

# 新型 CVD 金刚石 X 射线探测器时间性能初步研究

侯立飞, 杜华冰, 车兴森, 韦敏习, 余波, 杨国洪, 刘慎业

中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900

**摘要** 在微带结构化学气相沉积(CVD)探测器的基础上,利用同轴结构输出部件结合隔离直流电路制作了单端连接同轴探测器,该探测器主要用于激光等离子体的 X 射线测量。探测器采用直径为 4 mm 的圆柱体 CVD 金刚石,金刚石一个端面镀有网格状电极,另一端镀有圆盘状电极。网格状电极既可保证正常施加偏压,也可使 X 射线直接照射至金刚石表面。在短脉冲激光装置上开展了探测器的时间响应特性实验,结果显示探测器上升时间为 61 ps。CVD 金刚石探测器的时间性能研究为探测器的优化改进奠定了基础。

**关键词** 探测器; 化学气相沉积; X 射线探测器; 网格状电极; 时间特性

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0704001

## Preliminary Study of Temporal Performances of a Novel CVD Diamond X-Ray Detector

Hou Lifei, Du Huabing, Che Xingsen, Wei Minxi, Yu Bo, Yang Guohong, Liu Shenye

Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

**Abstract** Based on the microstrip structure chemical vapor deposition (CVD) detectors, a coaxial detector with a single-ended connector has been manufactured using coaxial structure output components combined with isolated direct current circuits. The detector is mainly used for X-ray measurement of laser plasma. The detector uses a cylinder CVD diamond with the diameter of 4 mm. One end of the diamond is plated with a piece of grid electrode and the other end is plated with a piece of disc-shaped electrode. The grid electrode can ensure the normal application of the bias, but also allows X-ray to directly irradiate on the surface of the diamond. The temporal response performance experiment of the detector is tested on short pulse laser equipment. The results show that the rising time of the detector is 61 ps. The temporal performance study of CVD diamond detectors lays the foundation for the optimization of detectors.

**Key words** detectors; chemical vapor deposition; X-ray detector; grid electrode; temporal performance

**OCIS codes** 040.5150; 040.7480; 340.7480

## 1 引 言

在间接驱动激光聚变研究中,激光与黑腔高 Z 材料相互作用产生 X 射线,X 射线辐照靶丸,实现内爆点火。X 射线辐射流和辐射温度是激光聚变物理研究中的重要参数。在 X 射线辐射测量方面,X 光二极管(XRD)是主要的探测器件。XRD 线性范围大、易标定、响应快,不过其灵敏度较低,且与光子能量成反比<sup>[1-2]</sup>。

而另一种材料金刚石可用于 X 射线探测,以及  $\gamma$  射线、高能带电粒子与中子探测。金刚石光电导

探测器(PCD)的特点包括:载流子迁移率大,是硅的两倍,且介电常数较小,因此响应速度快;常温条件下漏电流较低;对原子转移的阻力较大,其转移阈值约为 43 eV,而硅为 20 eV;禁带宽度大,5.5 eV 的禁带<sup>[1]</sup>使其对可见光不响应,在激光聚变装置中,金刚石对基频与倍频激光的响应灵敏度很低;同时抗损伤能力良好,能够在高注量率、高辐照强度以及高温等严苛的环境下正常工作<sup>[1-3]</sup>。然而无论是天然单晶还是多晶金刚石,其成本都十分昂贵,且尺寸受限。但是随着化学气相沉积(CVD)技术的发展,金刚石探测器具有了良好的应用前景。CVD 金刚石

收稿日期: 2018-01-30; 收到修改稿日期: 2018-03-11

基金项目: 国家自然科学基金(11775203)、中国工程物理研究院院长基金(YZJLX 2016007)

作者简介: 侯立飞(1981—),男,硕士,副研究员,主要从事等离子体诊断方面的研究。E-mail: gulaoo@aliyun.com

探测技术可以作为 XRD 探测技术良好的补充。

在美国的国家点火装置与 Z-pinch 装置<sup>[1-2]</sup>以及软 X 光能谱仪 Dante 上集成了 CVD 金刚石探测器,其具有辐射源监测与通道瞄准的作用。另外,金刚石探测器也在惯性约束聚变实验中用于 X 光 Bangtime 测量与中子能谱的测量。在神光系列激光装置上,CVD 金刚石探测器也已经应用于 X 射线测量与中子诊断方面<sup>[4-7]</sup>。另外,上海大学、清华大学等高校也开展了 CVD 金刚石探测技术的研究<sup>[8-10]</sup>。

