supported by Open Fund Project of National Defense Key Subject Laboratory of Radioactive Geology and Exploration Technology (No.RGET1912), National Major Instrument Project (No.2017YFF0106503), National Natural Science Foundation of China (No.11805032, No.41804114), University-Industry Collaborative Education Program (No.202002088002)

First author: XING Yiqiang, male, born in 1997, graduated from Yantai University in 2019, master student, focusing on nuclear radiation detection simulation research

Corresponding author: ZHAO Jiankun, E-mail: martin1945@ecut.edu.cn

Received date: 2021-01-02, revised date: 2021-02-05

thickness is 2.0 mm. Under the optimal thickness of 2.0 mm, the effective transmittance is 154.5%, high-energy X-ray transmittance is 74.5%, and the characteristic X-ray peak back ratio is 27.9%. **[Conclusions]** Diamond can be used as a substitute for beryllium optical windows and has good application prospect.

Key words X-ray tube, Monte Carlo method, Diamond, Optical windows

铍作为传统的X射线管窗口材料,其硬度较低(莫氏硬度为4),在制作大面积窗口时,因管内外压强差较大,易破碎,并且铍表面的氧化膜对气密性影响较大^[1]。

金刚石作为热点材料,属于典型的面心立方结构(晶格常数为0.357 nm,键长为0.154 nm,键角为109°28'),是原子排列最紧密的材料($1.77 \times 10^{23} \text{ cm}^{-2}$)之一,具有很高的硬度(莫氏硬度为10)和抗压强度(大于1.2 GPa),以及优异的热学(室温热导率20~22 W·cm⁻¹·K⁻¹,室温热膨胀系数仅为(1.1~1.3)×10⁻⁶ K⁻¹)、光学(对X射线透明性较高)和电学性能^[2-4]。

现阶段,金刚石单线切割机、化学气相沉积(Chemical Vapor Deposition, CVD)等方法^[5-8]均已相当成熟,可以制备直径为50~150 mm的大面积金刚石薄膜。其封装工艺采用活性钎料钎焊(含活性金属Ti、Zr)的方法,可以有效提高封装管内部的真空度^[8-9]。目前,金刚石材料已广泛应用于红外窗口、高能激光武器窗口、高功率微波武器回旋管、行波管、光刻系统核心组件的制造^[2, 4-5, 8, 10-17]。因此,金刚石较好的X射线透明性和机械强度对于应用于微型X射线管窗口具有一定的研究价值。

本文通过蒙特卡罗方法计算K系特征X射线透射比 T 、高能射线有效透射比 T_e 和峰总比 P 等参数,研究金刚石光学窗口的最佳厚度,以期获得低能区间(0~5 keV)和中能区间(5~20 keV)的高屏蔽率和高能区间(20~30 keV)的高透射率(以下简称“阻低通高”)。

1 原理与方法

X射线管出射原级谱包含:韧致辐射连续谱^[18]、叠加在连续谱之上的特征X射线以及低能散射。低能韧致辐射和散射本底会对痕量元素的测量会产生不利影响^[19-20]。因此,需要采用合适的光学窗口来屏蔽X射线管的低能韧致辐射和低能散射射线。同时,尽可能提高较高能量射线(有效激发射线)的有效透射比^[21]。射线强度初始强度为 I_0 ,经过厚度为 t 的窗体后,束流强度将衰减为:

$$I = I_0 e^{-\mu \cdot t} \quad (1)$$

式中: μ 为线性吸收系数,cm⁻¹。表示单位厚度上的窗体原子与X射线发生相互作用的概率。

在一般情况下,物质对X射线的吸收作用使用质量衰减系数来表征,即X射线穿过单位面积内的物质质量时的线衰减系数。质量衰减系数由线衰减系数与物质密度相比得到:

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} \quad (2)$$

物质对X射线的吸收作用用质量衰减系数来表示,得到式(3):

$$I = I_0 e^{-\mu_m \cdot x_m} \quad (3)$$

式中: I_0 为初始射线计数率,s⁻¹; I 为经过光学窗口后的计数率,s⁻¹; μ_m 为质量衰减系数,cm²·g⁻¹; x_m 为质量厚度,g·cm⁻²;

