

# 化学气相沉积金刚石探测器测量辐射驱动内爆的硬 X 射线\*

余波<sup>†</sup> 陈伯伦 侯立飞 苏明 黄天炬 刘慎业

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

(2012年8月25日收到; 2012年9月10日收到修改稿)

金刚石探测器具有响应快、灵敏度高、动态范围大、平响应、击穿电压高、抗辐射等优点, 广泛运用于 X 射线测量. 利用化学气相沉积方法制备的光学级金刚石, 采用金属-金刚石-金属结构研制了 X 射线金刚石探测器. 在 8 ps 激光器上的探测器响应性能考核表明, 整个探测器系统的响应时间为 444 ps, 上升时间为 175 ps, 载流子寿命为 285 ps. 将探测器应用于神光 III 原型装置的内爆物理实验硬 X 射线测量, 分别测量得到以注入黑腔的激光转化为主和靶丸内爆产生为主的硬 X 射线能流, 测得的峰值信号分别正比于激光总能量和反比于靶丸 CH 层厚度.

**关键词:** CVD 金刚石探测器, 硬 X 射线, 激光能量**PACS:** 81.05.ug, 52.70.La**DOI:** 10.7498/aps.62.058102

## 1 引言

在定量测量激光驱动惯性约束聚变实验的 X 射线能谱和能流中, 需要具有响应快、灵敏度高、动态范围大、平响应、击穿电压高的探测器, 而且还需要探测器具备在高温、高辐射和强电磁干扰条件下正常工作的能力.

目前常用的探测器中, 硅光二极管对可见光有响应, 且抗辐照能力较低; 真空 X 射线二极管的灵敏度很低, 且随光子能量的变化而变化. 相比于前两者, 金刚石探测器能够满足要求用于 X 射线测量. 金刚石禁带宽度宽 (5.5 eV), 杂散光对探测器影响小; 金刚石电阻率高 (大于  $10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ ), 室温下探测器漏电流较低; 金刚石介电常数小 (约 5.7), 电子、空穴迁移率高 (分别为  $2200 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$  和  $1800 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ ), 探测器响应速度快; 金刚石热导率高, 探测器热量能得到及时扩散; 探测器抗辐射能力强, 可以承受  $10^{15} \text{ cm}^{-2}$  的辐射而性能下降

很少; 金刚石击穿电压高.

鉴于金刚石探测器的诸多优点, 以及 20 世纪 90 年代化学气相沉积 (chemical vapor deposition, CVD) 方法制作大面积、低成本、高纯度、低缺陷金刚石的成功, 金刚石逐渐被用于各种辐射探测, 包括 X 射线<sup>[1-6]</sup>、高能带电粒子<sup>[7]</sup> 以及中子<sup>[8]</sup> 探测等. 其中, X 射线方面的应用包括: Z 箍缩和惯性约束聚变实验中软 X 射线诊断<sup>[1-3]</sup>、加速器 X 射线束位置监测<sup>[4]</sup>、医学中 X 射线剂量测量<sup>[5]</sup>、内爆物理的 X 射线 Bang Time 测量<sup>[6]</sup>. 在国内, 上海大学<sup>[7]</sup>、西北核技术研究所<sup>[9]</sup> 等单位在金刚石的研制和应用方面也取得很大进步.

本文利用 CVD 方法制成的  $10 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$  光学级金刚石, 采用金属-金刚石-金属结构研制了 X 射线探测器, 金属化电极是 60 nm/120 nm/1000 nm 的 Ti/Pt/Au. 通过 8 ps 激光器, 考察了探测器的时间响应, 并将探测器应用于神光 III 原型装置的内爆物理实验硬 X 射线测量, 考核了探测器应用.

\* 国家自然科学基金 (批准号: 11205142) 资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯作者. E-mail: yubobnu@163.com

## 2 探测器工作原理

金刚石探测系统主要由 CVD 金刚石探测器、高压电源、示波器三部分组成, 等效电路如图 1 所示. 高压电源为探测器的供电, 示波器显示和记录探测信号. 当射线束辐照金刚石时, 产生的载流子在偏压的作用下向两端电极漂移, 在外电路产生电信号. 由于脉冲辐射强度较大、时间短, 电路中的电流值有可能在瞬间超过高压源的上限电流值 (mA), 因而在电路中采用了电容  $C$ , 作为电路的电荷存储装置. 在电路接通情况下, 无辐照时, 高压源为电容充电; 当有辐照时, 探测器所在电路产生大量电流, 电容为探测器提供电荷.