中国工程物理研究院激光聚变研究中心之前研制的 CVD 金刚石 X 射线探测器采用的是“三明治”微带结构。两条微带连接长方形金刚石的两个端面电极,然后通过同轴射频连接器及射频电缆分别与偏压电源和示波器相连<sup>[4]</sup>。该金刚石探测器在短脉冲激光装置上测得的上升时间达 60 ps,半峰全宽达 120 ps。而该探测器也已应用在神光 III 装置上,开展的 X 射线辐射流诊断实验结果表明:辐射流时间演化结果与软 X 光能谱仪测量结果一致。而且关于探测器也开展了灵敏度相对标定研究,可应用于 X 射线辐射流诊断。不过该探测器整体结构不够紧凑,通过微带施加偏压,存在安全隐患。为此,本文研发了一种新的单端连接同轴结构 CVD 金刚石探测器,并开展了时间性能的研究。

## 2 探测原理

金刚石作为光电导探测器,对于光激发的电子与空穴均视为载流子<sup>[9-10]</sup>。设定载流子浓度为  $n$ ,表示单位体积内载流子数目。载流子产生率为:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{P(t)}{\gamma V} - \frac{n}{\tau}, \quad (1)$$

式中: $P$  为吸收功率,表示单位时间内吸收的能量; $\tau$  为载流子寿命; $V$  为有效体积; $\gamma$  为产生一对电子空穴对所需的平均电离能。

假设激发光的脉冲时间远大于载流子寿命,则探测器的电流信号可表示为:

$$I = A \frac{e\mu V_0}{2\gamma L^2} \tau P, \quad (2)$$

式中: $A$  为探测器对辐射的吸收率; $e$  为电子电荷; $\mu$  为载流子迁移率; $V_0$  为偏压; $L$  为两电极间距离。根据(2)式可知探测器信号可反映输入的辐射源波形。

对于高斯分布的脉冲信号激发源,设  $\sigma$  为半峰全宽, $E_0$  为辐射在金刚石探测器灵敏区沉积的总能量,则探测器的电流<sup>[11-12]</sup>为:

$$I(t) = \frac{e\mu E_0 V_0}{2\gamma L^2} \times \exp\left(\frac{\sigma^2}{2\tau^2} - \frac{t}{\tau}\right) \times \left\{ \operatorname{erf}\left[\frac{1}{\sqrt{2}}\left(\frac{t}{\sigma} - \frac{\sigma}{\tau}\right)\right] + 1 \right\}, \quad (3)$$

令  $\frac{e\mu E_0 V_0}{2\gamma L^2} = C$ , 则:

$$I(t) = C \times \exp\left(\frac{\sigma^2}{2\tau^2} - \frac{t}{\tau}\right) \left\{ \operatorname{erf}\left[\frac{1}{\sqrt{2}}\left(\frac{t}{\sigma} - \frac{\sigma}{\tau}\right)\right] + 1 \right\}. \quad (4)$$

灵敏度  $S$  (单位为 A/W) 的公式如下:

$$S = e\mu\tau V_0 / (L^2 \gamma) = e\mu(\epsilon)\tau\epsilon / (L\gamma), \quad (5)$$

式中: $\epsilon$  为电场强度。

加入输出电压远小于偏压,则测得的信号即为输出信号;如果并非如此,则需对测量信号进行修正,真实的输出信号为:

$$V_{pc} = \frac{V_{out}}{1 - V_{out}/V_0}, \quad (6)$$

式中: $V_{pc}$  为修正后的输出电压信号; $V_{out}$  为实际测量的输出电压信号。

## 3 探测器结构

所提出的 CVD 金刚石探测器结构如图 1 所示。探测器采用圆柱体金刚石,其两个端面分别镀有网状电极与盘状电极。

金刚石网状电极示意图如图 1(b) 所示,网状电极面向辐射源,镀层为网状金膜。CVD 金刚石直径为 4 mm,厚度为 1 mm。网状电极的外径为 3.5 mm,其中心网直径为 2.6 mm,中心网占空比小于 20%,材料为 3  $\mu\text{m}$  厚的金膜。盘状电极为直径 3.5 mm、厚度 1  $\mu\text{m}$  的金膜。

探测器总体结构如图 1(a) 所示,其中连接环通过螺纹固定套接在外壳的前端,在外壳内中轴线上依次设置有垫片、金刚石、绝缘环、绝缘层,垫片、金刚石、绝缘环,其通过连接环压紧在外壳内。垫片与网状电极压紧连接。绝缘层与外壳固定连接。绝缘层内包裹有芯针,芯针穿过绝缘环与盘状电极连接。外壳末端设置有外接电缆的接头。绝缘环材料为聚四氟乙烯,外壳末端为 SMA 型接头,绝缘层材料为聚四氟乙烯,芯针与盘状电极连接点到外壳末端的阻抗为 50  $\Omega$ 。

