

# CVD 金刚石辐射探测器研制及性能测试\*

周海洋<sup>†</sup> 朱晓东 詹如娟

(中国科学院基础等离子体物理重点实验室, 中国科学技术大学物理学院近代物理系, 合肥 230026)

(2009 年 6 月 5 日收到; 2009 年 6 月 28 日收到修改稿)

电学性质优异的金金刚石膜是理想的辐射探测器材料, 用自支撑金金刚石膜研制了辐射探测器, 进行了探测器的性能测试. 探测器采用的是“叉指”状共面型电极结构, 探测器的有效探测区面积为  $3\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ , 探测器的连接接口是 L16 电缆头. 探测器暗电流与电压呈线性变化的关系, 表明金属电极与金金刚石基底之间是欧姆型电接触. 当两电极之间的电场场强为  $30\text{ kV/cm}$  时, 探测器的暗电流仅约为  $0.1\text{ nA}$ , 探测器信号的上升时间为  $590\text{ ps}$ , 探测器的灵敏度约  $110\text{ mA/W}$ , 而且探测器有较好的剂量率线性特性.

**关键词:** CVD 金金刚石, 辐射探测器

**PACC:** 0670D, 2940

## 1. 引 言

由于优异的抗辐射性能, 金金刚石可以用作条件极端恶劣的辐射环境中工作的辐射探测器材料, 金金刚石膜辐射探测器的研制成了近年来 CVD 金金刚石应用研究的一个热点<sup>[1-4]</sup>. 与其他探测材料相比, 金金刚石具有许多非常优异的电学性质, 保证了金金刚石探测器能够具有优异的性能. 金金刚石的禁带宽度大 ( $5.5\text{ eV}$ )、电阻率高 ( $>10^{10}\text{ }\Omega \cdot \text{cm}$ )、介电常数小 (约 5.7), 保证了金金刚石器件的噪声小, 信噪比高. 金金刚石在从近紫外 ( $225\text{ nm}$ ) 到红外很宽的范围内几乎是透明的, 在使用过程中环境杂光对金金刚石探测器的影响极小, 无需加滤光片. 金金刚石的击穿电压高、载流子迁移率高, 这使得金金刚石辐射探测器可以承受比较大的工作电压, 电荷收集效率高、时间响应快. 金金刚石的热导率高, 使得金金刚石辐射探测器可以在室温, 甚至在比较高的温度下正常工作, 无需像硅探测器那样外加冷却系统. 此外, 金金刚石的原子序数  $Z=6$ , 与人体软组织的等效原子数  $Z_{\text{eff}} \approx 7.4$  非常接近, 而且金金刚石的密度比软组织大, 所以辐射束在相同质量的金金刚石和软组织内所损失的实际能量非常接近, 加之金金刚石无毒, 与组织液不会发生化学反应, 是理想的生物活体内置辐射剂量探测材料.

天然金金刚石中只有 IIa 型杂质含量少, 绝缘性好, 能用来制作光电导探测器. IIa 型金金刚石在天然金金刚石中含量极少, 仅占 1% 左右. 所以尽管性能优异, 金金刚石辐射探测器一直没能得到广泛应用. 高温高压 (HTHP) 法制备出的颗粒状金金刚石含有太多的杂质不适合探测器应用. 金金刚石探测器的广泛研制始于 CVD 金金刚石获得成功之后. CVD 金金刚石是连续膜, 突破了以往颗粒状金金刚石带来的尺寸限制, 而且通过调整 CVD 过程的工艺参数可以对金金刚石膜的性质进行优化, 使金金刚石辐射探测器的性能满足各种具体的探测要求.

## 2. 金金刚石辐射探测器的探测光电导特性的原理

金金刚石辐射探测器是利用金金刚石的光电导特性进行辐射测量的. 金金刚石的禁带宽度为  $5.5\text{ eV}$ , 当能量大于  $5.5\text{ eV}$  (波长小于  $0.22\text{ }\mu\text{m}$ ) 的入射光照到金金刚石上, 满带的电子被激发到导带, 并在满带留下一个空穴, 导带电子和满带的空穴可以自由移动 (统称为自由载流子), 使金金刚石的导电率增加, 这就是光致导电性<sup>[5]</sup>. 实际上, 自由载流子的激发过程包含了很多物理过程, 电子/空穴对的产生通常还伴随着光子产生, 产生一个电子/空穴对的

\* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2008CB717800) 和国家高技术研究发展计划 (批准号: 2003AA84TS18) 资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯联系人. E-mail: hyzhou@ustc.edu.cn

平均能量  $E_{e-h}$  比禁带宽度大. 对能量在 0.1—2.0 keV 范围内的软 X 射线, 由于光子能量远大于禁带宽度,  $E_{e-h}$  是个常数, 近似于 3 倍禁带宽度, 即  $16.5 \text{ eV}^{[6]}$ .