探测器采用的单端、同轴输出方式, 既能减小体积, 又能阻抗匹配, 满足快响应要求. 电路中的电容和电阻实际组成了高速 T 形隔离器.

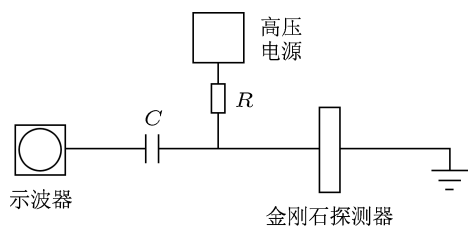


图 1 探测器等效电路图

X 射线与金刚石相互作用方式主要分为光电吸收、康普顿散射和电子对效应三种, 而 30 MeV 以下的 X 射线与金刚石作用主要为光电效应和康普顿效应. 金刚石中的碳原子之间以共价键结合, 内部没有自由电子存在, 因而金刚石是良好的绝缘体. 当 X 射线束流辐照到光电导模式金刚石探测器时, 在金刚石中沉积能量, 激发产生具有一定能量的光电子、康普顿电子, 光电子、康普顿电子在金刚石中沉积能量激发出电子-空穴对, 电子-空穴对在外电场作用下定向运动, 形成电流, 然后用灵敏电流计测量或者耦合成电压信号测量电流信号. 探测器的工作原理如图 2 所示.

将辐射激发的电子与空穴统一处理为载流子, 定义  $n$  为载流子浓度. 根据电荷守恒定律, 载流子变化率等于单位时间产生的载流子减去单位时间消失的载流子<sup>[10]</sup>, 即

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

其中,  $P$  为金刚石吸收功率,  $\tau$  为载流子寿命,  $V$  为金刚石有效体积,  $\gamma$  为产生电子-空穴对所需的平均电离能 13.3 eV. 假如入射脉冲信号是半高全宽为  $\sigma$  的高斯分布, 在探测器灵敏区沉积的总能量为  $E_0$ , 则有

$$n(t) = \frac{E_0}{2\gamma V} e^{\frac{\sigma^2}{2\tau^2} - t} \left[ \operatorname{erf} \left( \frac{1}{\sqrt{2}} \left( \frac{t}{\sigma} - \frac{\sigma}{\tau} \right) \right) + 1 \right]. \quad (2)$$

根据电流密度  $j = nev = ne\mu V/L$ , 并考虑载流子在电场作用下漂移至收集电极的时间, 得到探测器的电流信号为

$$I(t_0) = \int_{t_0}^{t_0+\tau} j(t) ds dt, \quad (3)$$

式中,  $\mu$  为载流子迁移率,  $V_0$  为极间偏压,  $L$  为极间距离.

假如激发脉冲时间远大于载流子寿命, 则得到探测器的电流信号为  $I = \frac{e\mu V_0}{\gamma L^2} \tau P$ , 由此可推导探测器灵敏度为  $\xi = \frac{e\mu\tau V_0}{\gamma L^2}$ . 对于  $10 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$  的 CVD 金刚石, 假设电荷收集距离  $d = \mu\tau E = 200 \text{ }\mu\text{m}$ , 则灵敏度  $\xi = 15 \text{ mC/J}$ .