根据截面的定义,线性吸收系数可由式(4)表示:

$$\mu = \sigma_x \cdot N = \sigma_x \cdot N_A \rho / A \quad (4)$$

式中: σ_x 为X射线与窗体原子发生相互作用的微观截面; A 代表窗体材料原子质量; N_A 代表阿伏伽德罗常数; ρ 为窗体材料密度,g·cm⁻³。

衰减系数由相应的质量光电吸收系数和质量散射系数构成。对大多数物质而言,X射线的线性光电效应吸收系数 τ 远大于线散射系数,对于微型X射线管,其X射线能量小于100 keV,X射线与物质的相互作用以光电效应为主,在计算过程中可将线性光电吸收系数作为总线性系数,得到式(5)和式(6):

$$\mu \approx \tau, \mu/\rho \approx \tau/\rho \quad (5)$$

$$\mu_m = \tau/\rho = K \cdot Z^m \lambda^n \quad (6)$$

式中: m 值固定, $m=4$; K 为常数,对于每个确定的元素, K 是确定的; n 对于不同的元素取值不同,但是一个常数,在2.5~3.5之间变化; λ 为波长,nm。

由式(6)可得,光学窗口原子序数越大,质量衰减系数越大;对于确定的光学窗口材料,质量衰减系数随X射线能量的增加而减小。

2 蒙特卡罗模拟

采用通用蒙特卡罗模拟软件MCNP (Monte Carlo N Particle Transport Code),参考丹东志达有限公司的侧窗式微型X射线管(XH502),构建了仿真模型,结果如图1所示,关键部件参数如表1所示。

模拟过程中,阳极靶倾斜角度为45°;电子的能量为50 keV,使用点源代替阴极钨丝,定向发射电子

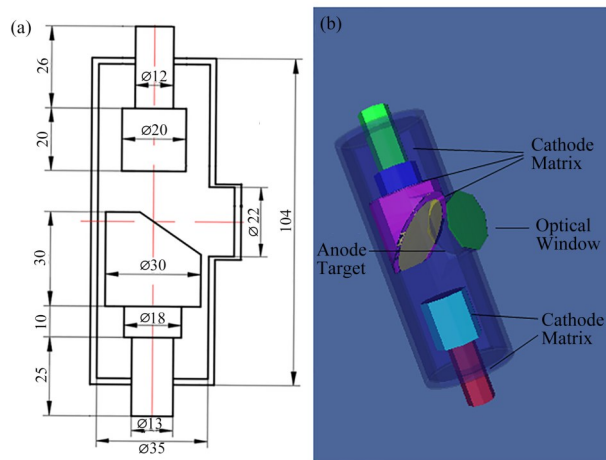


图1 X射线管结构 (a) 结构参数, (b) 3D 视图

Fig.1 Diagram of X-ray tube structure

(a) Structure, (b) 3D view

来模拟电子聚焦系统的准直效果; 抽样粒子数为X射线管的管电压为 50 kV、电流为 1.0 mA 工况下的电子数, 可由式(7)可得^[22]:

$$N = \frac{It}{e} = \frac{10^{-3} \times 1}{1.602 \times 10^{-19}} \approx 6 \times 10^{15} \quad (7)$$

式中: N 为抽样粒子数; I 为管电流, A; t 为X射线管运行时间, s; e 为一个电子所带电荷量, 为 1.602×10^{-19} ; 假设X射线管功率稳定, 本次模拟结果为功率 50 W 工况下的出射谱。

光学窗口的厚度作为本次模拟的变量, 采用 F1 卡作为数据采集器, 将两个 F1 卡分别定义在窗口内

表1 X射线管模型参数
Table 1 Model parameter of X-ray tube

名称 Item	材料 Materials
阳极靶 Anode target	银 silver
管体 Tube	玻璃 Glass
阴极基体 Cathode matrix	铜 Copper
阳极基体 Anode matrix	铜 Copper
光学窗口 Optical window	铍、金刚石 Beryllium and diamond