在没有光照射时, 金刚石内部也存在热激发的自由载流子, 当外加电场时, 热激发载流子的定向漂移形成暗电流. 对绝缘体金刚石来说, 热激发载流子的数量很小, 通常忽略不予以考虑, 自由载流子即专指光生载流子.

### 3. CVD 金刚石探测器的制备介绍

CVD 金刚石膜电学品质高是获得高性能金刚石辐射探测器的首要条件. CVD 金刚石厚膜采用等离子体化学气相沉积 (PCVD) 方法制备, 厚膜表面进行双面抛光以提高金刚石膜的电学品质<sup>[7]</sup>. 抛光后金刚石膜被切成  $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$  的辐射探测器的基片, 在基片表面上用半导体平面工艺制作 Ti/Au 电极, Ti 是为了使金属与金刚石之间形成欧姆型电接触, Au 则主要是充当 Ti 电极的保护层. 电极结构采用的是“叉指”状共面型电极, 指宽为  $20 \text{ }\mu\text{m}$ , 指距  $30 \text{ }\mu\text{m}$ , 有效探测区面积为  $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ .

金刚石膜金属化后的封装及电极的引出也是需要细致考虑的问题. 探测器的封装设计需要考虑到探测器的具体使用环境, 保证在实际的使用环境中可以稳定正常工作, 即保证电极引出线连接的稳定可靠, 接触电阻小. 同时需要考虑到探测器的安装和连接方便. 我们采用的封装连接如图 1 所示, 探测器的主体——金刚石膜在图中右端的金属体内, 采用的连接接口是 L16 电缆头.

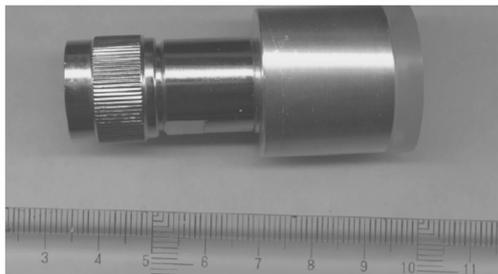


图 1 CVD 金刚石探测器外观图

金刚石探测器的高灵敏度和高信噪比与金刚石具有高电阻率的特性有密不可分的关系, 我们对金刚石膜双面抛光后的样品进行了电阻率测试. 通

常半导体材料的电阻率用探针法测<sup>[8]</sup>, 但是由于金刚石的电阻率超过了探针法的测量范围, 因此采用了测方块电阻进而推算金刚石膜电阻率的方法, 具体一点讲, 是在形状规则的金刚石膜上加直流电压, 用高灵敏电流计测出电流的大小, 根据电压、电流的大小得到金刚石膜的电阻, 然后根据金刚石膜的外形几何尺寸推算出电阻率. 我们的金刚石膜样品在外加  $10 \text{ V}$  直流偏压时, 电流小于  $0.1 \text{ pA}$  (超过了仪器的灵敏度范围), 由此推算出电阻率  $> 10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$ .

### 4. 金刚石探测器的性能测试

我们进行了 CVD 金刚石探测器的性能测试: 暗电流、灵敏度、时间响应、辐射剂量线性及谱响应特性等是探测器的几个重要性能指标.

#### 4.1. 暗电流

暗电流是探测器主要的电学性质之一, 指没有电离辐射辐照时在外加电场作用下探测器的本底电流, 要获得高信噪比首先要求探测器的暗电流小.