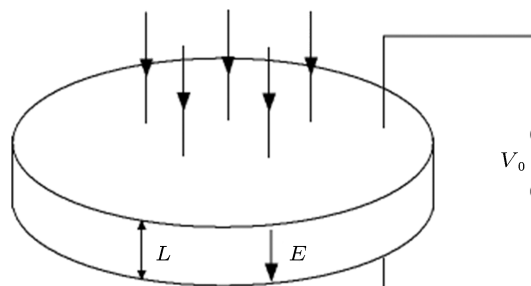


图 2 金刚石探测器工作原理示意图

金刚石探测器在探测电路中表现为受辐射激发的电阻, 阻抗随吸收功率增加而减小. 如果输出电压远小于偏压, 探测器阻抗可以忽略, 测得的信号即是输出信号; 如果输出电压相对偏压可比拟, 则需要对测得的电压信号  $V$  进行修正, 得到的真实输出信号为

$$V_{\text{out}} = V / (1 - V/V_0). \quad (4)$$

## 3 探测器响应研究

根据探测器的工作原理可知, 探测器的时间响应速度主要受金刚石的电荷收集距离和漂移速度决定. 金刚石中载流子迁移率快, 电子与空穴的迁

移率差距小, 因而时间响应快. 另外, 探测器的响应还包括反冲核的退激发速度, 电缆、T形隔离器和示波器的响应速度, 而金刚石缺陷会降低探测器的时间响应性能.

金刚石探测器的响应特性在 8 ps 激光装置上标定, 原理如图 3 所示. 脉冲宽度为 8 ps, 波长约为 263 nm 的激光照射在 CVD 金刚石产生载流子, 对探测器施加偏压收集电信号, 并通过电缆输出至 8 GHz 带宽的 DS080804B 示波器.

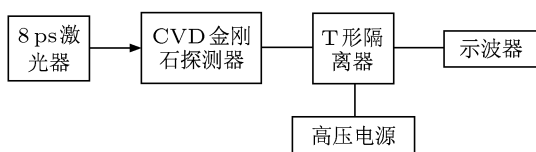


图 3 探测器标定原理图

两个探测器的响应特性标定结果如图 4, 4<sup>#</sup> 探测器系统在 1000 V 偏压时, 上升沿响应时间、下降沿响应时间和半高宽分别为 175 ps, 1.02 ns 和 444 ps, 而 5<sup>#</sup> 探测器系统分别为 177 ps, 1.24 ns, 501 ps.

探测系统上升沿响应时间  $\tau_s$  满足公式  $\tau_s = \sqrt{\tau_L^2 + \tau_D^2 + \tau_T^2 + \tau_{osc}^2}$ , 其中  $\tau_L$  为激光脉冲上升时间,  $\tau_D$  为探测器上升沿响应时间,  $\tau_T$  为 T 形隔离器上升沿响应时间,  $\tau_{osc}$  为示波器上升沿响应时间. 8 ps

激光脉冲上升沿响应时间  $\tau_L=4ps$ , T 形隔离器上升沿响应时间为 35 ps, 8 GHz 带宽的 DS080804B 示波器上升沿响应时间  $\tau_{osc} \approx 3 \text{ ns}/80 = 37.5 \text{ ps}$ , 因此, 4<sup>#</sup> 探测器上升沿响应时间为 167 ps. 可见, 影响探测系统上升沿响应主要是探测器本身. 另外, 探测器的偏压越大, 探测器的半高宽越小, 探测器响应越快.

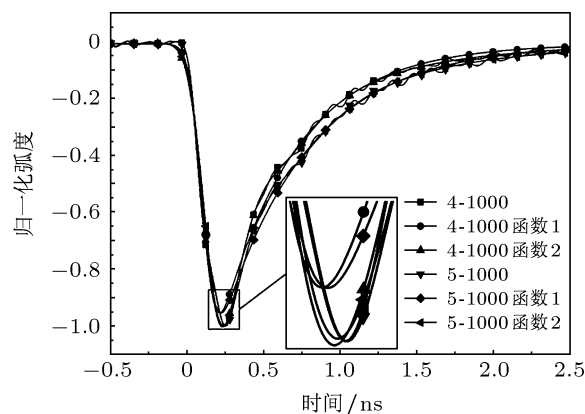


图 4 探测器的响应曲线以及拟合结果

探测系统的响应曲线拟合结果如图 4 所示, 函数形式根据 (3) 式和文献 [11] 选用高斯分布卷积指数式衰减形式, Fitting1 和 Fitting2 分别选用拟合函数 1 和 2 进行拟合. 拟合结果表明, 选用双指数衰减更符合实验结果.