外两侧, 记录X射线管的原级谱和屏蔽后的出射谱。

3 实验结果

分别模拟了 0 mm (原级谱)、0.1 mm、0.25 mm、0.5 mm、1.0 mm、1.5 mm、2.0 mm、2.5 mm 和 3.0 mm 条件下, 铍、金刚石作为光学窗口的X射线出射谱。0~5 keV 能量范围的出射X射线能谱如图2所示。从图2(a)中看出, 随着铍光学窗口厚度的增加, Si-K 系(管体为玻璃, SiO_2)和 Ag-L 系特征X射线计数率下降明显, 当厚度达到 2.5 mm 时两个特征X射线计数率均降至 0, 当厚度达到 3 mm 时该能量区间只有 0.51% 的X射线通过窗口。由图2(b), 当金刚石厚度达到 0.25 mm 时两个特征X射线计数率均降为 0, 当厚度达到 1 mm 时该区间的X射线即可被完全屏蔽。

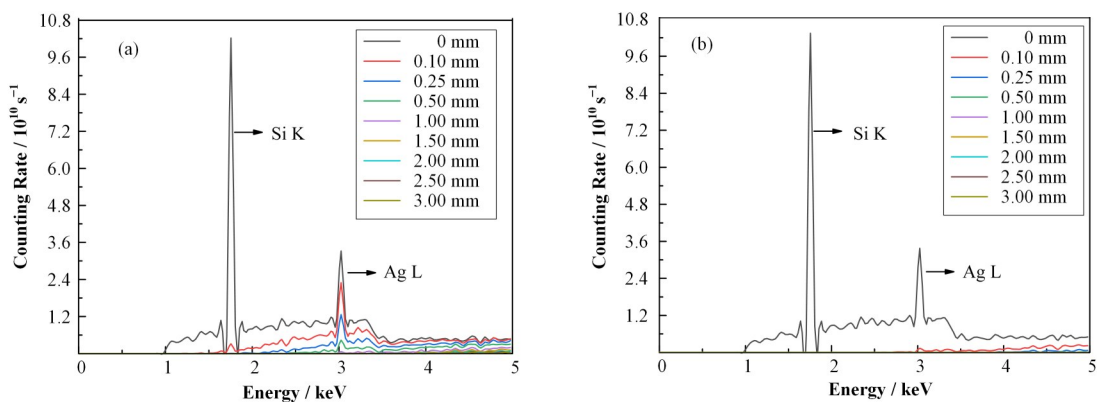


图2 不同材料和厚度下的0~5 keV 出射X射线能谱 (a) 铍, (b) 金刚石

Fig.2 Emission X-ray energy spectra in the range of 0~5 keV under different materials and thicknesses (a) Beryllium, (b) Diamond

5~20 keV 能量范围的出射X射线能谱及注量率如图3所示, 如图3(a)中铍对该能量区间中大于 10 keV 的X射线屏蔽效果不明显, 谱线仍叠加在一起; 铍光学窗口达到 3 mm 时, 该区间内的X射线仍有 61.88% 计数率; 如图3(b)所示, 金刚石对该能量

区间内小于 16 keV 的X射线屏蔽效果明显, 2 mm 时下降趋势已经减缓, 仅有 28.53% 的X射线射出口。如图3(c)为 5~20 keV 能量范围的X射线通过光学窗口的注量率, 通过铍光学窗口的注量率变化缓慢; 通过金刚石光学窗口的注量率随着厚度的增