我们采用灵敏电流计测量了探测器的  $I-V$  特性曲线, 见图 2.  $I-V$  曲线的对称性表明金属电极与金刚石基底之间的接触是欧姆接触<sup>[9]</sup>, 当两电极之间的场强为  $30 \text{ kV/cm}$  时, 探测器的暗电流约为  $0.1 \text{ nA}$ . Han 等人制备的“叉指”型 CVD 金刚石探测器, 在  $5 \text{ kV/cm}$  的工作场强的暗电流约为  $1 \text{ nA}^{[10]}$ , 我们的 CVD 金刚石探测器的暗电流在更高的电场强度下还小一个量级; 天然 II a 型金刚石探测器在  $14 \text{ kV/cm}$  工作场强时的暗电流约为  $0.1 \text{ nA}^{[11]}$ , 与我们探测器的暗电流非常接近. 与现有的金刚石探测器相比, 我们的 CVD 金刚石探测器的暗电流比较

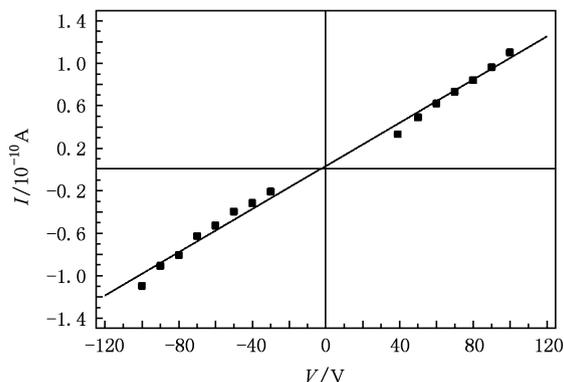


图 2 探测器暗电流随电压变化的  $I-V$  特性曲线

小,但是现在广泛使用的 X 射线探测器(X 射线二极管,XRD)的暗电流则是  $\sim 10^{-13}$  A,与之相比我们的 CVD 金刚石探测器的暗电流还是大了.

#### 4.2. 时间响应

我们用飞秒染料激光器对 CVD 金刚石探测器的时间响应特性进行了测试. 激光的波长为 365 nm,激光信号的上升沿时间为 15 ps,测量的实验安排见图 3.

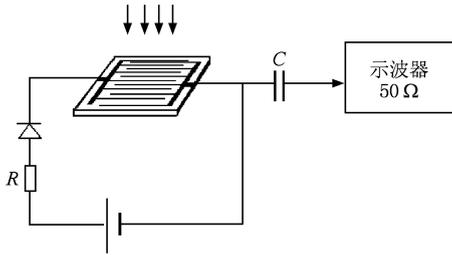


图 3 探测器时间特性测量的实验安排示意图

图 4 是外加电压为 100 V 时探测器在示波器上的输出信号,图中横向每格代表 500 ps,示波器输出信号的上升时间(信号从幅度的 10% 上升到 90% 所需的时间)约为 590 ps,由于激光信号的上升时间只有 15 ps,可以认为探测器的信号上升时间近似为 590 ps. 天然 II a 型金刚石探测器的时间响应约为 100 ps, XRD 的时间响应通常  $< 100$  ps. CVD 金刚石探测器的一个突出的优点是可以调整 CVD 金刚石的生长参数来优化探测器的电学性能,从而优化探测器的性能,现在国外通过对时间特性优化, CVD 金刚石探测器的时间响应已经可以优于 100 ps<sup>[1]</sup>.

#### 4.3. 灵敏度

灵敏度是探测器最主要的性能指标之一,探测器的灵敏度定义为探测器接受单位能量辐射后输出的电荷量. 通过与充氙平板电离室(DLS-504,有效探测面积为  $4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ ,工作电压 1000 V)的输出信号进行比照,利用下面的公式我们对探测器的灵敏度进行了标定:

$$S_D = S_{\text{电离室}} \left( \frac{I_D}{I_{\text{电离室}}} \right),$$

式中  $I_D, I_{\text{电离室}}$  分别是扣除本底电流后 CVD 金刚石探测器、充氙平板电离室的净信号电流,  $S_D, S_{\text{电离室}}$  分别是 CVD 金刚石探测器、充氙平板电离室的灵敏

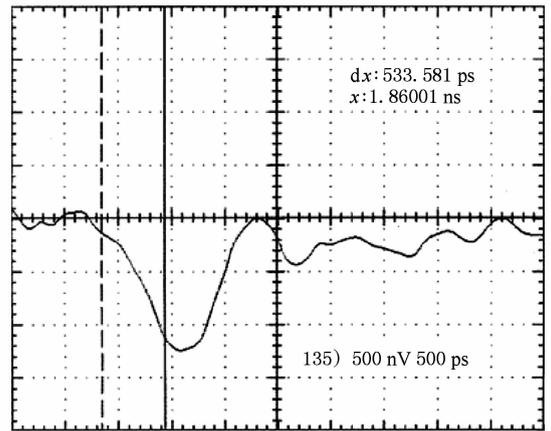


图 4 CVD 金刚石探测器输出的脉冲信号(横向每格代表 500 ps)