$$\text{拟合函数 1 } y = a \times e^{-(x-b)/c} \times [1 + \text{erf}((x-d)/e)] + f; \quad (5)$$

$$\text{拟合函数 2 } y = a_1 \times e^{-(x-b_1)/c_1} \times [1 + \text{erf}((x-d_1)/e_1)] + a_2 \times e^{-(x-b_2)/c_2} \times [1 + \text{erf}((x-d_2)/e_2)] + f. \quad (6)$$

前面分析表明, 影响探测器响应曲线的因素包括金刚石的电荷收集距离和电子漂移速度, 反冲核退激发速度, 电缆、T形隔离器和示波器响应速度, 以及金刚石缺陷. 其中, 反冲核  $\alpha$  在金刚石退激发时间仅几 ps, 可忽略; 电缆、T形隔离器和示波器响应速度与整个探测器系统响应时间相比也可忽略; 金刚石电荷收集距离与电子漂移速度之比实际就是载流子寿命, 一般为几百 ps, 既会影响金刚石受激产生的载流子浓度分布, 又会影响载流子在电极的收集; 金刚石缺陷会降低载流子在电极的收集效率.

(2) 式是载流子浓度随时间的变化, 由入射激光光半高宽  $\sigma$  和载流子寿命  $\tau$  决定. 载流子在空间上可以看成是均匀分布. 在偏压作用下, 载流子向收集电极漂移, 距电极越远, 到达电极所需时间越长, 因此, 电荷收集最大距离由载流子寿命决定. 载流子在向电极漂移的过程中, 还会由于金刚石缺陷被俘获, 距电极越远, 被俘获的概率越高.

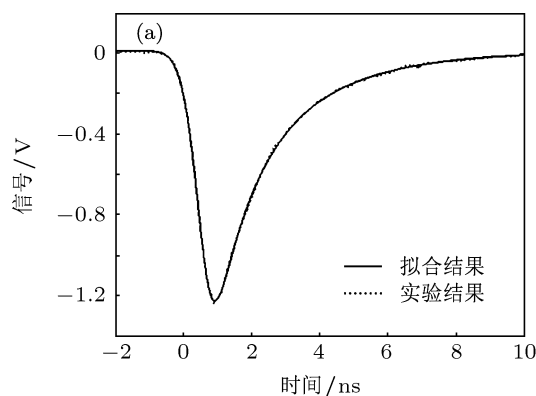
假定载流子收集效率和收集时间  $t$  的关系为  $(1/t)^x$ , 考虑载流子漂移和金刚石缺陷的探测器响应曲线拟合结果如图 5 所示. 对于 10 mm  $\times$  1 mm 的金刚石, 50  $\Omega$  匹配时 RC 为 200 ps, 因此, 曲线的

拟合范围是上升沿和前 200 ps 的下降沿. 拟合结果表明, 载流子寿命  $\tau$  为 285 ps, 收集效率曲线的指数为 0.5. 取载流子漂移速率为  $\mu = 2200 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ <sup>[10]</sup>, 在  $E = 1000 \text{ V/mm}$  时, 电荷收集距离  $d = 62.7 \text{ }\mu\text{m}$ . 标定结果和拟合曲线在上升沿和前 200 ps 的下降沿符合较好, 之后由于探测器系统的阻抗匹配等问题, 标定曲线出现振荡, 并逐渐偏离拟合结果.

#### 4 探测器实验应用

为了检测探测器的性能, 于 2012 年在神光 III 原型内爆物理实验期间进行了搭车考核. 探测器排布和标定时一样. 5<sup>#</sup> 探测器装在靶室上, 距靶点约 1.387 m, 金刚石片前面有 2 mm 的限孔、透过率 8% 的中性滤片、60  $\mu\text{m}$  的 Al 滤片, 耦合金属化电极, 能够透过 6 keV 以上的 X 射线; 4<sup>#</sup> 探测器装在靶室里, 距靶点 0.4 m, 金刚石前面是 4 mm 厚的 Al, 耦合金属化电极, 能够透过 20 keV 以上的 X 射线.