加迅速减小,且注量率远小于铍。即说明金刚石光学窗口对5~20 keV能量范围的出射X射线屏蔽效果更好。

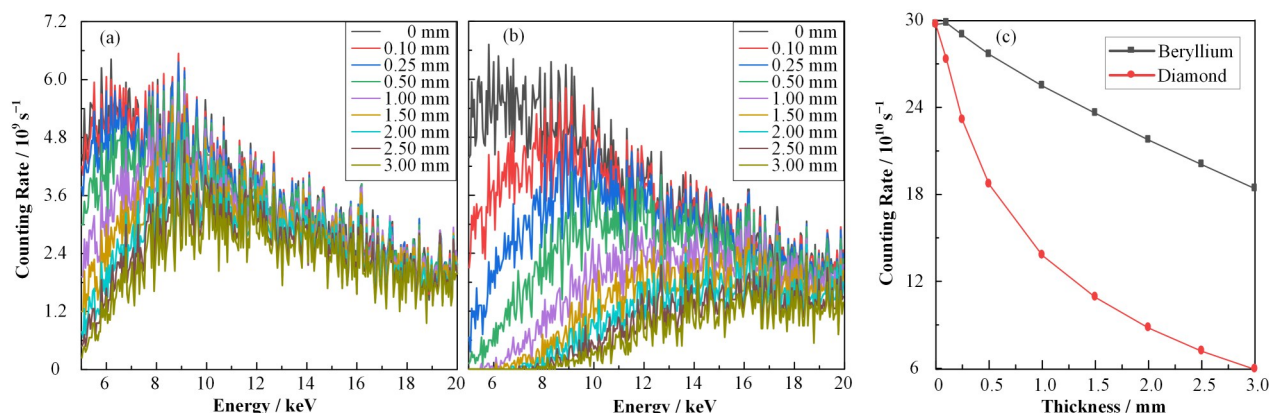


图3 不同材料和厚度下的5~20 keV出射X射线能谱及注量率 (a) 铍, (b) 金刚石, (c) 注量率
Fig.3 Emission X-ray energy spectra in the range of 5~20 keV and fluence rate under different materials and thicknesses (a) Beryllium, (b) Diamond, (c) Fluence rate

20~30 keV间X射线出射能谱如图4所示:该区域内有Ag的K系特征X射线(包括 $K_{\alpha 1}$:22.162 keV、 $K_{\alpha 2}$:21.988 keV、 $K_{\beta 1}$:24.942 keV、 $K_{\beta 2}$:25.452 keV)。特征X射线的计数率随着光学窗口的厚度增加而降低。相同厚度下,金刚石的屏蔽效果明显优于铍。因此,引入透射比 T 来表征不同厚度光学窗口对高能区间特征X射线的影响:

$$T = \frac{N'_{K_{\alpha}}}{N_{K_{\alpha}}} \times 100\% \quad (8)$$

式中: $N'_{K_{\alpha}}$ 为不同厚度条件下的 K_{α} 特征X射线总计数; $N_{K_{\alpha}}$ 为原级谱 K_{α} 特征X射线总计数。

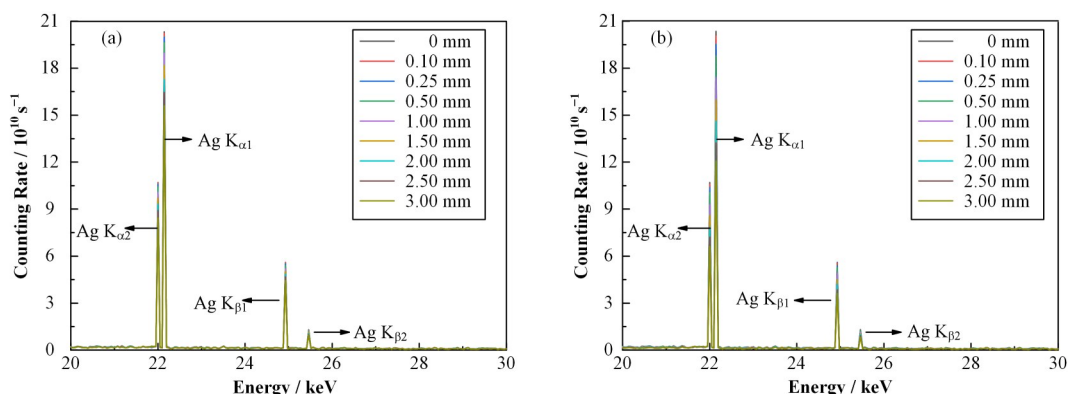


图4 不同材料和厚度下的20~30 keV出射X射线能谱 (a) 铍, (b) 金刚石
Fig.4 Emission X-ray energy spectra in the range of 20~30 keV under different materials and thicknesses (a) Beryllium, (b) Diamond

铍、金刚石作为光学窗口时的特征X射线的透射比 T 如图5所示,随着光学窗口厚度的增加,透射比 T 明显降低,铍光学窗口的透射比 T 下降速度明显低于金刚石光学窗口。3 mm厚度的铍光学窗口下Ag K_{α} 特征X射线仍能保持80%以上的计数率;对于金刚石,厚度为2 mm时Ag- K_{α} 特征X射线也可保证约74.5%的计数率。