度. 灵敏度标定时采用的是 8 keV 的 X 射线(约  $1.5 \text{ \AA}$ ),充氙电离室对 8 keV 的 X 射线的灵敏度约为  $4.36 \times 10^{-2} \text{ A/W}$ . 由于充氙电离室的有效探测面积为  $4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ ,而我们的探测器有效探测面积约为  $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \times 0.6 = 5.4 \text{ mm}^2$ (乘以系数 0.6 是为了去掉探测区域电极的覆盖面积),探测器最终的灵敏度为

$$S'_D = 16S_D/5.4.$$

用高灵敏电流计记录充氙电离室/探测器的本底电流及 X 射线辐照后的输出信号,表 1 是氙电离室的工作电压 1000 V、测器工作电压为 50 V 和 100 V 时所测得的实验结果及用上面的两个公式计算出的 CVD 金刚石辐射探测器的灵敏度.

表 1 灵敏度标定的实验数据

X 射线源参数/kV, mA		15, 10	15, 20
充氙平板 电离室	本底电流/A	$5 \times 10^{-13}$	
	总输出电流/A	$0.32 \times 10^{-9}$	$0.68 \times 10^{-9}$
CVD 金刚 石探 测器	工作电压 50 V	本底电流/A	$2.6 \times 10^{-11} \text{ A}$
	100 V	总输出电流/A	$0.28 \times 10^{-9}$
		灵敏度/ $\text{mA} \cdot \text{W}^{-1}$	101
100 V	工作电压	本底电流/A	$8 \times 10^{-11}$
	100 V	总输出电流/A	$0.39 \times 10^{-9}$
		灵敏度/ $\text{mA} \cdot \text{W}^{-1}$	125

我们制备的 CVD 金刚石探测器在  $\sim 33 \text{ kV/cm}$  工作场强(即工作电压为 100 V)时的灵敏度约为  $110 \text{ mA/W}$ ,比 Han 等人制备的 CVD 金刚石探测器的灵敏度(约  $2.2 \text{ mA/W}$ ,工作电场强度约为  $40 \text{ kV/cm}$ )高了一个量级<sup>[10]</sup>. 我们的电极间距只有  $30 \text{ }\mu\text{m}$ ,而他们的电极间距是  $75 \text{ }\mu\text{m}$ ,电极间距减小有利于载流子的收集,从而会提高灵敏度. 我们的电极间距比他们探测器的电极间距小,这应当是我们的

CVD 金刚石辐射探测器的灵敏度比较高的原因之一。当然,由于金刚石的禁带宽度比 Si 大,金刚石灵敏度比现在通常使用的硅光电二极管的灵敏度(可以高达 270 mA/W)要小。

由表 1 可以看到,保持 X 射线源参数(15 kV, 10 mA)不变时探测器的工作电压由 50 V 提高到 100 V,其灵敏度也由 101 mA/W 上升到 125 mA/W。Han<sup>[10]</sup>等人也指出共面型电极 CVD 金刚石探测器在高工作电场下探测器有较高的灵敏度,但是工作电压升高到一定值后(约 40 kV/cm)灵敏度会接近某一极限值,即会出现“饱和”值。灵敏度随工作电压增加而提高主要是因为高的工作电压有利于提高金刚石中载流子的迁移速度,从而会提高载流子的收集效率,灵敏度出现“饱和”现象则是因为载流子的迁移速度达到了饱和值。

#### 4.4. 辐射剂量率线性

由表 1 还可以看到,X 射线源的电压为 15 kV 电流为 10 mA 时探测器的净输出信号为  $0.31 \times 10^{-9}$  A,保持 X 射线源的电压不变电流增加到 20 mA 时,即 X 射线的能量不变、光通量增加一倍,探测器的净输出信号为  $0.59 \times 10^{-9}$  A,信号幅度也增

加了一倍,说明探测器的有很好的辐射剂量率线性,表明 CVD 金刚石探测器可以用于 X 射线的通量测量和医疗领域的 X 射线辐射剂量测量。

## 5. 结 论

我们用自支撑的 CVD 金刚石膜研制了辐射探测器。将 CVD 金刚石进行了双面抛光,加工成尺寸为 5 mm × 5 mm × 0.5 mm 的探测器的基材,探测器电极采用的是“叉指”状共面型电极结构,探测器的有效探测区面积为 3 mm × 3 mm,探测器的信号输出接口是 L16 电缆头。