探测器的工作流程如下:网状电极金刚石探测器外壳末端通过电缆与电阻电容(RC)隔直模块连接,RC 隔直模块通过电缆分别与偏压电源、示波器连接。偏压电源为金刚石施加偏压。脉冲 X 射线

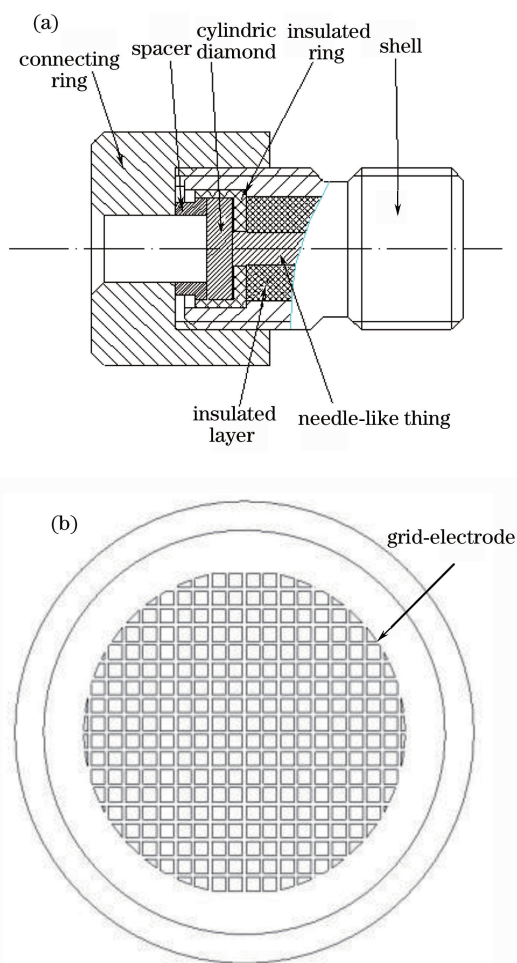


图 1 (a) CVD 金刚石探测器结构; (b) 金刚石网状电极  
Fig. 1 (a) Structure of CVD diamond detector;  
(b) diamond grid electrode

穿过连接环、垫片照射至金刚石,产生电子空穴对<sup>[11-14]</sup>,并在偏压电场的作用下产生电流。示波器通过 RC 隔直模块获取电压信号。根据公式  $F(t) = NV(t)/(R_0 R_e \Omega)$  能够计算得到辐射流随时间变化的结果,其中: $F(t)$  为辐射流; $N$  为信号衰减倍数; $R_0$  为示波器阻抗; $R_e$  为探测器响应函数; $\Omega$  为金刚石有效面积对应的立体角。

该探测器设置了网状电极,减小了对 X 射线的衰减,保证了低能 X 射线可以直接照射至金刚石,实现了惯性约束聚变领域的黑腔物理等实验研究中的 X 射线辐射测量。其同轴结构的设置更利于实现探测器的阻抗匹配,减小了测量信号失真。同时,较大面积的网状电极更易于瞄准,有利于灵敏度的标定与测量应用。

#### 4 探测器时间性能

探测器要应用于 X 射线辐射流测量,需要对其

时间性能进行研究。如果其时间性能与 XRD 相当,时间分辨能力达到 100 ps,即可满足现有激光聚变实验研究的需求。

##### 4.1 实验排布

CVD 金刚石探测器的时间性能研究是在短脉冲激光装置上进行的。实验排布如图 2 所示。激光器脉宽为 8 ps,波长为 266 nm。激光照射至探测器灵敏面。探测器通过 0.5 m 长微波电缆(型号:GAU6-SMMSMM-500,中国 Gwave Technology 公司)与 RC 隔直模块(型号:5531,美国 Picosecond Pulse Labs)连接。隔离器带宽为 10 GHz,上升时间为 35 ps(不大于 45 ps),最高输入偏压为 1.5 kV。隔离器高压输入端通过高压电缆与直流电源连接。实验时,直流电源为探测器提供 +200 V 的偏压。隔直模块的信号输出端通过 0.5 m 长的微波电缆与示波器连接。示波器带宽为 8 GHz。

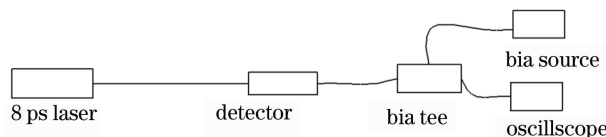


图 2 金刚石探测器时间性能实验排布图  
Fig. 2 Schematic for the temporal performance test of diamond detector