为了进一步明确两种光学窗口对X射线的“阻低通高”的性能,通过出射谱峰总比 P 来表征不同光学窗口厚度对特征X射线的影响:

$$P = \frac{N_p}{N_T} \times 100\% \quad (9)$$

式中: P 为峰总比; N_p 为 K_{α} 、 K_{β} 特征X射线的计数率之和; N_T 为全谱计数率之和。

通过特征X射线的有效透射比 T_E 来表征不同厚度光学窗口条件下,能谱中高能射线的相对计数率,进而对比两种光学窗口对X射线的“阻低通高”的性能。

$$T_E = \frac{N_H}{N_{L+M}} \times 100\% \quad (10)$$

式中: T_E 为有效透射比; N_H 为高能区间计数; N_{L+M} 为

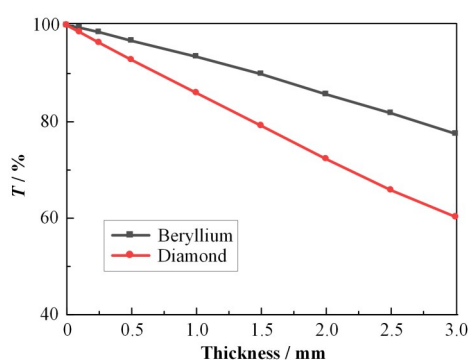
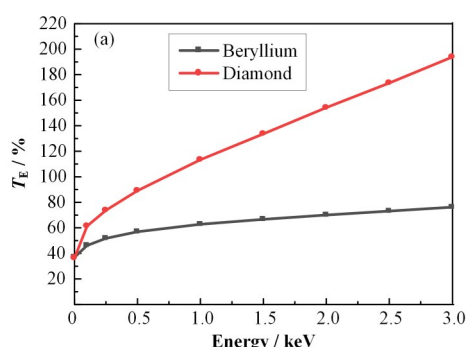


图5 不同光学窗口材料的特征X射线透射比

Fig.5 Transmittance of characteristic X-rays with different optical window materials

低能区和中能区计数之和。



由图6(a)可以看出,相同厚度条件下,金刚石的有效透射比 T_E 高于铍,且差值随着厚度的增加逐渐增大,说明:金刚石光学窗口的出射X射线中低、中能占比低于高能,且优于铍光学窗口。由图6(b)可看出,金刚石光学窗口的峰总比高于铍光学窗口,且随着厚度的增加铍光学窗口峰总比变化趋势缓慢,3 mm时仅比原级谱高5.2%;而金刚石光学窗口则增加比较明显,3 mm时比原级谱高13.5%。金刚石更能满足“阻低通高”的要求。

尽管厚度为3 mm的金刚石有效透射比 T_E 和峰总比 P 都要高于厚度为2 mm的金刚石,但此条件下 K_α 特征X射线的透射比较低,在兼顾“阻低通高”因素后,确定2 mm为50 kV微型X射线管金刚石光学窗口的最佳厚度。

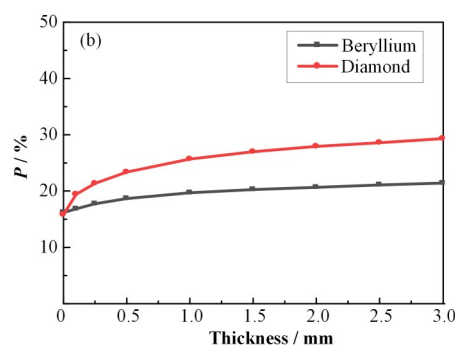


图6 不同光学窗口材料的特征X射线有效透射比(a)和峰总比(b)

Fig.6 Effective transmittance (a) and peak-to-total ratio (b) of characteristic X-rays with different optical window materials

4 结语

针对50 kV的侧窗式微型X射线管的金刚石滤光片厚度的选择,分别计算了不同厚度下,特征X射线的透射比 T 、峰总比 P 和高能区(20~30 keV)的有效透射比 T_E 。其中2 mm厚的金刚石光学窗口特征X射线的透射比 T 为76.5%,峰总比 P 为27.9%,有效透射比 T_E 为154.5%,能满足“阻低通高”的要求。且随着金刚石制备技术的迅猛发展,制作成本也会逐步降低,金刚石在X射线管光学窗口选材方面具有较好的应用价值。

