

CVD 金刚石薄膜探测器性能研究*

王兰^{1;1)} 欧阳晓平² 范如玉² 金永杰¹ 张忠兵² 潘洪波²
刘林月² 吕反修³ 卜忍安⁴ 刘德敏²

1 (清华大学工程物理系 北京 100084)

2 (西北核技术研究所 西安 710613)

3 (北京科技大学材料学院 北京 100083)

4 (西安交通大学 西安 710049)

摘要 通过实验测量和理论分析,从载流子动力学角度研究了用于脉冲辐射探测的CVD金刚石薄膜探测器的适用结构、电荷收集效率和时间响应性能.结果表明,CVD金刚石薄膜可以制成均匀型结构的探测器;薄膜中的缺陷会降低探测器的电荷收集效率,探测器的电荷收集效率随场强增大而增大直至饱和.已研制的CVD金刚石探测器电荷收集时间可达719ps,在2.5V/ μm 场强下达到饱和,电荷收集效率达60.5%;晶格散射是影响探测器时间响应的主要因素,选用大晶粒甚至单晶金刚石薄膜可以提高探测器时间响应.

关键词 CVD 金刚石 探测器 电荷收集效率 灵敏度 时间响应

1 引言

金刚石材料具有禁带宽度宽、载流子迁移率高、击穿场强高的性质,因而用金刚石制作的辐射探测器具有噪声低、时间响应快、耐辐照、线性电流大等优点,可以成为电流型脉冲辐射探测较理想的器件^[1, 2]. 20世纪90年代以来,随着CVD (Chemical Vapor Deposition) 技术的成熟,基于CVD金刚石材料的半导体探测器制作和应用发展迅速^[3, 4], CERN成立了专门的RD42小组对该类探测器进行研制.尽管CVD金刚石探测器的制作和应用技术发展很快,但至今尚未形成成熟的商用产品,这主要是因为其性能与薄膜质量、器件制作技术密切相关.电流型CVD金刚石探测器的研制和应用,迫切需要对其性能进行研究、获得对探测器级CVD金刚石薄膜沉积、器件制作的反馈信息.

由于CVD金刚石属于人造多晶晶体,其晶格的完整性和纯度受到加工工艺等因素的限制,杂质、晶格的不完整性以及晶界是金刚石缺陷的主要来源^[5, 6].

这些缺陷在金刚石的禁带中产生中间能级,形成陷阱.由辐射激发出的电子-空穴对在向两极板漂移的过程中,遇到陷阱,就会以一定的概率被俘获.因此,射线与CVD金刚石作用激发出的电子空穴对并没有被全部收集,将探测器的电荷收集效率(η , charge collection efficiency)定义为在两极板感应得到电荷数 Q_{ind} 与辐射在半导体中激发出的电子空穴对数 Q_{ion} 之比($\eta = Q_{\text{ind}}/Q_{\text{ion}}$),是衡量CVD金刚石探测器性能的重要指标.

当CVD金刚石探测器用于脉冲辐射探测领域时,探测器的时间响应越快,越能够充分的反映出脉冲辐射源的信息.由于金刚石中载流子迁移率快,电子与空穴的迁移率差距小^[7],使得金刚石探测器的时间响应与Si-PIN探测器相比快得多.缺陷的存在会影响探测器的时间响应性能的优劣.

暗电流、电荷收集效率、时间响应等是衡量探测器性能优劣的重要指标.我们已经研制出了适用于脉冲辐射探测领域的CVD金刚石探测器^[8].本文通过实验测量和理论分析,对该类探测器的性能进行了研究.

2006-12-31 收稿, 2007-03-27 收修改稿

* 国家自然科学基金(10675074)资助

1) E-mail: wanglan_99@hotmail.com

2 探测器制作

用于实验的CVD金刚石探测器结构如图1所示,无PN结的均匀型金刚石薄膜的尺寸为 $\phi 50\text{mm} \times 135\mu\text{m}$,在CVD金刚石薄膜的两面蒸镀20nm厚的金层与周围的铜电极共同作为信号的引出电极,外壳用聚四氟乙烯封装.探测器实物照片见图2.