靶室上 5<sup>#</sup> 探测器 24-2 发测量结果和重建结果如图 6 所示. 图 6(a) 的 X 光信号正常, 说明探测



器工作正常; X 射线信号光滑, 说明探测器结构合理. 将实验数据用标定的响应曲线反卷积, 即得到 X 射线发射曲线. 图 6(b) 是靶室上 5<sup>#</sup> 探测器的重建结果, 其中 Fitting 是将实验数据拟合, 并用拟合的响应曲线重建结果, Origin 是直接由实验数据和响应曲线重建结果. 两种重建结果一致, 只是拟合之后曲线更光滑. 重建得到的 X 射线能流是单峰, 应该是激光注入黑腔产生的 X 射线在测量信号中占主体.

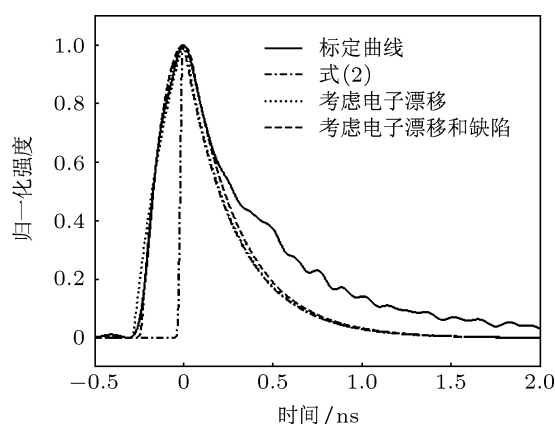


图 5 探测器的响应曲线与数值模拟比较

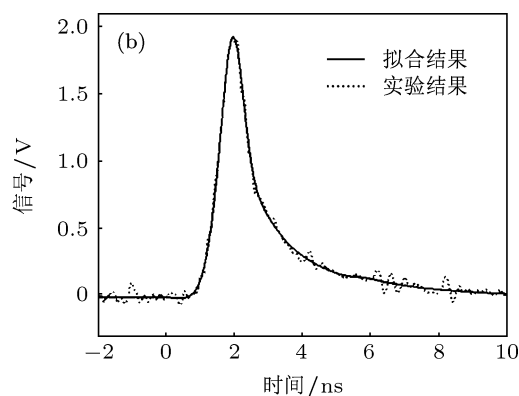


图 6 5<sup>#</sup> 探测器测量的 24-2 发数据 (a) 以及重建结果 (b)

靶室里 4<sup>#</sup> 探测器 24-2 发测量结果和重建结果如图 7 所示. 图 7(a) 的 X 射线信号正常、光滑. 图 7(b) 是靶室里 4<sup>#</sup> 探测器的重建结果, 其中 Fitting PSF 是将实验数据用拟合的响应曲线重建结果, Origin PSF 是直接由实验数据和响应曲线重建结果, 两种重建结果也一致. 重建得到的 X 射线能流在平台之后有一个峰, 前面的平台可能是激光注入黑腔产生的 X 射线, 而后面的峰可能是内爆产生的 X 射线峰.

将激光总能量、靶丸 CH 层厚度与探测器测量的峰值信号比较, 得到图 8 的结果. 为了比较, 需要将探测器的测量结果归一到偏压 1000 V 的情况, 对不同偏压的每发数据除以对应的电荷收集系数:  $\alpha(0.5 \text{ V}/\mu\text{m}) = 0.7$ ,  $\alpha(0.75 \text{ V}/\mu\text{m}) = 0.85$ ,  $\alpha(0.85 \text{ V}/\mu\text{m}) = 0.91$ ,  $\alpha(1 \text{ V}/\mu\text{m}) = 1$ ,  $\alpha(1.2 \text{ V}/\mu\text{m}) = 1.12$ <sup>[12]</sup>. 图 8 的比较表明, 5<sup>#</sup> 探测器随着激光总能量的增加, 峰值信号也随之增加, 进一步证实探测器测量的 X 射线主

要由注入黑腔的激光产生. 4<sup>#</sup> 探测器随着激光总能量的增加, 峰值信号随之增加的趋势不明显; 而峰值信号随靶丸 CH 层厚度增加而减小, 证实探测器

测量的 X 射线主要是靶丸内爆产生, 因为 CH 层越厚, 烧蚀层剩余的质量越大, 对内爆产生的 X 射线吸收越严重, 测量的峰值信号越小.