参考文献

- 1 刘斌, 张晓梅, 黎花, 等. 铍窗封接结构设计与工艺实现[J]. 真空电子技术, 2016, (01): 30 - 33. DOI: 10.16540/j.cnki.cn11-2485/tn.2016.01.011.
LIU Bin, ZHANG Xiaomei, LI Hua, *et al.* Structure design and sealing technology of beryllium windows[J]. Vacuum Electronics, 2016, (01): 30 - 33. DOI: 10.16540/j.cnki.cn11-2485/tn.2016.01.011.

- 2 王伟华, 代兵, 王杨, 等. 金刚石光学窗口相关元件的研究进展[J]. 材料科学与工艺, 2020, 28(3): 42 - 57. DOI: 10.11951/j.issn.1005-0299.20200074.
WANG Weihua, DAI Bing, WANG Yang, *et al.* Recent progress of diamond optical window-related components [J]. Materials Science and Technology, 2020, 28(3): 42 - 57. DOI: 10.11951/j.issn.1005-0299.20200074.
- 3 毛敏耀, 亢昌军, 王添平, 等. 金刚石薄膜的光学透射率研究[J]. 物理学报, 1995, 44(09): 1509 - 1515. DOI: 10.7498/aps.44.1509.
MAO Minyao, KANG Changjun, WANG Tianping, *et al.* Optical transmission studies of diamond thin films prepared by microwave plasma chemical vapor deposition [J]. Acta Physica Sinica, 1995, 44(09): 1509 - 1515. DOI: 10.7498/aps.44.1509.
- 4 王光祖, 崔仲鸣. 金刚石膜的功能应用[J]. 超硬材料工程, 2020, 32(2): 23 - 26.
WANG Guangzu, CUI Zhongming. Functional application of diamond film[J]. Superhard Material Engineering, 2020, 32(2): 23 - 26.