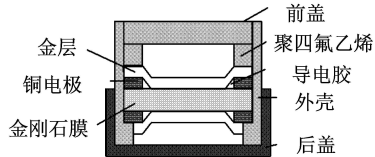


图 1 CVD 金刚石探测器封装结构示意图

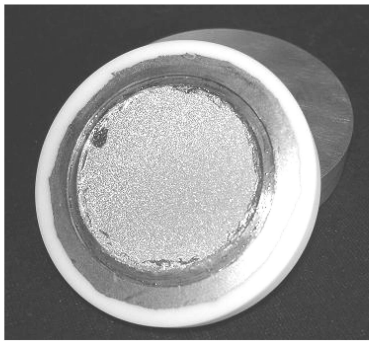


图 2 CVD 金刚石探测器实物照片

3 实验

实验装置示意图如图3所示,高压源为探测器提供 $5\text{V}/\mu\text{m}$ 以内电场,分别用小电流计和示波器记录探测器的电信号.

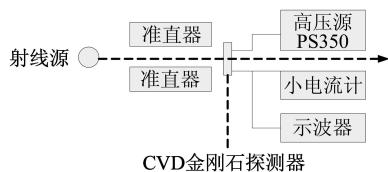


图 3 实验装置示意图

完成了以下三方面的实验工作:

a) 在射线源关闭且避光的条件下,完成了探测器暗电流的测量.

b) 在能量为 1.25MeV 的 ^{60}Co 稳态辐射源照射下完成了信号电荷收集效率的测量.

探测器灵敏度(S)定义为平均每个入射粒子在探测器外电路引起的电荷量.用剂量仪记录探测器所在位置的射线剂量并转换成单位时间内射线入射到探测

器灵敏面上的粒子数(Φ),用小电流计测得探测器外电路产生的电流(I),即单位时间内射线在探测器外电路引起的电荷量,可以得到探测器的灵敏度 $S=I/\Phi$.同时,利用MCNP蒙特卡洛模拟软件计算得到了在不存在缺陷的情况下探测器对 1.25MeV γ 射线的响应 S_{100} ,由电荷收集效率的定义可以得到 $\eta=S/S_{100}$.

c) 利用时间为飞秒级的脉冲紫外激光器完成了对探测器时间响应性能的测试.

入射激光由飞秒时间快门控制,可以产生半高宽为飞秒量级的脉冲紫外激光,作为 δ 射线源入射到探测器灵敏面.经过探测器响应后,波形被展宽,在外电路信号波形的上升时间和半高宽反映了探测器的时间响应性能.

4 实验结果

4.1 探测器暗电流

我们研制的金刚石探测器暗电流测量结果关系曲线如图4所示,可以看出,偏压在 600V 以内,暗电流在 nA 量级,其暗电流-电压线性关系良好,说明电极与金刚石薄膜之间形成了良好的欧姆接触.

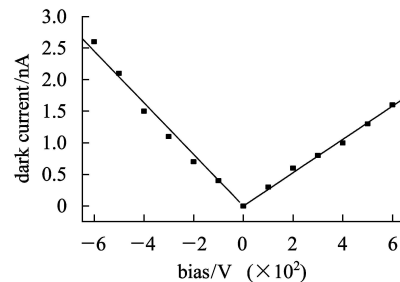


图 4 CVD 金刚石探测器暗电流-电压曲线

4.2 探测器电荷收集效率

探测器电荷收集效率测试结果如图5所示.我们研制的CVD金刚石探测器的电荷收集效率随偏压增大而增大,并在 $2.5\text{V}/\mu\text{m}$ 电场下达到饱和值 60.5% .

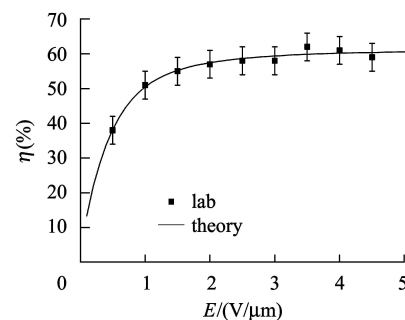


图 5 电荷收集效率与电场强度关系曲线(点标记为实验结果,实线为理论计算结果)

在饱和区, 电荷收集效率与平均值的最大偏差小于 5%. 测试结果表明, 该探测器电荷收集效率高, 且性能稳定. 电荷收集效率的饱和现象的原因将在本文第 5 节中分析.

4.3 探测器时间响应

CVD 金刚石探测器对 δ 辐射源的时间响应波形如图 6 所示, 按照高斯分布扣除记录系统带宽后得到探测器上升时间为 2.0ns, 半高宽为 21.0ns.