##### 4.2 实验结果与分析

CVD 金刚石探测系统测得的典型信号如图 3 所示。

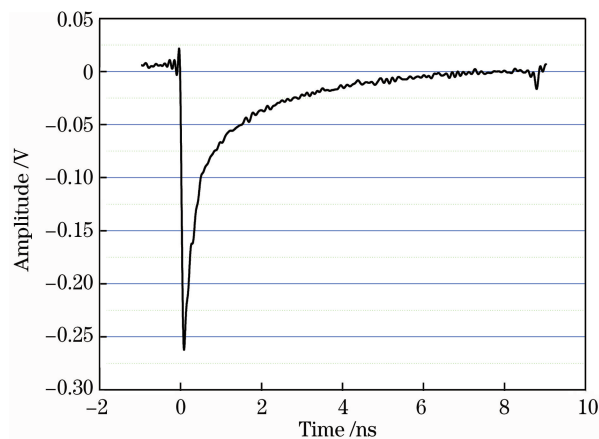


图 3 金刚石探测器时间特性实验典型信号  
Fig. 3 Typical signal for the temporal performance test of diamond detector

探测系统上升时间读取方法如下:从记录脉冲信号前沿峰值高度的 10% 处计算到峰值高度 90% 处止,为探测系统上升时间。从脉冲信号上升沿峰值高度的 50% 处起计算到信号下降沿峰值高度的

50%处止,为探测系统半峰全宽<sup>[15]</sup>。

金刚石探测器系统包括金刚石探测器、0.5 m 微波电缆、T型隔离器、0.5 m 微波电缆、示波器等。根据图 3,该探测系统上升时间为 61 ps,下降时间为 2.63 ns,半峰全宽为 357 ps。同样在 8 ps 激光装置上,测得的 XRD(偏压 2000 V)-电缆-示波器(8 GHz带宽)探测系统上升时间为 70 ps,半峰全宽为 95 ps。通过比较发现,金刚石探测器的上升沿时间优于 XRD,但是半峰全宽指标较差,约为 XRD 的 3.7 倍。

影响探测系统时间特性的元器件包括激光器、电缆、探测器以及隔离器与示波器,其中共 1 m 长的微波电缆对整体的时间特性贡献可忽略,系统上升时间  $\tau_s$  满足公式: $\tau_s = \sqrt{\tau_L^2 + \tau_D^2 + \tau_T^2 + \tau_{osc}^2}$ ,其中: $\tau_L$  为激光上升时间; $\tau_D$  为探测器上升时间; $\tau_T$  为偏压隔离器上升时间; $\tau_{osc}$  为示波器上升时间。10 GHz 带宽的 5531 偏压隔离器上升时间  $\tau_T = 35$  ps,8 GHz 带宽的示波器响应时间  $\tau_{osc} \approx 0.35/8$  ns = 44 ps,激光脉冲响应时间  $\tau_L = 4$  ps。金刚石探测器上升时间由 RC 常数决定,金刚石电容为 0.6 pF,RC 常数为 30 ps。因此,计算得到系统上升时间为 63 ps,与测量得到的上升时间一致。下降时间由金刚石载流子寿命决定。载流子寿命、载流子迁移率、电场强度决定了电荷收集距离。已知电场强度为 0.2 V/ $\mu$ m,载流子迁移率为 2000 cm<sup>2</sup>/(V·s),假定电荷收集距离为 100  $\mu$ m,得到载流子寿命为 2.6 ns,与下降时间一致。电荷收集距离表明了金刚石的质量,其说明下降时间较 XRD 大很多的主要原因是由 CVD 金刚石电子学特性引起的。在下一步工作中需要进一步研究 CVD 金刚石本身特性,优化改进探测器的时间性能,尤其是下降时间,以保证探测器在 X 射线能流测量中拥有更好的时间分辨能力。

## 5 结 论

在微带结构的基础上,设计制作了一种新的网状阴极同轴结构 CVD 金刚石 X 射线探测器。网状电极能保证正常施加偏压,同时不影响低能 X 射线直接照射至金刚石。该探测器为单端输出结构,利用偏压隔离器,可保证正常施加偏压,同时输出脉冲信号至示波器。该探测器主要用于激光等离子体的 X 射线测量。在 8 ps 激光器上开展的时间响应特性实验结果显示:探测系统上升时间为 61 ps,下降时间为 2.63 ns。通过分析认为影响下降沿的主要原因是金刚石本身的电子学特性。综上,CVD 金