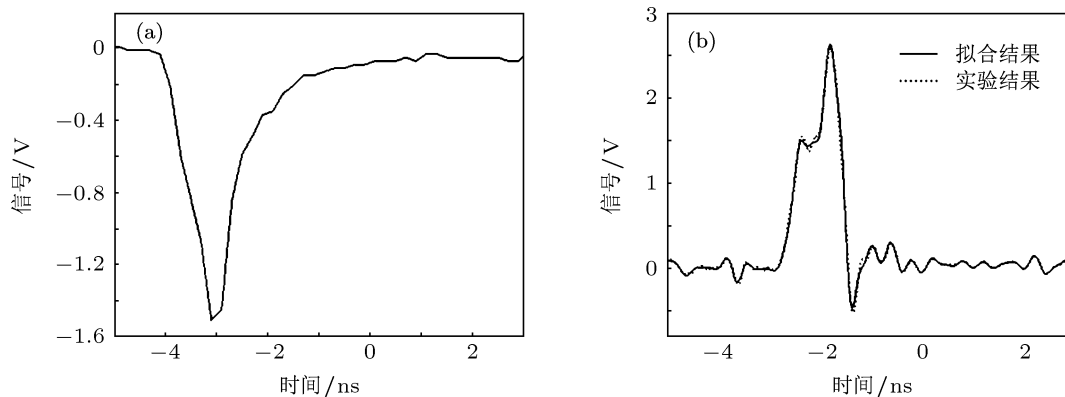


图 7 4<sup>#</sup> 探测器测量的 24-2 发数据 (a) 以及重建结果 (b)

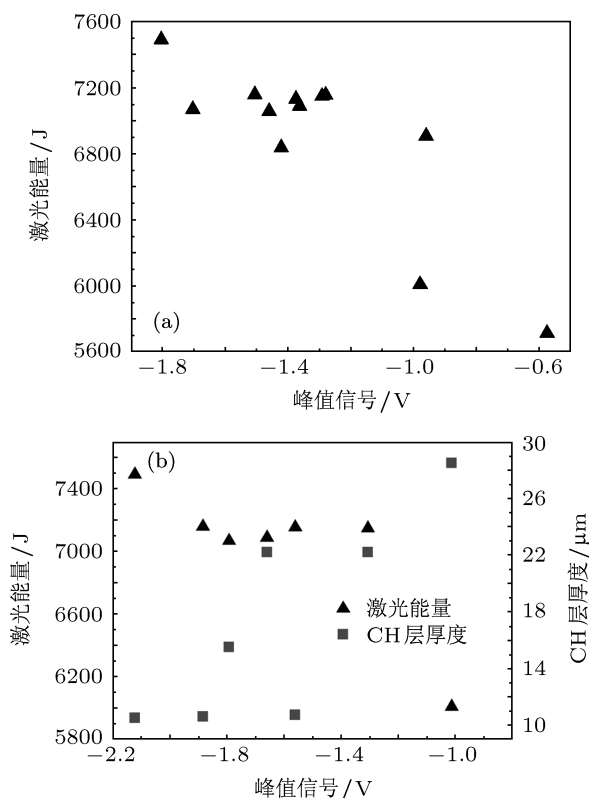


图 8 探测器峰值信号与激光总能量、CH 厚度比较 (a) 5<sup>#</sup>; (b) 4<sup>#</sup>

## 5 结论

本文利用化学气相沉积方法制备的光学级金刚石, 采用金属-金刚石-金属结构研制了 X 射线 CVD 金刚石探测器. 通过 8 ps 激光器考核了探测器响应性能, 结果表明整个探测器系统的响应时间为 444 ps, 上升时间为 175 ps, 载流子寿命为 285 ps, 证实探测器结构的可行性, 具有快响应特性. 将探测器应用于神光 III 原型装置的内爆物理实验硬 X 射线测量, 靶室上的 5<sup>#</sup> 探测器测量得到以注入黑腔的激光转化为主的硬 X 射线能流, 测得的峰值信号正比于激光总能量; 靶室里的 4<sup>#</sup> 探测器测量得到以靶丸内爆产生为主的硬 X 射线能流, 测得的峰值信号反比于靶丸 CH 层厚度.