进行了金刚石探测器的性能测试。探测器的暗电流与工作电压呈线性变化的关系,表明电极金属与金刚石基底之间是欧姆接触。工作电场场强为 30 kV/cm 时,探测器的暗电流约为 0.1 nA,与天然 IIa 型金刚石探测器的暗电流相当。利用飞秒染料激光器进行了探测器的时间特性的测量,探测器信号的上升时间为 590 ps。CVD 金刚石探测器在 ~33 kV/cm 工作场强(即工作电压为 100 V)时灵敏度约为 110 mA/W。探测器有很好的辐射剂量率线性,可以用于 X 射线的通量测量和医疗领域的 X 射线辐射剂量测量。

[1] Bergonzo P, Brambilla A, Tromson D, Mer C, Guizard B, Foulon F 2000 *Appl. Surf. Sci.* **154/155** 179

[2] Pu R A, Fan R Y, Jin Y J, Liu L Y, Lü F X, Ou-Yang X P, Pan H B, Wang L, Zhang ZH B 2008 *Chin. Phys. B* **17** 3644

[3] Liu J M, Shi W M, Su Q F, Wang L J, Xia Y B 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 2518 (in Chinese) [刘健敏、史伟民、苏青峰、王林军、夏义本 2006 物理学报 **55** 2518]

[4] Chen G CH, Fan R Y, Lü F X, Ou-Yang X P, Tang W ZH, Wang L, Wang W, Zhang ZH B 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 2170 (in Chinese) [陈广超、范如玉、吕反修、欧阳晓平、唐伟忠、王 兰、王 伟、张忠兵 2006 物理学报 **55** 2170]

[5] Ma H L, Liu Zh L 1994 *J. of Atomic and Molecular Physics* **11** 387 (in Chinese) [马洪良、刘忠礼 1994 原子与分子物理学报 **11** 387]

[6] Shockley W 1961 *Solid-state electron* **2** 35

[7] The RD42 Collaboration, Friedl M, Adam W, Bauer C,

Berdermann E, Bergonzo P, Bogani F, Borchi E, Brambilla A 1999 *Nucl. Instrum. Meth. in Phys. Res. A* **435** 194

[8] Chen Zh M, Wang J N 1999 *Basic Material Physics of Semiconductor devices* (Beijing: Science Press) p249 (in Chinese) [陈治明、王建农 1999 半导体器件的材料物理学基础(北京:科学出版社)第 249 页]

[9] Faggio G, Marinelli M, Messina G, Milani E, Paoletti A, Santangelo S, Rinati G V 1999 *Microsystem Technologies* **6** 23

[10] Han S, Wagner R S, Gullikson E 1996 *Nucl. Instrum. Meth. in Phys. Res. A* **380** 205

[11] Wang H B, Ma H L, Chen ZH L, Liu ZH L, Zheng ZH J, Tang D Y, Tian Z Z, Liu R H, Chen CH, Li J, Zhang J X 1995 *Nuclear Electronics & Detection Technology* **15** 343 (in Chinese) [王红斌、马洪良、陈正林、刘忠礼、郑志坚、唐道源、田宗载、刘仁和、陈 川、李 君、张俊贤 1995 核电子学与探测技术 **15** 343]

# Fabrication and performance of CVD diamond radiation detector<sup>\*</sup>

Zhou Hai-Yang<sup>†</sup> Zhu Xiao-Dong Zhan Ru-Juan

(CAS Key Laboratory of Basic Plasma Physics, Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

(Received 5 June 2009; revised manuscript received 28 June 2009)

## Abstract

Radiation detector of high performance was fabricated using free-standing thick CVD diamond films. The CVD diamond detector has “cross-finger” coplanar electrodes. The electrical contact between electrodes and diamond films is ohmic. The effective area is  $3 \times 3 \text{ mm}^2$ . When working under electric field strength of  $30 \text{ kV/cm}$ , the dark current of the detector is only about  $0.1 \text{ nA}$ , the rise time of the signal is about  $590 \text{ ps}$ , its sensitivity is about  $110 \text{ mA/W}$ . Besides, the detector has fairly good linearity on dose rate.

**Keywords:** CVD diamond, radiation detector

**PACC:** 0670D, 2940

---

<sup>\*</sup> Project supported by the State Key Program for Basic Research of China (Grant No. 2008CB717800), the National High Technology Research and Development Program for Inertial Confinement Fusion of China (Grant No. 2003AA84TS18).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: hyzhou@ustc.edu.cn