- 5 曹倩雯. 金刚石膜及类金刚石膜的光学应用研究进展[J]. 智库时代, 2019, (33): 210 - 211.
CAO Qianwen. Research progress of optical application of diamond film and diamond-like carbon film[J]. Think Tank Era, 2019, (33): 210 - 211.
- 6 吴玉程. 金刚石薄膜制备方法与应用的研究现状[J]. 材料热处理学报, 2019, **40**(05): 1 - 16. DOI: 10.13289/j.issn.1009-6264.2018-0411.
WU Yucheng. Research trends of preparation and application of diamond film[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2019, **40**(05): 1 - 16. DOI: 10.13289/j.issn.1009-6264.2018-0411.
- 7 刘鲁生, 翟朝峰, 杨兵, 等. 金刚石薄膜连续制备的热丝化学气相沉积设备研制[J]. 真空, 2020, **57**(06): 1 - 4. DOI: 10.13385/j.cnki.vacuum.2020.06.01.
LIU Lusheng, ZHAI Zhaofeng, YANG Bing, *et al.* Development of hot filament chemical vapor deposition equipment for continuous diamond film preparation[J]. Vacuum, 2020, **57**(06): 1 - 4. DOI: 10.13385/j.cnki.vacuum.2020.06.01.
- 8 吕反修. 金刚石膜制备与应用-下卷[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
LYU Fanxiu. Diamond film preparation and application [M]. Beijing: Science Press, 2014.
- 9 徐超. CVD金刚石厚膜焊接工艺的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2003.
XU Chao. The research of brazing processing of CVD diamond thick film[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2003.
- 10 顾长志, 金曾孙. 金刚石膜的性质、应用及国内外研究现状[J]. 功能材料, 1997, **28**(3): 232 - 236. DOI: 10.1007/BF02947210.
GU Changzhi, JIN Zengsun. The characteristics and applications of diamond film and the researching status [J]. Journal of Functional Materials, 1997, **28**(3): 232 - 236. DOI: 10.1007/BF02947210.
- 11 李志良, 冯进军, 刘本田, 等. 140 GHz兆瓦级回旋管高斯模式输出窗设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2017, **15**(4): 534 - 538. DOI: 10.11805/tyda201704.0534.
LI Zhiliang, FENG Jinjun, LIU Bentian, *et al.* Design of Gaussian mode output windows for 140 GHz MW gyrotron[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2017, **15**(4): 534 - 538. DOI: 10.11805/tyda201704.0534.
- 12 Nöhammer B, Hoszowska J, Freund A K, *et al.* Diamond planar refractive lenses for third- and fourth-generation X-ray sources[J]. Journal of Synchrotron Radiation, 2003, **10**(2): 168 - 171. DOI: 10.1107/S0909049502019532.
- 13 Mahmood N, Mehmood M Q, Tahir F A. Diamond step-index nanowaveguide to structure light efficiently in near and deep ultraviolet regimes[J]. Scientific Reports, 2020, **10**(1): 18502. DOI: 10.1038/s41598-020-75718-x.
- 14 Thumm M. MPACVD-diamond windows for high-power and long-pulse millimeter wave transmission[J]. Diamond and Related Materials, 2001, **10**(9 - 10): 1692 - 1699. DOI: 10.1016/S0925-9635(01)00397-1.
- 15 Ying X T, Luo J L, Wang P N, *et al.* Ultra-thin freestanding diamond window for soft X-ray optics[J]. Diamond and Related Materials, 2003, **12**(3 - 7): 719 - 722. DOI: 10.1016/S0925-9635(02)00340-0.
- 16 张眯, 王从香, 牛通, 等. 金刚石/铝在微波功率组件中的应用研究[J]. 电子机械工程, 2020, **36**(4): 53 - 56. DOI: 10.19659/j.issn.1008-5300.2020.04.013.
ZHANG Mi, WANG Congxiang, NIU Tong, *et al.* Application of diamond/Al in microwave power modules [J]. Electro-Mechanical Engineering, 2020, **36**(4): 53 - 56. DOI: 10.19659/j.issn.1008-5300.2020.04.013.
- 17 贾鑫, 魏俊俊, 黄亚博, 等. 金刚石散热衬底在GaN基功率器件中的应用进展[J]. 表面技术, 2020, **49**(11): 111 - 123. DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.11.013.
JIA Xin, WEI Junjun, HUANG Yabo, *et al.* Application progress of diamond heat dissipation substrate in GaN-based power devices[J]. Surface Technology, 2020, **49**(11): 111 - 123. DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.11.013.
- 18 Hoff G, Streck E E, Lai A, *et al.* Using Geant4 Monte Carlo toolkit to evaluate a low power X-ray tube generator configuration[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2021, **168**: 109487. DOI: 10.1016/j.apradiso.2020.109487.
- 19 谷懿, 熊盛青, 葛良全, 等. 微型X射线管出射谱特征研究及Be窗厚度确定[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, **34**(1): 252 - 256. DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2014)01-0252-05.
GU Yi, XIONG Shengqing, GE Liangquan, *et al.* Research on spectral characteristic of miniature X-ray tube and determination of beryllium window thickness[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, **34**(1): 252 - 256. DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2014)01-0252-05.
- 20 左卓, 何兴, 张松, 等. 微型X射线管不同靶材出射光斑对比研究[J]. 核技术, 2020, **43**(10): 100401. DOI: 10.

- 11889/j.0253-3219.2020.hjs.43.100401.
- ZUO Zhuo, HE Xing, ZHANG Song, *et al.* A comparative study on the focus size of different target materials of micro target X-ray source[J]. Nuclear Techniques, 2020, **43**(10): 100401. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2020.hjs.43.100401.
- 21 王雷. 微型透射式X射线管滤光片设计[D]. 成都: 成都理工大学, 2016.
- WANG Lei. Design of miniature transmission X-ray tube filter[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2016.
- 22 杨强, 葛良全, 谷懿, 等. 微型X射线管靶材厚度理论计算与出射光谱模拟研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, **33**(4): 1130 - 1134. DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2013)04-1130-05.
- YANG Qiang, GE Liangquan, GU Yi, *et al.* Theoretical calculation and simulation research on micro X-ray tube target thickness and spectra[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, **33**(4): 1130 - 1134. DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2013)04-1130-05.