本研究展示了 CVD 金刚石探测器的响应性能和初步应用, 结果令人鼓舞, 但同样还有很多工作需要进一步开展, 比如探测器的暗电流、电磁屏蔽和抗辐射等等, 通过这些工作, 将金刚石探测器的应用进一步向 X 射线 Bang Time 测量、中子飞行时间谱测量扩展.

[1] Spielman R B 1992 *Rev. Sci. Instrum.* **63** 5056  
 [2] Turner R E, Landen O L, Bell P, Costa R, Hargrove D 1999 *Rev. Sci. Instrum.* **70** 656  
 [3] Hou L F, Li F, Yuan Y T, Yang G H, Liu S Y 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 1137 (in Chinese) [侯立飞, 李芳, 袁永腾, 杨国洪, 刘慎业 2010 物理

学报 **59** 1137]  
 [4] Morse J, Salome M, Berdermann E, Pomorski M, Cunningham W, Grant J 2007 *Diamond & Related Materials* **16** 1049  
 [5] Bruzzi M, Menichelli D, Pini S, Bucciolini M, Molnar J, Fenyvesi A 2002 *Appl. Phys. Lett.* **81** 298

- [6] MacPhee A G, Edgell D H, Bond E J, Bradley D K, Brown C G, Burns S R, Celeste J R, Cerjan C J, Eckart M J, Glebov V Y, Glenzer S H, Hey D H, Jones O S, Kilkenny J K, Kimbrough J R, Landen O L, Mackinnon A J, Meezan N B, Parker J M, Sweeney R M 2010 *JINST* **6** 1
- [7] Wang L J, Liu J M, Su Q F, Shi W M, Xia Y B 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 2518 (in Chinese) [王林君, 刘建敏, 苏青峰, 史伟民, 夏义本 2006 物理学报 **55** 2518]
- [8] Schmid G J, Griffith R L, Izumi N, Koch J A, Lerche R A, Moran M J, Phillips T W, Turner R E, Glebov V Y, Sangster T C, Stoeckl C 2003 *Rev. Sci. Instrum.* **74** 1828
- [9] Lei L, Ouyang X P, Cao N, Zhang X P, Wang L, Zhong Y H 2009 *High Power Laser and Particle Beams* **21** 1083 (in Chinese) [雷岚, 欧阳晓平, 曹娜, 张显鹏, 王兰, 仲云红 2009 强激光与粒子束 **21** 1083]
- [10] Kania D R, Pan L S, Bell P, Landen O L, Kornblum H, Pianetta P, Perry M D 1990 *J. Appl. Phys.* **68** 124
- [11] Knauer J P, Gindele N C 2004 *Rev. Sci. Instrum.* **75** 3714
- [12] Dauffy L S, Koch J A 2005 *LLNL Report No.* UCRL-TR 216920

# Hard X-ray measurement for indirect-driven imploding by chemical vapor deposited diamond detectors\*

Yu Bo<sup>†</sup> Chen Bo-Lun Hou Li-Fei Su Ming Huang Tian-Xuan Liu Shen-Ye

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

(Received 25 August 2012; revised manuscript received 10 September 2012)

## Abstract

The diamond detector is used to diagnose X-ray and has the advantages of fast response, high sensitivity, large dynamic range, flat response, high breakdown field, and outstanding radiation hardness. The X-ray diamond detector with a metal-diamond-metal structure is developed, in which the optical grade diamond is synthesized by chemical vapor deposition (CVD) method. Through the calibration of response time on the pulse laser of 8 ps width, the full width at half maximum of the CVD diamond detector is 444 ps, the rise time of the detector is 175 ps, and the lifetime of the carrier is 285 ps. The detectors are used to measure the hard X-ray for the imploding experiment on SGIII-prototype equipment. The results indicate that the measured hard X-ray flux is produced mainly by laser and target imploding, and the peak signal is in direct proportion to the laser energy and in inverse proportion to the CH thickness of target.

**Keywords:** CVD diamond detector, hard X-ray, laser energy

**PACS:** 81.05.ug, 52.70.La

**DOI:** 10.7498/aps.62.058102

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11205142).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: yubobnu@163.com