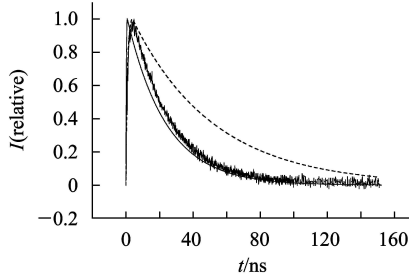


图 6 金刚石探测器实验响应曲线 (探测器规格: $\phi 50\text{mm} \times 135\mu\text{m}$, 光滑实线为不考虑缺陷影响时理论计算结果, 有毛刺的实线为实测结果, 虚线为 Si-PIN 探测器不考虑缺陷影响时理论计算结果)

5 分析

5.1 探测器暗电流分析

探测器封装工艺理想的条件下, 暗电流主要由半导体的本征载流子浓度决定. 由玻尔兹曼分布函数可知^[9], 半导体禁带宽度越大, 本征载流子浓度越低, 本征半导体电阻率越高. 由于金刚石材料的禁带宽度可达 5.5eV, 在 550K 温度以下, 纯净金刚石的本征电阻率均高于 $10^{13}\Omega\cdot\text{cm}$. 因此, 金刚石不需要制作 PN 结, 就可以满足探测器对暗电流的工作要求. 由于使用了本征 CVD 金刚石材料, 且形成了良好的欧姆接触, 可以由欧姆定律 ($R = U/I$), 结合曲线直线拟合结果计算得到该探测器本征电阻达 $10^{14}\Omega\cdot\text{cm}$.

5.2 探测器电荷收集效率分析

用电荷收集距离^[5, 10, 11] σ 和载流子寿命 τ 来表示电子和空穴被俘获前所能漂移的平均距离:

$$\sigma = (v_e + v_h)\tau = (\mu_e + \mu_h)E\tau,$$

其中, μ 为载流子的迁移率; v 是载流子漂移速度; E 为外加电场强度; τ 是决定于材料缺陷的常量. 考虑到电子-空穴对产生位置的影响, Hecht 等人推导出了源粒子穿透深度为 G 时, 均匀电离且缺陷分布均匀条件下

的电荷收集效率与电荷收集距离的关系^[12]:

$$\eta = \frac{Q_{\text{ind}}}{Q_{\text{ion}}} = \frac{\sigma}{L} \left[1 - \frac{\sigma}{4G} (1 - e^{-2G/\sigma})(1 + e^{2(G-L)/\sigma}) \right].$$

其中, L 为探测器两对面电极的距离. 随着电荷收集距离的增大, 电荷收集效率随之增大, 当 $\sigma \ll L$ 时为线性增长关系, 当 σ 逐渐增大, 受金刚石膜厚和俘获概率的影响, 电荷收集效率逐渐偏离线性而趋于饱和.

另一方面, 随着电场的增强, 晶格获得的能量更多地转移给光学声子, 载流子漂移速度 v 也趋向饱和, 可以由玻尔兹曼关系计算得到^[13], 金刚石中载流子漂移速度在电场强度为 $1\text{V}/\mu\text{m}$ 时开始偏离线性, 逐渐趋于饱和, 电子和空穴的饱和漂移速度分别为 $2.2 \times 10^7\text{cm/s}$ 和 $1.5 \times 10^7\text{cm/s}$, 这意味着电荷收集距离随着电场强度的增加而增加, 在电场强度达到 $1\text{V}/\mu\text{m}$ 时开始偏离线性, 逐渐趋于饱和.

在电荷收集效率随电荷收集距离增加而饱和与电荷收集距离随电场强度增加而饱和这两个因素的共同作用下, 从理论上讲, 探测器的电荷收集效率应随外加电场的增加而增加, 并在一定电场下达到饱和. 实验结果与理论分析相吻合, 计算得到, 载流子寿命为 719ps.

5.3 探测器时间响应性能分析

狄钦松于 1965 年推导出了无缺陷情况下半导体探测器时间响应的计算方法^[14], 该方法同样适用于均匀型半导体探测器. 探测器的时间响应速度主要受晶体中载流子的漂移距离和漂移速度决定. 由于金刚石中载流子迁移率快, 电子与空穴的迁移率差距小, 使得金刚石探测器的时间响应与常用的同尺寸的 Si-PIN 半导体探测器相比, 时间响应快得多. 用此方法计算得到的金刚石探测器的时间响应如图 6 所示. 缺陷同样也会对探测器时间响应性能产生影响. 一方面, 缺陷使被俘获的载流子不必跑完整个薄膜厚度就停止了对外电路的信号贡献过程从而加快了探测器的时间响应, 另一方面, 由缺陷引起的晶格散射降低了电子、空穴的漂移速度, 从而减慢探测器的响应速度.