石探测器的时间性能研究为探测器的优化改进奠定了基础。

## 参 考 文 献

- [1] Han S. New developments in photoconductive detectors [J]. Review of Scientific Instruments, 1997, 68(1): 647-652.
- [2] Spielman R B, Ruggles L E, Pepping R E, *et al.* Fielding and calibration issues for diamond photoconducting detectors [J]. Review of Scientific Instruments, 1997, 68(1): 782-785.
- [3] Wang L J, Liu J M, Su Q F, *et al.* Electrical properties of alpha-particle detectors based on CVD diamond films [J]. Acta Physica Sinica, 2006, 55(5): 2518-2522.  
王林军, 刘健敏, 苏青峰, 等. 金刚石膜  $\alpha$  粒子探测器的电学性能研究 [J]. 物理学报, 2006, 55(5): 2518-2522.
- [4] Hou L F, Li F, Yuan Y T, *et al.* Chemical vapor deposited diamond detectors for soft X-ray power measurement [J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(2): 1037-1142.  
侯立飞, 李芳, 袁永腾, 等. 化学气相沉积金刚石探测器测量软 X 光光谱 [J]. 物理学报, 2010, 59(2): 1037-1142.
- [5] Hou L F, Li Z C, Yuan Y T, *et al.* Relative calibration of chemical vapor deposited diamond X-ray detector [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(8): 1871-1873.  
侯立飞, 李志超, 袁永腾, 等. 化学气相沉积金刚石 X 射线探测器相对标定 [J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(8): 1871-1873.
- [6] Huang T X, Wang H B, Sun K X, *et al.* Measurement of soft X-ray power with a diamond detector [J]. Chinese Journal of Atomic and Molecular Physics, 1998, 15(1): 73-76.  
黄天暄, 王红斌, 孙可照, 等. 利用金刚石探测器测量软 X 光辐射功率 [J]. 原子与分子物理学报, 1998, 15(1): 73-76.
- [7] Ma H L, Liu Z L, Zheng Z J, *et al.* Natural diamond photoconductive X-ray detectors [J]. High Power Laser and Particle Beams, 1994, 6(3): 407-410.  
马洪良, 刘忠礼, 郑志坚, 等. 金刚石(IIa)光导 X 射线探测器 [J]. 强激光与粒子束, 1994, 6(3): 407-410.
- [8] Ouyang X P, Wang L, Fan R Y, *et al.* Preparation of diamond-film based radiation detector [J]. Acta Physica Sinica, 2006, 55(5): 2170-2174.  
欧阳晓平, 王兰, 范如玉, 等. 金刚石膜探测器研制



- [J]. 物理学报, 2006, 55(5): 2170-2174.
- [9] Wang L, Ouyang X P, Fan R Y, *et al.* A CVD diamond film detector for pulsed proton detection[J]. Chinese Physics B, 2008, 17(10): 3644-3648.
- [10] Liu J M, Xia Y B, Wang L J, *et al.* Study on preparation and properties of X-ray detector based on CVD diamond film[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2006, 26(5): 669-672.  
刘健敏, 夏义本, 王林军, 等. CVD 金刚石膜 X 射线探测器的研制及性能研究[J]. 核电子学与探测技术, 2006, 26(5): 669-672.
- [11] Turner R E, Landen O L, Bell P, *et al.* Achromatically filtered diamond photoconductive detectors for high power soft x-ray flux measurements[J]. Review of Scientific Instruments, 1999, 70(1): 656-658.
- [12] Kania D R, Pan L S, Bell P, *et al.* Absolute x-ray power measurements with subnanosecond time resolution using type IIa diamond photoconductors[J]. Journal of Applied Physics, 1990, 68(1): 124-130.
- [13] Kania D R, Pan L, Kornblum H, *et al.* Soft x-ray detection with diamond photoconductive detectors [J]. Review of Scientific Instruments, 1990, 61(10): 2765-2767.
- [14] Han S, Wagner R S, Joseph J. Chemical vapor deposited diamond radiation detectors for ultrahigh radiation dose-rate measurements: response to subnanosecond, 16-MeV electron pulses[J]. Review of Scientific Instruments, 1995, 66(12): 5516-5521.
- [15] Sun K X, Jiang S E, Yi R Q, *et al.* Research on time characteristics of soft X-ray diode [J]. Acta Physica Sinica, 2006, 55(1): 68-75.  
孙可煦, 江少恩, 易荣清, 等. X 射线二极管时间特性研究[J]. 物理学报, 2006, 55(1): 68-75.