从探测器的时间响应测量结果与无俘获条件下的理论计算结果对比可以看出, 综合俘获和晶格散射两种因素的作用后, 缺陷降低了探测器的时间响应性能, 由于探测器制作采用的金刚石薄膜晶粒较大, 杂质少, 缺陷少, 探测器的时间响应与不考虑缺陷影响的理论计算结果相比展宽较小, 比 Si-PIN 探测器仍然有较大提高.

6 结论

由以上实验结果及其分析中可以看出, CVD 金刚石薄膜的本征电阻率可高达 $10^{14}\Omega\cdot\text{cm}$, 仅通过简单的均匀型 MSM 结构, 就可以制作得到具有 nA 量级暗电流的探测器; 薄膜中的缺陷会降低探测器的电荷收集效率, 电荷收集效率随着电场的增大而增大, 当电场强到一定程度后达到饱和, 已经研制的 CVD 金刚石

探测器电荷收集时间可达 719ps, 在 $2.5\text{V}/\mu\text{m}$ 场强下达到饱和状态, 电荷收集效率达 60.5%; 选用缺陷少的金刚石薄膜可以提高探测器电荷收集效率, 从式(8)中可以看出, 在对重带电粒子的测量中, 在满足带电粒子全沉积的厚度条件下, 通过减少薄膜厚度可以提高电荷收集效率, 从而提高探测器对带电粒子的灵敏度; 晶格散射是影响探测器时间响应的主要因素, 选用大晶粒甚至单晶金刚石薄膜可以提高探测器时间响应。

参考文献(References)

- Bergonzo P, Brambilla A, Tromson D et al. NIM, 2002, **A476**: 694—700
- Mainwood A. Diamond and Related Materials, 1998, **7**: 504—509
- Mainwood A. Semicond. Sci. Technol., 2000, **15**: 55—63
- Kagan H. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2005, **A541**: 221—227
- Marinelli M, Milani E, Paoletti A et al. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2002, **A476**: 701—705
- Balducci A, Marinelli M, Milani E et al. App. Phys. Lett., 2005, **86**: 022108
- ZHANG Ming-Long, GU Bei-Bei, WANG Lin-Jun et al. Physics Letters, 2004, **A332**: 320—325
- OUYANG Xiao-Ping, WANG Lan, FAN Ru-Yu et al. Chinese Physics, 2005, **55**(5): 2170—2174 (in Chinese)
- (欧阳晓平, 王兰, 范如玉等. 物理学报, 2005, **55**(5): 2170—2174)
- LIU En-Ke, ZHU Bing-Sheng, LUO Jin-Sheng et al. Semiconductor Physics, Beijing: Publishing House of Electronic Industry, 2005. 75 (in Chinese)
(刘恩科, 朱秉升, 罗晋生等. 半导体物理. 北京: 电子工业出版社, 2005. 75)
- Marinelli M, Milani E, Paoletti A et al. App. Phys. Lett., 1999, **75**: 3216—3218
- Foulon F, Pochet T, Gheeraert E et al. IEEE Trans. Nucl. Sci., 1994, **41**(4): 927
- Hecht K. Z. Phys., 1932, **77**: 235
- Pan L S, Kania D R. Diamond: Electronic Properties and Applications. London, Kluwer: Academic Publishers, 1993. 241—251
- Dikinson W C, Lauzon A F, Neifert R D et al. Lawrence Radiation Laboratory, Livermore, Int. Rept. UOPB 63—113, 1963

Properties of CVD Diamond Film Detector^{*}

WANG Lan^{1;1)} OUYANG Xiao-Ping² FAN Ru-Yu² JIN Yong-Jie¹ ZHANG Zhong-Bing²

PAN Hong-Bo² LIU Lin-Yue² LÜ Fan-Xiu³ BU Ren-An⁴ LIU De-Min²

1 (Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

2 (Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710613, China)

3 (Materials College, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

4 (Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract The dark current, charge collection efficiency and time response properties of CVD diamond film detectors are studied based on experiments and their theoretic analysis. The results shows: No PN or PIN junctions are needed when preparing diamond detectors; charge collection efficiency of the detector will be reduced by defects in film, and it increases and reaches saturation along with the increasing electric field between the two electrodes. The charge collection time of our diamond film detector is about 719ps, and the charge collection efficiency can reach the saturation value of 60.5% under the electric field of $2.5\text{V}/\mu\text{m}$. Scattering of the lattice may slow the detector response, so it's necessary to improve CVD technology and choose diamond film with big grain size.

Key words CVD diamond, detector, charge collection efficiency, sensitivity, time response

Received 31 December 2006, Revised 27 March 2007

* Supported by NSFC (10675074)

1) E-mail: wanglan_99@hotmail.com